



ПЕРЕВІРКА ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ТА ЕФЕКТИВНОСТІ БАГАТОРІВНЕВОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВІБРАЦІЇ АВІАЦІЙНИХ ДВИГУНІВ

О. М. ПАВЛОВСЬКИЙ

НТУУ «Київський політехнічний ін-т». 03056, м. Київ, пр-т Перемоги, 37. E-mail: a_pav@ukr.net

Підтверджено працездатність та ефективність розробленої інформаційної моделі багаторівневої системи контролю вібрації авіаційних двигунів, яка має три рівні функціонування. Перший рівень забезпечує виконання контрольних функцій вібраційного стану авіаційного двигуна. Другий та третій функціональні рівні системи забезпечують виконання діагностичних функцій – виявлення дефектів лопаток турбокомпресора та тріщини валу. Підтверджена коректність реакції системи на подолання порогових значень вібрації для контрольного рівня. Визначено діагностичні ознаки для рівня діагностики пошкодження лопаток робочих коліс. Встановлено зміну значень діагностичних ознак при розвитку пошкоджень лопаток робочих коліс та тріщин ротора авіаційного двигуна. Бібліогр. 6, рис. 5.

Ключові слова: вібрація авіаційних двигунів, багаторівнева система контролю вібрації, вейвлет-розкладання, основна роторна гармоніка, тріщиноподібне пошкодження вала

Забезпечення експлуатаційної надійності авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) ґрунтується на принципі попередження несправностей, пошкоджень та відмов двигунів в експлуатації. Необхідною умовою цього є високий рівень розвитку систем діагностування, а однією з вимог, що пред'являються до засобів діагностики і контролю ГТД, є раннє виявлення пошкоджень і дефектів. Практично всі типи двигунів характеризуються сукупністю однакових найбільш небезпечних пошкоджень та несправностей роторних елементів, таких як: тріщини, забоїни та обриви лопаток компресора; забоїни та прогари лопаток турбіни; руйнування валів та заклинювання роторів. Діагностика таких пошкоджень на етапі їх початкового розвитку забезпечить попередження відмов і руйнування двигуна в польоті.

Для діагностики ГТД в експлуатації використовуються контроль наявності та концентрації металів у мастилi, контроль параметрів вібрації та шуму, аналіз параметрів робочих процесів ГТД, які реєструються в польоті. Діагностування відбувається на стаціонарних режимах експлуатації, а обмеження маси бортового обладнання зумовлює використання тільки простих алгоритмів діагностування. Система контролю вібрації двигуна (СКВД) входить до складу бортової системи керування та контролю ГТД. Головним завданням бортової СКВД є попередження передаварійних станів двигуна у разі перевищення вібрацією встановлених значень. Функціональні можливості бортових СКВД обмежуються лише контролем рівнів вібрації на основних роторних гармоніках та порівнянням їх значень зі встановленими

нормами на стаціонарному режимі. Такі системи зараз непридатні для контролю вібрації на нестационарних режимах, вони не забезпечують оперативного виявлення найбільш небезпечних початкових пошкоджень роторних елементів, які під час експлуатації ГТД можуть призвести до руйнування двигуна.

Введення в експлуатацію нових ГТД підвищеної контрольної придатності, модернізація елементної бази бортових СКВД дає можливість застосування сучасних методів цифрової обробки вібраційних сигналів на стаціонарних та нестационарних режимах експлуатації ГТД. Це дозволяє реалізувати в бортових СКВД не тільки наявну зараз контрольну функцію, а й діагностичні функції для раннього виявлення найнебезпечніших пошкоджень роторних елементів.

