УДК 621.002.56 https://doi.org/10.15407/itm2024.01.093

В. Т. МАРЧЕНКО, Н. П. САЗІНА

МЕТОДИЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ОЦІНКИ РІВНЯ КОМПЕТЕНТНОСТІ ЕКСПЕРТІВ У ГРУПІ ПРИ ВИЗНАЧЕННІ ЕФЕКТИВНОСТІ РАКЕТНО-КОСМІЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

Інститут технічної механіки
Національної академії наук України і Державного космічного агентства України,
вул. Лешко-Попеля, 15, 49005, Дніпро, Україна; e-mail:sazinana@ukr.net

Використання методів експертних оцінок істотно полегшує рішення важкоформалізованих задач. Однак при цьому на результат рішення накладається суб'єктивний фактор. В теорії прийняття рішень на сьогодні розроблено ряд методичних прийомів, які дозволяють знизити вплив суб'єктивного фактора на якість прийнятих рішень. Ця стаття присвячена розробці методу кількісної оцінки компетентності експертів за результатами експертного оцінювання при вирішенні задач визначення ефективності унікальних, технічно складних систем спеціального й подвійного призначення, зокрема, ракетно-космічних комплексів. При проведенні експертного оцінювання проєктів таких систем, кількісну оцінку компетентності експертів запропоновано проводити у два етапи: попередня оцінка компетентності експертів за їх фактографічними даними проводиться при формуванні складу експертної групи; уточнений розрахунок компетентності експертів проводиться безпосередньо перед розрахунком очікуваних показників цільової ефективності з використанням результатів експертних оцінок, виконаних за розробленою методикою. Запропонований у статті метод кількісної оцінки компетентності експертів заснований на оцінці кваліфікації експертів, що приймають участь у процесі рішення задачі визначення очікуваної цільової ефективності складної технічної системи.

Застосування матриці рангів дозволить уникнути випадків, коли при високому рівні погодженості експертних оцінок найточніші оцінки приймаються за аномальні. Для експертного оцінювання економічної й цільової ефективності ракетно-космічних систем пропонується будувати матрицю рангів на основі часткових критеріїв технічної ефективності та додаткових факторів непрямого контролю.

У представленій математичній моделі кількісної оцінки компетентності експертів містяться параметри налаштування математичної моделі на конкретні умови проведення експертного оцінювання (використовувані методи експертного оцінювання, шкали вимірів, конкретні обмеження тощо). Математична модель побудована виходячи з аксіоматичного твердження, що "істинні" значення оцінки значимості оцінюваних об'єктів експертизи лежать усередині області значень експертних оцінок. В роботі представлено також укрупнений алгоритм обчислення параметрів налаштування за даними попередньої обробки результатів експертного оцінювання. На основі наведених у статті математичної моделі та алгоритму може бути розроблена комп'ютерна програма визначення компетентності експертів за результатами експертного оцінювання.

Ключові слова: *експертне оцінювання, кількісна оцінка компетентності експертів, математична модель, ракетно-космічні комплекси, фактори непрямого контролю.*

Expert examination methods greatly facilitate the solution of difficult-to-formalize problems. However, in this case the solution is affected by a subjective factor. The decision-making theory has a number of methodological techniques that diminish its effect on the decision made. This paper presents a method of quantitative evaluation of experts' competence from the results of an expert examination of the efficiency determination of unique, technically complex systems of special and dual purpose, in particular space-rocket complexes. In an expert examination of projects of such systems, it is suggested that the experts' competence be quantitatively evaluated in two stages: a preliminary evaluation of the experts' competence from their factual data and a refined evaluation of the experts' competence just before the calculation of the expected indices of target efficiency using the results of expert examinations made by the procedure developed. The proposed method of quantitative evaluation of experts' competence is based on evaluating the qualification of the experts involved in the target efficiency determination of a complex engineering system.

A rank matrix constructed on the basis of partial criteria of technical efficiency and additional factors of indirect control is proposed as a tool to eliminate cases where at a high level of expert evaluation consistency the most accurate expert evaluations may be considered anomalous in the expert evaluation of the technical and target efficiency of space-rocket systems.

The presented mathematical model of quantitative evaluation of experts' competence includes parameters that adjust the mathematical model to specific conditions of the expert evaluation (expert evaluation methods employed, measurement scales, specific limitations, etc.). The mathematical model is constructed around the axiom that the "true" estimates of the significance of the objects under evaluation lie within the expert evaluation domain. The paper also presents an enlarged algorithm for adjustment parameter calculation from the results of expert estimate preprocessing. The presented mathematical model and algorithm make it possible to develop a computer program for determining experts' competence from expert evaluation results.

Keywords: *expert evaluation, quantitative evaluation of experts' competence, mathematical model, space-rocket complex, indirect control factor*.

