**Бурау Надія Іванівна. Віброакустична діагностика тріщиноподібних пошкоджень турболопатних машин на стаціонарних та нестаціонарних режимах : дис... д-ра техн. наук: 05.11.13 / Національний технічний ун-т України "Київський політехнічний ін- т". — К., 2005. — 397арк. : рис. — Бібліогр.: арк. 331-355.**

|  |  |
| --- | --- |
| |  | | --- | | **Бурау Н.І. Віброакустична діагностика тріщиноподібних пошкоджень турболопатних машин на стаціонарних та нестаціонарних режимах**. – Рукопис.  Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, Київ, 2005.  Дисертацію присвячено вирішенню актуальної проблеми визначення технічного стану (ТС) лопаток газотурбінних двигунів (ГТД) в процесі функціонування двигуна та діагностування в них тріщиноподібних пошкоджень на основі розвитку теоретичних засад віброакустичних методів діагностування, застосування ефективних методів обробки діагностичної інформації на сучасних інформаційних технологій для розпізнавання ТС. Для цього в роботі розроблено динамічну модель ГТД як об’єкту віброакустичної діагностики тріщиноподібних пошкоджень лопаток на стаціонарних та нестаціонарних режимах, встановлено закономірності впливу пошкодження на параметри та характеристики вільних та вимушених стаціонарних і нестаціонарних коливань моделей лопатки, аналітично визначено та досліджено вплив пошкодження на кореляційні та спектральні характеристики коливань лопатки при нестаціонарному вузькосмуговому вібраційному збуренні. Для обробки діагностичної інформації обґрунтовано застосування методів багатомірного спектрального аналізу, частотно-часових перетворень, вейвлет-перетворення та безрозмірних амплітудних характеристик віброакустичного сигналу, ефективність методів обробки доведено в результаті чисельного та фізичного моделювання робочого колеса ГТД на стаціонарних та нестаціонарних режимах вібраційного збурення. Визначено та досліджено діагностичні ознаки тріщиноподібного пошкодження. За визначеними аналітичними залежностями проведено оцінювання параметру пошкодження на стаціонарному та нестаціонарних режимах для розпізнавання ТС лопаток. Розроблено методичні засади використання нейронних мереж для розпізнавання ТС лопаток на стаціонарному та нестаціонарних режимах за кількісними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень. Розроблено методику віброакустичного діагностування тріщиноподібних пошкоджень лопаток на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації ГТД. | |
| |  | | --- | | Головний науковий результат роботи – вирішення важливої науково – технічної проблеми визначення ТС лопаток ГТД в умовах експлуатації та діагностування в них тріщиноподібних пошкоджень на ранній стадії розвитку, який полягає у створенні наукових основ розробки системи віброакустичного моніторингу, діагностики та оцінювання тріщиноподібних пошкоджень в лопатках ГТД на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації шляхом розвитку теоретичних засад віброакустичних методів діагностування, застосування ефективних методів обробки діагностичної інформації та сучасних інформаційних технологій для розпізнавання ТС лопаток ГТД.   1. На основі аналізу фізичної природи основних джерел вібраційного та акустичного збурення лопаток, характеру їх змінювання відповідно до режимів експлуатації ГТД, а також на основі розроблених та теоретично обґрунтованих моделей лопаток та робочих коліс розроблено і досліджено динамічну модель турболопатної машини як об’єкту віброакустичної діагностики тріщиноподібних пошкоджень лопаток на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації. Динамічна модель характеризує стани ГТД за відсутності та наявності тріщиноподібного пошкодження в лопатці та забезпечує формування віброакустичних каналів, що пов’язують джерело вібраційного та акустичного збурення на стаціонарних і нестаціонарних режимах з реакцією відповідного робочого колеса та ГТД в цілому і відображають необхідне перетворення множини збурень у вимірювані вібраційні та акустичні сигнали. 2. В результаті дослідження впливу тріщиноподібного пошкодження на параметри та характеристики вільних та вимушених коливань моделей лопатки при стаціонарному збуренні встановлено, що:   - поява пошкодження призводить до появи в спектральній щільності вільних коливань залежних від параметру пошкодження складових низької інтенсивності на гармоніках основної частоти коливань лопатки, найбільш представницькими серед яких є складові на парних гармоніках (зокрема, на другій гармоніці), поява складових на непарних вищих гармоніках зумовлена початковою нелінійністю моделі лопатки;  - амплітуди вимушених нерезонансних коливань моделі лопатки при стаціонарному вібраційному збуренні зростають зі збільшенням параметру пошкодження відповідно до зростання додаткових складових в імпульсній характеристиці моделі лопатки, спектральна щільність коливань збагачується додатковими складовими низької інтенсивності;  - для малих значень параметру пошкодження =0,01,...,0,05 його вплив на імпульсні характеристики нестаціонарної моделі лопатки з урахуванням розсіювання енергії та моделі лопатки без урахування розсіювання енергії є ідентичним за умови обмеження імпульсних характеристик найбільш представницькими постійною складовою та першими двома гармоніками.   