

## МАШИНОЗНАВСТВО

УДК 621.112.32

Л.М. Гельман, д.т.н., проф.

Л.М. Удовенко, аспір.

Національний технічний університет України "КПІ"

В.Т. Ширков, заст. гол. інж.

Запорізьке ВАТ "Мотор Січ"

ПОПЕРЕДЖУВАЛЬНА ВІБРОАКУСТИЧНА ДІАГНОСТИКА  
РОТОРНИХ СИСТЕМ

*Проведена апробація методу попереджувальної віброакустичної діагностики роторних систем із використанням акустичних діагностичних паспортів. Проведена оцінка діагностичних ознак та експериментально підтверджена їх залежність від частоти обертання вала двигуна.*

**1. Вступ**

В роботі розглянутий новий [1] метод попереджувальної віброакустичної діагностики вузлів (вентилятор, компресор, турбіна) роторних систем, що ґрунтується на обробці власного віброакустичного шуму цих систем та акустичній діагностичній паспортизації роторних деталей двигуна.

Ціль роботи – експериментальна апробація методу для роторних вузлів авіаційного газотурбінного двигуна та одержання акустичного діагностичного паспорта двигуна.

Неруйнівні методи діагностики деталей роторних систем дозволяють виявити наявність чи відсутність втомних пошкоджень, але не дозволяють попередити зазначені пошкодження.

Однією з основних причин виникнення втомних пошкоджень обертових роторних деталей є високий рівень вібраційних навантажень на ці деталі. Запропонований метод використовує попереджувальний підхід: замість діагностики втомних пошкоджень пропонується діагностика підвищених рівнів вібраційних навантажень на обертові деталі роторних систем.

Метод є перспективним, тому що своєчасне виявлення підвищених навантажень дозволить попередити виникнення втомних пошкоджень шляхом усунення причин, що викликають підвищені навантаження.

**2. Експериментальна оцінка діагностичних ознак**

Головними причинами, що викликають вібрацію і шум вузлів роторних систем, є механічна та аеродинамічна навантаженість [2, 3, 4]. Механічна навантаженість обумовлена ротором двигуна, що обертається зі швидкістю  $n$  (об./хв) та генерує вузькополосні гармонійні сигнали на роторній частоті та кратних їй частотах:

$$f_{pj} = \frac{j \cdot n}{60}, \quad (1)$$

де  $j = 1, 2, 3, \dots$

Аеродинамічна навантаженість обумовлена нерівномірністю потоку, що обтікає ротор, та неідентичністю роторних деталей, при цьому генеруються вузькополосні сигнали на лопатевих частотах (частотах проходження лопаток) та кратних їм частотах:

$$f_{z_i} = \frac{j \cdot z_i \cdot n}{60}, \quad (2)$$

де  $z_i$  – число лопаток  $i$ -того ступеня компресора чи турбіни;

$f_{z_i}$  – частота проходження лопаток  $i$ -того ступеня.

Для оцінки рівнів механічної та аеродинамічної навантажень кожного вузла використовуємо [1] дві діагностичні ознаки: нормовані сумарні інтенсивності вузькополосних сигналів на роторній частоті та кратних їй частотах і лопатевій частоті та кратних їй частотах відповідно.

Процедура оцінки діагностичних ознак складається з таких етапів:

- а) реєстрація акустичних шумів двигуна;
- б) одержання не когерентно усереднених спектральних щільностей потужності акустичного шуму двигуна;
- в) виявлення вузькополосних сигналів в отриманих спектральних щільностях;
- г) ідентифікація виявлених сигналів у спектральній області;+
- д) оцінка діагностичних ознак і діагностична паспортизація роторних деталей двигуна.

### 2.1. Реєстрація акустичних шумів двигуна

Реєстрація акустичних шумів двигуна проводилася на іспитовому стенді за допомогою комплексу вимірювальної апаратури ВШВ 003-М2 і магнітографа НО68. Були отримані записи акустичного шуму одновального газотурбінного двигуна на 13 стаціонарних режимах: від 74 % до 98 % від максимальної швидкості обертання ротора з дискретністю 2 %.