Методи експертних оцінок є одним з основних інструментів у теорії прийняття рішень при вирішенні важкоформалізованих задач. Ключовими ознаками таких задач є значні труднощі у виконанні формалізованого (математичного) опису задачі та відсутність необхідного обсягу коректних (прийнятної якості) вихідних даних. До числа таких належить й задача оцінки очікуваного цільового ефекту від експлуатації створюваних складних технічних систем спеціального й подвійного призначення.

Математичне моделювання функціонування безпосередньо самих складних технічних систем не є проблемною задачею й досить широко застосовується в проєктно-конструкторських бюро. Проблемною задачею в цьому випадку є визначення структури комплексного показника "цільовий ефект" і встановлення аналітичних (або хоча б математико-статистичних) зв’язків між цільовим ефектом і основними тактико-технічними характеристиками створюваної складної технічної системи. Тому на практиці рішення подібних проблемних задач здійснюється з застосуванням методів і інструментів експертних оцінок. Використання методів експертних оцінок істотно полегшує рішення важкоформалізованих задач, однак при цьому на результат рішення накладається суб’єктивний фактор. В теорії прийняття рішень на сьогодні розроблено ряд методичних прийомів, які дозволяють знизити вплив суб’єктивного фактору на якість прийнятих рішень. В більшості випадків при використанні експертної інформації в процесі прийняття рішення враховується рівень компетентності кожного експерта.

Із практичного досвіду створення ракетно-космічних систем випливає, що розрахунок очікуваної цільової ефективності цих систем не можливий без використання експертної інформації. У свою чергу, експертна інформація повинна використовуватися з урахуванням рівня компетентності кожного експерта, залученого до проведення експертних оцінок.

Визначення компетентності експерта за фактографічною інформацією про нього явно недостатньо при проведенні експертного оцінювання ефективності унікальних технічно складних систем спеціального й подвійного призначення, зокрема, ракетно-космічних комплексів.

Значна частина наукових джерел інформації присвячені питанням кількісної оцінки компетентності експертів з використанням їх фактографічних даних. При написанні даної роботи було розглянуто публікації [1] – [16]. Серед робіт, присвячених питанням кількісної оцінки компетентності експертів на підставі індивідуальних експертних оцінок слід відзначити [1] – [3].

Дана стаття присвячена розробці методу кількісної оцінки компетентності експертів за результатами експертного оцінювання при рішенні задач розрахунку очікуваного цільового ефекту від експлуатації створюваних складних технічних систем, зокрема, об’єктів ракетно-космічної техніки.

При проведенні експертного оцінювання складних і дорогих науково-технічних систем, кількісну оцінку компетентності експертів доцільно проводити у два етапи:

– перший етап – попереднє визначення рівня компетентності експертів при формуванні експертної групи. У цьому випадку коефіцієнт компетентності експерта являє собою кількісну оцінку рівня досвіду і професійних знань потенційного члена експертної групи про об’єкт експертного оцінювання;

– другий етап – уточнена оцінка рівня компетентності експертів безпосередньо перед розрахунком показників ефективності з використанням результатів експертних оцінок. У цьому випадку коефіцієнт компетентності експерта буде являти собою кількісну міру рівня надійності результатів експертного оцінювання конкретного експерта.

Як вихідні положення при розробці запропонованого методичного підходу використано такі постулати:

– множина експертних оцінок стосовно заданого набору об'єктів (факторів) може бути представлена у вигляді векторів евклідова простору. Це концептуальне положення вперше було використано в роботі [3];

– визначення значень коефіцієнтів компетентності експертів доцільно виконувати із застосуванням ітераційних процедур. Це концептуальне положення вперше було використано в роботі [2].

При вирішенні задачі розрахунку очікуваної цільової ефективності складних технічних систем об'єктами експертизи, як правило, є часткові критерії, альтернативні проєкти, тактико-технічні характеристики конкретної складної технічної системи.

Вербальна постановка задачі. Задано вербально-числову матрицю (ВЧМ) $F(f_{mi})$ розмірності $m^* \times n$ зі значеннями експертних оцінок важливості (значимості) n об'єктів експертизи в заданій шкалі вимірів. ВЧМ, як правило, представляється у вигляді наступної таблиці:

Таблиця

Експерт	Фактор				
	1	…	i	…	n
1	f_{11}	…	f_{1i}	…	f_{1n}
⋮					
m	f_{m1}	…	f_{mi}	…	f_{mn}
⋮					
m^*	f_{m^*1}	…	f_{m^*i}	…	f_{m^*n}

де m^* – число експертів; n – число факторів; f_{mi} – оцінка m-м експертом важливості (значимості i-го об'єкта (фактора).

Елементами ВЧМ $f_{mi} > 0$ є бальні оцінки важливості.

