УДК 621.002.56 https://doi.org/10.15407/itm2020.01.076

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

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ТЕХНИЧЕСКОГО УРОВНЯ СИСТЕМЫ ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

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 – подання практичної реалізації (у вигляді алгоритму та комп'ютерної програми) запропонованого авторами даної статті методичного підходу до оцінки технічного рівня системи геостаціонарного супутникового зв'язку (СГСС).

Показник технічного рівня є кількісною мірою досконалості конструкції СГСС і якості послуг зв'язку, що надаються системою. Технічний рівень відноситься до числа основних техніко-економічних характеристик дослідно-конструкторської роботи зі створення СГСС.

Разом з витратами на створення і експлуатацію СГСС показник технічного рівня визначає її конкурентоспроможність на світовому ринку послуг космічного зв'язку.

Завдання кількісної оцінки технічного рівня СГСС відноситься до числа складних багатокритеріальних задач. З ряду можливих технічних характеристик СГСС для розрахунку показника технічного рівня обрані тільки ті характеристики, які істотно впливають на величину корисного ефекту, отриманого в результаті створення і експлуатації СГСС. З метою скорочення розмірності цієї задачі з ряду можливих технічних характеристик виділені групи. Кожна група являє собою окремий показник технічної ефективності СГСС.

В основу розробленого алгоритму розрахунку показника технічного рівня покладено математичну модель методу аналізу ієрархій Т. Сааті, яка доповнена авторами статті математичними моделями для максимально можливого врахування технічних особливостей СГСС і забезпечення контролю помилок і протиріч у судженнях експертів, які беруть участь в підготовці вихідних даних за невимірними або важко вимірними техніко-економічними показниками.

Робота наведеного в статті алгоритму розрахунку технічного рівня продемонстрована на числовому прикладі.

На основі результатів розрахунку формується висновок про технічний рівень створюваної СГСС в порівнянні зі світовими показниками у вигляді лінгвістичної змінної.

На базі наведеного алгоритму може бути створена галузева методика кількісної оцінки технічного рівня СГСС, яка відповідає вимогам сьогодення.

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

Цель работы – представление практической реализации (в виде алгоритма и компьютерной программы) предложенного авторами данной статьи методического подхода к оценке технического уровня системы геостационарной спутниковой связи (СГСС).

Показатель технического уровня является количественной мерой совершенства конструкции СГСС и качества предоставляемых системой услуг связи. Технический уровень относится к числу основных технико-экономических характеристик опытно-конструкторской работы по созданию СГСС.

Наряду с затратами на создание и эксплуатацию СГСС показатель технического уровня определяет ее конкурентоспособность на мировом рынке услуг космической связи.

Задача количественной оценки технического уровня СГСС относится к числу сложных многокритериальных задач. Из множества технических характеристик СГСС для расчета показателя технического уровня выбраны только те характеристики, которые существенно влияют на величину полезного эффекта, получаемого в результате создания и эксплуатации СГСС. В целях сокращения размерности этой задачи из множества технических характеристик выделены группы. Каждая группа представляет собой частный показатель технической эффективности СГСС.

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

Работа приведенного в статье алгоритма расчета технического уровня продемонстрирована на численном примере.

На основании результатов расчета формируется заключение о техническом уровне создаваемой СГСС по сравнению с мировыми показателями в виде лингвистической переменной.

На базе приведенного алгоритма может быть создана отраслевая методика количественной оценки технического уровня СГСС, которая отвечает требованиям сегодняшнего дня.

Ключевые слова: *алгоритм, количественная оценка технического уровня, контроль ошибок, косми-*

ческий аппарат, метод анализа иерархий, ракетно-космическая техника, система геостационарной спутниковой связи, технический уровень.

This paper presents a practical implementation (in the form of an algorithm and software) of the authors' methodological approach to assessing the technical level of a geostationary satellite communication system (GSCS).

The technical level index is a qualitative measure of the perfection of the GSCS design and the quality of the GSCS-provided services. The technical level is one of the key techno-economic indices of the GSCS development.

Together with the GSCS development and operation cost, the technical level index governs the GSCS competitiveness on the world market of space communication services.

The problem of quantitative assessment of the GSCS technical level is a complex multicriteria problem. Out of the many technical characteristics of a GSCS, only those that significantly affect the useful effect from its operation are chosen. To reduce the dimensionality of this problem, the many technical characteristics are divided into groups. Each group is a particular index of the GSCS technical efficiency.

The technical level calculation algorithm developed in this work 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 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 techno-economic indices.

The operation of the algorithm is demonstrated using a numerical example.

Based on the calculated results, a conclusion is formed about the technical level of the GSCS under development in comparison with the world indices in the form of a linguistic variable.

Based on the algorithm presented in this paper, a state-of the-art sectorial methodology for GSCS technical level quantification may be developed.

Keywords: *algorithm, technical level quantification, error check, 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 систем геостационарных спутников связи (СГСС). Наряду с затратами на разработку и эксплуатацию СГСС показатель ТУ определяет конкурентоспособность нового изделия на мировом рынке ракетно-космической продукции и услуг.

Показатель ТУ является количественной мерой оценки совершенства конструкции космического аппарата и всей космической системы в целом, а также качества производимой системой продукции (услуг).

