УДК 629.76/.78 https://doi.org/10.15407/itm2021.03.083

В. Т. МАРЧЕНКО[1], О. А. ПЕТЛЯК[2], Н. П. САЗІНА[1], П. П. ХОРОЛЬСЬКИЙ[1]

МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ДО РОЗРАХУНКУ ВАРТОСТІ ДОСЛІДНО-КОНСТРУКТОРСЬКИХ РОБІТ ЗІ СТВОРЕННЯ КОСМІЧНИХ АПАРАТІВ

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

[2] Державне підприємство "Конструкторське бюро "Південне" імені М. К. Янгеля,
вул. Криворізька, 3, 49008, Дніпро, Україна

Мета роботи – розроблення методичного підходу на створення єдиної для всіх виконавців дослідно-конструкторських робіт (ДКР) галузевої комп'ютеризованої методики розрахунку очікуваної вартості виконання ДКР зі створення космічних апаратів (КА). Основу методичного підходу складає вартісна модель КА та практичні рекомендації щодо розробки галузевої комп'ютеризованої методики.

Вартісні параметри створення, виробництва й експлуатації нових зразків КА та їх технічний рівень (досконалість) є визначальними факторами для оцінки їх конкурентоспроможності. Для ухвалення рішення про доцільність створення (або продовження робіт) нового зразка КА необхідно мати коректні результати розрахунку очікуваних витрат для виконання ДКР.

Використання в методиках розрахунку очікуваних витрат для виконання ДКР зі створення нових зразків ракетно-космічної техніки стандартизованого методу калькуляції є неприйнятним через необхідність наявності відпрацьованої конструкторської і технологічної документації, яка є кінцевим результатом будь-якої ДКР.

Розробка якісної галузевої методики розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення КА на основі параметричних методів (основні методи в методиках космічних агентств США й Європи) неможлива через відсутність в космічному агентстві України галузевої статистичної бази даних трудомісткості та матеріаломісткості таких робіт. Тому і виникла необхідність розробки нестандартної вартісної моделі ДКР зі створення КА.

Авторами в основу вартісної моделі закладено метод покомпонентної аналогії відносно простих складових частин КА, використання руху (знизу–вверх) по гілках зваженого орієнтованого деревовидного графа, який є моделлю технічної структури КА та методи нечіткої математики. Деревовидний граф Gi(V(C),D) моделює технічну структуру КА (V, D і C – множини відповідно вершин, дуг графа та складових частин КА; кожній вершині графа відповідає складова частина КА).

В статті наведена нестандартна вартісна модель ДКР зі створення КА (яка по своїй суті близька до нелінійної параметричної вартісної моделі) та методична основа для розробки сучасної галузевої методики розрахунку вартості ДКР зі створення КА із деталізацією за складовими частинами та за етапами.

Ключові слова: *космічний апарат, вартісна модель, зважений орієнтований деревовидний граф, технічна структура космічного апарату, дослідно-конструкторська робота, методика.*

The aim of this work is to develop a methodological approach to the development of a unified, common for all developers, computer-aided branch procedure for spacecraft development cost estimation based on a spacecraft cost model and practical recommendations on computer-aided branch procedure development.

The cost parameters of the development, manufacturing, and operation of new spacecraft and their technical level (perfection) are the determining factors in competitiveness assessment. To decide on the advisability of starting or resuming the development of a new spacecraft, one has to correctly estimate the development cost.

Using the standardized calculation method in estimating the development cost for new space hardware is unacceptable for lack of bug-free design and production documentation, which is the end product of any development activity.

Parametric methods (the basic methods used to estimate the spacecraft development cost in the USA and Europe) cannot be used in the development of a high-quality procedure for spacecraft development cost estimation for lack of a branch statistical database on spacecraft development labor intensiveness and materials consumption at the State Space Agency of Ukraine. This calls for a nonstandard cost model of spacecraft development.

The authors' cost model is based on a method of componentwise analogy for simple spacecraft components, moving (up and down) along the edges of a weighted oriented tree graph that models the spacecraft technical structure, and fuzzy analysis methods. The tree graph Gi(V(C),D) models the spacecraft technical structure (V, C, and D are the sets of graph vertices and edges and spacecraft components, respectively; to each graph vertex there corresponds a spacecraft component).

The paper presents a nonstandard cost model of spacecraft development, which in its essence is close to a nonlinear parametric cost model, and a scientific methodology for the development of an advanced branch procedure for spacecraft development cost calculation with component and stage detailing.

Keywords: *spacecraft, cost model, weighted oriented tree graph, spacecraft technical structure, development activity, procedure.*

Вартісні параметри створення, виробництва й експлуатації нових зразків

ракетно-космічної техніки (РКТ) та їх технічний рівень (досконалість) є визначальними факторами для оцінки конкурентоспроможності нових зразків РКТ. Для ухвалення рішення про доцільність створення нових зразків РКТ необхідно мати коректні результати розрахунку очікуваних витрат для виконання дослідно-конструкторських робіт (ДКР) і технічного рівня цих зразків.

Для великих, технічно складних, високотехнологічних і науковоємнісних систем (виробів), якими є зразки РКТ, достатньо точний розрахунок очікуваної вартості є надзвичайно складним завданням, складність якого обумовлена насамперед такими обставинами:

– високий рівень новизни, наукової ємності й надзвичайно високої технологічної складності виробів РКТ, а також тривалий цикл їхньої розробки;

– значний вплив суб'єктивного фактора на величину очікуваних витрат. Процес розрахунку вартісних показників і показника технічного рівня в Україні не тільки не формалізований, а навіть не впорядкований: кожний співвиконавець ДКР розраховує свої витрати за своїми внутрішніми стандартами (або інструкціями);

– значний рівень невизначеності початкових даних, що використовуються у процесі проведення розрахунків.

На сьогодні в Україні діють чотири загальнодержавних методичних документа (методики й методичні рекомендації) з розрахунку очікуваних витрат для виконання науково-дослідних робіт (НДР) і ДКР [1] – [4].

В основу методики [1] покладено спрощений параметричний метод розрахунку очікуваних витрат для створення нової техніки. Подібний метод дає прийнятний за точністю результат тільки за умови наявності достатнього обсягу достовірної й однорідної статистичної інформації для технічних виробів машинобудування. Спрощений параметричний метод забезпечує одержання коректних результатів розрахунку витрат зі створення неунікальної й ненаукоємної технічної продукції середнього машинобудування (автомобілі, металообробні верстати, електродвигуни тощо) Подібна методика не може застосовуватись для розрахунку очікуваних витрат на створення зразків РКТ через її спрощеність та відсутність необхідних статистичних даних.

В основу методичних вказівок [2] покладено калькуляційний метод. Використання даних методичних вказівок вимагає наявності готової й експериментально відпрацьованої конструкторської й технологічної документації. В той час як основним завданням ДКР є саме розробка й експериментальне відпрацьовування конструкторської й технологічної документації на вироби РКТ і передача її підприємствам-виробникам серійної продукції.

Методика [3] є перевиданням в 2006 році методики, розробленої Міністерством з питань європейської інтеграції у 2001 році.