У випадку, коли експертні оцінки виконані методом попарних порівнянь із використанням фундаментальної шкали відносної важливості Т. Сааті, елементи матриці $F(f_{mi})$ формуються за даними матриць парних порівнянь $A^{(m)} = (A_{ij}^{(m)})$ [4] – [6]. Кількість матриць парних порівнянь $A^{(m)} = (a_{ij}^{(m)})$, дорівнює числу експертів у групі.

Матриця $F(f_{mi})$ за заданими матрицями парних порівнянь формується наступним чином. Позначимо через $AF(f_{mi})$ матрицю, еквівалентну матриці $F(f_{mi})$, але побудовану за даними матриць парних порівнянь, тобто $F(f_{mi}) = AF(f_{mi})$.

$$AF = (f_{mi}):\ f_{mi} = \sum_{j}^{n_a} a_{ij}\ ,\ i = \overline{1, n_a}\ ,\ j = \overline{1, n_a}\ ,\ m = \overline{1, m^*}\ .$$

Елементи $a_{ij}^{(m)}$ містяться в матрицях парних порівнянь $A^{(m)} = (a_{ij}^{(m)})$.

Таблиця

	f_{11}	$\cdots$	f_{1i}	$\cdots$	f_{1n}
$AF(f_{mi}) =$	f_{m1}	$\cdots$	f_{mi}	$\cdots$	f_{mn}
	f_{m^*1}	$\cdots$	f_{m^*i}	$\cdots$	f_{m^*n}

Таким чином, у формалізованому виді задача полягає в тому, щоб за даними матриці $F(f_{mi})$ або $AF(f_{mi})$ (у випадку використання матриць парних порівнянь) визначити кортеж K коефіцієнтів компетентності експертів групи

$$K = \left\langle K_1, K_2,..,.K_{m,},..., K_{m^*} \right\rangle ,$$

де K_m – коефіцієнт компетентності m -го експерта.

Математична модель. Математична модель для рішення цієї задачі являє собою впорядковану множину аналітичних виразів і обмежень на основі яких може бути побудований обчислювальний алгоритм визначення значень складових частин K_m кортежу $K = \left\langle K_1, K_2,..,.K_{m,},..., K_{m^*} \right\rangle$:

– аналітичний вираз залежності коефіцієнта компетентності експерта K від величини похибки його оцінки δ: $K = f(\delta)$;

– аналітичні вирази для визначення похибки експертної оцінки δ як модуль різниці оцінок експерта f_m й істинного (true) значення f_{tr}. Задача визначення похибки δ містить деяку невизначеність, тому що не відомо "точне" значення f_{tr}. Значення f_{tr} може бути визначене приблизно (з наперед заданою точністю) методом послідовних наближень.

– ітераційну модель визначення "точного" значення величини f_{tr} , яку побудуємо в такий спосіб. Позначимо початкові значення через $fr_{tr}^{(0)}$. Виконаємо спеціальну попередню обробку даних матриць $F(f_{mi})$ і $AF(f_{mi})$ з використанням підготовленої організаторами експертного оцінювання (для конкретного експертного оцінювання) одномірної матриці контрольних факторів. При цьому використаємо кілька допущень:

Вказаний склад математичних моделей будується на основі таких допущень:

1) "істинне" значення оцінки f_{tr} лежить у середині області значень експертних оцінок. Виконання цього допущення забезпечується вибором якості й кількості експертів групи;

2) оцінювані експертами фактори не корелюють між собою. Це допущення забезпечується вибором складу оцінюваних факторів;

3) коефіцієнт компетентності експерта (функція $K = f(\delta)$) у питанні, що піддається експертній оцінці, є гладкою монотонно спадною (обернено пропорційною) функцією від величини δ, що є модулем відхилення експертної оцінки від "істинного" значення f_{tr} ;

4) область визначення функції $K = f(\delta)$ $D(f) = (0,+\infty)$ пов’язана з наступними обмеженнями: на практиці значення величини δ не може бути

більше, чим $\max\sum_i f_{mi}$. Область значень функції $E(f)=(0{,}1)$. При прагненні похибки δ до 0 $(\delta\to 0)$, функція $K=f(\delta)$ асимптотично прагне до 1, а при $(\delta\to\infty)$, функція асимптотично прагне до 0: $f(\delta)\to 0$.

Визначення структури й параметрів функції $K=f(\delta)$. Побудувати функцію $K=f(\delta)$ шляхом простої обробки статистичних даних неможливо через їх відсутність. Із цієї причини структура функції $K=f(\delta)$ визначена на основі допущень 3 і 4, які відображають властивості функції $K=f(\delta)$. Значення параметрів цієї функції визначаються за формальними правилами, виходячи із застосованого методу експертного оцінювання.