Оценка ТУ должна проводиться в процессе выполнения ОКР как Заказчиком СГСС, так и Головным разработчиком этой системы.

Заказчик должен проводить оценку ТУ в целях контроля соответствия создаваемой СГСС последним достижениям отечественной и зарубежной науки и техники.

Головной разработчик обязан периодически проводить расчеты по оценке ТУ СГСС, т. к. он несет ответственность не только за выполнение требований тактико-технического задания (ТТЗ), но и за обеспечение требуемого ТУ разрабатываемой системы.

На практике в Украине Заказчик космической системы не проводит расчеты по количественной оценке ТУ, а разработчики выполняют оценку этого важного показателя 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 отраслевого методического обеспечения для проведения расчетов технического уровня, в частности по количественной оценке ТУ СГСС.

Следует отметить, что показатель ТУ СГСС полностью определяется основными техническими характеристиками находящегося в орбитальном полете космического аппарата этой системы. Наземный сегмент 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.

1 Теоретическое обоснование алгоритма расчета показателя технического уровня СГСС. Алгоритм должен обеспечивать решение следующих задач:

1) определить численное значение показателя технического совершенства (технического уровня) каждого из заданного множества тождественных по функциональному назначению СГСС и создаваемой СГСС;

2) определить СГСС, обладающую наивысшим значением ТУ;

3) сформировать заключение о ТУ создаваемой СГСС в виде лингвистической переменной: <выше мирового; выше среднемирового; равный среднемировому; ниже среднемирового; ниже мирового уровня>.

Исходными данными для применения алгоритма являются:

1) состав рассматриваемых СГСС и соответствующие им тактико-технические характеристики, которые являются частными показателями технической эффективности;

2) технико-экономические показатели функционирующих СГСС – аналогов вновь создаваемой СГСС;

3) фундаментальная шкала относительной важности Т. Саати [1].

Задача корректного расчета показателя ТУ таких технически сложных систем, как СГСС, является многокритериальной и трудно формализуемой, а, следовательно, трудно решаемой задачей.

Подобного рода задачи имеют место в теории принятия решений. На сегодняшний день наиболее эффективным методом решения подобных задач (по критерию корректности получаемого решения) является метод анализа иерархий Т. Саати [1].

В работе [2] показано, что использование метода Т. Саати при определении значения показателя ТУ космических систем дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) (КС ДЗЗ) и СГСС позволяет существенно повысить уровень корректности результатов расчета.

1.1 Математические соотношения для расчета значений показателя ТУ. Согласно [2] математическая модель расчета показателя ТУ СГСС имеет следующий вид:

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

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

$$q^*_{\alpha_i} = \max\{q_{\alpha_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\alpha_i}}{q^*_{\alpha_i}} \le 1, \text{ при этом } \delta_i = 1,$$

$$q^*_{\alpha_i} = \min\{q_{\alpha_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\alpha_i}}{q^*_{\alpha_i}} > 1, \text{ при этом } \delta_i = -1;$$

$$q^*_{\beta_i} = \max\{q_{\beta_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\beta_i}}{q^*_{\beta_i}} \le 1, \text{ при этом } \delta_i = 1, \qquad (3)$$

$$q^*_{\beta_i} = \min\{q_{\beta_{ir}}\}, \text{ если } \frac{q_{\beta_i}}{q^*_{\beta_i}} > 1, \text{ при этом } \delta_i = -1;$$

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

Состав частных показателей технической эффективности (ЧПТЭ) и логическая схема решения задачи по определению значения показателя ТУ СГСС приведены на рис. 1.

В общем случае состав ЧПТЭ определяется системными аналитиками специалистами в области космических систем спутниковой связи на основании анализа фактических технико-экономических показателей функционирующих СГСС–аналогов создаваемого образца.

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

$q_{ПН}$ (q_{β_1}) – удельный вес полезной нагрузки (аппаратуры связи) в общей массе геостационарного спутника связи (ГСС); $q_{ЭО}$ (q_{β_2}) – удельная энергообеспеченность аппаратуры связи (транспондеров); $T^{пр}_{САС}$ (q_{β_3}) – приведенный срок активного существования ГСС на орбите; $q_{ИН}$ (q_{β_4}) – удельная информативность ГСС; δ_0 (q_{β_5}) – точность определения углового положения ГСС на орбите; δ_C (q_{β_6}) – точность угловой стабилизации ГСС на орбите; $K_{СВ} = K_K$ (q_{β_7}) – показатель качества связи; D (q_{α_1}) – добротность антенных систем, установленных на борту ГСС; G – коэффициент усиления антенной системы; K – шумовая температура в приемном тракте антенной системы; EIM (q_{α_2}) – эквивалентная изотропно излучаемая мощность антенной системы; $P_{ЭМ}$ – излучаемая электрическая мощность антенной системы; $P_{БИ}$ (q_{α_3}) – вероятность ошибки на 1 бит информации.