Типове положення з планування, обліку й калькулювання собівартості НДР та ДКР [4] за своїм змістом аналогічне методичним вказівкам [2].

Для розрахунку очікуваних витрат на виконання ДКР зі створення нових зразків РКТ метод калькуляції явно неприйнятний, тому що вимагає наявності відпрацьованої конструкторської і технологічної документації, яка є кінцевим результатом будь-якої ДКР. Як показує практика, розрахунки очікуваних витрат для виконання ДКР зі створення нових зразків РКТ на основі методу калькуляції дають низький рівень точності.

Достатньо часто (на законній підставі) розроблювачами ДКР зі створення зразків РКТ метод калькуляції використовується, щоб підігнати вартість ро-

біт під бажаний результат, або ж підігнати ціну робіт під виділений обсяг фінансування, а не для обґрунтування об'єктивно потрібних обсягів фінансування для виконання ДКР, виходячи з новизни та технічної складності створюваного зразка. На практиці нерідкі випадки, коли прогнозні (очікувані) витрати в 2 – 3 рази перевищують фактичні (після виключення впливу інфляції та девальвації національної валюти) витрати.

Для забезпечення суттєвого підвищення якості розрахунків очікуваної вартості ДКР зі створення нових зразків ракетно-космічної техніки необхідна розробка відповідних вітчизняних галузевих комп'ютеризованих методик, зокрема методики розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення КА.

1. Сучасний стан методичного забезпечення розрахунків очікуваної вартості ДКР РКТ в закордонних космічних агентствах. Космічні агентства країн-лідерів у сфері створення та використання ракетно-космічної техніки (США, Франція, Російська Федерація, Німеччина, Італія та ін.) велику увагу приділяють питанням забезпечення коректного техніко-економічного обґрунтування ДКР зі створення об'єктів РКТ. В цих організаціях розроблена та постійно удосконалюється система методик, яка дозволяє достатньо точно проводити розрахунки очікуваних витрат для виконання ДКР зі створення нових зразків РКТ.

Наприкінці 80-х років минулого століття керівництвом космічних агентств США (NASA) та Європи (ESA) була поставлена задача щодо створення системи якісних комп'ютеризованих галузевих методик розрахунків очікуваної вартості зі створення нових зразків РКТ, кількісної оцінки ризиків проєктів з їх створення та рівня якості цих зразків. Перша версія таких методик створена в космічному агентстві США в 1996 р., а в Європейському космічному агентстві – в 1998 р. [5]. В подальшому створена система методик постійно удосконалювалася та розширювалася. Станом на кінець 2019 р. система методик щодо розрахунку (прогнозування) очікуваної вартості та кількісної оцінки ризиків створення та експлуатації нових зразків РКТ налічує біля 2-х десятків методик, серед яких можна виділити наступні: PRICE-H, TRANSCOST, USCM, SSCM, UnSVC, FAST, SATCAV, NAFCOM, TRASIM, CEDRE, RACE Model, TIW-Q,D, ECOS, ACES та ін. [5] – [10].

Слід відзначити, що зазначені методики постійно удосконалюються з періодичністю 2 – 5 років.

Практично в усіх з перерахованих методик використовується багатомірна параметрична модель затрат (Parametric) як залежність вартості від значень основних технічних характеристик нового зразка РКТ. Числові значення параметрів цієї моделі визначені за статистичними техніко-економічними даними раніше створених зразків-аналогів. Зрідка використовуються методики на основі методу аналогій (у випадках, коли новий зразок є модернізацією існуючого зразка або у випадку проведення оперативної оцінки вартості). Методики розрахунку очікуваної вартості ДКР, в основі яких лежить метод калькуляції, в NASA і ЄКА не використовуються. В той же час в Україні і в Російській Федерації для розрахунків очікуваної вартості створення нових зразків РКТ використовуються методики, які розробляються кожним підприємством з урахуванням своїх суб'єктивних інтересів та базуються на методі калькуляції. В Російській Федерації використання подібних методик в принципі можливо, тому що галузевим науково-дослідним інститутом з питань вирішення економічних проблем ракетно-космічної промисловості (організа-

ція "Агат") створена та підтримується в актуальному стані галузева база даних трудомісткості робіт, які виконуються в процесі розробки зразків РКТ. Подібна база даних в ракетно-космічній галузі України взагалі відсутня.

2. Вербальна постановка задачі з розробки методичного забезпечення розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення космічних апаратів.

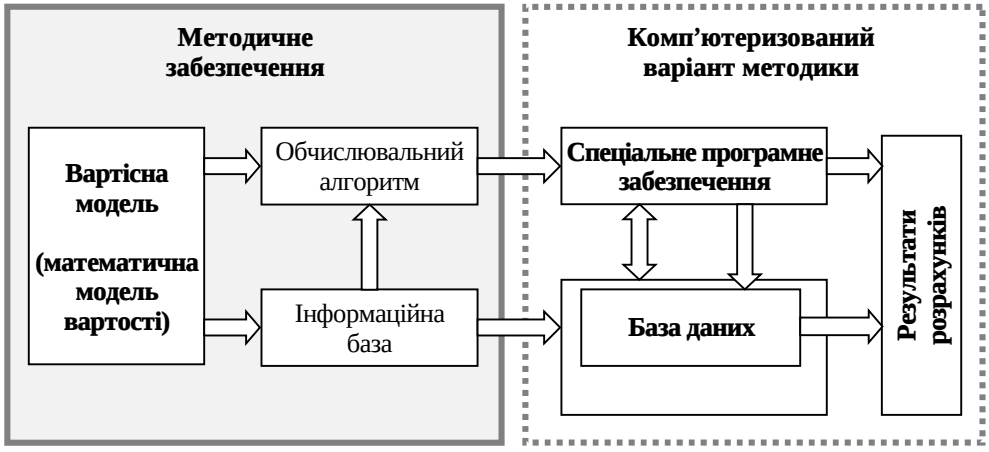
Необхідно розробити науково-методичне забезпечення розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення космічних апаратів (КА) у складі:

– математичної моделі для розрахунку вартості (вартісної моделі);

– обчислювального алгоритму;

– засобів формування та ведення інформаційної бази даних.

Структура сучасної галузевої методики розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення зразків РКТ (виходячи з досвіду космічних агентств NASA та ESA) приведена на рис. 1.



СУБД – система управління електронною базою даних

Рис. 1 – Структура сучасної методики розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення зразків РКТ

Вартісна математична модель ДКР (VM) є системою алгебраїчних рівнянь, які відображають вхідні дані (ID) в результати розрахунків (REZ) вартості ДКР і, з математичної точки зору, є алгебраїчним оператором (AlO). Формально вартісна модель може бути представлена в такому вигляді:

$$VM : \{ID\} \xrightarrow{AlO} \{REZ\}.$$

Інформаційну базу складають об'єктивно існуючі (згідно діючих нормативних документів) документи.

