

УДК 629.735.035.3:514.88(045)

С.О. ДМИТРИЄВ<sup>1</sup>, М.В. КУПЧИК<sup>2</sup><sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Україна<sup>2</sup>ТОВ „Інтертел”, Україна

## ОЦІНКА ВПЛИВУ НЕТОЧНОСТЕЙ ВИЗНАЧЕННЯ ВИМІРЮВАНИХ ПАРАМЕТРІВ ПРИ РОЗРАХУНКАХ КУТА ВСТАНОВЛЕННЯ ЛОПАТЕЙ ГВИНТА

Розглянуто алгоритм розрахунку кута встановлення лопатей повітряного гвинта при застосуванні оптичного методу його вимірювання. Проведено оцінку впливу неточностей визначення вимірюваних параметрів в процесі обчислення кута встановлення для різних варіантів розміщення оптичної підсистеми.

**силова установка турбогвинтового двигуна, кутове положення лопатей повітряного гвинта, оптичний метод, пристрій, параметри, неточності вимірювання, похибка**

### Вступ

Важливою умовою забезпечення високого рівня безпеки польотів та економічної ефективності використання повітряних суден (ПС) з турбогвинтовими двигунами (ТГД) є максимально точне визначення фактичних значень основних енергетичних параметрів роботи силової установки (СУ) – її потужності та тяги.

Кожний розроблений повітряний гвинт (ПГ), безпосередній рушій СУ з ТГД, проходить випробування на спеціальних стендах в аеродинамічних трубах з метою отримання його характеристик – залежностей коефіцієнтів потужності  $\beta$  та тяги  $\alpha$  від відносного поступу гвинта  $\lambda$  та кута встановлення лопатей гвинта  $\varphi_{2\theta}$  [1]. Тобто при наявності характеристик ПГ основні параметри СУ можуть бути розраховані шляхом вимірювання кутового положення лопатей ПГ при відомому поступу  $\lambda$ .

### Формулювання проблеми

Вимірювання кутового положення лопатей гвинта при наземних випробуваннях ведеться із застосуванням безконтактного методу [2], суть якого полягає в наступному. На певній відстані від площини обертання встановлюють випромінювач та приймач

оптичного випромінювання, які формують оптичну підсистему пристрою і можуть бути розміщені як в одній вертикальній площині з віссю гвинта, так і паралельно до цієї площини на відстані  $\Delta l$ , або з відхиленням на кут  $\alpha_{зм}$  до цієї площини. Висота розміщення випромінювача та приймача обирається виходячи із умови забезпечення максимальної чутливості методу при змінах кутового положення лопатей ПГ. Вимірювальний блок пристрою при цьому фіксує час відсутності променя на приймачі при його перетинанні лопаттю гвинта  $\tau$ , а також частоту обертання гвинта  $n_{2\theta}$ .

Проведення вимірювань кутового положення лопатей ПГ в експлуатації нерозривно пов'язане з наявністю низки факторів, які можуть суттєво вплинути на остаточні результати. До таких факторів слід відносити неточність розташування оптичної підсистеми відносно осі гвинта та можливу вібрацію літака на підвищених режимах роботи двигуна. Тому, розробка математичного апарату для розрахунку можливого впливу зазначених факторів дозволила б суттєво підвищити точність методу.

### Вирішення проблеми

Розглянемо найбільш простий варіант розміщення оптичної підсистеми пристрою для вимірювання

кутового положення лопатей ПГ, при якому вісь оптичної підсистеми лежить в одній вертикальній площині з віссю гвинта. Подібна схема розміщення є прийнятною для значної кількості літаків з ТГД, наприклад, для Ан-140, Dornier 328, ATR 42 тощо.

**Визначення кута встановлення лопатей повітряного гвинта.** Визначення кута встановлення лопатей  $\varphi_{\text{зв}}$  ведеться для попередньо обраного контрольного радіусу лопаті  $R$  (радіус проекції точок передньої та задньої кромки на площину обертання) (рис. 1) за відомою частотою обертання гвинта  $n_{\text{зв}}$  при наявних геометричних характеристиках гвинта та визначеному часі відсутності оптичного випромінювання на приймачі  $\tau$  [3].

