УДК 621.002.56

В. Т. МАРЧЕНКО[1], Е. П. ПЕТЛЯК[2], Н. П. САЗИНА[1], П. П. ХОРОЛЬСКИЙ[1]

О НОВОМ МЕТОДЕ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

[1]Институт технической механики
Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины,
ул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Днепр, Украина; e-mail:sazinana@ukr.net

[2] Государственное предприятие "Конструкторское бюро "Южное" имени М. К. Янгеля,
ул. Криворожская, 3, 49008, Днепр, Украина

Цель работы – разработка современного метода оценки технического уровня космических аппаратов дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) на основе модернизированного авторами статьи метода иерархий Т. Саати. Создание методического обеспечения корректной оценки технического уровня новой техники обусловлено важностью значения этого показателя при оценке конкурентоспособности разрабатываемой ракетно-космической техники. В статье описан обобщенный метод оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники и его детализация применительно к задаче оценки технического уровня КА ДЗЗ. Приведенный метод был использован для оценки технического уровня КА "Січ-2М" при разработке технического проекта.

Мета роботи – розробка сучасного методу оцінки технічного рівня космічних апаратів дистанційного зондування Землі (КА ДЗЗ) на основі модернізованого авторами статті методу ієрархій Т. Сааті. Створення методичного забезпечення коректної оцінки технічного рівня нової техніки обумовлено важливістю значення цього показника при оцінці конкурентоспроможності ракетно-космічної техніки, що розробляється. У статті описаний узагальнений метод оцінки технічного рівня виробів ракетно-космічної техніки і його деталізація щодо задачі оцінки технічного рівня КА ДЗЗ. Наведений метод був використаний для оцінки технічного рівня КА "Січ 2М" при розробці технічного проекту.

The research objective is to develop a modern method of an engineering evaluation of Earth remote sensing spacecraft based on an updated hierarchy T. Saati method. Creation of methodic support for a correct engineering evaluation of the state-of-the-art technology is motivated by the importance of this factor for evaluating the competiveness of the rocket and space technology under development. The paper presents a generalized method of the engineering evaluation of rocket and space products and its specification related to the issue of an engineering evaluation of Earth remote sensing spacecraft. The method under consideration has been employed for an engineering evaluation of the Sich-2M satellite in the development of the technical project.

Ключевые слова: *дистанционное зондирование Земли, космический аппарат, метод анализа иерархий, ракетно-космическая техника, технический уровень.*

Технический уровень (ТУ) является одним из основных технико-экономических показателей опытно-конструкторской работы. Наряду с затратами на разработку и эксплуатацию показатель ТУ определяет конкурентоспособность вновь создаваемого технического изделия или системы. Вопрос оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники стал особенно актуальным в результате возникновения мирового рынка космической продукции и космических услуг.

В 80-е годы 20-го века в СССР выполнялась комплексная научно-исследовательская работа (НИР) "Уровень", конечной целью которой было создание методик оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники (РКТ). Судя по открытым публикациям последних лет [1 – 4], в основу этих методик были положены "Методические указания по оценке технического уровня промышленной продукции РД 50-149-79". В основу методик оценки технического уровня изделий РКТ, разработанных в процессе НИР "Уровень" (головная организация ЦНИИМАШ), положен комплексный метод [5]. Разработанные в процессе НИР "Уровень" методики не удовлетворяют нынешним требованиям [3], и на сегодня остается актуальной задача создания методического обеспечения оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники с учетом коммерциализации ракетно-космической отрасли [1 – 3].

Оценка технического уровня изделий РКТ по своей сути является задачей многокритериальной оптимизации.

На основе анализа существующих методов решения многокритериальных задач оптимизации сформирована обобщенная логическая схема решения задач оценки технического уровня изделий РКТ (ракетно-космических комплексов, космических систем и т. д.), представленная на рис. 1.