З аналізу класу відносно простих безперервних монотонно спадних і обмежених зверху й знизу функцій випливає, що умовам допущень 3 і 4 задовольняє прототип "S-подібної" функції $f(x)=\dfrac{1}{1+e^{-x}}$ (сигмоїда). Цей прототип є перетворенням осьової симетрії сигмоїди відносно вертикальної осі, що проходе через точку перегину.

Найбільш простими аналітичними виразами прототипу сигмоїди, які задовольняють припущенням, є зручні для практичного використання функції виду

$$K=\{1+\rho\cdot\exp(g(\delta-\bar{\delta}))\}^{-1}. \quad (1)$$

Для налаштування функції (1) на конкретні умови експертного оцінювання до складу цієї функції введені параметри налаштування: ρ, g і $\bar{\delta}$, значення яких більше 0. Точка $\delta=\bar{\delta}$ є точкою перегину функції (1). У роботі [3] наведена формула функції $K=f(\delta)$, що задовольняє допущенням 1 – 4 і має вид:

$$K=\frac{1}{(1-B)e^{br}+B}, \quad (2)$$

де B, b – параметри математичної моделі, а r – похибка експертної оцінки.

Практичне використання формули (2) не є зручним, тому що параметри B, b залежать від використовуваної шкали експертного оцінювання. Причому на параметр ρ автоматично накладається обмеження $B<1$. У функції (2) чітко не визначена точка перегину. Позитивною якістю запропонованої формули (1) є те, що параметри ρ, g і $\bar{\delta}$, є інструментом налаштування формули (1) на конкретні умови експертного оцінювання. Це забезпечує досить швидке спадання значень функції $f(\delta)$ після точки $\delta>\bar{\delta}$ (ділянка увігнутості функції). Це важливо, тому що максимально можлива похибка експертної оцінки δ не може бути нескінченною величиною, оскільки не може бути більше, ніж $\max\sum_i f_{mi}$. Це значить, що в точці $\delta=\max\sum_i f_{mi}$ значення функції $K=f(\delta)$ повинно бути близьким до 0: $K=f(\max\sum_i f_{mi})\approx 0$.

Параметр $\bar{\delta}$ визначає точку перегину. Спільне використання параметрів ρ і $\bar{\delta}$ дозволяє керівникові групи підготовки й проведення експортного оцінювання встановити граничне значення коефіцієнта компетентності K_g, яке ділить групу експертів на дві підгрупи: підгрупа з високим рівнем компетентності й підгрупа з невисоким рівнем компетентності. Параметр ρ визначається з умови $f(\bar{\delta}) = \frac{1}{1+\rho} = K_g$.

Визначення параметрів, g **та** $\bar{\delta}$**.** Керівник групи, який проводить підготовку й проведення експертних оцінок, після попередньої обробки даних матриць експертних оцінок визначає значення прийнятної відносної похибки експертних оцінок Δtr. У роботі [3] рекомендується приймати значення величини Δtr на рівні 0,4 (40 %) від модуля величини, прийнятої за "точне" значення, та встановлює відповідний цьому значенню рівень компетентності K_*. Експертна інформація з відносною похибкою більшою, ніж Δtr сприймається як не коректна. Якщо $K_m < K_*$, то оцінки експерта m може бути виключена з матриць експертних оцінок як аномальні дані. Величина прийнятної похибки δ^* визначається за формулою

$$\delta^* = \Delta tr \cdot \operatorname{mod} fr_{tr}^{(0)},$$

де $\operatorname{mod} fr_{tr}^{(0)}$ – модуль вектора $fr_{tr}^{(0)}$.

Значення величини $\bar{\delta}$ обране таким, щоб точка перегину функції $K = f(\delta)$ перебувала по середині інтервалу $(0, \delta^*)$. У цьому випадку

$$K(\bar{\delta}) = f(\bar{\delta}) = \frac{1}{1+\rho} = K_g \quad . \tag{3}$$

Із цього виразу керівник групи підготовки й проведення експертного оцінювання визначає потрібне значення параметра ρ. Як правило, за замовчуванням параметр ρ =1. При ρ =1 значення функції $K(\bar{\delta})$ в точці перегину графіка функції завжди буде дорівнює 0,5.

Параметр g визначається з умови:

$$K(\delta^*) = K_* \ . \tag{4}$$

Значення обмежень Δtr, K_* і K_g визначаються керівником групи підготовки й проведення експертного оцінювання за результатами попередньої обробки матриці експертного оцінювання.

Визначення похибки експертної оцінки δ**.** Зважаючи на допущення 2 і той факт, що матриця $F(f_{mi})$ або $AF(f_{mi})$ являє собою об'єднання результатів незалежних індивідуальних експертних оцінок m^* експертів групи, ці матриці можна відобразити в евклідів простір з декартовою метрикою розмірністю n (R^n). Образом рядків матриць будуть вектори в просторі R^n.