В роботі [1] запропоновано структуру такої багаторівневої системи контролю вібрації (БСКВ) на основі об'єднання модернізованої підсистеми контролю вібрації на основних роторних гармоніках для стаціонарного режиму та двох нових підсистем для діагностики пошкоджень роторних елементів на стаціонарних і нестационарних режимах. Це дозволить розширити функціональні можливості існуючих бортових систем контролю вібрації і забезпечить виявлення найбільш небезпечних пошкоджень роторних елементів та попередження передаварійних станів ГТД в експлуатації. Спрощену схему БСКВ наведено на рис. 1. Перший рівень функціонування є основним для забезпечення попередження передаварійних станів і на ньому відбувається безпосередній контроль рівня вібрації на основних роторних гармоніках на стаціонарному режимі роботи. Рівень був модернізований шляхом використання сучасної

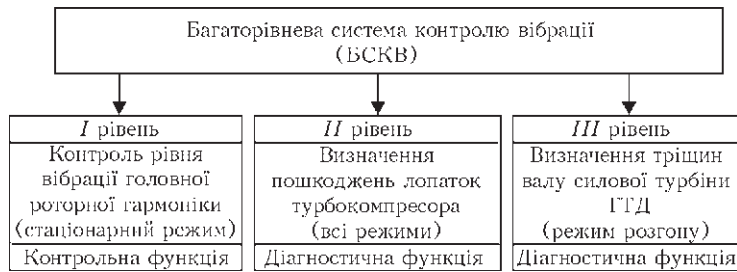


Рис. 1. Спрощена схема багаторівневої системи контролю вібрації

цифрової елементної бази та цифрової вузькосмугової фільтрації [2]. Другий рівень призначений для діагностування початкових тріщин лопаток турбокомпресора, функціонування діагностичного апарату цього рівня відбувається на стаціонарному та нестаціонарних режимах експлуатації двигуна [3]. Третій рівень призначений для виявлення тріщиноподібного пошкодження валу силової турбіни при розгоні ротора ГТД [4].

Для оцінки працездатності та ефективності системи було створено її інформаційну модель. Структурну схему інформаційної моделі БСКВ наведено на рис. 2, у відповідності до якої інформаційна модель, як і запропонована система, виконує перераховані нижче контрольні та діагностичні функції.

Перший рівень функціонування (контроль вібрації на основних роторних гармоніках на стаціонарному режимі роботи двигуна) призначений для:

- формування вібраційних сигналів;
- виділення основної роторної гармоніки шляхом цифрової вузькосмугової фільтрації на стаціонарних режимах роботи двигуна;
- порівняння амплітуди усередненого значення роторної гармоніки з пороговими значеннями, які відповідають рівням «Підвищена вібрація» та «Небезпечна вібрація»;
- інформування користувача шляхом світлової індикації у разі перевищення порогових значень;
- запис даних у файл.

Другий рівень (діагностування пошкодження лопаток робочих коліс) призначений для:

- формування широкосмугових вібраційних сигналів, що випромінюються робочими колесами без пошкодження та з пошкодженням однієї чи декількох лопаток на стаціонарному та нестаціонарних режимах експлуатації ГТД;
- вейвлет-розкладання на п'ять рівнів сформованої широкосмугової вібрації;

