

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Харківський національний університет радіоелектроніки

ЮР ТЕТЯНА ВАСИЛІВНА

УДК 004.93: 681.518.5

**МОДЕЛІ І МЕТОДИ СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ВУЗЛІВ ГАЗОТУРБІННИХ ДВИГУНІВ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Харків – 2012

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у Запорізькому національному технічному університеті, Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник – кандидат технічних наук, професор Дубровін Валерій Іванович, Запорізький національний технічний університет, завідувач кафедри програмних засобів.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор Удовенко Сергій Григорович, Харківський національний університет радіоелектроніки, професор кафедри електронних обчислювальних машин;

кандидат технічних наук, доцент Фірсов Сергій Миколайович, Національний аерокосмічний університет ім. М.Є. Жуковського «ХАІ», доцент кафедри систем управління літальних апаратів.

Захист відбудеться «___» _____ 2012 р. о ____ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 у Харківському національному університеті радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Харківського національного університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14.

Автореферат розісланий «___» _____ 2012 р.

Учений секретар
спеціалізованої вченої ради

В.В. Безкоровайний

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Один із перспективних напрямів вирішення задачі підвищення ефективності характеристик силових установок сучасних літальних апаратів щодо адаптивності до умов експлуатації та режимів використання літака, надійності та ресурсу лежить в області інтегрованих систем автоматичного керування і контролю авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД).

Зношування в процесі експлуатації призводить до зміни стану і характеристик вузлів двигуна: опор роторних деталей (ушкодження підшипників), зубчастих передач (вироблення контактних поверхонь зубців), лопаткових машин (зниження коефіцієнту корисної дії, продуктивності, запасів газодинамічної стійкості), камер згоряння (втрати), елементів проточної частини. Внаслідок цього значно змінюються як статичні, так і динамічні характеристики двигуна, що визначають його властивості як об'єкта регулювання.

Таким чином, існує необхідність розвитку методів неруйнівного контролю технічного стану вузлів ГТД під час їх експлуатації.

Розробка методу автоматичного розпізнавання технічного стану вузлів двигуна, реалізованого в системі автоматичного керування (САК) двигуна, дозволить у процесі функціонування двигуна автоматично переходити до режиму керування оптимального за даних умов.

Одними з ефективних засобів технічного діагностування ГТД є вібродіагностичні методи. Вібраційний сигнал несе в собі велику кількість інформації щодо технічного стану вузлів двигуна і може бути достовірним показником їхньої працездатності.

До найбільш значних робіт в області віброакустичного діагностування роторного обладнання належать дослідження Артоболевського І.І., Балицького Ф.Я., Баркова А.В., Баркової Н.О., Генкіна М.Д., Гольдина А.С., Русова В.А., Соколової А.Г., Теттера В.Ю., Фролова К.В., Ширмана О.Р., Яблонського В.В. та ін.

На підставі проведеного аналізу було визначено переваги та недоліки вібродіагностичних підходів. Існуючі методи вібраційної діагностики вузлів ГТД переважно ґрунтуються на часовому або спектральному аналізі вібраційних сигналів із використанням перетворення Фур'є, що робить ці методи малочутливими до зародження дефектів і утрудняє спостереження за розвитком дефектів. Перспективні методи аналізу нестационарних сигналів, у тому числі вібраційних сигналів, засновані на застосуванні безперервного вейвлет-перетворення. Серед авторів, що досліджують можливість застосування вейвлет-перетворення в задачах вібродіагностики, можна виділити Пригунова О.І., Randall R.B., Antoni J., Tandon N. та ін.

Однак відомі методи аналізу вібраційних сигналів, що використовують вейвлет-аналіз, характеризуються низькою швидкістю і малою інформативністю при виділенні ознак зношування вузлів ГТД, що сильно обмежує практичне застосування цих методів у задачах діагностування і прийняття рішень.

