ISSN 1561-8889. Космічна наука і технологія. 2005. Т 11. № 1/2. С. 3—9.

УДК 519.9:629.764

В. П. Гусынин[1], Ю. М. Гольдштейн[2], В. К. Дорошкевич[2], В. И. Кузнецов[2], Ю. П. Кучугурный[2]

[1]Національне космічне агентство України, Київ

[2]Інститут технічної механіки НАН України і НКА України, Дніпропетровськ

Многокритериальный сравнительный анализ объектов ракетно-космической техники

Надійшла до редакції 15.07.04

Проблема порівняльного аналізу об'єктів ракетно-космічної техніки сформульована в термінах однієї з фундаментальних задач системного аналізу — порівняння об'єктів по сукупності різнорідних критеріїв. Пропонується алгоритмізована методика порівняльної оцінки, яка базується на методі аналізу ієрархій. Наведено приклад — порівняння груп ракет-носіїв, отриманий з використанням розробленого програмного забезпечення.

Предметом нашей статьи является сравнение различных объектов ракетно-космической техники (РКТ) одинакового назначения — ракет-носителей (РН), космических ракетных комплексов (КРК), космических аппаратов (КА), платформ и так далее. Их разработка и эксплуатация требует выделения значительных ресурсов, поэтому сравнительный анализ объектов РКТ проводится практически на всех этапах их создания и эксплуатации: при выборе направлений модернизации и при проектировании — для определения технического уровня проектируемого объекта, при продвижении на рынок — для оценки конкурентоспособности и выборе рыночной стратегии. Несомненно, разработка эффективной методики такого анализа весьма актуальна. Сложность задачи заключается в том, что объекты РКТ необходимо сопоставлять по большому числу количественных и качественных (оцениваемых экспертно) критериальных признаков, и стандартной является ситуация, когда ни один из объектов не доминирует по всем показателям одновременно.

Уточним используемые определения. Критериальный признак — количественная или качественная характеристика, существенная для суждения об объекте. Показатель — количественное значение или качественная оценка оцениваемого объекта по определенному критериальному признаку. Можно сказать, что система критериальных признаков — это система координат в многомерном пространстве, в котором анализируются объекты, а набор показателей объекта — это точка или область, занимаемая объектом в пространстве критериальных признаков.

Такой подход к анализу объектов авиации и других транспортных систем впервые был предложен в 1930-е годы Р. Л. Бартини («параллелепипед Бартини»). В 1970—1980-е гг. Т. Л. Саати разработал и развил «иерархический аналитический процесс» (analytic hierarchy process) — мощный метод сопоставительного анализа и ранжирования объектов, характеризующихся наборами критериев и показателей, количественных и качественных. Этот метод называют также методом анализа иерархий (МАИ) [8, 10, 11].

Этот метод для успешного применения требует соблюдения следующих условий:

а) в процедуре принимают участие достаточно квалифицированные эксперты, не допускающие существенных погрешностей в оценках, более того, в рамках метода МАИ требуется, чтобы группа экспертов была консолидированной, т. е. имеющей общие позиции и стремящейся к согласованности своих оценок;

б) для множества сравниваемых объектов («альтернатив») может быть выстроена общая система критериев;

в) оценки по «негативным» критериям не находятся в опасной близости к ограничениям.

Как показывает опыт, в области ракетно-космической техники эти условия вполне можно выполнить.

Отметим, что ни один из многокритериальных методов не свободен от недостатков [7]. Возможно, это фундаментальное свойство проблемы, и поэтому методов так много.

Сформулируем основные требования к методике сравнительного анализа объектов РКТ.

1. ***Открытость и гибкость*** — могут использоваться различные системы критериев, как количественных, так и качественных.

2. ***Достаточная универсальность*** — возможность сравнивать и ранжировать любые объекты, для которых можно построить общую систему критериев.

3. ***Обозримость и оперативность*** — все необходимые расчеты и экспертные оценки по методике могут выполняться одним экспертом или небольшой группой в приемлемые сроки.

4. ***Максимально возможная объективность*** — экспертам и лицам, принимающим решения, должна быть предоставлена возможность проверки обоснованности и согласованности суждений. Отметим, что при наличии экспертных оценок субъективность нельзя устранить полностью [3—5].