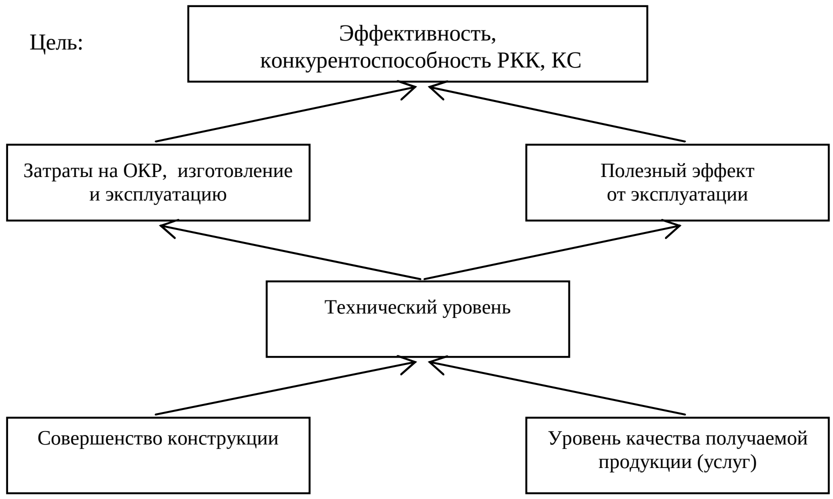
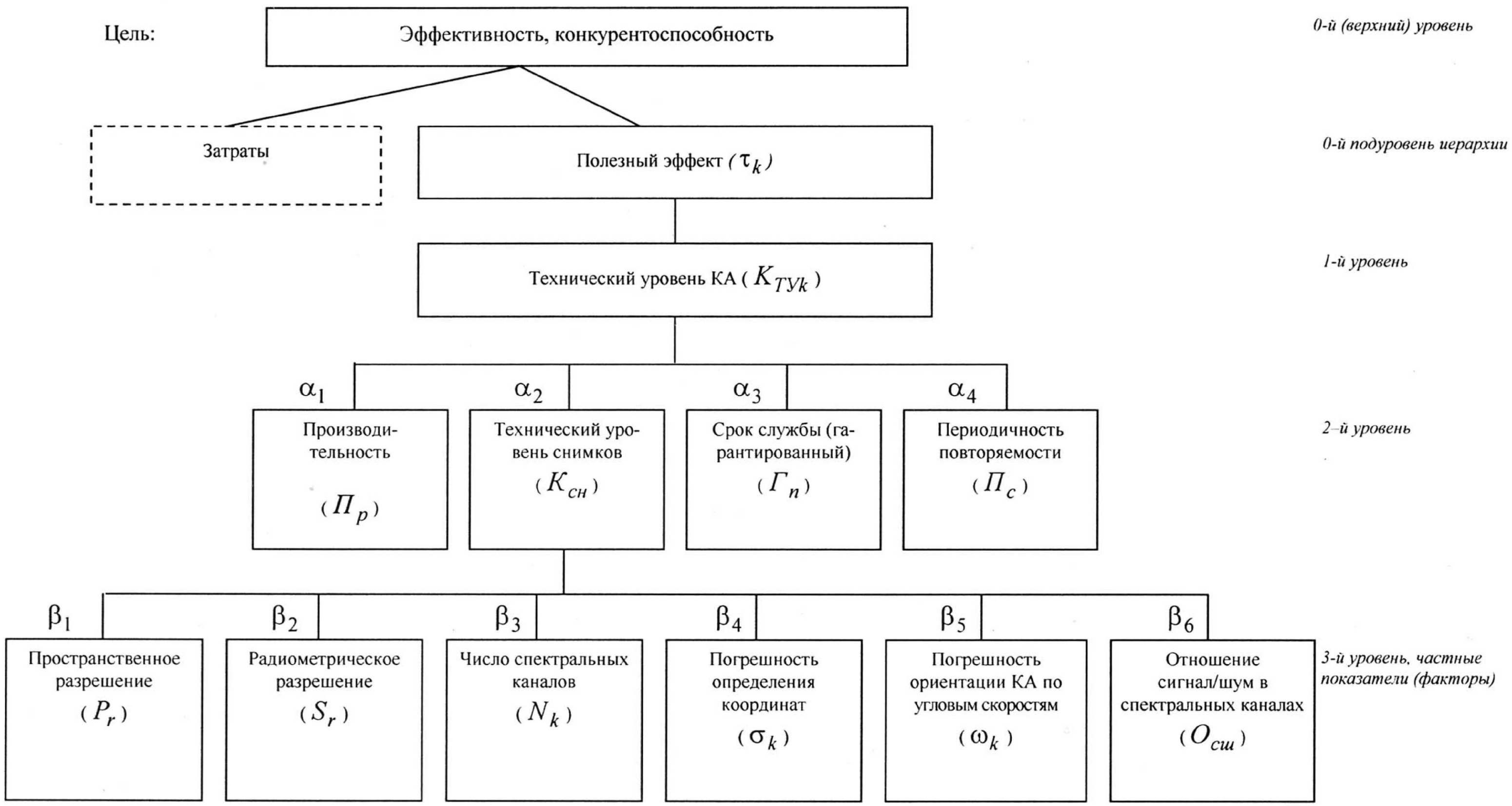


Рис. 1 – Логическая схема решения задач оценки технического уровня РКТ

Применительно к космической системе наблюдения Земли из космоса, эффективность эксплуатации которой определяется техническим уровнем космического аппарата, логическая схема решения задачи оценки ТУ принимает вид, приведенный на рис. 2.

