УДК 621.002.56

В. Т. МАРЧЕНКО, П. П. ХОРОЛЬСКИЙ, Н. П. САЗИНА, Л. Г. ЖУКОВА

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

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

Мета роботи полягає в розробці алгоритму оцінки технічного рівня космічних апаратів дистанційного зондування Землі. Визначено склад, послідовність дій і розрахункові формули, які забезпечують отримання числового значення технічного рівня. В основу алгоритму покладено новий метод оцінки технічного рівня виробів ракетно-космічної техніки, побудований на основі методу аналізу ієрархій Т. Сааті, теорії багатокритеріальної оптимізації та прийняття рішень. Показник технічного рівня є одним з основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи, який поряд з витратами на розробку і експлуатацію визначає конкурентоспроможність новостворюваного технічного вироба або системи. Наведений алгоритм був використаний при розрахунках технічного рівня космічного апарата дистанційного зондування Землі "Січ-2М".

Практичне використання результатів роботи можливе в космічній галузі при розробці нових космічних апаратів дистанційного зондування Землі, а також їх складових частин.

Цель работы состоит в разработке алгоритма оценки технического уровня космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. Определен состав, последовательность действий и расчетные формулы, которые обеспечивают получение численного значения технического уровня. В основу алгоритма положен новый метод оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники, построенный на основе метода анализа иерархий Т. Саати, теории многокритериальной оптимизации и принятия решений. Показатель технического уровня является одним из основных технико-экономических показателей опытно-конструкторской работы, который наряду с затратами на разработку и эксплуатацию определяет конкурентоспособность вновь создаваемого технического изделия или системы. Приведенный алгоритм был использован при расчетах технического уровня космического аппарата дистанционного зондирования Земли "Січ-2М".

Практическое использование результатов работы возможно в космической отрасли при разработке новых космических аппаратов дистанционного зондирования Земли, а также их составных частей.

The aim of this work is the development of an algorithm to assess the technical level of Earth remote sensing spacecraft. The composition and sequence of actions and computational formulas for obtaining a numerical value of the technical level are determined. The algorithm is based on a new method for space hardware technical level assessment developed around Saaty's analytic hierarchy process and the multicriterion optimization and decision-making theory. The technical level index is one of the basic technical and economic indices of R&D work which, together with the development and operation cost, governs the competitive ability of a newly developed product or system. The algorithm was used in the evaluation of the technical level of the Sich-2M Earth remote sensing spacecraft.

The results of this work may be used in the space industry in the development of new Earth remote sensing spacecraft and components thereof.

Ключевые слова: *алгоритм оценки, изделие ракетно-космической техники, космический аппарат, метод анализа иерархий, многокритериальная оптимизация, технический уровень.*

Показатель технического уровня (k_{TY}) является количественной мерой оценки совершенства конструкции космического аппарата (КА) дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) и качества производимой с его применением продукции (космических снимков).

Технический уровень КА ДЗЗ определяется численными значениями тактико-технических характеристик (ТТХ) КА.

Предельное значение показателя k_{TY} =1. Если k_{TY} =1, то рассматриваемый КА является эталоном достигнутого в мире совершенства конструкции и качества космических снимков.

Показатель технического уровня (ТУ) КА ДЗЗ, наряду с рыночной ценой стандартных космических снимков и себестоимостью производства этой продукции, определяет уровень конкурентоспособности продукции рассматриваемого КА на мировом рынке космических снимков.

Приведенный ниже вычислительный алгоритм построен на основе метода, приведенного в [1, 2], и содержит состав, последовательность действий и расчетные формулы, которые позволяют получить конечный результат (численное значение показателя технического уровня) за конечное число шагов.

Алгоритм расчета показателя технического уровня КА ДЗЗ

Шаг 1. Сформировать и представить экспертам в формализованном виде (таблицы, графики и т. д.) на бумажном носителе исходные данные, которые необходимы для заполнения матриц парных сравнений.

Исходные данные должны содержать:

– описание цели создания и назначения КА;

– состав и характеристики задач ДЗЗ, для решения которых будет использоваться космическая информация, производимая оцениваемым КА;

– тактико-технические характеристики КА;

– описание источников полезного эффекта.

Шаг 2. Определить состав одиночных (частных) и групповых показателей технического уровня КА.

Метод определения приведен в [1].