Сравнение объектов по совокупности разнородных критериев является одной из фундаментальных задач системного анализа. Разработано много методов многокритериального сравнения [4—6, 9]. В различных прикладных задачах целесообразно использовать различные методы. Проведенный анализ показал, что сформулированным требованиям наиболее соответствует метод анализа иерархий [8, 10, 11]. Подход, основанный на этом методе, позволил отделить разработку общей методики (универсальной) от формирования набора критериев (специфических для рассматриваемой задачи), разработать алгоритмизированную и удовлетворяющую всем перечисленным требованиям методику. Методика реализована в виде программного пакета и используется в системных исследованиях ракетно-космической техники.

Сущность метода анализа иерархий состоит 1) в представлении исходной проблемы в виде иерархии; 2) в вынесении экспертных суждений на каждом уровне иерархии по парным сравнениям с использованием особой числовой шкалы, что позволяет сравнивать как количественные, так и качественные показатели; 3) в специальной математической обработке суждений.

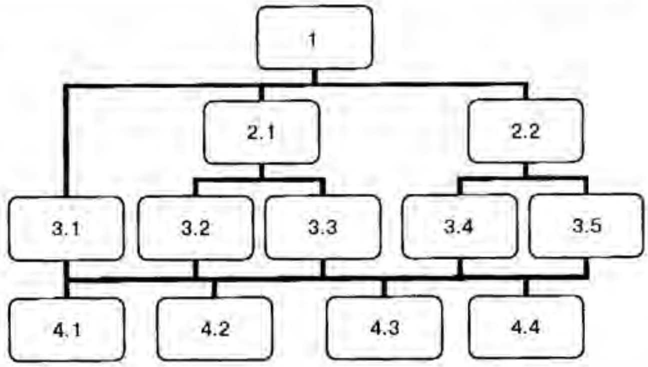

Рис. 1. Схема четырехуровневой доминантной иерархии: *1* — цель, *2* — групповые критерии, *3* — критерии, *4* — альтернативы

Рассмотрим этапы применения метода при сравнительном анализе объектов РКТ.

1. Как показывает опыт, в задаче сравнительного анализа объектов РКТ можно ограничиться доминантными трехуровневыми или четырехуровневыми иерархиями (рис. 1).

Четырехуровневые иерархии целесообразно использовать при большом числе критериев (более 7—10): критерии объединяются в группы критериев, вводится дополнительный уровень иерархии — групповые или комплексные критерии. Доминантные иерархии имеют древовидную структуру с одной вершиной — «целью» иерархии. Цель составляет высший уровень иерархии (уровень 1). На этом уровне может находиться лишь один объект. На следующем «вниз» уровне 2 в трехуровневой иерархии находятся критерии, а в четырехуровневой иерархии — комплексные критерии. По системе этих критериев оцениваются сравниваемые объекты (альтернативы). Альтернативы располагаются на самом нижнем уровне.

2. В методе анализа иерархий первичной операцией является парное сравнение: два объекта, находящихся на одном уровне, сравниваются по своей относительной значимости для одного объекта вышележащего уровня. Если критерий имеет определенную числовую меру, например масса выводимого полезного груза или стоимость, то в качестве результата оценки удобно (но не обязательно) взять отношения соответствующих характеристик (заданных либо рассчитанных). Если критерий не имеет принятой меры, то сравнение в МАИ проводится с использованием специальной «шкалы относительной важности» (шкала 1—9). Эта шкала

имеет следующие основные уровни, выбранные с учетом экспериментально установленных психофизиологических особенностей человека, проводящего сравнение [8]:
1 — нет превосходства одного объекта над другим,
3 — слабое превосходство,
5 — сильное превосходство,
7 — очень сильное превосходство,
9 — абсолютное превосходство.

Четные уровни шкалы (2, 4, ...) — промежуточные [8].

