

УДК 629.7

## КРИТЕРІАЛЬНІ ОСНОВИ ОЦІНЮВАННЯ МОДИФІКАЦІЙ ТРАНСПОРТНИХ ЛІТАКІВ ЗА ВАРТІСНИМИ ПОКАЗНИКАМИ

Л. В. Капітанова, д-р техн. наук

[l.kapitanova@khai.edu](mailto:l.kapitanova@khai.edu)

ORCID: 0000-0003-3878-6734

Д. С. Кірносів

[d.s.kirnosov@khai.edu](mailto:d.s.kirnosov@khai.edu)

ORCID: 0000-0002-2288-2863

В. І. Рябков, д-р техн. наук

[2506lulu@gmail.com](mailto:2506lulu@gmail.com)

ORCID: 0000-0001-6512-052X

Національний аерокосмічний  
університет

ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний

інститут»,

61070, Україна, Харків,

вул. Чкалова, 17

Предметом досліджень у статті обрано процес формування критеріальної бази для оцінки ефективності проведення модифікаційних змін у літаку транспортної категорії. Метою є розробка критеріїв підтримки прийняття на кожному з етапів життєвого циклу нового літака транспортної категорії рішень щодо доцільності модифікаційних змін, а саме: при проектуванні, при виробництві та на етапі його експлуатації. Складність задачі полягає в необхідності розробки для кожного етапу окремо моделі оцінки наслідків змін літака, що у сукупності визначала б інтегральну ефективність його модифікації. Для оцінки ефективності базових літаків, що знаходяться в експлуатації, існує ряд економічних показників їх ефективності, зокрема, вартість літако-години і перевезення однієї тонни вантажу на один кілометр, що лише частково беруться до уваги при аналізі ефективності модифікації літака, хоча в випадку з літаками транспортної категорії потрібні критерії питомих витрат за весь життєвий цикл як для базового літака, так і для його модифікації. Для їх розробки пропонується метод оцінки вартості усього життєвого циклу літака, а також метод поділу модифікаційних змін за параметрами верхнього рівня (ПМП), який застосовується на етапі проектування апаратів, і нижнього рівня для етапу експлуатації (ПВЕ). На основі її з урахуванням специфіки вказаних методів розроблено показники додаткових трудовитрат, які виникають при реалізації модифікаційних змін в умовах виробництва й на етапі експлуатації літака. У запропонованих критеріях враховано показники транспортної ефективності модифікацій важкого літака й інтегральної ефективності модифікації з урахуванням вартісних витрат на усіх основних етапах життєвого циклу модифікації. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: запропоновано критерії підтримки прийняття на кожному з етапів життєвого циклу нового літака транспортної категорії рішень щодо доцільності модифікаційних змін, тобто при проектуванні, в умовах виробництва і на етапі її експлуатації. Такі критерії забезпечать інтегральну ефективність модифікації транспортного літака.

**Ключові слова:** транспортний літак, базовий літак, модифікації літака, моделі оцінки ефективності літака.

### Вступ

Процес створення модифікацій транспортних літаків всіх вагових категорій набув широкого розвитку. На основі змін вирішується проблема безперервного підвищення продуктивності (рейсової та годинної) літаків цього типу.

Досягти такої мети можна шляхом збільшення трьох параметрів: комерційного навантаження  $m_{\text{кр}}$ , дальності перевезення  $L$  та крейсерської швидкості  $V_{\text{крейс}}$ .

У важких транспортних літаках значення цих параметрів, як правило, вже досягнуто, а при створенні модифікацій ставляться і реалізуються інші цілі: зниження маси конструктивних елементів, зменшення трудовитрат у процесі виробництва, зниження витрат на одиницю корисної роботи, зниження витрат на етапі експлуатації, що призводить до необхідності розробки особливих моделей їх оцінки.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Створення важких транспортних літаків є особливістю української школи літакобудування: Ан-132D, Ан-22, Ан-124, Ан-225 [1]. Досконалість їх льотно-технічних характеристик визнана у всьому світі, тому вони регулярно використовуються й досі.

Звісно, для літаків найважливішим показником вважається його економічна ефективність, закладена О. К. Антоновим [2] ще при проектуванні та в процесі виробництва.

