

УДК 621.183:621.313-752

О.Г. Приймаков, Ю.О. Градиський

## МЕТОДИКА ОБРОБКИ РЕЗУЛЬТАТІВ ДІАГНОСТИЧНИХ ВИПРОБУВАНЬ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ

*Розроблена й описана методика обробки результатів діагностичних випробувань дизелів авіаційної наземної техніки. Проаналізовано хід виконання діагностичних випробувань технічного стану дизелів та двигунів внутрішнього згорання методом лінійного прогнозування.*

### Вступ

У процесі експлуатації дизелів авіаційної наземної техніки (АНТ) зміну технічного стану їх агрегатів, складальних одиниць та механізмів необхідно прогнозувати. На практиці експлуатації дизельних двигунів АНТ питання прогнозування технічного стану розроблені в недостатньо повній мірі. Це пов'язано з рядом причин, головними з яких є:

відсутність універсального методичного підходу до розв'язання задач прогнозування технічного стану;

недостатній ступінь розробки методів прогнозування та технічних засобів реалізації цих методів;

відсутність конкретних рекомендацій з використання вже розробленої апаратури, призначеної для прогнозування технічного стану інших машин.

Одним з найважливіших завдань при прогнозуванні технічного стану є вибір методу прогнозування: способу теоретичної та практичної дії, направленої на розробку прогнозів. На теперішній час нараховується приблизно 200 методів науково-технічного прогнозування [1 – 6] різних за точністю. Проаналізуємо основні з них, які відображають стан різного роду технічних приладів:

експертні методи, які базуються на евристичному підході до аналізу об'єкта прогнозування (ґрунтуються на використанні думок експертів та спеціалістів);

фактографічні методи, які базуються на фактичному інформаційному матеріалі про об'єкт прогнозування та його минулий розвиток;

комбіновані методи, які використовують фактографічну та експертну інформацію (пропонують розробку математичного та евристичного прогнозів незалежно один від другого, після чого проводиться порівняння та аналіз результатів, виходячи з яких приймаються остаточні рішення);

методи аналогій ґрунтуються на прогнозуванні стану приладу за інформацією, яка зібрана з прила-

дів-аналогів. Ці методи застосовуються при прогнозуванні стану виробів на стадії їх розробки;

статистичні методи, які об'єднують сукупність методів обробки кількісної інформації про об'єкт прогнозування за принципом виявлення розміщених у ній математичних закономірностей розвитку та математичних взаємозв'язків характеристик з метою отримання прогнозуючих моделей.

Для прогнозування технічного стану дизелів АНТ перевагу слід віддати статистичним методам. Для обробки результатів випробувань зручно використовувати методи екстраполяції тенденцій [1]. Відповідно до основ загальної теорії прогнозування [1] контроль технічного стану необхідно проводити з певною періодичністю. Прогнозування буде здійснюватися за результатами діагностування та зводиться до:

визначення допустимих змін діагностичних параметрів, контролюючих загальний стан агрегатів;

визначення залишкового ресурсу агрегату в цілому за результатами зміни інтенсивності діагностичних параметрів.

На початкових етапах експлуатації дизеля АНТ можна для обробки використовувати метод лінійного прогнозування [2, 3]. Сутність його полягає в тому, що умови екстраполяції приймаються незмінними, а залежність зміни параметрів від часу роботи – лінійною. Враховуючи ці припущення для одержання прогнозу достатньо знати лише величини напрацювання з початку експлуатації  $T_n$ , граничне  $P_r$ , номінальне  $P_n$  та фактичне  $P_i$  значення параметрів. Прогнозований час залишкового ресурсу можна виразити формулою

$$T_{\text{зап}} = T_n \frac{R_{\text{зап}}}{R_{\text{ісп}}}, \quad (1)$$

де  $R_{\text{зап}} = \frac{P_r - P_i}{P_r - P_n}$  – коефіцієнт залишкового ресурсу;

$$R_{\text{ісп}} = \frac{\Pi_{\text{і}} - \Pi_{\text{н}}}{\Pi_{\text{г}} - \Pi_{\text{н}}} - \text{коефіцієнт використаного ресурсу.}$$

сурсу.