Космический аппарат дистанционного зондирования Земли (КА ДЗЗ) является технической системой, которая производит и доставляет на Землю космическую продукцию в виде снимков заданных участков поверхности Земли в заданных спектральных диапазонах с требуемым пространственным разрешением.

Космические аппараты ДЗЗ являются уникальными техническими изделиями. Среди множества (группы) одинаковых (однородных) по функциональному назначению КА, как правило, не существует изделия, которое превосходило бы по своим техническим характеристикам все остальные аппараты. Поэтому в качестве базового образца сравнения целесообразно принять гипотетический КА с самыми лучшими техническими характеристиками из группы однородных изделий. После завершения расчета технического уровня (по отношению к гипотетическому образцу) за базовый образец принимается космический аппарат, у которого имеет место наибольшее значение показателя технического уровня по отношению к гипотетическому образцу. Значения технического уровня остальных КА приводятся к уровню выбранного за базовый образец реального изделия.



$\{\alpha_i\}, \{\beta_j\}$ – множество весовых коэффициентов, определяемых по специальному алгоритму.

Рис. 2 – Логическая схема решения задач оценки технического уровня КА ДЗЗ

Техническая эффективность КА как производящей космическую продукцию (снимки) системы определяется основными показателями: производительностью, качеством (ТУ) космических снимков и надежностью (гарантийный срок эксплуатации). Таким образом, с учетом показателя периодичности повторной съемки, технический уровень КА ДЗЗ по отношению к базовому образцу может быть представлен линейной (аддитивной) сверткой указанных показателей:

$$K_{ТУk} = \alpha_1 \cdot \frac{П_р}{П_{рб}} \alpha_2 \cdot \frac{K_{сн}}{K_{снб}} + \alpha_3 \cdot \frac{Г_п}{Г_б} + \alpha_4 \cdot \left(\frac{П_с}{П_{сб}} \right)^{-1}, \tag{1}$$

где: $K_{ТУk}$ – технический уровень КА по отношению к базовому образцу; $П_р$ – среднесуточная производительность КА ДЗЗ; $П_{рб}$ – среднесуточная производительность базового образца; $K_{сн}$ – коэффициент качества (технический уровень) космических снимков; $K_{снб}$ – коэффициент качества космических снимков базового образца ($K_{снб} = 1$, так как базовый образец обладает наивысшими техническими характеристиками среди группы КА ДЗЗ, однородных по функциональному назначению); $Г_п$ – приведенный срок гарантийной эксплуатации (срок службы) КА, который определяется как произведение срока службы на уровень вероятностной гарантии его обеспечения; $Г_б$ – гарантийный срок эксплуатации базового образца; $П_с$ – периодичность повторной съемки одного и того же объекта на поверхности Земли в заданном диапазоне географических широт; $\overline{\alpha} = (\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4)$ – вектор весовых коэффициентов. Вектор $\overline{\alpha}$ определяется по специальной методике, приведенной ниже.

Показатель среднесуточной производительности $П_р$ объединяет в себе такие показатели технического уровня КА, как среднесуточная мощность системы электроснабжения, оперативный запас энергоемкости и максимальная мощность системы электроснабжения, скорость передачи целевой информации, емкость бортового запоминающего устройства для хранения данных ДЗЗ, ширина снимаемого участка, ширина захвата (полосы обзора).

Показатель качества (технического уровня) космических снимков $K_{сн}$ является аддитивной сверткой таких частных показателей технического уровня, как: пространственное разрешение, радиометрическое разрешение, число спектральных каналов, погрешность определения координат объектов на космических снимках и т. д.

Показатель приведенного срока службы КА $Г_п$ включает в себя такие частные показатели технического уровня КА, как гарантийный срок службы, уровень вероятности обеспечения достижения заданного срока службы и уровень вероятности безотказности работы бортовой аппаратуры.