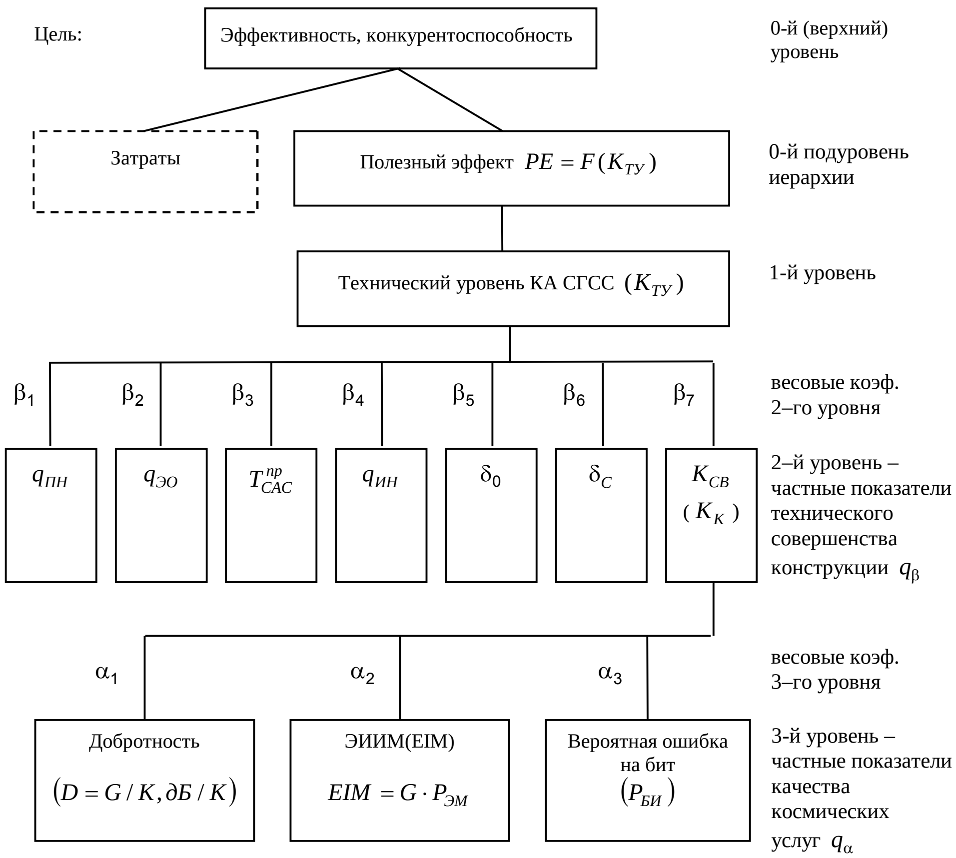

Рис. 1 – Формальное описание полезного эффекта и логическая схема решения задачи количественной оценки ТУ СГСС

1.2 Метод построения матриц парных сравнений. Описание метода построения матриц парных сравнений A_α и A_β приведено в [2].

Матрица A_α используется для определения влияния ЧПТЭ на качество услуг связи, а матрица A_β – для определения ТУ СГСС как целостной системы.

1.3 Математические соотношения автоматического (программного) обнаружения грубых ошибок в матрицах парных сравнений A^0_α и A^0_β. На основе сформированной экспертами первоначальной матрицы $A^0(a_{ij})$ автоматически (компьютерной программой) строятся две матрицы $B^0(b^0_{ij})$ и $B(b_{ij})$.

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

Матрицам $A^0(a_{ij})$ 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 $A^0(a_{ij})$ и столбцов по возрастанию сумм элементов столбцов матрицы $A^0(a_{ij})$.

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 $A^0(a_{ij})$ не содержат грубых ошибок, если выполняется условие:

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

Элементы матрицы $A^0(a_{ij})$ будут содержать грубые ошибки, если не выполняется условие (4), если $a_{ij} \neq 1$ при $(i = j)$ $a_{ji} \neq \frac{1}{a_{ij}}$.

1.4 Математические соотношения автоматического (программного) обнаружения логических ошибок в матрицах парных сравнений A^0_α и A^0_β. Строки и столбцы матрицы $A^0(a_{ij})$ 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 $A(a_{ij})$:

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

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

1.5 Математические соотношения определения индексов согласованности матриц парных сравнений A^0_α и A^0_β. После устранения выявленных ошибок в матрице попарных сравнений $A^0(a_{ij})$ определяются собственные числа $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, ..., \lambda_n\}$ этой матрицы.

Индекс согласованности определяется по формуле [1]

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

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

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

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

1.6 Математические соотношения определения значений показателей степени влияния частных показателей эффективности на величину полезного эффекта от эксплуатации СГСС. Если условие (7) выполняется – вычисляется собственный вектор матрицы $A^0(a_{ij})$ для $\lambda = \lambda_{\max}$: $A_\alpha \cdot [v_1, v_2, ..., v_n,]^T = \lambda_{\max} \cdot [v_1, v_2, ..., v_n,]^T$, где $\{v_i\} = \{\alpha_i\}$, если $A^0(a_{ij}) = A^0_\alpha$; $\{v_i\} = \{\beta_i\}$, если $A^0(a_{ij}) = A^0_\beta$

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

Если условие (7) не выполняется, 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 $A^0(a_{ij})$ строится уточненная матрица $A^*(a^*{}_{ij})$ следующим образом:

$$a^*_{ij} = c_{im} \cdot c_{mj}\,,\; c_{mj} = \sum_{k=1}^{n} a_{mk} \cdot a_{kj} \cdot P_k\,,\; c_{jm} = \frac{1}{c_{mj}}\,,\; P_k = \frac{\sum_{s=1}^{n} a_{ks}}{\sum_{s=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} a_{ks}}\,, \qquad (8)$$

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

Для матрицы $A^* = \lfloor a^*_{ij} \rfloor$ вычисляется 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.