До складу спеціального програмного забезпечення для реалізації обчислювального алгоритму входять: програма управління обчислювальним процесом включно з інтерфейсом, програмні модулі розрахунків, програми формування екранних форм для введення початкових даних в базу даних, формування вихідних форм результатів розрахунків та підготовки цих результатів для передачі по каналу зв'язку тощо.

3. Побудова вартісної моделі ДКР зі створення зразка КА. Розрахунок очікуваної вартості технічно складних унікальних виробів, таких як зразки РКТ, вимагає складних методик.

Ядром вартісної моделі є закладений в неї метод розрахунку вартості. На практиці використовуються наступні методи:

– нормативно-калькуляційний;

– метод аналогій;

– параметричний (екстраполяційно-статистичний);

– метод розрахунку за питомими витратами (використовується тільки на передпроєктній стадії);

– метод експертних оцінок (використовується тільки на передпроєктній стадії).

Приведені вище недоліки нормативно-калькуляційного метода роблять неможливим його використання для розробки якісної методики очікуваної вартості ДКР зі створення нових зразків РКТ.

Метод аналогій використовується, коли новий зразок є модернізацією вже існуючого зразка, або у випадку необхідності грубої, але швидкої оцінки вартості, тому цей метод також не може бути покладено в основу методики.

Параметричний метод є найбільш ефективним (з точки зору точності) сучасним методом розрахунку очікуваної вартості створення зразків нової техніки й використовується майже в усіх методиках NASA та ЕКА.

Параметричний метод представляє собою певну математичну залежність (параметричні рівняння) між тактико-технічними характеристиками зразка нової техніки та витратами для його створення. У загальному випадку параметричні рівняння є рівняннями багатофакторної, у більшості випадків, нелінійної регресії. Для побудови таких параметричних рівнянь необхідна наявність значного обсягу статистичних даних по зразках-аналогах. Наявність таких даних дозволяє одержати залежність вартісних показників нового зразка від рівня його основних тактико-технічних характеристик. Такі залежності будуть справедливі для зразків, які близькі за призначенням та не мають корінних принципових відмінностей за конструктивним рішенням від зразків-аналогів .

Через відсутність в космічному агентстві України галузевої статистичної бази даних трудомісткості та матеріаломісткості робіт зі створення зразків РКТ, розробка якісної галузевої методики розрахунку очікуваної вартості ДКР космічних апаратів на основі класичних параметричних методів (регресійних моделей) неможлива. З тієї ж причини, не можливо використати в якості галузевої методики ні одну з існуючих закордонних методик (SSCM19, PRICE-H, USCM, Unsvc, NAFCOM, ECOS тощо). Наприклад, база статистичних даних для методики SSCM19 включає вартісні та технічні характеристики приблизно 100 космічних апаратів. Неможливість прямого використання закордонних методик у космічній галузі України обумовлена тим, що параметри системи алгебраїчних рівнянь вартісних моделей, які використані в цих методиках, визначені з використанням статистичних техніко-економічних даних космічного агентства-володаря методики. Для використання закордонних методик у космічній галузі України необхідно параметри вартісних моделей у цих методиках замінити на параметри, що відповідають статистичним техніко-економічним показникам створених в Україні космічних апаратів. Окрім того, вільний доступ до закордонних методик (навіть на комерційні основі) відсутній.

Після проведення наукового пошуку та аналізу проблеми розробки якісних методик розрахунку очікуваної вартості ДКР зі створення РКТ, сформовано спосіб побудови нестандартної вартісної моделі.

В основу побудови нестандартної вартісної моделі покладено принцип покомпонентної аналогії та метод узагальнених параметрів. Використання принципу покомпонентної аналогії дозволяє виконувати детальні розрахунки вартості відносно простих складових частин космічного апарату, для яких відносно легко можна знайти зразки-аналоги. Метод узагальнених параметрів (як альтернатива параметричній моделі) детально описаний (стосовно ракетних комплексів) в статті [11]. Згідно методу узагальнених параметрів загальна сума затрат на розробку ракетного комплексу ($З_{СУМ}$) визначається з використанням наступного базового рівняння:

$$З_{СУМ} = A \times G_k \times K_H \times K_{СЛ} \times K_{РОЗ},$$

де A – постійний коефіцієнт, визначений в результаті обробки статистичних даних за прототипами (витрати на 1 кг ваги конструкції); G_k – вага сухої конструкції (без ваги ракетного палива); K_H – коефіцієнт новизни розробки; $K_{СЛ}$ – коефіцієнт складності конструкції в порівнянні з виробом-аналогом; $K_{РОЗ}$ – коефіцієнт збільшення затрат через неоптимальність планування і фінансування (коефіцієнт розробки і календарного планування).

Величини G_k, K_H та $K_{СЛ}$ визначаються з використанням емпіричних функцій від значень тактико-технічних характеристик (ТТХ) зразка ракетного комплексу, що створюється.

На відміну від [11] (через відсутність можливості побудови емпіричних функцій) для розрахунку значень параметрів K_H та $K_{СЛ}$ у вартісній моделі ДКР КА використані методи нечіткої математики. Окрім того, параметри K_H та $K_{СЛ}$ визначаються для кожної складової частини космічного апарата, а замість ваги конструкції G_k та витрат на 1 кг ваги конструкції A в запропонованій вартісній моделі використовується відповідно трудомісткість основних робіт зі створення зразків-аналогів складових частин нового КА та середньомісячний виробіток на одного працівника.

3.1 Метод обчислення коефіцієнта новизни в вартісній моделі ДКР КА. За межами методики розрахунку вартості дослідно-конструкторських робіт зі створення космічного апарату Головним розробником повинна бути проведена класифікація ДКР зі створення КА за ознакою степінь новизни розробки у формі нечіткої лінгвістичної змінної (НЛЗ) під назвою "Новизна розробки" з терм-множиною (вербальні значення лінгвістичної змінної) T:

T ={запозичується раніше створений зразок ($\tilde{C}_{H0}$); незначна модернізація аналога ($\tilde{C}_{H1}$); середня модернізація аналога ($\tilde{C}_{H2}$); істотна модернізація аналога ($\tilde{C}_{H3}$); нова розробка стосовно аналога ($\tilde{C}_{H4}$); суттєво нова розробка стосовно аналога ($\tilde{C}_{H5}$); розробка зразку наступного покоління ($\tilde{C}_{H6}$); принципово новий зразок стосовно вітчизняного прототипу ($\tilde{C}_{H7}$)}. Знак "~" означає, що $\tilde{C}_{Hк}$ є нечіткою множиною.

Кожному терму $\tilde{C}_{Hк}$ ставиться у відповідність нечіткий інтервал значень (в %) степені новизни розробки ДКР, тобто $\tilde{C}_{Hк}$ є нечітким числом з неперервною функцією належності $\mu_{\tilde{C}_{Hк}}(x)$ на універсальній множині $X=[0;100]$, яка є множиною дійсних чисел на інтервалі $[0;100]$.