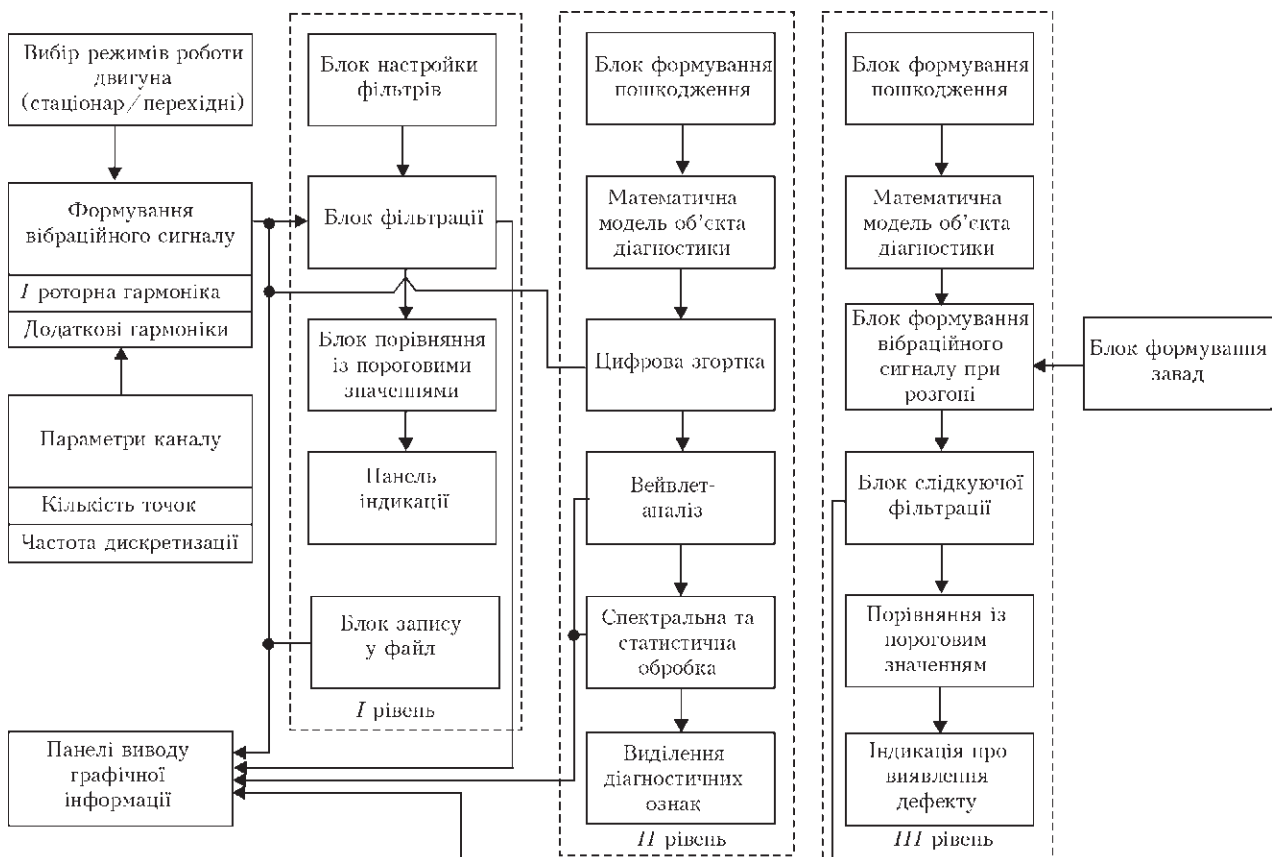


Рис. 2. Структурна схема інформаційної моделі БСКВ



- графічного представлення елементів вейвлет-розкладання;
- відображення спектрів елементів вейвлет-розкладання;
- визначення та відображення статистичних характеристик елементів вейвлет-розкладання;
- формування діагностичних ознак пошкодження;
- прийняття рішення про поточний функціональний стан лопаток робочого колеса.

Третій рівень (діагностування дефектів типу тріщини валу) призначений для:

- формування вібраційних сигналів, що супроводжують прискорене (при розгоні ротора ГТД) обертання валу без пошкодження та з тріщиноподібним пошкодженням;
- виділення основної роторної гармоніки на режимі розгону двигуна шляхом використання розробленого слідкуючого вузькосмугового фільтра;
- аналізу пікових значень вібрації в області субгармонічних резонансів;
- формування діагностичних ознак пошкодження;
- прийняття рішення про поточний функціональний стан валу ротора.

Для моделювання повного циклу процесу контролю та діагностики розроблена інформаційна модель має додаткові блоки генерації вібраційних сигналів, блоки формування моделей об'єктів діагностики для другого та третього рівнів та блоки формування дефектів початкових пошкоджень тріщин лопаток робочих коліс та дефектів обертючих валів ротора. Для прикладу модель реалізована лише для одного вимірювального каналу вібрації ГТД, оскільки для інших каналів принцип функціонування БСКВ залишається незмінний, а кількість каналів, в залежності від обраного двигуна, буде різною.

