

УДК 621.452.322.026.7:531.41:531.781

doi: 10.32620/aktt.2023.3.04

К. М. ПОДГОРСЬКИЙ, С. В. ЄПІФАНОВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського  
«Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ НА АБСОЛЮТНІ ПОХИБКИ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ВИЗНАЧЕННЯ ККД ВЕНТИЛЯТОРА

**Предметом** дослідження є процеси експериментального визначення характеристик вентиляторів турбореактивних двоконтурних двигунів із високим і надвисоким ступенем двоконтурності. Підвищення ККД вентиляторів двигунів зазначеного класу потребує вирішення низки складних взаємопов'язаних проблем, однією з яких є визначення характеристик за результатами випробувань. **Метою** є обґрунтування необхідності використання методу, оснований на вимірюванні крутильного моменту, та формування вимог щодо точності його вимірювання. **Задачі:** уточнення отриманих раніше зв'язків між похибками вимірювання й точністю визначення ККД і витрати повітря, формування універсальних залежностей, які дозволяють аналізувати абсолютні похибки визначення ККД будь-якого вентилятора або компресора за відомими похибками вимірювання, аналіз точності альтернативних методів організації вимірювань і розрахунків зазначених параметрів, порівняльне дослідження зазначених методів і формування рекомендацій щодо їх практичного використання на прикладі характеристики реального вентилятора. Для цього використовуються аналітичні **методи** аналізу похибок, оснований на методах аналізу випадкових величин. Отримано наступні **результати:** уточнено формули, які пов'язують абсолютні похибки розрахунку ККД і витрати повітря з абсолютними похибками вимірюваних параметрів (математичні моделі похибок), а також визначають вимоги до точності вимірювання крутильного моменту, необхідної для визначення ККД із заданою точністю. **Наукова й практична новизна** отриманих результатів полягає в наступному: уточнено математичні моделі похибок визначення ККД і витрати повітря у вентиляторі, які пов'язують похибки результатів розрахунків із похибками вимірюваних параметрів, у результаті використання цих моделей отримали розвиток експериментальні методи визначення характеристик компресорів і вентиляторів; вперше детально проаналізовано розподіл похибок в усій області визначення характеристики конкретного вентилятора. Показано, що похибки визначення ККД вентилятора суттєво залежать від ступеня підвищення тиску й витрати повітря. При малих значеннях цих параметрів похибки значно зростають. В області низьких режимів роботи двигуна (близьких до області режиму малого газу) похибки визначення ККД на основі обробки результатів вимірювань настільки великі, що вірогідне визначення ККД стає практично неможливим без залучення додаткової інформації, в якості якої може бути використана розрахункова характеристика вентилятора, а також математична модель двигуна та результати вимірювання параметрів робочого процесу в інших вузлах, крім самого вентилятора.

**Ключові слова:** турбореактивний двоконтурний двигун; вентилятор; характеристика; коефіцієнт корисної дії; похибка; вимірювач крутильного моменту.

Позначення	
$\Delta$	– абсолютна похибка;
$\delta$	– відносна похибка;
$\varepsilon$	– нормована похибка;
$\eta_B^*$	– ККД вентилятора;
$\lambda$	– коефіцієнт швидкості;
$\pi$	– газодинамічна функція тиску;
$\pi_B^*$	– ступінь підвищення тиску вентилятора;
$\omega$	– кутова швидкість;
$c_p$	– питома теплоємність повітря;
$D_{p_{вх}}$	– перепад між повним і статичним тиском;
$F_{вх}$	– площа мірного перерізу на вході;
G	– витрата повітря;
k	– коефіцієнт адиабати;
M	– крутильний момент;
m	= 0.04039 – коефіцієнт;
n	– частота обертання;
$p_{вх}$	– статичний тиск на вході до вентилятора;
$p_{вх}^*$	– повний тиск на вході до вентилятора;
$p_B^*$	– повний тиск на виході з вентилятора;
q	– газодинамічна функція витрати;
$T_{вх}^*$	– повна температура на вході до вентилятора;
$T_B^*$	– повна температура на виході з вентилятора;

## Вступ

Турбореактивні двоконтурні двигуни з високим і надвисоким ступенем двоконтурності є основою силових установок пасажирських і транспортних літаків великої та середньої дальності. У цих двигунах значна частина (80 і більше відсотків) тяги формується в зовнішньому контурі, основним елементом якого є вентилятор. Тому існуючі програми розвитку авіаційних двигунів значну увагу приділяють удосконаленню вентиляторів [1-3]. Підвищення ККД вентиляторів двигунів зазначеного класу потребує вирішення ряду складних взаємопов'язаних проблем в області газової динаміки, матеріалознавства, міцності, аналізу коливань, технології та інших областях. Однією з цих проблем є визначення характеристик вентилятора за результатами його випробувань.

В роботі [4] авторами цієї статті представлено огляд робіт з визначення характеристик вентиляторів. Відмічено, що випробування у складі повнорозмірного двигуна мають ту перевагу, що характеристики випробуваного вузла визначаються з урахуванням його взаємодії з іншими вузлами двигуна. Найбільш складним завданням обробки результатів таких випробувань є визначення ККД. Порівняння альтернативних методів визначення ККД показало, що найбільш перспективним є метод, оснований на використанні вимірювання крутильного моменту. При цьому неможливо використовувати промислові вимірювачі крутильного моменту, і найбільш прийнятним варіантом є його визначення за кутовою деформацією валу ротора низького тиску, який сполучає вентилятор із турбіною низького тиску.