Наприклад, рядку матриці з номером m^* у просторі R^n буде відповідати вектор $\overline{f}_m$ з координатами $(f_{m1}, f_{m2},... f_{mi}, f_{mn})$.

Відображення матриць $F(f_{mi})$ і $AF(f_{mi})$ має такий вигляд:

$$F(f_{mi}),\ (AF(f_{mi})) \to \{\overline{f}_1, \overline{f}_2, ..., \overline{f}_m, \overline{f}_{m*}\}.$$

Кожному вектору $\overline{f}_m$ в просторі R^n $(f_m \in R^n)$ відповідає точка $F_m(f_{m1}, f_{m2},... f_{mi}, f_{m*n})$. Тоді величина δ_m може бути визначена за формулою:

$$\delta_m = \left\{\sum_i (f_{mi} - f_{tri})^2\right\}^{1/2}.$$

Визначення наближеного значення компонент вектора $\overline{f}_{tr}$. Компоненти векторної величини $\overline{f}_{tr}$ невідомі, але за певних умов, значення цих компонентів можуть бути визначені приблизно з наперед заданою точністю методом послідовних наближень. У допущеннях 1 – 4 містяться необхідні умови для вибору ефективного початкового значення координат вектора $\overline{f}_{tr}$ й приблизного знаходження компонент цього вектора методом ітерацій з наперед заданою точністю. Вихідними даними для початку ітераційного процесу є множина значень первинних похибок експертів $\{\delta_m^{(0)}\}$ і початкових значень компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ $(f_{tri}^{(0)})$

$$\delta_m^{(0)} = \left\{\sum_i (f_{mi} - f_{tri}^{(0)})^2\right\}^{1/2}.$$

Першим кроком ітераційного процесу для визначення початкових значень компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ $(f_{tr_i}^{(0)})$ є обчислення коефіцієнтів компетентності $K_m^{(0)}$ першої ітерації компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ $(f_{tr_i}^{(1)})$ за формулами:

$$K_m^{(0)} = \left\{1 + \rho \cdot \exp\left(g\left(\delta_m^{(0)} - \overline{\delta}\right)\right)\right\}^{-1},$$

$$k_m^{(0)} = \frac{K_m^{(0)}}{\sum_m K_m^{(0)}},$$

де $k_m^{(0)}$ – нормований коефіцієнт відносної компетентності; $\sum_m K_m^{(0)} = 1$.

Перший крок ітераційного процесу визначається наступним виразом:

$$f_{tr_i}^{(1)} = \sum_m f_{mi} \cdot k_m^{(0)},\ i = \overline{1,n},\ m = \overline{1,m^*}.$$

Всі наступні ітерації виконуються за формулами:

$$\delta_m^{(s)} = \left\{ \sum_i (f_{mi} - f_{tr\,i}^{(s)})^2 \right\}^{1/2}, \tag{5}$$

$$K_m^{(s)} = \left\{1 + \rho \cdot \exp\left(g\left(\delta_m^{(s)} - \bar{\delta}\right)\right)\right\}^{-1}, \tag{6}$$

$$k_m^{(s)} = \frac{K_m^{(s)}}{\sum_m K_m^{(s)}}, \tag{7}$$

$$f_{tr\,i}^{(s+1)} = \sum_m f_{mi} \cdot k_m^{(s)}, \; i = \overline{1,n}, \; m = \overline{1,m^*}. \tag{8}$$

Ітераційний процес за формулами (5)–(8) триває до виконання умови:

$$\left| f_{tr\,i}^{(s+1)} - f_{tr\,i}^{(s)} \right| < \varepsilon_f \cdot f_{tr\,i}^{(s)}, \; i = \overline{1,n},$$

де ε_f – наперед задана величина в %, що визначає точність обчислення компонентів $\{f_{tr\,i}\}$ вектора $\bar{f}_{tr}$.

Важливим є визначення початкового значення компонентів вектора $[(\bar{f}_{tr})]$. Від рівня коректності визначення початкового значення компонентів вектора $[(\bar{f}_{tr})]$ великою мірою залежить рівень коректності коефіцієнтів компетентності експертів. У роботі [2] початкові компоненти визначаються за даними повної матриці експертних оцінок як середнє арифметичне значення:

$$f_{tr\,i}^{(0)} = \frac{1}{m} \sum_m f_{mi}.$$

Варто зазначити, що в роботі [3] ітераційна процедура визначення значень компонентів вектора $[(\bar{f}_{tr})]$ не застосовується. За "істинне" значення компонентів вектора $\bar{f}_{tr}\,(f_{tr1}, f_{tr2}, ..., f_{tri}, f_{trn})$ приймаються координати центра кластера точок $F_m\,(f_{m1}, f_{m2}, ..., f_{mi}, f_{mn})$ у просторі R^n з виразу

$$F_{tr}\,(f_{tr1}, f_{tr2}, ..., f_{tri}, f_{trn}) = \arg\min \sum_m r_m \left| f_m - f_{tr} \right|,$$

