



КОМПЛЕКСНЫЙ ПОКАЗАТЕЛЬ ТАКТИКО-ТЕХНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕСПИЛОТНЫХ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Б. С. Абезгауз¹, М.Б. Алесов²

¹АО «КТ-Беспилотные системы»

²АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро»

В статье рассмотрена задача формирования комплексного показателя тактико-технических характеристик (ТТХ) беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Для расчёта комплексного показателя использована теория средних взвешенных величин. Определение весовых коэффициентов выполнено методом статистической обработки проектов. Представлена методика комплексной оценки и даны примеры расчёта комплексного показателя ТТХ БПЛА. Продемонстрирован способ группирования различных моделей и кластеризации методов расчёта взвешенных средних на основе анализа упорядоченных рядов.

Ключевые слова: комплексный показатель качества; нормирование единичных показателей; средние взвешенные величины; показатели весомости.

Для цитирования:

Абезгауз Б. С., Алесов М. Б. Комплексный показатель тактико-технических характеристик беспилотных летательных аппаратов // Системный анализ и логистика: журнал.: выпуск №4(34), ISSN 2007-5687. – СПб.: ГУАП., 2022 – с.16-27. РИНЦ. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-16-27.

INTEGRATED INDICATOR OF TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES

B. S. Abezgauz¹, M.B. Alesov²

¹«KT-Unmanned Systems» Corp

²«Ramenskoye Instrument-Building Design Bureau» Corp

The problem of forming an integrated indicator of tactical and technical characteristics of an unmanned aerial vehicle (UAV) is considered. The theory of weighting means is used to calculate an integrated indicator. Weighting factors are determined by statistical processing of projects. The method of integrated estimation is presented and examples of calculating the integrated indicator of UAV performance characteristics are given. The grouping of models and the clustering of weighting means on base of the ordered rows are illustrated.

Keywords: integrated quality indicator; normalization of individual indicators; weighting mean values; weighting factors.

For citation:

Abezgauz B. S., Alesov M. B. Integrated indicator of tactical and technical characteristics of unmanned aerial vehicles // System analysis and logistics.: №4(34), ISSN 2007–5687. – Russia, Saint-Petersburg.: SUAI., 2022 –p. 16-27. DOI: 10.31799/2077-5687-2022-4-16-27.

Введение

Основными показателями функционального применения беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) являются тактико-технические характеристики (показатели назначения), включающие такие параметры как: максимальная скорость полёта, максимальная высота полёта, максимальная продолжительность полёта, радиус действия, удельная грузоподъёмность и др. В настоящее время спроектировано и построено достаточно много моделей БПЛА, широко используемых в различных отраслях промышленности в нашей стране и за рубежом.

При оценке имеющихся моделей и формировании требований для вновь разрабатываемых конструкций возникает задача оценки функционального качества модели на базе комплексного показателя. Данная статья посвящена изложению методики комплексной оценки ТТХ БПЛА на основе статистических данных об имеющихся моделях в рамках выбранного класса БПЛА (документальный подход).

Основные принципы оценки качества технических систем рассмотрены в рамках работ по квалиметрии Г.Г. Азгальдовым и др. [1-3], А.И. Субетто и Ю.М. Андриановым [4, 5], В. К.



Федюкиным [6]. Дальнейшее развитие методов агрегирования многомерных данных и разработки функций комплексного показателя качества нашли своё отражение в работах Т.М. Леденевой и С.Л. Подвального [7]. Кроме стандартных подходов к выбору весовых коэффициентов (экспертный метод, способ регрессионных зависимостей и др.) Н.В. Хованским предложен метод рандомизированных сводных показателей [8, 9]. К настоящему времени достаточно полно исследованы алгебраические функции формирования комплексных показателей на основе так называемых взвешенных средних в трудах отечественных (А.И. Орлов [10], В.В. Подиновский и А.П. Нелюбин [11]) и зарубежных специалистов (К. Джини [12], М. Најџа [13], Р. Месиар и Ј. Спиркова [14]). Все указанные теоретические разработки могут быть применены для решения технически важной и актуальной задачи – оценки качества моделей БПЛА по основным показателям назначения.