У зазначеній роботі отримано основні формули, що зв'язують похибки визначення ККД з похибками вимірювань. Основну увагу приділено аналізу відносних похибок. При цьому відносні похибки вимірювань в усьому діапазоні характеристики вентилятора вважалися постійними. Це припущення дозволило отримати достатньо прості формули, однак в умовах значної зміни параметрів, що досліджуються, воно не є вірним. Більш коректним є припущення про постійність абсолютних похибок вимірювань [5-7]. Тому у цій статті зазначені формули скориговано і виконано дослідження абсолютних похибок. Це дозволило проаналізувати похибки в усьому діапазоні характеристики вентилятора, а також уточнити отримані раніше висновки щодо необхідної точності вимірювання параметрів під час випробувань.

## 1. Аналіз точності визначення ККД методом, оснований на вимірюванні тиску й температури на вході й виході

У роботі [4] розглянуто два методи визначення ККД. Перший метод (у подальшому – метод 1) оснований на вимірюванні тиску й температури робочого тіла (повітря) на вході й виході з вентилятора. ККД визначається за формулою

$$\eta_{B1} = \frac{T_{Bx}^*}{T_B^* - T_{Bx}^*} \left[ \left( \frac{p_B^*}{p_{Bx}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right], \quad (1)$$

з якої виходить співвідношення для визначення абсолютної похибки

$$\begin{aligned} \Delta \eta_{B1}^* &= \left( \frac{\partial \eta_{B1}^*}{\partial p_B^*} \Delta p_B^* + \frac{\partial \eta_{B1}^*}{\partial p_{Bx}^*} \Delta p_{Bx}^* + \right. \\ &\quad \left. + \frac{\partial \eta_{B1}^*}{\partial T_B^*} \Delta T_B^* + \frac{\partial \eta_{B1}^*}{\partial T_{Bx}^*} \Delta T_{Bx}^* \right) = \\ &= \frac{k-1}{k} \frac{\eta_B^*}{p_{Bx}^* \left( 1 - \pi_B^* \frac{k-1}{k} \right)} \left( \frac{1}{\pi_B^{*2}} \Delta p_B^* - \Delta p_{Bx}^* \right) + \\ &\quad + \frac{\eta_B^{*2}}{T_{Bx}^* \left( \pi_B^* \frac{k-1}{k} - 1 \right)} \left[ \frac{T_B^*}{T_{Bx}^*} \Delta T_{Bx}^* - \Delta T_B^* \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Позначимо як  $\varepsilon_p = \frac{\Delta p}{p^*}$ ,  $\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T_{Bx}^*}$  відносні похибки вимірювання тиску та температури. На відміну від зазвичай вживаних відносних похибок  $\varepsilon_p = \frac{\Delta p}{p}$ ,

$\varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T^*}$ , будемо називати їх нормованими похибками.

Зазвичай характеристики компресорів й вентиляторів визначаються в зведених параметрах, тому тиск та температура на вході відповідають стандартним атмосферним умовам та є постійними. Вважаючи похибки вимірювання окремих параметрів незалежними випадковими величинами, а дисперсії абсолютних похибок тисків та температур однаковими, а також виражаючи відношення температур через ступінь підвищення тиску та ККД, отримаємо

зв'язок між абсолютною похибкою ККД та нормованими похибками тиску й температури:

$$\Delta \eta_{B1}^* = \eta_{B1}^* \sqrt{\left(\frac{\partial \delta \eta_{B1}^*}{\partial \varepsilon_p}\right)^2 \varepsilon_p^2 + \left(\frac{\partial \delta \eta_{B1}^*}{\partial \varepsilon_T}\right)^2 \varepsilon_T^2}, \quad (3)$$

де 
$$\frac{\partial \delta \eta_{B1}^*}{\partial \varepsilon_p} = \frac{k-1}{k} \frac{1}{1 - \pi_B^* \frac{k-1}{k}} \sqrt{\frac{1}{\pi_B^*} + 1};$$

$$\frac{\partial \delta \eta_{B1}^*}{\partial \varepsilon_T} = \frac{\eta_{B1}^*}{\left(\pi_B^* \frac{k-1}{k} - 1\right)} \sqrt{\left[1 + \left(\frac{k-1}{\pi_B^* k} - 1\right) \frac{1}{\eta_{B1}^*}\right]^2 + 1}.$$

З отриманих виразів випливає, що абсолютна похибка визначення ККД за першим методом зрос-

тає зі збільшенням значення ККД і зменшується зі збільшенням ступеня підвищення тиску.

Графіки, які відповідають залежностям (3), представлено на рис. 1 та 2.

Для порівняння результатів, отриманих для абсолютних і відносних похибок ККД у цій роботі та у попередньому дослідженні [4], будемо вважати, що номінальне значення ККД дорівнює 0.8. Тоді відношення абсолютної й відносної похибок складатиме 0.8. У цих умовах порівняння рис. 1 та 2 з даними роботи [4] виявляє, що оцінка впливу похибок вимірювання тисків, отримана для відносної похибки, є в 3-6 разів більшою, ніж оцінка, отримана для абсолютної похибки. В той же час, оцінки впливу похибок вимірювання температур практично збігаються: відмінність складе 20-30%. Таким чином, отримана оцінка абсолютної похибки є більше оптимістичною, тому що показує суттєво менший вплив похибок вимірювання тисків.

