

ПУСТОВИЙ С.О., канд. техн. наук
НАЛІСНИЙ М.Б.

КОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ РОТОРНИХ МАШИН НА ОСНОВІ СТАТИСТИЧНОЇ ОБРОБКИ ВІБРАЦІЙНИХ ПАРАМЕТРІВ З ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕОРІЇ ТОЛЕРАНТНИХ МЕЖ

УДК 629.139.19

У статті авторами пропонується методика статистичної обробки результатів контролю вібраційних параметрів роторних машин на прикладі газотурбінного двигуна з застосуванням теорії толерантних меж, а також алгоритм і програма, що її реалізують. Наведено приклад обробки вібраційних даних справного і несправного газотурбінного двигуна за розробленою методикою.

На сьогодні мабуть жодна складна технічна система не існує без силової установки, в основі якої є роторна машина, що обертається. Основний тип силової установки (привід), що використовується в теперешній час на авіаційному, корабельному, а також трубопроводному транспорті - газотурбінний двигун (ГТД). Основу ГТД становить багатоступінчаста лопаткова машина, що включає набір робочих коліс, що обертаються і нерухомих направляючих (соплових) апаратів компресора і турбіни.

При експлуатації високоенергетичних теплонапружених газотурбінних двигунів, аварії яких розвиваються швидко і приводять до сильних руйнувань, істотного значення набувають питання аварійного захисту двигунів і, особливо, швидкодії систем аварійного захисту і технічної діагностики.

Традиційні методи виявлення несправностей по відхиленню параметрів робочого процесу від установлених заздалегідь граничних значень не забезпечують необхідної швидкодії, тому що граничні значення параметрів знаходяться за границями діапазону регулювання, що у ряді випадків складає до 40-50% номінального значення. Розширення області припустимих граничних значень параметрів необхідно також для обліку виробничо-технологічних допусків на виготовлення й умови експлуатації двигуна. Тому розроблювальні алгоритми виявлення несправностей повинні мати адаптивний характер, тобто граничні значення параметрів повинні безупинно змінюватися в залежності від режиму, умов роботи двигуна, обсягу накопиченої вимірювальної діагностичної інформації, як конкретного екземпляра двигуна, так і всього парку однотипних двигунів.