Остановимся на парном сравнении более подробно. Пусть на рассматриваемом иерархическом уровне находится n объектов, а на более высоком уровне — m объектов. Предположим, что все n объектов могут быть объективно оценены по их влиянию на каждый из m объектов более высокого иерархического уровня; нормированные на единицу, эти оценки w_i (заранее неизвестные) будут иметь вид

$$w_1, w_2, \ldots, w_n,$$
$$0 < w_i < 1, \qquad \sum w_i = 1.$$

Существенно, что в МАИ ценность элемента может быть малой, но не нулевой. Составим из этих оценок матрицу парных сравнений A, элементы которой $a_{ij} = w_i/w_j$ определяют, во сколько раз i-й элемент (стоящий в строке) более важен, чем j-й элемент (в столбце) по влиянию на рассматриваемый элемент-критерий более высокого уровня. Матрица A квадратная $(n \times n)$, с положительными элементами. Очевидно, что все элементы на главной диагонали матрицы — полученные при сравнении элемента с самим собой - единичные ($a_{ii} = 1$). Результаты сравнения i-элемента с j-элементом и j-элемента с i-элементом — взаимно обратные числа — матрица A обратно симметрична: $a_{ij} = 1/a_{ji}$. Из этих двух операций сравнения выполняется только одна: если элемент матрицы a_{ij} оценен, то симметричный относительно главной диагонали матрицы элемент вычисляется.

При условии известных истинных весов матрица парных сравнений принимает вид

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & 1 \end{pmatrix} =$$
$$= \begin{pmatrix} 1 & w_1/w_2 & \ldots & w_1/w_n \\ w_2/w_1 & 1 & \ldots & w_2/w_n \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ w_n/w_1 & w_n/w_2 & \ldots & 1 \end{pmatrix}.$$

В большинстве случаев веса неизвестны. В этих случаях оценки проводятся экспертом, при этом

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 1 & a_{12} & \ldots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \ldots & a_{2n} \\ \ldots & \ldots & \ldots & \ldots \\ a_{n1} & a_{n2} & \ldots & 1 \end{pmatrix},$$

где a_{ij} — экспертная оценка i-го объекта по сравнению с j-м объектом по шкале «1—9».

Для данного иерархического уровня конструируют m матриц парных сравнений — по каждому элементу лежащего выше уровня; таким образом всего проводится $mn(n-1)/2$ парных сравнений.

Если в работе участвуют S равноправных экспертов, и их мнения существенно расходятся, то в качестве оценки рекомендуется использовать среднее геометрическое оценок экспертов [8]:

$$a_{ij} = \left(a_{ij}^{(1)} \cdot a_{ij}^{(2)} \cdot \ldots \cdot a_{ij}^{(S)}\right)^{1/S}.$$

При необходимости могут быть учтены и различия в компетентности или ранге экспертов.

3. На третьем этапе производится математическая обработка матриц парных сравнений по всей иерархической структуре:
— исходя из матриц парных сравнений, определяются локальные приоритеты для каждой матрицы;
— для элементов каждого иерархического уровня вычисляются синтезированные приоритеты;
— вычисляются глобальные приоритеты альтернатив по совокупности критериев.

Совокупности приоритетов каждого типа образуют векторы приоритетов. Под приоритетами понимаются положительные числа. Сумма компонентов вектора приоритетов равна 1.

Определение приоритетов позволяет линейно упорядочить (ранжировать) объекты, первоначально рассматриваемые как точки многомерного пространства критериев. Приоритеты позволяют количественно оценить сравнительную ценность объектов по выбранной системе критериев.

Рассмотрим детальнее процесс определения вектора локальных приоритетов по известной матрице парных сравнений.

Пусть X-мерный вектор составлен из искомых приоритетов x_i:

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \ldots \\ x_n \end{pmatrix}, \qquad 0 < x_i \le 1, \quad \sum_{i=1}^{n} x_i = 1.$$

Если бы «истинные значения» w_i оценок объектов были известны, то можно было бы записать $x_i = w_i/w$, где $w = \Sigma\, w_i$.

