

УДК 61.2:004.93:007.52

О.Г. Кучер, д-р техн. наук, проф.  
П.О. Власенко, студ.  
О.В. Тишкевич, студ.

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ АЛГОРИТМІВ ТРЕНДОВОГО АНАЛІЗУ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ГАЗОТУРБІННОГО ДВИГУНА

НАУ, кафедра авіаційних двигунів  
E-mail: Pavlino4ka@yandex.ru

*Розглянуто питання діагностики авіаційних двигунів та оцінки ефективності методів трендового аналізу як однієї з найважливіших процедур виявлення дефектів.*

*In this article are examined questions of diagnostics of aircraft engine and, in the first place, the analysis of the effectiveness of the methods of trend analysis as one of the most important procedures of the detection of defect, is carry ouied.*

### Вступ

Діагностика авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) проводиться для попередження відмов, раннього виявлення розвитку дефектів і впровадження заходів щодо їх усунення.

Алгоритми трендового аналізу дозволяють визначити початкову стадію зміни технічного стану двигуна на підставі аналізу процесу зростання або спадання приведених комплексних діагностичних параметрів [1].

### Постановка проблеми

Протягом експлуатації авіаційні двигуни зношуються і в них відбуваються зміни параметрів.

Для їх аналізу і своєчасного виявлення несправності якоїсь зі складових двигуна використовують трендовий аналіз.

### Діагностика двигуна

Трендовий аналіз – складова частина комплексного діагностування, що включає контроль параметрів проточної частини двигуна, параметрів маслосистеми і вібраційної діагностики.

Діагностика авіаційного ГТД складається з таких основних етапів:

- зняття сигналів з авіаційних двигунів;
- приведення параметрів до стандартних атмосферних умов (САУ);
- виключення аномальних значень;
- згладжування інформації;
- трендового аналізу;
- розпізнавання стану на підставі діагностичних матриць, статистичної теорії і розпізнавання образів.

Зведений алгоритм реалізується в автоматизованій системі. На початковому етапі відбувається зняття параметрів двигуна.

До основних вимірюваних діагностичних параметрів двигуна підвищеної контролепридатності ПС-90А належать [2]:

- температура повітря на вході в двигун  $t_{вх}$ ;
- температура масла на виході з задньої опори шарикопідшипника компресора високого тиску (КВТ)  $t_{м. КВТ}$ ;
- температура масла на виході з опори роликотурбінника турбіни високого тиску (ТВТ)  $t_{м. ТВТ}$ ;
- температура масла на виході з опори роликотурбінника турбіни низького тиску (ТНТ)  $t_{м. ТНТ}$ ;
- температура повітря за КВТ  $t_{к}^*$ ;
- температура масла на вході в двигун  $t_{м. вх}$ ;
- температура газу за турбіною  $t_{т}$ ;
- температура лопатки першого ступеня турбіни  $t_{л}$ ;
- температура повітря під панелями газогенератора  $t_{пг}$ ;
- тиск повітря в системі суфлірування  $p_{суф}$ ;
- тиск повітря на вході в двигун  $p_{вх}$ ;
- тиск палива в першому контурі форсунок  $p_{т1к}$ ;
- тиск повітря за вентилятором  $p_{в}^*$ ;
- тиск повітря за КВТ  $p_{к}^*$ ;
- тиск масла на вході в двигун  $p_{м. вх}$ ;
- частота обертання ротора компресора низького тиску (КНТ)  $n_{в}$ ;
- частота обертання ротора КВТ  $n_{КВТ}$ ;
- віброшвидкість у зоні роздільного корпусу ротора високого тиску  $V_{рКВТ рк}$ ;
- віброшвидкість у зоні роздільного корпусу ротора низького тиску  $V_{рв. рк}$ ;
- віброшвидкість у зоні задньої опори ротора високого тиску  $V_{рКВТ зп}$ ;
- віброшвидкість у зоні задньої опори ротора низького тиску  $V_{рв. зп}$ ;
- витрата палива  $G_{т}$ ;
- відношення  $\vartheta$  тисків  $p_{т}/p_{вх}$ .

Для подальшої обробки інформації ці параметри необхідно привести до САУ, режиму (див. таблицю) і ймовірності для того, щоб їх можна було порівнювати, виходячи з однакових умов роботи двигуна.

Діагностику можна проводити тільки на газодинамічно подібних режимах [3; 6].

## Параметри приведення режимів

Параметр	Режим		
	Максимальний	Номинальний	Крейсерський
Частота обертання, $n_{\text{квт. пр.}}, \%$	94,0	91,5	88,0
Висота польоту $H$ , м	0	5 000	11 000
Число Маха, $M$	0,24	0,60	0,80
Температура повітря на вході, $t_{\text{вх}}, ^\circ\text{C}$	18,5	1,2	-28,2
Тиск повітря на вході, $p_{\text{вх}}, \text{Па (кгс/см}^2\text{)}$	1,072	0,700	0,352

Розглянемо формули приведення параметрів до САУ:

– приведена частота обертання ротора КВТ:

$$n_{\text{пр.квт}} = n_{\text{квт}} \sqrt{\frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{вх}}^* + T_0}};$$

– приведена частота обертання ротора КНТ:

$$n_{\text{в.пр}} = n_{\text{в}} \sqrt{\frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{вх}}^* + T_0}};$$