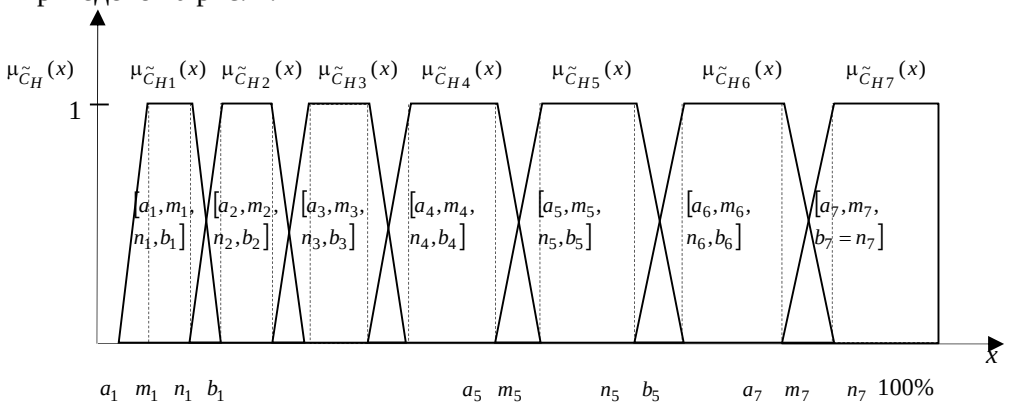
Згідно [14], нечітким числом є випукла нечітка множина з кусково-неперервною функцією належності, що задана на множині дійсних чисел.

$$\mu_{\tilde{C}_{Hк}}(x)=[a_к,m_к,n_к,b_к](x)=\begin{cases}0, & якщо \quad x<a_к\\ \dfrac{x-a_к}{m_к-a_к}, & якщо \quad a_к\le x\le m_к\\ 1, & якщо \quad m_к<x<n_к\\ \dfrac{b_к-x}{b_к-n_к}, & якщо \quad n_к\le x\le b_к\\ 0, & якщо \quad x>b_к\end{cases},$$

$$\tilde{C}_{Hк}\subset X=[0;100],\quad к=\overline{1,7}.$$

При побудові функції належності лінгвістичної змінної "новизна розробки" необхідно дотримуватись умов: $n_{k-1}=a_k$, $b_{k-1}=m_k$ (для $k=\overline{2,7}$) і $b_7=n_7$, а із функції $\mu_{\tilde{C}_{H7}}(x)$ потрібно виключити четверту складову $\dfrac{b_7-x}{b_7-n_7}$.

Графік функцій належності лінгвістичної змінної "новизна розробки" приведено на рис. 2.



$$\mu_{\tilde{C}_{H0}}(x=0)=1;\ \mu_{\tilde{C}_{H0}}(x>0)=0$$

Рис. 2 – Графік функцій належності лінгвістичної змінної "Новизна розробки"

В даному випадку функція належності є функцією розподілу міри можливості, а точніше, впевненості Головного розробника КА, що нечітко визначена величина "степінь новизни розробки"[1)] прийме конкретне значення на нечіткому інтервалі $[a_к,m_к,n_к,b_к]$. Сегмент $(m_к,n_к)$ є інтервалом, в якому найбільш можливе знаходження значення параметра $C_{Hк}$, а величини

[1] Степінь новизни розробки визначається як доля (в %) заново сконструйованих вузлів та деталей. На етапі ДКР цей параметр є нечіткою величиною, а після завершення ДКР цей параметр вимірюється і стає чіткою величиною [13]. Степінь новизни зразка (C_H) та степінь її уніфікації $C_{УН}$ в сумі складають 100 %.

$(m_к - a_к)$ та $(b_к - n_к)$ є оцінкою розмитості границь сегменту $(m_к, n_к)$. Нечіткому інтервалу $[a_к, m_к, n_к, b_к]$відповідає трапецієвидна функція належності. Побудова такої функції належності (визначення параметрів $a_к, m_к, n_к, b_к$) є достатньо простою задачею для досвідченого проєктанта (в умовах наявності навіть обмеженого об'єму, але достатньо коректних фактичних даних по 2 – 3 аналогічним розробкам).

З практичного досвіду відомо, що трудомісткість основних робіт (Tp) зі створення КА та його складових частин є показниковою функцією від степені новизни розробки [13]. Найбільш вдало трудомісткість основних робіт описується двопараметричною (параметри A_0 та α) емпіричною формулою виду

$$Tp(C, C_H) = A_0(C) \times \exp(\alpha \times (C_H - C_H^*)/100), \quad (1)$$

де C_H^* – точна нижня межа множини $\tilde{C}_H$, при якій розроблюваний зразок вважається новим, тобто $K_H \geq 1$; $C_H^* = \inf\{\tilde{C}_H\}$ за умови, що $Tp(C, C_H) = A_0(C)$.

В формулі (1) величина C_H є нечітким числом. В нечіткій математиці нечіткі множини та числа позначаються знаком "~". Параметр $A_0(C)$ залежить від особливостей конструкції конкретного зразка C, а параметри α та C_H^* залежать тільки від типу КА. Параметри α та C_H^* є чіткими числами і визначаються Головним розробником КА за межами вартісної моделі.

За коефіцієнт новизни K_H у випадку розробки конструкції космічного апарата прийнято відношення трудомісткості основних робіт зі створення нового зразка до трудомісткості відповідних основних робіт зі створення зразка-аналога.

З урахуванням (1)

$$\tilde{K}_H(C_H) = \exp(\alpha \times (\tilde{C}_H - C_H^a)/100). \quad (2)$$

В стислій узагальненій формі

$$K_H(C_H) = f(C_H). \quad (3)$$

Принцип узагальнення Заде для нечітких множин дозволяє використання чітких функцій (відображень) f від нечітких змінних [14]. Оскільки у виразі (2) величина C_H є нечітким числом, то K_H є також нечіткою величиною [14]:

$$f : X \longrightarrow Y; \; y = f(x); \; \tilde{C}_H \subset X = [0;100];$$
$$\tilde{K}_H \subseteq Y = [y_{\min}; y_{\max}];$$
$$y_{\min} = f(a_k); \; y_{\max} = f(b_k).$$

У формулі (2) параметр $\alpha > 0$, тому відповідна формулі (3) функція $f(x)$ є безперервною строго зростаючою однозначною функцією на проміжку $[a_к, b_к]$, а значить існує обернена до неї однозначна функція $x = f^{-1}(y)$.

Функція належності нечіткого числа $\tilde{K}_H$ згідно з [14] має наступний вигляд:

$$\mu_{\tilde{K}_H}(y) = \mu_{\tilde{C}_H}(x) = \mu_{\tilde{C}_H}(f^{-1}(y)).$$

Тоді

$$\tilde{K}_H(\tilde{C}_H) = f(\tilde{C}_H) = f(\int\limits_{x\in X} \mu_{\tilde{C}_H}(x)/x) = \int\limits_{y\in Y} \mu_{\tilde{C}_H}(f^{-1}(y))/y). \qquad (4)$$

Знак $\int$ означає безперервність функцій належності $\mu_{\tilde{C}_H}(x)$ та $\mu_{\tilde{K}_H}(y)$.