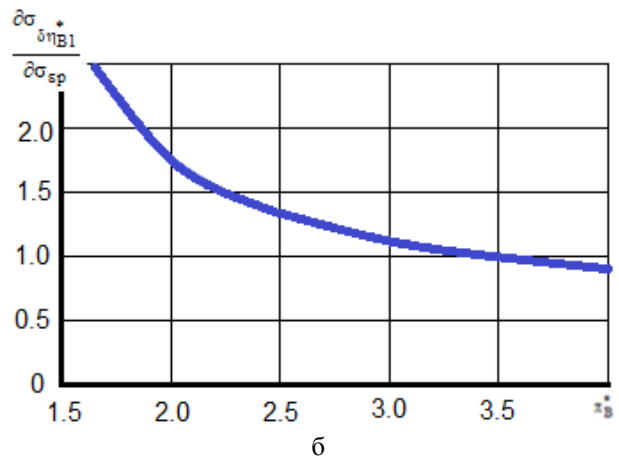
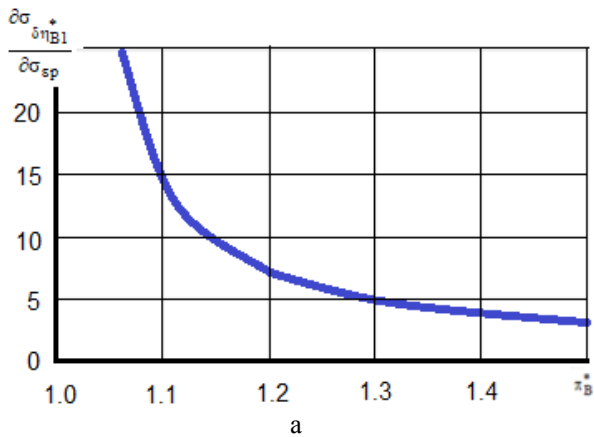


Рис. 1. Залежність чутливості похибки визначення ККД до похибок вимірювання тисків від ступеня підвищення тиску: а – в області  $1.0 < \pi_B^* \leq 1.5$ ; б – в області  $1.5 < \pi_B^* \leq 4.0$

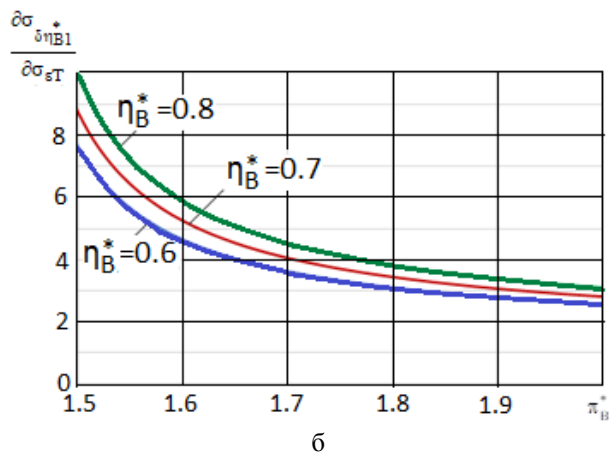
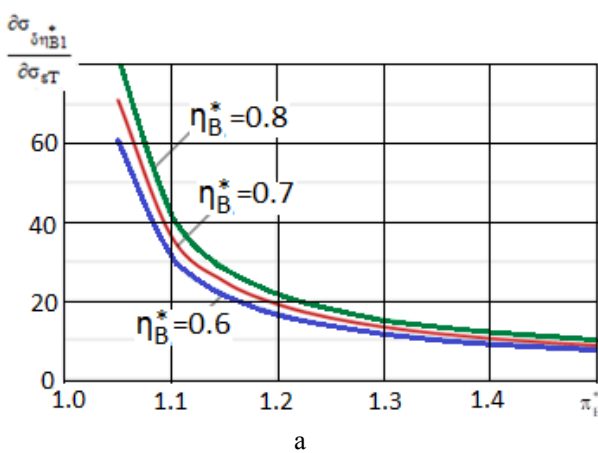


Рис. 2. Залежність чутливості похибки визначення ККД до похибок вимірювання температури від ступеня підвищення тиску та ККД: а – в області  $1.0 < \pi_B^* \leq 1.5$ ; б – в області  $1.5 < \pi_B^* \leq 4.0$

## 2. Аналіз точності визначення ККД методом, оснований на вимірюванні крутильного моменту

Другий метод визначення ККД (у подальшому – метод 2) оснований на вимірюванні крутильного моменту на валу, що приводить вентилятор. ККД розраховується як відношення адіабатної потужності до потужності, яка передається на приведення вентилятора:

$$\eta_{B2} = \frac{G_{cp} T_{BX}^*}{M_{кр} \omega} \left[ \left( \frac{P_B^*}{P_{BX}^*} \right)^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right]. \quad (4)$$

Витрата повітря не є прямо вимірюваним параметром. Вона визначається розрахунковим шляхом на основі вимірювання температури, а також повного й статичного тиску у вхідному мірному перерізі:

$$G = m \frac{\sqrt{T_{BX}^*}}{P_{BX}^*} F_{BX} q(\lambda). \quad (5)$$

Значення газодинамічної функції витрати  $q(\lambda)$  визначається як функція газодинамічної функції тиску:  $q(\lambda) = f[\pi(\lambda)]$ . У роботі [4] показано, що похибки визначення витрати й ККД зменшуються, якщо визначити газодинамічну функцію тиску як

$$\pi(\lambda) = 1 - \frac{Dp_{BX}^*}{P_{BX}^*}, \quad (6)$$

де  $Dp_{BX}^* = P_{BX}^* - p_{BX}^*$  – перепад між повним і статичним тиском.

Абсолютна похибка розрахунку ККД за формулою (4) визначається як

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \eta_{B2}^*}{\eta_{B2}^*} = & \frac{\Delta G}{G} - \frac{\Delta M_{кр}}{M_{кр}} \left( \pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \Delta M_{кр} - \frac{\Delta \omega}{\omega} + \\ & + \frac{\Delta T_{BX}^*}{T_{BX}^*} + \frac{k-1}{k} \frac{\pi_B^{\frac{1}{k}}}{\pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1} \frac{\Delta P_B^*}{P_{BX}^*} - \frac{k-1}{k} \frac{\pi_B^{\frac{k-1}{k}}}{\pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1} \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*}. \end{aligned} \quad (7)$$

Похибка визначення витрати

$$\frac{\Delta G}{G} = -0.5 \frac{\Delta T_{BX}^*}{T_{BX}^*} + \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*} + \frac{\Delta q}{q}. \quad (8)$$