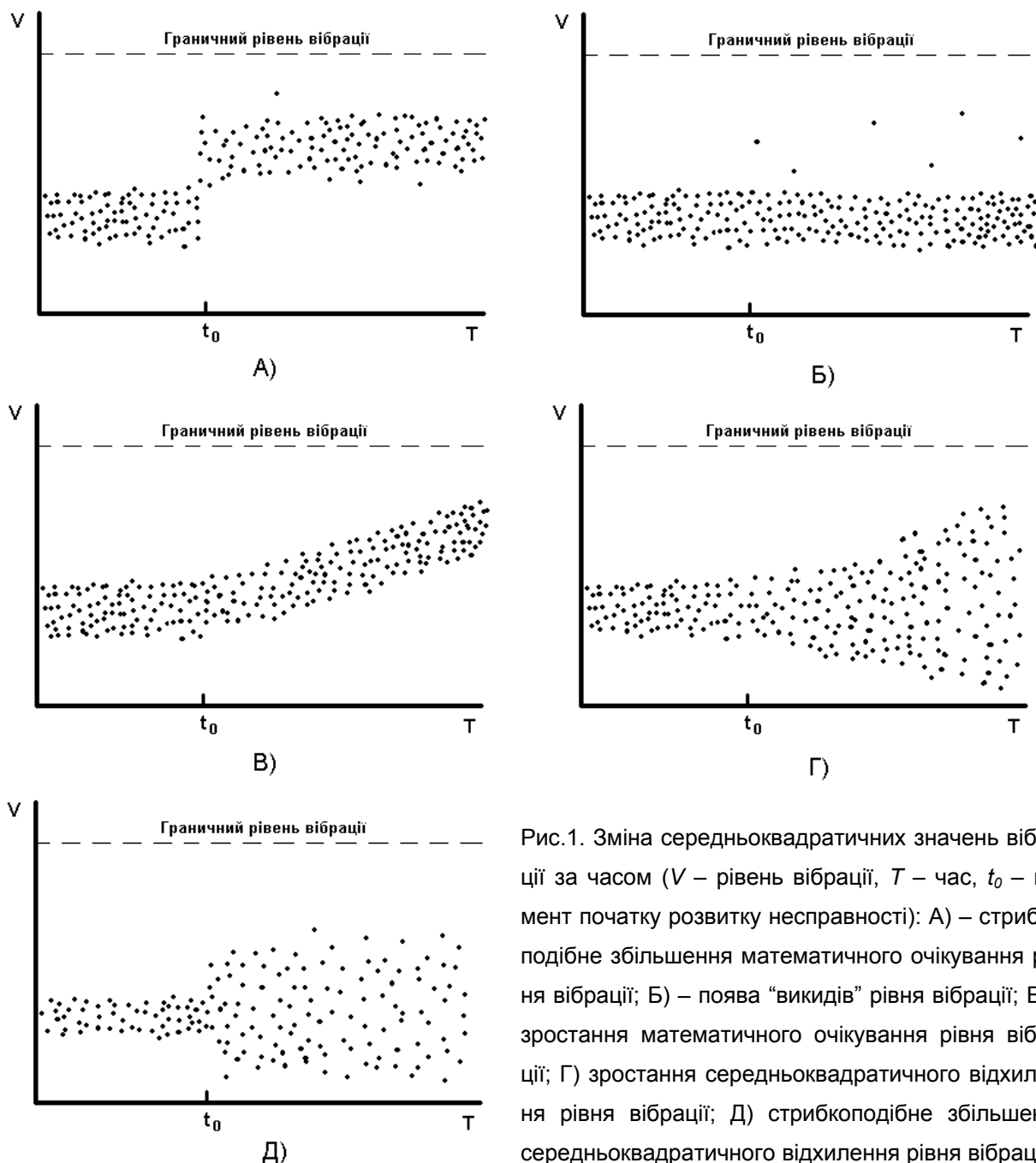
ГТД як роторна аеромеханічна машина в процесі свого функціонування здійснює вимушені і резонансні коливання, тобто проявляє вібраційну активність. Інтенсивність коливань механічного походження, а отже, і вібрація корпусу двигуна визначаються станом роторів, їх опорних підшипників, жорсткістю опор, тобто станом систем ГТД. Таким чином, вимірювання і аналіз вібраційних параметрів дозволяє оцінити технічний стан кожного елемента окремо і всього двигуна в цілому. Висока інформативність віброакустичних сигналів, простота їх перетворення в електричні сигнали і, отже, можливість автоматизації всього процесу контролю і діагностування дають можливість не тільки виявлення, але і завчасного попередження несправностей ГТД [1].

Відомо, що спектральна діагностика за результатами вимірювань віброакустичних сигналів є високоефективним методом виявлення прихованих дефектів і поломок роторних машин. Але цей метод діагностування потребує складних математичних перетворень й обробки вимірювальної інформації, що вимагає потужної обчислювальної техніки з високою швидкістю. Тому в системах вібромоніторингу та аварійного захисту, які функціонують в реальному масштабі часу, як правило зостосовується

лише жорсткий допусковий безперервний контроль середньоквадратичних значень вібропараметрів.

Як свідчить практичний досвід, в багатьох випадках в момент початку розвитку несправності (t_0) середньоквадратичні значення вібрації (V) не досягають встановлених попереджувальних або аварійних меж (рис.1), тому системи вібромоніторингу, що побудовані на жорсткому допусковому контролі, не видають будь-яких сигналів оператору. Хоча через певний час може статися лавиноподібний розвиток несправності, який характеризується стрибкоподібним збільшенням вібрації, при якому система аварійного захисту може не встигнути спрацювати [2]. Але, як видно з рис.1, вимірювальна інформація, починаючи з моменту t_0 несе в собі діагностичні ознаки прояву несправності.

Таким чином, актуальним є розробка методики безперервного контролю технічного стану роторних машин за результатами вимірювань чисельних значень їх параметрів, в першу чергу вібраційних, яка дозволяє здійснювати побудову адаптивних границь працездатності в реальному масштабі часу (не потребують складних математичних перетворень) та використовує накопичену діагностичну інфо-



рмацію по всьому парку однотипних двигунів.

Зазначеним вище вимогам задовольняє алгоритм побудови адаптивних (рухомих) меж статистично можливих та статистично допустимих значень вібропараметра ГТД на основі застосування теорії толерантних меж.

