УДК 621.002.56 https://doi.org/10.15407/itm2019.04.092

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

КОЛИЧЕСТВЕННАЯ ОЦЕНКА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ КОСМИЧЕСКИХ СИСТЕМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ И СИСТЕМ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ: МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД

[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

Мета роботи – представлення розробленого Інститутом технічної механіки Національної академії наук України і Державного космічного агентства України за участю Державного підприємства "КБ "Південне" методичного підходу до оцінки технічного рівня космічних систем дистанційного зондування Землі і систем геостаціонарного супутникового зв'язку (КСДЗЗ і СГСС), який дозволяє істотно підвищити якість розрахунків та знизити вплив суб'єктивного фактора при визначенні значення показника технічного рівня. Це досягається за рахунок високого рівня формалізації процесу кількісної оцінки технічного рівня і застосування математичних методів, які використовуються в сучасній теорії прийняття рішень.

Показник технічного рівня – це кількісна міра оцінки досконалості конструкції виробу і якості продукції (послуг), вироблених з його застосуванням. Показник технічного рівня є одним з основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи. Значення показника технічного рівня є визначальним (поряд з витратами на створення і експлуатацію) фактором конкурентоспроможності новостворюваної космічної системи.

Ідентичність технічної структури КСДЗЗ і СГСС, особливо платформ космічних апаратів цих систем, дозволила побудувати єдиний методичний підхід до розв'язання завдань кількісної оцінки показника технічного рівня для цих систем. Відмінності будуть мати місце тільки в деталях алгоритмів обчислення показника технічного рівня. Основна суть відмінності алгоритмів полягає у виборі оптимального складу часткових показників технічної ефективності для кожної космічної системи.

В основу методичного підходу покладена математична модель методу аналізу ієрархій Т. Сааті, доповнена авторами статті математичними моделями для максимально можливого врахування технічних особливостей КСДЗЗ і СГСС, а також забезпечення контролю помилок і протиріч у судженнях експертів, які приймають участь у підготовці вихідних даних щодо невимірних або важковимірних техніко-економічних показників КСДЗЗ і СГСС.

На основі наведеного методичного підходу може бути створена галузева методика кількісної оцінки технічного рівня КСДЗЗ і СГСС, яка відповідає вимогам сьогоднішнього дня.

Ключові слова: *кількісна оцінка технічного рівня, космічна система дистанційного зондування Землі, космічний апарат, метод аналізу ієрархій, ракетно-космічна техніка, система геостаціонарного супутникового зв'язку, технічний рівень.*

Цель работы – представление разработанного Институтом технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины с участием Государственного предприятия "КБ "Южное" методического подхода к оценке технического уровня космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной спутниковой связи (КСДЗЗ и СГСС), позволяющего существенно повысить качество расчетов и снизить влияние субъективного фактора при определении значения этого показателя. Это достигается за счет высокого уровня формализации процесса количественной оценки технического уровня и применения математических методов, которые используются в современной теории принятия решений.

Показатель технического уровня – это количественная мера оценки совершенства конструкции изделия и качества производимой с его применением продукции (услуг). Показатель технического уровня является одним из основных технико-экономических показателей опытно-конструкторской работы. Значение показателя технического уровня является определяющим (наряду с затратами на создание и эксплуатацию) фактором конкурентоспособности вновь создаваемой космической системы.

Идентичность технической структуры КСДЗЗ и СГСС, особенно платформ космических аппаратов этих систем, позволила построить единый методический подход к решению задач количественной оценки показателя технического уровня для этих систем. Отличия будут иметь место только в деталях алгоритмов вычисления показателя технического уровня. Основная суть отличия алгоритмов заключается в выборе оптимального состава частных показателей технической эффективности для каждой космической системы.

В основу методического подхода положена математическая модель метода анализа иерархий Т. Саати, дополненная авторами статьи математическими моделями для максимально возможного учета технических особенностей КСДЗЗ и СГСС и обеспечения контроля ошибок и противоречий в суждениях экспертов, принимающих участие в подготовке исходных данных по неизмеримым или трудноизмеримым технико-экономическим показателям КСДЗЗ и СГСС.

На основе приведенного методического подхода может быть создана отвечающая требованиям сегодняшнего дня отраслевая методика количественной оценки технического уровня КСДЗЗ и СГСС.

Ключевые слова: *количественная оценка технического уровня, космическая система дистанционного зондирования Земли, космический аппарат, метод анализа иерархий, ракетно-космическая техника, система геостационарной спутниковой связи, технический уровень.*

This paper presents a methodological approach to assessing the technical level of space systems of Earth remote sensing (SSERSs) and geostationary satellite communication systems (GSCSs) developed by the Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Sciences of Ukraine and the State Space Agency of Ukraine together with Yuzhnoye State Design Office. The approach allows one to substantially increase calculation quality and reduce the human factor effect in the determination of this index. This is achieved due to a high level of formalization of the technical level quantification process and the use of mathematical methods employed in the modern decision making theory.

The technical level index is a qualitative measure of the perfection of a product and the quality of the products (services) produced with its use. The technical level index is one of the key techno-economic indices of development work. The value of the technical level index is a determining factor (together with the development and operation costs) of the competitiveness of a newly developed space system.

The identity of the SSERS and GSCS technical structure, especially that of the platforms of SSERS and GSCS spacecraft, made it possible to construct a unified methodological approach to solving the problem of quantitative assessment of the SSERS and GSCS technical level index. The difference will only be in details of technical level calculation algorithms. The major difference is in the choice of an optimal set of particular technical efficiency indices for each space system.