Значення параметра α найбільш зручно визначити із відомого співвідношення трудомісткостей розробки конструкторської документації зразків-аналогів.

Для використання нечіткого числа $\tilde{K}_H$ в розрахунках вартості за формулами (6)–(15) необхідно виконати його дефазифікацію[2)] (перетворення нечіткого числа в чітке) за методом центра тяжіння

$$K_H = defz(\tilde{K}_H) = \frac{\int\limits_{y_{\min}}^{y_{\max}} y \cdot \mu_{\tilde{K}_H}(y)dy}{\int\limits_{y_{\min}}^{y_{\max}} \mu_{\tilde{K}_H}(y)dy} = \frac{b^{*2} - a^{*2} + n^{*2} - m^{*2} + b^* \cdot n^* - a^* \cdot m^*}{3(b^* - a^* + n^* - m^*)},$$

$$\gamma^* = \exp(\alpha(\gamma - C_H^{\alpha}) \cdot 10^{-2}), \quad \gamma = \{a, m, n, b\},$$

$$\gamma^* = \{a^*, m^*, n^*, b^*\}, \ \{a, m, n, b\} \xrightarrow{f} \{a^*, m^*, n^*, b^*\}.$$

Знак $\int$ в даному випадку означає операцію інтегрування.

Недефазифіковані нечіткі значення коефіцієнтів новизни та складності будуть використовуватися при проведенні розрахунків ризику збільшення витрат на виконання ДКР. Розрахунки вартості з використанням дефазифікованих нечітких величин проводяться виконавцями складових частин КА. Результати цих розрахунків будуть використані Головним розробником КА для оцінки рівня ризику збільшення витрат на виконання ДКР за окремою методикою.

3.2. Метод обчислення коефіцієнта складності в вартісній моделі ДКР КА. Коефіцієнт складності $K_{СЛ}$ дозволяє врахувати вплив ТТХ нового зразка на збільшення трудомісткості основних робіт зі створення цього зразка відносно трудомісткості відповідних основних робіт для зразка-аналога.

По аналогії з [13] коефіцієнт складності $K_{СЛ}$ може бути виражений показовою функцією від ТТХ нового зразка

$$K_{СЛ}(C) = \left(\frac{1 - K_{ТУ}(C^{(a)})}{1 - K_{ТУ}(C)}\right)^{\beta}.$$

При цьому $K_{ТУ}(C) \le 0{,}99$, а $K_{ТУ}(C^{(a)}) \le K_{ТУ}(C)$.

В стислій узагальненій формі

$$K_{СЛ}(C) = \varphi(\beta), \qquad (5)$$

---

[2] Виходячи з умов побудови функцій належності $\mu_{\tilde{C}_H}(x)$ та $\mu_{\tilde{\beta}}(u)$ (ці функції є числовою мірою можливості) процедура дефазифікації (defz) за методом центра тяжіння аналогічна (подібна) знаходженню математичного очікування випадкових величин в теорії ймовірності.

де $K_{TY}(C)$ та $K_{TY}(C^{(a)})$ – показники технічного рівня відповідно нового зразка та його аналога.

В формулі (5) показник β є нечітким числом на нечіткому інтервалі $[c, p, s, d]$. Параметри c, p, s, d залежать тільки від типу КА і визначаються Головним розробником КА за межами вартісної моделі. Значення параметрів c, p, s, d найбільш зручно визначити з відомого співвідношення трудомісткостей автономних (комплексних) випробовувань зразків-аналогів. Показники $K_{TY}(C)$ та $K_{TY}(C^{(a)})$ обчислюються за окремою методикою.

Функція належності нечіткого числа $\tilde{\beta}$ має вигляд:

$$\mu_{\tilde{\beta}}(u) = [c, p, s, d](u) = \begin{cases} 0, & якщо \quad u < c \\ \dfrac{u-c}{p-c}, & якщо \quad c \le u \le p \\ 1, & якщо \quad p < u < s \\ \dfrac{d-u}{d-s}, & якщо \quad s \le u \le d \\ 0, & якщо \quad u > d \end{cases}$$

$$\tilde{\beta} \subseteq U = [0; \beta_{\max}], \quad \beta_{\max} < 2 \text{ , [13]}.$$

Графік функцій належності $\mu_{\tilde{\beta}}(u)$ приведено на рис. 3.

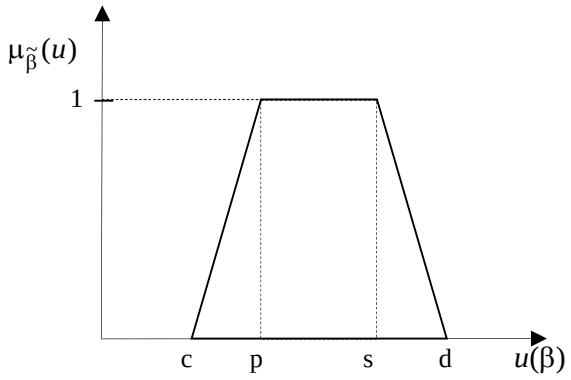


Рис. 3 – Графік функцій належності нечіткої величини $\tilde{\beta}$

Функція φ відображає множину U в множину V:

$$\varphi : u \longrightarrow V ; \; V = [\varphi(c), \varphi(d)].$$

Функція належності нечіткого числа $K_{СЛ}$ згідно з [14] має вигляд:

$$\mu_{\tilde{K}_{СЛ}}(v) = \mu_{\tilde{\beta}}(u) = \mu_{\tilde{\beta}}(\varphi^{-1}(v)) .$$

Тоді

$$\tilde{K}_{СЛ}(v) = \varphi(\tilde{\beta}) = \int_{v \in V} \mu_{\tilde{\beta}}(\varphi^{-1}(v)) / v .$$

Після проведення дефазифікації нечіткого числа $\tilde{K}_{СЛ}$ його чітке значення

$$K_{СЛ}(C) = defz(\tilde{K}_{СЛ}) = \frac{d^{*2} - c^{*2} + s^{*2} - p^{*2} + d^* \cdot s^* - c^* \cdot p^*}{3(d^* - c^* + s^* - p^*)},$$

$$g^* = \left(\frac{1 - K_{ТУ}^{(a)}(C)}{1 - K_{ТУ}(C)} \right)^g, \; g = \{c, p, s, d\},$$

$$g^* = \{c^*, p^*, s^*, d^*\}, \; \{c, p, s, d\} \xrightarrow{\varphi} \{c^*, p^*, s^*, d^*\}.$$

3.3 Вартісна модель ДКР зі створення зразка КА. Вартість ДКР КА складається з поетапних витрат для виконання робіт зі створення космічного апарата та його складових частин. Для компактного представлення вартісної моделі КА введемо два допоміжні математичні об'єкти: зважений орієнтований деревовидний граф $Gz(V, D)$, еквівалентний технічній структурі космічного апарата (де V – множина вершин, а D – множина дуг або ребер), та орієнтований деревовидний граф $Ge(E, W)$, еквівалентний структурі етапів та підетапів виконання ДКР (де E – множина вершин, W – множина дуг).