### 2.2. Одержання некогерентно усереднених спектральних щільностей потужності акустичного шуму двигуна

Обробка акустичного шуму проводилася на ЕОМ за допомогою пакета “ПОС” НПО “Міра” [5]. Оброблено записи 13 стаціонарних режимів. Отримано спектральні щільності потужності акустичного шуму двигуна для всіх досліджуваних режимів у діапазоні частот  $0 \div 20$  кГц.

Спектральна щільність потужності  $S(f)$  акустичного шуму двигуна для режиму 74 % представлена на рис. 1, на якому чітко виділяються вузькополосні сигнали на роторних частотах та частотах проходження лопаток ступенів компресора і турбіни.

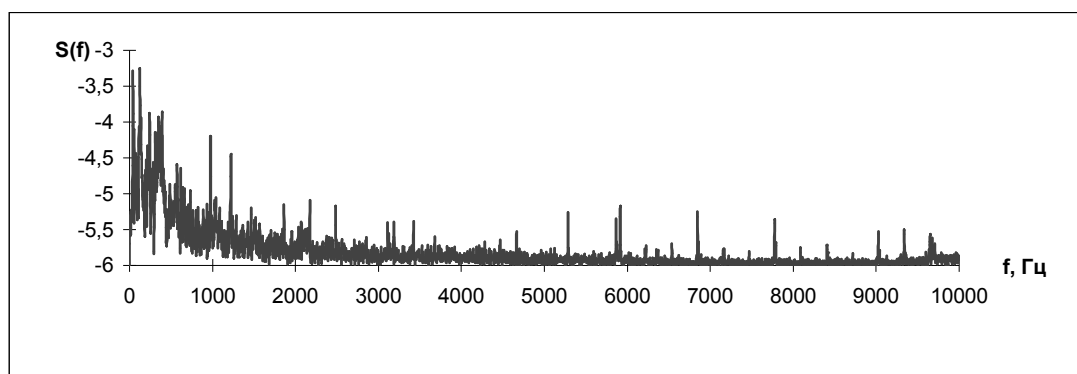


Рис. 1. Спектральна щільність потужності акустичного шуму одновального двигуна (частота обертання вала компресора 240 Гц).

### 2.3. Виявлення вузькополосних сигналів в отриманих спектральних щільностях, оцінка інтенсивностей та частот виявлених сигналів

Виявлення вузькополосних сигналів в отриманих спектральних щільностях і оцінка інтенсивностей проводилися за допомогою методу двостороннього контрасту [2], оцінка частот виявлених сигналів проводилася на підставі показників таходатчика для кожного стаціонарного режиму.

### 2.4. Ідентифікація виявлених сигналів у спектральній області

Ідентифікація виявлених сигналів у спектральній області проводилася шляхом зіставлення переліку оцінок частот виявлених сигналів із очікуваним переліком вальних частот і їхніх гармонік, лопатевих частот і їхніх гармонік. За результатами виявлення оцінки та ідентифікації вузькополосних сигналів у спектральній області, ми одержуємо акустичну спектральну “картину”, що складається зі спектральних амплітуд і частот вищезгаданих сигналів.

Попереджувальна діагностика проводиться за акустичним діагностичним паспортом двигуна, що складається з акустичних спектральних “картин” та їх опису. Отримано акустичні діагностичні паспорти двигуна для всіх розглянутих режимів.

Акустичний паспорт для режиму 74 % представлений у табл. 1.

### 2.5. Оцінка діагностичних ознак і діагностична паспортизація роторних деталей двигуна

Оцінка діагностичних ознак проводилася: а) шляхом підсумовування спектральних амплітуд виявлених сигналів вальних гармонік; б) шляхом підсумовування спектральних амплітуд виявлених сигналів лопатевих гармонік для кожної ступені двигуна. Діагностичні ознаки, що отримані для семи ступнів компресора і турбіни представлені на рис. 2, 3.