Похибка визначення газодинамічної функції витрати

$$\Delta q = q \pi^{\frac{1}{k}} \frac{\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1.5}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \Delta \pi. \quad (9)$$

Відповідно до (6),

$$\Delta \pi = \frac{Dp_{BX}^*}{P_{BX}^*} \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*} - \frac{\Delta(Dp_{BX}^*)}{P_{BX}^*} = (1 - \pi) \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*} - \frac{\Delta(Dp_{BX}^*)}{P_{BX}^*}. \quad (10)$$

Тоді

$$\Delta q = q \pi^{\frac{1}{k}} \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \frac{1}{P_{BX}^*} \left[ \Delta(Dp_{BX}^*) - (1 - \pi) \Delta P_{BX}^* \right];$$

$$\frac{\Delta G}{G} = -0.5 \frac{\Delta T_{BX}^*}{T_{BX}^*} + \left( 1 - \pi^{\frac{1}{k}} (1 - \pi) \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \right). \quad (11)$$

$$\cdot \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*} + \pi^{\frac{1}{k}} \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \frac{\Delta(Dp_{BX}^*)}{P_{BX}^*};$$

Із урахуванням (11) вираз (7) перетворюється на

$$\begin{aligned} \frac{\Delta \eta_{B2}^*}{\eta_{B2}^*} = & 0.5 \frac{\Delta T_{BX}^*}{T_{BX}^*} - \frac{\Delta M_{кр}}{M_{кр}} - \frac{\Delta \pi}{\pi} + \frac{k-1}{k} \cdot \\ & \cdot \frac{\pi_B^{\frac{1}{k}}}{\pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1} \frac{\Delta P_B^*}{P_{BX}^*} + \pi^{\frac{1}{k}} \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \frac{\Delta(Dp_{BX}^*)}{P_{BX}^*} + \\ & + \left( 1 - \pi^{\frac{1}{k}} (1 - \pi) \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} - \frac{k-1}{k} \frac{\pi_B^{\frac{k-1}{k}}}{\pi_B^{\frac{k-1}{k}} - 1} \right) \frac{\Delta P_{BX}^*}{P_{BX}^*}. \end{aligned} \quad (12)$$

Ураховуючи, що значення газодинамічної функції  $\pi(\lambda)$  в робочому діапазоні вентилятора складає від 0.75 до 1, можемо прийняти, що для вимірювання перепаду тиску доцільно використовувати датчики, діапазон зміни тиску яких складає від 0 до 20 кПа, тобто при тому ж класі точності, що мають вимірювачі повного тиску, абсолютна похибка вимірювання перепаду тиску буде в 5 разів меншою:  $\Delta(Dp) = 0.2 \Delta p$ .

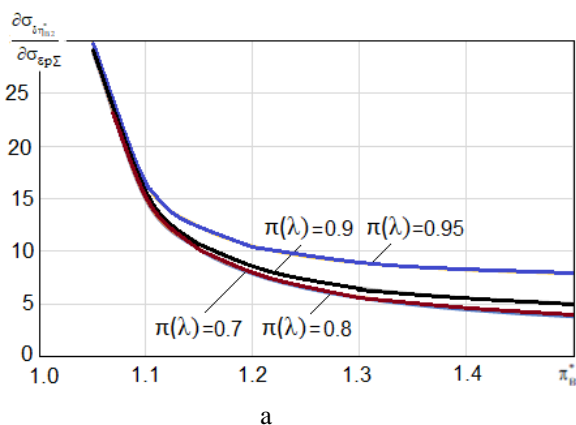
Введемо до розгляду нормалізовані похибки визначення крутильного моменту та частоти обертання:  $\varepsilon_M = \frac{\Delta M_{кр}}{M_{кр\ max}}$ ;  $\varepsilon_n = \frac{\Delta n}{n_{\max}}$ . Тоді отримаємо вираз для абсолютної похибки визначення ККД методом 2, аналогічний формулі (3) для методу (1):

$$\Delta \eta_{B2}^* = \eta_{B2}^* \left( \left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_T} \right)^2 \varepsilon_T^2 + \left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_M} \right)^2 \varepsilon_M^2 + \left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_n} \right)^2 \varepsilon_n^2 + \left[ \left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_p} \right)^2 + \left( 0.2 \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{Dp}} \right)^2 \right] \varepsilon_p^2 \right)^{\frac{1}{2}}, \quad (13)$$

де  $\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_T} = 0.5$ ;  $\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_M} = \frac{M_{\max}}{M}$ ;  $\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_n} = \frac{n_{\max}}{n}$ ;

$$\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{Dp}} = \pi^{-\frac{1}{k}} \frac{1.5 - \pi^{-\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{-\frac{k-1}{k}}};$$

$$\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_p} = \sqrt{\left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{pB}} \right)^2 + \left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{p\max}} \right)^2} = \left( \left( \frac{k-1}{k} \frac{\pi_B^{*\frac{1}{k}}}{\pi_B^{*\frac{k-1}{k}} - 1} \right)^2 + \left( 1 - \pi^{-\frac{1}{k}} \left( 1 - \pi \right) \frac{1.5 - \pi^{-\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{-\frac{k-1}{k}}} - \frac{k-1}{k} \frac{\pi_B^{*\frac{k-1}{k}}}{\pi_B^{*\frac{k-1}{k}} - 1} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}}.$$



Чутливість похибки визначення ККД до сумарної нормованої похибки вимірювання тисків та репаду тиску  $\frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{p\Sigma}} = \sqrt{\left( \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_p} \right)^2 + \left( 0.2 \frac{\partial \delta \eta_{B2}^*}{\partial \varepsilon_{Dp}} \right)^2}$  представлено на рис. 3.

