

<https://doi.org/10.15407/knit2020.05.005>
УДК 629.13

О. А. ПЕТЛЯК¹

нач. сектору
E-mail: petlyak@ukr.net

В. Т. МАРЧЕНКО²

наук. співроб. відділу
E-mail: office.itm@nas.gov.ua

¹ Державне підприємство «Конструкторське бюро «Південне» ім. М. К. Янгеля
вул. Криворізька 3, Дніпро, Україна, 49008

² Інститут технічної механіки Національної академії наук України
й Державного космічного агентства України
вул. Лешко-Попеля 15, Дніпро, Україна, 49005

ПРО ОДИН ІЗ ПІДХОДІВ ДО ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО РІВНЯ ГЕОСТАЦІОНАРНИХ СУПУТНИКІВ ЗВ'ЯЗКУ

Мета статті — представлення розробленого методичного підходу до кількісної оцінки показника технічного рівня (технічної досконалості) геостационарних супутників зв'язку. Показник технічного рівня — кількісна міра оцінки досконалості конструкції виробу і якості продукції (послуг), вироблених з його застосуванням; це один з основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи. Значення показника технічного рівня є одним з визначальних факторів конкурентоспроможності новостворюваної космічної системи.

Розглянуто наявні методичні підходи з кількісної оцінки технічного рівня наукомістких і технічно складних виробів. Описано методичний підхід до визначення складу показників технічної ефективності для розрахунків показника технічного рівня геостационарного супутника зв'язку, формальний опис корисного ефекту і логічна схема кількісної оцінки технічного рівня, методичний підхід до розрахунків ступеня впливу часткових показників технічної ефективності на величину корисного ефекту від використання геостационарного супутника зв'язку. В основу методичного підходу покладено математичну модель методу аналізу ієрархій Т. Сааті, доповнену моделями авторів для максимально можливого обліку технічних особливостей геостационарних супутників зв'язку і забезпечення контролю помилок і протиріч у судженнях експертів, що брали участь у підготовці початкових даних з невимірюваних або важко вимірюваних техніко-економічних показників геостационарних супутників зв'язку.

Завдяки високому рівню формалізації процесу кількісної оцінки технічного рівня і застосуванню математичних методів, які використовуються в сучасній теорії прийняття рішень, розроблений методичний підхід дозволяє істотно підвищити якість розрахунків та знизити вплив суб'єктивного фактора при визначенні значення показника технічного рівня. На основі наведеного методичного підходу може бути створено методуку кількісної оцінки технічного рівня геостационарних супутників зв'язку, що відповідає вимогам сьогодення.

Ключові слова: геостационарний супутник зв'язку, кількісна оцінка технічного рівня, космічний апарат, метод аналізу ієрархій, ракетно-космічна техніка.

Цитування: Петляк О. А., Марченко В. Т. Про один із підходів до оцінки технічного рівня геостационарних супутників зв'язку. *Космічна наука і технологія*. 2020. **26**, № 5 (126). С. 5—14. <https://doi.org/10.15407/knit2020.05.005>

ВСТУП

Показник технічного рівня (ТР) є одним із основних техніко-економічних показників дослідно-конструкторської роботи (ДКР) зі створення зразків ракетно-космічної техніки (РКТ). Разом з витратами на розробку й експлуатацію виробу РКТ показник ТР визначає конкурентоспроможність нового виробу на світовому ринку ракетно-космічної продукції й послуг. Показник технічного рівня є кількісною мірою оцінки досконалості конструкції виробу і якості виробленої з його застосуванням продукції (послуг).

Відповідно до нормативних документів колишнього СРСР (РК-95 і ГОСТ В15.2003) оцінювання технічного рівня повинне здійснюватися у процесі виконання ДКР як замовником, так і головним розробником виробу РКТ. Замовником — з метою контролю відповідності створюваного зразка РКТ останнім досягненням вітчизняної і закордонної науки й техніки. Головний розробник зобов'язаний періодично проводити розрахунки з оцінки ТР створюваного зразка РКТ, тому що він несе відповідальність не тільки за виконання вимог тактико-технічного завдання (ТТЗ), але й за забезпечення необхідного технічного рівня виробу, що розроблюється.

На практиці замовник виробу РКТ розрахунки з кількісного оцінювання ТР не проводить, а розробники РКТ виконують оцінювання чисто формально з використанням простих прийомів, які застосовуються для оцінки якості споживчої промислової продукції, а отже, результати цих розрахунків не можуть вважатися коректними.

Основною причиною такого стану справ є відсутність в Україні методичного забезпечення для проведення розрахунків з кількісної оцінки ТР виробів РКТ.

1. СУЧАСНІ МЕТОДИЧНІ ПІДХОДИ З КІЛЬКІСНОЇ ОЦІНКИ ТР НАУКОМІСТКИХ І ТЕХНІЧНО СКЛАДНИХ ВИРОБІВ

Кількісна оцінка ТР наукомістких і технічно складних виробів, як і раніше, залишається проблемною [1—5, 7]. Така оцінка станом на сьогодні виконується методами експертних оцінок:

- пряма оцінка — експерти безпосередньо визначають значення показника ТР;
- метод бальних оцінок;
- ранжирування часткових показників технічного рівня;
- бінарне попарне порівняння окремих показників технічного рівня.