Технічна структура КА (як вхідні дані) задається у формі схеми поділу у відповідності з вимогами державного стандарту ГОСТ 2.711-82 ЕСКД. Вершинам графа $Gz(V, D)$, у цьому випадку, будуть відповідати зразки (технічні вироби), з яких складається КА: системи (та еквівалентні їм вироби), підсистеми (та еквівалентні їм вироби), блоки (вузли), складові частини блоків (підвузли), відповідні їм макети (МА) та наземне допоміжне обладнання (NDO). Так, до складу виробів першого рівня у схемі поділу КА входять у ранзі систем цільова апаратура (сканери, радіолокатори, транспондери) та наземне допоміжне обладнання (механічне, електричне, пневматичне).

Кореневій вершині графа $Gz(V, D)$ V_0 ставиться у відповідність КА (умовне позначення C_0). Вершинам першого (суміжного з кореневою вершиною V_0) ярусу V_i ставляться у відповідність системи (C_i), вершинам другого ярусу V_{ij} – підсистеми (C_{ij}), вершинам третього ярусу V_{ijk} – блоки або вузли (C_{ijk}) і так далі.

Кожна гілка графа $Gz(V, D)$ починається з кореневої вершини V_0 і закінчується вершиною-листком V_l (вершина, з якої не виходять дуги). Вершинам-листкам відповідають вироби, які є покупними або запозиченими.

Аналогічно будується граф $Ge(E, W)$. Кореневій вершині даного графа E_0 відповідає ДКР. Вершинам першого (суміжного з кореневою вершиною E_0) ярусу E_m ставляться у відповідність стадії: ескізне проєктування, технічне проєктування, розробка робочої документації, виготовлення й випробовування дослідних та льотного зразків.

Вершинам другого ярусу E_{mn} ставляться у відповідність етапи: розробка та випуск пояснювальної записки ескізного проєкту, розробка та лабораторні відпрацювання макетів найбільш складних компонентів блоків та вузлів, розробка та випуск пояснювальної записки технічного проєкту, розробка та лабораторні відпрацювання макетів найбільш складних блоків та вузлів, розро-

бка конструкторської документації, розробка експлуатаційної документації, розробка технологічної документації, підготовка та проведення наземного експериментального відпрацювання складових частин та КА в цілому, виготовлення льотного зразка.

Вершинам третього ярусу E_{mnp} ставляться у відповідність підетапи: виготовлення та проведення випробовувань макетів КА, виготовлення та проведення автономних випробовувань експериментальних зразків складових частин систем КА, виготовлення та комплексні випробовування дослідних зразків систем КА та поставка їх для збирання інженерної моделі та проведення комплексних випробовувань на інженерній моделі КА, коригування та випуск конструкторської, експлуатаційної та технологічної документації, збирання льотного зразка КА, заводські приймально-здавальні випробування льотного зразка КА, підготовка до відправлення на космодром льотного зразка КА.

Вершинам четвертого ярусу E_{mnpr} ставляться у відповідність підетапи другого рівня, які є складовими частинами підетапів першого рівня.

За необхідності в граф $Ge(E,W)$ передбачено включення підетапів третього та четвертого рівнів.

Згідно з загально визнаним означенням зваженого орієнтованого деревовидного графа його дуги направлені від кореневої вершини V_0 в бік суміжних з нею вершин першого ярусу V_i і так далі для кожної послідуючої вершини (окрім вершини-листка) – в бік суміжних вершин нижчого ярусу. Аналітичним способом уявлення такого графа є матриця інциндетності $A(a_{ij})_{N\times(N-1)}$ [12], де N – кількість вершин графа.

З метою побудови оптимального обчислювального алгоритму (за критерієм мінімум оперативної пам'яті та кількості комп'ютерних операцій) виконано наступні перетворення початкового графу $Gz(V,D)$:

– змінено напрям дуг на протилежний (в бік руху по гілках графу від вершини-листка до кореневої вершини V_0, після чого деревовидний граф перетворюється в мережу збирання $Gzb(V,D)$ (розрахунок вартості зразківів виконується по схемі "знизу-вверх" – від простих виробів до більш складних);

– вага присвоюється не дугам, а вершинам, при цьому вага є не скалярною, а векторною величиною (вартість створення виробу, що відповідає заданій вершині графа; трудомісткість робіт та матеріальні витрати). До початку проведення розрахунків вага представляє собою нульовий вектор;

– замість громіздкої матриці інцидентності $A(a_{ij})_{N\times(N-1)}$ інцидентність вершин та дуг визначається спеціальним правилом нумерації вершин. Номер вершини будується з використанням індексів $i,j,k,l...$, які ідентифікують складові частини КА і являє собою цілочисельну змінну виду $a_1a_2a_3...a_q$ (де a – ціле число від 0 до 99, q – глибина графа $Gz(V,D)$). Число a_1 відповідає значенню індекса i, a_2 – індексу j, і так далі. Для систем КА C_i номер відповідної вершини буде мати вигляд: $a_100...00$, для підсистем C_{ij} – $a_1a_200...00$ і так далі. Така система нумерації дає можливість однозначної ідентифікації кожної гілки графів $Gz(V,D)$ та $Gzb(V,D)$ без використання громіздкої матриці інциндетності $A(a_{ij})_{N\times(N-1)}$.

Множина вершин $V(C)$ графа $Gz(V,D)$ включає технічні вироби, які виготовляються в процесі ДКР КА:

$$V(C)=\{C_0,C_i,C_{ij},C_{ijk},C_{ijkl},AM,SM,PM,IM,LZ,$$
$$AM_i,SM_i,PM_i,IM_i,LZ_i,AM_{ij},SM_{ij},PM_{ij},IM_{ij},LZ_{ij},$$
$$AM_{ijk},SM_{ijk},PM_{ijk},IM_{ijk},LZ_{ijk},AM_{ijkl},SM_{ijkl},PM_{ijkl},IM_{ijkl},LZ_{ijkl}\},$$

де $AM, AM_i, AM_{ij}, AM_{ijk}, AM_{ijkl}$ – відповідно антенний макет КА та макети його складових частин; SM … – відповідно силовий макет КА та макети його складових частин; PM … – відповідно повномасштабний макет КА та макети його складових частин; IM … – відповідно інженерна модель КА та інженерні моделі його складових частин; LZ, $LZ_i, LZ_{ij}, LZ_{ijk}, LZ_{ijkl}$ – льотний зразок КА та його складових частин.

Множина вершин E графа $Ge(E,W)$ включає можливі етапи (підетапи) ДКР зі створення КА:

$$E=\{E_0,E_m,E_{mn},E_{mnp},E_{mnpr},...\}.$$

Кожному елементу декартового добутку множин $V(C)\times E=\{V_m(C),E_k\}$ можна поставити у відповідність уніфікований блок вартісної моделі (рівняння (6) – (14)).