Статтю ліцензовано на умовах Ліцензії Creative Commons «Attribution» («Атрибуція») 4.0 Міжнародна.  
© Л. В. Капітанова, Д. С. Кірносів, В. І. Рябков, 2023

Такий підхід базується на більш ранніх розробках вітчизняних дослідників з економіки літаків транспортної категорії на етапі їх експлуатації, що змушує розробників шукати оптимальні рішення вже на етапі проектування [3].

З урахуванням таких обставин на Державному підприємстві ДП «Антонов» [4] розроблено методику оцінки рішень за сукупністю льотно-технічних і вартісних показників, що повною мірою реалізується під час створення модифікацій літаків транспортної категорії [6] зі збільшеною рейсовою й годинною продуктивністю.

При вирішенні завдань подібного типу найчастіше використовують прогностичні моделі [5] з оцінкою економічної ефективності створюваних літаків на момент введення їх в експлуатацію і на деякий наступний строк [6].

У дослідженні [7] наведено моделі оцінки економічної ефективності при внесенні модифікацій в конструкцію транспортного літака У роботі [8] представлено аналіз експлуатаційно-економічних показників літаків транспортної категорії різного призначення, дані про надійність, основні причини відмов літаків, двигунів і компонентів.

У дослідженнях показники економічної ефективності співставляли з окремими льотно-технічними параметрами.

Стосовно новостворених модифікацій методика їх конкретної оцінки за вартісними показниками вперше наведена в роботі [9] для близькомагістральних пасажирських літаків.

### Параметри, які змінюються у процесах створення й експлуатації модифікації транспортних літаків

Класифікація параметрів, що характеризують модифікацію літака транспортної категорії, представлена в роботах [1, 2]. Відповідно до неї існують два великі класи змінюваних параметрів – це ПМП і ПВЕ. Розрізняються вони за впливом на змінення стартової маси модифікації та реалізації на різних етапах життєвого циклу:

– ПМП – група керуючих параметрів (верхнього рівня (КП)<sup>в</sup>), що модифікуються при проектуванні, змінення яких призводить до збільшення стартової маси в порівнянні з масою базового літака ( $m_0^м (ПМП) > m_0^б$ );

– ПВЕ – група керуючих параметрів (нижнього рівня (КП)<sub>н</sub>), які змінюються на етапах виробництва та експлуатації і не призводять до зміни стартової маси ( $m_0^м (ПМП) = m_0^б$ ).

Адекватно до їх статусу сформована схема критеріїв підтримки прийняття рішень протягом усього життєвого циклу модифікації з урахуванням інтегральних показників її ефективності (рис. 1).

Із даних, наведених на рисунку, випливає, що прийняття рішень за критерієм питомих витрат необхідно здійснювати на етапі проектування в міру отримання розрахункових параметрів ПМП, таких як вартість життєвого циклу, продуктивність модифікації та календарний ресурс, що закладаються до основних силових елементів. Такий підхід дозволить скоротити кількість варіантів, що розглядатимуться на наступних етапах.

Для етапів виробництва й експлуатації модифікації (з урахуванням зміни параметрів ПВЕ) необхідні моделі вагової та вартісної еквівалентності параметрів, що використовуються в загальній схемі оцінювання модифікації за інтегральними показниками ефективності.