Умножим вектор **X** на матрицу сравнений A слева:

$$(\mathbf{A}\cdot\mathbf{X})_i = \sum_j a_{ij}x_j = \sum_j \frac{w_i}{w_j}\,x_j = w_i \sum_j \frac{x_j}{w_j} = \frac{w_i}{w}\sum_j \frac{w_j}{w_j}.$$

Поскольку

$$\sum (w_j/w_j) = \sum 1 = n,$$

то подстановка «истинных значений» в это выражение дает

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{X} = n\mathbf{X}.$$

Следовательно, задача определения вектора локальных приоритетов сводится к задаче о нахождении собственного вектора матрицы парных сравнений:

$$\mathbf{A}\cdot\mathbf{X} = \lambda\mathbf{X}$$

и последующей нормировки этого вектора:

$$\sum x_i = 1.$$

Задача о нахождении собственных векторов и собственных значений матрицы имеет несколько решений — спектр матрицы $\{\lambda_k, X_k\}$. В рассматриваемой задаче искомым является вектор, который соответствует максимальному собственному значению. По теореме Перрона [2] максимальное по абсолютной величине собственное значение положительной квадратной матрицы единственно и положительно, и соответствующий ему собственный вектор — положителен. Кроме того, максимальное собственное значение положительной обратно симметричной матрицы не меньше ее ранга: $\lambda_{\max} \geq n$. Эти свойства матриц сравнений позволяют использовать в программе известные вычислительные методы [1] для определения максимального собственного значения и собственного вектора матрицы, являющегося вектором приоритетов. (В состав практически всех математических пакетов включены средства для нахождения собственных значений и векторов матриц — Eigenvalues, Eigenvectors).

Для решения рассматриваемых задач можно применять как общие, так и специализированные методы. В разработанной программе применяется следующий итерационный метод. В качестве начального приближения берется любой вектор $\boldsymbol{\chi}$ соответствующей размерности n. В общем случае его можно разложить по собственным векторам $\mathbf{X}_i$ рассматриваемой матрицы:

$$\boldsymbol{\chi} = \sum_i \alpha_i \mathbf{X}_i.$$

Поскольку $\mathbf{AX}_i = \boldsymbol{\lambda}_i\mathbf{X}_i$, в результате P-кратного действия матрицы A на вектор $\boldsymbol{\chi}$ имеем

$$\mathbf{A}^P\boldsymbol{\chi} = \mathbf{A}^{P-1}\sum_i \alpha_i \mathbf{AX}_i =$$

$$= \mathbf{A}^{P-1}\sum_i \alpha_i \boldsymbol{\lambda}_i \mathbf{X}_i = \sum_i \alpha_i\, \boldsymbol{\lambda}_i^P \mathbf{X}_i.$$

Учитывая, что одно из собственных значений (λ_1) максимальное и положительное, получаем, что коэффициент разложения у вектора $\mathbf{X}_1$ в последней формуле при достаточно большом числе итераций становится существенно больше, чем остальные коэффициенты. Следовательно, вектор $\mathbf{A}^P\boldsymbol{\chi}$ становится «почти коллинеарным» искомому вектору $\mathbf{X}_1$. В результате нормировки вектора $\mathbf{A}^P\boldsymbol{\chi}$ получаем искомый вектор приоритетов:

$$X_1 = \frac{\mathbf{A}^P\chi}{\sum_i(\mathbf{A}^P\chi)_i}.$$

Максимальное собственное значение вычисляется как коэффициент пропорциональности между компонентами вектора:

$$\lambda_1 = \frac{(\mathbf{A}X_1)_i}{(X_1)_i}.$$

Для контроля согласованности экспертных оценок вводятся две связанные характеристики — индекс согласованности ИС и отношение согласованности ОС [8]:

$$\text{ИС} = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}, \quad \text{ОС} = \frac{\text{ИС}}{P_n},$$

где P_n — индекс согласованности для положительной обратно симметричной матрицы случайных оценок размера $n\times n$; элементы этой матрицы получены случайным выбором из множества допустимых оценок, т. е. из чисел ряда {1/9, 1/8, 1/7, 1/6, 1/5, 1/4, 1/3, 1/2, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9}.

Значения P_n приведены ниже [8]:

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
P_n	0	0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49

Допустимым считается отношение согласованности, не превышающее 10—20 %. Если ОС выходит из этих пределов, то экспертам необходимо исследовать задачу и проверить свои оценки [8].

Вычисление. синтезированных приоритетов для каждого уровня иерархии производится следующим образом.