Формула (6) визначає вартість робіт зі створення зразка C на етапі e (сума вартостей трудових $VtR_{e,q}(C)$ та матеріальних ресурсів: $VtM_{e,q}(C)$, $VtPKV_{e,q}(C)$):

$$Vt_e(C)=\sum_q(VtR_{e,q}(C)+VtM_{e,q}(C)+VtPKV_{e,q}(C))+\Delta Vt_e(C),\ q\in Q(C,E), \quad (6)$$

$$VtR_{e,q}(C)=TR_{e,q}(C)\cdot Q_{BP}(C), \quad (7)$$

$$TR_{e,q}(C)=TR^a_{e,q}(C)\cdot K_H\left(R_{e,q}(C)\right)\cdot K_{CЛ}\left(R_{e,q}(C)\right)\cdot K^{-1}_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right), \quad (8)$$

$$VtM_{e,q}(C)=\sum_p(K(M_{e,q,p})\cdot Ц(M_p)),\ p=\overline{1,P_M}, \quad (9)$$

$$VtPKV_{e,q}(C)=\sum_n(K(PKV_{e,q,n})\cdot Ц(PKV_n)),\ n=\overline{1,N_{PKV}}, \quad (10)$$

$$\Delta Vt_e(C)=\sum_{n=1}^{d(C)-1}(Vt_e(C_d)), \quad (11)$$

де $\Delta Vt_e(C)=0$, якщо виріб C є вершиною-листком у графі $Gi(V,D)$, тобто $d(C)=1$.

$$K_H(C_H)=f(C_H)=\frac{b^{*2}-a^{*2}+n^{*2}-m^{*2}+b^*\cdot n^*-a^*\cdot m^*}{3(b^*-a^*+n^*-m^*)},$$
$$q=\{a,m,n,b\}\xrightarrow{f}\{a^*,m^*,n^*,b^*\}, \quad (12)$$
$$q^*=\exp(\alpha(q-C^\alpha_H)\cdot 10^{-2}),$$

$$K_{СЛ}(C) = \varphi(C) = \frac{d^{*2} - c^{*2} + s^{*2} - p^{*2} + d^* \cdot n^* - c^* \cdot p^*}{3(d^* - c^* + s^* - p^*)},$$

$$g = \{c, p, s, d\} \xrightarrow{\varphi} g^* = \{c^*, p^*, s^*, d^*\}, \qquad (13)$$

$$g^* = \left(\frac{1 - K^a_{ТУ}(C\ )}{1 - K_{ТУ}(C)} \right)^g .$$

$$Q_{ВР}(C) = ZP_{СМ}(C) \cdot (1 + \delta_{БЮ} + K_{НР}(C)) \cdot (1 + \delta_{ППР}(C)) \cdot (1 + \delta_{НДС}(C)), \quad (14)$$

$$K_{АВ} = \frac{TR^0_{e,q}}{TR^+_{e,q}}, \qquad (15)$$

де C – узагальнений зразок (виріб) C, що приймає одне зі значень множини $V(C)$; e – узагальнений етап, що приймає одне зі значень множини E; C_d – виріб, який безпосередньо входить до складу виробу C (вершина в графі $Gz(V,D)$, суміжна з вершиною C, та нижча від неї за рівнем ієрархії); $\deg(C) = d(C)$ – степінь вершини в графі $Gz(V,D)$, яка відповідає виробу C.

В формулах (6) – (14) використовуються базові змінні величини:

$Vt_e(C)$, $VtR_{e,q}(C)$, $VtM_{e,q}(C)$, $VtPKV_{e,q}(C)$, $TR_{e,q}(C)$, $TR^a_{e,q}(C)$, $Q_{ВР}(C)$, $K_H(R_{e,q}(C))$, $K_{СЛ}(R_{E,q}(C))$, $K_{АВ}(R_{e,q}(C))$, $K(M_{e,q,p})$, $Ц(M_p)$, $K(PKV_{e,q,n})$, $Ц(PKV_n)$.

Зміст базових змінних економічного типу:

$Vt_e(C)$ – повна вартість з урахуванням матеріалів і покупних комплектуючих виробів (ПКВ) групи (комплексу) взаємозв'язаних робіт $\{R_{e,q}\}$;

$VtR_{e,q}(C)$ – чиста вартість роботи без урахування матеріалів і ПКВ $R_{e,q}$ (q-ї роботи етапу (підетапу) E по виробу C);

$TR_{e,q}(C)$, $TR^a_{e,q}(C)$ – трудомісткість (люд. місяць) роботи $R_{e,q}$ по виробу C, та по виробу-аналогу C відповідно;

$Q_{ВР}(C)$ – середньомісячний виробіток на одного працівника на підприємстві-розробнику узагальненого виробу C;

$VtM_{e,q}(C)$ і $VtPKV_{e,q}(C)$ – загальна вартість матеріалів і покупних комплектуючих виробів, необхідних для виконання $R_{e,q}(C)$ відповідно;

$K(M_{e,q,p})$ і $Ц(M_p)$ – кількість матеріалу марки p, необхідного для виконання роботи $R_{e,q}(C)$ і ціна одиниці виміру цього матеріалу відповідно ($p = \overline{1, P_M}$, P_M – число марок матеріалів, необхідних для виконання роботи $R_{E,q}(C)$);

$K(PKV_{e,q,n})$ і $Ц(PKV_n)$ – кількість ПКВ типу n, необхідних для виконання роботи $R_{e,q}(C)$ і ціна одиниці цього ПКВ відповідно ($n = \overline{1, N_{PKV}}$, N_{PKV} – число типів ПКВ, необхідних для виконання роботи $R_{e,q}(C)$).

Фізичний зміст базових змінних технічного типу:

$K_H(R_{e,q}(C))$ – коефіцієнт відносної новизни конструкції узагальненого виробу C по відношенню до виробу-аналога з прив'язкою до виду роботи $R_{e,q}(C)$;

$K_{СЛ}\left(R_{e,q}(C)\right)$ – коефіцієнт відносної технічної складності узагальненого виробу по відношенню до виробу-аналога з прив'язкою до виду роботи $R_{e,q}(C)$;

$K_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right)$ – коефіцієнт відносного рівня автоматизації роботи $R_{e,q}(C)$ по відношенню до аналогічної роботи ДКР виробу-аналога.

Індекс q, що входить до складу базових змінних, означає порядковий номер роботи, яка виконується в процесі ДКР узагальненого виробу C на узагальненому етапі (підетапі) робіт E, та належить множині $Q(C,e)$, $q \in Q(C,e) = (q_1, q_2, ..., q_{N_c})$.

У випадку, коли значення лінгвістичної змінної $C_H < 1$ для робіт, що виконуються у процесі виготовлення дослідного зразка та льотного зразка складових частин КА, а також при проведенні автономного й комплексного відпрацьовування виробів C_i, C_{ij}, C_{ijk}, значення коефіцієнта K_H варто приймати рівним одиниці (K_H =1). Це обумовлено особливостями виготовлення та проведення випробувань виробів ракетно-космічної техніки.

У формулі (15) $TR^0_{e,q}$ – трудомісткість виконання роботи $R_{e,q}$ до впровадження засобів автоматизації; $TR^+_{e,q}$ – трудомісткість виконання роботи $R_{e,q}$ після впровадження засобів автоматизації.