Таким чином, актуальною задачею сучасного двигунобудування є розробка нових і модифікація існуючих методів і моделей діагностування вузлів двигуна, що

дозволять більш надійно виділити у вібраційному сигналі ознаки відхилення характеристик двигуна від нормального стану і побудувати автоматичну систему розпізнавання технічного стану вузлів ГТД.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконувалася відповідно до координаційних планів Міністерства освіти і науки України та Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) у рамках держбюджетних науково-дослідних робіт «Інтелектуальний аналіз даних і прийняття рішень» (№ ДР 0106U008620) і «Моделі, методи та інформаційні технології прийняття рішень і технічного діагностування» (№ ДР 0109U007672), де автор брав участь як виконавець, розробив і здійснив експериментальне дослідження моделей і методів спектрального аналізу технічного стану вузлів ГТД.

Мета і задачі дослідження. Метою дисертаційної роботи є розробка моделей, методів і комплексу програм для раннього діагностування виникнення й розвитку дефектів деталей і вузлів газотурбінного двигуна.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- аналіз існуючих методів виявлення дефектів вузлів двигуна на основі аналізу вібраційних сигналів;
- розробка ефективних методів аналізу вібраційних сигналів, призначених для оцінки технічного стану вузлів ГТД і орієнтованих на реалізацію в складі інтегрованої системи керування силовою установкою сучасних літальних апаратів;
- розробка алгоритмічного й програмного забезпечення для аналізу вібраційних сигналів двигуна в програмно-апаратному комплексі «WinПОС»;
- дослідження характеристик розроблених методів оцінки технічного стану вузлів ГТД шляхом вирішення практичних задач діагностування для даних стендових випробувань двигуна;
- розробка рекомендацій для застосування розроблених методів;
- розробка моделей діагностування вузлів ГТД для системи автоматичного керування двигуна.

Об'єкт дослідження – процес діагностування вузлів авіаційних ГТД (таких як редуктор приводу повітряного гвинта турбогвинтового ГТД і вентиляторна ступінь двоконтурного ГТД).

Предмет дослідження – моделі і методи спектрального аналізу технічного стану вузлів ГТД.

Методи дослідження. Для вирішення сформульованих у роботі задач використовувалися такі методи: метод вейвлет-аналізу й метод швидкого перетворення Фур'є – для виявлення частотних особливостей вібраційних сигналів; методи математичної статистики – для визначення параметрів сигналів та аналізу розподілу вейвлет-коефіцієнтів.

Наукова новизна одержаних результатів дисертаційної роботи полягає в тому, що:

- уперше запропоновано метод зменшення впливу граничних ефектів для безперервного вейвлет-перетворення, виконуваного за допомогою комплексного вейвлету Морле, який відрізняється від існуючого застосуванням розробленого

автором аналітичного виразу для розрахунку області достовірності, що дозволяє зменшити перекручування, які вносяться вейвлет-перетворенням у результати аналізу;

- модифіковано метод аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації, що відрізняється від існуючого застосуванням банків вейвлетних фільтрів на основі комплексного вейвлету Морле і крос-спектрального аналізу. За рахунок виділення не тільки гармонійних, але й імпульсних складових сигналу метод дозволяє виділити більшу кількість характеристичних частотних складових вібраційних сигналів і в такий спосіб дає більш чіткі ознаки відхилення поточного стану вузлів двигуна від нормального;

- удосконалено статистичний метод аналізу вібраційних сигналів за рахунок застосування S-дискримінанту, що дозволило створити метод первинної експрес-діагностики відхилення технічного стану двигуна від нормального;

- одержали подальший розвиток моделі діагностування вузлів ГТД, які відрізняються від існуючих застосуванням безперервного вейвлет-аналізу та S-дискримінанту, що дозволило виявляти зношування деталей на більш ранніх етапах розвитку дефектів.