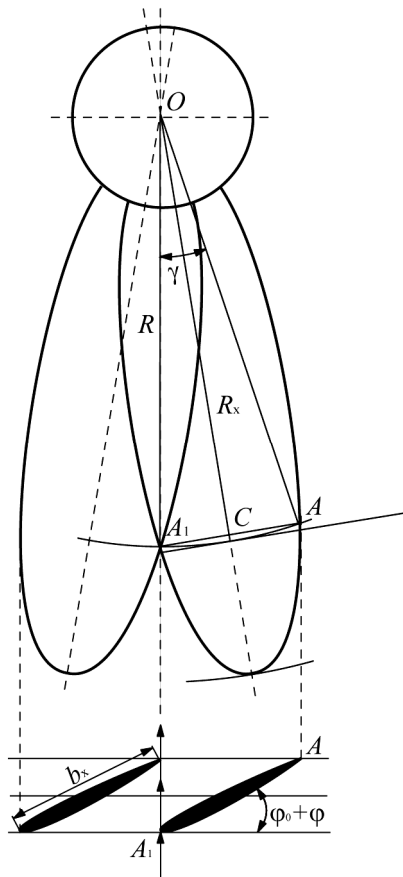


Рис. 1. Схема перетинання променя лопатю при розташуванні оптичної підсистеми в одній вертикальній площині з віссю гвинта

Радіальний кут переміщення лопаті при перетинанні оптичного випромінювання  $\gamma_{\text{рад}}$  визначається

ся наступною формулою:

$$\gamma_{\text{рад}} = \frac{\pi n_{\text{зв}} \tau}{30} . \quad (1)$$

З іншого боку, відповідно до рис. 1 кут  $\gamma$  можна визначити залежністю

$$\gamma = 2 \arcsin \left[ 0,5 \frac{b_x}{R} \cos(\varphi_o + \varphi) \right] , \quad (2)$$

де  $b_x$  – хорда лопаті на радіусі  $R_x$ ;  $\varphi_o$  – кут геометричного закручування лопаті на радіусі  $R_x$ ;  $\varphi$  – кут встановлення лопаті.

Радіус  $R_x$  пов'язаний з радіусом  $R$  наступною залежністю:

$$R_x = \sqrt{R^2 - [0,5 b_x \cos(\varphi_o + \varphi)]^2} . \quad (3)$$

Враховуючи залежність (2), кут  $\gamma_{\text{рад}}$  можна подати у такому вигляді:

$$\gamma_{\text{рад}} = 2 \arcsin \left[ 0,5 \frac{b_x}{R} \cos(\varphi_o + \varphi) \right] \frac{\pi}{180} . \quad (4)$$

Після підстановки (4) в (1) отримуємо:

$$3 n_{\text{зв}} \tau = \arcsin \left[ 0,5 \frac{b_x}{R} \cos(\varphi_o + \varphi) \right] . \quad (5)$$

Оскільки довжина хорди  $b_x$  та величина кута геометричного закручування лопаті  $\varphi_o$  змінюються вздовж пера, тому для вирішення рівняння (5) відносно кута  $\varphi$  його необхідно доповнити такими залежностями:

$$\bar{b}_x = f(\bar{R}_x) ; \quad \varphi_o = f(\bar{R}_x) , \quad (6)$$

де  $\bar{b}_x = b_x / D$ ;  $\bar{R}_x = R_x / 0,5 D$ ;  $D$  – діаметр повітряного гвинта.

Для гвинта АВ-72 залежності (6), апроксимовані в діапазоні відносних радіусів

$$0,45 \leq \bar{r} \leq 0,95 ,$$

матимуть наступний вигляд:

$$b_x = -0,39375 R_x^2 + 0,9376 R_x - 0,20553 ; \quad (7)$$

$$\varphi_o = 11,1658 R_x^2 - 53,04090 R_x + 53,6899 . \quad (8)$$

Таким чином, визначення кута встановлення лопаті ПГ ведеться за системою з чотирьох рівнянь:

(3), (5), (7) та (8). Однак при проведенні реальних вимірювань неможливо забезпечити стовідсоткову точність визначення усіх параметрів, що породжує необхідність у проведенні детального аналізу можливого впливу неточностей на остаточні результати вимірювання.

