

УДК 621.515-226.2

В.М. Дихановський<sup>1</sup>, О.Л. Шаповалов<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Міністерство оборони України, Київ

<sup>2</sup>Державний науково-випробувальний центр Збройних Сил України, Феодосія

## ЗАСТОСУВАННЯ РОЗРІЗНИХ ЛОПАТОК ДЛЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ КОМПРЕСОРІВ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

*На основі аналізу трикутників швидкостей за вхідним напрямним апаратом прототипу двигуна AI-450-МС показано, що на нерозрахункових режимах роботи газотурбінних двигунів сучасні системи регулювання не можуть забезпечити безвідривне натікання потоку по всій висоті лопатки робочого колеса. Описані фактори, які спричиняють відмінність профілів трикутників швидкостей на розрахунковому та нерозрахункових режимах. Запропонований спосіб зміни конструктивних кутів входу і виходу лопаток вхідного напрямного апарата відповідно до режиму роботи двигуна.*

**газотурбінний двигун, компресор, регулювання, вхідний напрямний апарат, трикутники швидкостей, розрізні лопатки**

Для забезпечення високої маневреності літальних апаратів та безпеки польотів до сучасних авіаційних двигунів висуваються жорсткі вимоги щодо газодина-

мічної стійкості. Як відомо, найменші запаси газодинамічної стійкості авіаційні двигуни мають під час розгону двигуна, тобто на режимах прийомистості.

На стаціонарних режимах двигуни добре працюють лише на одному режимі, який називається розрахунковим. На інших експлуатаційних режимах, які вважаються нерозрахунковими, двигун працює гірше або переходить на небезпечні режими роботи.

Найбільш поширеним способом регулювання осьового компресора є поворот лопаткових вінців компресора. Причому повертаються тільки лопатки напрямного апарата однієї або декількох ступенів, але за рахунок цього забезпечується збереження величини кутів атаки в межах допустимого не тільки для лопаток напрямного апарата, а і для робочого колеса (РК) в широкому діапазоні роботи. Регулювання напрямного апарата здійснюється так, щоб потік повертався в лопатковому вінці на потрібний кут без великих відривів потоку з лопаток. Регулювання здійснюється шляхом примусового повороту лопаток навколо їх осі обертання на заданий програмно-задавальним пристроєм кут.

Але на нерозрахункових режимах роботи газотурбінних двигунів (ГТД) сучасні системи регулювання не можуть забезпечити безвідривне натікання потоку по всій висоті лопатки робочого колеса. Отже, необхідно дослідити роботу сучасного компресора на нерозрахункових режимах роботи, вважаючи, що на розрахунковому режимі кути атаки на лопатках мають номінальну величину. Найбільш інформативним засобом аналізу кутів натікання на лопаткові вінці є побудова трикутників швидкостей за висотою лопатки.

Були проведені розрахункові дослідження течії газу через вхідний напрямний апарат (ВНА) прототипу двигуна AI-450-МС на двох режимах його роботи: максимальному режимі, що характеризується витратою повітря 1,27 кг/с, і мінімальному режимі, що характеризується витратою повітря 0,61 кг/с. Для визначення параметрів потоку розрахунок здійснювався з використанням моделі течії в'язкого стисливого теплопровідного газу, яка реалізована у розрахунковому комплексі Єршова і Русанова "FlowER" [2]. Повний тиск газу на вході становив 101320 Па, густина газу 1,225 кг/м<sup>3</sup>, температура газу 288 К. У результаті розрахункових досліджень були отримані дані щодо газодинамічних параметрів навколо ВНА на максимальному і мінімальному режимах.

На основі цих даних були побудовані залежності, які характеризують розподіл осьової швидкості перед ВНА за висотою лопатки на максимальному і мінімальному режимах роботи компресора, що показано на рис. 1.

У загальному випадку розподіл осьової швидкості перед ВНА залежить від геометричної форми лопаток ВНА. Але для якісного аналізу трикутників швидкостей у цій роботі був прийнятий розподіл осьової швидкості перед ВНА, характерний для про-

тотипу двигуна AI-450-МС. А саме: на максимальному режимі роботи ГТД конструктивні кути входу і виходу ВНА становлять по всій висоті лопатки  $\alpha_{0к} = -7^\circ$ ,  $\alpha_{1к} = 0^\circ$  відповідно.