Перераховані методичні підходи досить прості у використанні, однак дають значення показника ТР, що суттєво залежить від суб'єктивних факторів.

Ще у 1980-ті роки у колишньому СРСР виконувалася комплексна науково-дослідна робота (НДР) «Рівень», кінцевою метою якої була розробка методик з оцінки технічного рівня виробів РКТ. Ця робота очолювалися Центральним науково-дослідним інститутом машинобудування (ЦНДІмаш) і 4-м Центральним науково-дослідним інститутом Міністерства оборони (ЦНДІМО). Розроблені в рамках НДР «Рівень» методичні матеріали не відповідають вимогам сьогодення, тому що базувалися на положеннях нормативного документа РД 50-149-79 (Методичні вказівки з оцінки технічного рівня і якості машинобудівної продукції).

В Україні будь-яких матеріалів з оцінки ТР виробів РКТ на даний час немає.

Основним завданням даної статті є виклад розробленого Інститутом технічної механіки НАН України і ДКА України за участі ДП КБ «Південне» методичного підходу до оцінки ТР виробів РКТ, що дозволяє суттєво знизити вплив суб'єктивного фактора на значення показника технічного рівня.

Це досягається за рахунок високого рівня формалізації процесу кількісної оцінки ТР і застосування математичних методів, які використовуються в сучасній теорії прийняття рішень.

Повністю виключити участь експертів можна тільки у випадку, якщо системні аналітики (із проєктантів) зможуть побудувати адекватну функцію корисного ефекту (КЕ), яку можна отримати у процесі експлуатації зразка РКТ, від значень його тактико-технічних характеристик:

$$КЕ = Q(ТТХ).$$

Числові значення показника технічного рівня створюваного зразка дорівнюють:

а) у випадку, коли базовий зразок РКТ реально існує —

$$k_{\text{ТР}_n} = \frac{Q(\text{ТТХ}_n)}{Q(\text{ТТХ}_\text{Б})};$$

б) у випадку, коли базовий зразок є гіпотетичним, тобто його ТТХ визначено як найкращі технічні характеристики із групи розглянутих зразків функціональних аналогів створюваних зразків РКТ —

$$k_{\text{ТР}_n} = \frac{k_{\text{ТР}_n}^*}{k_{\text{ТР}_\text{Б}}^*}, \quad n = \overline{1, N},$$

$$k_{\text{ТР}_n}^* = \frac{Q(\text{ТТХ}_n)}{Q(\text{ТТХ}_\text{Б})},$$

$$k_{\text{ТР}_\text{Б}}^* = \max \left\{ \frac{Q(\text{ТТХ}_n)}{Q(\text{ТТХ}_\text{Б})} \right\},$$

де $Q(\text{ТТХ}_n)$ — величина корисного ефекту, який можна отримати від експлуатації n -го зразка РКТ, $Q(\text{ТТХ}_\text{Б})$ — величина корисного ефекту при експлуатації базового зразка РКТ, N — число порівнюваних зразків РКТ.

Для зручності створюваному зразку РКТ доцільно присвоїти індекс $n = 1$. На практиці для переважної більшості зразків РКТ побудувати явну аналітичну функцію $Q(\text{ТТХ})$ неможливо в силу її нелінійності та наявності факторів невизначеності, а отже, повністю виключити участь експертів у процесі оцінки ТР зразків РКТ неможливо.

Стратегічна важливість і особливості РКТ (наукоємність, висока технологічність, висока технічна складність, функціонування в умовах космічного простору, неремонтоздатність, дуже висока вартість ДКР і т. п.) обумовлюють необхідність розробки нового методичного підходу до оцінки технічного рівня створюваних виробів РКТ. Новий методичний підхід повинен забезпечувати істотне зниження впливу суб'єктивного фактора на значення показника ТР створюваної РКТ.

Як показує досвід, для такого класу завдань зниження впливу суб'єктивного фактора на кінцеві результати можна добитися тільки шляхом максимально можливої формалізації процесу розв'язку завдання, а саме:

- дати розглянутому завданню чітке математичне формулювання;
- описати кожний етап розв'язку завдання в термінах абстрактних математичних структур;
- звести участь експертів тільки в частині підготовки невимірюваних або важко вимірюваних початкових даних, які необхідні для проведення розрахунків;
- реалізувати автоматичний логіко-математичний контроль наявності помилок або протиріч у судженнях експертів.

2. ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Задано:

а) мету, призначення і чисельні значення основних тактико-технічних характеристик (ТТХ) створюваної геостаціонарної системи космічного зв'язку (ГСКЗ), космічним сегментом якої є геостаціонарний супутник зв'язку (ГСЗ):

$$\text{ТТХ} = \{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \dots, \tau_{1M}\} = \{\tau_{1m}\}, \quad m = \overline{1, M};$$

б) групу виробів-аналогів (за функціональним призначенням) з відомими ТТХ

$$\{\tau_{nm}\}, \quad n = \overline{2, N},$$

де $\{\tau_{11}, \tau_{12}, \tau_{13}, \dots, \tau_{1M}\}$ — множина основних ТТХ створюваної ГСКЗ, $\{\tau_{nm}\}$ — множина основних ТТХ n -го виробу функціонального аналога, N — загальна кількість порівнюваних за технічним рівнем ГСКЗ, M — загальне число основних ТТХ.

