

УДК 629.7.001.25(045)

М.С. КУЛИК, О.А. ТАМАРГАЗІН, І.І. ЛІННІК

Національний авіаційний університет, Київ, Україна

ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ АВІАЦІЙНОГО ДВИГУНА В АВАРІЙНІЙ СИТУАЦІЇ

Велика кількість об'єктів керування математично описуються системами диференціальних рівнянь невисокого порядку і представляються відповідними наборами взаємозалежних лінійних і нелінійних динамічних ланок. Це задовольняє тим методам діагностування, які призначені визначати динамічну характеристику об'єкта і для яких носієм інформації є сигнал, що містить реакцію на внутрішню перешкоду. Такий підхід розглянуто у статті для розробки метода розрахунку динамічного стану авіаційного двигуна під час позаштатних ситуацій. Застосування розробленого методу дозволяє спрогнозувати технічний стан авіаційного газотурбінного двигуна при обриві лопаток компресора чи потраплянні сторонніх предметів у проточну частину двигуна зі злітної смуги.

авіаційний двигун, ушкодження, технічний стан, надійність

Вступ

Однією з характерних рис проблеми надійності є її комплексність, багатоплановість. Не можна, наприклад, забезпечити високу надійність авіаційних двигунів (АД) тільки розробкою вдалої її конструкції або тільки за рахунок високого рівня технології її виробництва [1]. Для того щоб промисловість випускала високонадійну продукцію, необхідно одночасне виконання цілої низки умов.

1. Формулювання проблеми

Аварійні ситуації, що відбуваються під час експлуатації АД роблять проблему прогнозування їхніх можливих наслідків надзвичайно актуальною. Найчастіше такі задачі зводяться до задач динамічної контактної взаємодії тіла з перешкодою. Існуючі моделі, побудовані на теорії механічного удару, досить складні в математичному плані і не завжди дозволяють врахувати весь набір параметрів, які цікавлять дослідника. Зазвичай ударні процеси досліджуються експериментально і, отже, є набір даних, який характеризує процес, на основі якого можливе формування розрахункових моделей, побудованих за допомогою теорії подоби і розмірностей.

Розглянемо АД як деяку систему, що перебуває в полі зовнішніх впливів. Фактори впливу позначимо

через f_i . Зазвичай є кілька класів систем, що відрізняються технічними характеристиками, тому введемо параметр p_j , що буде відображати властиві системі внутрішні особливості, які визначають відмінність конкретної системи від подібних їй систем. У нашому розпорядженні є набори: зовнішніх факторів (ЗФ) f_i , $i = \overline{1, n}$; параметрів p_j , $j = \overline{1, m}$; відгуків r_k , $k = \overline{1, l}$, які математично можуть бути зв'язані деякою функціональною залежністю:

$$\Phi(f_1, \dots, f_n, p_1, \dots, p_m, r_1, \dots, r_l) = 0.$$

На підставі теорії подоби і розмірностей, розмірності будь-яких механічних величин, виражаються у вигляді добутку розмірностей основних величин (кілограм – M , метр – L , секунда – T):

$$[A] = M^\alpha L^\beta T^\gamma.$$

Це дозволяє представити функціональну залежність не у вигляді залежності від конкретних параметрів, що характеризують вищезгадані набори, а у вигляді залежності від безрозмірних симплексів і комплексів:

$$\Pi(\pi_1, \dots, \pi_s) = 0.$$

2. Рішення проблеми

Тому що розглядається задача про контактну взаємодію АД із твердою перешкодою, тому вибе-

ремо наступні параметри: у якості ЗФ – швидкість V і кут α зустрічі з перешкодою; як параметри виро- бів – довжину l , діаметр d і масу m АД, а також час- тоту першого тону власних коливань конструкції v і координату виміру відгуку x ; як відгук системи – віброударне прискорення a .

Тому що в досліджуемій задачі розглядається ві- сьм факторів, тому кожна π -змінна може бути пред- ставлена як їхній добуток, у якому кожний спів- множник буде зводитися в певний ступіні:

$$\pi = \prod_{i=1}^n f_i^{z_i} \times \prod_{j=n+1}^{n+m} p_j^{z_j} \times \prod_{k=n+m+1}^{n+m+l} r_k^{z_k}.$$

Підставивши конкретні значення n , m і l у цю фо- рмулу отримаємо:

$$\pi = \prod_{i=1}^2 f_i^{z_i} \times \prod_{j=3}^7 p_j^{z_j} \times \prod_{k=8}^8 r_k^{z_k}.$$

Замінивши співмножники на їхні розмірності одержимо:

$$\prod_{q=1}^8 \left[M^{\alpha_q} L^{\beta_q} T^{\gamma_q} \right]^{z_q} = M^0 L^0 T^0,$$

де $\alpha_q, \beta_q, \gamma_q$ – відомі числа.