Однак зі збільшенням  $T_{\text{н}}$  достовірність одержаних результатів знижується, у зв'язку з цим необхідно в загальному випадку використовувати метод середньостатистичного прогнозування.

У результаті взаємодії різних факторів закономірність зміни діагностичних параметрів однотипних дизелів АНТ буде мати різний характер. Однак при великій кількості дизелів АНТ одного типу зона зміни параметрів буде явно виражена. Обробивши експериментальні дані методом найменших квадратів, легко отримати математичний вираз залежності контролюючого параметра  $\Pi(t)$ , яка найчастіше зустрічається в даних умовах роботи. Незалежно від того, як розміщена на графіку крива даного реально об'єкта, її визначають за формулою

$$\Delta\Pi = at^{\alpha}, \quad (2)$$

де  $\Delta\Pi$  – зміни параметра;

$t$  – термін напрацювання;

$a$  – коефіцієнт, який характеризує швидкість зміни параметра;

$\alpha$  – постійний показник, який належить даному виду параметра.

Показник  $\alpha$  при цьому не змінюється, а коефіцієнт  $a$  визначає масштаб залежності або швидкості зміни параметра тільки для даного типу дизель-генератора.

При прогнозуванні за середньостатистичними даними визначають імовірність того, що за час  $t_{\text{м}}$  даний параметр не вийде за допущені межі, тобто не настане відмова даного вузла або деталі. Величина  $t_{\text{м}}$  являє собою періодичність технічного обслуговування або ремонту.

Між кількістю випробувань, на момент проведення яких гарантується відсутність відмови, та допустимими значеннями параметра існує така залежність:

$$n = \frac{1}{1 - \alpha \sqrt[n]{\frac{\Pi_{\text{д}}}{\Pi_{\text{г}}}}}, \quad (3)$$

де  $\Pi_{\text{д}}$  – допустиме значення параметра;

$n$  – кількість перевірок.

При визначенні  $n$  отримане значення округляють до цілого числа. З (3) випливає, що найменша ймовірність відмови очікується при  $n = 2$ . При цьому допустима величина параметра

$$\Pi_{\text{д}} = 0,5^{\alpha} \Pi_{\text{г}}. \quad (4)$$

Виходячи з (3), (4) та враховуючи задану періодичність  $t_{\text{м}}$ , можна визначити максимально можливий ресурс дизеля АНТ

$$t_{\text{р}} = \alpha \sqrt[n]{\frac{\Pi_{\text{г}}}{\Pi_{\text{д}}}} (n-1)t_{\text{м}}. \quad (5)$$

Коефіцієнти  $\alpha$  для різних параметрів дизеля наведені в табл. 1.

Таблиця 1

**Коефіцієнти  $\alpha$  для різних параметрів дизеля**

Ступінь прориву газів у картер	1,3
Витрата мастила на угар	2,0
Потужність	0,8
Зазор між клапаном та коромислом	1,1
Зазор в кривошипно-шатунному механізмі	1,4
Зазори в підшипниках кочення	1,5

Залежність між коефіцієнтом залишкового ресурсу  $R_{\text{зал}}$  та часом роботи набуває вигляду:

$$R_{\text{зал}} = 1 - at^{\alpha}; \quad R_{\text{ісп}} = at^{\alpha}. \quad (6)$$

Використовуючи значення  $\alpha$ , можна легко визначити величину коефіцієнта  $a$ :

$$a = \frac{1}{t_{\text{г}}^{\alpha}}, \quad (7)$$

де  $t_{\text{г}}$  – граничне напрацювання до моменту  $R_{\text{ісп}} = 1$ .

Розглянутий метод дає хороші результати при наявності статистичних даних при 200...500 досліджень аналогічних дизелів. Якщо таких даних немає, то можна здійснити обробку результатів, використовуючи спосіб прогнозування за результатами двох діагностувань.

Для його застосування необхідно знати такі дані: напрацювання  $T_1$  до першого діагностування;

напрацювання  $T_2$  до другого діагностування;

коефіцієнти використаного ресурсу  $R_{\text{ісп1}}$  та  $R_{\text{ісп2}}$ .