Задача формирования показателя качества заключается в следующем. По имеющемуся набору частных числовых показателей, отражающих выбранные ТТХ БПЛА,

$$P_1, P_2, \dots, P_n$$

сформировать комплексный показатель качества $Q \in I = [0, 1]$

$$Q = \Phi(P_1, \dots, P_n),$$

обеспечивающий возможность оценки конкретной модели БПЛА по сравнению с другими моделями аппаратов данного класса. Здесь n – число частных показателей;

$\Phi(\cdot): \prod_{i=1}^n \Omega_i \rightarrow I$ – функция агрегирования; $\Omega_i \subset \mathbf{R}$ – область изменения абсолютного

показателя P_i во множестве вещественных чисел; $\prod_{i=1}^n (\cdot)$ – прямое (декартово) произведение подмножеств.

Рекомендуемая последовательность формирования комплексного критерия включает три этапа: приведение абсолютных частных показателей к выбранной единой шкале измерения, определение вида функции расчёта комплексных показателей, определение коэффициентов весомости (важности) каждого частного показателя в общей сумме взвешенного среднего значения. Именно в такой последовательности и будет выполнено изложение материала.

1. Нормирование частных абсолютных показателей

Для обеспечения сопоставимости исходных характеристик (приведения числовых значений к одинаковому масштабу) выполняется преобразование абсолютных показателей P_i в относительные показатели K_i с помощью функции нормирования $N_i(\cdot): \Omega_i \rightarrow I = [0, 1]$.

Рекомендуется использовать монотонные функции преобразования с граничными условиями

$$\text{sign}\left(\frac{dN_i(P)}{dP}\right) = 1 \text{ при } P_i \in \Omega_i = [P_i^{\text{БП}}, P_i^{\text{ЭТ}}], \quad N_i(P_i^{\text{БП}}) = 0, \quad N_i(P_i^{\text{ЭТ}}) = 1. \quad (1)$$

Здесь $P_i^{\text{ЭТ}}$ – эталонное значение, являющееся наилучшим достигнутым значением абсолютного показателя P_i на период оценивания качества; $P_i^{\text{ДОП}}$ – допустимое значение, являющееся наихудшим, но все-таки приемлемым для использования; $P_i^{\text{БП}}$ – браковочное значение, отличающееся на величину абсолютной погрешности измерения ΔP_i :

$$P_i^{\text{БП}} = P_i^{\text{ДОП}} - \Delta P_i. \quad (2)$$



При этом для определённости предполагается, что качество абсолютного показателя улучшается с увеличением его значения. При необходимости это всегда можно обеспечить с помощью операций инвертирования знака и сдвига.

Для оценки эталонного и допустимого значений показателя, отражающих текущий уровень качества, кроме экспертного метода, рекомендуется применять документальный метод расчёта по имеющимся проектам:

$$P_i^{\text{ЭТ}} = \max_j P_{ij}, \quad P_i^{\text{ДОП}} = \min_j P_{ij}, \quad (3)$$

где P_{ij} – значения абсолютного показателя с номером i в проекте с номером j .

При формировании прогнозных показателей в качестве $P_i^{\text{ЭТ}}$ можно использовать экстраполированное значение, отражающее перспективный уровень развития на заданный момент времени.

При двух заданных краевых условиях (1) могут быть определены параметры a , b двухпараметрической функции преобразования. В таблице 1 представлены выражения типовых функций нормирования $N_i(\cdot)$. Наиболее часто используется уравнение прямой линии, в нелинейном случае применяют также логарифмическую (закон Вебера-Фехнера) и степенную (закон Стивенса) функции [2].

Таблица 1 – Функции нормирования абсолютных числовых показателей

Наименование	Математическое выражение
Линейная функция	$N(P) = aP + b = \frac{P - P^{\text{БП}}}{P^{\text{ЭТ}} - P^{\text{БП}}}$
Логарифмическая функция ($P^{\text{БП}} > 0$)	$N(P) = a \ln P + b = \frac{\ln P - \ln P^{\text{БП}}}{\ln P^{\text{ЭТ}} - \ln P^{\text{БП}}}$
Степенная функция ($0 < \alpha < 1$)	$N(P) = aP^\alpha + b = \frac{P^\alpha - (P^{\text{БП}})^\alpha}{(P^{\text{ЭТ}})^\alpha - (P^{\text{БП}})^\alpha}$

2. Функция агрегирования частных показателей

В общем виде выражение комплексного показателя качества Q записывается как

$$Q = F(K_1, \dots, K_n), \quad (4)$$

где K_1, \dots, K_n – единичные (частные) относительные показатели качества; $F(\cdot) : I^n \rightarrow I$ – функция агрегирования.