Діапазон статистично можливих значень вібропараметра із заданою довірчою імовірністю характеризує прогнозовану область розкиду значень параметра вібрації відносно його середнього рівня в залежності від напрацювання (обсягу вимірювань) і визначається окремо для кожного конкретного двигуна. Побудова верхньої та нижньої меж статистично можливих значень вібропараметра базується на обчисленні статистичних оцінок його математичного очікування та дисперсії за нескладними статистичними формулами [3], а також потребує визначення чисельного значення толерантного коефіцієнту.

Визначення статистичної оцінки математичного очікування вібраційного параметра \bar{Y}_i , що обчислюється при i -му вимірюванні, для кожного екземпляру двигуна здійснюється за формулою:

$$\bar{Y}_i = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i}{n}, \quad (1)$$

де Y_i – результат i -го вимірювання вібропараметра;

n – кількість вимірювань.

Визначення статистичної оцінки дисперсії D_i і середньоквадратичного відхилення S_i зареєстрованих значень параметра вібрації здійснюється за формулами:

$$S_i = \sqrt{D_i}, \quad (2)$$

$$\text{де } D_i = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2}{n-1}. \quad (3)$$

Визначення толерантного коефіцієнта k_i , що залежить від числа (обсягу) вимірювань, прийнятого рівня значущості і довірчої імовірності знаходження рівня вібрації в діапазоні його статистично можливих значень (між межами Y_i^{*B} і Y_i^{*H}), здійснюється за формулою:

$$k_i = \frac{2,58}{\sqrt{n}} + 2,58 \sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(P_q, n-1)}}, \quad (4)$$

де $\chi^2(P_q, n-1)$ – квантіль χ^2 -розподілу з $(n-1)$ ступенями свободи і рівнем довірчої імовірності P_q (для інженерних розрахунків $P_q=0,95$).

При числі вимірювань $(n-1) \geq 31$ величина $\sqrt{\frac{n-1}{\chi^2(P_q, n-1)}} = 1/\sqrt{1-1,64\sqrt{\frac{2}{n-1}}}$.

Визначення верхньої і нижньої меж статистично можливих значень вібропараметра здійснюється відповідно за формулами:

$$Y_i^{*B} = \bar{Y}_i + k_i S_i \quad (5)$$

$$Y_i^{*H} = \bar{Y}_i - k_i S_i, \quad (6)$$

де Y_i^{*B} - верхня межа статистично можливих рівнів вібропараметра;

Y_i^{*H} - нижня межа статистично можливих рівнів вібропараметра.

Діапазон статистично допустимих значень вібропараметра із заданою довірчою імовірністю характеризує область допустимих значень на основі даних про розкид рівнів вібрації парку однотипних справних двигунів. Побудова статистично допустимих меж передбачає розрахунок значення середньозваженого середньоквадратичного відхилення рівнів вібропараметра парку однотипних справних двигунів та відповідних значень толерантних коефіцієнтів.

Визначення середньозваженого середньоквадратичного відхилення рівнів вібропараметра справних двигунів S_m базується на основі використання статистичної інформації по всьому парку однотипних ГТД:

$$S_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m S_{in_i}^2 (n_i - 1)}{(\sum_{i=1}^m n_i) - m}}, \quad (7)$$

де m - число справних двигунів;

n_i - число вимірювань на i -му справному двигуні;

$S_{in_i}^2$ - дисперсія рівнів вібрації i -го двигуна за n_i вимірювань.

Толерантні коефіцієнти k_n^B і k_n^H обчислюються на основі інтервальних оцінок середнього значення рівня вібрації конкретного двигуна і дисперсії рівнів вібрації двигунів в залежності від числа вимірювань і рівнів значущості виходу вібрації за межі Y_n^B і Y_n^H при заданій довірчій імовірності:

$$k_n = \frac{2,58}{\sqrt{n}} + \frac{2,58}{\sqrt{1 - 1,64 \sqrt{\frac{2}{f}}}}, \quad (8)$$

де f - міра свободи (можливо задавати $f=m-1$).

Визначення верхньої і нижньої меж статистично допустимих значень вібропараметра здійснюється відповідно за формулами:

$$Y_n^B = \bar{Y}_n + k_n^B S_m \quad (9)$$

$$Y_n^H = \bar{Y}_n - k_n^H S_m, \quad (10)$$

де Y_n^B - верхня межа статистично допустимих рівнів вібропараметра;

Y_n^H - нижня межа статистично допустимих рівнів вібропараметра.

На основі вищевикладеної методики за формулами (1)-(10) розроблена блок-схема алгоритму обробки вібропараметрів (рис.2) і програма, що реалізує методику діагностування технічного стану ГТД по зміні амплітудних параметрів роторної вібрації в процесі експлуатації.