1.7 Математические соотношения для определения градационных значений мирового технического уровня СГСС-аналогов: $K_{ТУ_r}^{\max}$**,** $K_{ТУ_r}^{cp}$**,** $K_{ТУ_r}^{\min}$**.** В расчетах используются значения показателя ТУ СГСС-аналогов ($r = \overline{2,R}$ **).**

Высший мировой уровень определяется как $K_{ТУ_r}^{\max} = \max\left\{K_{ТУ_r}\right\}$.

Среднемировой уровень: $K_{ТУ_r}^{cp} \dfrac{\sum K_{ТУ\,r}}{R}$.

Низший мировой уровень: $K_{ТУ_r}^{\min} = \min\left\{K_{ТУ_r}\right\}$.

1.8 Математические соотношения для определения показателя ТУ СГСС по отношению к лучшему образцу из заданного множества СГСС ($K_{ТУ\,r}^{*}$ **).** Определить технический уровень каждой из рассматриваемых СГСС по отношению к лучшему образцу СГСС ($K_{ТУ\,r}^{*}$) по формуле (9)

$$K_{ТУ\,r}^{*} = \frac{K_{ТУ\,r}}{K_{ТУ\quad r}^{\max}}, \ r = \overline{1,R}\,. \qquad (9)$$

1.9 Математические соотношения для формирования заключения о ТУ создаваемой СГСС в форме лингвистической переменной

Таблица 1 – Значения лингвистической переменной

Интервал значений	Значение лингвистической переменной
$K_{ТУ}^{*\max} < K_{ТУ_1}^{*}$	выше мирового
$K_{ТУ}^{*cp} < K_{ТУ_1}^{*} \le K_{ТУ}^{*\max}$	выше среднемирового
$K_{ТУ_1}^{*} = K_{ТУ}^{*cp}$	равный среднемировому
$K_{ТУ}^{*cp} > K_{ТУ_1}^{*} \ge K_{ТУ}^{*\min}$	ниже среднемирового
$K_{ТУ_1}^{*} < K_{ТУ}^{*\min}$	ниже мирового уровня

2. Представление и описание вычислительного алгоритма

Алгоритм расчета показателя технического уровня СГСС представлен в виде блок-схемы (графической модели) на рис. 2.