Функция $F(\cdot)$ должна обладать свойствами: монотонности по аргументам, непрерывности, симметричности, коммутативности, однородности [7]. Достаточно общей формой функции комплексного показателя является двухпараметрическое семейство средних взвешенных Джини (Gini C.) [13]

$$G_{r,s}(K_1, \dots, K_n) = \left(\frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i^r}{\sum_{i=1}^n g_i K_i^s} \right)^{\frac{1}{r-s}}, \quad (5)$$

где g_1, \dots, g_n – коэффициенты весомости, характеризующие степень важности



(значимости) частных показателей K_1, \dots, K_n соответственно; r, s – параметры семейства средних ($r \neq s$).

В частном случае при $s = r - 1$ средние $G_{r,r-1}()$ носят название средних взвешенных Лемера (Lehmer D.)

$$G_{r,r-1}(K_1, \dots, K_n) = L_r(K_1, \dots, K_n) = \frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i^r}{\sum_{i=1}^n g_i K_i^{r-1}}, \quad (6)$$

В частности, для $r = 2$ имеем формулу контргармонического взвешенного среднего, используемого при обработке изображений для удаления одиночных импульсов,

$$G_{2,1}(K_1, \dots, K_n) = L_2(K_1, \dots, K_n) = \frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i^2}{\sum_{i=1}^n g_i K_i}, \quad (7)$$

При $s = 0$ средние Джини $G_{r,0}()$ являются степенными взвешенными средними

$$G_{r,0}(K_1, \dots, K_n) = H_r(K_1, \dots, K_n) = \sqrt[r]{\frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i^r}{\sum_{i=1}^n g_i}}, \quad (8)$$

Наиболее распространённые выражения для степенных взвешенных средних при $r = -1, 0, 1, 2$ представлены в таблице 2.

Часто используются нормированные коэффициенты весомости

$$\sum_{i=1}^n g_i = 1$$

и указанные ранее формулы расчёта средних упрощаются. Кроме того, при расчёте среднего гармонического и геометрического рекомендуется выполнить предварительный сдвиг исходных параметров на множество $I_1 = [1, 2]$ с последующим восстановлением.

Таблица 2 – Функции степенных взвешенных средних [3]

Наименование	Математическое выражение
Среднее гармоническое взвешенное	$H_{-1} = \frac{\sum_{i=1}^n g_i}{\sum_{i=1}^n \frac{g_i}{K_i}}$
Среднее геометрическое взвешенное	$H_0 = \left(\prod_i K_i^{g_i} \right)^{\frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i}} = \exp \left(\frac{1}{\sum_{i=1}^n g_i} \sum_{i=1}^n g_i \ln K_i \right)$



Наименование	Математическое выражение
Среднее арифметическое взвешенное	$H_1 = \frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i}{\sum_{i=1}^n g_i}$
Среднее квадратическое взвешенное	$H_2 = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n g_i K_i^2}{\sum_{i=1}^n g_i}}$

Простейшие выражения арифметического H_1 и квадратического средних H_2 обычно используют при независимых единичных показателях. Если частные показатели статистически взаимосвязаны, а для ТТХ БПЛА это является разумным допущением, то рекомендуется использовать функции гармонического H_{-1} , геометрического H_0 и контргармонического L_2 взвешенного среднего.

Дополнительно можно использовать следующее гибридное выражение для двух разнотипных показателей Q', Q'' с функциями агрегирования $F'()$, $F''()$:

$$Q = F(K_1, \dots, K_n) = \frac{Q' + \beta Q''}{1 + \beta} = \frac{F'(K_1, \dots, K_n) + \beta F''(K_1, \dots, K_n)}{1 + \beta}. \quad (9)$$

где $\beta > 0$ – коэффициент относительной значимости второго показателя по сравнению с первым.