Потрібно:

а) розробити методичний підхід до кількісної оцінки ТР ГСКЗ, що дозволяє суттєво знизити вплив суб'єктивного фактора на значення показника ТР. Побудувати укрупнений обчислювальний алгоритм;

б) побудувати детальний обчислювальний алгоритм розрахунків показника ТР ГСКЗ, розробити для цього алгоритму відповідне програмне забезпечення, виконати комп'ютерні розрахунки для заданих угруповань початкових даних.

Результати розрахунків повинні містити:

- числове значення показника технічного рівня;
- висновок про технічний рівень створюваної РКТ у лінгвістичних термінах: вищий від світового; рівний світовому; вищий від середньосві-

тового; рівний середньосвітовому; нижчий від середньосвітового; нижчий від світового рівня.

Опис розв'язку цього завдання доволі об'ємний, тому може стати предметом окремої статті.

Особливості ГСКЗ, які повинні бути враховані при розробленні методичного підходу:

а) показник ТР ГСКЗ повністю визначається основними технічними характеристиками супутника зв'язку, що перебуває в орбітальному польоті, тому що всі науково-технічні проблеми створення ГСКЗ зосереджено насамперед у ГСЗ, який повинен надійно функціонувати протягом не менш як 15 років в умовах космічного простору. Наземний сегмент ГСКЗ є комплексом радіотехнічних і програмно-технічних засобів, які функціонують у земних умовах, постійно технічно обслуговуються й ремонтуються, є стандартними або такими, що незначно модифікуються. Капітальні витрати на створення і виведення на орбіту ГСЗ становлять більш ніж 95 % від загальних витрат на створення ГСКЗ;

б) тотожні по функціональному призначенню ГСЗ-аналоги створюваного супутника зв'язку можуть суттєво відрізнятись за абсолютною інформативності (Мбіт/с), масою, кількістю встановлених на борту супутника транспондерів (апаратура зв'язку) і способом виведення ГСЗ на геостационарну орбіту (пряме виведення або через проміжну опорну орбіту).

3. МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ

Показник ТР виробів соціально-економічного призначення еквівалентний показнику якості цих виробів, тоді як показник ТР спеціальних виробів подвійного застосування тотожний показнику відносної технічної ефективності; для виробів військового призначення показник ТР з точністю до деякої константи дорівнює ймовірності виконання бойового завдання.

Супутник зв'язку відноситься до класу спеціальних технічних систем подвійного призначення, тому його часткові показники технічного рівня збігаються із частковими показниками технічної ефективності, і замість терміна «окремі показники ТР» будемо використовувати більш звичний розробникам РКТ термін «часткові показники технічної ефективності».

Супутник зв'язку, що перебуває на орбіті (виробник послуг), виконує функцію передачі інформації від одного об'єкта, розташованого на поверхні Землі, до іншого. Тому склад його часткових показників технічної ефективності складається із двох груп:

- показники, що визначають якість послуг зв'язку (q_α);
- показники, що характеризують досконалість конструкції самого супутника (q_β).

Такий поділ показників дозволяє суттєво спростити математичну модель розрахунків показників ТР.

Завдання кількісного оцінювання показника ТР ГСЗ ($K_{ТР}$) належить до класу багатокритеріальних завдань, які, як правило, розв'язуються методом адитивної згортки часткових критеріїв (часткових показників технічної ефективності). На користь даного методу кількісної оцінки ТР ГСЗ свідчать такі факти:

- показник технічного рівня $K_{ТР}$ є відносною безмірною величиною;
- часткові показники технічної ефективності q_α і q_β є незалежними.

Виходячи з наведених положень, математична модель для розрахунків показника ТР має такий вигляд:

$$K_{ТР} = \sum_i \beta_i \cdot \left(\frac{q_{\beta i}}{q_{\beta i}^*} \right)^{\delta_i},$$

$$\sum_i \beta_i = 1, \quad i = \overline{1, I_\beta},$$

$$K_{ЯЗ} = \sum_i \alpha_i \cdot \left(\frac{q_{\alpha i}}{q_{\alpha i}^*} \right)^{\delta_i},$$

$$\sum_i \alpha_i = 1, \quad i = \overline{1, I_\alpha},$$

$$q_{\alpha i}^* = \max\{q_{\alpha in}\}, \text{ якщо } \frac{q_{\alpha i}}{q_{\alpha i}^*} \leq 1, \text{ при цьому } \delta_i = 1,$$

або

$$q_{\alpha i}^* = \min\{q_{\alpha in}\}, \text{ якщо } \frac{q_{\alpha i}}{q_{\alpha i}^*} > 1, \text{ при цьому } \delta_i = -1,$$

$$q_{\beta i}^* = \max\{q_{\beta in}\}, \text{ якщо } \frac{q_{\beta i}}{q_{\beta i}^*} \leq 1, \text{ при цьому } \delta_i = 1,$$

$$q_{\beta i}^* = \min\{q_{\beta in}\}, \text{ якщо } \frac{q_{\beta i}}{q_{\beta i}^*} > 1, \text{ при цьому } \delta_i = -1,$$

де $K_{яз}$ — показник якості послуг зв'язку, q_{oin} — частковий i -й показник технічної ефективності n -го ГСЗ, що визначає якість послуг зв'язку, q_{oi}^* — частковий i -й показник технічної ефективності еталонного виробу ГСЗ, що визначає якість послуг зв'язку, q_{bin} — частковий i -й показник технічної ефективності n -го ГСЗ, що визначає досконалість його конструкції, q_{bi}^* — частковий i -й показник технічної ефективності еталонного виробу ГСЗ, що визначає досконалість його конструкції, α_i — нормований показник ступеня впливу i -го показника якості послуг зв'язку на величину корисного ефекту, β_i — нормований показник ступеня впливу i -го показника досконалості конструкції на величину корисного ефекту.