Практичне значення одержаних результатів полягає у такому:

- розроблені методи дозволили провести раннє діагностування підшипників, редукторів і лопаткових машин ГТД і виявити специфічні для кожного випадку вектори ознак дефектів;

- на основі розроблених методів на ДП «Івченко-Прогрес» для програмно-апаратного комплексу «WinПОС» проходить апробацію пакет прикладних програм, що дозволяє визначити технічний стан переднього редуктора двигуна ТВ3-117ВМА-СБМ;

- розроблено рекомендації для застосування запропонованих методів і моделей під час проектування перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестаціонарних сигналів і діагностування станів деталей і вузлів ГТД;

- наукові положення, висновки й рекомендації, викладені в дисертаційній роботі, використані при підготовці дисциплін «Теорія прийняття рішень», «Системи підтримки прийняття рішень» та «Сучасні бази даних та інтелектуальний аналіз даних» на кафедрі програмних засобів ЗНТУ, а також при підготовці фахівців за спеціальністю 6.040301 «Прикладна математика» при викладанні дисципліни «Математичне моделювання» в Запорізькому національному університеті.

Особистий внесок здобувача. Дисертація є результатом самостійної роботи автора. Наукові положення, висновки та рекомендації, які складають суть дисертаційної роботи, були сформульовані, розроблені та досліджені самостійно. За результатами дисертаційної роботи було надруковано 17 робіт [1–17]. У роботах, написаних у співавторстві, здобувачу належать: [1] – розробка та дослідження методу вібродіагностування підшипників, заснованого на застосуванні вейвлет-перетворення; [2] – розробка та програмна реалізація методу первинної експрес-діагностики стану підшипника кочення шляхом аналізу вібраційних сигналів з використанням S-дискримінанту; [3] – розробка та програмна реалізація методу

аналізу вібраційних та інших видів нестационарних сигналів за допомогою вейвлетної фільтрації; [4] – дослідження фільтруючих властивостей вейвлет-перетворення, розробка методу зменшення впливу граничних ефектів на результати вейвлет-аналізу; [5] – розробка моделей діагностування вузлів ГТД із застосуванням розробленого методу спектрального аналізу вібраційних сигналів і вдосконаленого методу на основі S-дискримінанту; [7] – розробка алгоритму граничної вейвлет-обробки для очищення вібросигналу від шуму; [8, 9] – аналіз існуючих методів діагностування дефектів підшипників на основі вейвлет-аналізу їх вібраційних сигналів; [13, 14] – експериментальне дослідження методу аналізу вібраційних сигналів із застосуванням вейвлетної фільтрації при діагностуванні підшипників кочення і зубчастих передач.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 12-му, 13-му и 15-му міжнародних молодіжних форумах «Радіоелектроніка і молодь в ХХІ ст.» (Харків, 2008, 2009, 2011 рр.), на міжнародній науковій конференції «Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту» (Євпаторія, 2008 р.), міжнародній науково-технічній конференції «Нові технології, методи обробки та зміцнення деталей енергетичних установок» (Запоріжжя – Алушта, 2008 р.), на міжнародній конференції з автоматичного управління Автоматика-2008 (Одеса, 2008 р.), на XIV Міжнародному конгресі двигунобудівників (Харків – Рибаче, 2009 р.), на міжнародній конференції з автоматичного управління Автоматика-2010 (Харків, 2010 р.), на XV Міжнародному конгресі двигунобудівників (Харків – Рибаче, 2010 р.), на V Міжнародній науково-практичній конференції «Сучасні проблеми і досягнення в області радіотехніки, телекомунікацій і інформаційних технологій» (Запоріжжя, 2010 р.), на II Міжнародній науково-практичній конференції «Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії» (Харків, 2010 р.).

Публікації. Основні положення і результати дисертації опубліковані в 17 друкованих роботах, з них: 5 статей в наукових виданнях, які входять до наукових фахових видань України з технічних наук, і 12 робіт у збірниках праць наукових конференцій.