3. Расчёт коэффициентов весомости

Кроме широко распространённого экспертного способа [1] для расчёта коэффициентов весомости g_1, \dots, g_n достаточно часто используется вероятностный способ, или метод статистической обработки проектов, основанный на предположении, что проектировщик (в широком смысле этого слова) будет стремиться приблизить к эталонному (наилучшему) значению те свойства, которые он считает наиболее важными [3]. В результате, степень приближения к эталону может рассматриваться как мера весомости (важности) соответствующего свойства.

В этом случае функцию расчёта весомости можно записать как меру приближения показателя K_i к эталонному значению $K_i^{\text{ЭТ}}$

$$g'_i = \rho(K_i, K_i^{\text{ЭТ}}), \quad (10)$$

Конкретизация весомости в простейшем случае при $K_i^{\text{ЭТ}} = K_i^{\text{max}}$ может быть представлена как

$$g'_i = \rho(K_i, K_i^{\text{max}}) = \frac{\bar{K}_i - K_i^{\text{min}}}{K_i^{\text{max}} - K_i^{\text{min}}}, \quad (11)$$

где \bar{K}_i , K_i^{min} , K_i^{max} – среднее, максимальное и минимальное значения частного показателя K_i по имеющимся проектам.

Значения характеристик рассчитываются по формулам:



$$\bar{K}_i = \frac{1}{p} \sum_{j=1}^p K_{ij}, \quad K_i^{\max} = \max_j K_{ij}, \quad K_i^{\min} = \min_j K_{ij}, \quad (12)$$

где K_{ij} – значение показателя K_i в проекте с номером j ; p – число проектов.

Расчёт весомостей может выполняться как по абсолютным показателям P_i , так и по относительным величинам K_i .

Очевидно, средние значения показателя по проектам \bar{K}_i могут быть рассчитаны по рассмотренным ранее формулам средних, а степень приближения к эталонному значению может быть определена по формулам таблицы 1. Например, с использованием степенной функции

$$g'_i = \rho(K_i, K_i^{\max}) = \frac{\bar{K}^\alpha - (K_i^{\min})^\alpha}{(K_i^{\max})^\alpha - (K_i^{\min})^\alpha}, \quad (13)$$

Кроме того, при достаточно большом числе проектов рекомендуется использовать цензурированную часть выборки [2]

$$\bar{K}_i = \frac{1}{p'} \sum_{j=1}^{p'} K'_{ij}, \quad K'_{ij} = H(K_{ij} - \hat{K}_i) K_{ij}, \quad (14)$$

где $H()$ – функция Хэвисайда, $H(U) = \begin{cases} 1, & U \geq 0 \\ 0, & U < 0 \end{cases}$; \hat{K}_i – заданное граничное значение

показателя снизу.

Нормализованный коэффициент весомости запишется как

$$g_i = \frac{g'_i}{\sum_{j=1}^n g'_j}. \quad (15)$$

Использование других методов (регрессионных зависимостей и эквивалентных соотношений) предполагает возможность измерения (оценки) комплексного показателя, что не всегда возможно и нами не применяется.

Допустимо также использовать смешанный способ, заключающийся в комбинировании весомостей, полученных с использованием разных принципов: экспертного или вероятностного. Например, общая весомость двух частных коэффициентов $g_i^{(1)}$, $g_i^{(2)}$ может быть представлена как

$$g_i = \frac{g_i^{(1)} + \beta g_i^{(2)}}{1 + \beta}. \quad (16)$$

где β – коэффициент относительной значимости второго метода по сравнению с первым.

4. Методика комплексной оценки и пример расчёта

При формировании комплексной оценки качества БПЛА предлагается использовать общий (последовательный) алгоритм, представленный в таблице 3. Там же указаны конкретные особенности, учитываемые при расчёте комплексного показателя ТТХ БПЛА далее.