У такий спосіб складне завдання (1) зведено до розв'язку двох простіших завдань:

- визначення складу та значень параметрів q_{oi} і q_{bi} ;
- визначення значень показників впливу α_i та β_i .

4. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО ВИЗНАЧЕННЯ СКЛАДУ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ

Склад у системі рівнянь (1) початкових параметрів $\{q_{oi}\}$ і $\{q_{bi}\}$ повинен визначатися системним аналізом (а не експертами із числа розроблювачів КА), виходячи із призначення й мети створення ГСЗ, а також з урахуванням результатів аналізу, наявних фактичних техніко-економічних показників виробів-аналогів.

В рівнянні (1) початкові параметри q_{oi} й q_{bi} повинні задовольняти наступні основні вимоги:

- бути функціональними характеристиками КА, які впливають на результати його застосування за призначенням;
- бути взаємозалежними;
- урахувати відмінність КА й КА-аналогів за масою, числом транспондерів і способом виведення супутника на геостационарну орбіту.

Кінцевим результатом роботи з визначення складу параметрів $\{q_{oi}\}$ і $\{q_{bi}\}$ повинен бути формальний опис очікуваного корисного ефекту від застосування КА за призначенням і логічна схема кількісної оцінки ТР ГСЗ, які повинні су-

проводжуватися техніко-економічною інформацією від виробів-аналогів.

Структура корисного ефекту від використання ГСЗ за призначенням має вигляд

$$KE(ГСЗ) = E_K + E_{НБО} + E_T$$

де E_K — комерційний економічний ефект, $E_{НБО}$ — економічні вигоди (відвернені збитки) за рахунок використання космічних технологій у сфері національної безпеки й оборони, E_T — економічний ефект за рахунок трансферту створених технологій у галузі промисловості.

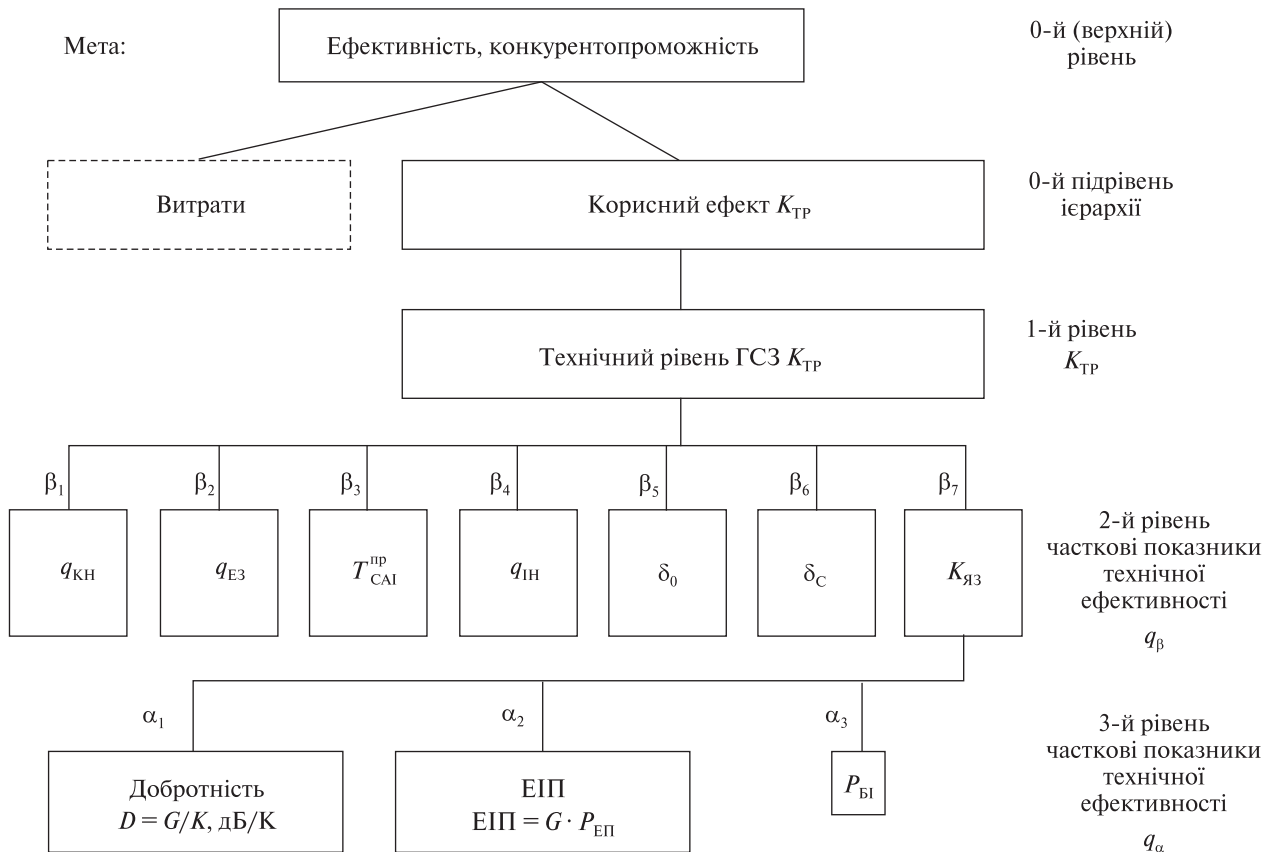
Логічна схема розв'язку завдання є початковими даними для експертів при формуванні матриці парних порівнянь (опис матриць наведено у п. 5). Приклад побудови логічної схеми кількісної оцінки ТР ГСЗ наведено на рисунку.

5. МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКІВ СТУПЕНЯ ВПЛИВУ ЧАСТКОВИХ ПОКАЗНИКІВ ТЕХНІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ НА ВЕЛИЧИНУ КОРИСНОГО ЕФЕКТУ

Коректне (точне або близьке до точного) визначення показників ступеня впливу $\{\alpha_i\}$ і $\{\beta_i\}$ дотепер є проблематичним.

Математичні завдання виду (1) досить часто зустрічаються у сучасній теорії прийняття рішень. Серед багатьох методів розв'язування такого завдання найбільш математично обґрунтованим і найбільш часто використовуваним є метод аналізу ієрархій (МАІ) Т. Сааті, у складі якого є метод парних порівнянь. Тому в основу запропонованого методичного підходу до розв'язку завдання кількісної оцінки ТР ГСЗ покладено метод парних порівнянь. Стосовно розглянутого завдання метод Т. Сааті модифіковано з метою максимально можливого врахування особливостей супутника зв'язку і забезпечення істотного зниження суб'єктивного фактора (експертів) на числове значення показника ТР ГСЗ.

5.1. Суть методу Т. Сааті [6] полягає у парному порівнянні факторів, що впливають на значення загального для них критерію вищого рівня ієрархії з використанням спеціальної фундаментальної шкали відносного впливу часткових критеріїв (факторів) на значення критерію більш високого рівня. Психологічно для



Формальний опис корисного ефекту й логічна схема кількісної оцінки ТР ГСЗ: q_{KH} — питома вага корисного навантаження (апаратури зв'язку) у загальній масі ГСЗ, q_{EZ} — питома енергозабезпеченість апаратури зв'язку (транспондерів), T_{CAIP}^{np} — наведений строк активного функціонування ГСЗ на орбіті, q_{IN} — питома інформативність ГСЗ, δ_0 — точність орієнтації (визначення кутового положення ГСЗ на орбіті), δ_C — точність кутової стабілізації ГСЗ на орбіті, K_{YZ} — показник якості зв'язку, D — добротність антенних систем, установлених на борту ГСЗ, G — коефіцієнт посилення антенної системи ГСЗ, K — шумова температура у приймальному тракті антенної системи ГСЗ, EIP — еквівалентна ізотропно випромінювана потужність антенної системи ГСЗ, P_{EIP} — випромінювана електрична потужність антенної системи ГСЗ, P_{BI} — ймовірність помилки на 1 біт інформації ГСЗ

експерта це значно легше, ніж оцінювати вплив усіх відразу часткових факторів. Властивість порівнювати предмети попарно притаманна людському мозку незалежно від кількості предметів, що потрапили в його поле зору. Таким чином, результати парних порівнянь більш близькі за точністю до реальних значень.

Результати парних порівнянь надаються матрицею $A(a_{ij})$, де a_{ij} є відношенням ступеня w_i впливу i -го фактора на значення w_j критерію більш високого рівня до відповідного впливу j -го фактора, тобто

$$a_{ji} = w_i / w_j \text{ і } a_{ii} = 1 / a_{ij}.$$

Опис функціональної шкали Т. Сааті наведено у таблиці. Згідно з методом Т. Сааті оцінкою коректності дій експертів при формуванні матриці $A(a_{ij})$ є так званий індекс погодженості. Перевищення індексу погодженості допустимого значення вказує на наявність у матриці $A(a_{ij})$ помилок (кардинальних, логічних). У цих випадках експерт (група експертів) повинні повторно скласти матрицю парних порівнянь. Формула індексу погодженості виявляє наявність помилок у матриці $A(a_{ij})$, але не дозволяє встановити, які елементи матриці є помилковими. З метою усунення цього недоліку метод Т. Сааті модерні-

Фундаментальна шкала відносної важливості Т. Сааті

Відносна важливість a_{ij}	Рівень відносної переваги фактора q_i над фактором q_j	Пояснення
1	Однакова важливість	Обидва фактори вносять однаковий вклад у показник ефективності (ПЕ)
2	Слабка перевага	Незначна перевага впливу i -го фактора на показник ПЕ порівняно з j -м фактором
3	Проміжний рівень між слабкою й середньою перевагою	Проміжне значення між слабким впливом і середньою перевагою
4	Середня перевага	Середня перевага впливу на показник ПЕ i -го фактора над j -м
5	Проміжний рівень між середньою й сильною перевагою	
6	Сильна перевага	Сильна перевага впливу на показник ПЕ i -го фактора над j -м
7	Проміжний рівень переваги між сильним і дуже сильним	
8	Дуже сильна перевага	Дуже сильна перевага впливу на показник ПЕ i -го фактора
9	Абсолютна перевага	Немає ніяких сумнівів, що вплив на показник ПЕ i -го фактора дуже сильний порівняно із j -м

зовано шляхом включення в нього додаткових функцій.