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, п'яти розділів основного змісту, висновків, переліку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг дисертації складає 177 сторінок, включаючи основну частину обсягом 147 сторінок, і містить 79 рисунків на 43 сторінках, 5 таблиць на 2 сторінках, список використаних джерел зі 116 найменувань на 13 сторінках, 5 додатків на 17 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету роботи, поставлено задачі дослідження, визначено наукову новизну дисертаційної роботи і практичне значення одержаних результатів.

Перший розділ дисертації містить аналіз сучасного стану проблеми діагностування ГТД. Представлено структуру інтегрованої системи автоматичного керування й контролю авіаційних ГТД, місце й значення системи контролю і діагностики двигуна в ній. Описано функції САК із погляду оперативного контролю і діагностування технічного стану двигуна.

Вібраційна діагностика – один із методів технічної діагностики ГТД, що використовує як діагностичні сигнали механічні коливання деталей і вузлів. Методи віброакустичної діагностики застосовуються під час проектування, виробництва, експлуатації та ремонту двигунів.

Проведено огляд бортових і наземних методів контролю вібрації двигуна, що дозволяють виявити дефекти роторної частини двигуна (підшипників, робочих лопаток і т. д.). Показано недоліки наведених методів. Для усунення цих недоліків запропоновано розробити ефективні методи й програми аналізу вібраційних сигналів для виявлення дефектів деталей двигуна. Для аналізу вібраційних сигналів запропоновано використовувати вейвлет-перетворення, що є ефективним методом виділення характеристичних особливостей нестационарних сигналів.

У висновках до розділу 1 визначено задачі дисертаційної роботи.

У **другому розділі** для розробки ефективного методу оцінки технічного стану вузлів ГТД, вільного від недоліків, розглянутих у розділі 1, запропоновано використовувати безперервне вейвлет-перетворення.

Безперервне вейвлет-перетворення являє собою розкладання аналізованого сигналу в базисі аналізуючої вейвлетної функції.

Базис вейвлет-перетворення будується шляхом масштабних перетворень і переносів материнського вейвлету $\psi(t)$ із безперервними значеннями базисних параметрів – масштабного коефіцієнту a і параметру зсуву b

$$\psi_{a,b}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left(\frac{t-b}{a}\right), \quad a, b \in R, \quad (1)$$

де $\psi_{a,b}(t)$ – дочірній вейвлет базису.

В інтегральній формі безперервне вейвлет-перетворення сигналу $s(t)$ може бути виражене як

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{|a|}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) \psi_{a,b}^*(t) dt, \quad (2)$$

де $*$ – оператор комплексного спряження.

Як можна помітити, безперервне вейвлет-перетворення сигналу $s(t)$ із аналізуючим вейвлетом $\psi(t)$ являє собою згортку сигналу із комплексно-спряженим дочірнім вейвлетом.

Використовуючи рівність Парсеваля, що описує зв'язок між функціями і їхніми образами Фур'є, вираз (2) можна записати в альтернативній формі

$$W(a,b) = \sqrt{a} F^{-1} \left\{ S(f) \Psi^*(af) \right\}, \quad (3)$$

де f – частота;

a – масштабний коефіцієнт;

F^{-1} – оператор зворотного перетворення Фур'є;

$\Psi(af)$ – перетворення Фур'є дочірнього вейвлету;

$S(f)$ – перетворення Фур'є аналізованого сигналу.

Таке представлення дозволяє прискорити обчислення вейвлет-коефіцієнтів за рахунок використання швидкого перетворення Фур'є. До того ж, перетворення Фур'є материнського вейвлету як правило відоме в аналітичному вигляді і, отже, кількість необхідних обчислень скорочується.

Вираз (3) показує, що вейвлет-перетворення може бути розглянуте як спеціальна операція фільтрації з вейвлетом як ядром фільтра. Також можна помітити, що вейвлет-перетворення є фільтрацією із постійною добротністю (постійною Q), при якій відношення середньоквадратичної ширини смуги пропущення до центральної частоти фільтра є постійною величиною.