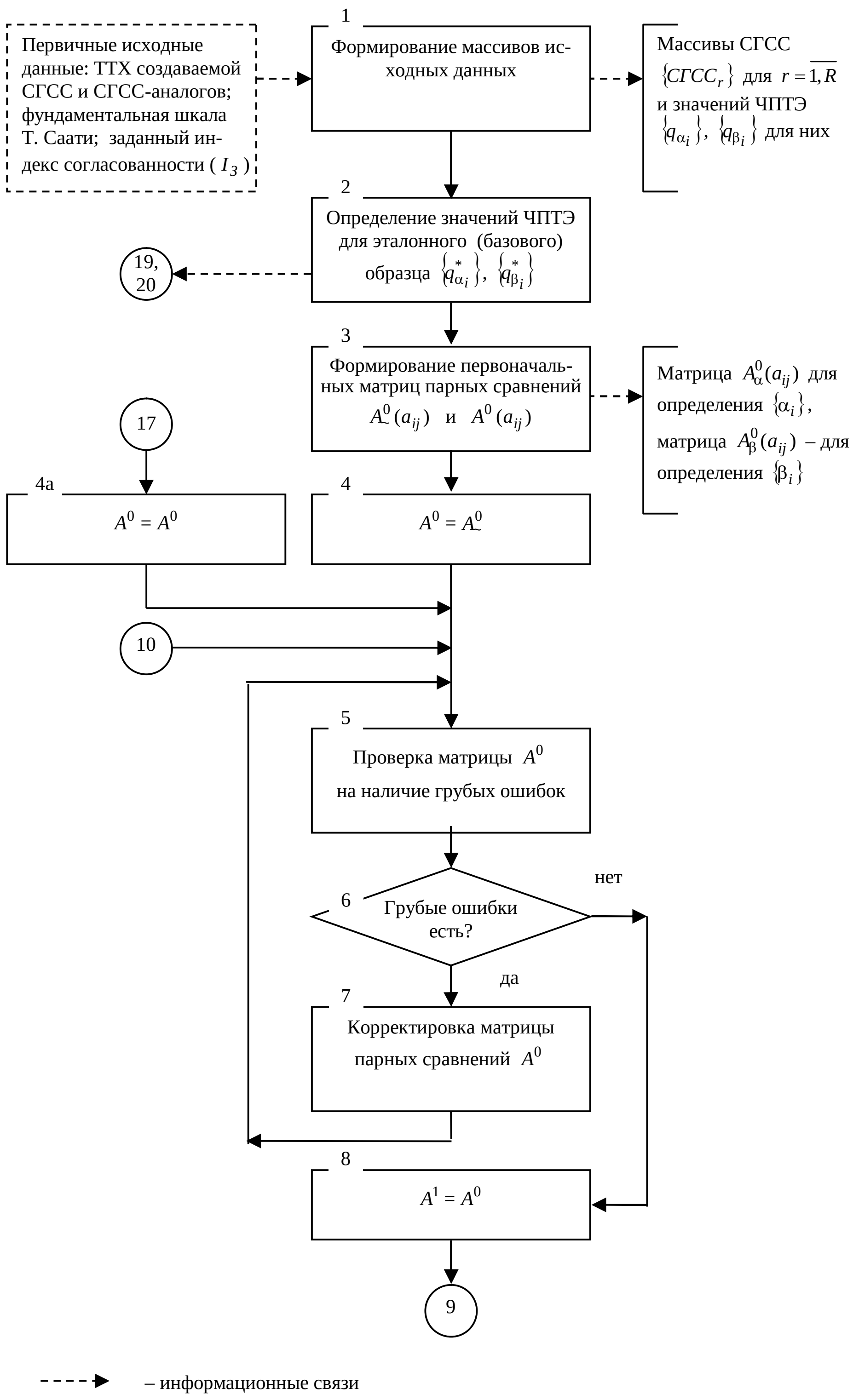

Рис. 2, лист 1 – Алгоритм расчета показателя технического уровня СГСС

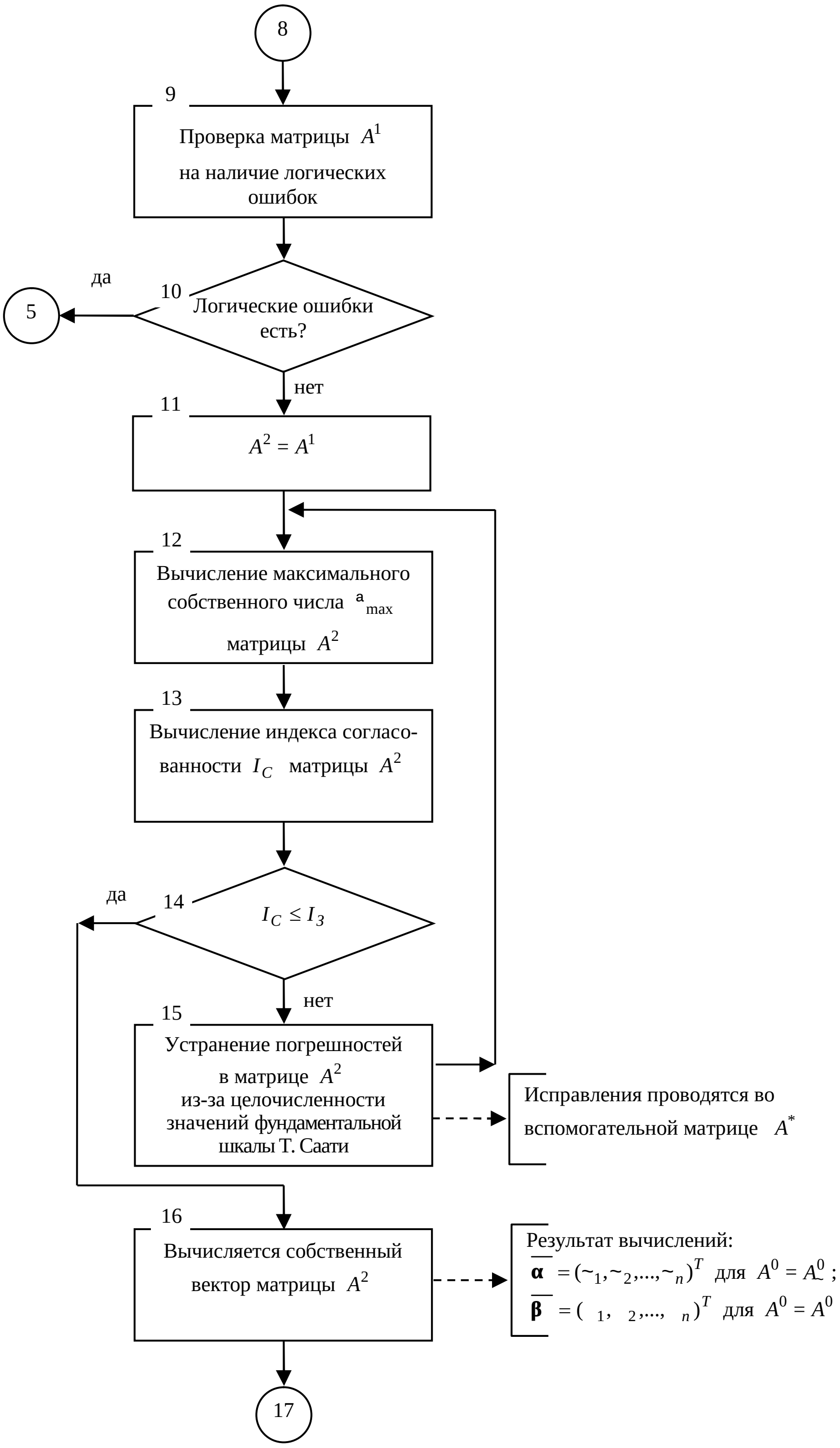
8
9
Проверка матрицы A^1 на наличие логических ошибок
да
10
Логические ошибки есть?
5
нет
11
$A^2 = A^1$
12
Вычисление максимального собственного числа λ_{max} матрицы A^2
13
Вычисление индекса согласованности I_C матрицы A^2
да
14
$I_C \le I_3$
нет
15
Устранение погрешностей в матрице A^2 из-за целочисленности значений фундаментальной шкалы Т. Саати
Исправления проводятся во вспомогательной матрице A^*
16
Вычисляется собственный вектор матрицы A^2
Результат вычислений:
17