5.2. Спосіб побудови матриці парних порівнянь.

Первісний варіант матриці $A^0(a_{ij}^0)$ для парних порівнянь виконує експерт або група експертів під контролем провідного експерта (модератора), використовуючи підготовлену системним аналітиком техніко-економічну інформацію із супутників зв'язку (згідно з п. 4) і функціональну шкалу Т. Сааті.

Якщо первісна матриця $A^0(a_{ij}^0)$ не містить кардинальних або логічних помилок, то робота експертів на цьому завершується.

Якщо ж у результаті автоматичного контролю в матриці $A^0(a_{ij}^0)$ виявлено помилки, то експерти повинні їх усунути. Подальша участь експертів у визначенні показника ТР непотрібна.

5.3. Метод пошуку можливих грубих помилок у матриці парних порівнянь. На основі сформованої експертами первісної матриці $A^0(a_{ij}^0)$ автоматично (комп'ютерною програмою) будуються дві матриці: $B^0(b_{ij}^0)$ і $B(b_{ij})$. Матриця $B^0(b_{ij}^0)$ формується за правилом $b_{ij}^0 = 1$, якщо $a_{ij}^0 \geq 1$, інакше $b_{ij}^0 = 0$. Матрицям $A^0(a_{ij}^0)$ і $B^0(b_{ij}^0)$ відповідає кортеж номерів рядків $i^0 = \langle 1, 2, \dots, I \rangle$ і кортеж наборів стовпців $j^0 = \langle 1, 2, \dots, I \rangle$.

На підставі матриці $B^0(b_{ij}^0)$ формується бінарна матриця $B(b_{ij})$ шляхом упорядкування рядків цієї матриці по спаданню суми елементів рядків матриці $A^0(a_{ij}^0)$ і стовпців по зростанню сум елементів стовпців матриці $A^0(a_{ij}^0)$.

Кортеж рядків матриці $B(b_{ij})$ після цієї операції буде мати вигляд $i = \langle i_1, i_2, \dots, i_I \rangle$, а кортеж стовпців — $j = \langle j_1, j_2, \dots, j_I \rangle$. Елементи матриці $A^0(a_{ij}^0)$ не містять грубих помилок, якщо виконується умова

$$b_{ij} = 1 \text{ для всіх } j \geq i \tag{2}$$

$$b_{ij} = 0 \text{ для всіх } j < i.$$

Елементи матриці $A^0(a_{ij}^0)$ будуть містити грубі помилки, якщо умова (2) не виконується.

5.4. Метод пошуку можливих логічних помилок у матриці парних порівнянь. Рядки й стовпці матриці $A^0(a_{ij}^0)$ необхідно впорядкувати у відповідності з рядками й стовпцями бінарної матриці $B(b_{ij})$. В результаті одержимо матрицю $A(a_{ij})$ $i = \langle i_1, i_2, \dots, i_I \rangle$, $j = \langle j_1, j_2, \dots, j_I \rangle$.

Наявність можливих логічних помилок у матриці $A(a_{ij})$ визначається з умови дотримання транзитивності в рядках і стовпцях матриці $A(a_{ij})$:

$$a_{ij} \leq a_{i(j+1)} \text{ для } i \leq j, \tag{3}$$

$$a_{ij} \geq a_{(i+1)j} \text{ для } (i+1) > j.$$

Елементи матриці $A(a_{ij})$, для яких умова (3) не виконується, є помилковими. За індексами помилкових елементів a_{ij} визначаються помилкові елементи у матриці $A^0(a_{ij}^0)$.

5.5. Обчислення індексу погодженості елементів матриці парних порівнянь. Після усунення виявлених помилок у матриці попарних порівнянь $A^0(a_{ij}^0)$ визначаються власні числа $\lambda = \{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_I\}$ цієї матриці.

Індекс погодженості визначається за формулою (4) [6]

$$I_C(\lambda) = \frac{\lambda_{\max} - I}{I - 1}, \quad (4)$$

де λ_{\max} — максимальне власне число з безлічі $\{\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_I\}$.

Якщо параметр $I_C(\lambda)$ менший від наперед заданого рівня погодженості матриці парних порівнянь I_3 :

$$I_C \leq I_3, \quad (5)$$

то обчислюється власний вектор матриці $A^0(a_{ij}^0)$ для $\lambda = \lambda_{\max}$.

5.6. Визначення ступеня впливу часткових показників ефективності на величину корисного ефекту. У випадку виконання умови (5) нормовані складові власного вектора матриці парних порівнянь, знайдені для власного числа λ_{\max} , будуть [6] шуканими показниками значимості $\{\alpha_i\}$ й $\{\beta_j\}$, які необхідно використовувати для обчислення показника ТР за формулою (1).

