

УДК 629.735.083.035.3.004.58 (045)

С. В. Єнчев, канд. техн. наук, доц.
С. Ю. Гуз, студ.
Майкл Олалі, асп.
А. П. Вознюк, асп.

КОМПЛЕКСНИЙ МЕТОД ДІАГНОСТУВАННЯ ТУРБОГВИНТОВИХ ДВИГУНІВ

НАУ, Аерокосмічний інститут, e-mail: esw@ukr.net

Розглянуто можливість використання мінімальних критеріально-параметричних характеристик комплексного методу діагностування турбогвинтових двигунів.

The possibility of using minimum criteria-parametric characteristics of complex method to diagnose turboprop engines will be considered.

Вступ

На сьогодні потребує дослідження критеріально-параметрична база комплексного методу діагностування турбогвинтових двигунів (ТГД), яка має відповідати не тільки міжнародним стандартам з безпеки польотів, а й слугувати надійним фундаментом для запровадження новітніх технологічних розробок для діагностування ТГД.

Аналіз досліджень і публікацій

Як відомо, діагностичний процес пов'язаний з отриманням і опрацюванням інформації, тим самим потребує економіко-технічних витрат на оснащення технічної бази пристрою (електронне та конструкційне оснащення детекторів, датчиків, передавальних пристроїв тощо), які спрямовані на оптимізацію пошуку й усунення імовірних пошкоджень та відмов ТГД, що дозволить підвищити рівень безпеки польоту [1; 4–6]. Оскільки потреба отримання діагностичної інформації виникає щоразу після використання ТГД і під час самого використання, то постійно вводяться критерії базових важливих параметрів, на основі яких ґрунтуються різні алгоритми діагностичного дослідження [2; 3; 7].

Вирішальну роль у дослідженні відіграє кількість досліджуваних критеріїв; чим більше отримано інформації, тим імовірніше буде оцінка технічного стану ТГД [1; 6]. З економічного погляду для швидкого процесу діагностування потрібно впроваджувати мінімальне поле діагностичного дослідження завдяки вдосконаленню технології діагностування [6].

Постановка завдання

Завдання дослідження можна сформулювати як дослідження можливості використання мінімальних критеріально-параметричних характеристик комплексного методу діагностування ТГД. Такі характеристики мають одночасно від-

повідати сучасним міжнародним стандартам з безпеки польоту та економічній рентабельності використання цього методу і тим самим зосередити виробників діагностичних розробок на виготовлення зручних малогабаритних діагностичних пристроїв для знаходження цих параметрів.

Формування мінімально-критеріальних характеристик умовного пошкодження ТГД

Сучасні діагностичні прилади для ТГД мають аналізувати зміну рівня загальної вібрації двигуна, концентрації продуктів зношення деталей, які омиваються мастилом, накопичення пошкоджень критичних елементів конструкції [2; 3], оцінювати технічний стану елементів проточної частини ТГД.

Діагностичний параметр загальної вібрації двигуна

$$\Delta \bar{K}_g = \frac{K_{g \text{ пот}}}{K_{g 0}} - 1,$$

де $K_{g 0}$ та $K_{g \text{ пот}}$ – відповідно початкове та поточне значення, наприклад, коефіцієнта віброперевантаження.

Аналогічно можна визначити відносний коефіцієнт приросту концентрації металу в мастилі:

$$\Delta \bar{K}_{\text{Fe}} = \frac{K_{\text{Fe пот}}}{K_{\text{Fe 0}}} - 1,$$

де $K_{\text{Fe 0}}$ та $K_{\text{Fe пот}}$ – відповідно початкове та поточне значення концентрації заліза в мастилі.

Величину пошкоджень критичного елемента конструкції подамо у вигляді:

$$\bar{K}_\tau = \frac{t_e}{\tau_e}, \quad (1)$$

де t_e – еквівалентне напрацювання, яке накопичується від польоту до польоту; τ_e – довговічність критичного елемента конструкції при параметрах еквівалентного режиму навантаження. Як еквівалентний режим навантаження рекомен-

дується вибирати злітний режим роботи двигуна в стандартних атмосферних умовах. Якщо реальне напрацювання двигуна подати у вигляді еквівалентного, яке визначається для критичного елемента конструкції, то для кожного значення еквівалентного напрацювання t_e зв'язок параметра \bar{K}_τ з $\Delta\bar{K}_g$ та $\Delta\bar{K}_{Fe}$ може бути апроксимований рівняннями першого порядку:

$$\bar{K}_\tau = \gamma + \beta_1 \Delta\bar{K}_g; \quad (2)$$

$$\bar{K}_\tau = \gamma + \beta_2 \Delta\bar{K}_{Fe}, \quad (3)$$

де γ, β_1 та β_2 – коефіцієнти взаємозв'язку.