За результатами обробки акустичних шумів для всіх перерахованих вище режимів можна відзначити наступне. Отримані діагностичні дані залежать від вимірюваної частоти обертання ротора. Найбільш яскраво виражені перша роторна і перша лопатева гармоніки першої ступені компресора. Графіки залежностей інтенсивностей цих гармонік від режиму двигуна представлені на рис. 4. Перевищення над рівнем шуму складають від 5 дБ до 30 дБ. Інші гармоніки, в основному, мають меншу інтенсивність (перевищення над рівнем шуму менше 5 дБ), хоча іноді окремі гармоніки досягають значної величини (перевищення над рівнем шуму до 25 дБ). До режиму 78 % перша лопатева гармоніка першої ступені компресора перевищує першу роторну.

Таблиця 1

Акустичний паспорт одновального авіаційного газотурбінного двигуна

| Вузол двигуна, ступінь, гармоніка | Частота            | Амплітуда |
|-----------------------------------|--------------------|-----------|
| Ротор компресора                  | Роторні гармоніки  |           |
| 1                                 | 240                | 18,51     |
| 2                                 | 480                | 13,14     |
| 3                                 | 720                | 12,97     |
| 4                                 | 960                | 4,63      |
| 6                                 | 1440               | 4,42      |
| 8                                 | 1920               | 3,08      |
| 10                                | 2400               | 6,14      |
| 15                                | 3600               | 2,17      |
| 16                                | 3840               | 6,67      |
| 18                                | 4320               | 3,65      |
| 21                                | 5040               | 10,67     |
| 22                                | 5280               | 1,31      |
| 23                                | 5520               | 0,63      |
| 24                                | 5760               | 56,09     |
| 25                                | 6000               | 4,81      |
| Перша ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 8880               | 21,31     |
| 2                                 | 17760              | 2,91      |
| Друга ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 10320              | 10,77     |
| 2                                 | 20640              | 4,24      |
| Третя ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 14160              | 0,98      |
| Четверта ступінь компресора       | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 16080              | 3,23      |
| П'ята ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 17520              | 3,54      |
| Шоста ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 19440              | 0,84      |
| Сьома ступінь компресора          | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 21360              | 0,84      |
| Ротор турбіни                     | Роторні гармоніки  |           |
| 1                                 | 165                | 10,99     |
| Перша ступінь турбіни             | Лопатеві гармоніки |           |
| 1                                 | 10560              | 1,02      |

На інших режимах перша роторна гармоніка перевищує лопатеву. Рівень інтенсивності першої лопатевої гармоніки збільшується до режиму 78 %, а потім знижується. Рівень інтенсивності першої роторної гармоніки збільшується до режиму 80 %, а потім також знижується. Ближче до режиму 98 % рівні інтенсивностей першої роторної і першої лопатевої гармонік відрізняються незначно.

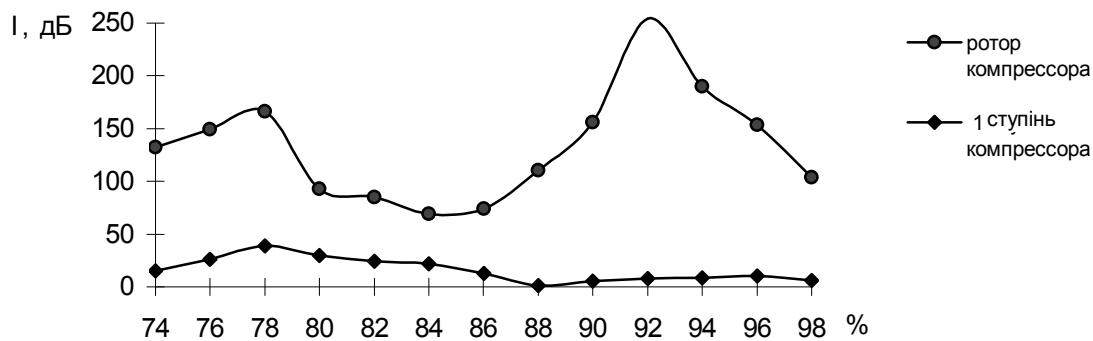


Рис. 2. Залежність діагностичних ознак від частоти обертання ротора для ротора та першого ступеня компресора