Шаг 3. Определить значения групповых показателей технического уровня. Построить иерархию задачи оценки технического уровня. Объединить однородные показатели в группы. В задаче расчета показателей ТУ КА ДЗЗ имеется два уровня иерархии частных и групповых показателей. Последовательность действий приведена в [1].

Шаг 4. Заполнить матрицу парных сравнений для первой группы однородных показателей технического уровня:

Шаг 4.1 Сформировать вспомогательную бинарную матрицу $B_1 = \lfloor b_{ij} \rfloor$ для показателей (факторов) технического уровня, входящих в одну из групп.

$B_1 = \lfloor b_{ij} \rfloor$:

	фактор			
фактор	f_1	f_{kj}	…	f_{k_1}
f_1	1	b_{12}	…	b_{1k_1}
f_{kj}	b_{21}	1	…	
…	…	…	…	…
f_{k_1}	$b_{k_1 1}$		…	1

где k_1 – число показателей технического уровня в первой группе однородных показателей (факторов).

Правила заполнения бинарной матрицы B_1:

– если фактор f_i по уровню влияния на величину полезного эффекта от применения КА ДЗЗ превосходит влияние фактора f_j, то $b_{ij} = 1$, а $b_{ji} = 0$. $b_{ii} = 1$, $i = 1,2,...,k_1$: главная диагональ заполнена "1";

– если факторы f_i и f_j по уровню влияния на величину полезного эффекта равнозначны, тогда $b_{ij} = b_{ji} = 1$.

Шаг 4.2 На основании заполненной бинарной матрицы строится эквивалентная матрица $B_1^* = \left[b_{ij}^*\right]$ по следующему правилу.

За первый фактор f_1^* для матрицы B_1^* принят фактор f_m, для которого сумма элементов m-ой строки максимальна. После этого строка m из бинарной матрицы B исключается.

Определение фактора f_2^* проводится по тому же правилу, что и определение фактора f_1^*, только без учета уже использованной строки m.

Аналогично определяются все последующие факторы f_g, $g = 3,4,...,k_1$. В результате $(k_1 - 1)$ операций получим упорядоченную по степени влияния последовательность факторов $\{f_i^*\}$.

Матрица $B_1^* = \left[b_{ij}^*\right]$ будет иметь следующий вид:

$B_1^* = \left[b_{ij}^*\right]$:

	фактор			
фактор	f_1^*	f_2^*	…	$f_{k_1}^*$
f_1^*	1	1	…	1
f_2^*		1	…	
…	…	…	…	…
$f_{k_1}^*$	0	0	…	1

В силу правила построения матрицы B_1^* в первой строке все элементы матрицы $b_{ij}^* = 1$, а сумма элементов первой строки $\sum_{j=1}^{k_1} b_{ij}^* = k_1$, так как среди множества всех факторов $\{f_i^*\}$ есть хотя бы один фактор f_m, который оказывает наибольшее влияние на величину полезного эффекта. Случай, когда все факторы f_i равноценны по своему влиянию на величину полезного эффекта, т. е. когда все $b_{ij} = 1$, является тривиальным, и для него нет надобности строить матрицу парных сравнений.

В последней строке k_1 матрицы B_1^* все элементы, кроме элемента $b_{k_1 k_1}^*$, могут быть равны нулю, так как среди множества факторов $\{f_i^*\}$ есть хотя бы один фактор, который оказывает наименьшее влияние на величину полезного эффекта (ПЭ).

Шаг 4.3 Для упорядоченной по уровню влияния на показатель ПЭ совокупности факторов $\{f_i^*\}$ с использованием фундаментальной шкалы Саати построить $(k_1 \times k_1)$-матрицу парных сравнений A. Описание фундаментальной шкалы приведено в конце данного алгоритма (см. табл. 1).

$$A(a_{ij}) = \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1m_s} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2m_s} \\ & & \dots & \\ a_{m_s1} & a_{m_s2} & \dots & a_{m_sm_s} \end{pmatrix}, \qquad (1)$$

$$a_{ij} > 0, \ a_{ji} = \frac{1}{a_{ij}}, \ \max a_{ij} = 9.$$

Шаг 4.4 Проверить на согласованность матрицы A_1, B_1 и B_1^*.