Особливості реалізації інформаційної моделі БСКВ у вигляді віртуального приладу середовища графічного програмування NI LabVIEW наведено в роботі [5].

Перевірка функціонування першого рівня інформаційної моделі БСКВ. У відповідності до виконуваних БСКВ функцій, перший рівень системи призначений для виділення з широкосмугового вимірюваного сигналу вузькосмугових складових на стаціонарному режимі роботи, що відповідають основним роторним гармонікам контрольованих ступенів двигуна, визначення усередненого значення амплітуди вібрації на цих гармоніках та порівняння його з установленими пороговими значеннями (нормами). Для виділення інформативної (роторної) складової вібрації використовується цифровий вузькосмуговий фільтр Батерворта 10-го порядку, центральна частота смуги пропускання якого відповідає основній

частоті обертання контрольованого ступеня ротора [2]. Після виділення із сигналу інформативних складових проводиться усереднення за виразом:

$$A'_1 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - A_{\text{серед}})^2},$$

де n – кількість значень; A_i – виміряні значення амплітуди головної роторної гармоніки після фільтрації; $A_{\text{серед}}$ – середнє значення.

Для визначення поточного вібраційного стану ГТД та попередження передаварійних станів відбувається порівняння отриманого значення вібрації з установленими пороговими значеннями, що відповідають рівням «Підвищена вібрація» або «Небезпечна вібрація». При перевищенні порогових значень система сповіщає про це користувача відповідною індикацією.

Математичною умовою для прийняття рішення про поточний рівень вібрації є:

$$\begin{cases} x_{\text{СКВ}} \geq x_{\text{підв}}, & \text{TO } s = s_{\text{підв}}, \\ x_{\text{СКВ}} \geq x_{\text{неб}}, & \text{TO } s = s_{\text{неб}}, \\ x_{\text{СКВ}} < x_{\text{підв}}, & \text{TO } s = s_{\text{норм}}, \end{cases}$$

де $x_{\text{СКВ}} = A'_1$ – середньоквадратичне значення амплітуди вібрації після фільтрації; $x_{\text{підв}}$ – порогове значення підвищеної вібрації; $x_{\text{неб}}$ – порогове значення небезпечної вібрації; s – показник стану системи; $s_{\text{підв}}$ – виявлено підвищену вібрацію; $s_{\text{неб}}$ – виявлено небезпечну вібрацію; $s_{\text{норм}}$ – нормальний рівень вібрації.

Для підтвердження ефективного функціонування першого рівня БСКВ у якості порогових значень «Підвищена вібрація» або «Небезпечна вібрація» були обрані значення $A_n = 40$ мм/с і $A_n = 50$ мм/с для двигуна МС-500 [3]. У якості тестового сигналу із вібродатчика було сформовано сигнал виду:

$$y(t) = \sum_{i=1}^4 A_i \sin(2\pi f_i t) + n(t),$$

де $A_1 = 30$ мм/с; $A_2 = A_3 = A_4 = 0,5A_1$; $f_1 - 100$; $f_2 - 300$; $f_3 - 103$; $f_4 - 50$ Гц.

Змінюючи амплітуду головної роторної гармоніки A_1 та побічних гармонік A_i , було встановлено відповідну однозначність реакції системи на подолання порогових значень, що, у свою чергу, підтвердило працездатність першого рівня БСКВ.

Перевірка функціонування другого рівня інформаційної моделі БСКВ. Другий рівень функціонування БСКВ призначений для виконання діагностичної функції виявлення початкових пошкоджень (тріщин) лопаток робочих коліс турбокомпресора. Для виявлення складових вібраційного сигналу, що обумовлені наявністю тріщини



лопаток робочих коліс турбокомпресора, в роботі [3] запропоновано та обґрунтовано використання вейвлет-розкладання із використанням вейвлетів сімейства Добеші 10-го порядку (db10) з подальшим використанням отриманого набору елементів розкладання (як окремих вибірок вібраційного сигналу) для визначення безрозмірних амплітудних характеристик: коефіцієнтів форми, фону, імпульсності та пік-фактору.