The methodological approach is based on a mathematical model of Saaty's analytic hierarchy process extended by the authors to include mathematical models for accounting as fully as possible for the SSERS and GSCS technical features and checking for errors and contradictions in the judgments of the experts who take part in the preparation of basic data on immeasurable or hard-to-measure SSERS and GSCS techno-economic indices.

Based on the presented methodological approach, one may develop a state-of the-art sectorial methodology for SSERS and GSCS technical level quantification.

Keywords: *technical level quantification, space system of Earth remote sensing, spacecraft, analytic hierarchy process, space-rocket hardware, geostationary satellite communication system, technical level.*

Введение. Показатель технического уровня (ТУ) является одним из основных технико-экономических показателей опытно-конструкторской работы (ОКР) по созданию образцов космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной спутниковой связи (КСДЗЗ и СГСС). Наряду с затратами на разработку и эксплуатацию КСДЗЗ и СГСС показатель ТУ определяет конкурентоспособность нового изделия на мировом рынке ракетно-космической продукции и услуг.

Показатель ТУ является количественной мерой оценки совершенства конструкции изделия и качества производимой с его применением продукции (услуг).

Оценка ТУ должна проводиться в процессе выполнения ОКР как Заказчиком КСДЗЗ и СГСС, так и Головным разработчиком этих систем.

Заказчик проводит оценку ТУ в целях контроля соответствия создаваемого образца ракетно-космической техники (РКТ) последним достижениям отечественной и зарубежной науки и техники.

Головной разработчик обязан периодически проводить расчеты по оценке ТУ создаваемого образца РКТ, т. к. он несет ответственность не только за выполнение требований тактико-технического задания, но и за обеспечение требуемого ТУ разрабатываемого изделия.

На практике Заказчик изделия РКТ расчеты по количественной оценке ТУ вообще не проводит, а разработчики РКТ выполняют оценку чисто формально с использованием простых приемов, которые применяются для оценки качества потребительской промышленной продукции, а следовательно, результаты этих расчетов не могут считаться корректными (адекватными).

Основной причиной такого положения дел является отсутствие в Украине методического обеспечения для проведения расчетов по количественной оценке ТУ космических систем ДЗЗ и систем ГСС.

1. Существующие методические подходы к решению задачи по количественной оценке ТУ наукоемких и технически сложных изделий

Задача количественной оценки ТУ наукоемких и технически сложных изделий по-прежнему остается проблемной задачей [1 – 6]. Такая оценка в настоящее время выполняется методами экспертных оценок:

– прямым методом, когда эксперты непосредственно определяют значение показателя ТУ;

– методом балльных оценок;

– ранжированием частных показателей технического уровня;

– бинарным попарным сравнением частных показателей технического уровня.

Перечисленные методические подходы достаточно просты в использовании, однако дают значение показателя ТУ, существенно зависящее от субъективных факторов.

Еще в 80-е годы XX-века выполнялась (в бывшем СССР) комплексная научно-исследовательская работа (НИР) "Уровень", конечной целью которой была разработка методик (методических указаний) по оценке технического уровня изделий РКТ.

Работы по НИР "Уровень" возглавлялись Центральным научно-исследовательским институтом машиностроения (ЦНИИМаш) и 4-м Центральным научно-исследовательским институтом Министерства обороны (ЦНИИ МО). Разработанные в рамках НИР "Уровень" методические материалы не соответствуют требованиям сегодняшнего дня, т. к. базировались на положениях устаревшего нормативного документа "РД 50-149-79. Методические указания по оценке технического уровня и качества машиностроительной продукции".

Что касается Украины, то в стране вообще отсутствуют какие-либо методические материалы по оценке ТУ изделий РКТ.

Основной задачей данной статьи является изложение разработанного Институтом технической механики Национальной академии наук Украины и Государственного космического агентства Украины (ИТМ НАНУ и ГКАУ) с участием Государственного предприятия «Конструкторское бюро «Южное» (ГП "КБ "Южное") методического подхода к оценке ТУ космических систем ДЗЗ и систем ГСС, позволяющего существенно повысить качество расчетов и снизить влияние субъективного фактора на значение показателя ТУ.

Это достигается за счет высокого уровня формализации процесса количественной оценки ТУ и применения математических методов, которые используются в современной теории принятия решений.

Полностью исключить участие экспертов возможно только в случае, если системные аналитики смогут построить корректную (адекватную) функцию зависимости величины полезного эффекта (PE), который может быть получен в процессе использования (эксплуатации) создаваемого образца, от значений его тактико-технических характеристик (ТТХ): $PE = Q(TTX)$.

В этом случае численные значения показателя технического уровня создаваемого образца определяются следующим образом:

а) базовый (эталонный) образец космической системы реально существует

$$k_{ТУ_r} = \frac{Q(TTX_r)}{Q(TTX_Б)};$$

б) в случае, когда базовый образец является гипотетическим, т. е. его ТТХ определены как наилучшие технические характеристики из группы рассматриваемых образцов функциональных аналогов создаваемых образцов КСДЗЗ и СГСС:

$$k_{ТУ_r} = \frac{k^*_{ТУ_r}}{k^*_{ТУ_Б}}, \ r = \overline{1,R}, \ k^*_{ТУ_r} = \frac{Q(TTX_r)}{Q(TTX_Б)}, \ k^*_{ТУ_Б} = \max\left\{\frac{Q(TTX_r)}{Q(TTX_Б)}\right\},$$

где $Q(TTX_r)$ – величина полезного эффекта, который может быть получен от применения (эксплуатации) r-го образца КСДЗЗ и СГСС; $Q(TTX_Б)$ – величина полезного эффекта, который может быть получен от применения (эксплуатации) базового образца КСДЗЗ и СГСС; R – число сравниваемых образцов КСДЗЗ и СГСС.