де $r_m \left| f_m - f_{tr} \right| = \left\{ \sum_i r_m (f_{mi} - f_{tri})^2 \right\}^{1/2}$ – відстань між точками $F_m\,(f_{m1}, f_{m2}, ..., f_{mi}, f_{mn})$ й $F_{tr}\,(f_{tr1}, f_{tr2}, ..., f_{tri}, f_{trn})$.

І в першому й у другому випадку для визначення компонентів вектора $\bar{f}_{tr}$ використовується все поле даних, що містяться в матриці експертних оцінок. Початково передбачається, що всі експертні оцінки коректні або, принаймні, рівноцінні. Використання усереднених величин f_m для визначення компетентності експертів може привести до того, що при високому рівні погодженості експертних оцінок (високий коефіцієнт конкордації) експертна оцінка, що була визначена як аномальна, згодом виявиться самою точною. У цьому випадку експерти "дружно" помилилися. Цей факт визначає необхідність створення інструмента локалізації області "точних" значень компонентів вектора $\overline{f}_{tr}\ (f_{tr1}, f_{tr2}, ..., f_{tri}, f_{trn})$.

У випадку експертного оцінювання ракетно-космічних систем такий інструмент побудувати можна, тому що й економічна, й цільова ефективність знаходяться у прямій залежності від технічної ефективності цих систем [7]. Це дозволяє ранжувати часткові критерії, які досить нескладно піддаються експертній оцінці завдяки їхній простоті й очевидності. Ранжування часткових критеріїв технічної ефективності відносно нескладно виконати за допомогою математичного моделювання функціонування ракетно-космічних систем. До складу факторів, що підлягають експертному оцінюванню, крім значимих часткових критеріїв технічної ефективності додатково включаються ще один-два контрольні фактори, які на перший погляд здаються значимими, але при поглибленому аналізі повинні бути оцінені експертами як малозначущі. У такий спосіб формується одномірна матриця рангів $R_1\ (r_i^0)$ факторів непрямого контролю, що відповідає оцінюваним експертами факторам. Ця матриця є інструментом визначення області локалізації "істинних" значень величин f_{tri}.

Для визначення області локалізації значень величин f_{tri} використовуються дві допоміжні матриці $EF = (e_{mi})$ й $RF = (r_{mi})$, $m = \overline{1, m^*}$, $i = \overline{1, n}$.

Компоненти обох матриць обчислюються за формулами:

$$e_{mi} = \frac{f_{mi}}{\sum_i f_{mi}} 100\%\ , \tag{9}$$

$$r_{mi_1}\ (e_{mi\ 1}) = 1 \text{ для } e_{mi_1} = \max\{e_{m_1}, e_{m_2}, ..., e_{mn_a}\} = E_n(e_{mi}), \tag{10}$$

$$r_{mi_2}\ (e_{mi\ 2}) = \begin{cases} 2, \text{для } (e_{mi\ 2}) = \max\{E_m\ (e_{mi}) \setminus e_{mi_1}\}, \text{та } e_{mi\ 2} < [(1\text{-}\varepsilon) \cdot e_{mi_1}] \\ 1, \text{у іншому випадку} \end{cases} \tag{11}$$

$$r_{mi_k}\ (e_{mi\ k}) = \begin{cases} k, \text{для } (e_{mi\ k}) = \max\{E_n\ (e_{mi}) \setminus e_{mi_1}, e_{mi_2}, ..., e_{mi(k-1)}\} \\ r_{mi\ (k-1)}, \text{та } e_{mi_k} < [(1\text{-}\varepsilon) \cdot e_{mi(k-1)}] \text{ у іншому випадку} \end{cases}, \ k = \overline{3, n}, \tag{12}$$

$$\Delta r_m = \left| r_{m_1} - r_1^0 \right| + \left| r_{m_2} - r_2^0 \right| + ... + \left| r_{m_{n_a}} - r_{n_a}^0 \right|. \tag{13}$$