Показатель периодичности повторной съемки $П_с$ включает в себя такие частные показатели, как: ширина полосы обзора, угол перенацеливания по крену и угловая скорость перенацеливания КА.

Показатели $П_р$, $K_{сн}$, $Г_п$, $П_с$ являются групповыми, поэтому составляющие их частные показатели отдельно учитывать не надо.

Таким образом, коэффициент технического уровня космического аппарата K_{TYk} представляет собой линейную свертку системы групповых показателей, а показатель качества космических снимков $K_{сн}$ является аддитивной сверткой пяти частных (одиночных) и одного группового показателя. Групповой показатель погрешности определения координат объектов G включает в себя частные показатели, такие как: предельная погрешность управления ориентацией и точность стабилизации.

Метод оценки технического уровня КА ДЗЗ. Технический уровень КА является функцией от тактико-технических характеристик космического аппарата τ_i

$$K_{ТУК} = F(\{\tau_i\}) = \sum_{i=1}^{4} \alpha_i P_{2i} \, , \tag{2}$$

где $\{P_{2i}\}$ – множество групповых показателей (2-й уровень иерархии); $\{\alpha_i\}$ – множество весовых коэффициентов.

$$P_{22} = K_{ин} = \beta_1 \left(\frac{\tau_1}{\tau_{1б}}\right)^{-1} + \beta_2 \left(\frac{\tau_2}{\tau_{2б}}\right) + \beta_3 \left(\frac{\tau_3}{\tau_{3б}}\right) + \beta_4 \left(\frac{\sigma}{\sigma_б}\right)^{-1} + \beta_5 \left(\frac{\tau_5}{\tau_{5б}}\right) + \beta_6 \left(\frac{\tau_6}{\tau_{6б}}\right), \tag{3}$$

где τ_1 – пространственное разрешение; τ_2 – спектральное разрешение; τ_3 – число спектральных каналов; σ – погрешность координатной привязки; τ_5 – погрешность ориентации КА по угловым скоростям на участках проведения съемки; τ_6 – отношение сигнал/шум.

Если бы полезный эффект $ПЭ(\tau)$ от применения КА ДЗЗ мог быть представлен явной функцией от совокупности тактико-технических характеристик $\tau = \{\tau_к\}$, то весовые коэффициенты $\{\alpha_i\}$ могли бы быть однозначно определены через систему частных производных

$$\left.\frac{\partial ПЭ(\tau)}{\partial \tau_к}\right|_{\tau = \{\tau_{ок}\}}, \tag{4}$$

где $\{\tau_{ок}\}$ – множество значений тактико-технических характеристик.

Выражение (4) определяет изменение (чувствительность) величины полезного эффекта $ПЭ(\tau)$ от использования КА ДЗЗ по назначению при вариации конкретной технической характеристики космического аппарата в точке $\tau_0 = \{\tau_{ок}\}$. Множеству значений тактико-технических характеристик $\{\tau_{ок}\}$ соответствует значение выбранных в процессе проектирования тактико-технических характеристик КА при рассчитанных затратах на выполнение ОКР.

Аналогичная ситуация имеет место и в случае определения системы коэффициентов $\{\beta_j\}$.

Однако в связи с невозможностью на практике представить полезный эффект $ПЭ(\tau)$ в виде явной функции от переменных $\{\tau_к\}$, а также в силу уникальности КА (отсутствует необходимая статистическая информация), весовые коэффициенты $\{\alpha_i\}$ и $\{\beta_j\}$ могут быть определены только с привлечением экспертов для формирования необходимых исходных данных.

Существующие сегодня методы оценки технического уровня новых образцов изделий машиностроения для вычисления значений весовых коэффициентов используют методы балльных оценок или ранжирования. Таким образом, эксперты напрямую влияют на значения весовых коэффициентов. Использование этих методов для определения весовых коэффициентов крайне нежелательно при оценке технического уровня КА ДЗЗ из-за высокой степени субъективизма, обусловленного человеческим фактором.

Для решения задач многокритериальной оптимизации наиболее эффективным является метод попарных сравнений Т. Саати [6].

В методе Саати эксперты выполняют вспомогательную работу, которая заключается в построении матрицы парных сравнений и, таким образом, не могут напрямую влиять на численные значения весовых коэффициентов, как это имело место в случае использования методов балльных оценок и ранжирования. Метод Саати в течение последних двух десятилетий показал высокую эффективность и позволяет существенно снизить влияние человеческого фактора на конечные результаты, то есть на численные значения весовых коэффициентов.