Для удобства создаваемому образцу КСДЗЗ и СГСС целесообразно присвоить индекс $r = 1$.

На практике, для подавляющего большинства образцов КСДЗЗ и СГСС построить явную аналитическую функцию $Q(TTX)$ не представляется возможным в силу ее нелинейности и наличия факторов неопределенности. Поэтому полностью исключить участие экспертов в процессе оценки ТУ образцов КСДЗЗ и СГСС практически невозможно.

Стратегическая важность и особенности РКТ (наукоемкость, высокотехнологичность, очень высокая техническая сложность, функционирование в условиях космического пространства, неремонтируемость, очень высокая стоимость ОКР и т. д.) обуславливают необходимость разработки нового методического подхода к оценке технического уровня создаваемых образцов КСДЗЗ и СГСС. Этот подход должен обеспечивать существенное снижение влияния субъективного фактора на численное значение показателя ТУ создаваемой РКТ.

Как показывает практический опыт, добиться снижения влияния субъективного фактора на конечные результаты, для такого класса задач, можно только путем максимально возможной формализации процесса решения задачи и в первую очередь:

– придания рассматриваемой задаче четкой математической формулировки;

– описания каждого этапа решения задачи в терминах абстрактных математических структур;

– сведения участия экспертов только в части подготовки неизмеримых или трудноизмеримых исходных данных, необходимых для проведения расчетов;

– применения автоматического (компьютерного) логико-математического контроля наличия ошибок или противоречий в суждениях экспертов.

2. Вербальная постановка задачи

Задано:

а) цель, назначение и численные значения основных ТТХ создаваемой КСДЗЗ и СГСС, космическим сегментом которой является космический аппарат (КА):

$$TTX = \{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, ..., \tau_{1M}\} = \{\tau_{1m}\}, \ m = \overline{1,M};$$

б) группа изделий-аналогов (по функциональному назначению) с известными ТТХ: $\{\tau_{rm}\}$, $r = \overline{2,R}$, где $\{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, ..., \tau_{1M}\}$ – множество основных ТТХ создаваемой КСДЗЗ или СГСС; $\{\tau_{rm}\}$ – множество основных ТТХ r-го изделия функционального аналога; R – общее количество сравниваемых по ТУ КСДЗЗ и СГСС; M – общее число основных ТТХ.

Требуется:

а) сформулировать (разработать) методический подход к решению задачи количественной оценки ТУ КСДЗЗ и СГСС, позволяющий существенно снизить влияние субъективного фактора на численное значение показателя ТУ. Построить укрупненный вычислительный алгоритм;

б) построить детальный вычислительный алгоритм расчета показателя ТУ КСДЗЗ и СГСС, разработать для этого алгоритма соответствующее программное обеспечение, выполнить компьютерные расчеты для заданных наборов исходных данных.

Результаты расчетов должны содержать:

– численное значение показателя ТУ;

– заключение о техническом уровне создаваемой РКТ в лингвистических терминах: выше мирового; выше среднемирового; равный среднемировому; ниже среднемирового; ниже мирового уровня.

Примечание. Описание решения задачи б) не может быть приведено в данной статье из-за ограничений по ее объему, поэтому является предметом отдельных статей.

Особенности КСДЗЗ и СГСС, которые должны быть учтены при разработке методического подхода:

а) показатель ТУ КСДЗЗ и СГСС полностью определяется основными техническими характеристиками, находящегося в орбитальном полете космического аппарата этих систем. Наземный сегмент КСДЗЗ и СГСС представляет собой комплекс радиотехнических и программно-технических средств, которые функционируют в земных условиях, постоянно технически обслуживаются и ремонтируются, а также являются стандартными или незначительно модифицируемыми изделиями;

б) тождественные по функциональному назначению КА-аналоги создаваемого КА СГСС могут существенно отличаться по абсолютной информативности (Мбит/с), массе, количеству установленных на борту спутника транспондеров (связная аппаратура) и способу выведения КА СГСС на геостационарную орбиту (прямое выведение или через промежуточную опорную орбиту).

3. Математическая постановка задачи

Показатель ТУ изделий народнохозяйственного назначения эквивалентен показателю качества этих изделий, в то же время показатель ТУ специальных изделий двойного применения тождественен показателю относительной технической эффективности, а для изделий военного назначения показатель ТУ эквивалентен вероятности выполнения боевой задачи.

Так как КСДЗЗ и СГСС относятся к классу специальных технических систем двойного назначения, то их частные показатели технического уровня совпадают с частными показателями технической эффективности, поэтому вместо термина "частные показатели ТУ" далее будем использовать более привычный разработчикам РКТ термин "частные показатели технической эффективности".

Находящиеся в орбитальном полете КА (производители космической продукции и услуг связи) выполняют функцию сбора космической информации ДЗЗ или обеспечения бесперебойной связи между объектами, расположенными на Земле. Поэтому перечень его частных показателей технической эффективности состоит из двух групп:

– показатели, определяющие качество космической продукции (услуг) (q_{α});

– показатели, характеризующие совершенство конструкции КА (q_{β}).