Номера рядків m_s матриці $AF(f_{mi})$, відібраних для обчислення початкових значень компонетів вектора $\overline{f}_{tr}$, визначаються за формулами:

$$m_1 = \left\{ m \,\middle|\, \Delta r_m = min\left\{\Delta r_1, \Delta r_2, \dots, \Delta r_{m^*}\right\} = R(\Delta r_m) \right\}, \tag{14}$$

$$m_2 = \left\{ m \,\middle|\, \Delta r_m = min\left\{R(\Delta r_m) \setminus \Delta r_{m1}\right\} \right\}, \tag{15}$$

$$m_s = \left\{ m \,\middle|\, \Delta r_m = min\left\{R(\Delta r_m) \setminus \Delta r_{m1}, \Delta r_{m2}, \dots, \Delta r_{m(s-1)}\right\} \right\}, \ m_s = \overline{1, m^{**}}, \tag{16}$$

$$m^{**} = min\{\, E\left(\frac{m^*}{2}\right),\ \{min\ m \big| (\Delta_m - \Delta r_m) < 0\}\}\ , \qquad (17)$$

де Δ_m – наперед задана гранична величина.

$$r_{m\,i_1} = 1 \text{ для } e_{mi_1} = \max\{e_{m1}, e_{m2},\ \ldots,\ \ e_{m\,n_a}\} = \max F\{e_{m\,i}\}\,, \qquad (18)$$

$$r_{m\,i_2} = \begin{cases} 2 \text{ для } e_{m\,i_2} = \max F\{e_{m\,i}\} \setminus e_{mi_1}, \text{ якщо } e_{m\,i_2} < e_{m\,i_1} \cdot (1-\varepsilon_a) \\ r_{m\,i_2} = r_{m\,i_1} \text{ в іншому випадку} \end{cases}\ , \qquad (19)$$

$$r_{m\,i_n} = \begin{cases} n \text{ для } e_{m\,i_n} = \max F\{e_{m\,i}\} \setminus \{e_{mi_1}, e_{mi_1}, \ldots,\ e_{mi_{(n-1)}}\},\ \text{якщо } e_{m\,i_n} < e_{m\,i_{(n-1)}} \cdot (1-\varepsilon_a) \\ r_{m\,i_n} = r_{m\,i_{(n-1)}} \text{ в іншому випадку} \end{cases}. \qquad (20)$$

Початкові значення компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ $\{\overline{f}_{tr_i^{(0)}}\}$ визначаються за формулами:

$$\overline{f}_{tr_i^{(0)}} = \frac{1}{m^{**}} \sum_{m_s} f_{m_s i} \quad m_s = \overline{1, m^{**}}\ . \qquad (21)$$

Алгоритм визначення коефіцієнта компетентності експертів. Початкові значення $\overline{f}_{tr_i^{(0)}}$ є вихідними даними для початку ітераційного процесу визначення коефіцієнта компетентності експертів у такій послідовності.

Крок 1. Сформувати матрицю $AF(f_{mi})$ за даними матриць $A_m = (a_{ij}^{(m)})$.

$$AF(f_{mi}):\ f_{mi} = \sum_j a_{ij}^{(m)}\ .$$

Крок 2. Визначити початкові значення компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$.

Крок 2.1. Побудувати допоміжні матриці $EF = (e_{mi})$ й $RF = (r_{mi})$, $m_s = \overline{1, m^*}$, $i = \overline{1, n}$ за формулами (9)–(13).

Крок 2.2. Визначити номера рядків m_s матриці $F(f_{mi})$ або $AF(f_{mi})$, відібраних для обчислення початкових значень компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ за формулами (14) – (17).

Крок 2.3. Початкові значення компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ $\{f_{tr_i}^{(0)}\}$ визначаються за формулою:

$$f_{tr_i}^{(0)} = \frac{1}{m^{**}} \sum_{m_s} f_{m_s i} \quad m_s = \overline{1, m^{**}}\ .$$

Крок 2.4. За початковими значеннями компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ визначити параметри ρ, g і $\overline{\delta}$ у формулі $K_m = \left\{1 + \rho \cdot \exp\left(g\left(\delta_m - \overline{\delta}\right)\right)\right\}^{-1}$. Параметри ρ, g і $\overline{\delta}$ обчислити за формулами (3), (4).

Крок 3. Обчислити початкові значення коефіцієнтів компетентності експертів за формулами:

$$\delta_m^{(0)} = \left\{ \sum_i (f_{mi} - f_{tri})^2 \right\}^{1/2},$$

$$K_m^{(0)} = \left\{ 1 + \rho \cdot \exp\left(g\left(\delta_m^{(0)} - \bar{\delta} \right) \right) \right\}^{-1}, \; m = \overline{1, m^*}.$$

Крок 4. Обчислити із заданою точністю ε_f значення компонентів вектора $\overline{f}_{tr}$ методом послідовних наближень за формулами (18) – (21).