Таблица 3 – Последовательность комплексной оценки ТТХ БПЛА

Наименование этапа	Особенности выполнения
1. Выбор показателей (свойств) БПЛА, используемых для комплексной оценки	1) Максимальная скорость полёта 2) Крейсерская скорость полёта 3) Взлётная масса 4) Максимальная высота полёта 5) Максимальная продолжительность полёта
2. Расчёт интервалов изменения значений абсолютных показателей $[P_i^{BP}, P_i^{ЭГ}]$	По формулам (3)
3. Зависимости между абсолютными и относительными показателями и шкала измерений	Линейная функция, таблица 1. Отрезок $I = [0, 1]$
4. Способ расчёта весомостей g_i	1) Формулы (11), (12), (15) 2) Формулы (12), (13), (15)
5. Определение математических выражений комплексной оценки Q и расчёт показателя	1) Среднее контргармоническое взвешенное L_2 , формула (7) 2) Среднее геометрическое взвешенное H_0 , таблица 2 3) Среднее гармоническое взвешенное H_{-1} , таблица 2 4) Среднее квадратическое взвешенное H_2 , таблица 2 5) Гибридное: среднее квадратическое и среднее геометрическое $H_2 + H_{-1}$, формула (9)
6. Анализ качества моделей с ранжированием групп	На базе упорядоченных рядов

Пример расчёта комплексных показателей

В качестве примера рассмотрим расчёт комплексной оценки ТТХ зарубежных БПЛА самолётного типа, относящихся по взлётной массе к классу «Средний» (диапазон массы от 150 до 1000 кг).

Ретроспективный ряд частных ТТХ БПЛА дан в таблице 4. Там же приведены граничные значения единичных показателей (две нижние строки таблицы).

При отсутствии одного из значений частного показателя его величина не используется ни в расчёте весомости, ни в расчёте комплексного показателя данной модели БПЛА.

Таблица 4 – Частные абсолютные показатели ТТХ БПЛА

№	Наименование модели БПЛА	Год начала эксплуатации	Взлётная масса, кг	Скорость (максимальная/крейсерская), км/ч	Максимальная высота, м	Автономность полёта, ч
1	IAI Scout	1979	159	176/102	4575	7
2	AAI RQ-2 Pioneer	1986	189	176/–	4572	5
3	GNAT-750	1990	510	193/175	7620	48
4	RQ-5 Hunter	1993	726	204/148	4575	12
5	I-GNAT	1993	700	296/175	9140	48
6	General Atomics ALTUS	1996	350	185/150	19800	24



№	Наименование модели БПЛА	Год начала эксплуатации	Взлётная масса, кг	Скорость (максимальная/крейсерская), км/ч	Максимальная высота, м	Автономность полёта, ч
7	Searcher II	1998	436	200/146	7010	18
8	IAI I-View MK150	2002	160	185/–	5200	7
9	Elbit Hermes-450	2004	450	176/130	6100	14
10	BAE Systems HERTI	2004	340	250/233	6100	20
11	Selex ES Falco	2007	750	216/–	6500	11
12	CH-3	2008	640	220/180	5000	12
13	Elbit Hermes-900	2009	1100	220/112	9100	36
14	Bayraktar TB2	2011	650	222/130	8200	27
15	Shahed 129A	2012	450	170/140	9000	24
16	Gem-7	2016	295	240/120	–	35
Характерные значения	P_i^{BP}		150	170/102	4572	5
	$P_i^{ЭТ}$		1100	296/233	19800 (9100)	48

Рассчитанные относительные параметры ТТХ представлены в таблице 5. Там же, в последних двух строках, приведены нормированные весомости показателей g_i , рассчитанные по формулам (11), (12), (13), (15) при $\alpha = 0,5$.

Наиболее весомым оказался показатель автономности полёта, при этом взлётная масса (косвенно учитывающая и величину грузоподъёмности в текущем периоде анализа), а также скорости полёта имеют примерно одинаковую весомость. Наиболее значимые параметры весомости выделены жирным шрифтом и подчёркиванием в нижних строках таблицы 5.

Вызывает удивление, что наименьшая весомость выявлена для показателя высоты полёта (значения выделены курсивом). Это связано с тем, что модель с условным номером 6 специально была разработана для высотных полётов и её присутствие в составе исходного ряда существенно уменьшило весомость показателя из-за значительно меньших высотных характеристик большинства других моделей. Если исключить эту модель из рассмотрения (использовать цензурированную выборку), то окажется, что наибольшей весомостью обладает именно высота полёта. Соответствующие показатели в этом случае даны в последних строках таблицы 5 в скобках.