Такое разделение позволяет существенно упростить математическую модель расчета показателей ТУ.

Задача количественной оценки показателя ТУ КСДЗЗ и СГСС ($K_{ТУ}$) относится к классу многокритериальных задач, которые, как правило, решаются методом аддитивной свертки частных критериев (частных показателей технической эффективности).

В пользу рациональности использования данного метода для количественной оценки ТУ КСДЗЗ и СГСС свидетельствуют следующие факты:

– показатель технического уровня $K_{ТУ}$ является относительной безмерной величиной;

– частные показатели технической эффективности q_{α} и q_{β} являются независимыми (не коррелируют между собой).

Исходя из приведенных положений, математическая модель для расчета показателя ТУ имеет следующий вид:

$$K_K = \sum_i \alpha_i \cdot \left(\frac{q_{\alpha_i}}{q^{*}_{\alpha_i}} \right)^{\delta_i}, \quad \sum_i \alpha_i = 1, \;\; i = \overline{1, n_{\alpha}}\,; \tag{1}$$

$$K_{ТУ} = \sum_i \beta_i \cdot \left(\frac{q_{\beta_i}}{q^{*}_{\beta_i}} \right)^{\delta_i}, \quad \sum_i \beta_i = 1, \;\; i = \overline{1, n_{\beta}}\,; \tag{2}$$

$$\begin{aligned} q^{*}_{\alpha_i} &= \max\{q_{\alpha_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\alpha_i}}{q^{*}_{\alpha_i}} \le 1, \text{ при этом } \text{¢}_i = 1; \\ q^{*}_{\alpha_i} &= \min\{q_{\alpha_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\alpha_i}}{q^{*}_{\alpha_i}} > 1, \text{ при этом } \text{¢}_i = -1; \\ q^{*}_{\beta_i} &= \max\{q_{\beta_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\beta_i}}{q^{*}_{\beta_i}} \le 1, \text{ при этом } \text{¢}_i = 1; \\ q^{*}_{\beta_i} &= \min\{q_{\beta_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\beta_i}}{q^{*}_{\beta_i}} > 1, \text{ при этом } \text{¢}_i = -1; \end{aligned} \tag{3}$$

где K_K – показатель качества космической продукции (услуг); $q_{\alpha_{ir}}$ – частный i-й показатель технической эффективности r-й КСДЗЗ и СГСС, определяющий качество продукции, услуг; $q^{*}_{\sim_i}$ – частный i-й показатель технической эффективности эталонного (базового) изделия КСДЗЗ и СГСС, определяющий качество продукции (услуг); $q_{\beta_{ir}}$ – частный i-й показатель технической эффективности r-й КСДЗЗ и СГСС, определяющий совершенство конструкции КА системы; q^*_i – частный i-й показатель технической эффективности эталонного (базового) изделия КСДЗЗ и СГСС, определяющий совершенство его конструкции; $\sim_i$ – нормируемый показатель степени влияния i-го показателя качества продукции (услуг) на величину полезного эффекта; $_i$ – нормируемый показатель степени влияния i-го показателя совершенства конструкции на величину полезного эффекта.

Таким образом, сложная задача (1) – (3) сведена к решению двух более простых задач:

– определение состава и значений параметров $q_{\sim_i}$ и $q_{\ _i}$;

– определение значений показателей влияния $\sim_i$ и $_i$.

4. Методический подход к определению состава показателей технической эффективности для расчета показателя ТУ КСДЗЗ и СГСС

Состав входящих в систему уравнений (1) – (3) параметров $\{q_{\sim_i}\}$ и $\{q_{\ _i}\}$ должен определяться системными аналитиками (а не экспертами) из числа разработчиков КА исходя из назначения и цели создания КСДЗЗ и СГСС, а также с учетом результатов анализа, имеющихся фактических технико-экономических показателей по изделиям-аналогам.

Входящие в систему уравнений (1) – (3) параметры q_{α_i} и $q_{\ _i}$ должны удовлетворять следующим основным требованиям:

– являться функциональными характеристиками КА, которые оказывают значимое влияние по результатам применения КСДЗЗ и СГСС по назначению;

– параметры должны быть взаимонезависимыми;

– учитывать различие КА и КА-аналогов СГСС по массе, числу транспондеров и способу выведения спутника на геостационарную орбиту.

Конечным результатом работы по определению состава параметров $\{q_{\alpha_i}\}$ и $\{q_{\beta_i}\}$ должно быть формальное описание ожидаемого полезного эффекта от применения КА по назначению и логическая схема решения задачи количественной оценки ТУ КСДЗЗ и СГСС.

Логическая схема решения задачи и технико-экономические показатели по изделиям-аналогам являются исходными данными для экспертов при формировании матрицы парных сравнений (описание матриц приведено в п. 5).

Примеры построения логической схемы решения задачи количественной оценки ТУ приведены на рис. 1 (для КСДЗЗ) и рис. 2 (для СГСС).

Физическое содержание показателей (параметров), приведенных на рис. 1, следующее:

$ПР$ – производительность КА; $K_{СН}$ – технический уровень (качество) снимков, $K_{СН} = K_K$; $Г_С$ – гарантированный срок службы; $П_С$ – периодичность повторяемости съемки; $P_{ПР}$ – пространственное разрешение; $P_{РМ}$ – радиометрическое разрешение; N_k – число спектральных каналов; σ_k – погрешность определения координат; ω_k – погрешность ориентации КА по угловым скоростям; $O_{СШ}$ – отношение сигнал/шум в спектральных каналах; $\{\sim_i\}, \{\ _i\}$ – множество весовых коэффициентов, определяемых по специальному алгоритму.