Для одержання необхідних при прогнозуванні залежностей запишемо систему рівнянь:

$$R_{\text{ісп1}} = aT_1^{\alpha}; \quad R_{\text{ісп2}} = aT_2^{\alpha}. \quad (8)$$

Після простих перетворень одержимо такі рівності

$$\ln \frac{R_{\text{ісп1}}}{R_{\text{ісп2}}} = \alpha \ln \frac{T_1}{T_2}; \quad (9)$$

$$\alpha = \frac{\ln \frac{R_{\text{зап1}}}{R_{\text{зап2}}}}{\ln \frac{T_1}{T_2}}. \quad (10)$$

За допомогою (10) можна визначити дійсне значення показника ступеня  $\alpha$  для даного типу дизелів АНТ. Визначаючи  $a$  з (8), одержимо

$$a = \frac{R_{\text{зап1}}}{T_1^\alpha} = \frac{R_{\text{зап2}}}{T_2^\alpha}. \quad (11)$$

Час напрацювання за умови  $R_{\text{зап}} = 1$  буде дорівнювати

$$T_{\text{гр}} = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/\alpha}. \quad (12)$$

Таким чином, залишковий ресурс може бути знайдений з умови

$$T_{\text{зап}} = T_{\text{гр}} - T_2 = \left(\frac{1}{a}\right)^{1/\alpha} - T_2. \quad (13)$$

Прогнозування технічного стану дизеля АНТ методом реалізації закономірностей зміни діагностичних параметрів з використанням степеневі функції [2] забезпечують визначення залишкового ресурсу з більшою достовірністю, ніж лінійне та середньостатистичне прогнозування. Це можна пояснити тим, що апроксимація реальної залежності степеневі функції більш точно враховує закон зміни діагностичних параметрів у часі. Отже, завдання прогнозування залишкового ресурсу дизелів АНТ зводиться до виявлення закономірності зміни діагностичного параметра по мірі вироблення ресурсу та моменту досягнення граничного значення цього параметра.

Залежність зміни нерівномірності обертання вала двигуна від структурних параметрів установлена в [3]. Структурні параметри можна представити у вигляді функцій, які залежать від напрацювання, а саме:

$$\begin{aligned} p_k &= f_1(t); \quad p_c = f_2(t); \\ p_z &= f_3(t); \quad \theta_{\text{впр}} = f_4(t); \\ g &= f_5(t); \quad T = f_6(t). \end{aligned} \quad (14)$$

У загальному випадку зв'язок між нерівномірністю обертання вала двигуна та структурними параметрами може бути представлений у вигляді

$$\delta = F [f_1(t), f_2(t), f_3(t), f_4(t), f_5(t), f_6(t)]. \quad (15)$$

Таким чином, величина  $\delta$  є функцією часу. Спе-

цифічною особливістю дизелів АНТ є те, що час їх роботи значно менше часу його знаходження в резерві.

Технічне обслуговування дизелів проводиться на основі нормативних документів [2], частота обслуговування визначається часом напрацювання. Однак з переходом на технічне обслуговування за фактичним технічним станом дизеля необхідно відповісти на наступні питання:

з якою точністю необхідно прогнозувати технічний стан дизеля;

як часто необхідно проводити діагностування з метою проведення прогнозування з заданою точністю.

Для відповіді на ці питання розглянемо характер зміни величини нерівномірності обертання колінчастого вала в процесі експлуатації дизеля.

Знайдемо тренд зміни технічного стану дизеля за допомогою інтерполяційної формули Лагранжа [3]. Функція зміни  $\delta$  задана даними проведених діагностувань у моменти часу проведення діагностування  $t_0, t_1, \dots, t_n$

$$\delta_0 = f(t_0); \quad \delta_1 = f(t_1), \dots, \delta_n = f(t_n). \quad (16)$$

Значення тренда будуть співпадати зі значенням функції в цих точках

$$L(t_0) = \delta_0; \quad L(t_1) = \delta_1, \dots, L(t_n) = \delta_n. \quad (17)$$

Скористаємося рекомендаціями, викладеними в [4], з вибору функції, яка описує тренд, та представимо  $L(t)$  у вигляді

$$L(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + \dots + a_n t^n, \quad (18)$$

де  $a_0, a_1, \dots, a_n$  – невідомі постійні коефіцієнти, які необхідно знайти.