– приведена температура газу за турбіною:

$$t_{\text{т.пр}}^* = (t_{\text{т}}^* + T_0) \frac{T_{\text{п}}}{(t_{\text{вх}}^* + T_0)} - T_0;$$

– приведена температура повітря за КВТ:

$$t_{\text{к.пр}}^* = (t_{\text{к}}^* + T_0) \frac{T_{\text{п}}}{(t_{\text{вх}}^* + T_0)} - T_0;$$

– приведена витрата палива:

$$G_{\text{т.пр}} = G_{\text{т}} \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{вх}}} \sqrt{\frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{вх}}^* + T_0}};$$

– приведений тиск повітря за КВТ:

$$p_{\text{к.пр}}^* = p_{\text{к}}^* \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{вх}}^*};$$

– приведений тиск повітря за вентилятором:

$$p_{\text{в.пр}}^* = p_{\text{в}}^* \frac{p_{\text{п}}}{p_{\text{вх}}^*};$$

– приведена температура лопаток першого ступеня турбіни;

$$t_{\text{л.пр}} = (t_{\text{л}} + T_0) \frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{вх}}^* + T_0} - T_0;$$

– приведена температура під панелями газогенератора:

$$t_{\text{пг.пр}} = (t_{\text{пг}} + T_0) \frac{T_{\text{п}}}{t_{\text{вх}}^* + T_0} - T_0;$$

– перепад тисків палива на форсунках першого контуру:

$$dp_{\text{т1к}} = (p_{\text{т1к}} + p_{\text{х}}^*) - p_{\text{к}}^*;$$

– перепад температури масла на опорі шарико-підшипника ротора КВТ:

$$dt_{\text{м.квт}} = t_{\text{м.квт}} - t_{\text{м.вх}};$$

– перепад температури масла на опорі ролик-підшипника ротора ТВТ:

$$dt_{\text{м.твт}} = t_{\text{м.твт}} - t_{\text{м.вх}};$$

– перепад температури масла на опорі ролик-підшипника ротора ТНТ:

$$- dt_{\text{м.тнт}} = t_{\text{м.тнт}} - t_{\text{м.вх}};$$

$$p_{\text{п}} = 1,072;$$

$$T_{\text{п}} = T_0 + t_{\text{п}};$$

$$T_0 = 273,15.$$

Існує три основних діагностичних режими роботи двигуна, до яких приводяться зняті параметри:

– максимальний;

– номінальний;

– крейсерський.

Залежно від обраного режиму, встановлюються значення частоти обертання ротора КВТ, висоти польоту, числа Маха, температури та тиску повітря на вході. Для подальшого аналізу параметрів їх необхідно нормувати, тобто виконати приведення за ймовірністю. Для нормування відхилень від базових значень використовують формули [4]:

$$Y_i = \frac{Z_i - \bar{Z}}{S_z};$$

$$\bar{Z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Z_i;$$

$$S_z = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (Z_i - \bar{Z})^2};$$

$$Z_i = \frac{\Pi_{\text{пр.п}i} - \Pi_{\text{б.п}}}{S_{\text{б.п}}};$$

$$\bar{\Pi}_{\text{б.п}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \Pi_{\text{пр.п}i};$$

$$S_{\text{б.п}} = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\Pi_{\text{пр.п}i} - \bar{\Pi}_{\text{б.п}})^2};$$

де  $\bar{Z}$ ,  $S_z$  – математичне сподівання і середньоквадратичне відхилення  $Z_i$ .

Відхили параметрів  $W_i$ , які нормують за ймовірністю відносні значення параметрів у загальному випадку, мають вигляд:

$$W_i = \frac{Z_i - \bar{Z}}{S_x};$$

$$Z_i = \frac{\delta \Pi_{\text{пр}i} - \bar{\Pi}_{\text{б}} \delta_{\text{п}}}{S_{\delta} \delta_{\text{п}}};$$

$$\delta \Pi_{\text{пр}i} = \frac{\Pi_{\text{пр}i} - \Pi_{\text{пр}i}^e}{\Pi_{\text{пр}i}^e};$$

де  $\overline{\Pi} \delta_{\Pi}$ ,  $S_{\delta_{\Pi}}$  – математичне сподівання та середньоквадратичне відхилення відносних параметрів  $\delta \Pi_{\text{пр}i}$ .

Еталонні значення параметрів

$\Pi_{\text{жпр}i}^e = f_j(r_{\text{жпр}i})$  являють собою монотонні функції, що описують поліномами  $n$ -го степеня залежності діагностичних параметрів відносно приведенного до САУ одного із режимних параметрів:

– якщо  $j = 1$ , частоти обертання ротора низького тиску:

$$r_{1\text{пр}} = n_{\text{в пр}};$$

– якщо  $j = 2$ , частоти обертання ротора високого тиску:

$$r_{2\text{пр}} = n_{\text{квт пр}};$$

– якщо  $j = 3$ , ковзання роторів:

$$r_{3\text{пр}} = s_{\text{пр}} = n_{\text{квт пр}}/n_{\text{в пр}}.$$

Один із можливих способів приведення відносних параметрів (визначення відхилів), що використовується в автоматизованих системах діагностування, має вигляд

$$\Delta(X_{\text{жпр}i}) = \frac{X_{\text{пр}i} - X_{\text{жпр}i}^e}{X_{\text{жпр}i}^e \sigma[\delta(X_{\text{жпр}i})]} - \overline{D(X_{\text{жпр}i})}_k,$$

$$\text{де } \delta(X_{\text{жпр}i}) = \frac{X_{\text{жпр}i} - X_{\text{жпр}i}^e}{X_{\text{жпр}i}^e};$$

$$\sigma(\delta(X_{\text{жпр}i})) = \sqrt{\frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k (\delta(X_{\text{жпр}i}) - m(\delta(X_{\text{жпр}i})))^2};$$

$$m(\delta(X_{\text{жпр}i})) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \delta(X_{\text{жпр}i});$$

$$D(X_{\text{жпр}i}) = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \frac{\delta(X_{\text{жпр}i})}{\sigma(\delta(X_{\text{жпр}i}))},$$