Рис. 2, лист 2

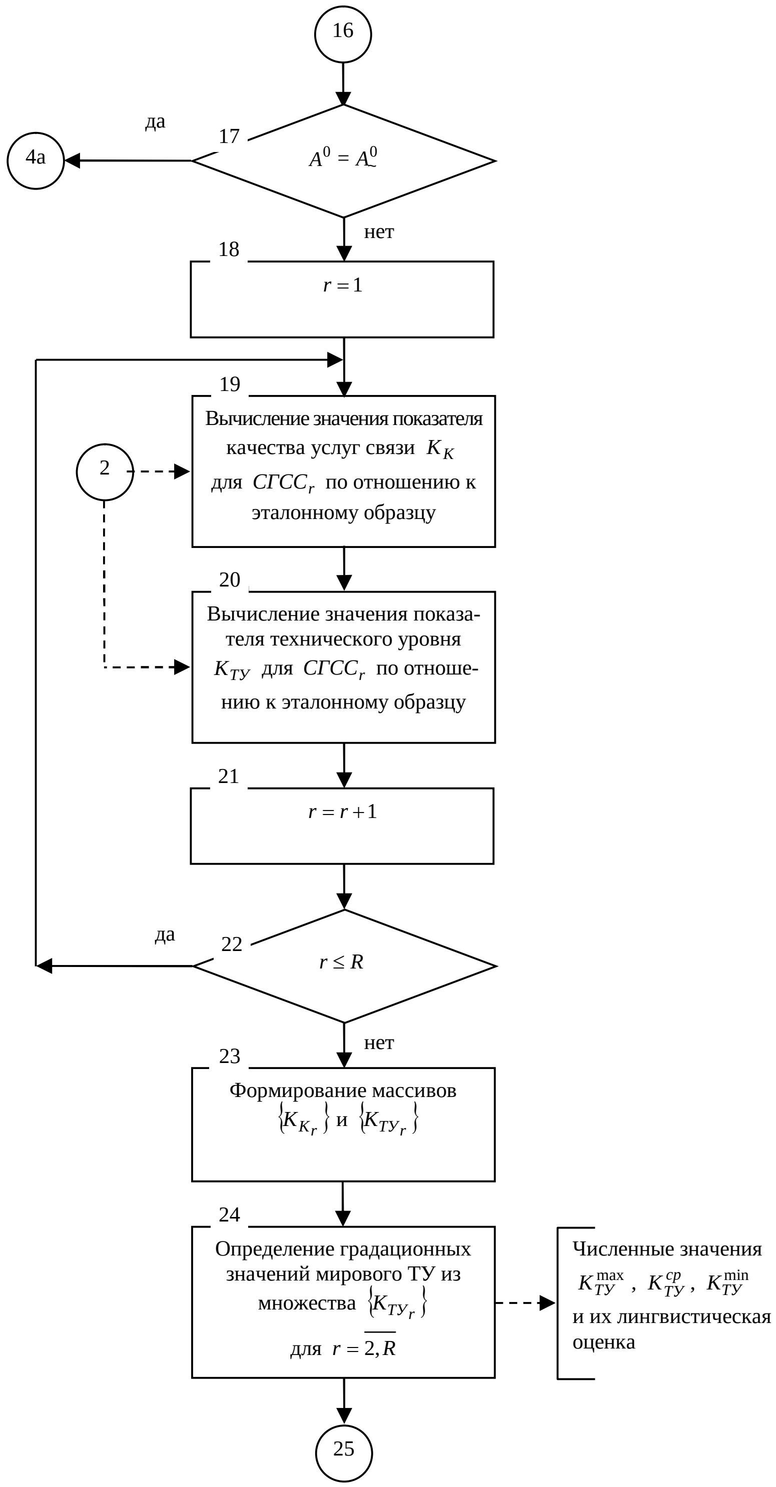
16
17
$A^0 = A^0_{\sim}$
да
4а
нет
18
$r = 1$
19
Вычисление значения показателя качества услуг связи $K_К$ для $СГСС_r$ по отношению к эталонному образцу
2
20
Вычисление значения показателя технического уровня $K_{ТУ}$ для $СГСС_r$ по отношению к эталонному образцу
21
$r = r + 1$
22
$r \le R$
да
нет
23
Формирование массивов $\{K_{К_r}\}$ и $\{K_{ТУ_r}\}$
24
Определение градационных значений мирового ТУ из множества $\{K_{ТУ_r}\}$ для $r = \overline{2, R}$
Численные значения $K_{ТУ}^{\max}$, $K_{ТУ}^{ср}$, $K_{ТУ}^{\min}$ и их лингвистическая оценка
25