Уровень иерархии характеризуется: номером уровня p; числом элементов уровня n_p; набором матриц парных сравнений по критериям-элементам предыдущего уровня $p-1$: $\{\mathbf{A}_1, \mathbf{A}_2, \ldots, \mathbf{A}_{n_{p-1}}\}$; матриц столько же, сколько элементов предыдущего уровня - n_{p-1}, а размерность матриц равна числу n_p сравниваемых элементов; набором векторов локальных приоритетов, полученных из матриц сравнения:

$$(X_1, X_2, \ldots X_{n_{p-1}})^{(p)} = \left(\begin{pmatrix} x_1^{(1)} \\ \ldots \\ x_{n_p}^{(1)} \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} x_1^{(2)} \\ \ldots \\ x_{n_p}^{(2)} \end{pmatrix}, \ldots, \begin{pmatrix} x_1^{(n_{p-1})} \\ \ldots \\ x_{n_p}^{(n_{p-1})} \end{pmatrix} \right)^{(p)}$$

всего на p-уровне n_{p-1} векторов размерности n_p. Обозначим через $y_i^{(p)}$ синтезированный (вычисленный) приоритет уровня p. Вычисление (синтез) приоритетов производится следующим образом. Самый верхний элемент иерархии — цель — имеет приоритет $y_1^{(1)} = 1$. Приоритеты нижнего уровня с номером $p > 1$ вычисляют, используя приоритеты для уровня $p-1$ в качестве весовых множителей. Процесс идет до нижнего уровня иерархии, где находятся альтернативы:

$$y_i^{(p)} = \sum_{k=1}^{n_{p-1}} (x_i^{(p)})_k \cdot y_k^{(p-1)}, \qquad i = 1, 2, \ldots, n_p.$$

Каждый элемент на иерархическом уровне характеризуется единственным приоритетом $y_i^{(p)}$. Уровни характеризуется разным числом приоритетов, по числу элементов на уровне. Приоритеты каждого уровня образуют n_p-мерный нормированный вектор (заметим, что размерность векторов различна на разных уровнях):

$$Y^{(p)} = \begin{pmatrix} y_1^{(p)} \\ \ldots \\ y_{n_p}^{(p)} \end{pmatrix}, \qquad \sum_{i=1}^{n_p} y_i^{(p)} = 1.$$

Вычисленные приоритеты всех уровней, т. е. нормированные векторы $\{\mathbf{Y}^{(1)}, \ldots, \mathbf{Y}^{(\max p)}\}$, представляют собой математическое решение поставленной задачи.

Вектор приоритетов уровня критериев показывает направления совершенствования объекта, отображая важность каждого из свойств или параметров («что важно и чего недостает объекту в сравнении с другими»). Вектор приоритетов уровня альтернатив позволяет произвести ранжирование объектов: каждому из них соответствует свой приоритет (составляющая вектора) — число в интервале (0 — 1). Чем это число больше, тем объект предпочтительнее. Вектор приоритетов уровня альтернатив дает числовую характеристику для каждого возможного варианта выбора, его можно использовать в качестве критерия обобщенной ценности в задачах распределения ресурсов. Если в состав альтернатив включить лучшие из известных объектов данной отрасли техники, то, вычислив приоритеты, можно определить уровень предлагаемых технических проектов.

Разработанные методика и программное обеспечение использовались в задачах анализа объектов РКТ. Для примера рассмотрим трехуровневую иерархию, и на основе данных из общедоступных источников (Space News, Новости космонавтики, проспекты фирм и др.) сопоставим три семейства перспективных ракет-носителей.

Построим схему иерархии для сравнения технико-экономического уровня (рис. 2).

Цель: сравнение технико-экономического уровня трех новых зарубежных семейств ракет-носителей «Ариан-5», «Атлас-5» и «Дельта-4» для запусков тяжелых геостационарных КА.

Для оценки используются шесть критериальных признаков.

1. Энергетические возможности — максимальная масса полезного груза, выводимого на геопереходную орбиту.