де  $X_{\text{жпр}i}$  – приведені значення параметрів;  $X_{\text{жпр}i}^e$  – еквівалентні математичні сподівання нормованих відхилень діагностичних параметрів;  $\delta(X_{\text{жпр}i})$  – відносне відхилення діагностичних параметрів;  $\sigma(\delta(X_{\text{жпр}i}))$ ,  $m(\delta(X_{\text{жпр}i}))$  – середньоквадратичне відхилення та математичне сподівання відносних значень параметра.

Окремі випадки приведених нормованих діагностичних параметрів (відхилів), які використовуються в системі діагностування двигуна мають такий вигляд:

– відхил частоти обертання ротора низького тиску приведенний до  $n_{\text{в пр}}$ :

$$\Delta(n_{\text{в пр}i}) = \frac{n_{\text{в пр}i} - n_{\text{в пр}i}^e}{n_{\text{в пр}i}^e \sigma[\delta(n_{\text{в пр}i})]} - \overline{D(n_{\text{в пр}i})}_{20} = \Delta N1 = NV; \tag{1}$$

– відхил частоти обертання ротора високого тиску приведенний до  $n_{\text{квт пр}}$ :

$$\Delta(n_{\text{квт пр}i}) = \frac{n_{\text{квт пр}i} - n_{\text{квт пр}i}^e}{n_{\text{квт пр}i}^e \sigma[\delta(n_{\text{квт пр}i})]} - \overline{D(n_{\text{квт пр}i})}_{20} = \Delta N2 = NV; \tag{2}$$

– відхил температури газу за турбіною приведенний до ковзання роторів  $s_{\text{пр}}$ :

$$\Delta(T_{\text{тур}i}^*) = \frac{T_{\text{тур}i}^* - T_{\text{тур}i}^{*e}}{T_{\text{тур}i}^{*e} \sigma[\delta(T_{\text{тур}i}^*)]} - \overline{D(T_{\text{тур}i}^*)}_{20} = \Delta T = TS. \tag{3}$$

Наступний етап обробки – виключення аномальних точок, значення яких значно відрізняються від більшості значень вибірки [1] (рис. 1).

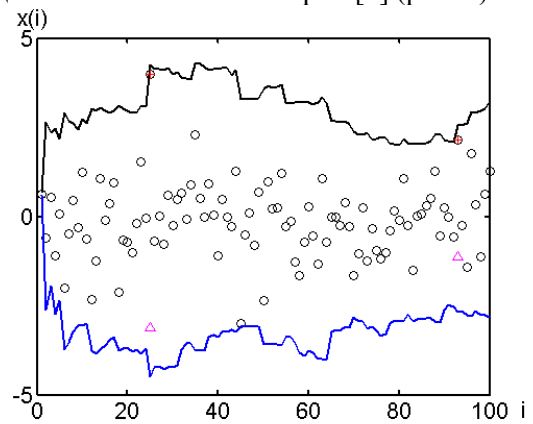


Рис. 1. Виключення аномальних точок

Природа появи аномальних точок не визначена до кінця. У більшості випадків це пов'язано з грубими похибками або різкими фізичними змінами досліджуваного процесу. Якщо параметри знімаються вручну, то грубі похибки може вносити екіпаж. Якщо ж значення записуються МСРП, то похибки виникають при збоях в роботі. Існує багато процедур виключення аномальних точок. Відповідно до однієї з них для кожної  $j$ -ї вибірки із  $n$  значень параметрів спочатку розраховуються математичне сподівання і дисперсію

$$\bar{x}(j) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x(i), S^2(j) = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x}(j))^2.$$

Значення  $x(i)$  вважають аномальним ( $x_{\text{ап}}(i)$ ), якщо  $x(i) \geq b(j)$  або  $x(i) \leq a(j)$ .

Величини  $a(j)$  і  $b(j)$  знаходять із співвідношень:

$$\begin{aligned} a(j) &= \bar{x}(j) - t_2 S(j), & b(j) &= \bar{x}(j) + t_1 S(j), & \text{якщо } \gamma < -0,2; \\ a(j) &= \bar{x}(j) - t_1 S(j), & b(j) &= \bar{x}(j) + t_2 S(j), & \text{якщо } \gamma > 0,2; \\ a(j) &= \bar{x}(j) - t_1 S(j), & b(j) &= \bar{x}(j) + t_1 S(j), & \text{якщо } |\gamma| < 0,2, \end{aligned}$$

де  $t_1 = 2 + 0,21g(0,04n)$ ;

$$\gamma = \frac{\sqrt{n(n-1)}}{n-2} \frac{1}{nS^3(j)} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x}(j))^3;$$

$$t_2 = (19(\gamma_2 + 2)^{0.5} + 1)^{0.5};$$

$$\gamma_2 =$$

$$= \frac{n^2 - 1}{(n-2)(n-3)} \left( \left( \frac{1}{nS^4(j)} \sum_{i=1}^n (x(i) - \bar{x}(j))^4 - 3 \right) + \frac{6}{n+1} \right).$$

Оскільки процес виміру точок випадковий, то після видалення аномальних точок проводиться процедура згладжування даних (рис. 2.), за допомогою якої будується гладка функція, яка характеризує зміну середніх значень параметра.