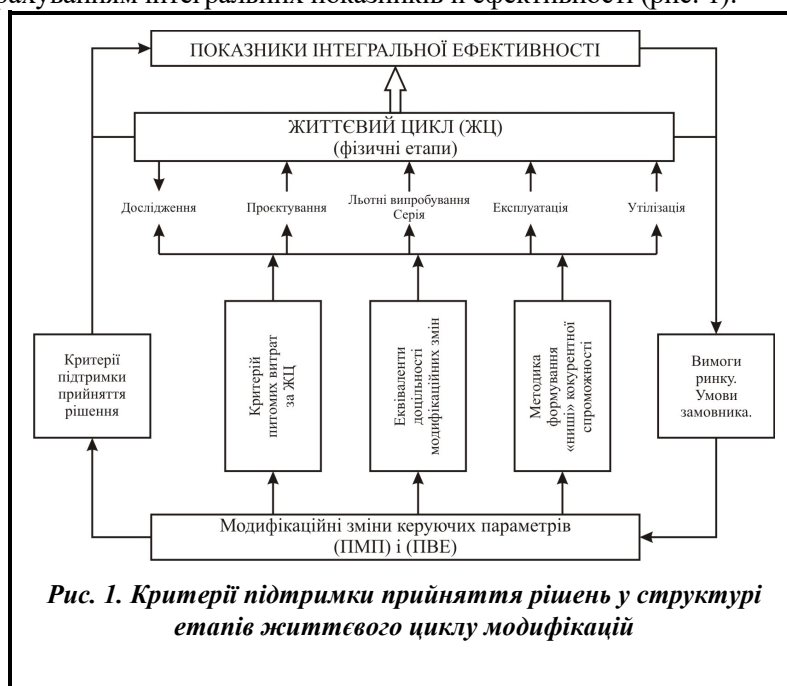


Рис. 1. Критерії підтримки прийняття рішень у структурі етапів життєвого циклу модифікації

**Інтегральний критерій вартісної ефективності модифікаційних змін**

Як уже зазначалося, інтегральними показниками важкого літака виступають:

- повна корисна робота, виконувана модифікацією на етапі експлуатації;
- повні вартісні витрати за життєвий цикл модифікації.

У такому випадку їх відношення набуває статусу критерію інтегральної ефективності:

$$\bar{B}_{\text{жц}} = \frac{\text{Повні витрати за життєвий цикл}}{\text{Вся робота літака на етапах експлуатації}}. \quad (1)$$

Цей критерій в параметричному вираженні має вигляд:

$$\bar{B}_{\text{жц}} = \frac{B_{\text{жц}}}{m_{\text{кн}} \cdot L \cdot N}; \quad (2)$$

$$B_{\text{жц}} = A_{\text{ч}} \cdot T_{\text{г}}, \quad (3)$$

де  $T_{\text{г}}$  – заявлений ресурс у льотних годинах;  $N$  – кількість рейсів за життєвий цикл зі середньозваженими часами польоту;  $A_{\text{ч}}$  визначається усередненими витратами на час польоту з урахуванням всіх фаз життєвого циклу

$$A_{\text{ч}} = A_{\text{ал}} + A_{\text{ад}} + A_{\text{тол}} + A_{\text{тод}} + A_{\text{пал}} + A_3 + B_{\text{ап}}, \quad (4)$$

де  $A_{\text{ал}}$ ,  $A_{\text{ад}}$  – витрати на амортизацію літака і двигуна;  $A_{\text{тол}}$ ,  $A_{\text{тод}}$  – витрати на технічне обслуговування літака і двигуна;  $A_{\text{пал}}$  – витрати на паливо;  $A_3$  – витрати на заробітну плату екіпажу;  $B_{\text{ап}}$  – непрямі (аеропортові) витрати.

Повну роботу, виконану модифікацією за життєвий цикл на етапі її експлуатації, оцінимо за виразом

$$W = m_{\text{кн}} \cdot L \cdot N, \quad (5)$$

де  $m_{\text{кн}} \cdot L$  – корисна робота, що здійснюється модифікацією за один рейс.

Таким чином, критерій підтримки прийняття рішень при реалізації модифікаційних змін основних параметрів модифікації запишеться у вигляді

$$\bar{B}_{\text{жц}} = \frac{A_{\text{ч}} (A_{\text{ал}}, A_{\text{ад}}, A_{\text{тол}}, A_{\text{тод}}, A_{\text{пал}}, A_3, B_{\text{ап}}) \cdot T_{\text{г}}}{m_{\text{кн}} \cdot L \cdot N}. \quad (6)$$

Критерій (6) слід віднести до інтегральної групи. Розмірність критерію [грн. (дол.)/кг × км/рейс] повністю підтверджує його інтегральність, оскільки до нього увійшли величина комерційного навантаження  $m_{\text{кн}}$ , дальність перевезення  $L$ , тобто основна відмітна ознака модифікації (її рейсова продуктивність) і заявлений ресурс  $T_{\text{г}}$ . Крім того, з'являється можливість на основі цього критерію оцінити ефективність першої групи параметрів, що модифікуються (ПМП).