Для всех строк матрицы A_1 должно выполняться условие транзитивности:

$$\begin{aligned} &a_{ij} \le a_{i(j+1)} \text{ для всех } j > i, \\ &a_{ij} \ge a_{(i+1)j} \text{ для всех } j > (i+1). \end{aligned} \qquad (2)$$

Условие (2) – условие монотонного возрастания элементов матрицы с увеличением индекса j и монотонного убывания с увеличением индекса $(i+1)$.

В то же время условие (2) – это формализованная запись отсутствия нарушения закона транзитивности среди элементов матрицы A_1. Закон транзитивности на множестве элементов a_{ij} не нарушается, если матрицы A_1, B_1 и B_1^* взаимосогласованные, т. е. для всех строк матрицы A_1 выполняется условие (2). Если условие (2) выполняется для всех строк матрицы A_1, то перейти на выполнение шага 5.

Если же в какой-то строке q имеет место нарушение условия монотонности (2), то в этой строке есть элемент $a_{qj} > a_{q(j+1)}$. Элемент a_{qj} является причиной нарушения закона транзитивности. Эксперт должен изменить значение a_{qj} на такое, чтобы выполнялось условие (2). Если же эксперт уверен, что выбранное им значение a_{qj} правильное, то в этом случае он должен уточнить матрицу B_1^* (элемент b_{qj}^*), а в матрице B_1 – элемент, соответствующий элементу b_{qj}^*. Если изменению подлежит элемент b_{qj}^* бинарных матриц B_1 и B_1^*, то необходимо вернуться к шагу 4.1. После устранения всех выявленных нарушений условия (2) сформировать окончательный вариант матрицы A_1 и перейти к шагу 5.

Шаг 5. Вычислить индекс согласованности I_{c_1} матрицы A_1.

Шаг 5.1 Вычислить максимальное значение собственного числа $\lambda_{1\max}$ матрицы A_1, исходя из следующего выражения:

$$\det|A_1 - E\lambda_1| = \begin{vmatrix} a_{11}-\lambda_1 & a_{12} & \dots & a_{1k_1} \\ a_{21} & a_{22}-\lambda_1 & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{k_11} & \dots & \dots & a_{k_1k_1}-\lambda_1 \end{vmatrix} = 0, \qquad (3)$$

где $\det[A_1 - E\lambda_1]$ – определитель; E – единичная матрица размера $k_1 \times k_1$.

Следствием раскрытия определителя $\det[A_1 - E\lambda_1]$ есть многочлен степени k_1 от параметра λ_1: $P_{k_1}(\lambda_1)$. Собственными числами λ_{i1} матрицы A_1 являются корни многочлена $P_{k_1}(\lambda_1)$, $\lambda_{\max} = \max\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{k_1}\}$.

Шаг 5.2. Вычислить индекс согласованности матрицы A_1

$$I_{C_1} = \frac{(\lambda_{\max} - k_1)}{k_1 - 1}. \qquad (4)$$

Далее:

а) если $I_{C_1} \le \gamma_{\max}$ ($\gamma_{\max}$ – допустимое предельное отклонение индекса I_C), то вычисляется вектор собственных значений α_1 матрицы A_1 путем решения системы уравнений:

$$\begin{aligned} &(1-\lambda_{1\max})\cdot\alpha_{11} + a_{12}\cdot\alpha_{21} + \ldots + a_{1k_1}\cdot\alpha_{k_1 1} = 0, \\ &a_{21}\cdot\alpha_{11} + (1-\lambda_{1\max})\cdot\alpha_{21} + \ldots + a_{2k_1}\cdot\alpha_{k_1 1} = 0, \\ &\ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \quad \ldots \\ &a_{k_1 1}\cdot\alpha_{11} + a_{k_1 2}\cdot\alpha_{21} + \ldots + (1-\lambda_{1\max})\cdot\alpha_{k_1 1} = 0. \end{aligned} \qquad (5)$$

Для вычисления собственных значений и собственных векторов матриц существуют стандартные программы. Полученные численные значения собственного вектора $\alpha = \{\alpha_i\}$ проверяются на условие:

$$\sum_{i-1}^{k_1} \alpha_{i1} = 1. \qquad (6)$$

Если условие (6) не выполняется, необходимо выполнить нормирование величин α_i путем их деления на сумму $\sum_{i=1}^{k_1} \alpha_{i1}$

$$\alpha'_{i1} = \frac{\alpha_{i1}}{\sum_{i=1}^{k_1} \alpha_{i1}}, \qquad i = \overline{1, k_1}. \qquad (7)$$

Величины α'_{i1} принимаются за значение коэффициентов влияния для первой однородной группы показателей технического уровня.