Опис порядку використання підстановок для елементів множини $\{V_m(C), E_k\}$ в формулах (6) – (15):

1) якщо $C = C_i$ (одна з систем КА) і $e = AV$ (автономне відпрацювання), то базова змінна $VtR_{e,q}(C)$ буде мати вигляд: $VtR_{AV,0q}(C_i)$.

Величина $VtR_{AV,0q}(C_i)$ має наступний фізичний зміст: вартість q-ї роботи з множини $Q(C_i, AV)$ виробу C_i на етапі автономного відпрацювання цього виробу;

$q \in Q(C_i, AO)$ – індекс q означає порядковий номер роботи; робота $R_{AV,0q}(C_i)$ виконується на етапі автономного відпрацювання безпосередньо виробу C_i.

Аналогічно: $TR_{e,q}(C) \Rightarrow TR_{AV,0q}(C_i)$, $VtM_{e,q}(C) \Rightarrow VtM_{AV,0q}(C_i)$, $VtPKV_{e,q}(C) \Rightarrow VtPKV_{AV,0q}(C_i)$, $Vt_{e,q}(C) \Rightarrow Vt_{AV,0q}(C_i)$.

Фізичний зміст змінних $Q_{BP}(C)$, $K_H\left(R_{e,q}(C)\right)$, $K_{СЛ}\left(R_{e,q}(C)\right)$, $K_{AB}\left(R_{e,q}(C)\right)$ очевидний;

2) якщо $C = СЕП$ (система електропостачання КА) і $E = AV$ (автономне відпрацювання), то змінні наберуть вигляду:

$VtR_{AV,0q}(СЕП)$, $TR_{AV,0q}(СЕП)$, $VtM_{AV,0q}(СЕП)$, $VtPKV_{AV,0q}(СЕП)$, $Vt_{AV,0q}(СЕП)$, $Vt_{AV,0q}(СЕП)$, $K_H\left(R_{AV,0q}(СЕП)\right)$, $K_{СЛ}\left(R_{AV,0q}(СЕП)\right)$, $K_{AB}\left(R_{AV,0q}(СЕП)\right)$.

Для кожного елемента декартового добутку множин $V(C) \times E = \{V_m(C), E_k\}$ потрібно сформувати відповідний фрагмент бази даних.

Висновки

1. Розроблено нестандартну вартісну модель ДКР зі створення КА, яка по своїй суті близька до нелінійної параметричної вартісної моделі. За відсутно-

сті необхідної статистичної інформації розроблена вартісна модель базується на методі покомпонентної аналогії відносно простих складових частин КА, теорії зважених орієнтованих деревовидних графів та методах нечіткої математики.

2. Розроблена вартісна модель може бути покладена в основу єдиної для усіх виконавців сучасної галузевої комп'ютеризованої методики розрахунку вартості ДКР зі створення КА з деталізацією за складовими частинами та за етапами виконання робіт.

1. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження й розробки та їх впровадження у виробництво. Спільний наказ Міністерства економіки України та Міністерства фінансів України від 25.09.01 № 218/446. URL: http://www1.nas.gov.ua/infrastructures/Legaltexts/ Others/me_mf/Pages/218-446.aspx (дата звернення: 20.07.2020).
2. Методичні рекомендації визначення кошторисної вартості НДДКР для організацій (підприємств) різних форм власності та господарювання (крім бюджетних установ). Наказ Міністерства освіти і науки України від 21.02.2006 № 119. URL: https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0119290-06#Text (дата звернення: 20.07.2020).
3. Методика визначення економічної ефективності витрат на наукові дослідження й розробки та їх впровадження у виробництво. К.: Міністерство розвитку економіки, торгівлі та сільського господарства України, 2006. 18 с URL: https://me.gov.ua/ Documents/Detail?lang=uk-UA&id=72a08214-1710-4e5e-9526-9fede7dc8f63&title= MetodikaViznachenniaEkonomichnoiEfektivnostiVitratNaNaukoviDoslidzhennia IRozrobki TaYikhVprovadzhenniaUVirobnitstvo (дата звернення: 20.07.2020).
4. Типове положення з планування, обліку і калькулювання собівартості науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт (постанова КМУ від 20 липня 1996 р. N 830 Київ) Документ 96-п, втратив чинність, підстава: постанова КМУ № 2019-419-2019-п від 01.01.2020.
5. *Цветков А. Б.* Вопросы эффективности проектного менеджмента в космической отрасли: российский и международный опыт. Доклад на 2-й международной конференции "Логистика ракетно-космической промышленности" SPACELOG–2017. Москва. 2017. URL: http://www.sms-corp.ru/images/publication/Spacelog2017.pdf (дата звернення: 22.07.2020).
6. Review of hardware cost estimation methods, models and tools applied to early phases of space mission planning. URL: http://titania,ctie,monash,edu,au/papers/trivailo-2012,pdf (дата звернення: 21,05,2020).
7. Development of the Small Satellite Cost Model 2019 (SSCM19). URL: https://aerospace.org/sites/default/files/2020-05/SSCM19 %20paper.pdf (дата звернення: 10.08.2020).
8. *Scherrer D., Chedevergne F., Grenard P., Troyes J., Murrone A. et al.* Recent CEDRE Applications.AerospaceLab. 2011. P. 1–28. hal-01182477 URL: https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01182477/document (дата звернення: 18.08.2020).
9. *Brian Alford, Booz Allen Hamilton, Andy Prince*. NASA Project Cost Estimating Capability: New Analyses for Spacecraft Estimating. ICEAA 2016 International Training Symposium. (October 2016). URL: http://www.iceaaonline.com/ready/wp-content/uploads/2016/10/GP03-ppt-Alford-NASA-Project-Cost-Estimating.pdf (дата звернення: 18.08.2020).
10. *Broder Melvin, Mahr Eric, Barkmeyer Dan, Burgess Eric. Alvarado Wilmer, Toas Samuel, Hogan Gregory*. (June 2010). Review of Three Small-Satellite Cost Models. 2010 ISPA/SCEA ConferenceSan Diego. CAJune 2010. URL: http://www.iceaaonline.com/ready/ wp-content/uploads/2017/09/EST01A-Broder.pdf (дата звернення: 18.08.2020).
11. *Горбулин В. П., Кушнарев А. П.* Модели прогнозирования технико-экономических показателей РК и выбора оптимальной стратегии их отработки. Космічна наука і технологія. 2012. Т. 18. № 5. С. 66–73. https://doi.org/10.15407/knit2012.05.066
12. *Оре О.* Теория графов. 2-е изд. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1980. 336 с.
13. *Малышев Г. В.* Проектирование автоматических космических аппаратов. Вероятностные методы анализа. Москва: Машиностроение, 1982. С. 28.
14. *Штовба С. Д.* Введение в теорию нечетких множеств и нечеткую логику. URL: http://matlab.exponenta.ru/ fuzzylogic/index.php; (дата звернення 10.04.2021).

Отримано 30.06.2021,
в остаточному варіанті 01.10.2021