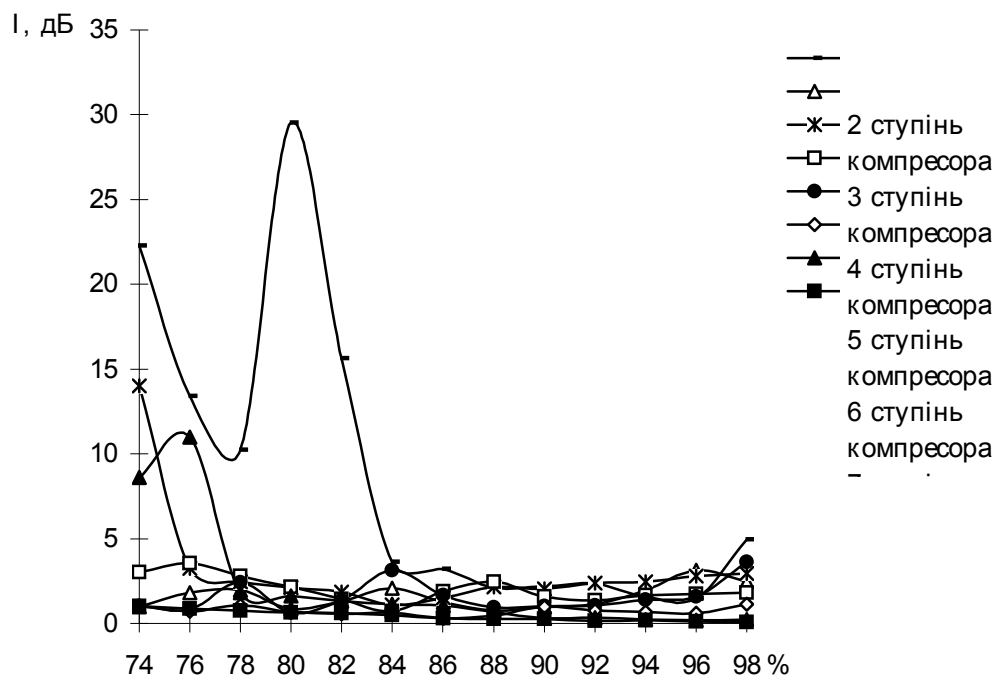


Рис. 4. Залежність діагностичних ознак від частоти обертання ротора для 2-4 ступенів компресора і турбіни

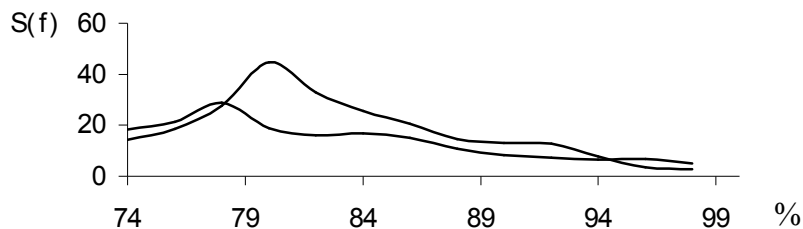


Рис. 3. Графіки залежностей інтенсивностей першої роторної гармоніки і першої лопатевої гармоніки компресора від режиму двигуна

### 3. Висновок.

1. Проведено експериментальну апробацію безрозбірного автоматичного методу попереджувальної пасивної низькочастотної віброакустичної діагностики для роторних вузлів одновалового авіаційного газотурбінного двигуна.