Перевірку працездатності розробленої моделі другого рівня функціонування БСКВ проведено у два етапи. На першому були виділені діагностичні ознаки, що свідчать про наявність пошкодження лопатки, а на другому встановлено функціональні залежності діагностичних ознак від параметру пошкодження та кількості пошкоджених лопаток. Для виділення діагностичних ознак було порівняно параметри апроксимацій та деталей вейвлет-розкладання для бездефектного стану робочого колеса та за наявності тріщини однієї чи декількох лопаток. Можливими чутливими параметрами у відповідності до роботи [3] було обрано максимальні і мінімальні значення, СКЗ, коефіцієнти форми та фону, пік-фактор елементів вейвлет-розкладання.

У якості сигналу стаціонарного вхідного збурення використано:

$$y(t) = \sum_{i=1}^5 A_i \sin(2\pi f_i t),$$

де $A_1=30$ мм/с, $A_2=A_3=A_4=0,5A_1$, $A_5=0,1$ мм/с, $f_1=300$, $f_2=100$, $f_3=103$, $f_4=50$, $f_5=600$ Гц.

Частота п'ятої складової обрана із урахування того, що для використаного значення власної частоти лопаток робочого колеса 600 Гц забезпечується збурення резонансних коливань, що підвищує ефективність виявлення дефекту [3].

В результаті проведених модельних експериментів, обробки та аналізу вібраційних сигналів для робочого колеса з бездефектними лопатка-

ми та робочого колеса при пошкодженні однієї чи декількох лопаток було встановлено, що поява та розвиток пошкодження призводить до появи постійної складової апроксимації – самого низькочастотного елементу вейвлет-розкладання. Тому у якості діагностичної ознаки доцільно прийняти значення постійної складової апроксимацій.

Для виявлення кількісної діагностичної ознаки змінювали параметр пошкодження (відносне змінювання жорсткості лопатки робочого колеса) у межах від 0,01 до 0,1 [2]. При прѣдослідженні було виявлено декілька параметрів, які чутливі до зміни параметру пошкодження та змінюються однозначно. Такими параметрами елементів вейвлет-розкладу є коефіцієнт форми та коефіцієнт фону [3]. Найбільша чутливість цих безрозмірних коефіцієнтів до зміни параметру пошкодження була виявлена для деталі другого рівня розкладу. Узагальнені результати дослідження наведено на рис. 3 для різних значень параметру пошкодження і різної кількості пошкоджених лопаток.

Як видно з рис. 3, а, при збільшенні параметру пошкодження в зазначених вище межах значення коефіцієнта форми зменшуються приблизно на 12 % у порівнянні із бездефектним станом для однієї лопатки з пошкодженням, а при збільшенні кількості лопаток з пошкодженням до п'яти зменшення коефіцієнта форми досягає приблизно 24 %.

Аналіз результатів, наведених на рис. 3, б, показав, що при збільшенні параметру пошкодження значення коефіцієнта фону однозначно зростає: приблизно у три рази у порівнянні із бездефектним станом для однієї пошкодженої лопатки та більше ніж у п'ять разів для п'яти пошкоджених лопаток. Збільшення ознаки відбувається і при збільшенні кількості пошкоджених лопаток.