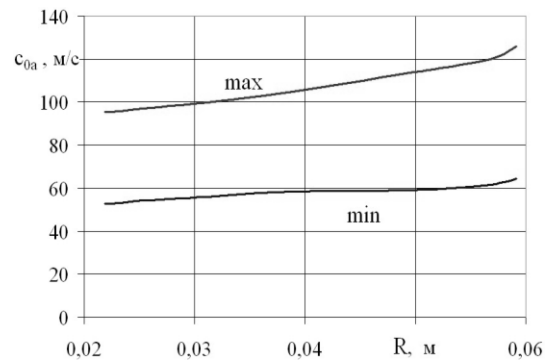


Рис. 1. Розподіл осьової швидкості перед ВНА за висотою лопатки на різних режимах роботи компресора

На мінімальному режимі лопатки ВНА повернуті на збільшення кута атаки на  $44^\circ$ , при цьому конструктивні кути входу і виходу такі:  $\alpha_{0к} = 37^\circ$ ,  $\alpha_{1к} = 44^\circ$  відповідно.

Для оцінки кутів натікання на лопатки робочого колеса за їх висотою був проведений аналіз трикутників швидкостей за вхідним напрямним апаратом на розрахунковому і нерозрахункових режимах роботи компресора. При цьому вважалося, що найбільша розбіжність кутів натікання на робоче колесо за висотою лопаток має місце між кутами кореня і периферії лопаток. За розрахунковий режим роботи був прийнятий максимальний режим. З нерозрахункових режимів був розглянутий лише мінімальний, оскільки порівняно з максимальним режимом він має найбільшу розбіжність кутів натікання на робоче колесо.

### Визначення трикутників швидкостей

Для визначення трикутників швидкостей перед робочим колесом, яке розміщене після ВНА, необхідно знати параметри векторів швидкості між ними. У цій роботі вважалося, що для всіх режимів при однакових площах каналу на вході і виході ВНА, тобто в перетинах 0 – 0 і 1 – 1, осьові швидкості однакові:

$$c_{1a} = c_{0a} \quad (1)$$

На максимальному режимі роботи потік у ВНА не змінює свого напрямку, тому кути входу і виходу потоку в абсолютному русі залишаються однаковими:

$$\alpha_1 = \alpha_0 = 0^\circ \quad (2)$$

Окружну складову трикутника швидкостей можна обчислити так:

$$u_1 = R_{\text{ВНА}} \cdot \omega_{\text{РК}} \quad (3)$$

З урахуванням співвідношення

$$\omega_{\text{РК}} = n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}$$

рівняння (3) перепишемо інакше:

$$u_1 = R_{\text{ВНА}} \cdot n \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60}, \quad (4)$$

де  $R_{\text{ВНА}}$  – радіус лопатки ВНА;  $\omega_{\text{РК}}$  – кутова швидкість обертання робочого колеса;  $n$  – частота обертання робочого колеса.

Кути входу потоку до робочого колеса у відносному русі для максимального режиму роботи ГТД можна визначити так:

$$\beta_1 = \arctan \frac{u_1}{c_{1a \max}} \quad (5)$$

або з урахуванням співвідношення (1)

$$\beta_1 = \arctan \frac{u_1}{c_{0a \max}}. \quad (6)$$

Визначивши величини  $c_{1a}$ ,  $u_1$ ,  $\alpha_1$ ,  $\beta_1$ , на максимальному режимі роботи ГТД можна побудувати трикутники швидкостей, які показані на рис. 2 з позначкою **max**. Тут показані трикутники швидкостей для периферії і втулки лопатки.