Як видно з рис. 3, в області низьких значень ступеня підвищення тиску вплив похибки вимірювання тиску зростає, а в області великих значень ступеня підвищення тиску - стабілізується

Порівняння рис. 3 з рис. 1 показує, що в області  $1.0 < \pi_B^* \leq 1.5$ , характерній для вентиляторів двигунів із високим ступенем двоконтурності, вплив похибок вимірювання тисків для методів 1 і 2 є майже однаковим при великих значеннях витрати повітря (малих значеннях  $\pi(\lambda)$ ), а при малих значеннях витрати повітря сумарна похибка визначення ККД за методом 2, зумовлена похибками вимірювання тисків, стає майже вдвічі більшою, а похибка методу 1 не змінюється. Проте це не означає, що метод 1 є кращим, тому що його сумарна похибка визначається головним чином похибками вимірювання температур, які у зазначеній області  $\pi_B^*$  перевищують похибки методу 2 у 20 і більше разів.

### 3. Аналіз похибок визначення характеристики ККД реального вентилятора

Отримані вище формули та графіки є універсальними і можуть бути використані для визначення точності характеристики вентилятора у будь-якій її точці, що характеризується значеннями  $n$ ,  $M$ ,  $G$ ,  $\pi_B^*$ ,  $\eta_B^*$ . Застосуємо їх для аналізу реальної характеристики ККД вентилятора, приведеної на рис. 4.

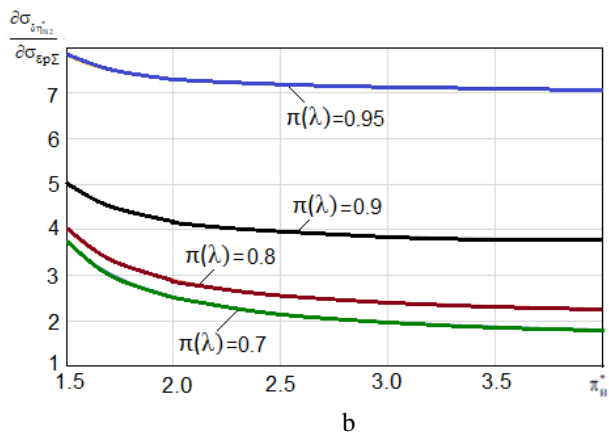


Рис. 3. Залежність чутливості похибки визначення ККД до нормованої похибки вимірювання тисків:

а – в області  $1.0 < \pi_B^* \leq 1.5$ ; б – в області  $1.5 < \pi_B^* \leq 4.0$

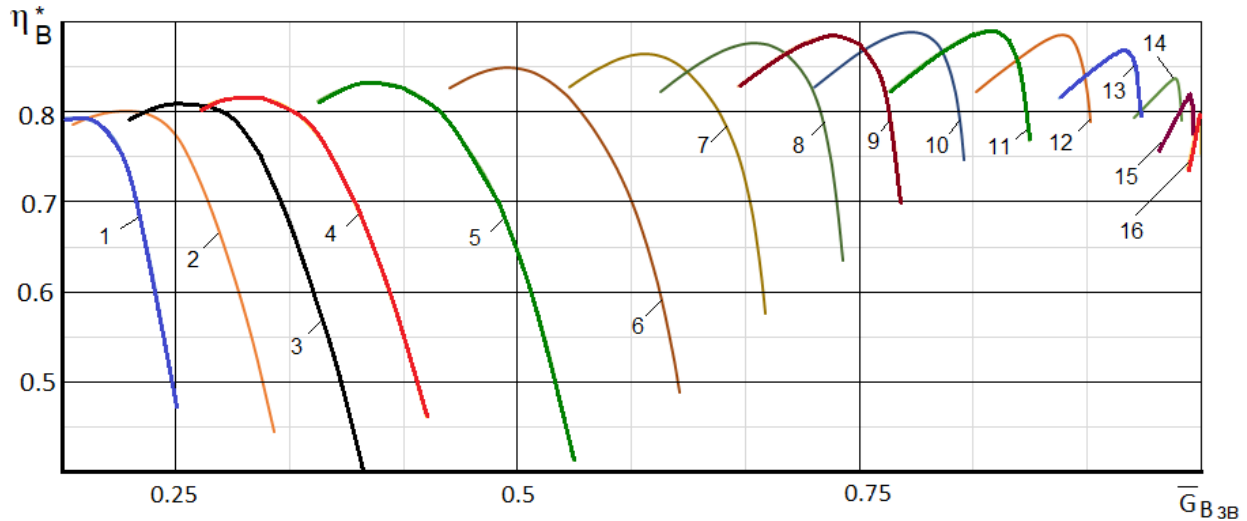


Рис. 4. Характеристика вентилятора. Значення відносних частот обертання на ізолініях:  
1 – 0.2033; 2 – 0.2574; 3 – 0.3089; 4 – 0.3618; 5 – 0.4685; 6 – 0.5683; 7 – 0.6675; 8 – 0.7431; 9 – 0.7935;  
10 – 0.8431; 11 – 0.8943; 12 – 0.9580; 13 – 1; 14 – 1.0541; 15 – 1.0813; 16 – 1.1089

Ураховуючи аналіз робіт з експериментального визначення характеристик вентиляторів і компресорів, а також результати досліджень, наведені в попередній публікації авторів [4], будемо використовувати наступні значення нормованих похибок вимірювання:

$$\varepsilon_p = \frac{\Delta p}{p_*} = 0.1\%; \quad \varepsilon_{Dp} = 0.2\varepsilon_p; \quad \varepsilon_T = \frac{\Delta T}{T_{Bx}^*} = 0.2\%;$$

$$\varepsilon_M = \frac{\Delta M}{M_{\max}} = 0.4\%; \quad \varepsilon_n = \frac{\Delta n}{n_{\max}} = 0.02\%,$$