На рис.3 наведені результати побудови меж статистично можливих та статистично допустимих рівнів вібрації при відсутності несправностей двигуна. З графіку зображеному на рис.3 видно, що побудовані межі лежать набагато нижче ніж попереджувальний або аварійний порого (гранично допустимого рівня за умови міцності). По мірі накопичення вимірювальної інформації, як статистично мож-

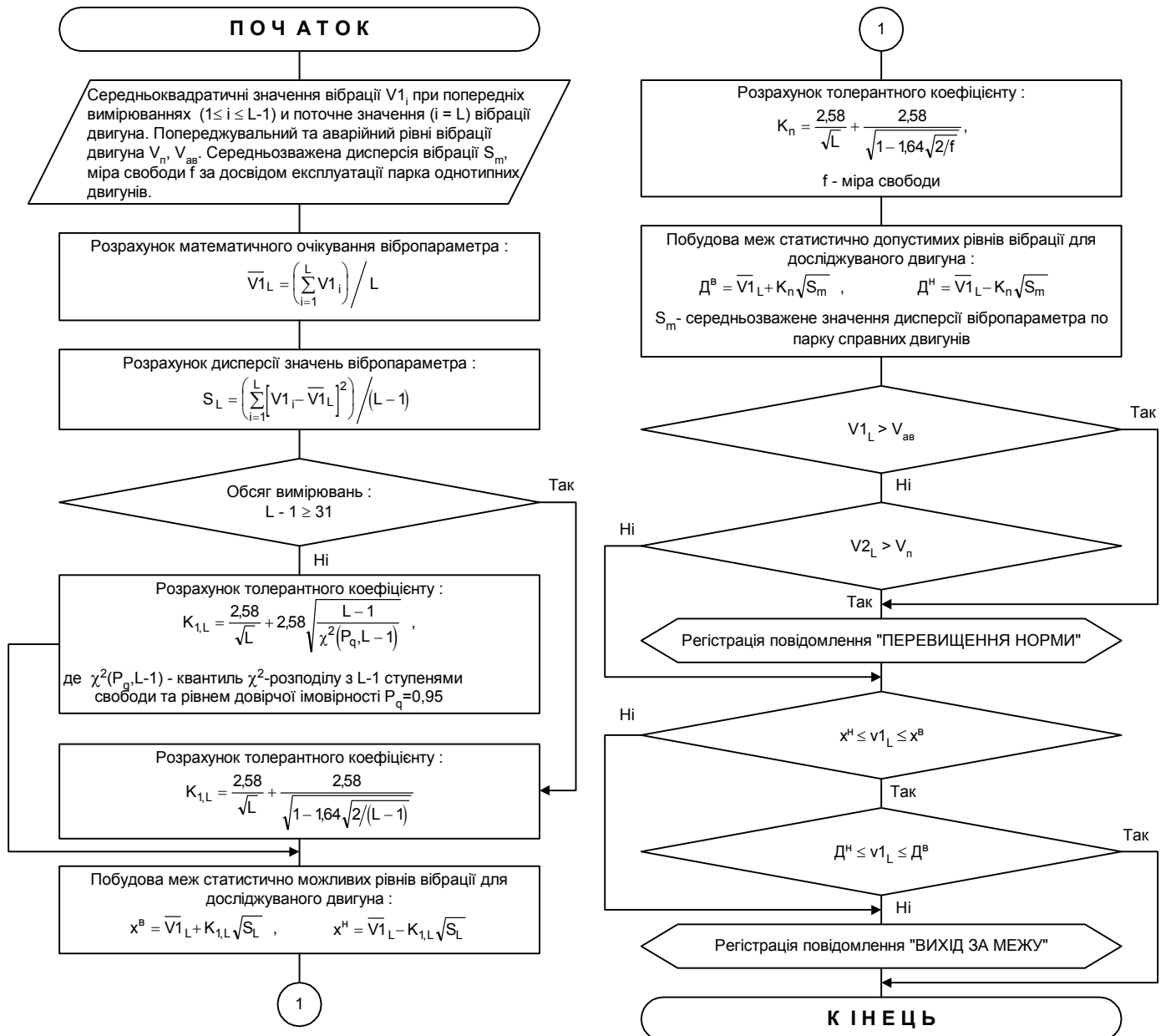


Рис.2. Блок-схема алгоритму статистичної обробки вібраційних параметрів з застосуванням теорії толерантних меж

ліві, так і статистично допустимі межі звужуються, тобто межі є адаптивними до обсягу діагностичної інформації. Статистично допустимі межі ширше ніж статистично можливі, що пояснюється тим, що статистично допустимі межі враховують данні про розкид рівнів вібрації парку однотипних двигунів (характеризується середньозваженим середньоквадратичним відхиленням рівня вібропараметра).