Протягом життєвого циклу спостерігаються зміни і другої групи параметрів (ПВЕ), які не призводять до збільшення стартової маси літака, натомість поліпшують одні параметри за рахунок інших, що зазвичай супроводжується підвищенням трудовитрат  $\Delta T_0$  на реалізацію таких процесів і призводить до зміни вартісних показників: літако-години  $A_{\text{г}}$  і собівартості авіаперевезень  $a$ .

З урахуванням таких обставин виникає необхідність у розробці моделей типу

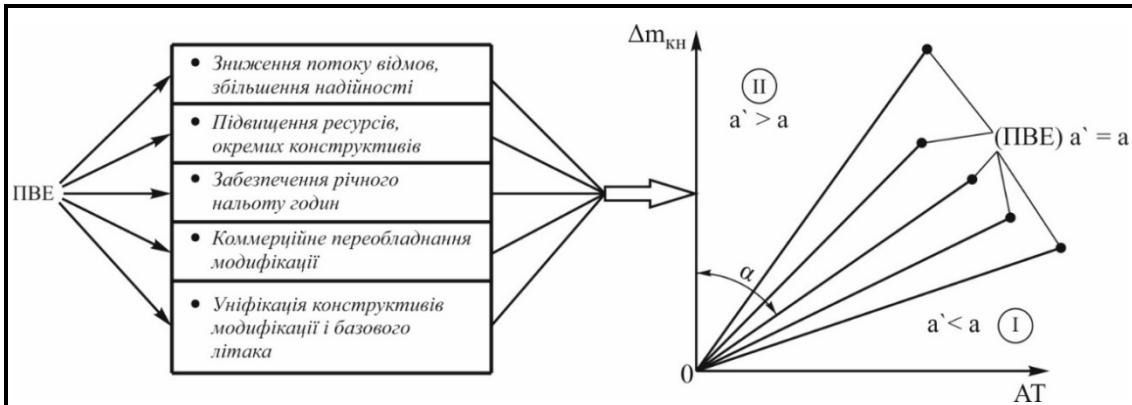
$$a', A_{\text{г}}' = f(\Delta m_{\text{кн}}, \Delta T_0). \quad (7)$$

Природно, що вартість авіаперевезень  $a'$  і вартість літако-години  $A_{\text{г}}'$  після таких модифікаційних змін істотно залежать від співвідношення параметрів у правій частині виразу (7)  $\Delta m_{\text{кн}}/\Delta T_0$  при  $\Delta m_{\text{кн}} \neq 0$  и  $\Delta T_0 \neq 0$ .

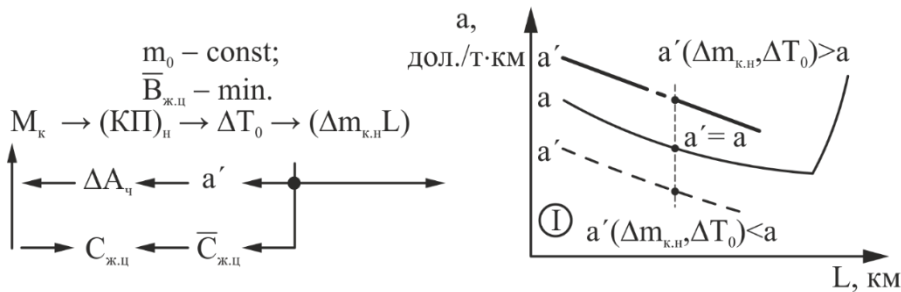
До модифікаційних змін параметрів ПВЕ віднесені:

- уніфікація конструктивів модифікації та базового літака;
- комерційне переобладнання літака під сезонні авіаперевезення;
- зниження кількості відмов і підвищення надійності модифікованої конструкції тощо.

На рис. 2 наведено схему отримання вагових еквівалентів доцільності модифікаційних змін параметрів ПВЕ.