Відповідно до (18) представимо функцію тренда у вигляді інтерполяційного многочлена Лагранжа

$$L_n(t) =$$

$$\sum_{i=0}^n \delta_i \frac{(t-t_0)\dots(t-t_{i-1})(t-t_{i+1})\dots(t-t_n)}{(t_i-t_0)\dots(t_i-t_{i-1})(t_i-t_{i+1})\dots(t_i-t_n)}. \quad (19)$$

При визначені точності прогнозування необхідно знати ступінь наближення многочлена Лагранжа в точках, які відрізняються від вузлів інтерполяції. Представимо похибку в вигляді функції

$$R_n(t) = F(t) - L_n(t) \quad (20)$$

та введемо допоміжну функцію

$$\varphi(t) = R_n(t) - k \Pi_{n+1}(t), \quad (21)$$

де  $\Pi_{n+1}(t) = (t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_n)$  – многочлен, який дорівнює 0 в точках  $t_0, t_1, \dots, t_n$ .

Функція  $\varphi(t)$  має  $(n + 1)$  коренів. Підберемо коефіцієнт  $k$  таким чином, щоб функція  $\varphi(t)$  мала ще один корінь у будь-якій фіксованій точці  $t' \in [a, b]$ , але відмінній від вузлів інтерполяції. При цьому  $\Pi_{n+1}(t') \neq 0$ , оскільки точка  $t'$  не є вузлом інтерполяції. Точка  $t'$  вибрана так, що  $\varphi(t) = 0$ , тобто

$$R_n(t) - k(t' - t_0)(t' - t_1) \dots (t' - t_n) = 0. \quad (22)$$

Визначимо величину  $k$  з (22)

$$k = \frac{F(t') - L_n(t')}{(t' - t_0)(t' - t_1) \dots (t' - t_n)}. \quad (23)$$

Для визначення чисельного значення коефіцієнта  $k$  продиференціюємо функцію (21)  $(n + 1)$  разів. Похідна  $(n + 1)$  порядку функції (21) має хоча б один корінь, тоді

$$\varphi^{(n+1)}(\xi) = 0. \quad (24)$$

Величина  $k$  визначається наступним чином

$$k = \frac{F^{(n+1)}(\xi)}{(n + 1)!}. \quad (25)$$

Точки  $\xi$  та  $t' \in [a, b]$ . Оскільки точка  $t'$  – вільна точка, можна записати

$$\begin{aligned} R_n(t) &= F(t) - L_n(t) = \\ &= \frac{F^{(n+1)}(\xi)}{(n + 1)!} (t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_n). \end{aligned} \quad (26)$$

Позначимо  $M_{n+1} = \max_{t \in [a, b]} |F^{(n+1)}(t)|$ , тоді оцінка похибки інтерполяційного многочлена

$$|R_n(t)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n + 1)!} |(t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_n)|. \quad (27)$$

Раніше була визначена точність вимірювання ступеня нерівномірності обертання вала двигуна, яка повинна бути не нижче 6 %. Очевидно, що при прогнозуванні технічного стану дизелів АНГ екстраполіруванням тренда вимірних значень ступеня нерівномірності обертання вала двигуна похибка  $R_n(t)$  також повинна бути не більше 6 %.

У нашому випадку функція зміни  $\delta$  задана умовами (16). Таким чином, виникає задача зворотного екстраполірування, тобто за заданим значенням  $\delta$  з урахуванням похибки необхідно знайти відповідне значення аргументу функції  $t$ . Значення  $t$  і є часом, на протязі якого ступінь нерівномірності обертання

вала двигуна  $\delta$  не вийде за допустимі межі, тобто дизель буде знаходитись в технічно справному стані.