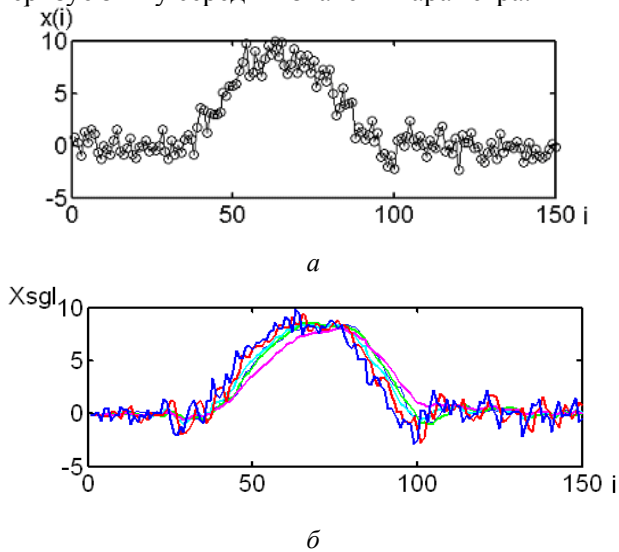


Рис. 2. Згладжування даних  
а – вихідний процес; б – згладжування даних різними методами

До найбільш розповсюджених процедур згладжування даних відносять процедури ковзного середнього, медіанного згладжування, згладжування даних за допомогою сплайнів, диференціального та експоненціального згладжування.

Процедура медіанного згладжування, що відноситься до перешкодостійких і є найбільш ефективною, задається формулою

$$x_{i \text{ Me згл}} = x_v \left( \frac{n}{2} \right), \text{ якщо } n \text{ парне};$$

$$x_{i \text{ Me згл}} = \frac{1}{2} \left( x_v \left( \frac{n}{2} \right) + x_v \left( \frac{n+1}{2} \right) \right), \text{ якщо } n \text{ непарне},$$

де  $x_v(i)$  – варіаційний ряд точок, що будується шляхом сортування вихідного ряду  $x(i)$ .

Для методу ковзної смуги:

$$x_{i \text{ згл}} = x_{i-1 \text{ згл}} + \frac{x_i - x_{i-n}}{n};$$

$$x_{0 \text{ згл}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_j;$$

для експоненціального методу:

$$x_{i \text{ згл}} = \alpha x_i + (1 - \alpha) x_{i-1 \text{ згл}},$$

де  $x_{i \text{ згл}}$  – згладжене значення вихідного процесу;  $x_{0 \text{ баз}}$  – початкове згладжене значення вихідного процесу;  $\alpha$  – коефіцієнт згладжування, значення якого встановлюється на рівні 10–20% ( $\alpha = 0,1 \dots 0,2$ );  $x_i$  – значення параметра вихідного процесу.

Задачею трендового аналізу є виявлення тренда, тобто наявності поступового зменшення або збільшення значення досліджуваного параметра. Якщо звернутися до фізичного змісту, то наявність тренда в авіаційному ГТД – це поступове погіршення роботи якоїсь складової або двигуна в цілому. Отже, своєчасне виявлення тренда параметра може запобігти поломці двигуна в польоті.

Існують параметричні і непараметричні критерії виділення трендів. До параметричних належать критерій Аббе, модифікований критерій Аббе,  $S$ ,  $S'$  та  $J$ -критерії [1; 4; 5; 6].

Непараметричними є критерії знаків, серій та інверсій. В усіх критеріях користуються ковзною смугою (у більшості випадків її довжина дорівнює 10, 16, 20 точкам), яка шляхом сканування вилучає з вихідного сигналу задану кількість точок у ковзній смузі.

Ця кількість точок має бути кратною  $2^n \times 5^m$  ( $n, m$  дорівнюють 0, 1, 2...), наприклад, 8, 10, 16, 20, 25, 32, ..., щоб не накопичувалася похибка округлення.

Аналіз показав, що при заданому вигляді сигналу найбільш ефективно виявлення тренда здійснюється для критерію серій з 16–25 точками в ковзній смузі, для критерію Аббе з 16–20 точками.