Следует также отметить, что использование степенной функции расчёта весомости (13) не изменило положения соответствующих показателей в упорядоченном ряду весомостей: в частности, наиболее и наименее весомые показатели сохранили свои места.

Таблица 5 – Частные относительные параметры и весомости

№	Масса, кг	Скорость максимальная, км/ч	Скорость крейсерская, км/ч	Высота, м	Автономность, ч
1	0,010	0,048	0	0,000	0,046
2	0,041	0,048	–	0	0
3	0,379	0,182	0,557	0,200	1,000
4	0,606	0,270	0,351	0,000	0,163
5	0,579	1,000	0,557	0,300	1,000
6	0,210	0,119	0,366	1,000	0,442
7	0,301	0,238	0,336	0,160	0,302
8	0,010	0,119	–	0,041	0,046



№	Масса, кг	Скорость максимальная, км/ч	Скорость крейсерская, км/ч	Высота, м	Автономность, ч
9	0,316	0,048	0,214	0,100	0,209
10	0,200	0,635	1,000	0,100	0,349
11	0,632	0,365	–	0,127	0,140
12	0,516	0,397	0,595	0,028	0,163
13	1,000	0,397	0,076	0,297	0,721
14	0,526	0,413	0,214	0,238	0,512
15	0,316	0	0,290	0,291	0,442
16	0,154	0,556	0,137	–	0,698
Весомость g_i , формулы (11), (15)	0,222 (0,195)	0,188 (0,167)	0,226 (0,192)	0,120 (0,239)	0,243 (0,206)
Весомость g_i , формула (13), (15)	0,201 (0,188)	0,198 (0,186)	0,217 (0,198)	0,158 (0,222)	0,225 (0,206)

Значения комплексных показателей ТТХ, рассчитанные по разным формулам взвешенных средних, представлены в таблице 6. Аналогично принятому ранее соглашению жирным шрифтом и подчёркиванием выделены наилучшие значения показателей, а курсивом – наихудшие.

Во втором столбце таблицы 6 в скобках дополнительно указаны комплексные показатели при исключённой из рассмотрения высотной модели БПЛА с номером 6. Даже в этом случае указанные ранее лучшие модели имеют достаточно хорошие показатели качества.

Таблица 6 – Комплексные показатели моделей БПЛА

№	L_2	H_0	H_{-1}	H_2	$H_2 + H_{-1}$
1	0,043 (0,043)	0,022	0,022	0,001	0,012
2	0,044 (0,044)	0,023	0,023	0,001	0,012
3	0,663 (0,701)	0,482	0,455	0,356	0,434
4	0,427 (0,427)	0,291	0,277	0,130	0,217
5	0,782 (0,882)	0,703	0,683	0,587	0,655
6	0,685 (–)	0,358	0,340	0,210	0,295
7	0,280 (0,381)	0,279	0,278	0,082	0,181
8	0,078 (0,113)	0,052	0,051	0,004	0,029
9	0,225 (0,273)	0,187	0,183	0,045	0,118
10	0,681 (0,653)	0,453	0,422	0,341	0,414
11	0,444 (0,466)	0,318	0,302	0,156	0,248
12	0,473 (0,457)	0,351	0,335	0,175	0,271
13	0,708 (0,848)	0,488	0,450	0,390	0,458
14	0,423 (0,578)	0,383	0,383	0,174	0,285
15	0,345 (0,674)	0,259	0,259	0,099	0,188
16	0,546 (0,547)	0,342	0,341	0,211	0,299

На основании расчёта все модели упорядочены по возрастанию комплексного показателя. Соответствующие ряды в зависимости от используемой функции расчёта взвешенных средних показаны в таблице 7.