Для визначення часу  $t$  прийнемо  $\delta$  за незалежну змінну, а  $t$  будемо вважати функцією:

$$\begin{aligned} t &= t_0 + \frac{(\delta - \delta_1)(\delta - \delta_2) \dots (\delta - \delta_n)}{(\delta_0 - \delta_1)(\delta_0 - \delta_2) \dots (\delta_0 - \delta_n)} + \\ &+ t_1 \frac{(\delta - \delta_0)(\delta - \delta_2) \dots (\delta - \delta_n)}{(\delta_1 - \delta_0)(\delta_1 - \delta_2) \dots (\delta_1 - \delta_n)} + \\ &+ t_n \frac{(\delta - \delta_0)(\delta - \delta_1) \dots (\delta - \delta_{n-1})}{(\delta_n - \delta_0)(\delta_n - \delta_1) \dots (\delta_n - \delta_{n-1})}. \end{aligned} \quad (28)$$

Записуючи в скороченому вигляді, одержимо

$$\begin{aligned} t &= \\ &= \sum_{i=0}^n t_i \left( \frac{(\delta - \delta_0)(\delta - \delta_1) \dots (\delta - \delta_{i-1})(\delta - \delta_{i+1}) \dots (\delta - \delta_n)}{(\delta_i - \delta_0)(\delta_i - \delta_1) \dots (\delta_i - \delta_{i-1})(\delta_i - \delta_{i+1}) \dots (\delta_i - \delta_n)} \right) \times \\ &\times \left( \frac{(\delta_i - \delta_0)(\delta_i - \delta_1) \dots (\delta_i - \delta_{i-1})(\delta_i - \delta_{i+1}) \dots (\delta_i - \delta_n)}{(\delta_i - \delta_0)(\delta_i - \delta_1) \dots (\delta_i - \delta_{i-1})(\delta_i - \delta_{i+1}) \dots (\delta_i - \delta_n)} \right)^{-1}. \end{aligned} \quad (29)$$

Раніше нами була одержана оцінка похибки інтерполяційного многочлена (19)

$$|R_n(t)| \leq \frac{M_{n+1}}{(n + 1)!} |\Pi_{n+1}(t)|, \quad (30)$$

де  $M_{n+1}$  залежить від властивостей функції;

$\Pi_{n+1}(t) = (t - t_0)(t - t_1) \dots (t - t_n)$  визначається лише вибором вузлів інтерполяції  $t_i$ .

Нормативними документами [2] визначені терміни технічного обслуговування дизелів. Перше технічне обслуговування проводиться після напрацювання дизель-генератором 250...270 годин.

Проведемо заміну змінної  $\ell = \cos \theta$ . Функція  $F(t)$  стає тепер функцією кута  $\theta$ . Оскільки  $-1 \leq \ell \leq 1$ , можна вважати, що кут  $\theta$  змінюється від 0 до  $\pi$ .

Вузли інтерполяції вибирають наступним чином. Задамо значення функції в точках

$$\theta = m \frac{\pi}{n}, \quad (31)$$

де  $m = 0, 1, 2, \dots, n$ .

З (31) видно, що для шуканої змінної  $\ell$  ці точки повинні розташовуватися за законом

$$\ell_m = \cos \left( m \frac{\pi}{n} \right). \quad (32)$$

При аналізі (32) легко бачимо, що вузли інтерполяції розташовуються нерівномірно, скупчуючись до кінців відрізка  $\ell [-1, 1]$ . Причому кількість вузлів інтерполяції дорівнює  $(n + 1)$ , де  $n$  – показник інтерполяційного многочлена (19).

Для розрахунку числових значень показників якості функціонування системи скористаємося відомими формулами. Вираз для коефіцієнта готовності набуває вигляду

$$k_1 = \frac{T}{T + T_a}, \quad (33)$$

де  $T$  – середнє напрацювання системи до відмови;

$T_a$  – середня тривалість відновлення системи.

Коефіцієнт оперативної готовності обчислимо за формулою

$$R_1(t_0) = \frac{T - \int_0^{t_0} F(t) dt}{T + T_a}, \quad (34)$$

де  $t_0$  – оперативний час роботи системи, необхідний для виконання завдання;

$F(t)$  – функція розподілу часу системи до відмови. Величина  $F(t)$  залежить від індивідуальних умов експлуатації кожного дизеля. Для оцінювання ефективності застосування розроблених пристроїв діагностики скористаємося даними (табл. 2).