Похибка визначення витрати повітря (горизонтальної координати характеристики) описується формулою (11), з якої витікає:

$$\Delta G = G \left( 0.25\varepsilon_T^2 + \left[ \left( 1 - \pi^{\frac{1}{k}} (1 - \pi)^{\frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}} \right)^2 + \left( 0.2\pi^{\frac{1}{k}} \frac{1.5 - \pi^{\frac{k-1}{k}}}{1 - \pi^{\frac{k-1}{k}}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \varepsilon_p^2 \right); \quad (14)$$

Обчислення виконано з використанням програмного засобу Excel для кожної точки характеристики вентилятора. Необхідні для використання формули (14) значення газодинамічної функції швидкості  $\pi(\lambda)$  визначалися наступним чином. Спочатку із

використанням формули (5) і стандартних значень температури та тиску ( $T_{Bx}^* = 288.16 \text{ K}$ ,  $p_{Bx}^* = 101322 \text{ Па}$ ) розраховувалися значення газодинамічної функції витрати:

$$q(\lambda) = \frac{G \sqrt{T_{Bx}^*}}{\rho_{Bx}^* F_{Bx}},$$

де  $F_{Bx}$  – площа мірного перерізу на вході до вентилятора.

Потім розраховувалися значення газодинамічної функції тиску. Знайти аналітичну залежність  $\pi(\lambda) = f(q(\lambda))$  не вдається, тому в робочому діапазоні  $0 < \lambda < 0.75$  на основі табличних даних цю залежність було апроксимовано степеневою функцією

$$\pi = 1 - 0.34q^{2.5}.$$

Результати подано на рис. 5 у вигляді відносних похибок  $\Delta \bar{G} = \frac{\Delta G}{G_{\max}}$  – відношення абсолютних похибок до максимальної витрати повітря.

Отримана залежність свідчить про те, що на режимах з малою витратою повітря похибки визначення витрати перевищують 1%; зі зростанням витрати повітря похибки її визначення зменшуються і на високих режимах складають менше 0.3%.

Похибки визначення ККД методом 1, визначені за формулою (3), представлено на рис. 6 у вигляді, аналогічному характеристиці вентилятора (тобто у вигляді ліній рівної частоти обертання).

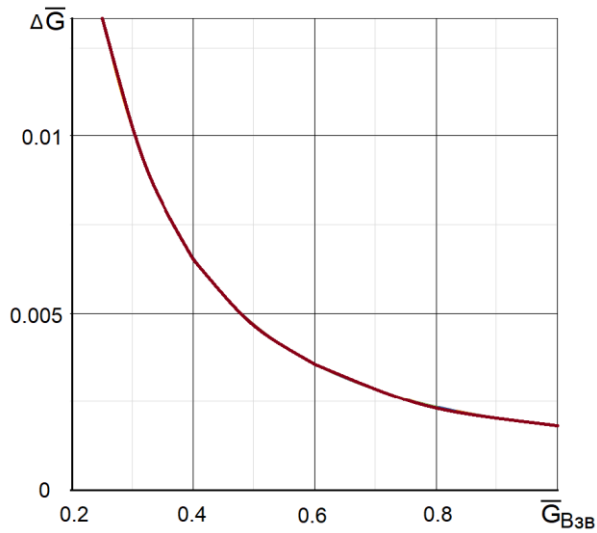


Рис. 5. Похибки визначення витрати повітря

Видно, що навіть при зазначених вище дуже малих значеннях похибок вимірювання тисків і ККД методом 1 у полі характеристики вентилятора температур не вдається визначити ККД з абсолютною похибкою менше за 2 %, а при малих значеннях зведеної частоти обертання внаслідок малих значень

ступеня підвищення тиску похибка складає десятки відсотків. Результати, отримані для методу 2 з використанням формули (13), наведено на рис. 7, 8.