Для дотримання цієї рівності ступінь z_q вибира- ють таким чином, щоб одночасно виконувалися співвідношення:

$$\sum_{q=1}^8 \alpha_q z_q = 0, \quad \sum_{q=1}^8 \beta_q z_q = 0, \quad \sum_{q=1}^8 \gamma_q z_q = 0.$$

При цьому очевидно, що кількість рівнянь дорів- нює кількості повторюваних змінних, а кількість невідомих – кількість істотних факторів.

У розглядаємому випадку:

$$V_8^{z_1} m^{z_2} l^{z_3} d^{z_4} v^{z_5} x^{z_6} a^{z_7} = 1;$$

$$\begin{aligned} & \left[M^0 L^1 T^{-1} \right]^{z_1} \times \left[M^1 L^0 T^0 \right]^{z_2} \times \left[M^0 L^1 T^0 \right]^{z_3} \times \\ & \times \left[M^0 L^1 T^0 \right]^{z_4} \times \left[M^0 L^0 T^{-1} \right]^{z_5} \times \left[M^0 L^1 T^0 \right]^{z_6} \times \\ & \times \left[M^0 L^1 T^{-2} \right]^{z_7} = M^0 L^0 T^0. \end{aligned}$$

Для того, щоб остання комбінація була безрозмі- рною, повинні одночасно задовольнятися рівняння: для розмірності M

$$0 + z_2 + 0 + 0 + 0 + 0 + 0 = 0;$$

для розмірності L

$$z_1 + 0 + z_3 + z_4 + 0 + z_6 + z_7 = 0;$$

для розмірності T

$$-z_1 + 0 + 0 + 0 - z_5 + 0 - 2z_7 = 0;$$

Тому що ранг матриці менше кількості невідо- мих, то система має рішення, відмінне від нульово- го. Так як $z_2 = 0$, тому досить розглянути систему:

$$\begin{cases} z_1 + z_3 + z_4 + z_6 + z_7 = 0; \\ -z_1 - z_5 - 2z_7 = 0. \end{cases}$$

Ця система буде мати фундаментальну систему рішень, яка складається із чотирьох рішень. Загаль- не рішенням системи має вигляд

$$\begin{cases} z_3 = -z_1 - z_4 - z_6 - z_7; \\ z_5 = -z_1 - 2z_7. \end{cases}$$

Сформуємо чотири π -змінних:

$$\pi_1 = V_8^0 m^0 l^{-1} d^0 v^{-2} x^0 a^1 = l^{-1} v^{-2} a^1;$$

$$\pi_2 = V_8^0 m^0 l^{-1} d^0 v^0 x^1 a^0 = l^{-1} x^1;$$

$$\pi_3 = V_8^0 m^0 l^{-1} d^1 v^0 x^0 a^0 = l^{-1} d^1;$$

$$\pi_4 = V_8^1 m^0 l^{-1} d^0 v^{-1} x^0 a^0 = V_8^1 l^{-1} v^{-1}.$$

Тоді:

$$\prod \left(l^{-1} v^{-2} a^1, (V \sin \delta)^1 l^{-1} v^{-1}, l^{-1} d^1, l^{-1} x \right) = 0.$$

Експериментальні дослідження процесів динаміч- ної контактної взаємодії дозволяють визначити рівень віброприсокрень у різних зонах досліджуваного об'єк- та. Тому останнє рівняння доцільно розв'язати щодо тієї π -змінної, яка містить зазначений параметр:

$$a = K \cdot (v \cdot V \sin \delta) \cdot \left(\frac{d}{l} \right) \cdot \left(\frac{x}{l} \right),$$

що скорочено можна записати як

$$a = K \cdot \pi_I \cdot \pi_{II},$$

де

$$\pi_I = v \cdot V \sin \delta \cdot d/l;$$

$$\pi_{II} = x/l.$$

Природно припустити, що отримані π -змінні є незалежними:

$$a = K \cdot a(\pi_I) \cdot a(\pi_{II}).$$

Отримана залежність, дозволяє прогнозувати рі- вень перевантажень у тій або іншій області АД при

заданих зовнішніх впливах. Складність застосування отриманої залежності полягає у визначенні значення коефіцієнта, що погодить, K і конкретної залежності для співмножників $a(\pi_I)$ і $a(\pi_{II})$.