Крок 5. Обчислити остаточні значення коефіцієнта компетентності експертів. Визначити кортеж коефіцієнтів компетентності експертів групи

$$K = \langle K_1, K_2, ..., K_m, K_{m^*}, \rangle,$$

$$K_m = \left\{ 1 + \rho \cdot \exp\left(g\left(\delta_m - \bar{\delta} \right) \right) \right\}^{-1}.$$

Висновки. Запропонований у статті метод кількісної оцінки компетентності експертів заснований на оцінці кваліфікації експертів, що приймають участь у процесі рішення задачі визначення очікуваної цільової ефективності складної технічної системи. У представленій математичній моделі кількісної оцінки компетентності експертів містяться параметри налаштування математичної моделі на конкретні умови проведення експертного оцінювання (використовувані методи експертного оцінювання, шкали вимірів, конкретні обмеження тощо). Математична модель побудована виходячи з аксіоматичного твердження, що "істинні" значення оцінки значимості оцінюваних об'єктів експертизи лежать усередині області значень експертних оцінок. Наведений укрупнений покроковий обчислювальний алгоритм може бути використаний для розробки комп'ютерної програми визначення компетентності експертів за результатами експертного оцінювання.

При проведенні експертного оцінювання складних і дорогих науково-технічних проєктів, таких як ракетно-космічні системи, кількісну оцінку компетентності експертів доцільно проводити у два етапи: попередня оцінка компетентності експертів (за фактографічними даними про експерта) проводиться при формуванні складу експертної групи; уточнений розрахунок компетентності експертів проводиться безпосередньо перед розрахунком очікуваних показників цільової ефективності з використанням результатів експертних оцінок, виконаних за даною методикою.

1. *Тоценко В. Г.* Методы и системы поддержки принятия решений. Алгоритмический аспект. К.: Наук. думка, 2002. 382 с.
2. *Воронин А. Н.* Системный анализ и многокритериальная оценка космических проєктов экспертными методами. Проблемы управления и информатики. 2004. № 1. С. 121–135.
3. *Архипов А. Е., Архипова С. А.* Оценивание уровня компетентности экспертов по результатам многообъектной экспертизы. Економіка та держава. 2015. № 6. С. 29–33.
4. *Alpatov, A. P., Marchenko, V. T., Khorolskyi, P. P. and Sazina, N. P.* Тне Status and Directions for Improving тне Regulatory and Procedural framework for тне Rocket and Space Technologv Development in Ukraine. Science and Innovation. 2022. Vol. 18, №1 (103). P. 76–88.
5. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Сазіна Н. П.* Кількісна оцінка рівня ризику збільшення витрат на розробку зразків космічної техніки. Технічна механіка. 2022. №4. С. 51–66. https://doi.org/10.15407/itm2022.04.051
6. *Саати Т.* Принятие решений – метод анализа иерархий. М.: Радио и связь, 1993. 278 с.

7. *Алпатов А. П., Марченко В. Т., Хорольський П. П., Сазіна Н. П.* Методологічні аспекти фінансово-економічного обґрунтування концептуальних завдань космічної галузі. Космічна наука і технологія. 2014. Т. 20, № 6 (91). С. 49–59. https://doi.org/10.15407/knit2014.06.049
8. *Пилипенко О. В., Переверзев Е. С., Алпатов А. П., Марченко В. Т., Печеневская О. К., Хорольский П. П.* Эффективность научно-технических проєктов и программ: монографія. Днепропетровск: Пороги. 2008. 509 с.
9. *Адамов А. П., Гаджиев У. А., Пирбудагов Г. М., Соцкая А. М.* Об определении компетентности экспертов методом взаимооценки. Автоматика и телемеханика. 1989. №3. С. 185–189.
10. *Панкова Л. А., Петровский А. М., Шнейдерман М. В.* Организация экспертизы и анализ экспертной информации. М.: Наука, 1984. 120 с.
11. *Литвак В. Г.* Экспертная информация. Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
12. *Harker P. N.* Incomplete Pairwise Comparisons in the Analytic Hierarchy Process. Mothl Modelling. 1987. Vol. 9. № 11. P. 837–848. URL.: https://core.ac.uk/download/pdf/82129055.pdf (дата звертання 28.11.2023). https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90503-3
13. *Кини Р. Л., Райфа. Х.* Принятие решений при многих критериях предпочтения: пер. с англ. / под ред. И. Ф. Шахнова. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
14. *Малин А. С., Мухин В. И.* Исследование систем управления. М.: Изд. дом ГУ ВШЭ, 2004. 399 с.
15. *Гнатієнко Г. М., Снитюк В. Є.* Експертні технології прийняття рішень: Монографія. К.: ТОВ Маклаут, 2008. 444 с.
16. *Полегенько А. Ф., Князский О. В.* Оценка относительной компетентности экспертов в экспертной группе с использованием матриц парных сравнений. Озброєння та військова техніка. 2014. № 3. С. 49–55. URL.: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ovt_2014_3_11.pdf (дата звертання 14.12.2023).

Отримано 21.02.2024,
в остаточному варіанті 18.03.2024