При зародженні несправності середньоквадратичні рівні вібрації можуть характеризуватись аномальною поведінкою, як показано на рис.1, при цьому середньоквадратичний рівень вібрації не перевищує гранично допустимого рівня. Але як видно з рис.4, адаптивні до фактичної вимірювальної інформації статистично можливі та статистично допустимі межі реагують на аномальну поведінку середньоквадратичного рівня вібрації. На рис.4. для прикладу побудовані статистично можливі та статистично допустимі межі для випадків: (А) - стрибкоподібного збільшення математичного очікування рівня вібрації, (Б) - появи "викидів" рівня вібрації, (В) - стрибкоподібного збільшення середньоквадратичного відхилення рівня вібрації.

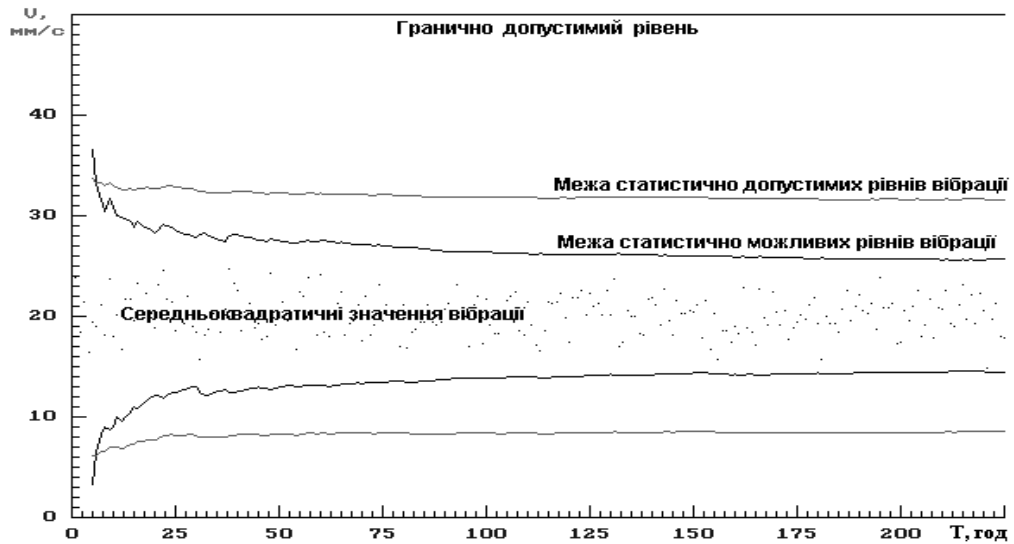


Рис.3. Результати розрахунку меж статистично можливих та статистично допустимих рівнів вібрації при відсутності несправностей двигуна

При застосуванні адаптивних статистично можливих та статистично допустимих меж рівня вібрації, діагностичними ознаками прояву несправностей слід вважати:

- перегиб меж (див. випадок А на рис.4);
- стрибок меж (див. випадок Б на рис.4);
- розширення меж (див. випадок В на рис.4);
- перетин статистично можливих меж з статистично допустимими межами.

Всі наведені вище ознаки в результаті призводять до виходу середньоквадратичного рівня вібрації за статистично можливі або статистично допустимі межі (всі випадки на рис.4), що дозволяє фо-