Найчастіше на практиці вейвлет-аналіз сигналів виконується без урахування особливостей настроювання вейвлетів, які істотно впливають на результати перетворення і можливість їхньої правильної інтерпретації. Застосування вейвлет-перетворення без урахування частотних характеристик вейвлету може давати спотворену інформацію щодо особливостей аналізованого сигналу.

Для успішного використання вейвлет-перетворення необхідний ретельний аналіз параметрів материнського вейвлету. Це дозволить гнучко управляти настроюванням вейвлету для одержання необхідних аналізуючих властивостей вейвлет-перетворення і правильно інтерпретувати одержувані результати.

Для вибору найбільш ефективного вейвлету для аналізу вібраційних сигналів були проаналізовані вейвлет Морле і вейвлет Мексиканський капелюх як найпоширеніші типи вейвлетів, що використовуються в задачах безперервного вейвлет-аналізу нестационарних сигналів. Ці вейвлети більше за інших за формою подібні до імпульсних складових вібраційних сигналів, що робить їх найбільш відповідним засобом аналізу сигналів такого виду.

При виборі аналізуючого вейвлету для фільтрації сигналів перевага була надана вейвлету Морле, що має більш вузький образ Фур'є. Присутність домінуючої частоти дозволяє варіювати вибірковість вейвлету Морле в частотній області.

Крім того, перевагу було надано комплексному типу вейвлету Морле. Його перетворення Фур'є дорівнює нулю для негативних частот, що дозволяє розділити фазові й амплітудні компоненти сигналу при виконанні вейвлет-перетворення.

У часовій області комплексний вейвлет Морле являє собою комплексну експоненту, що модулюється функцією Гауса

$$\psi(t) = \frac{\sigma}{\sqrt{\pi}} e^{-\sigma^2 t^2} e^{i2\pi f_0 t}, \quad (4)$$

а в частотній – має форму Гаусового вікна

$$\Psi(f) = \Psi^*(f) = e^{-(\pi^2/\sigma^2)(f-f_0)^2}, \quad (5)$$

де t – час;

f_0 – центральна частота аналізуючого вейвлету;

σ – ширина аналізованого діапазону частот;

* – означає комплексне спряження.

Таким чином, частотний діапазон, що покривається вікном вейвлету Морле, практично обмежений інтервалом $[f_0 - \sigma/2, f_0 + \sigma/2]$.

Граничний ефект вейвлет-перетворення – це область, у якій значення вейвлет-коефіцієнтів спотворюються розривною природою границь сигналу. Приклад граничного ефекту, що виникає при вейвлет-перетворенні, наведений на рис. 1.

Як видно з рис. 1, амплітуди вейвлет-перетворення в області граничних ефектів порівняні з амплітудами коефіцієнтів, що визначають особливу точку сигналу.

При виконанні вейвлет-перетворення кінцевої часової реалізації довжини N у частотній області помилки в розрахунку вейвлет-коефіцієнтів зумовлені природою перетворення Фур'є, яке припускає, що аналізований сигнал періодичний і має період довжиною N .

Для зменшення впливу граничних ефектів при виконанні вейвлет-аналізу сигналів запропонований метод, який сполучає доповнення аналізованого сигналу нулями до довжини вдвічі збільшеного сигналу і наступне усереднення області коефіцієнтів, що несе спотворені значення коефіцієнтів.