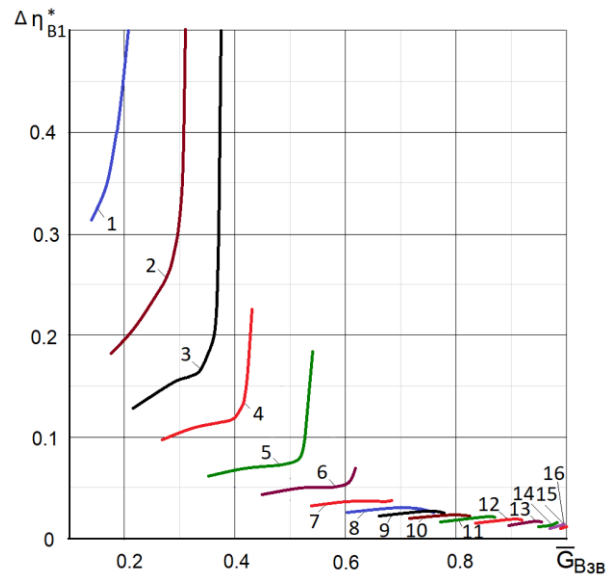


Рис. 6. Розподіл абсолютних похибок визначення

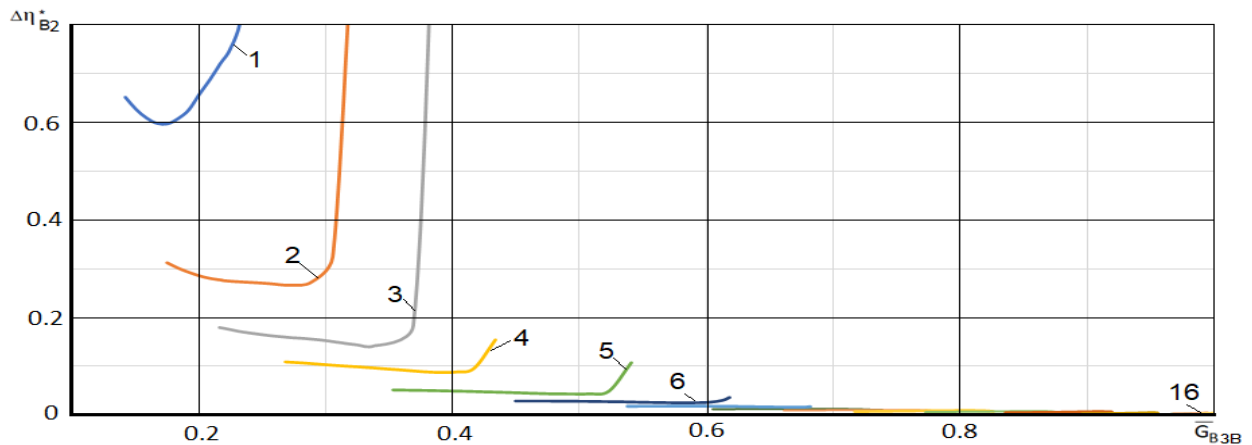


Рис. 7. Розподіл абсолютних похибок визначення ККД методом 2 у полі характеристики вентилятора

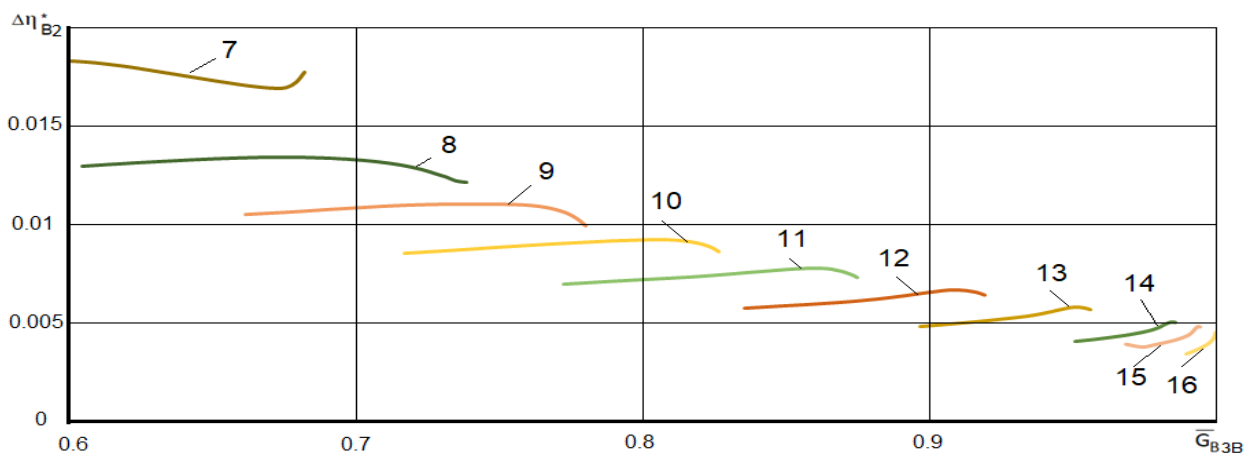


Рис. 8. Розподіл абсолютних похибок визначення ККД методом 2 в області великих витрат повітря

## Висновки

Аналіз отриманих результатів дозволяє зробити наступні висновки:

1. Використання вимірювачів крутильного моменту дозволяє зменшити похибки визначення ККД вентилятора, тому що вплив похибок вимірювання температур і тисків у разі використання методу 2 є суттєво меншим, ніж при використанні методу 1.

2. Похибки вимірювання частоти обертання й температури (при їх розглянутому рівні) вносять малий внесок у сумарну похибку визначення ККД. Тому похибка визначення ККД головним чином визначається похибками вимірювання тисків і крутильного моменту.

3. При зниженні витрати повітря (тобто режиму роботи двигуна) складова похибки визначення ККД, пов'язана з похибками вимірювання тисків, зростає більш інтенсивно, ніж похибка, пов'язана з похибкою вимірювання крутильного моменту. Тому на низьких режимах внесок зазначених складових є приблизно однаковим, а на високих режимах похибка визначення ККД практично повністю визначається похибкою вимірювання крутильного моменту.

4. Похибки визначення ККД вентилятора суттєво залежать від ступеня підвищення тиску й витрати повітря. При малих значеннях цих параметрів похибки значно зростають.

5. В області низьких режимів роботи двигуна (близьких до області режиму малого газу) похибки визначення ККД на основі обробки результатів вимірювань настільки великі, що вірогідне визначення ККД стає практично неможливим без залучення додаткової інформації, в якості якої може бути використана розрахункова характеристика вентилятора, а також математична модель двигуна та результати вимірювання параметрів робочого процесу в інших вузлах, крім самого вентилятора.

**Внесок авторів:** формулювання проблеми – **С. В. Єпіфанов, К. М. Подгорський**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **К. М. Подгорський**; формування аналітичної моделі похибок – **К. М. Подгорський**; визначення кількісних показників точності для прикладу характеристики вентилятора – **К. М. Подгорський**; аналіз похибок та формування висновків – **С. В. Єпіфанов, К. М. Подгорський**.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

## Література

1. *Clean Sky Research and Demonstration Programmes for Next Generation Aircraft Engines [Text] / J-F. Brouckaert, F. Mirville, K. Phuah, P. Taferner // Aeronautical Journal. – 2018. – Vol. 122, Iss. 1254. – P. 1163-1175. DOI: 10.1017/aer.2018.37.*

2. *Whurr, J. Rolls-Royce's Long Term Civil Aircraft Propulsion System Concept and Technology Strategy [Text] / J. Whurr, P. Beecroft // International Symposium on Air Breathing Engines. – ISABE-2017-22531. – 19 p.*

3. *Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (аналитический обзор) [Текст] ; под общ. ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина. – М. : ЦИАМ. – 2004. – 424 с.*