Виявлення тренда за допомогою критерію екстремальних точок здійснюється за статистикою

$$S = \frac{p - E\{p\}}{\sqrt{D\{p\}}}.$$

Для розрахунку статистики  $S$  використовують послідовність  $\{x_i = x(i); i = \overline{1, n}\}$  і визначають індикатор  $y$ :

$$y_i = \begin{cases} 1, \text{ якщо } x(i) < x(i+1) < x(i+2); \\ \text{або } x(i) > x(i+1) > x(i+2); \\ 0 \text{ у будь-якому іншому разі.} \end{cases}$$

Кількість екстремальних точок тоді дорівнює

$$p = \sum_{i=1}^{n-2} y_i.$$

Величина  $p$ , має математичне сподівання

$$E\{p\} = \sum_{i=1}^{n-2} E\{y_i\} = \frac{2(n-2)}{3}$$

і дисперсію

$$D\{p\} = E\{p^2\} - E^2\{p\} = \frac{16n - 29}{90},$$

де

$$E\{p^2\} = \frac{40n^2 - 144n + 131}{90}.$$

Якщо  $|S| < U_{\alpha/2}$ , то ряд стаціонарний; якщо  $S < -U_{\alpha/2}$ , то ряд має тренд до спадання; якщо  $S > U_{\alpha/2}$ , то ряд має тренд до зростання ( $U_{\alpha/2}$  – квантиль нормального розподілу).

На рис. 3 виявлення тренда фіксується перетином кривих граничного рівня.

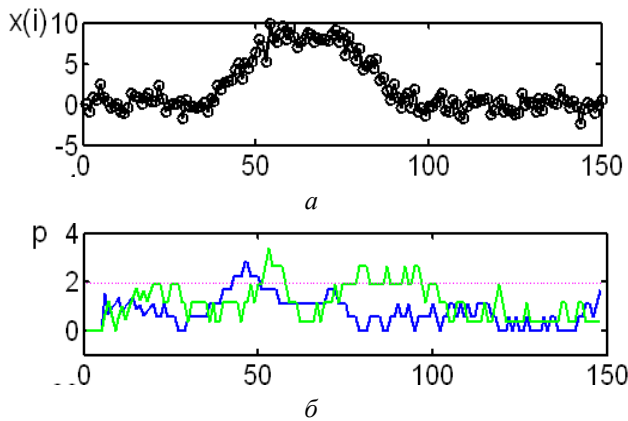


Рис. 3. Виявлення тренда за допомогою критерію екстремальних точок:  
а – вихідний процес; б – критерій екстремальних точок

Критерій не є ефективним, оскільки не завжди виявляє тренд, і його виявлення відбувається зі значним запізненням.

Критерій серій характеризується кількістю та довжиною серій.

Для аналізу процесу будується знакова функція, яка показує, вище чи нижче досліджувана точка за середнє значення:

$$y_i = \begin{cases} 1, & x(i) \geq x_m, \\ -1 & x(i) < x_m, \end{cases}$$

де  $x_m$  – медіана досліджуваного ряду:

$$x_m = x_m(n) = x\left(\frac{n+1}{2}\right), \text{ якщо } n \text{ не парне;}$$

$$x_m = x_m(n) = \frac{1}{2} \left( x\left(\frac{n}{2}\right) + x\left(\frac{n}{2} + 1\right) \right), \text{ якщо } n \text{ парне.}$$

За допомогою знакової функції визначається кількість серій  $v(n)$  та їх довжина  $\tau(n)$ .

Якщо

$$v_{n,1-\alpha/2} \leq v \leq v_{n,\alpha/2},$$

де  $v_{n,1-\alpha/2}, v_{n,\alpha/2}$  – значення квантилей розподілу величини  $v$  при заданому критичному рівні значущості  $\alpha$  і відомому об'ємі спостережень  $n$ , то приймається гіпотеза про стаціонарність і незалежність випадкового процесу.

В іншому випадку приймають гіпотезу про наявність тренда процесу.

Модифікований критерій серій збудований на обчисленні кількості серій  $v(n)$  і фіксуванні довжини серій  $\tau(n)$ . Гіпотеза про стаціонарність процесу приймається, якщо одночасно виконуються умови:

$$v(n) > \left[ \frac{1}{2} (n+1 - 1,96\sqrt{n-1}) \right];$$

$$\tau(n) < [3,31 \lg(n+1)].$$

У протилежному випадку робиться висновок про наявність залежності між спостереженнями ряду та існуванням тренда.

На рис. 4 виявлення тренда позначається перетином кривої кількості серій граничних рівнів.

Проведений аналіз виявлення тренда з 20 і 25 точками в ковзній смузі.

Як видно з рис.4, тренд зафіксований раніше в другому випадку. Отже, більш ефективним є критерій серій з 25 точками в ковзній смузі.

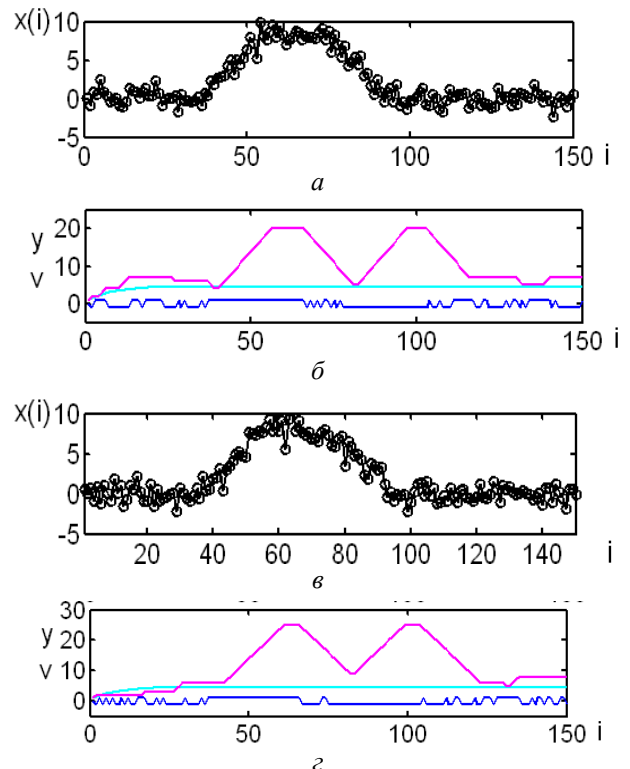


Рис. 4. Виявлення тренда за допомогою критерію серій:  
а, б – 20 точок, в, г – 25 точок у ковзній смузі