Перейти к выполнению шага 6.

б) если индекс согласованности [3] превышает допустимое значение (уровень согласованности матрицы A недостаточный), то необходимо переопределить матрицу A следующим образом:

$$\begin{aligned} &A^* = \left[a^*_{ij}\right], \\ &a^*_{ij} = c_{im} \cdot c_{mj}, \\ &c_{im} = \frac{1}{c_{mi}}, \\ &c_{mi} = \sum a_{mq} \cdot a_{qi} \cdot P_q, \\ &P_q = \frac{\sum_{l=1}^{k_1} a_{ql}}{\sum_{q=1}^{k_1}\sum_{l=1}^{k_1} a_{ql}}, \quad q, l = \overline{1, k_1}; \end{aligned} \qquad (8)$$

в) для переопределенной матрицы A определить значения весовых коэффициентов α_i, соответствующих показателям технического уровня, входящим в первую группу.

Перейти на выполнение шага 6.

Шаг 6. Выполнить действие шагов 4 и 5 для второго уровня иерархии показателей технического уровня.

В результате выполнения действий шагов 4 – 6 для каждой группы будет сформирован вектор (кортеж) коэффициентов влияния $\alpha_2\{\alpha_{12}, \alpha_{22}, \ldots, \alpha_{k2}\}$. После завершения шага 6 перейти к шагу 7.

Шаг 7. Сформировать группу близких по функциональному назначению к рассматриваемому КА ДЗЗ спутников с соответствующими им тактико-техническими характеристиками (ТТХ).

Шаг 8. На основании ТТХ КА-аналогов и ТТХ рассматриваемого КА построить гипотетический базовый образец с наилучшими тактико-техническими характеристиками, выбранными из множества ТТХ представленных спутников. Так как каждый спутник является уникальным, то необходимо привести к единой технической базе такие важные характеристики, как пространственное разрешение и суточная производительность. За параметр пространственного разрешения целесообразно принять полусумму наилучших разрешений панхроматического канала и ближайших к нему спектральных каналов. За параметр "суточная производительность" принять среднесуточную производительность в режиме Pan+MS (как наиболее востребованный режим для решения целевых задач ДЗЗ). Различие между КА по составу приборов ДЗЗ будет учтено в параметре "общее число спектральных каналов".

Шаг 9. Для каждого КА из группы, сформированной на шаге 7, и каждой группы однородных показателей технического уровня определить численное значение группового показателя по формуле:

$$P_{S\Gamma} = \alpha_{1S} \cdot \frac{P_{1S}}{P_{1S\text{б}}} + \alpha_{2S} \cdot \frac{P_{2S}}{P_{2S\text{б}}} + \ldots + \alpha_{nS} \cdot \frac{P_{nS}}{P_{nS\text{б}}}, \quad S = 1, 2, \qquad (9)$$

где $P_{S\Gamma}$ – групповой показатель для S-ой группы однородных показателей; P_{1S} – первый показатель технического уровня, входящий в S-ую группу; P_{nS} – последний показатель технического уровня, входящий в S-ую группу; $P_{i\text{б}}$ – значение базовых показателей гипотетического КА; α_{iS} – весовые коэффициенты для S-ой группы однородных показателей.

Итоговое значение технического уровня вычисляется для каждого КА по формуле:

$$k_{\text{ТУ}k} = \alpha_{1k} \cdot \frac{P_{1k}}{P_{1k\text{б}}} + \alpha_{2k} \cdot \frac{P_{2k}}{P_{2k\text{б}}} + \ldots + \alpha_{mk} \cdot \frac{P_{mk}}{P_{mk\text{б}}}, \qquad (10)$$

где α_{ik} – весовые коэффициенты, соответствующие группе показателей, определяющих непосредственно технический уровень КА ДЗЗ; P_{ik} – показатели, непосредственно определяющие технический уровень КА; $P_{ik\text{б}}$ – показатели гипотетического КА, которые используются для оценки технического уровня КА; m – число показателей, входящих в группу однородных показателей непосредственной оценки технического уровня КА.

Примечание: В случае если в формулах (4) и (5) появится множитель $\frac{P_{iS}}{P_{iS\,б}} > 1$ или $\frac{P_{ik}}{P_{ik\,б}} > 1$, то этот множитель следует возвести в степень "-1".