1. Вперше проведено дослідження коливань моделей лопаток без пошкодження та з тріщиноподібним пошкодженням при нестаціонарному вібраційному збуренні. Встановлено, що при повільній зміні частоти вібраційного збурення коливання лопатки є нестаціонарним процесом зі змінною частотою, амплітуда якого змінюється за формою амплітудно-частотної характеристики моделі лопатки. При швидкій зміні частоті вібраційна дія збуджує вільні згасаючі коливання лопаток, амплітуда яких залежить від швидкості змінювання частоти. Збуджені нестаціонарною дією коливання моделі лопатки з пошкодженням являють собою полігармонічний процес, середнє значення та амплітуди складових якого є функціями параметру тріщиноподібного пошкодження. 2. Отримано нові аналітичні вирази та визначено вплив тріщиноподібного пошкодження на кореляційні та спектральні характеристики коливань моделі лопатки при нестаціонарному вузькосмуговому вібраційному збуренні. Показано, що поява та розвиток пошкодження в інтервалі значень = 0,01...0,1 призводить до змінювання за формою та значенням авто- та взаємних кореляційних функцій в різних перерізах, а також до появи в спектральній щільності нестаціонарних коливань лопатки складових низької інтенсивності на вищих гармоніках власної частоти моделі лопатки з пошкодженням, найбільш представницькою з яких є складова на другій гармоніці. 3. Запропоновано та обґрунтовано доцільність використання методів багатомірного спектрального аналізу, частотно-часових перетворень, масштабно-часового перетворення та чисельних характеристик віброакустичних сигналів для обробки діагностичної інформації на стаціонарному та нестаціонарних режимах експлуатації ГТД. Вперше в результаті чисельного та фізичного моделювання для кожного з режимів встановлено закономірності впливу тріщиноподібного пошкодження на оцінки модуля біспектру, частотно-часові оцінки та безрозмірні амплітудні дискримінанти віброакустичних сигналів і складових їх вейвлет – перетворення. Визначено та досліджено діагностичні ознаки пошкодження, встановлено, що для діагностики початкового розвитку пошкодження найбільш інформативними є ознаки, які визначаються на нестаціонарних режимах вібраційного збурення, зокрема, на режимі прийомистості. 4. Вперше за отриманими аналітичними залежностями проведено оцінювання параметру тріщиноподібного пошкодження за визначеними безрозмірними амплітудними дискримінантами на стаціонарному та нестаціонарних режимах роботи ГТД. Отримані оцінки є прийнятними на режимі прийомистості в усьому діапазоні розглянутих значень = 0,01...0,1, а на стаціонарному режимі та режимі дроселювання – при оцінюванні тріщиноподібних пошкоджень в інтервалі значень . 5. Розроблено методичні засади використання нейронних мереж для розпізнавання ТС лопаток ГТД за результатами обробки діагностичної інформації в процесі експлуатації. Вперше для моделі робочого колеса ГТД на стаціонарному та нестаціонарних режимах вібраційного збурення проведено розпізнавання ТС лопаток з використанням імовірнісної нейронної мережі за кількісними діагностичними ознаками та ознаками у вигляді контурних зображень. Визначено значення параметру впливу мережі, за якого забезпечується максимальне значення вірогідності розпізнавання за кількісними діагностичними ознаками для кожного з режимів вібраційного збурення. Встановлено діапазон значень параметру впливу мережі, в якому забезпечується безпомилкове розпізнавання ТС лопаток за результатами оцінювання модуля біспектру у вигляді контурних зображень для початкових пошкоджень 0,05. 6. Розроблено вимірювальну систему для моделювання окремих етапів та всього процесу діагностування тріщиноподібних пошкоджень лопаток в об’єктах діагностики різної складності (одна лопатка, робочі колеса, турболопатна машина) на стаціонарних та нестаціонарних режимах вібраційного збурення. 7. Проведені дослідження підтвердили ефективність застосування віброакустичних методів для моніторингу, діагностики та оцінювання тріщиноподібних пошкоджень в лопатках ГТД на стаціонарних та нестаціонарних режимах експлуатації. На основі отриманих результатів проведено наукове обґрунтування структурного синтезу системи віброакустичної діагностики тріщиноподібних пошкоджень лопаток, як складової інтегрованої автоматичної системи моніторингу ГТД. Обґрунтовано рекомендації по вибору елементів вимірювальної системи для забезпечення фізичного формування вимірювальних каналів та розроблено методику віброакустичного діагностування тріщиноподібних пошкоджень під час доведення чи відновлення ГТД, в процесі експлуатації, в процесі обслуговування перед експлуатацією. 8. Результати роботи впроваджено в практику контролю авіаційної техніки на ДП завод 410 ЦА (м. Київ). За розробленою методикою вимірювань та обробки діагностичної інформації було зроблено наукове обґрунтування експлуатації лопатей несучих гвинтів вертольота Ка-26 зі збільшеним призначеним строком служби, на основі якого прийнято відповідне Рішення Державного департаменту авіаційного транспорту України №ДКР-0050/Ка-26-2003 від 11.04.2003р. Результати роботи використовуються в навчальному процесі кафедри приладів та систем орієнтації та навігації Національного технічного університету України “КПІ” (м. Київ), Інституту новітніх технологій Національного авіаційного університеті (м. Київ). | |