Кожному значенню π -змінної відповідає тричотири значення відгуку. Модель регресійного аналізу припускає, що отримані в результаті серії експериментів значення відгуків a_{cp} можна розділити на дві частини: одна з них закономірно залежить від π , тобто визначається функціональною залежністю $a(\pi)$, інша частина – випадкова стосовно π і цю частину можна позначити через ε , причому ці величини є векторами. Модель може бути записана як:

$$a_{cp,i} = a_{cp}(\pi_i) + \varepsilon_i, \quad i = \overline{1, n}.$$

При виборі функції відгуку $a_{cp}(\pi)$ сама функція належить параметричному сімейству функцій $a_{cp}(\pi, \theta)$, де θ – параметр сімейства, що є, у загальному випадку, вектором. Зазначена функція може бути представлена як сума добутоків модельних функцій $\phi_j(\pi)$ і елементів вектора θ_j :

$$a_{cp,i}(\pi_i) \approx \sum_{j=1}^m \theta_j \phi_j(\pi_i), \quad i = \overline{1, n},$$

де i – порядковий номер пари "відгук-фактор"; n – кількість таких пар, наявних у нашому розпорядженні; j – порядковий номер модельної функції; m – кількість функцій, що беруть участь у формуванні моделі.

При виборі методів визначення параметрів регресійної моделі можна керуватися різними підходами. Один з найпоширеніших підходів полягає в тому, що при «правильному» виборі параметрів моделі компоненти вектора $[\theta]$ повинні бути підібрані таким чином, щоб вектор нев'язок прагнув до нуля на сукупності відомих точок:

$$a_{cp,i}(\pi_i) - (\theta_1 \pi_i^2 + \theta_2 \pi_i + \theta_3) \rightarrow 0, \quad i = \overline{1, n}.$$

Як міра прагнення до нуля нев'язок можна приймати різні співвідношення, наприклад, суму квадратів:

$$\sum_{i=1}^n [a_{cp,i} - \tilde{\theta}_1 \pi_i^2 - \tilde{\theta}_2 \pi_i - \tilde{\theta}_3]^2 \rightarrow \min_{\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3}.$$

Тоді

$$F(\tilde{\theta}_1, \tilde{\theta}_2, \tilde{\theta}_3) = \sum_{i=1}^n [a_{cp,i} - \tilde{\theta}_1 \pi_i^2 - \tilde{\theta}_2 \pi_i - \tilde{\theta}_3]^2.$$

Використовуючи необхідні умови екстремуму функції декількох змінних, одержуємо нормальну систему для визначення оцінок коефіцієнтів моделі:

$$\left. \begin{aligned} \tilde{\theta}_1 \sum_{i=1}^n \pi_i^4 + \tilde{\theta}_2 \sum_{i=1}^n \pi_i^3 + \tilde{\theta}_3 \sum_{i=1}^n \pi_i^2 &= \sum_{i=1}^n a_{cp,i} \pi_i^2; \\ \tilde{\theta}_1 \sum_{i=1}^n \pi_i^3 + \tilde{\theta}_2 \sum_{i=1}^n \pi_i^2 + \tilde{\theta}_3 \sum_{i=1}^n \pi_i &= \sum_{i=1}^n a_{cp,i} \pi_i; \\ \tilde{\theta}_1 \sum_{i=1}^n \pi_i^2 + \tilde{\theta}_2 \sum_{i=1}^n \pi_i + \tilde{\theta}_3 n &= \sum_{i=1}^n a_{cp,i}. \end{aligned} \right\}$$

Рішення цієї системи дає остаточні формули для визначення оцінок параметрів моделі.

Висновок

Розглянутий підхід до дослідження фізичних причин і картини виникнення і розвитку відмов у результаті потрапляння в проточну частину сторонніх предметів може бути використаний для прогнозування погіршення характеристик проточної частини двигуна в експлуатації. Зокрема, розглянутий підхід може бути також використаний для створення моделей абразивного та ерозійно-корозійного зношування елементів проточної частини авіаційних газотурбінних двигунів, що дозволить зменшити витрати на експериментальне доведення двигунів.

Литература

- Кулик Н.С., Тамаргазин А.А. Перспективные направления диагностирования авиационных двигателей // Авиационно-космична техніка і технології: Зб. наук. праць. – Х.: ХАІ, 2001. – Вип. 23. Теплові двигуни та енергоустановки. – С. 163-166.

Надійшла до редакції 23.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А.Г. Кучер, Національний авіаційний університет, Київ.