Критерій Аббе (Хальда) відноситься до параметричних критеріїв, що обчислюється за формулою

$$r = \frac{1}{2} \frac{\sum_{i=1}^{n-1} (x_{i+1} - x_i)^2}{\sum_{i=1}^n x_i^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i\right)^2}.$$

Якщо  $r \leq r_{кр}$ , приймається рішення про наявність нестационарності. Для підвищення обчислювальної ефективності критерію Аббе для його розрахунку можна скористатися рекурентним алгоритмом, що в декілька разів зменшує кількість арифметичних операцій:

$$m_j = m_{j-k} + \frac{-x_{j-k+1} + x_j}{k};$$

$$S_j = S_{j-1} - x_{j-k}^2 + x_j^2;$$

$$\Delta_j = \Delta_{j-1} - (x_{j-k} - x_{j-k-1})^2 + (x_{j+1} - x_j)^2;$$

$$r_j = \frac{1}{2} \frac{\Delta_j}{S_j - m_j^2}, \text{ якщо } j > k.$$

У цьому алгоритмі, як і в методі ковзної смуги, розрахунок сум заснований на запам'ятовуванні результатів попередньої ітерації та доповнення та виключення з сум відповідно нової та останньої точок.

Модифікований критерій Аббе визначають через критерій Аббе за формулою

$$r' = \frac{1}{2} \ln \frac{2-r}{r}.$$

Особливістю цього критерію є те, що, якщо  $n > 10$ , значення величин  $r'$  можна вважати нормально розподіленими випадковими величинами з дисперсією

$$\sigma'_r = \frac{1}{\sqrt{n-3}}.$$

Допустиме значення критерію дорівнює  $r'_{доп} = K_P \sigma'_r$ , а толерантний коефіцієнт  $K_P$  визначається при заданій ймовірності за таблицями нормального розподілу.

Проведений аналіз виявлення тренда при ймовірностях 0,9; 0,99; 0,999 показав, що обидва критерії на всіх рівнях дозволяють виявляти тренд (рис. 5).

Критерій Аббе при цьому перегинає відповідні порогові рівні зверху вниз, а модифікований критерій Аббе знизу вгору.

Інтегральний  $S$ -критерій є сумою значень параметрів центрованих відносно їх поточного математичного сподівання:

$$S_n = \sum_{i=1}^n (x_i - m_i),$$

$$\text{де } m_i = \frac{1}{i} \sum_{k=1}^i x_k.$$

Граничне значення, при перевищенні якого з заданою ймовірністю буде виявлено порушення стаціонарності, має вигляд

$$S_{допi} = K_P \sigma_x \sqrt{\sum_{k=1}^i \left(1 - \sum_{j=1}^{i+k+1} \frac{1}{i-j+1}\right)}.$$

Модифікований  $S'$ -критерій, в якому замість поточного математичного сподівання розглядається його оцінка, апроксимована лінійною моделлю  $m_x = a(\tau - \bar{\tau}) + b$  визначається виразом

$$S'_i = \sum_{k=2}^i \left( x_k - \hat{a}_k (\tau - \bar{\tau}_k) - \hat{b}_k \right);$$

$$\hat{a}_k = \frac{\sum_{j=1}^k x_j (\tau_j - \bar{\tau}_j)}{\sum_{j=1}^k (\tau_j - \bar{\tau}_j)};$$

$$\hat{b}_k = \frac{1}{k} \sum_{j=1}^k x_j,$$

де  $\tau_k$  – поточне значення часу;  $\bar{\tau}_k$  – середній час спостереження.

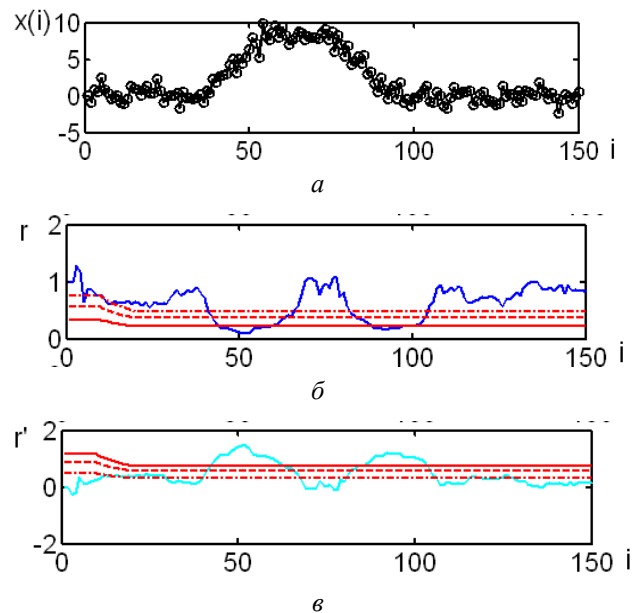


Рис. 5. Виявлення тренда за допомогою критеріїв Аббе:

$a$  – вихідний процес;  $b$  – критерій Аббе;  $c$  – модифікований критерій Аббе



Граничне значення розраховується за формулою

$$S'_{\text{доп}i} = K_p \sigma_x \sqrt{\sum_{k=1}^i \left[ 1 - \left( \frac{\sum_{j=1}^{i+k+1} \frac{1}{i-j+1} + \sum_{j=1}^{i+k+h(k)} \frac{(2k-i+j-2)(i-j)}{\sum_{p=1}^{i-j+1} (2p-i+j-2)^2} \right) \right]}$$

$$h(k) = \begin{cases} 0, & k=1 \\ 1, & k>1 \end{cases};$$

де  $K_p$  – толерантний коефіцієнт;  $\sigma_x$  – середньоквадратичне значення  $x$ .

У разі перевищення граничного значення з заданою ймовірністю буде визначено порушення стаціонарності.

Як впливає із графіків  $S$ -критерію (рис. 6), при ймовірності виявлення тренда 0,9; 0,99; 0,999 всі три графіки перетнули граничне значення.

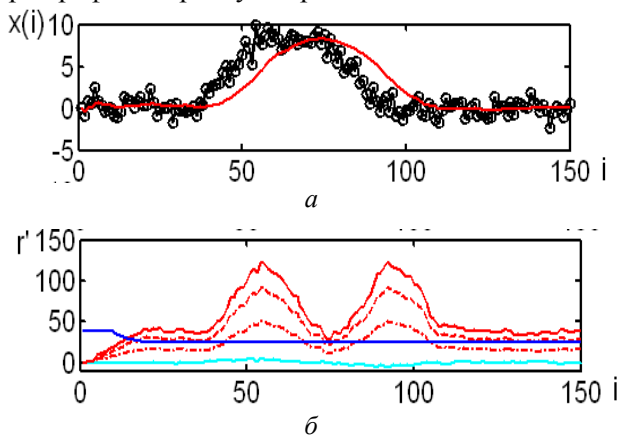


Рис. 6. Виявлення тренда за допомогою  $S'$ -критерію:  
а – вихідний процес; б –  $S'$ -критерій

Отже, тренд виявлений при всіх заданих ймовірностях, але не так виражено.

$J$ -критерій заснований на інтегруванні (підсумуванні) приросту параметра:

$$J_k = \sum_{k=1}^n (x_k - x_{k-1}),$$

$$\text{де } J_n = x_{n+1} - m_x, \quad m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i.$$

На кожному кроці підсумовування при  $k \geq n$  визначається різниця

$$E_k = |J_k| - M,$$

$$\text{де } M = K_p \sigma_x.$$

Якщо  $E_k \geq 0$ , то спостерігається тренд параметра.

Розглянуті алгоритми і методи статистичного і трендового аналізу використовуються для розпізнавання стану двигуна Д-30КП в автоматизованій системі діагностування [5; 6], де в кожному польоті знімаються 12 параметрів, з яких п'ять характеризують роботу проточної частини двигуна:

- частота обертання ротора КНТ  $n_b$ ;
  - частота обертання ротора КВТ  $n_{\text{КВТ}}$ ;
  - температура газу за турбіною  $t_T$ ;
  - витрата палива  $G_T$ ;
  - тиск палива перед форсунками  $P_\Phi$ ,
- а ще п'ять інших параметрів використовують для приведення до САУ:

- температура зовнішнього середовища  $t_{\text{вх}}$ ;
- тиск зовнішнього середовища  $p_{\text{вх}}$ ;
- висота польоту  $H$ ;
- швидкість польоту  $V_{\text{пр}}$ ;
- число Маха  $M$ .

Як діагностичні параметри для діагностування двигуна використовуються 20 відхилів (див. формули (1), (2), (3)).

На верхньому графіку рис. 7 показано процес зміни параметра відхилів частоти обертання ротора низького тиску.

Наведені граничні рівні 1,5; 2; 3 відповідають допустимому, контрольному і критичному рівням.

На середньому графіку рис. 7 показано відхил, який пройшов процедуру медіанного згладжування. Згладжування за диференціальною, експоненціальною процедурами та з використанням ковзної смуги дає змогу обробляти дані з різною фізичною природою.

Виявлення тренда проводиться в системі за допомогою модифікованого критерію Аббе.

Для розпізнавання стану ГТД використовують діагностичну матрицю (рис. 7, нижній графік).

За допомогою статистичних критеріїв аналізується динаміка зміни параметрів.

Статистичні критерії дозволяють виявляти наявність аномальних точок, стрибки параметра, стрибки дисперсії параметра, наявність тренда, виходи відхилів параметрів за граничні рівні.

При перетині допустимого рівня необхідний подальший нагляд за відповідними параметрами, при перетині контрольного рівня необхідно перевірити справність двигуна, а при перетині критичного рівня три рази підряд – зняти двигун з експлуатації. У показаному на рис. 7 випадку був виявлений тренд діагностичного параметра та його вихід за третій критичний рівень. У зв'язку з дефектом двигун був знятий з експлуатації.