Полученные в результате вычисления по формуле (5) параметры $k_{ТУk}^{(q)}$ представляют собой технический уровень q-го КА по отношению к характеристикам гипотетического аппарата, индекс q определяет номер КА в группе.

Шаг 10. Определить технический уровень КА по отношению к лучшему КА из группы спутников-аналогов по назначению. В качестве лучшего КА принимается космический аппарат, у которого $k_{ТУk}^{(q)}$ максимально, обозначим как $k_{ТУk}^{(m)}$, где $k_{ТУk}^{(m)}$ – мировой уровень КА ДЗЗ среди множества спутников, однородных по функциональному назначению.

В результате выполнения расчетов в соответствии с приведенным алгоритмом получим ряд значений $k_{ТУk}^{*} = \left\{k_{ТУk}^{*(1)}, k_{ТУk}^{*(2)}, \ldots, k_{ТУk}^{*(Q)}\right\}$, $k_{ТУk}^{*(q)} = \frac{k_{ТУk}^{(q)}}{k_{ТУk}^{(m)}}$; $q = \overline{1,Q}$. Значение $k_{ТУk}^{*}$, соответствующее рассматриваемому КА, будет оценкой ТУ данного КА в группе аналогов по функциональному назначению.

Таблица 1 – Фундаментальная шкала относительной важности Т. Саати

Отн. важн. (a_{ij})	Уровень относительного превосходства влияния на показатель эффективности (ПЭ) первого фактора q_i над вторым q_j	Пояснения
1	Равная важность	Оба фактора вносят одинаковый вклад в показатель ПЭ
2	Слабое превосходство	Незначительное превосходство влияния на показатель ПЭ i-го фактора по сравнению с влиянием j-го фактора
3	Промежуточный уровень между слабым и средним превосходством	Промежуточное значение между слабым и средним превосходством
4	Среднее превосходство	Среднее превосходство влияния на показатель ПЭ первого фактора над вторым
5	Промежуточный уровень между средним и сильным превосходством	
6	Сильное превосходство	Сильное превосходство влияния на показатель ПЭ первого фактора над вторым
7	Промежуточный уровень превосходства между сильным и очень сильным	

Отн. важн. (a_{ij})	Уровень относительного превосходства влияния на показатель эффективности (ПЭ) первого фактора q_i над вторым q_j	Пояснения
8	Очень сильное превосходство	Очень сильное превосходство влияния на показатель ПЭ первого фактора над вторым
9	Абсолютное превосходство	Нет никаких сомнений, что влияние на показатель ПЭ первого фактора очень сильное по сравнению со вторым

Приведенный алгоритм был использован при расчетах технического уровня космического аппарата дистанционного зондирования Земли "Січ-2М".

Выводы

1. Предложенный алгоритм оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники разработан на основе теоретических положений метода анализа иерархий Т. Саати. Этот метод в последние десятилетия широко применяется в теории многокритериальной оптимизации и в теории принятия решений.

2. В отличие от существующих методов количественной оценки технического уровня, в основе которых лежат балльные экспертные оценки значимости технических характеристик промышленной продукции, в предложенном алгоритме используются показатели относительной важности технических характеристик исходя из их влияния на принятый критерий эффективности. Относительная важность определяется на основе фундаментальной шкалы Т. Саати исходя из формального описания критерия эффективности.

3. Актуальность задачи повышения уровня достоверности количественной оценки технического уровня обусловлена тем, что технический уровень является определяющим фактором конкурентоспособности.

4. Разработанный алгоритм оценки технического уровня новых образцов ракетно-космической техники прошел апробацию при разработке технического проекта космического аппарата "Січ-2М".

5. Продукт реализован в виде программного кода на языке Delphi в среде ОС Windows.

1. *Марченко В. Т, Петляк Е. П. , Сазина Н. П., Хорольский П. П.* О новом методе оценки технического уровня космических аппаратов дистанционного зондирования Земли. *Техническая механика,* 2017. №2. С. 41–50.
2. *Марченко В. Т, Петляк Е. П* Новый метод оценки технического уровня изделий ракетно-космической техники. Космические технологии: настоящее и будущее: 6-я международная конференция, май, 2017 г., Днепр: сборник докладов. Днепр, 2017. С. 31–32.
3. *Саати Т.* Принятие решений – метод анализа иерархий. Москва.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Получено ,
в окончательном варианте 13.12.2017