Из приведенного выше следует, что для более корректного вычисления весовых коэффициентов $\{\alpha_i\}$ и $\{\beta_j\}$ целесообразно использовать метод Томаса Саати.

Множество весовых коэффициентов определяется по методу Саати как координаты собственного вектора матрицы парных сравнений $A = [a_{ij}]$

$$A\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_n\end{pmatrix} = \begin{pmatrix}a_{11}\ a_{12}\ \dots\ a_{1n}\\ a_{21}\ a_{22}\ \dots\ a_{2n}\\ \vdots\\ a_{n1}\ a_{n2}\ \dots\ a_{nn}\end{pmatrix}\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_n\end{pmatrix} = \lambda\begin{pmatrix}\alpha_1\\ \alpha_2\\ \vdots\\ \alpha_n\end{pmatrix}, \tag{5}$$

где α_i – степень влияния i-го фактора на показатель эффективности; α_j – степень влияния j-го фактора на показатель эффективности.

Если $a_{ij} = \dfrac{\alpha_i}{\alpha_j}$, то матрица A заполнена корректно (элементы матрицы согласованы).

Элементы a_{ij} матрицы A представляют собой числа, которые показывают, во сколько раз влияние i-го фактора на значения показателя эффективности (или другого критерия) сильнее, чем влияние j-го фактора, поэтому матрица A представляет собой набор коэффициентов относительного влияния.

Матрица A является положительно определенной (все $a_{ij} > 0$) и обратно симметричной $\left(a_{ji} = \dfrac{1}{a_{ij}}\right)$, а элементы, стоящие на главной диагонали, равны единице ($a_{ij} = 1$, при $i = j$).

Таким образом, построенная матрица является неприводимой. Из теоремы Перрона–Фробениуса [6] следует, что для неприводимой неотрицательной матрицы W существует единственное максимальное действительное положительное собственное значение $\lambda_{\max}$. Собственному значению матрицы $\lambda_{\max}$ соответствует единственный неотрицательный собственный вектор $w = \{w_1, w_2, \ldots w_n\}$, такой что выполняется условие $\sum_{i=1}^{n} w_i = 1$.

Задача состоит в том, что, производя парные сравнения степени влияния двух факторов $f_i(\alpha_i)$ и $f_j(\alpha_j)$ на показатель эффективности, эксперты определяют не значение этих факторов, а их отношение (числа $a_{ij} = \frac{\alpha_i}{\alpha_j}$). Это значительно более простая задача, чем определять экспертным путем сами значения α_i и α_j. Парные сравнения влияния факторов производятся исходя из субъективных оценок экспертами величин a_{ij}.

Определение численных значений величин a_{ij} производится экспертами в соответствии с требованиями фундаментальной шкалы относительного превосходства (весов), приведенной в [6]. Томас Саати предложил также метод для частичного выявления противоречивости заполнения им матрицы парных сравнений. Степень противоречивости определяется через индекс согласованности элементов a_{ij}

$$I_c = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \tag{6}$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное значение матрицы A, которое определяется решением задачи (5) на нахождение собственных значений; n – размерность квадратной матрицы A.

Индекс согласованности элементов матрицы A позволяет оценить качество работы эксперта при заполнении им матрицы парных сравнений. Индекс согласованности должен быть примерно равен нулю $I_c \approx 0$, но на практике добиться этого невозможно, считается допустимым значением индекса согласованности число, не превышающее значение $0{,}1\,(I_c \le 0{,}1)$. При заполнении матрицы парных сравнений часто возникают противоречивые данные, так, например, часто не соблюдается условие транзитивности вида: если $a_{ij} > a_{ik}$, $a_{ik} > a_{ip}$, то обязательно должно выполняться условие $a_{ij} > a_{ip}$. Кроме того, при заполнении матрицы парных сравнений используется дискретная шкала (согласно фундаментальной шкале относительности важности).

Несмотря на широкое распространение и привлекательность метода Т. Саати, остается до настоящего времени нерешенным вопрос обеспечения непротиворечивости (согласованности) матрицы парных сравнений.