4. *Подгорський, К. М. Аналіз точності експериментального визначення ККД вентилятора з використанням вимірювачів крутильного моменту [Текст] / К. М. Подгорський, С. В. Єпіфанов // Авіаційно-космічна техніка та технологія. – 2023. – № 1(185). – С. 35–46. DOI: 10.32620/akt.2023.1.04.*

5. *Зайдель, А. Н. Элементарные оценки ошибок измерений [Текст] / А. Н. Зайдель. – Л. : Наука, 1967. – 88 с.*

6. *Schennach, S. Recent Advances in the Measurement Error Literature [Text] / S. Schennach // Annual Review of Economics. – 2016. – Vol. 8. – P. 341-377. DOI: 10.1146/annurev-economics-080315-015058.*

7. *Yi, Grace. Statistical Analysis with Measurement error or misclassification. Strategy, method and application [Text] / Grace Yi. – Springer. – 2017. – 471 p.*

## References

1. Brouckaert, J-F., Mirville, F., Phuah, K. and Taferner, P. Clean Sky Research and Demonstration Programmes for Next Generation Aircraft Engines. *Aeronautical Journal*, 2018, vol. 122, iss. 1254, pp. 1163-1175. DOI: 10.1017/aer.2018.37.

2. Whurr, J. and Beecroft, P. Rolls-Royce's Long Term Civil Aircraft Propulsion System Concept and Technology Strategy. *International Symposium on Air Breathing Engines*, ISABE-2017-22531. 19 p.

3. Skibin, V. A. and Solonin, V. I. *Raboti veduschih aviaostroitelnih kompanij po sozdaniyu perspektivnyh aviatsionnyh dvigatelej (analticheskij obzor) [Works of leading aircraft engine designing companies on promising aircraft engines development (analytical overview)]*. Moscow, CIAM Publ., 2004. 424 p.

4. Podgor'sky, K., Yepifanov, S. Analiz tochnosti eksperimentalnogo viznachennya KKD ventilyatora z vikorystannyam vymiryuvachiv krutyl'nogo



momentu [Accuracy analysis of the fan efficiency experimental determination using torque meter]. *Aviacijno-kosmicna tehnika i tehnologija – Aerospace Technique and Technology*, 2023, no. 1(185), pp. 35-46. DOI: 10.32620/akt.2023.1.04.

5. Zajdel, A. N. *Elementarnye otsenki oshibok izmerenij* [Elementary estimations of measuring errors]. Leningrad, Nauka Publ., 1967. 88 p.

6. Schennach, S. Recent Advances in the Measurement Error Literature. *Annual Review of Economics*, 2016, vol. 8, pp. 341-377. DOI: 10.1146/annurev-economics-080315-015058.

7. Yi, Grace. *Statistical Analysis with Measurement error or misclassification. Strategy, method and application*. Springer, 2017. 471 p.

Надійшла до редакції 15.04.2023, розглянута на редколегії 12.06.2023

## ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF MEASUREMENT ERRORS ON THE ABSOLUTE ERRORS OF THE EXPERIMENTAL DETERMINATION OF FAN EFFICIENCY

*Kostiantyn Podgors'ky, Sergiy Yepifanov*

The **subject** of research in this article is the experimental determination of the characteristics of fans of turbofan engines with a high and ultra-high bypass ratio. Increasing the efficiency of fans of engines of the specified class requires solving many complex interrelated problems, one of which is the determination of characteristics based on test results. The **goal** is to substantiate the need to use a method based on the determination of torque and the formation of requirements for the accuracy of its measurement. **Tasks**: clarification of previously obtained relationships between measurement errors and accuracy of determination of efficiency and air flow, formation of universal dependencies that allow analysis of absolute errors of determination of efficiency of any fan or compressor based on known measurement errors, analysis of the accuracy of alternative methods of organization of measurements and calculations the specified parameters, a comparative study of the specified methods and the formation of recommendations for their practical use on the example of the characteristics of a real fan. The following **results have been** obtained: the formulas that relate the absolute errors of calculating the efficiency and air flow with the absolute errors of the measured parameters (mathematical models of errors) have been clarified, as well as the requirements for the accuracy of the torque measurement necessary to determine the efficiency with the specified accuracy have been specified. The **scientific and practical novelty** of the results obtained is as follows: the mathematical models of errors in determining the efficiency and air flow in the fan have been clarified, which connect the errors of the calculation results with the errors of the measured parameters, because of the use of these models, experimental methods of determining the characteristics of compressors and fans have been developed; for the first time, the distribution of errors in the entire area of determining the characteristics of a specific fan was analyzed in detail. It is shown that the errors in determining the efficiency of the fan depend significantly on the degree of pressure increase and air flow. At small values of these parameters, the errors increase significantly. In the area of low engine operating modes (close to the area of the low air consumption), the errors in determining the efficiency based on the processing of the measurement results are so large that a reliable determination of the efficiency becomes practically impossible without the involvement of additional information, which can be used as the calculated characteristics of the fan, and as well as the mathematical model of the engine and the results of measuring parameters of the work process in other nodes, except for the fan itself.

**Keywords**: turbofan engine; fan; characteristics; efficiency; error; torquemeter.

**Подгорський Костянтин Миколайович** – асп. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Єпіфанов Сергій Валерійович** – д-р техн. наук, проф., зав. каф. конструкції авіаційних двигунів, Національний аерокосмічний університет ім. М. С. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Kostiantyn Podgors'ky** – PhD student of the Aircraft Engine Design Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: ugk@motorsich.com.

**Sergiy Yepifanov** – Doctor of Sciences (Engineering), Professor, Head of the Aircraft Engine Design Department, National Aerospace University “Kharkiv Aviation Institute”, Kharkiv, Ukraine, e-mail: s.yepifanov@khai.edu, ORCID: 0000-0003-0533-9524, Scopus Author ID: 6506749318.