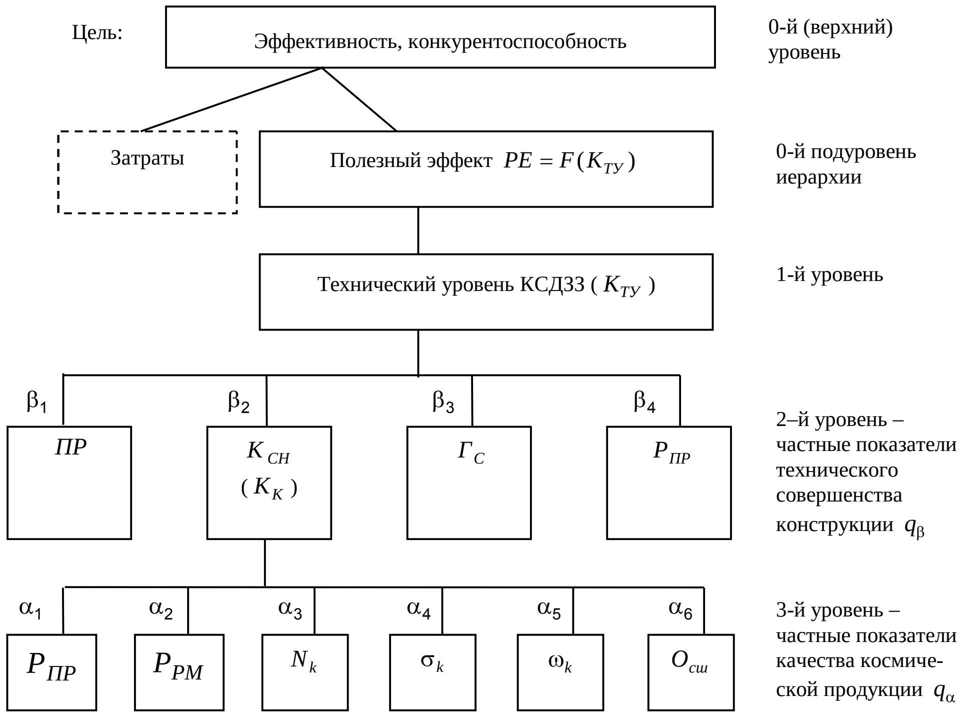

Рис. 1 – Формальное описание полезного эффекта и логическая схема решения задачи количественной оценки ТУ КСДЗЗ

Структура полезного эффекта от использования КСДЗЗ по назначению имеет вид:

$$PE(КС\ ДЗЗ) = E_К + E_Н + E_{НБО} + E_{ГУ} + E_{ЭК} + E_Т\ ,$$

где $E_К$ – коммерческий экономический эффект; $E_Н$ – непрямой экономический эффект за счет использования космических технологий в сфере хозяйственной деятельности; $E_{НБО}$ – экономические выгоды (предотвращенные убытки) за счет использования космических технологий в сфере национальной безопасности и обороны; $E_{ГУ}$ – экономические выгоды (предотвращенные убытки) за счет использования космических технологий при принятии государственных управленческих решений; $E_{ЭК}$ – экономические выгоды (предотвращенные убытки) за счет использования космической информации в сфере экологии; $E_Т$ – экономический эффект за счет трансферта созданных технологий в отрасли промышленности.

Физическое содержание показателей (параметров), приведенных на рис. 2, следующее:

$q_{ПН}$ – удельный вес полезной нагрузки (аппаратуры связи) в общей массе находящегося на стационарной орбите КА связи; $q_{ЭО}$ – удельная энергообеспеченность аппаратуры связи (транспондеров); $T^{пр}_{САС}$ – приведенный срок активного существования КА на орбите; $q_{ИН}$ – удельная информативность спутника связи; δ_0 – точность определения углового положения КА на орбите; δ_C – точность угловой стабилизации КА на орбите; $K_{СВ}$ – показатель качества связи, $K_{СВ} = K_К$; D – добротность антенных систем, установленных на борту СГСС; G – коэффициент усиления антенной системы; K – шумовая температура в приемном тракте антенной системы; EIM – эквивалентная изотропно излучаемая мощность антенной системы; $P_{ЭМ}$ – излучаемая электрическая мощность антенной системы; $P_{БИ}$ – вероятность ошибки на 1 бит информации.