Рис. 2, лист 3

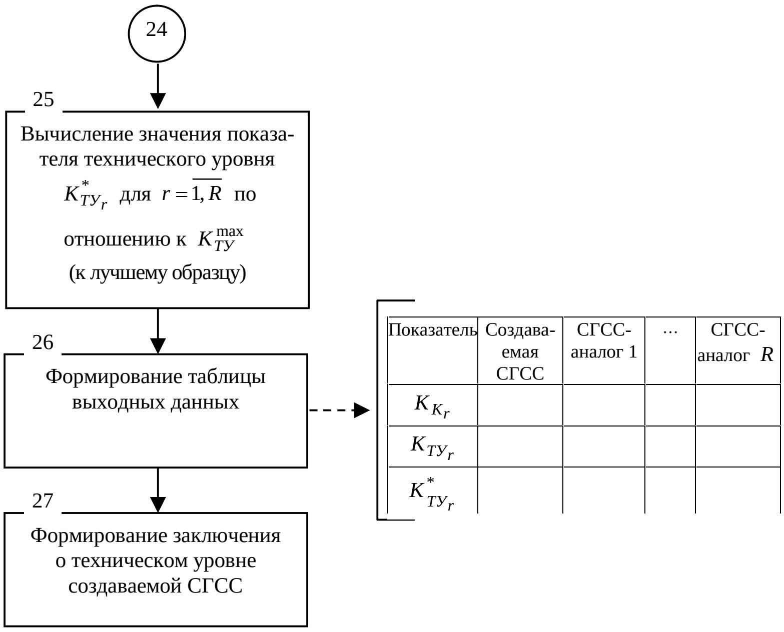

Рис. 2, лист 4

В блоке 5 грубыми ошибками, допущенными в процессе формирования матриц $A^0_\alpha(a_{ij})$ и $A^0_\beta(a_{ij})$, являются:

а) невыполнение условия $a_{ij} = 1$ при $i = j$;

б) невыполнение условия $a_{ji} = \dfrac{1}{a_{ij}}$, $i, j = \overline{1, n}$;

в) наличие нулевых элементов во вспомогательной бинарной матрице B, соответствующей строке матрицы A (A^0_α, A^0_β), имеющей наибольшую сумму элементов $\sum\limits_{j=1}^{n} a_{ij}$ этой строки;

г) если имеются элементы в двух различных строках i_1 и i_2 матрицы A равных $a_{i_1 j} = a_{i_2 j}$, то все компоненты этих строк должны совпадать, так как ЧПТЭ i_1 и i_2 эквивалентны по отношению к ЧПТЭ$_j$.

д) число нулей в бинарной матрице B должно возрастать по мере уменьшения суммы $\sum\limits_{j=1}^{n} a_{ij}$, так как матрица B упорядочена по убыванию суммы элементов строк матрицы $A^0\left(a_{ij}\right)$.

Математические соотношения для выполнения расчетов в блоках алгоритма приведены в разделах 1 и 2:

– блок 2 – формула (3) п. 1.1;
– блок 5 – п. 1.3;
– блок 9 – п. 1.4;
– блок 12 – п. 1.5;

– блок 13 – формула (6) п. 1.5;
– блок 15 – формула (8) п. 1.6;
– блок 16 – п. 1.6;
– блок 19 – формула (1) п. 1.1;
– блок 20 – формула (2) п. 1.1;
– блок 24 – п. 1.7;
– блок 25 – формула (9) п. 1.8.

3. Пример расчета технического уровня. Приведенный в разделе 2 вычислительный алгоритм реализован в программном виде на языке Object Pascal в среде разработки Delphi.

3.1 Исходные данные. В формализованном виде исходные данные представлены в табл. 2.

Таблица 2 – Основные тактико-технические характеристики СГСС

№ п/п	Название ТТХ СГСС	Название СГСС				
		Создаваемая СГСС	СГСС аналог 1	СГСС аналог 2	СГСС аналог 3	СГСС аналог 4
1	Масса КА при запуске (m_0), кг	3275	5100	4765	2970	4465
2	Масса КА на орбите ($m_{ГСС}$), кг	2200	3700	3400	2970	4465
3	Масса полезной нагрузки КА ($m_{ПН}$), кг	280	250	350	290	380
4	Число транспондеров ($n_{ТР}$), шт.	24 C+12 Ku	22 Ku	30 Ku	24 Ku	24Ku+4 Ka
5	Срок активного существования КА ($T_{САС}$), годы	15,0	15,0	15,0	15,0	15,0
6	Вероятность безотказной работы при $T = T_{САС}$ ($P_{САС}$)	0,8	0,75	0,8	0,8	0,82
7	Мощность (в конце САС) для питания ПН ($P_{ПН}$), кВт	5,8	8,0	6,0	6,0	5,8
8	Добротность приемного тракта транспондеров (D), дБ/К	6,0	5,5	6,5	5,9	6,2
9	ЭИИМ передающего тракта транспондера (EIRP), дБВт	53,0	51,0	57,5	50,5	58,0
10	Вероятность ошибки на бит информации ($P_{БИ}$)	10^{-6}	$2\ 10^{-6}$	10^{-6}	$1.5\ 10^{-6}$	10^{-6}
11	Точность определения угловой ориентации КА ($\delta_О$), град	0,04	0,06	0,03	0,035	0,03
12	Точность угловой стабилизации КА ($\delta_С$), град	0,065	0,65	0,60	0,065	0,06

Основные исходные данные (ТТХ) по СГСС аналогам (1 – 4) взяты из сети Интернет, а недостающие исходные данные определены методом экспертных оценок. Данные по создаваемой СГСС являются условными.