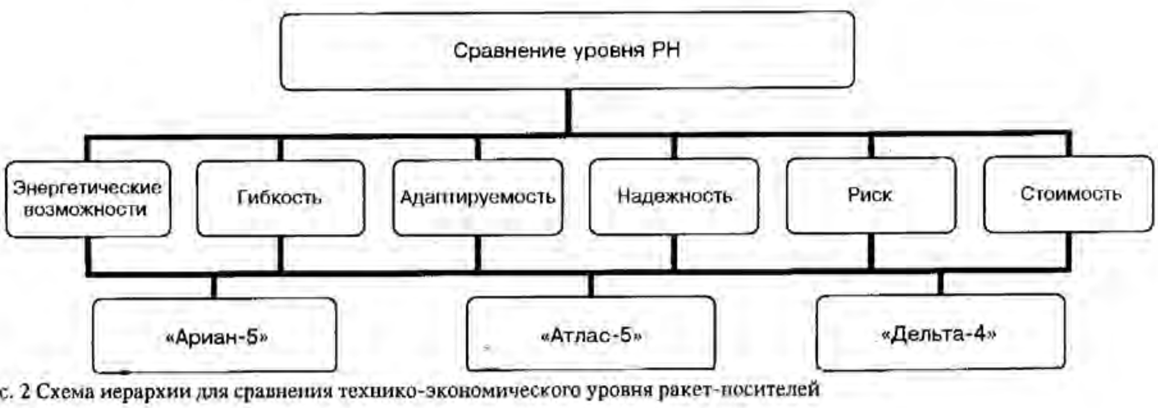

Рис. 2 Схема иерархии для сравнения технико-экономического уровня ракет-носителей

Таблица 1. Матрица сравнений и приоритеты критериальных признаков по отношению к цели ($n = 6$, $\lambda = 7.0490$, ИС = 0.2098, ОС = 0.1692)

	Признак	1	2	3	4	5	6	Приоритет
1	Энергетические возможности	1	3	1/5	1/2	3	5	0.1918
2	Гибкость	1/3	1	1/5	1/3	1	1/7	0.0463
3	Адаптируемость	5	5	1	2	3	3	*0.3609*
4	Надежность	2	3	1/2	1	3	3	0.2106
5	Риск	1/3	1	1/3	1/3	1	1/5	0.0542
6	Стоимость	1/5	7	1/3	1/3	5	1	0.1362

Таблица 2. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Энергетические возможности» (вес признака 0.1918, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	12/13	12/12.5	0.3200
2	«Атлас-5»	13/12	1	13/12.5	0.3467
3	«Дельта-4»	12.5/12	12.5/13	1	0.3333

Таблица 3. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Гибкость» (вес признака 0.0463, $n = 3$, $\lambda = 3.0649$, ИС = 0.0324, ОС = 0.0559)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	1/7	1/5	0.0719
2	«Атлас-5»	7	1	3	*0.6491*
3	«Дельта-4»	5	1/3	1	0.2790

Таблица 4. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Адаптируемость» (вес признака 0.3609, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	1	1	0.3333
2	«Атлас-5»	1	1	1	0.3333
3	«Дельта-4»	1	1	1	0.3333

Таблица 5. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Надежность» (вес признака 0.2106, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	5/6	5/6	0.2941
2	«Атлас-5»	6/5	1	1	*0.3529*
3	«Дельта-4»	6/5	1	1	*0.3529*

Таблица 6. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Риск» (вес признака 0.0542, $n = 3$, $\lambda = 3.0649$, ИС = 0.0324, ОС = 0.0559)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	1/5	3	0.1884
2	«Атлас-5»	5	1	7	*0.7306*
3	«Дельта-4»	1/3	1/7	1	0.0810

Таблица 7. Матрицы сравнений и приоритеты альтернатив по признаку «Стоимость» (вес признака 0.1362, $n = 3$, $\lambda = 3.00$, ИС = 0.00, ОС = 0.00)

	Альтернативы	1	2	3	Приоритет
1	«Ариан-5»	1	110/170	105/170	0.2401
2	«Атлас-5»	170/110	1	105/110	0.3711
3	«Дельта-4»	170/105	110/105	1	*0.3888*

2. Гибкость — количество возможных комплектаций ракет-носителей семейства (стартовыми ускорителями, верхними ступенями, обтекателями).

3. Адаптируемость — оценка соответствия требованиям по условиям для полезных нагрузок.

4. Надежность — отношение числа успешных пусков к общему их числу.

5. Риск технический — оценка новых технических решений.

6. Стоимость пуска.

Таким образом, имеем шесть критериальных признаков — три количественных (№№ 1, 4, 6), два качественных (№№ 3, 5) и один (№ 2), который имеет количественное выражение, но его целесообразнее оценивать качественно.

Альтернативы: три семейства ракет-носителей «Ариан-5» «Атлас-5», «Дельта-4».