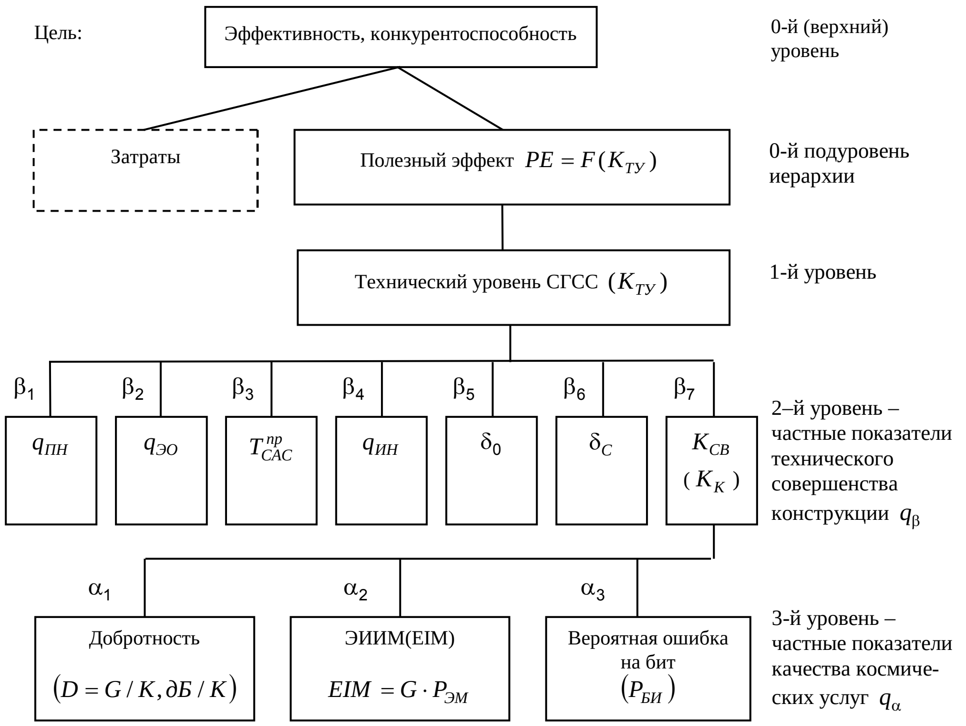

Рис. 2 – Формальное описание полезного эффекта и логическая схема решения задачи количественной оценки ТУ СГСС

Структура полезного эффекта от использования СГСС по назначению имеет вид:

$$PE(СГСС) = E_K + E_{НБО} + E_T ,$$

где E_K – коммерческий экономический эффект; $E_{НБО}$ – экономические выгоды (предотвращенные убытки) за счет использования космических технологий в сфере национальной безопасности и обороны; E_T – экономический эффект за счет трансферта созданных технологий в отрасли промышленности.

5. Методический подход к расчету показателей степени влияния частных показателей технической эффективности на величину полезного эффекта от использования КСДЗЗ и СГСС по назначению

Корректное (точное или близкое к точному) определение показателей степени влияния $\{\sim_i\}$ и $\{\ _i\}$ до настоящего времени представляет собой трудноразрешимую задачу.

Математические задачи вида (1) – (3) достаточно часто встречаются в современной теории принятия решений. Среди множества существующих методов решения такой задачи наиболее математически обоснованным и наиболее часто используемым является метод анализа иерархий Т. Саати [7], в составе которого содержится метод парных сравнений. Поэтому в основу предлагаемого методического подхода к решению задачи количественной оценки ТУ КСДЗЗ и СГСС положен метод парных сравнений. Применительно к рассматриваемой задаче метод Т. Саати модифицирован с целью максимально возможного учета особенностей КСДЗЗ и СГСС и обеспечения существенного снижения субъективного фактора (экспертов) на численное значение показателя ТУ КСДЗЗ и СГСС.

5.1. Суть метода Т. Саати [7]

Суть метода заключается в попарном сравнении факторов, влияющих на значение общего для них критерия высшего уровня иерархии с использованием специальной фундаментальной шкалы относительного влияния частных критериев (факторов) на значения критерия более высокого уровня. Психологически для эксперта это значительно легче, чем оценивать влияние сразу всех частных факторов. Свойство сравнивать предметы по парам присуще человеческому мозгу независимо от количества предметов, попавших в его поле зрения. Таким образом, результаты парных сравнений более близки по точности к реальным значениям.

Результаты парных сравнений представляются матрицей $A(a_{ij})$. Здесь a_{ij} является отношением степени влияния (w_i) i-го фактора на значение критерия белее высокого уровня к соответствующему влиянию (w_j) j-го фактора.

При этом должно выполняться условие

$$\left(a_{ji}=\frac{w_i}{w_j}\right) \text{ и } \left(a_{ji}=\frac{1}{a_{ij}}\right),\ i,j=\overline{1,n},$$

где n – количество факторов (частных показателей технической эффективности).

Описание функциональной шкалы Т. Саати представлено в табл. 1.

Согласно Т. Саати, оценкой корректности действий экспертов при формировании матрицы $A(a_{ij})$ является так называемый индекс согласованности.

Превышение допустимого значения индекса согласованности указывает на наличие в матрице $A(a_{ij})$ ошибок (кардинальных, логических). В этих случаях эксперт (группа экспертов) должен(ы) повторно составить матрицу парных сравнений.

Формула индекса согласованности обнаруживает наличие ошибок в матрице $A(a_{ij})$, но не позволяет установить, какие элементы матрицы являются ошибочными.

С целью устранения этого недостатка метод Т. Саати модернизирован путем включения в него дополнительных функций.

Таблица 1 – Фундаментальная шкала относительной важности Т. Саати

Отн. важн. (a_{ij})	Уровень относительной важности (превосходства первого фактора q_i над вторым q_j)	Пояснения
1	Равная важность	Оба фактора вносят одинаковый вклад в показатель эффективности
2	Слабое превосходство	Незначительное превосходство влияние на показатель ПЭ i-го фактора по сравнению с j-м фактором
3	Промежуточный уровень между слабым и средним превосходством	Промежуточное значение между слабым влиянием 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	
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

5.2. Способ построения матрицы парных сравнений

Парные сравнения выполняет эксперт или группа экспертов под контролем ведущего эксперта (модератора), используя подготовленную системными аналитиками технико-экономическую информацию по КСДЗЗ и СГСС (согласно п. 4). Используя функциональную шкалу Т. Саати, эксперты формируют первоначальный вариант матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$.