Все це дозволило сформулювати правило для прийняття рішення про функціональний стан об'єкта діагностики:

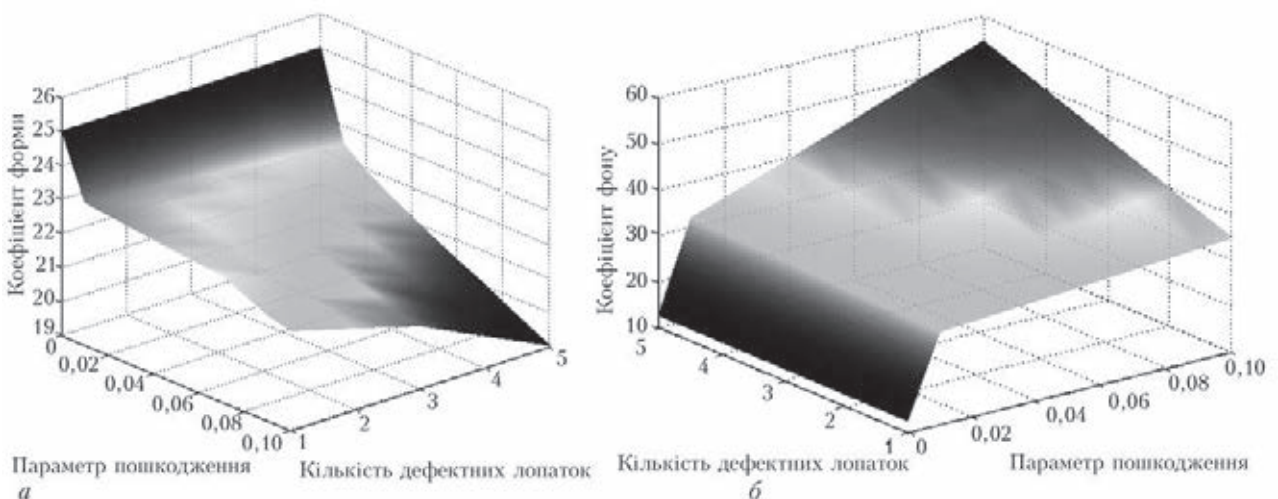


Рис. 3. Залежності коефіцієнтів форми (а) та фону (б) від параметру пошкодження та кількості пошкоджених лопаток

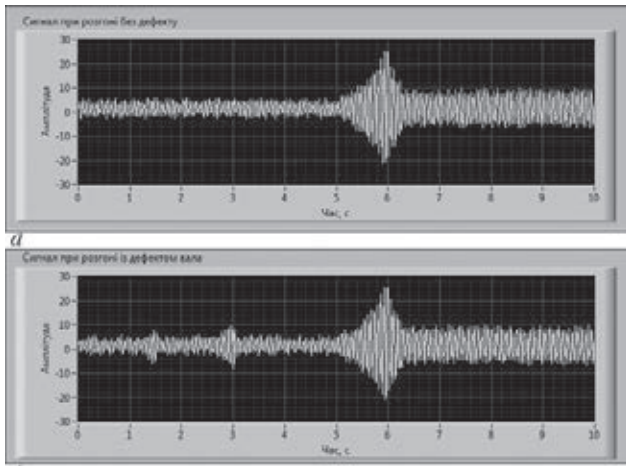


Рис. 4. Вібраційні сигнали, що аналізуються на третьому рівні БСКВ при розгоні ротора: а – вал без пошкодження; б – вал з пошкодженням

$$\begin{cases} x_{\text{пост}} > 0, \text{ то } s_1 = s_{\text{деф}}, \\ k_{\text{фор}} \geq k_{\text{пор1}}, \text{ то } s_2 = s_{\text{деф}}, \\ k_{\text{фону}} < k_{\text{пор2}}, \text{ то } s_3 = s_{\text{деф}}, \\ s_{\Sigma} \in s_1 \cup s_2 \cup s_3, \text{ то } s_{\Sigma} = s_{\Sigma\text{деф}}, \end{cases} \quad (1)$$

де $x_{\text{пост}}$ – постійна складова апроксимацій вейвлет-розкладу; $k_{\text{фор}}$ – коефіцієнт форми; $k_{\text{фону}}$ – коефіцієнт фону; $k_{\text{пор1}}$, $k_{\text{пор2}}$ – порогові значення; s – показник стану системи; s_1 – s_3 – показники стану діагностичних ознак; s_{Σ} – показник стану системи по трьом діагностичним ознакам; $s_{\Sigma\text{деф}}$ – показник виявлення дефекту.