Расчеты по предложенной методике проводились с использованием специально разработанного программного обеспечения. В табл. 1 приведены ре-

Таблица 8. Результаты многокритериального сравнительного анализа

Альтернативы	Приоритеты	Признаки					
		энергетические возможности	гибкость	адаптируемость	надежность	риск	стоимость
		0.1918	0.0463	0.3609	0.2106	0.0542	0.1362
«Ариан-5»	0.2899	0.3200	0.0719	0.3333	0.2941	0.1884	0.2401
«Атлас-5»	*0.3813*	0.3467	0.6491	0.3333	0.3529	0.7306	0.3711
«Дельта-4»	0.3288	0.3333	0.2790	0.3333	0.3529	0.0810	0.3888

зультаты парных сравнений критериальных признаков по важности, в ее последней колонке — вектор локальных приоритетов критериев. В табл. 2—7 приведены результаты парных сравнений альтернатив по каждому из признаков (шесть матриц парных сравнений и шесть векторов локальных приоритетов проектов в последних колонках таблиц).

В табл. 8 приведены результаты анализа — глобальные приоритеты (в первой колонке) и локальные приоритеты в остальных.

Таким образом, лучшим по системе критериев оказалось семейство ракет-носителей «Атлас-5», что (в данном случае) довольно легко объяснимо: оно лучшее по трем критериям из шестити, «на равных» в двух и ни по одному не худшее. Равноценность приоритетов семейств по самому «весомому» критерию (адаптируемость) и близость по трем следующим по весу (надежность, энергетические возможности, стоимость) обусловили сравнительно небольшие различия в глобальных приоритетах этих ведущих семейств (30 %), что свидетельствует о сложившемся уровне в этом секторе ракетно-космической техники, «обязательном» для всех новых участников.

В заключение отметим, что многокритериальный подход к оценке космических проектов и существующих объектов РКТ, а также разработанная на его основе методика позволяют решать для различных наборов критериев и альтернатив задачи сравнительного анализа объектов РКТ, выбора направлений их разработки и модернизации, формирования концепции их эксплуатации, распределения ресурсов в различных проблемных ситуациях.

1. Беклемишев Д. А. Дополнительные главы линейной алгебры. — М.: Наука, 1983.—336 с.
2. Беллман Р. Введение в теорию матриц. — М.: Наука, 1969.—368 с.
3. Воронин А. Н. Системный анализ и многокритериальная оценка космических проектов экспертными методами // Проблемы управления и информатики.—2004.—№ 1.—С. 121—135.
4. Ларичев О. И. Наука и искусство принятия решений. — М.: Наука, 1979.—300 с.
5. Ларичев О. И., Браун Р. Количественный и вербальный анализ решений: сравнительное исследование возможностей и ограничений // Экономика и математические методы.—1998.—**34**, № 4.—С. 97—107.
6. Ларичев О. И., Мошкович Е. М. Качественные методы принятия решений. — М: Физматлит., 1996.—278 с.
7. Ногин В. Д. Упрощенный метод анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев // Журн. вычисл. мат. и мат. физ.—2004.—**44**, № 7.—С. 1261—1270.
8. Саати Т., Кернс К. Аналитическое планирование. Организация систем. — М.: Радио и связь, 1991.—224 с.
9. Тоценко В. Г. Методы и системы поддержки принятия решений. — Киев: Наук. думка, 2002.—382 с.
10. Saaty T. L. The Analytic Hierarchy Process. — N. Y.: McGrow-Hill, 1980.
11. Saaty T. L. Decision making for leaders. — Pittsburg: RWS Publ., 2000.—240 p.

MULTICRITERIAL COMPARATIVE ANALYSIS OF ROCKET AND SPACE TECHNOLOGY

V. P. Gusynin, Yu. M. Goldshtein, V. K. Doroshkevich, V. I. Kuznetsov, Yu. P. Kuchugurny

The problem of a comparative analysis of objects of rocket and space technology is formulated in terms of one of fundamental problems of the system analysis, namely, comparisons of objects on set of diverse criteria. A procedure for a comparative estimation based on the method of the analytic hierarchy process is offered as an algorithm. We give an example, namely, a comparison of launcher-carriers, derived with the use of our software.