В основі методу лежить той факт, що високі рівні вібраційних навантажностей будь-якої ступені збільшують амплітуди роторних гармонік і гармонік частоти проходження лопаток.

Преваги методу: попереджувальний підхід, швидкість діагностики, адаптивний підхід, що дозволяє тестувати різні типи двигунів на різних режимах.

2. На іспитовому стенді експериментально проведена діагностика наступних вузлів: ротора, ступеней компресора і турбіни одновалового газотурбінного двигуна на 13 стаціонарних режимах (від 74 % до 98 % від максимальної швидкості обертання ротора).

3. Запропоновані для попереджувальної діагностики та експериментально отримано акустичні паспорти двигуна, що складаються з акустичних спектральних картин і їх опису для усіх вищезгаданих режимів. Частота обертання ротора є адаптивним параметром для попереджувального методу діагностики.

4. Експериментально зроблена оцінка діагностичних ознак і підтверджена їхня залежність від вимірюваної частоти обертання вала.

### ЛІТЕРАТУРА:

1. Gelman L.M., Kripak D.A., Fedorov V.V., Udovenko L.N. Condition monitoring diagnosis methods of helicopter units // 2000 Mechanical Systems and Signal Processing, Pennsylvania, Academic Press. – 2000. – 14(4). – P. 613–624.
2. Елдан Л.А., Крипак Д.А. Авіаційна віброакустична діагностика ідентифікації. – І.: Інститут радіотехніки, 1986. – 190 н.
3. Елдан Л.А., Івченко А.І., Діако А.В., Олійник А.І. Універсальні методи діагностики авіаційних двигунів // Вісник ЖІТІ, 1991. – №. 38–44.
4. Івченко А.І., Діако А.В. Ідентифікація параметрів віброакустичних ознак ідентифікації. – І.: Інститут радіотехніки, 1991. – №. 51–63.
5. Діако А.В. Методи діагностики ІІН (ІІІ (ІІІ “ІІІ”). – 1995. – 244 н.
6. Алейнік Е.І., Навічак А.А. Ідентифікація параметрів віброакустичних ознак ідентифікації // Вісник ЖІТІ. – І.: Інститут радіотехніки, 1980. – 0. 35. – 1 11. – №. 59–62.

ГЕЛЬМАН Леонід Муйсійович – доктор технічних наук, професор Національного технічного університету України “КП”.

Наукові інтереси:

- обробка сигналів;
- віброакустичні методи діагностики;
- адаптивні системи.

УДОВЕНКО Людмила Миколаївна – аспірантка Національного технічного університету України “КП”.

Наукові інтереси:

- обробка сигналів;
- віброакустичні методи діагностики.

ШИРКОВ Володимир Трохимович – заступник головного інженера Запорізького ВАР “Мотор Січ”

Наукові інтереси:

- експлуатація авіаційних двигунів.

Подано 15.05.2001

Гельман Л.М., Удовенко Л.М., Ширков В.Т. Попереджувальна віброакустична діагностика роторних систем

Гельман Л.М., Удовенко Л.Н., Ширков В.Т. Предупредительная виброакустическая диагностика роторных систем

Gelman L.M., Udovenko L.N., Shirkov V.T. Precautionary vibroacoustic diagnostics of rotor systems

УДК 621.112.32

**Предупредительная виброакустическая диагностика роторных систем / Л.М. Гельман, Л.Н. Удовенко, В.Т. Ширков**

Проведена апробация метода предупредительной виброакустической диагностики роторных систем с использованием акустических диагностических паспортов. Проведена оценка диагностических признаков и экспериментально подтверждена их зависимость от частоты вращения вала двигателя.

УДК 621.112.32

**Precautionary vibroacoustic diagnostics of rotor systems / L.M. Gelman, L.N. Udovenko, V.T. Shirkov**

The method of precautionary vibroacoustic diagnostics of rotor systems with use of the acoustic diagnostic passports is carried out. The estimation of diagnostic attributes is carried out and their dependence on frequency of engine shaft rotation is confirmed experimentally.