**Оцінка впливу неточностей визначення вимірюваних параметрів.** Ефективним методом оцінки впливу неточностей вимірювання є метод малих відхилень [4], результатом застосування якого є перетворення системи рівнянь (3), (5), (7) та (8) в систему лінеаризованих рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \delta R_x &= K_1 \delta R - K_2 \delta b_x + K_3 \delta \varphi_o + K_4 \delta \varphi; \\ \delta b_x &= K_5 \delta R_x; \\ \delta \varphi_o &= K_6 \delta R_x; \\ K_7 \delta n_{zg} + K_7 \delta \tau &= \delta b_x - \delta R - K_8 \delta \varphi_o - K_9 \delta \varphi; \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

де  $\delta y = \Delta y / y$  – відносне відхилення параметру;  $K_i$  – коефіцієнти впливу, що визначаються за формулами:

$$K_1 = \frac{R^2}{R^2 - [0,5b_x \cos(\varphi_o + \varphi)]^2}; \quad (10)$$

$$K_2 = \frac{0,25b_x^2 \cos^2(\varphi_o + \varphi)}{R^2 - [0,5b_x \cos(\varphi_o + \varphi)]^2}; \quad (11)$$

$$K_3 = \frac{0,125b_x^2 \sin 2(\varphi_o + \varphi)}{R^2 - [0,5b_x \cos(\varphi_o + \varphi)]^2} \varphi_o; \quad (12)$$

$$K_4 = \frac{0,125b_x^2 \sin 2(\varphi_o + \varphi)}{R^2 - [0,5b_x \cos(\varphi_o + \varphi)]^2} \varphi; \quad (13)$$

$$K_5 = \frac{-0,7875R_x^2 + 0,9376R_x}{-0,39375R_x^2 + 0,9376R_x - 0,20553}; \quad (14)$$

$$K_6 = \frac{22,3316R_x^2 - 53,04097R_x}{11,1658R_x^2 - 53,04097R_x + 53,6899}; \quad (15)$$

$$K_7 = \frac{3n_{zg}\tau}{tg(3n_{zg}\tau)}; \quad (16)$$

$$K_8 = \varphi_o tg(\varphi_o + \varphi); \quad (17)$$

$$K_9 = \varphi tg(\varphi_o + \varphi). \quad (18)$$

Відповідно до (10) ... (18) коефіцієнти впливу є функціями геометричних параметрів ПГ: радіуса

$R_x$ , кута геометричного закручування  $\varphi_o$ , а також вимірюваних параметрів: кута встановлення лопаті  $\varphi$ , частоти обертання гвинта  $n_{zg}$  та часу відсутності променя на приймачі  $\tau$ , і неточність визначення саме цих параметрів впливатиме на кінцевий результат.

Розрахунок похибок ведеться наступним чином: за рівнянь (3), (5), (7) та (8) розраховуються величини  $R_x$ ,  $b_x$ ,  $\varphi_o$  та  $\tau$ ; а за формулами (10) ... (18) обчислюються коефіцієнти впливу  $K_i$ , які підставляються до системи рівнянь (9). Результатом підстановки та вирішення системи (9) є залежність, що пов'язує відносне відхилення кутового положення лопатей  $\delta\varphi$  з відносними відхиленнями вимірюваних параметрів  $R_o$ ,  $n_{zg}$  та  $\tau$ :

$$\delta\varphi = A_1 \delta R + B_1 \delta n_{zg} + C_1 \delta \tau, \quad (19)$$

де  $A_1$ ,  $B_1$ ,  $C_1$  – коефіцієнти.

Для гвинта АВ-72 при частоті обертання гвинта  $n_{zg} = 1245$  об/хв. на радіусі  $R = 1,4625$  м та куті встановлення лопатей ПГ  $\varphi = 20^\circ$  залежність (19) набуває такого вигляду:

$$\delta\varphi = 0,7344\delta R - 8,73\delta n_{zg} - 8,73\delta \tau. \quad (20)$$

Очевидно, що найбільш суттєво на результати вимірювання впливають неточності при визначенні частоти обертання гвинта та часу відсутності оптичного випромінювання при його перетинанні лопаттю.

Однак описаний вище спосіб вимірювання кутового положення орієнтований на ідентифікацію кожної з лопатей ПГ при кожному оберті гвинта, що дозволяє проводити вимірювання частоти обертання ПГ з точністю до 100 %.

Похибка при визначенні часу перекриття оптичного випромінювання визначається в першу чергу швидкістю оптичної підсистеми пристрою. Так, при частоті дискретизації сигналу, що надходить з фотодетектора, близько 2 МГц похибка визначення  $\tau$  не перевищуватиме  $10^{-4}$  с.