Из рассмотрения результатов расчёта видно, что всё множество моделей можно разбить на независимые подмножества минимальной мощности: $\{1\}$, $\{2\}$, $\{8\}$, $\{9\}$, $\{4, 7, 15\}$, $\{6, 11, 12, 14, 16\}$, $\{3, 10, 13\}$, $\{5\}$. Их можно объединить, не нарушая упорядоченности в четыре подгруппы мощностью не выше 5 (правый столбец таблицы 7): подмножество низшего ранга «1» образовано моделями с номерами $\{\{1\}, \{2\}, \{8\}, \{9\}\}$, среднего ранга «2» – $\{4, 7, 15\}$, высокого ранга «3» – $\{6, 11, 12, 14, 16\}$, наивысшего ранга «4» – $\{\{3, 10, 13\}, \{5\}\}$.

Таким образом, используя несколько методов расчёта комплексных показателей, можно ранжировать модели БПЛА по независимым группам, сформированным на основании множества соответствующих упорядоченных рядов. Это позволяет качественно оценить место каждой модели БПЛА в общем ранжированном ряду.

Таблица 7 – Упорядоченные ряды номеров моделей

По L_2	По H_0	По H_{-1}	По H_2	По $H_2 + H_{-1}$	Подмножество о моделей (ранг)
1	1	1	1	1	1
2	2	2	2	2	
8	8	8	8	8	
9	9	9	9	9	
7	15	15	7	7	2
15	7	4	15	15	
4	4	7	4	4	
14	11	11	11	11	3
11	12	12	14	12	
12	6	6	12	14	
16	16	16	6	6	
6	14	14	16	16	4
3	10	10	10	10	
10	3	13	3	3	
13	13	3	13	13	
5	5	5	5	5	
I	II	II	I	I	Кластер методов

С точки зрения зависимости состава упорядоченного ряда от используемой функции расчёта взвешенных средних можно выделить несколько кластеров (групп) самих методов.

В таблице 8 представлена матрица «близости» различных методов расчёта средних. В качестве меры «близости» двух методов m, m' выбрано число неподвижных точек в перестановках двух рядов, полученных этими методами,

$$a_{m,m'} = A(T^m, T^{m'}) = \sum_{k=1}^p \sigma(t_k^m = t_k^{m'}), \quad (17)$$

где T^m – вектор высотой p упорядоченного ряда, полученного методом m ; t_k^m – элемент с номером k вектора T^m ; $A(\cdot): \mathbf{N}^p \times \mathbf{N}^p \rightarrow \mathbf{N}$ – функция близости двух методов; \mathbf{N} – множество натуральных чисел; $\sigma(\cdot)$ – двузначная функция от логического выражения

$$\sigma(t_k^m = t_k^{m'}) = \begin{cases} 1, & \text{при } t_k^m = t_k^{m'}, \\ 0, & \text{при } t_k^m \neq t_k^{m'}. \end{cases}$$

Можно также использовать в качестве меры «близости» взвешенную сумму всех циклов двух перестановок с весами, обратными их длинам (длина цикла неподвижной точки равна 1).



Таблица 8 – Матрица «близости» функций расчета средних

	По L_2	По H_0	По H_{-1}	По H_2	По $H_2 + H_{-1}$
По L_2	16	8	6	10	9
По H_0	8	16	12	10	11
По H_{-1}	6	12	16	7	8
По H_2	10	10	7	16	14
По $H_2 + H_{-1}$	9	11	6	14	16

Для используемого множества методов расчёта можно применить агломеративный кластерный алгоритм с последовательным парным объединением элементов (кластеров), обладающих наибольшей «близостью». В качестве меры «близости» подмножеств M, M' используется принцип «дальнего соседа»:

$$a_{M, M'} = \min_{\substack{m \in M, \\ m' \in M'}} A(T^m, T^{m'}). \quad (18)$$

В результате можно выделить две группы методов (два кластера), как отмечено в нижней строке таблицы 7: группа методов I $\{L_2, H_2, H_2 + H_{-1}\}$ и группа методов II $\{H_0, H_{-1}\}$. Для оценки качества моделей БПЛА на этапе предварительного или разведочного анализа можно использовать по одному представителю из двух групп методов.

Заключение

В работе представлено теоретическое обоснование и математическое описание методики комплексной оценки ТТХ БПЛА. Выполненные расчёты демонстрируют возможность использования методики для оценки качества существующих и перспективных конструкций БПЛА.