5.7. Обчислення компонентів власного вектора матриці парних порівнянь у випадку невиконання умови (5). При невиконанні умови (5) уточнюється вихідна матриця $A^0(a_{ij}^0)$ з умови, що помилки, пов'язані із цілочисельністю значень у фундаментальній шкалі відносної важливості, пропорційні сумі елементів рядків матриці $A^0(a_{ij}^0)$. На основі матриці $A^0(a_{ij}^0)$ будується уточнена матриця $A^*(a_{ij}^*)$ у такий спосіб:

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

$$c_{mj} = \sum_{q=1}^I a_{mq}^0 \cdot a_{qj}^0 \cdot P_q, \quad c_{jm} = \frac{1}{c_{mj}},$$

$$P_q = \frac{\sum_{s=1}^I a_{qs}^0}{\sum_{s=1}^I \sum_{q=1}^I a_{qs}^0},$$

де число m дорівнює номеру рядка k матриці $A^0(a_{ij}^0)$, для якого параметр P_q приймає найбільше значення.

Для матриці $A^* = [a_{ij}^*]$ обчислюються максимальне власне число λ_{\max}^* та відповідні компоненти власного вектора $\alpha = \{\alpha_1^*, \alpha_2^*, \dots, \alpha_I^*\}$.

Отримані значення координат власного вектора α повинні використовуватися для обчислення показника ТР.

5.8. Укрупнений обчислювальний алгоритм кількісної оцінки ТР ГСЗ. Крок 1. Виконати опис вербальної постановки завдання (відповідно до п. 4), дані якого є початковими для експерта (експертів) при побудові двох матриць парних порівнянь $A_\alpha^0(a_{ij}^0)$ і $A_\beta^0(a_{ij}^0)$. Матриця $A_\alpha^0(a_{ij}^0)$ будується для часткових показників якості послуг зв'язку q_α (третій рівень ієрархії на рисунку). Матриця $A_\beta^0(a_{ij}^0)$ будується для часткових показників технічної досконалості конструкції ГСЗ q_β (другий рівень ієрархії на рисунку).

Крок 2. За даними, підготовленими на кроці 1 (відповідно до п. 5.2), сформувати первісну матрицю парних порівнянь $A_\alpha^0(a_{ij}^0)$.

Крок 3. Автоматична перевірка наявності грубих помилок у первісній матриці парних порівнянь (відповідно до п. 5.3).

При наявності помилок сформувати пари значень індексів рядків і стовпців у матриці $A^0(a_{ij}^0)$, що має помилки, та перейти до кроку 2.

Інакше перейти до кроку 4.

Крок 4. Автоматична перевірка наявності логічних помилок у матриці $A^0(a_{ij}^0)$ відповідно до п. 5.4. При наявності логічних помилок перейти до кроку 2. Інакше перейти до кроку 5.

Крок 5. Обчислити індекс погодженості відкоректованої на кроках 2, 3 і 4 матриці парних порівнянь відповідно до п. 5.5.

У випадку, якщо індекс погодженості перевищує допустиме значення, перейти до кроку 6. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 6. Уточнити минулу перевірку на наявність помилок матрицю парних порівнянь для усунення впливу на індекс погодженості відповідно до п. 5.7. Обчислити індекс погодженості для відкоректованої матриці $A^*(a_{ij}^*)$. Якщо індекс погодженості перевищує допустиме зна-

чення, то повторити крок 6 для первісної матриці $A^*(a_{ij}^*)$. Інакше перейти до кроку 7.

Крок 7. Обчислити значення показників впливу $\{\alpha_i\}$ відповідно до п. 5.6. Обчислити значення показника якості послуг зв'язку K_{CB} . Перейти до кроку 8.

Крок 8. Повторити кроки 2—6 для визначення показників значимості $\{\beta_i\}$:

- побудувати первісну матрицю $A_{\beta}^0(a_{ij}^0)$;
- усунути виявлені помилки в матриці $A_{\beta}^0(a_{ij}^0)$;
- побудувати (при необхідності) уточнену матрицю $A_{\beta}^*(a_{ij}^*)$ і повторити крок 6 для цієї матриці. Перейти до кроку 9.

Крок 9. Обчислити значення ступеня впливу $\{\beta_i\}$ відповідно до п. 5.6. Обчислити значення показника технічного рівня за формулами (1). Перейти до кроку 10.

Крок 10. Визначити технічну досконалість створюваного ГСЗ стосовно множини порівнюваних функціонально однорідних виробів-аналогів. Сформувати висновок про технічну досконалість створюваного ГСЗ, вибравши одне значення з множини лінгвістичних значень: <вищий від світового; рівний світовому; вищий від середньосвітового; рівний середньосвітовому; нижчий від середньосвітового; нижчий від світового рівня >.

ВИСНОВОК

1. Наведений методичний підхід до кількісної оцінки технічного рівня (технічної досконалості) геостационарного супутника зв'язку дозволяє суттєво знизити вплив суб'єктивного фактора на чисельне значення показника ТР. Це досягається за рахунок високого рівня формалізації процесу кількісної оцінки технічного рівня. Роль експертів зведено до мінімуму — до рівня підготовки допоміжних вихідних даних.

2. В основу пропонованого методичного підходу покладений досить математично обґрунтований і широко використовуваний у сучасній теорії прийняття рішень метод аналізу ієрархій Т. Сааті.

Метод Т. Сааті доповнений деякими математичними процедурами, які дозволяють:

- врахувати особливості геостационарного супутника зв'язку;
- автоматично контролювати судження експертів на предмет наявності помилок і логічних протиріч.