Неточність же визначення контрольного радіусу  $R$  або наявність вертикальної складової вібрації силової установки при її роботі на підвищених режимах з амплітудою 0,01 м спричинюють похибку у визначенні кутового положення лопатей  $\delta\varphi_{2\theta} = 0,5\%$  (тобто  $0,1^\circ$  при  $\varphi_{2\theta} = 20^\circ$ ), а при амплітуді коливань 0,02 м –  $\delta\varphi_{2\theta} = 1,0\%$  (відповідно  $0,2^\circ$ ). Відносно висока точність визначення абсолютного значення  $\varphi_{2\theta}$  (при  $\varphi_{2\theta} = 20^\circ$ ) не означає, що вона буде зберігатися високою для інших  $\varphi_{2\theta}$ , тому забезпечення максимально точного визначення  $R$  є надзвичайно важливим.

Вплив неточностей при вимірюваннях малих кутів відхилення лопаті можливо мінімізувати шляхом непаралельного (під кутом  $\alpha_{зм.}$ ) розміщення оптичної підсистеми до вертикальної площини осі гвинта. В такому випадку система рівнянь (9) доповниться ще двома залежностями і відповідними розрахунковими коефіцієнтами з урахуванням напрямку повертання оптичної підсистеми.

В кінцевому результаті залежність (20) при непаралельному розміщенні матиме наступний вигляд:

$$\delta\varphi = A_2\delta R + B_2\delta n_{2\theta} + C_2\delta\tau + D_2\delta\alpha_{зм.}, \quad (21)$$

де  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ ,  $D_2$  – коефіцієнти;  $\delta\alpha_{зм.}$  – похибка визначення кута зміщення  $\alpha_{зм.}$

Як і для розглянутого вище варіанту розміщення оптичної підсистеми, проведемо чисельний розрахунок коефіцієнтів  $A_2$ ,  $B_2$ ,  $C_2$ ,  $D_2$  для гвинта АВ-72.

Результати розрахунку (табл. 1) свідчать, що при непаралельному розташуванні оптичної підсистеми відносно вертикальної площини осі гвинта вдається мінімізувати вплив неточностей вимірювання величин параметрів  $n_{2\theta}$  та  $\tau$  при незначному збільшенні ступеню впливу величини  $R$ , однак імовірна величина похибки  $\delta R$  при цьому зростає несуттєво.

Таблиця 1

Величини коефіцієнтів впливу

| $\alpha_{зм.},$<br>град | $A_2$  | $B_2$  | $C_2$  | $D_2$  |
|-------------------------|--------|--------|--------|--------|
| + 30                    | - 1,5  | - 13,7 | - 13,7 | - 3    |
| 0                       | - 1,5  | - 6,9  | - 6,9  | 0      |
| - 20                    | - 1,5  | - 2,9  | - 2,9  | - 0,5  |
| - 30                    | - 1,5  | - 2,01 | - 2,01 | - 0,7  |
| - 40                    | - 1,77 | - 1,25 | - 1,25 | - 0,75 |

## Висновки

Чисельний аналіз впливу можливих неточностей визначення вимірюваних для розрахунку кутового положення лопатей гвинта параметрів при застосуванні оптичного методу свідчить про високий рівень точності цього методу вимірювання, що дозволяє рекомендувати його до впровадження в організаціях з технічного обслуговування авіаційної техніки для визначення основних параметрів СУ з ТГД.

## Література

1. Александров В.Л. Воздушные винты. – М.: Оборонгиз, 1951. – 475 с.
2. Пат. № 60545 А. Україна, МПК<sup>7</sup> G01B11/04, G01B11/26 Спосіб дистанційного визначення лінійних розмірів або кутового положення нестационарних об'єктів та пристрій для його здійснення/Купчик М.В., Купчик В.Г. – 20022119503; Заяв. 28.11.2002; Опубл. 15.10.2003; Бюл. № 10, 2003 р.
3. Купчик М.В. Визначення кута встановлення лопатей повітряного гвинта при оцінці технічного стану турбогвинтових двигунів // К.: Вісник НАУ. – 2003. – № 4 (22). – С. 65 – 68.
4. Черкез Б.А. Инженерные расчеты газотурбинных двигателей методом малых отклонений. – М.: Машиностроение, 1975. – 380 с.

Поступила в редакцию 27.04.2005

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф. В.Н. Доценко, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.