В работе [7] предложен упрощенный метод обеспечения согласованности матрицы парных сравнений. Суть этого метода состоит в том, что эксперт заполняет только одну строку матрицы A, а остальные строки формируются автоматически исходя из условия достижения индекса согласованности $I_c = 0$. В этом случае проверка эксперта на противоречивость данных не представляется возможной. Это существенный недостаток предложенного в [7] метода. Собственно говоря, проблема некорректности и противоречий таким путем исключена из рассмотрения.

Метод формирования непротиворечивой матриц парных сравнений. Самым существенным недостатком существующего метода формирования матрицы парных сравнений является отсутствие формализованного способа устранения нарушения правила транзитивности. Устранение этого недостатка достигается за счет построения на заданном множестве факторов вспомогательной бинарной матрицы $B = [b_{ij}]$. Элементы b_{ij} принимают два значения $\{0, 1\}$; $b_{ij} = 1$, если влияние i-го фактора на показатель равно или превосходит влияние j-го фактора, в противном случае $b_{ij} = 0$. Эксперт заполняет бинарную матрицу "0" или "1", на диагонали должны стоять 1; $b_{ij} = 1$, если $i = j$.

На основе заполненной матрицы B формируется эквивалентная матрица $B^* = [b^*_{ij}]$ путем упорядочивания по возрастанию суммы элементов строки: $Q_i = \sum_{j=1}^{n} b_{ij}$. Сумма элементов первой строки $Q_1 = n$, так как на множестве заданных факторов $\{f_i\}, i = 1, n$ есть один или может быть, несколько факторов, оказывающих максимальное влияние на показатель эффективности. Строки матрицы B^* будут упорядочены по правилу $Q_i \geq Q_{i=1}$, $i = \overline{1, n}$, очевидно, что $Q_n = 1$, так как среди элементов множества $\{f_i\}$ найдется хотя бы один элемент, который оказывает наименьшее влияние на значение показателя эффективности. Таким образом, мы получим упорядоченную по убыванию влияния на показатель эффективности последовательность факторов f^*_k: f^*_1 соответствует значение Q_1; f^*_2 – Q_2; f^*_n – Q_n. На основании фундаментальной шкалы Саати эксперт заполняет верхнюю (по отношению к главной диагонали) часть матрицы парных сравнений для последовательности факторов f^*_i.

В случае, если матрицы $B^* = [b^*_{ij}]$ и $A = [a_{ij}]$ взаимно согласованы, то для элементов верхней (относительной главной диагонали) части матрицы A будет выполняться условие:

$$a_{ij} \leq a_{i(j+1)} \text{ если } i < j \quad , \qquad (7)$$
$$a_{ij} \geq a_{(i+1)\,j} \text{ если } (i+1) < j \,.$$

Из условия (7) следует, что элементы i-ой строки матрицы A образуют неубывающую числовую последовательность, и тем самым обеспечивается согласование элементов a_{ij} в части выполнения закона транзитивности. Если условие (7) не выполняется, например для элемента a_{kp} матрицы A, то эксперт должен уточнить значение величины a_{kp}, чтобы выполнялось условие (7). Если же эксперт уверен в правильности значения величины a_{kp}, то в этом случае он должен скорректировать значения элемента b_{kp} матрицы B на противоположное: если $b_{kp}=1$, то надо заменить $b_{kp}=0$ и после этого следует скорректировать матрицу B^*. Методом последовательных итераций эксперт достигнет согласованности матриц B и A, т. е. будет выполнено условие (7) и тем самым будет устранено нарушение закона транзитивности. Для согласованной на транзитивность матрицы парных сравнений вычисляется максимальное собственное значение $\lambda_{\max}$ путем решения задачи (5) и достигнутый индекс согласованности I_c (по соотношению (6)). Если параметр $I_c<\gamma_{грн}$ ($\gamma_{грн}$ – допустимое граничное значение, например $\gamma_{грн}=0{,}1$), то определяем значение собственного вектора $\alpha=\{\alpha_i\}$. Необходимо проверить выполнение условия $\sum_{i=1}^{n}\alpha_i=1$. Если это условие не выполняется, то необходимо выполнить операцию нормирования на сумму $\sum_{i=1}^{n}\alpha_i$. Если вычисленное значение $I_c>\gamma_{грн}$, то необходимо проводить дальнейшее согласование матрицы A (но уже без использования матриц B). Данное согласование должно устранить противоречие среди элементов a_{ij}, вызванное дискретными значениями относительной важности, которые приведены в [6]. В этом случае производится преобразование матрицы A в матрицу $A^*=\left[a_{ij}^*\right]$, с помощью которого будет устранено влияние на согласованность элементов матрицы A фактора дискретности фундаментальной шкалы.