З урахуванням виразів (2) та (3) рівняння зв'язку між розглянутими параметрами для заданого τ_e буде мати такий вигляд:

$$\bar{K}_\tau = \gamma + \beta_1 \Delta\bar{K}_g + \beta_2 \Delta\bar{K}_{Fe}. \quad (4)$$

Якщо $\Delta\bar{K}_g = 0$ або $\Delta\bar{K}_{Fe} = 0$, рівняння (4) перетворюється в рівняння (2) або (3). У тому випадку, коли $\Delta\bar{K}_g = 0$ та $\Delta\bar{K}_{Fe} = 0$, $\bar{K}_\tau = \gamma$.

З урахуванням рівняння (1) можна записати

$$\gamma = \frac{1}{\tau_e}. \quad (5)$$

Оскільки рівняння встановлює зв'язок між параметрами $\bar{K}_\tau, \Delta\bar{K}_g$ та $\Delta\bar{K}_{Fe}$ для окремих проміжків часу, встановимо залежність коефіцієнтів від величини еквівалентного напрацювання. Відзначимо, що коефіцієнт пов'язаний з величиною еквівалентного напрацювання рівнянням (5).

Як показує практика, зв'язок коефіцієнтів з величиною еквівалентного напрацювання можна описати таким чином:

$$\beta_1 = \lambda_0 + \lambda_1 t_e; \quad (6)$$

$$\beta_2 = \varphi_0 + \varphi_1 t_e, \quad (7)$$

де $\lambda_0, \lambda_1, \varphi_0, \varphi_1$ – постійні коефіцієнти.

З урахуванням рівнянь (5), (6), та (7) перетворюємо рівняння (4) до вигляду:

$$\begin{aligned} \bar{K}_\tau = & \frac{1}{\tau_e} t_e + (\Delta\bar{K}_g \lambda_0 + \Delta\bar{K}_g \lambda_1 t_e) + \\ & + (\Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_0 + \Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_1 t_e). \end{aligned} \quad (8)$$

Розв'язуючи рівняння (8) відносно t_e , отримаємо

$$t_e = \frac{\bar{K}_\tau - \Delta\bar{K}_g \lambda_0 - \Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_0}{1/\tau_e + \Delta\bar{K}_g \lambda_1 + \Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_1}. \quad (9)$$

Вираз (9) дозволяє оцінити еквівалент напрацювання за одночасної дії двох чи трьох параметрів: $\bar{K}_\tau, \Delta\bar{K}_g$, та $\Delta\bar{K}_{Fe}$.

Використовуючи формулу (9) з урахуванням співвідношення (5), можна подати величину умовного пошкодження двигуна:

$$\begin{aligned} \gamma(\bar{K}_\tau, \Delta\bar{K}_g, \Delta\bar{K}_{Fe}) = & \\ = & \frac{\bar{K}_\tau - \Delta\bar{K}_g \lambda_0 - \Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_0}{1 + \tau_e (\Delta\bar{K}_g \lambda_1 + \Delta\bar{K}_{Fe} \varphi_1)}. \end{aligned}$$

Розглянутий підхід до оцінки умовного пошкодження справедливий для багатократно повторюваної відповідної реалізації програми роботи двигуна та відповідної програми навантаження його основних вузлів і деталей.

У цьому зв'язку постійні коефіцієнти, які входять в розрахункову формулу, можуть бути застосовані лише для конкретної реалізації програмної роботи. Якщо реалізації відрізняється від одного польоту до іншого, то й постійні коефіцієнти будуть відрізнятися.

Це потребує установлення функціональних залежностей між постійними коефіцієнтами та параметрами, які характеризують реалізацію програми роботи двигуна.

За такі параметри цілеспрямовано беруть швидкість накопичення пошкоджень прийнятого критичного елемента $d\Pi_j / t_{nj}$ під час j -ї реалізації польоту t_{nj} , а також швидкості зміни відносних приростів характеристик вібрацій $(\Delta\bar{K}_g)_j / t_{nj}$ та концентрації металу в мастилi

$$(\Delta\bar{K}_{Fe})_j / t_{nj}.$$

Результати експериментів з їх кореляційно-регресивним аналізом дозволяють встановити статистичні залежності для постійних коефіцієнтів:

$$\lambda_0 = A_0 + \frac{1}{t_{nj}} (A_1 d\Pi_j + A_2 \Delta\bar{K}_g j + A_3 \Delta\bar{K}_{Fe j});$$

$$\lambda_1 = B_0 + \frac{1}{t_{nj}} (B_1 d\Pi_j + B_2 \Delta\bar{K}_g j + B_3 \Delta\bar{K}_{Fe j});$$

$$\varphi_0 = N_0 + \frac{1}{t_{nj}} (N_1 d\Pi_j + N_2 \Delta\bar{K}_g j + N_3 \Delta\bar{K}_{Fe j});$$

$$\varphi_1 = M_0 + \frac{1}{t_{nj}} (M_1 d\Pi_j + M_2 \Delta\bar{K}_g j + M_3 \Delta\bar{K}_{Fe j}),$$

де $A_0, \dots, A_3; B_0, \dots, B_3; N_0, \dots, N_3; M_0, \dots, M_3$ – постійні коефіцієнти рівнянь ліній регресії.