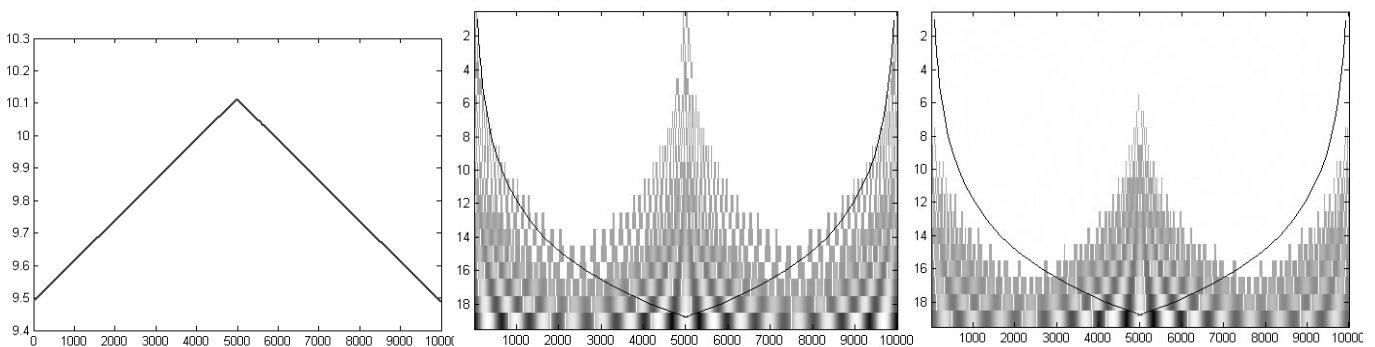


Рисунок 1 – Ілюстрація граничних ефектів, що виникають при виконанні безперервного вейвлет-перетворення сигналу

Для безперервного вейвлет-перетворення, що виконується за допомогою комплексного вейвлету Морле, уперше запропоновано аналітичний вираз для розрахунку області достовірності, що дозволяє зменшити спотворення, внесені перетворенням у результати аналізу.

Нехай вейвлет Морле $\psi(t)$ є функцією-вікном із радіусом δ_t . Тоді кожний дочірній вейвлет на масштабі a буде мати радіус вікна, що дорівнює $a\delta_t$. Якщо

точка вейвлет-коефіцієнта розташована від границі сигналу на відстані меншій за $a\delta_t$, то для її розрахунку необхідні значення сигналу, що виходять за межі ряду. Таким чином, кількість коефіцієнтів від країв сигналу, значення яких мають спотворений характер, може бути задана в такий спосіб:

$$n = \delta_t a * f_d, \quad (6)$$

де f_d – частота дискретизації сигналу.

Із (4) ширина вейвлету Морле в часовій області може бути визначена за допомогою правила трьох сигм як

$$\delta_t = \frac{3}{\sigma \sqrt{2}}. \quad (7)$$

Використовуючи вирази (6)–(7), можна отримати дві області: область достовірності вейвлет-перетворення і область, у якій не можна зневажати наявністю граничних ефектів. Запропоновано відкидати дану область граничних ефектів при подальших маніпуляціях з розрахованими коефіцієнтами вейвлет-перетворення.

Зазначимо також, що зі зменшенням кількості точок після відсікання області, яка містить граничні ефекти, падає роздільна здатність по частоті для спектра вейвлет-перетворення

$$\Delta f = \frac{f_d}{(N - 2 * n)}, \quad (8)$$

де N – кількість відліків сигналу;

f_d – частота дискретизації сигналу;

n – довжина області граничних ефектів.

Для ефективного аналізу вібраційних сигналів двигуна для виділення характерних складових і ознак зношування деталей удосконалено метод аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації за рахунок застосування банків вейвлетних фільтрів і крос-спектрального аналізу. Запропонований метод дозволяє виділити більшу кількість характеристичних частотних складових вібраційних сигналів за рахунок виділення не тільки гармонійних, але й імпульсних складових сигналу, що дає більш чіткі ознаки відхилення стану вузлів від нормального.

Для розділення різних частотних компонентів вібраційних сигналів від датчиків двигуна запропоновано використовувати банки вейвлетних фільтрів, побудованих на основі комплексного вейвлету Морле. Надано рекомендації з налаштування параметрів фільтра задля підвищення ефективності виділення характерних ознак сигналів.