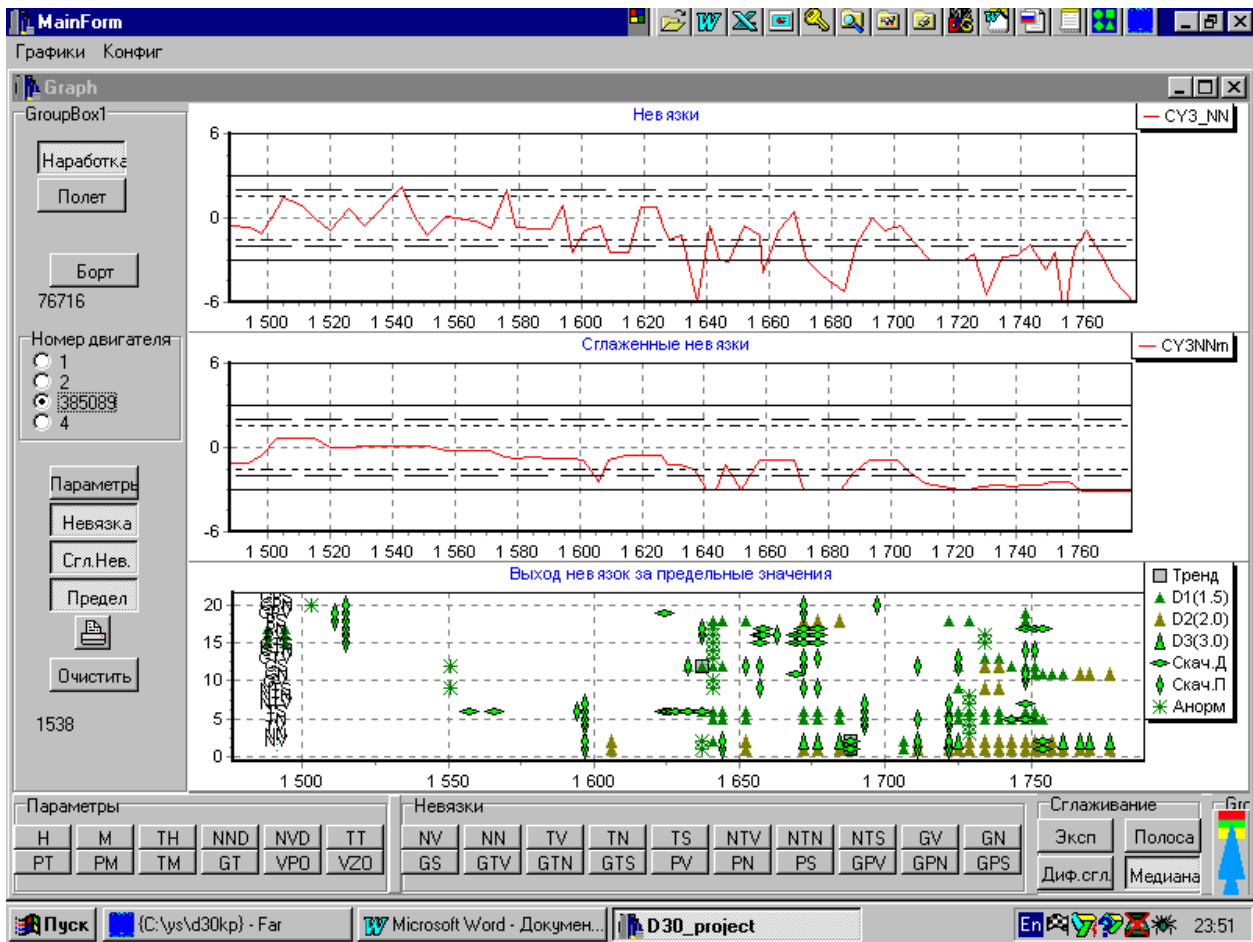


Рис. 7. Відхили, згладжені відхили, діагностична матриця аналізу стану двигуна:

\* – аномальні точки; ◆ – стрибки параметра; ■ – тренд; □ – перевищення контрольних рівнів

## Висновки

Найбільш ефективним непараметричним методом трендового аналізу виявився критерій серій, параметричним – модифікований критерій Аббе. Зазначені критерії можна використовувати для автоматизованого вияву трендів параметрів у системах діагностування.

## Література

1. Кулик М.С., Кучер О.Г., Тарасенко А.В. Система управления техническим состоянием авиационных газотурбинных двигателей в эксплуатации //Вісн. КМУЦА. – 2000. – 1–2. – С. 29–37.
2. Двигатель ПС-90А. Алгоритмы наземной диагностической обработки параметров двигателя ПС-90А и его сис-

тем: Методика 94-00-804ПМ 104. – Пермь: ПМКБ, 1987. – 159 с.

3. Ахмедзянов А.М., Дубравский Н.Г., Тунаков А.П. Диагностика состояния ВРД по термогазодинамическим параметрам. – М.: Машиностроение, 1983. – 206 с.

4. Кучер А.Г. Разработка методов и средств контроля показателей надежности и мониторинга ресурса авиационных ГТД в эксплуатации: Дис. ... на соиск. учен. степ. д-ра техн. наук. – К.: КМУГА, 1998. – 475 с.

5. Бабак В.П., Білецький А.Я., Приставка О.П.. Статистична обробка даних: Монографія. – К.: МІВВЦ, 2001. – 388 с.

6. Ионин Д.А., Яковлев Е.И. Современные методы диагностики магистральных газопроводов. – Л.: Недра, 1987. – 232 с.

Стаття надійшла до редакції 06.11.06.