Таблиця 2

Деякі показники роботи дизеля V-12

$T$ , год	$T_a$ , год	$t_0$ , год	$T_n$ , год	$\tau_0$ , год	$\lambda(t)$	$F(t)$
482	9,6	72	15,5	250	0,002	$0,25 t^{1,3}$

Проводячи обчислення згідно з (33) та (34), одержимо  $k_1 = 0,98$ ,  $R_1(72) = 0,848$ . Порівняємо ці числові значення  $k_1$  та  $R_1$  з тими, які мають місце при плановому проведенні технічного обслуговування. Вираз для коефіцієнта готовності такої системи має вигляд

$$k_2 = \frac{1}{1 + (T_a - T_n)\lambda(t)}, \quad (35)$$

де  $T_n$  – середня тривалість планового технічного обслуговування;

$\lambda(t)$  – інтенсивність відмов системи.

Коефіцієнт оперативної готовності для системи з плановим проведенням технічного обслуговування визначимо наступним чином:

$$R_0(t_0) = \frac{\int_0^{\tau_0} F(t + t_0) dt}{\int_0^{\tau_0} F(t) dt + T_n + (T_a - T_n)\tau_0}, \quad (36)$$

де  $\tau_0$  – періодичність проведення планового технічного обслуговування.

Згідно з табл. 2 одержимо  $k_2 = 0,51$ ;  $R_2(72) = 0,34$ . Легко бачити, що при обслуговуванні дизелів за їх фактичним технічним станом до гарантованого напрацювання в 1 000 годин необхідно 3 – 4 планових обслуговування, чим досягається економія часових та матеріальних витрат.

Порівняння значень коефіцієнтів  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $R_1$  та  $R_2$  показує, що технічне обслуговування за фактичним станом більш ефективно, ніж планове.

## Висновки

1. Застосування запропонованої уточнюючої методики, що базується на використанні многочлена Лагранжа для опису тренда зміни діагностичного параметра та наступної обробки статистичних даних, дає можливість прогнозувати технічний стан дизелів АНТ та застосовувати її для будь-яких типів двигунів внутрішнього згорання.

2. Для коректування часу проведення технічного обслуговування двигуна та здійснення його ремонту за фактичним технічним станом необхідно в практиці експлуатації враховувати результати всіх діагностичних випробувань.

3. Застосування запропонованих засобів діагностування дизелів АНТ, які дозволяють перейти до технічного обслуговування за фактичним станом агрегатів, забезпечує підвищення коефіцієнта готовності в 1,92 рази, а коефіцієнта оперативної готовності – у 2,49 рази.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Брук М.А., Самсонов Е.П. О подходе к оценке ресурса дизелей // Двигателестроение. – 1981. – № 7. – С. 56 – 58.
2. Двигатели внутреннего сгорания: Номенклатурный справочник. – М.: ШИИТЗИтяжмаш, 1981. – 96 с.
3. Краснокутський В.Н., Шунайлов Г.О., Іващенко І.І. Вібродіагностика розцентрування спряжених валів // Вестник науки и техники. – 2002. – №№ 2, 3. – С. 16 – 21.
4. Приймаков О.Г., Іващенко І.І. Математичне моделювання процесу вібродіагностики // Вестник науки и техники. – 2002. – № 4. – С. 11 – 17.
5. Іващенко І.І., Приймаков О.Г. Діагностування працездатності опор ковзання для авіаційної наземної техніки // Вестник науки и техники. – 2003. – № 1. – С. 9 – 14.
6. Іващенко І.І., Приймаков О.Г. Прогнозування залишкового ресурсу та надійності дизелів авіаційної наземної техніки // Вісник Харківського державного технічного університету сільського господарства. – 2003. – № 17. – С. 289 – 294.

Надійшла 28.09.2005

Рецензент: д-р техн. наук професор В.А. Войтов, Харківський університет Повітряних Сил.