**Рис. 2. Графічне представлення меж доцільності модифікаційних змін за умовою  $\Delta m_{\text{кн}}(\Delta T_0)$ :  $\Delta T_0$  – додаткові трудовитрати;  $a, a'$  – собівартість авіаперевезень 1 т вантажу на 1 км шляху до та після змін ПВЕ**



**Рис. 3. Схема впливу основних параметрів на зміну собівартості авіаперевезень  $a$  (дол./т·км) базового варіанта й додаткових трудовитрат  $\Delta T_0$  на  $a'$  (дол./т·км) при зміні ПВЕ**

При цьому всі модифікаційні зміни визнаються доречними в економічному сенсі, якщо вони приводять до зниження вартості літако-години

$$A_T = \Delta a \cdot m_{\text{кн}} \cdot V_{\text{рейс}}, \quad (8)$$

або вартості життєвого циклу

$$B_{\text{ж.ц}} = a' \cdot m_{\text{кн}} \cdot V_p \cdot B_p \cdot T_T, \quad (9)$$

де  $V_{\text{рейс}}$  – рейсова (крейсерська) швидкість;  $B_p$  – річний наліт у годинах;  $T_T$  – календарний (заявлений) ресурс у годинах.

Таким чином, доцільність модифікаційних змін ПВЕ визначається кутом нахилу  $\alpha$  залежності  $\Delta m_{\text{кн}}(\Delta T_0)$

$$\arctg \alpha \rightarrow \max, \quad (10)$$

який, у свою чергу, зумовлює критерії підтримання прийняття рішень у вигляді еквівалентів:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Delta m_{\text{кн}}, \Delta T_0 \\ B_{\text{ж.ц}} \end{array} \right\} \rightarrow \frac{\Delta m_{\text{кн}}}{\Delta T_0} (a' \leq a) \rightarrow \text{I} - \text{доцільно змінити} \quad (11)$$

$$\rightarrow \frac{\Delta m_{\text{кн}}}{\Delta T_0} (a' > a) \rightarrow \text{II} - \text{недоцільно змінювати} \quad (12)$$

Специфіка критеріїв (11) і (12) полягає в тому, що рішення приймається щодо  $\Delta m_{\text{кн}}$ , тобто за тими параметрами, на які проектувальник може вплинути в умовах  $a' < a$  і тим самим економічно обґрунтувати ефективність прийнятих рішень.

Крім того, знак «більше/менше» визначає межі можливих рішень, еквівалентно придатні для оцінювання ефективності зміни параметрів незалежно від їх категорії і для літаків різного призначення.

Реалізація критеріїв (11) і (12) пов'язана з конкретними модифікаційними змінами й для конкретних літаків із різними показниками трудовитрат  $\Delta T_0$  і комерційного навантаження  $\Delta m_{\text{кн}}$ . Виходячи з цього, еквіваленти ефективності повинні бути розроблені для кожного конкретного типу літака і умов його виробництва.

Найбільш узагальненим (який відображає всі поєднання модифікаційних змін) є критерій питомих витрат за повний життєвий цикл модифікації  $\bar{B}_{\text{жц}}$ . Він описує грошові витрати, які припадають на одиницю корисної роботи, що виконується модифікацією на етапі її експлуатації.

Значення  $\bar{B}_{\text{жц}}$  визначалися на основі паспортних даних вітчизняних літаків, заявлених на момент їх введення в експлуатацію.

Його індексна оцінка подається у вигляді параметра  $[\text{дол} / (m_{\text{кн}} \cdot L \cdot N)]$ , де  $m_{\text{кн}}$  – маса комерційного навантаження, що перевозиться (у тоннах);  $L$  – дальність перевезення (в км);  $N$  – кількість рейсів за життєвий цикл. Результати чисельної оцінки наведено у таблиці. Найбільш ефективними є модифікації з мінімальним значенням  $\bar{B}_{\text{жц}}$ .

Порівнюючи між собою регіональні пасажирські й транспортні літаки, слід визнати, що у модифікацій літаків критерій питомих витрат  $\bar{B}_{\text{жц}}$  дещо гірший, ніж у модифікацій літака Ан-148-100.

**Таблиця. Результати чисельної оцінки критерію питомих витрат за повний життєвий цикл модифікацій літаків**

Тип літака	Ан-26	Ан-32	Ан-132У	Ан-124-175	Ан-124-200	Ан-124-355	Ан-148-100	Ан-148	Ан-148-100М
$\bar{B}_{\text{жц}}, [\text{дол} / (m_{\text{кн}} \cdot L \cdot N_p)]$	0,62	0,61	0,51	0,59	0,63	0,62	0,50	0,48	0,85

При цьому слід зауважити, що величина таких показників транспортних літаків, як Ан-32 і Ан-132У дещо гірша, ніж у модифікацій важкого транспортного літака Ан-132. Це пояснюється недостатньо високим ресурсом і невеликою протяжністю авіаліній, на яких вони експлуатуються.