Показник стану системи s_{Σ} представляє собою кон’юнкційний показник із трьох діагностичних ознак – постійної складової апроксимацій вейвлет-розкладання, значень коефіцієнтів форми та фону деталі другого рівня вейвлет-розкладання. Таким чином, пошкодження лопатки буде виявлено тільки за умови виконання всіх трьох нерівностей в системі (1). Такий підхід забезпечить необхідну вірогідність визначення дефекту та знизить ймовірність випадкового спрацювання системи (хибної тривоги). Результати моделювання підтвердили працездатність та ефективність інформаційної моделі другого рівня БСКВ.

Перевірка функціонування третього рівня інформаційної моделі БСКВ. Третій рівень призначений для виявлення початкових поперечних тріщин валу ротора. Діагностування відповідно до результатів роботи [4] доцільно проводити на нестационарному режимі експлуатації ГТД, наприклад, при розгоні двигуна. Для коректної роботи даного рівня системи необхідно виділяти лише головну роторну складову при умовах змінної (зростаючої) частоти. Для цього використовується вузькосмуговий слідкуючий цифровий фільтр Батерворта 10-го порядку [6].

Діагностичною ознакою наявності тріщини валу є поява та зростання субрезонансних піків перехо-

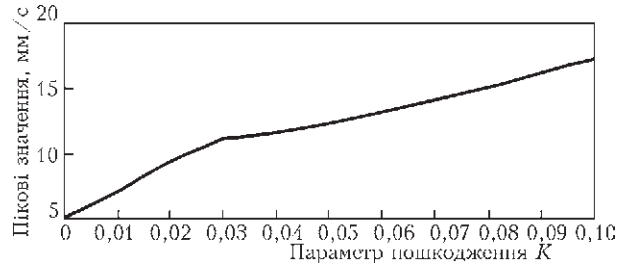


Рис. 5. Залежність пікових значень вібрації в області субгармонічних резонансів від параметра пошкодження валу ротора

ду частоти через критичне значення (до головного резонансу). Це явно спостерігається при порівнянні двох сигналів вібрації при розгоні ротора (рис. 4).

За результатами модельних експериментів було встановлено, що збільшення значення параметра пошкодження валу призводить до збільшення пікових значень вібрації в області субгармонічних резонансів (рис. 5). Таким чином, за зазначеними піковими значеннями можна приблизно оцінити наявність та ступінь пошкодження валу і прийняти рішення про захист двигуна від руйнування. Правило для прийняття рішення про функціональний стан валу ротора має вигляд:

$$\begin{cases} x_{\text{пик}} \geq x_{\text{пор}}, \text{ то } s = s_{\text{деф}}, \\ x_{\text{пик}} < x_{\text{пор}}, \text{ то } s = s_{\text{норм}}, \end{cases}$$

де $x_{\text{пик}}$ – пікове значення амплітуди вібрації до головного резонансу; $x_{\text{пор}}$ – порогове значення амплітуди вібрації; s – показник стану системи; $s_{\text{деф}}$ – дефектний стан; $s_{\text{норм}}$ – бездефектний стан.

Таким чином, проведені комп’ютерні експерименти показали працездатність третього рівня інформаційної моделі БСКВ та ефективність визначення початкових пошкоджень валу ротора ГТД на нестационарному режимі експлуатації. Результати перевірки працездатності кожного із трьох рівнів багаторівневої системи контролю вібрації підтвердили ефективність використання БСКВ для виявлення найбільш небезпечних пошкоджень роторних елементів та попередження передаварійних станів ГТД в експлуатації.

Висновки

Розроблено інформаційну модель для дослідження працездатності та ефективності багаторівневої системи контролю вібрації авіаційних двигунів. В результаті проведених модельних експериментів для кожного з трьох рівнів системи підтверджено відповідність розробленому принципу функціонування, коректність реакції системи на перевищення порогових значень вібрації (для контрольного рівня), однозначність змінювання діагностичних ознак в залежності від параметра пошкодження роторного елемента (для діагностичних рівнів).