Если первоначальная матрица $A^0(a^0{}_{ij})$ не содержит кардинальных или логических ошибок, то работа эксперта (экспертов) на этом завершается.

Если же в результате автоматического контроля в матрице $A^0(a^0{}_{ij})$ обнаружены ошибки, то эксперты должны устранить указанные ошибки. Дальнейшего участия в определении показателя ТУ эксперты не принимают.

5.3. Метод поиска возможных грубых ошибок в матрице парных сравнений

На основе сформированной экспертами первоначальной матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ автоматически (компьютерной программой) строятся две матрицы $B^0(b^0{}_{ij})$ и $B(b_{ij})$.

Матрица $B^0(b^0{}_{ij})$ формируется по правилу $b_{ij}^0 = 1$, если $a^0{}_{ij} \ge 1$, иначе $b_{ij}^0 = 0$.

Матрицам $A^0(a^0{}_{ij})$ и $B^0(b^0{}_{ij})$ соответствует кортеж номеров строк $i^0 = \langle 1,2,...,n \rangle$ и кортеж наборов столбцов $j^0 = \langle 1,2,...,n \rangle$.

На основании матрицы $B^0(b^0{}_{ij})$ формируется бинарная матрица $B(b_{ij})$ путем упорядочивания строк этой матрицы по убыванию суммы элементов строк матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ и столбцов по возрастанию сумм элементов столбцов матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$.

Кортеж строк матрицы $B(b_{ij})$ после этой операции будет иметь вид $i = \langle i_1, i_2, ..., i_n \rangle$, а кортеж столбцов – $j = \langle j_1, j_2, ..., j_n \rangle$. Элементы матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ не содержат грубых ошибок, если выполняется условие:

$$b_{ij} = 1 \text{ для всех } j \geq i \text{ и}$$
$$b_{ij} = 0 \text{ для всех } j < i. \qquad (4)$$

Элементы матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ будут содержать грубые ошибки, если условие (4) не выполняется.

5.4. Метод поиска возможных логических ошибок в матрице парных сравнений

Строки и столбцы матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ необходимо упорядочить в соответствии со строками и столбцами бинарной матрицы $B(b_{ij})$. В результате получим матрицу $A(a_{ij})$ $i = \langle i_1, i_2, ..., i_n \rangle$, $j = \langle j_1, j_2, ..., j_n \rangle$.

Наличие возможных логических ошибок в матрице $A(a_{ij})$ определяется из условия соблюдения транзитивности в строках и столбцах матрицы $A(a_{ij})$:

$$a_{ij} \leq a_{i(j+1)} \text{ при условии, что } i \leq j \quad \text{и}$$
$$a_{ij} \geq a_{(i+1)j} \text{ при условии, что } (i+1) > j. \qquad (5)$$

Элементы матрицы $A(a_{ij})$, для которых условие (5) не выполняется, являются ошибочными. По индексам ошибочных элементов a_{ij} определяются ошибочные элементы в матрице $A^0(a^0{}_{ij})$.

5.5. Вычисление индекса согласованности элементов матрицы парных сравнений

После устранения выявленных ошибок в матрице попарных сравнений $A^0(a^0{}_{ij})$ определяются собственные числа $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\}$ этой матрицы.

Индекс согласованности определяется по формуле (6) [7]

$$I_C(\lambda) = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}, \qquad (6)$$

где $\lambda_{\max}$ – максимальное собственное число из множества $\{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\}$.

Полученный $I_C(\lambda)$ сравнивается с наперед заданным уровня согласованности матрицы парных сравнений I_3 – проверяется выполнение условия (7)

$$I_C \leq I_3. \qquad (7)$$

5.6. Определение значений показателей степени влияния частных показателей эффективности на величину полезного эффекта при выполнении условия (7)

Вычисляется собственный вектор матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ для $\lambda = \lambda_{\max}$.

Найденные таким образом нормированные составляющие собственного вектора матрицы парных сравнений будут [7] искомыми показателями значимости $\{\sim_i\}$ и $\{\ _i\}$, которые необходимо использовать для вычисления показателя ТУ по формулам (1) – (2).

5.7. Вычисление компонент собственного вектора матрицы парных сравнений в случае невыполнения условия (7)

Следует уточнить матрицу $A^0(a^0{}_{ij})$ исходя из предположения, что вклад строк этой матрицы (обусловленный целочисленностью фундаментальной шкалы Т. Саати) в значение индекса согласованности $I_C(\lambda)$ прямо пропорционален сумме элементов каждой i-й строки ($i = \overline{1,n}$).

На основе матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$ строится уточненная матрица $A^*(a^*{}_{ij})$ следующим образом:

$$a^*_{ij} = c_{im} \cdot c_{mj}\,,\ c_{mj} = \sum_{k=1}^{n} a^0_{mk} \cdot a^0_{kj} \cdot P_k\,,\ c_{jm} = \frac{1}{c_{mj}}\,,\ P_k = \frac{\sum\limits_{s=1}^{n} a^0_{ks}}{\sum\limits_{s=1}^{n}\sum\limits_{k=1}^{n} a^0_{ks}}\,,$$

где c_{mj} – средневзвешенный j–й элемент обобщенной строки матрицы $A^0(a^0{}_{ij})$; k, s – вспомогательные индексы матрицы.