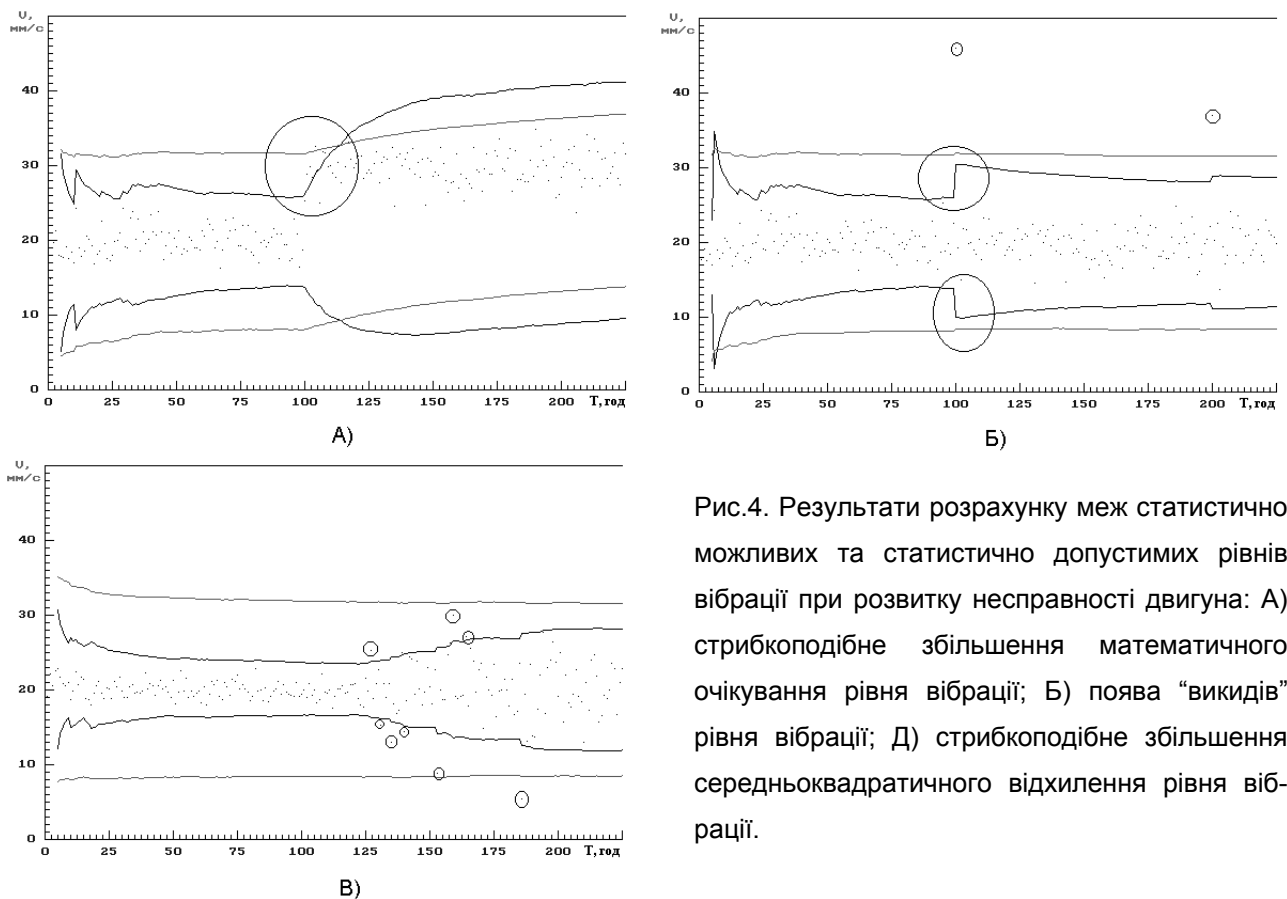


Рис.4. Результати розрахунку меж статистично можливих та статистично допустимих рівнів вібрації при розвитку несправності двигуна: А) стрибкоподібне збільшення математичного очікування рівня вібрації; Б) поява "викидів" рівня вібрації; Д) стрибкоподібне збільшення середньоквадратичного відхилення рівня вібрації.

рмалізувати та автоматизувати процес обробки інформації.

Таким чином, запропонований підхід до обробки виміральної інформації на основі теорії толерантних меж дозволяє, використовуючи простий математичний апарат, виконувати побудову статистичних меж середньоквадратичного рівня вібрації, що є адаптивними та дозволяють оперативно виявити несправність на ранніх етапах її розвитку. Безумовно, даний підхід не є заміною більш потужного апарату спектрального аналізу вібропараметрів, а є передумовою його застосування при виявленні діагностичних ознак, що зображені на рис.4.

ЛІТЕРАТУРА

1. Дорошко С.М. Контроль и диагностирование технического состояния газотурбинных двигателей по вибрационным параметрам. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.
2. Технические средства диагностирования:Справочник / Клюев В.В., Пархоменко П.П., Абрамчук В.Е. и др. – Под общей ред. Клюева В.В. – М.: Машиностроение, 1989. – 672 с.
3. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. - М.: Издательство физико-математической литературы, 1958. – 464 с.