Элементы a_{ij}^* матрицы A^* рассчитываются по следующим аналитическим выражениям:

$$a_{ij}^*=c_{im}\cdot c_{mj},$$

$$c_{mj}=\sum_{q=1}^{n}a_{mq}\cdot a_{qj}\cdot P_q, \qquad c_{jm}=\frac{1}{c_{mj}}, \qquad P_q=\frac{\sum_{s=1}^{n}a_{qs}}{\sum_{s=1}^{n}\sum_{q=1}^{n}a_{qs}}, \tag{8}$$

где $m=k:P_k=\max\{P_q\}$ – за число m принят номер строки матрицы A, для которой параметр P_q принимает наибольшее значение.

Для матрицы $A^*=\left[a_{ij}^*\right]$ повторно решается задача на собственные значения:

$$A^*\begin{pmatrix}\alpha_1^*\\ \alpha_2^*\\ \vdots\\ \alpha_n^*\end{pmatrix}=\lambda^*\begin{pmatrix}\alpha_1^*\\ \alpha_2^*\\ \vdots\\ \alpha_n^*\end{pmatrix}. \tag{9}$$

Из соотношения (9) определяется собственное значение $\lambda_{\max}^*$ и соответствующий $\lambda_{\max}^*$ собственный вектор $\alpha^*=\left(\alpha_1^*,\alpha_2^*,\ \ldots,\alpha_n^*\right)$. Нормированные значения координат собственного вектора α^* принимаются в качестве весовых коэффициентов.

Приведенный метод формирования непротиворечивой матрицы парных сравнений является надстройкой над методом парных сравнений Саати. Метод позволяет не только выявить наличие противоречия между элементами в матрице парных сравнений A, но показывает эксперту, какой именно элемент в матрице A некорректный и каким образом устранить некорректность. Кроме того, метод позволяет устранить возможность рассогласования матрицы A, обусловленную дискретностью фундаментальной шкалы.

Выводы

1. Приведен новый метод оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники на примере космического аппарата. В основу разработанного метода положены теоретические положения метода анализа иерархий Т. Саати, который в последние два десятилетия широко применяется в теории многокритериальной оптимизации и в теории принятия решений.

2. Описанный в настоящей работе метод заполнения матрицы парных сравнений позволяет исключить существенные ошибки в подготовке исходных данных: возможная и не зависящая от экспертов несогласованность подготовленных исходных данных, обусловленная дискретностью фундаментальной шкалы Т. Саати, при необходимости может быть практически полностью устранена.

3. На основании предложенного метода может быть разработана методика оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники и методика оценки конкурентоспособности этой техники на мировом рынке.

1. *Кулешов А. В., Прокопчик Н. Г., Богомолов А. А., Абросимов Н. А.* Методический подход к оценке технического уровня универсальных стартовых комплексов ракет космического назначения с использованием обобщенного показателя. Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета. 2010. № 2. С. 198 – 203.
2. *Галькевич И. А.* Методический подход к оценке конкурентоспособности ракетно-космической техники коммерческого назначения. Электронный журнал Труды МАИ. Вып. 73. URL: http://www.mai.ru/science/trudy (дата обращения: 8.02.2017).
3. *Галькевич И. А.* Разработка инструментария определения технико-экономических параметров космических телекоммуникационных проектов: дис. на соискание ученой степени канд. экономич. наук: утв. 08.07.2015. Москва, 2015. 283 с. URL: http://search.rsl.ru/ru/record/01007987089 (дата обращения: 26.02.2017).
4. *Крянев А. В., Семенов С. С.* Метод оценки технического уровня сложных технических систем, основанных на использовании зарождающихся технологий. Управление большими системами. 2012. Вып. 39. С. 5 – 36.
5. РД 50-149-79. Методические указания по оценке технического уровня и качества промышленной продукции. Утвержден Постановлением Госстандарта 17.04.79 № 1407. 121 с. URL: http://www.vniiki.ru/document/2034566.aspx (дата обращения: 20.12.2016)
6. *Саати Т.* Принятие решений – метод анализа иерархий. Москва.: Радио и связь, 1993. 278 с.
7. *Ногин В. Д.* Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев. Вычислительная математика и математическая физика. 2004. Т. 44, № 7. С. 1259 – 1268.

Получено 10.04.2017,
в окончательном варианте 19.06.2017