3.2 Результаты расчетов. Результаты расчета приведены в табл. 3, 4

Таблица 3 – Частные показатели технической эффективности СГСС

№ п/п	Название ТТХ СГСС	Название СГСС					
		Создаваемая СГСС	СГСС аналог 1	СГСС аналог 2	СГСС аналог 3	СГСС аналог 4	Базовый образец
1	Удельный вес полезной нагрузки в общей массе КА на орбите ($q_{ПН}$) q_{β_1}	0,127	0,068	0,103	0,098	0,085	0,127
2	Удельная энергообеспечиваемость полезной нагрузки ($q_{ЭО}$) q_{β_2}	0,003	0,002	0,002	0,002	0,00112	0,003
3	Приведенный срок активного существования КА ($T_{САС}^{пр}$) q_{β_3}	12	11,25	12	12	12,3	12,3
4	Удельная информативность ($q_{ИН}$) q_{β_4}	1,336	0,803	1,191	1,091	0,976	1,336
5	Точность определения углового положения КА на орбите (δ_0) q_{β_5}	0,04	0,06	0,03	0,035	0,03	0,03
6	Точность угловой стабилизации КА на орбите (δ_C) q_{β_6}	0,065	0,65	0,60	0,065	0,06	0,06
7	Добротность антенной системы КА (D) q_{α_1}	6,0	5,5	6,5	5,9	6,2	6,5
8	Эквивалентная изотропно излучаемая антенной мощность системы, дБВт (EIM) q_{α_2}	53,0	51,0	57,5	50,5	58,0	58
9	Вероятность ошибки на 1 бит информации ($P_{БИ}$) q_{α_3}	10^{-6}	$2\ 10^{-6}$	10^{-6}	$1.5\ 10^{-6}$	10^{-6}	$2\ 10^{-6}$

Таблица 4 – Результаты расчета показателей качества услуг и технического уровня СГСС

r	Наименование $СГСС_r$	K_{K_r}	$K_{ТУ_r}$	$K^*_{ТУ_r}$
1	Создаваемая СГСС	0,958	0,965	1
2	СГСС аналог 1	0,824	0,645	0,667
3	СГСС аналог 2	0,977	0,816	0,798
4	СГСС аналог 3	0,882	0,822	0,835
5	СГСС аналог 3	0,949	0,764	0,729
6	Базовая (эталонная) СГСС	1	1	

Примечания:

K_K – значения показателей качества услуги связи рассматриваемых СГСС ($r = \overline{1, R}$) по отношению к эталонному образцу;

$K_{ТУ}$ – значения показателей технического уровня рассматриваемых СГСС ($r = \overline{1, R}$) по отношению к эталонному образцу;

$K_{ТУ}^{*}$ – значения показателей технического уровня рассматриваемых СГСС ($r = \overline{1, R}$) по отношению к лучшему образцу.

Граничные значения показателей мирового технического уровня для рассматриваемых СГСС аналогов:

– максимальное значение – $K_{ТУ}^{*\max}$ = 0,835;

– среднее значение – $K_{ТУ}^{*ср}$ = 0,757;

– минимальное значение – $K_{ТУ}^{*\min}$ = 0,667.

3.3 Лингвистическая оценка ТУ создаваемого образца. Значение показателя технического уровня создаваемого образца СГСС $K_{ТУ_1}^{*}$ =1, что соответствует лингвистической оценке «выше мирового».

Заключение

1. Приведенный вычислительный алгоритм позволяет существенно повысить качество количественной оценки показателя технического уровня системы геостационарной спутниковой связи и снизить влияние субъективного фактора на численное значение этого показателя. Это достигается за счет высокой степени формализации расчетного процесса. Роль экспертов сведена к минимуму (до уровня подготовки вспомогательных исходных данных).

2. В основу методической базы для построения приведенного алгоритма 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:

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

– учитывать особенности геостационарных спутников связи.

3. На основе приведенного вычислительного алгоритма может быть создана методика количественной оценки технического уровня системы геостационарной спутниковой связи, отвечающая требованиям сегодняшнего дня.

1. *Саати Т.* Принятие решений – метод анализа иерархий. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
2. *Марченко В. Т., Петляк Е. П., Сазина Н. П., Хорольский П. П.* Количественная оценка технического уровня космических систем дистанционного зондирования Земли и систем геостационарной спутниковой связи: методический подход. Техническая механика. 2019. № 4. С. 92–106. https://doi.org/10.15407/itm2019.04.092

Получено 23.12.2019,
в окончательном варианте 17.02.2020