Использование группирования моделей на основе многометодного подхода позволяет не только количественно, но качественно определить место БПЛА в соответствующей ранжированной группе. Кроме представленных пяти методов могут быть использованы другие способы расчёта взвешенных средних, как описано в обзорной работе М. Найжа [13], с выделением кластеров методов по соответствующим упорядоченным рядам.

Представленная методика позволяет выполнять комплексный анализ не только ТТХ, но и других параметров БПЛА, а также учитывать производственные и эксплуатационные расходы, формируя интегральный показатель качества изделия [15].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Азгальдов Г. Г. Квалиметрия для всех / Г. Г. Азгальдов, А. В. Костин, В. В. Садовов. – М.: ИД ИнформЗнание, 2012. – 165 с.
2. Азгальдов Г. Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) / Г. Г. Азгальдов. – М.: Экономика, 1982. – 256 с.
3. Азгальдов Г. Г. О квалиметрии / Г. Г. Азгальдов, Э. П. Райхман. – М.: Издательство стандартов, 1973. – 172 с.
4. Субетто А. И. Квалиметрия / А. И. Субетто. – СПб.: Астерон. – 2002. – 287 с.
5. Андрианов Ю. М. Квалиметрия в приборостроении и машиностроении / Ю. М. Андрианов, А. И. Субетто. – Л.: Машиностроение, 1990. – 221 с.
6. Федюкин В. К. Квалиметрия. Измерение качества промышленной продукции / В. К. Федюкин. – М.: КНОРУС, 2013. – 316 с.
7. Леденева Т. М. Агрегирование информации в оценочных системах / Т. М. Леденева, С. Л. Подвальный // Вестн. Воронеж. гос. ун-та. Сер.: Системный анализ и информационные технологии. – 2016. – № 4. – С. 155-164.



8. Хованов Н. В. Оценка сложных экономических объектов и процессов в условиях неопределенности. К 95-летию метода сводных показателей А. Н. Крылова / Н. В. Хованов // Вестник СПбГУ. – 2005. – Сер. 5. Вып. 1. – С. 138-144.
9. Хованов Н. В. Статья о построении рейтинга российских научных журналов как повод подумать об общих принципах применения метода сводных показателей / Н. В. Хованов // Управление большими системами. – 2009. – Вып. 27. – С. 75-80.
10. Орлов А. И. О средних величинах / А. И. Орлов // Управление большими системами. – 2013. – Вып. 46. – С. 88-117.
11. Подиновский В. В. Средние величины: Многокритериальный подход / В. В. Подиновский, А. П. Нелюбин // Мат. проблемы управления. – 2020. – № 5. – С. 2-15.
12. Джини К. Средние величины / К. Джини. – М.: Статистика, 1970. – 448 с.
13. Hajja M. Some elementary aspects of means / M. Hajja // Means and Their Inequalities. International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences. – Vol. 2013. – P. 1-9.
14. Mesiar R. Weighted means and weighting functions / R. Mesiar, J. Spirikova // Kybernetika. – 2006. – V. 42. – P. 151-160.
15. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Абезгауз Борис Самуилович –

ведущий инженер

АО «КТ-Беспилотные системы»

199178, Россия, Санкт-Петербург, Малый пр. ВО, д. 54, корп.5, лит. П

E-mail: Boris.Abezgauz@kronshtadt.ru

Алесов Михаил Борисович –

ведущий инженер, канд. техн. наук, доцент

АО «Раменское приборостроительное конструкторское бюро», филиал в СПб

195009, Россия, Санкт-Петербург, ул. Михайлова, д. 21

E-mail: mbalesov@spb.rpkb.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Abezgauz Boris Samuilovich –

lead engineer

KT-Unmanned Systems Corp

b. 5, 34, Malyi av., Saint-Petersburg, 199178, Russia

E-mail: Boris.Abezgauz@kronshtadt.ru

Alesov Mihail Borisovich –

lead engineer, PhD. Tech. Sciences, associate Professor

Ramenskoye Instrument-Building Design Bureau Corp

21, Mihailova str., Saint-Petersburg, 195009, Russia

E-mail: mbalesov@spb.rpkb.ru