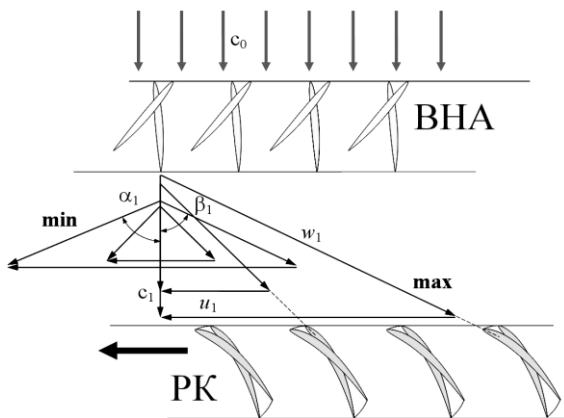


Рис. 2. Трикутники швидкостей за ВНА для різних режимів роботи компресора і незмінній частоті обертання

При побудові трикутників швидкостей для мінімального режиму була поставлена умова безвідривного натікання потоку на робоче колесо по всій висоті його лопатки. Виходячи з цієї умови, на мінімальному режимі роботи ГТД кути входу потоку до робочого колеса у відносному русі за висотою лопатки залишалися такими ж, як на максимальному режимі. Для виконання цієї умови були використані такі співвідношення:

$$\begin{aligned} w_{1u} &= c_{1a} \cdot \text{tg} \beta_1; \\ c_{1u} &= w_{1u} - u_1; \\ \alpha_1 &= \arctan \frac{c_{1u}}{c_{1a}}, \end{aligned} \quad (7)$$

де  $w_{1u}$  – проекція вектора відносної швидкості на напрям окружної швидкості;  $c_{1u}$  – проекція вектора абсолютної швидкості на напрям окружної швидкості.

Після нескладних перетворень співвідношення для визначення кутів входу потоку до РК (або кутів

виходу з ВНА) в абсолютному русі можна представити так:

$$\alpha_1 = \arctan \frac{c_{1a} \cdot \text{tg} \beta_1 - u_1}{c_{1a}} \quad (8)$$

або так:

$$\alpha_1 = \arctan \frac{\left( \frac{c_{1a}}{c_{1a \max}} - 1 \right) \cdot u_1}{c_{1a}}, \quad (9)$$

де  $c_{1a \max}$  – осьова швидкість на максимальному режимі роботи ГТД.

З урахуванням умови безвідривного натікання потоку на робоче колесо по всій висоті його лопатки на мінімальному режимі роботи ГТД були отримані кути виходу потоку з ВНА в абсолютному русі, що показано на рис. 2. На відміну від максимального режиму, для якого конструктивні кути виходу лопатки ВНА по всій її висоті однакові, робота на мінімальному режимі вимагає певного закручування лопатки ВНА. На рис. 3 показаний розподіл кутів виходу за висотою лопатки на максимальному та мінімальному режимах роботи ГТД і незмінній частоті обертання.

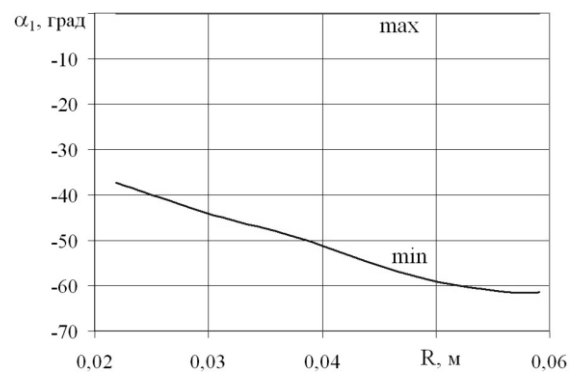


Рис. 3. Розподіл кутів виходу за висотою лопатки на різних режимах компресора і незмінній частоті обертання

Тут наочно видно, яким повинне бути закручування лопаток ВНА для виконання умови рівності кутів входу потоку до робочого колеса у відносному русі за висотою лопатки.

Різниця між кутами виходу потоку з ВНА в абсолютному русі при змінній частоті обертання біля втулки і на периферії становить  $\sim 25^\circ$ .

Аналогічна робота була проведена при побудові трикутників швидкостей для розглянутого ГТД, на якому режим роботи змінюється при зміні частоти обертання робочого колеса.