3. На основі запропонованого підходу може будуватися методика кількісної оцінки технічного рівня геостационарного супутника зв'язку.

ЛІТЕРАТУРА

1. Галькевич И. А. *Разработка инструментария определения технико-экономических параметров космических телекоммуникационных проектов*: дис. ... канд. экономич. наук. Москва, 2015. 283 с. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01007987089> (дата звертання: 07.06.2019).
2. Галькевич И. А. Методический подход к оценке конкурентоспособности ракетно-космической техники коммерческого назначения. *Тр. МАИ*. 2018. Вып. 73. URL: <http://www.mai.ru/science/trudy> (дата звертання: 08.02.2019).
3. 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.
4. 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. *Вестн. Самар. гос. аэрокосмич. ун-та*. 2010. № 2. С. 198—203.
5. Ногин В. Д. Упрощенный вариант метода анализа иерархий на основе нелинейной свертки критериев. *Вычисл. мат. и мат. физ.* 2004. **44**, № 7. С. 1259—1268.
6. Саати Т. *Принятие решений — метод анализа иерархий*. Москва: Радио и связь, 1993. 278 с.
7. Самохвалов Ю. Я., Бурба О. И. Оценка эффективности научных и научно-технических проектов на основе обобщенной функции Харрингтона. *Система управління, навігації та зв'язку*. 2018. Вип. 4. С. 77—85. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_4_17 (дата звертання: 20.05.2019).

Стаття надійшла до редакції 09.09.2019

REFERENCES

1. Galkevich I. A. (2015). *Development of a toolkit for determining the techno-economic parameters of space telecommunication projects*: dissertation for the degree of candidate of economic sciences. Moscow, 283 p. URL: <http://search.rsl.ru/ru/record/01007987089> (Last accessed: 07.06.2019).
2. Galkevich I. A. (2018). Methodical approach to assessing the competitiveness of rocket-space technology for commercial use. *Trudy MAI*, No. 73. URL: <http://trudymai.ru/upload/iblock/804/80409c6f075dd52366707575651f1c1d.pdf> (Last accessed: 07.06.2019).
3. Kryanov A. V., Semenov S. S. (2012). Development of modern technology and method to estimate technological level of complex technical systems based on arising technologies. *Large-Scale Systems Control*, No. 39, 5—36.
4. Kuleshov A. V., Prokopchik N. G., Bogomolov A. A., Abrosimov N. A. (2010). Technical approach for estimation of engineering level of universal launch complexes for space launch vehicles with use of overall parameter. *Vestnik of the Samara State Aerospace University*, No. 2, 198—203.
5. Noghin V. D. (2004). A simplified variant of the analytic hierarchy process based on a nonlinear scalarizing function. *Computational mathematics and mathematical physics*, **44**, No. 7, 1194—1202.
6. Saaty T. (1993). *Making decisions — analytic hierarchy process*. Moscow: Radio and communication.
7. Samokhvalov Yu., Burba O. (2018). Assessment of the efficiency of scientific and scientific and technical projects based on the Harrington generalized function. *Control, Navigation and Communication Systems*, No. 4, 77—85. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/suntz_2018_4_17 (Last accessed: 07.06.2019).

Received 09.09.2019

E. A. Petlyak¹

Head of Division

E-mail: petlyak@ukr.net

V. T. Marchenko²

Researcher

E-mail: office.itm@nas.gov.ua

¹ Yuzhnoye State Design Office

3 Krivorizka Str., Dnipro, 49008 Ukraine

² Institute of Technical Mechanics of the National Academy of Science of Ukraine
and the State Space Agency of Ukraine

15 Leshko-Popelia Str., Dnipro, 49005 Ukraine

ABOUT ONE OF THE APPROACHES TO THE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL LEVEL OF GEOSTATIONARY COMMUNICATION SATELLITES

The purpose of the study is to develop a methodological approach to the problem of a quantitative assessment of the technical level (technical excellence) of geostationary telecommunication satellites (GTS). The technical level indicator is a quantitative measure for assessing the perfection of the design of a product and the quality of products (services) produced with its use. This is an important technical and economic indicator of experimental design work. The value of the technical level indicator is one of the determining factors in the competitiveness of the created space system. The paper discusses the existing methodological approaches to the quantitative assessment of the technical level of science-intensive and technically complex products.

We present a new approach to determine the composition of technical performance markers for calculating the GTS technical level indicator allowing a formal description of the beneficial effect and a logical scheme for quantifying the technical level. The methodological approach to calculate the degree of influence of technical efficiency indicators on the value of the beneficial effect of the use of GTS is stated as well. It is based on a mathematical model of the hierarchy analysis introduced by T. Saaty, complemented by us with mathematical models for the best consideration of GTS technical features. It allowed us to ensure control of errors and contradictions in expert judgments involved in the preparation of initial data of unmeasurable or hardly measurable techno-economic indicators of GTS. Due to the higher level of formalization of the process of quantifying the technical level and the application of mathematical methods used in modern decision theory, the developed methodological approach serves to improve the quality of calculations significantly and to reduce the influence of the subjective factor in determining the value of the technical level indicator. Based on the above, we developed a method for quantitative assessment of the GTS technical level that meets the modern requirements.

Keywords: geostationary telecommunication satellite, quantitative assessment of the technical level, spacecraft, analytic hierarchy process, space technology.