Таким чином, визначаючи коефіцієнти $\lambda_0, \lambda_1, \varphi_0, \varphi_1$, можна оцінити умовне пошкодження двигуна для різних реалізацій програм його роботи.

Урахування технічного стану проточної частини ТГД

Для проведення повної діагностики роботи двигуна необхідно враховувати оцінку технічного стану елементів проточної частини ТГД за реєстрованими параметрами [3].

Як відомо, термодинамічна досконалість проточної частини ТГД має визначатися еквівалентним ефективним коефіцієнтом корисної дії (ККД), у цьому випадку – відношенням вихідної потужності двигуна до підведеної енергії.

Гвинтову потужність визначаємо за формулою

$$N_B = knP_{\text{ВОМ}},$$

де k – коефіцієнт, який враховує геометричні характеристики обертального моменту; n – частота обертання ротора, об/хв; $P_{\text{ВОМ}}$ – тиск мастила в системі ВОМ, МПа.

Звідси як основний діагностичний критерій для оцінки технічного стану проточної ТГД використовують співвідношення

$$K_{G_T} = \frac{P_{\text{ВОМ}}}{G_T} \cdot 10^3.$$

Цей критерій визначає гвинтовий ККД, зміни якого відображають усі зношені та випадкові пошкодження елементів проточної частини двигуна. Тому, якщо на реєструвальному датчику задати процес постійного визначення такого критерію, то можна прогнозувати роботу двигуна і завчасно усувати можливі технічні пошкодження частин ТГД як на землі, так і в повітрі попередженням екіпажу літака про ймовірне пошкодження і автоматично-ручним увімкненням додаткових силових установок, які мають компенсувати роботу пошкодженого двигуна, відвести від нього живлення, вимкнути у разі потреби протипожежну систему, встановлену на борту літака.

Висновки

Використання комплексного методу діагностування з урахуванням трьох діагностичних параметрів дозволяє отримати оцінки залишкової довговічності ТГД – запасу довговічності. Комплексний метод може використовуватись у широкому діапазоні зміни параметрів програм роботи ТГД і бути корисним для оцінювання технічного стану ТГД в експлуатаційних умовах.

Література

1. *Синтез систем управления и диагностирования газотурбинных двигателей* // С. В. Епифанов, Б. И. Кузнецов, И. Н. Богаенко и др. – К.: Техніка, 1998. – 312 с.
2. *Янко А. К.* Определение остаточного ресурса ГТД на основе анализа измерения запасов прочности наиболее нагруженных элементов. – В кн.: Промышленная теплотехника. – К.: Наук. думка, 1980. – №4. – С. 231–240.
3. *Карпов Е. Н., Дягилев В. А., Лаврухин С. Н.* Оценка технического состояния элементов проточной части ТВД по регистрируемым параметрам // Эксплуатационная надежность авиационных газотурбинных двигателей: Межвуз. сб. науч. тр. – К.: КИИГА, 1981. – С. 42–49.
4. *Система диагностирования технического состояния авиационных ГТД с применением нейронного подхода* / А. М. Пашаев, Д. Д. Асперов, Р. А. Садыхов, П. Ш. Абдуллаев // Авиационно-космическая техника и технология. – X 2005. – №3. – С. 33–42.
5. *Концепция разработки систем эксплуатационного мониторинга выработки ресурсов авиационных ГТД* / А. В. Олейник // Авиационно-космическая техника и технология. – X. 2005. – №10. – С. 37–41.
6. *Епифанов С. В., Симбирский Д. Ф., Каплун С. Н.* Оптимальный выбор измеряемых параметров при идентификации ГТД: В 3 ч. // Изв. вузов. Авиационная техника. – 1989. – №4. – С. 39–44; 1990. – №1. – С. 57–62; 1990. – №2. – С. 72–76.
7. *Использование компьютерного моделирования для учета технологической наследственности при установлении ресурсов авиационных ГТД* / А. В. Шереметьев, А. В. Петров // Авиационно-космическая техника и технология. – X 2005. – №4. – С. 50–53.

Стаття надійшла до редакції 23.11.06.