Трикутники швидкостей для цього випадку показані на рис. 4. Розподіл кутів виходу потоку з ВНА в абсолютному русі за висотою лопатки показаний на рис. 5. Тут різниця між кутами виходу потоку з ВНА в абсолютному русі біля втулки і на периферії становить  $\sim 14^\circ$ .

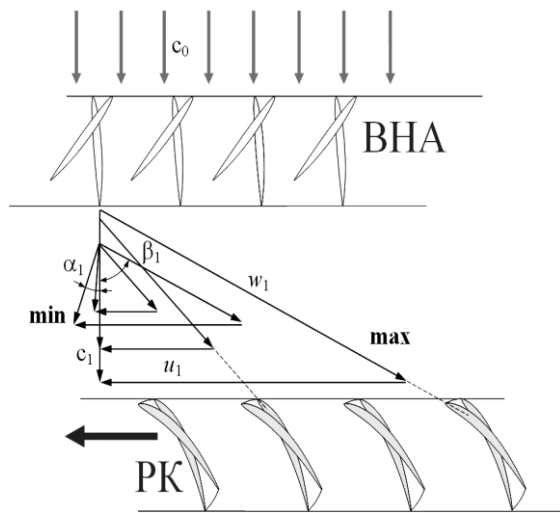


Рис. 4. Трикутники швидкостей за ВНА для різних режимів роботи компресора і змінній частоті обертання

Отже, аналізу трикутників швидкостей за вхідним напрямним апаратом прототипу двигуна АІ-450-МС показав, що для обох випадків, і для змінної частоти обертання робочого колеса, і для постійної, на нерозрахункових режимах роботи газотурбінних двигунів сучасні системи регулювання не можуть забезпечити безвідривне натікання потоку по всій висоті лопатки робочого колеса.

Така ситуація має місце внаслідок різних окружних швидкостей біля втулки і на периферії робочого колеса, що зумовлено величиною відносного діаметра втулки, який для сучасних двигунів становить  $\sim 0,3 \dots 0,6$  у перших ступенях компресора. Розглянутий двигун має відносний діаметр втулки 0,39. Можна показати, що різниця між кутами виходу потоку з ВНА в абсолютному русі біля втулки і на периферії тим більша, чим менший відносний діаметр втулки.

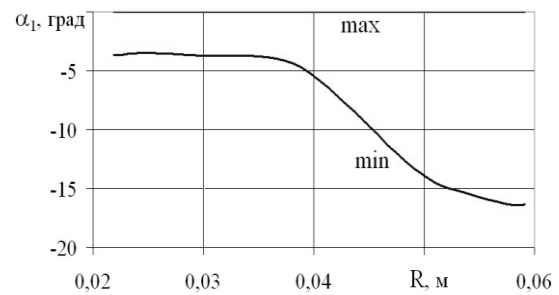


Рис. 5. Розподіл кутів виходу за висотою лопатки на різних режимах компресора і змінній частоті обертання

Для адаптації геометрії вхідного напрямного апарата доцільно було б використовувати лопатки зі змінним закручуванням. Але це технічно не можливо. Як альтернатива пропонується застосування розрізних лопаток, які при зміні режиму роботи ГТД повертаються не цілком, а диференційовано. Наприклад, якщо така лопатка складається з двох сегментів, то сегмент біля втулки повертається на менший кут, ніж сегмент на периферії.

### Список літератури

1. Дихановський В. М. Теоретичні основи газомеханічного методу регулювання осьового компресора ГТД // Зб. наук. пр. Інституту проблем машинобудування НАН України „Удосконалювання турбоустановок методами математичного і фізичного моделювання”. – 2003. – Т. 1. – С. 217-220.
2. Еришов С.В. Математическое моделирование пространственных турбулентных отрывных течений газа в многовенцовых турбомашинах: Дис... докт. техн. наук. – X., 1995. – 449 с.

Надійшла до редколегії 28.03.2007

Рецензент: д-р техн. наук проф. Ю.М. Терещенко, Національний авіаційний університет «ХАІ», Харків.