## Висновки

1. Сформовано критеріальну базу підтримки прийняття рішень за вартісним інтегральним показником ефективності реалізації модифікаційних змін параметрів ПМП, які змінюються на етапі загального проектування, і параметрів ПВЕ, що змінюються на етапах виробництва й експлуатації, тобто за сумою всіх етапів життєвого циклу.

2. Структуру критеріїв підтримання прийняття рішень утворюють:

– показники транспортної ефективності модифікацій важкого літака;

– критерії інтегральної ефективності модифікації з урахуванням вартісних і додаткових трудовитрат  $\Delta T_0$  на основних етапах життєвого циклу.

3. Запропоновані нові критерії підтримання прийняття рішень у процедурі оцінювання ефективності модифікаційних змін:

– для етапу розробки модифікацій – критерій питомих витрат за життєвий цикл  $\bar{B}_{\text{жц}}$ , в основі якого лежить відношення всіх видів витрат до всієї корисної роботи, виконаної модифікацією на етапі її експлуатації;

– для етапу виробництва і подальших доробок – критерії доцільності модифікаційних змін з урахуванням трудовитрат на їх реалізацію  $\left( \frac{\Delta m_{\text{кн}}}{\Delta T_0} (a' \leq a) \right)$ ;

– для етапу експлуатації модифікацій транспортних літаків – методика інформаційного представлення комерційних рейсів у вигляді показників конкурентоспроможності [7].

Використання такого набору критеріїв стосовно модифікаційних змін на вітчизняних літаках показало, що їх застосування істотно скорочує варіанти модифікаційних змін, які розглядаються, і знижує рівень суб'єктивності при їх реалізації.

**Література**

1. Антонов О. К., Толмачев В. И. Транспортный самолет сегодня и завтра. *Авиация и космонавтика*. 1966. № 8. С. 18–25.
2. Антонов О. К., Толмачев В. И. Основные проблемы создания тяжелого дальнего транспортного самолета: технический отчет № 14526. ОКБ имени О. К. Антонова. 1973.
3. Андриенко Ю. Г., Мирошников А. В. Временная межведомственная методика оценки сравнительной экономической эффективности перспективных самолетов гражданской авиации. М.: Воздушный транспорт, 1984. 203 с.
4. Андриенко Ю. Г. Метод формирования совокупности технико-экономических характеристик в процедуре выбора проектных решений при разработке транспортных самолетов. *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*: сб. науч. тр. Харьк. Нац. аэрокосм. ун-та «ХАИ». 2002. Вып. 12. С. 125–138.
5. Клочков В. В., Нижник М. В., Русанова А. Л. Прогнозирование экономической эффективности создания новых видов скоростного пассажирского транспорта. *Проблемы прогнозирования*. 2009. № 3. С. 58–76.
6. Current market outlook 2013–2032. The Boeing Company, 2013. 42 p. URL: [https://www.iaa.ie/docs/default-source/misc/boeing\\_current\\_market\\_outlook\\_20131.pdf](https://www.iaa.ie/docs/default-source/misc/boeing_current_market_outlook_20131.pdf).
7. Ignatyevs S, Makushkin S, Spivakovskyy S. Economic feasibility of modifications to the design of transport aircraft. *INCAS Bulletin*. 2021. Vol. 13. Special Iss. P. 67–76. <https://doi.org/10.13111/2066-8201.2021.13.S.7>.
8. Syam S., Jagathy Ray V. P. Airworthiness – monitoring of modifications on aircraft, engines & components. *International Journal of Operations and Quantitative Management*. 2013. Vol. 19. Iss. 3. P. 201–220.
9. Бабенко Ю. В. Формирование тарифов на авиаперевозки с учетом удельных затрат за жизненный цикл модификаций тяжелого транспортного самолета. *Авиационно-космическая техника и технология*. 2015. № 10 (127). С. 124–128.

Надійшла до редакції 19.04.2023