Для матрицы $A^* = \lfloor a^*_{ij} \rfloor$ вычисляются максимальное собственное число $\lambda^*_{\max}$ и соответствующие компоненты собственного вектора $\overline{\alpha}^* = \{\alpha^*_1, \alpha^*_2, ..., \alpha^*_n\}$.

Полученные значения координат собственного вектора $\overline{\alpha}^*$ должны использоваться для вычисления показателя ТУ.

5.8. Укрупненный вычислительный алгоритм количественной оценки ТУ КСДЗЗ и СГСС

1. Подготовка исходных данных

Шаг 1. Выполняется описание вербальной постановки задачи (в соответствии с п. 4), данные которой являются исходными для эксперта (экспертов) при построении двух матриц парных сравнений $A^0_\alpha(a^0_{ij})$ и $A^0_\beta(a^0_{ij})$.

Матрица $A^0_\alpha(a^0_{ij})$ строится для частных показателей качества космической продукции (услуг) q_α (третий уровень иерархии на рис. 1, 2).

Матрица $A^0_\beta(a^0_{ij})$ строится для частных показателей технического совершенства конструкции КСДЗЗ и СГСС q_β (второй уровень иерархии на рис. 1, 2).

2. Определение значений коэффициентов влияния частных показателей технической эффективности 3-го уровня иерархической схемы

Шаг 2. По данным, подготовленным на шаге 1 (в соответствии с п. 5.2), формируется первоначальная матрица парных сравнений $A_{\alpha}^{0}(a^{0}{}_{ij})$.

Шаг 3. Проводится автоматическая проверка наличия грубых ошибок в первоначальной матрице парных сравнений (в соответствии с п. 5.3).

При наличии ошибок формируются пары значений индексов строк и столбцов в матрице $A_{\alpha}^{0}(a^{0}{}_{ij})$, содержащие ошибки, и выполняется переход к шагу 2.

Шаг 4. Проводится автоматическая проверка наличия логических ошибок в матрице $A_{\alpha}^{0}(a^{0}{}_{ij})$ в соответствии с п. 5.4. При наличии логических ошибок выполняется переход к шагу 2.

Шаг 5. Вычисляется индекс согласованности откорректированной на шагах 2, 3 и 4 матрицы парных сравнений в соответствии с п. 5.5.

Если индекс согласованности не превышает допустимое значение, выполняется переход к шагу 6, иначе – переход к шагу 7.

Шаг 6. Вычисляется значение показателей значимости $\{\alpha_i\}$ в соответствии с п. 5.6.

Шаг 7. Уточняется матрица парных сравнений с целью устранения влияния целочисленности значений фундаментальной шкалы Т. Саати, после чего вычисляется значение показателей значимости в соответствии с п. 5.7.

3. Определение значений коэффициентов влияния частных показателей технической эффективности 2-го уровня иерархической схемы

Повторяются шаги 2 – 7 на основе матрицы $A_{\beta}^{0}(a_{ij}^{0})$ для определения показателей значимости $\{\beta_i\}$.

4. Вычисление значения показателя технического уровня для каждой КСДЗЗ и СГСС

Шаг 8. Вычисляется значение показателя качества продукции (услуг) (K_K) по формуле (1).

Шаг 9. Вычисляется значение показателя технического уровня ($K_{ТУ}$) по формуле (2).

Повторяются шаги 1 – 9 для множества сравниваемых функционально однородных изделий-аналогов.

5. Формируются выходные данные

Шаг 10. Определяется техническое совершенство создаваемой КСДЗЗ и СГСС по отношению к множеству сравниваемых функционально однородных изделий-аналогов. Формируется заключение о техническом совершенстве создаваемой КСДЗЗ и СГСС путем выбора одного из множества лингвистических значений: <выше мирового; выше среднемирового; равный среднемировому; ниже среднемирового; ниже мирового уровня>.

Заключение

1. Приведенный методический подход к количественной оценке технического уровня (технического совершенства) космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной космической связи позволяет существенно повысить качество расчета показателя их технического

уровня и снизить влияние субъективного фактора на численное значение этого показателя. Это достигается за счет высокой степени формализации процесса количественной оценки технического уровня. Роль экспертов сведена к минимуму (до уровня подготовки вспомогательных исходных данных).

2. В основу предлагаемого методического подхода положен достаточно математически обоснованный и широко используемый в современной теории принятия решений метод анализа иерархий Т. Саати.

Метод Т. Саати дополнен рядом формализованных (математических) процедур, которые позволяют:

– учитывать особенности космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной спутниковой связи;

– автоматически контролировать суждения экспертов на предмет наличия ошибок и логических противоречий.

3. На основании предложенного подхода может быть создана методика количественной оценки технического уровня космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной спутниковой связи.

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. Весник 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: 8.02.2019).
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: 26.02.2019).
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. *Самохвалов Ю. Я., Бурба О. И.* Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона. Системи управління, навігації та зв’язку. 2018. Вып. 4. С. 77–85. URL: http://nbuv.gov.ua/ UJRN/suntz_2018_4_17 (дата обращения: 20.05.2019).
6. *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.
7. *Саати Т.* Принятие решений – метод анализа иерархий. Москва.: Радио и связь, 1993. 278 с.

Получено 30.08.2019,
в окончательном варианте 22.11.2019