Отримані результати підтверджують працездатність та ефективність розробленої моделі, а також доцільність використання розробленої багаторівневої системи контролю вібрації в сучасних системах керування та діагностики ГТД.

1. Pavlovskiy O., Bouraou N., Yatsko L. Multilevel vibration control system of aviation gas-turbine engines // *Vibrations in Physical systems*. – 2012. – **25**. – P. 323–328.
2. Бурау Н. И., Павловский А. М. Цифровая фильтрация в системе контроля вибрации авиационных двигателей // *Вісник інженерної академії України*. – 2012. – № 34. – С. 18–23.
3. *Методи* цифровой обработки сигналов для вибрационной диагностики авиационных двигунів / Н.И. Бурау, Л.Л. Яцко,

О.М. Павловський, Ю.В. Сопілка. – Київ: НАУ, 2012. – 152 с.

4. Яцко Л. Л. Комплексна діагностика технічного стану роторів авіаційних двигунів на стаціонарних та нестационарних режимах: дис ... канд. техн. наук. – Київ: НТУУ «КПІ», 2008. – 169 с.
5. Павловський О. М. Використання пакету LABVIEW для моделювання та аналізу ефективності системи обробки вібраційних сигналів авіаційного двигуна // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Сер. Приладобудування. – 2013. – № 45. – С. 148–157.
6. *Разработка и исследование цифровых следящих фильтров для системы контроля вибрации авиационного двигателя на нестационарных режимах* / Н.И. Бурау, А.М. Павловский, Л.Л. Яцко, А.В. Иванченко // *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2013. – № 10(107). – С. 171–176.

Operability and effectiveness of the developed informational model of multi-level system for monitoring aircraft engine vibrations, having three levels of functioning, was confirmed. The first level provides fulfillment of control functions of aircraft engine vibrational state. The second and third functional levels of the system ensure fulfillment of diagnostic functions – detection of turbocompressor blade defects and shaft crack. Correctness of the system reaction for overriding vibration threshold values for the control level was confirmed. Diagnostic indices for impeller blade diagnostic level were determined. Change of values of diagnostic indices at development of impeller blade damage and rotor cracks in aircraft engine was determined. 6 References, 5 Figures.

Keywords: aircraft engine vibration, multi-level system of vibration control, wavelet decomposition, main rotor harmonics, cracklike shaft damage

Надійшла до редакції
19.01.2015

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ СПЕКТР-ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ

Преимущества спектр-интерферометрического метода определения остаточных напряжений

- высокая точность определения остаточных напряжений;
- бесконтактность измерений;
- оперативное определение напряжений;
- результаты определения напряжений сохраняются в виде документа;
- низкая стоимость отдельных измерений;
- возможность определения градиента напряжений в контролируемой точке.

ОПЕРАТИВНЫЙ КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА КОНСТРУКЦИЙ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОННОЙ ШИРОГРАФИИ

Электронная широгрфия – это современный метод контроля качества конструкций, позволяющий проводить исследования в реальном масштабе времени на объектах сложной геометрической формы и произвольных размеров.

Метод эффективен для применения в промышленности в следующих направлениях:

- измерение и анализ деформаций;
- неразрушающий контроль качества конструкций, изготовленных из различных конструкционных материалов;
- оптимизация узлов и элементов конструкций в процессе их изготовления.

Основными преимуществами метода являются:

- оперативность контроля качества, бесконтактность;
- высокая чувствительность;
- возможность получения информации о деформировании поверхности контролируемого объекта;
- отсутствие требований по виброзащите и предварительной специальной подготовки исследуемой поверхности, автоматизация процесса контроля.

Мобильная широгрфическая система состоит из малогабаритного широгрфического интерферометра, лазера со световодом, портативного компьютера.

E-mail: office@paton.kiev.ua