Добротність вейвлету Морле як фільтра визначається як

$$Q_W = \frac{\sigma}{f_0}, \quad (9)$$

де σ та f_0 – параметри материнського вейвлету, що визначають ширину діапазону частот та центральну частоту фільтра відповідно.

Задаючи вихідні параметри материнського вейвлету f_0 і σ , а також набір масштабів для розрахунку безперервного вейвлет-перетворення, можна побудувати банк фільтрів із необхідними аналізуючими параметрами.

Для побудови аналізуючого банку фільтрів на основі комплексного вейвлету Морле необхідно виконати такі етапи.

Етап 1. Як основу для розрахунку масштабів вейвлет-перетворення обрати $a_i = \left(2^{1/k}\right)^i$, що дозволить будувати банк фільтрів із k фільтрами на октаву.

Етап 2. Задати необхідну кількість фільтрів на октаву ($k = 1, 2, 3, 4, 6, 12, 24$).

Етап 3. Параметр добротності вибрати таким чином, щоб ширина діапазону кожного фільтра дорівнювала відстані між фільтрами

$$Q_W = 2^{1/k} - 1. \quad (10)$$

За допомогою цього параметра можна варіювати ширину смуги пропускання фільтрів і ступінь перекриття фільтрів у банку.

Етап 4. Розрахувати параметри фільтрів за допомогою константи Q_W

$$f_i = f_0 / a_i \text{ та } \sigma_i = f_i Q_W. \quad (11)$$

Етап 5. Після визначення позначених параметрів за допомогою виразу (5) можна побудувати банк фільтрів.

На рис. 2, а показаний банк фільтрів, отриманий за допомогою такої процедури, а на рис. 2, б – банк фільтрів із добротністю збільшеною у два рази.

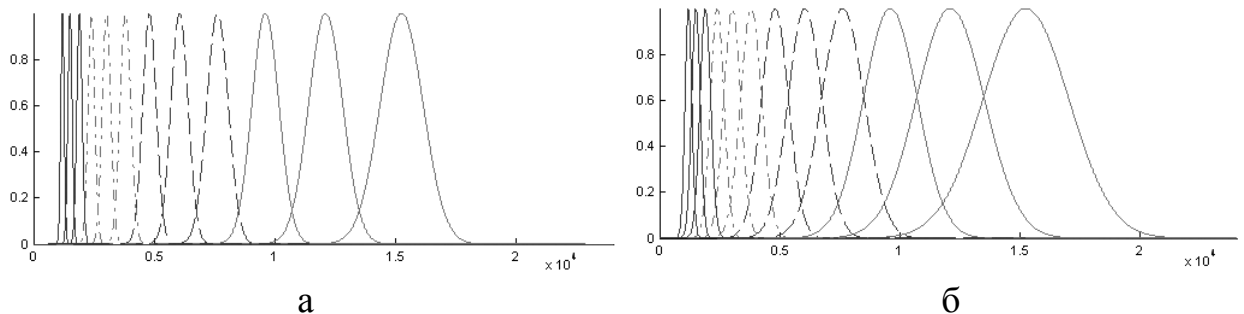


Рисунок 2 – Банк вейвлет-фільтрів із трьома фільтрами на октаву, що покриває чотири октави:

а – при добротності $Q_W = 2^{1/k} - 1$,

б – при добротності збільшеній у два рази $Q_W = 2 \cdot (2^{1/k} - 1)$

За допомогою побудованого банку фільтрів із використанням виразу (3) проводиться вейвлет-фільтрація аналізованого сигналу.

Завдяки тому, що використовуваний вейвлет Морле є комплексним, одержувані вейвлет-коефіцієнти для кожного масштабу/фільтра також є комплексними значеннями. Це дозволяє для аналізу особливостей сигналу використовувати спектр обвідної вейвлет-перетворення, тобто демодулювати сигнал у необхідному частотному діапазоні:

$$EW(a,b) = \left[W_{re}(a,b)^2 + W_{im}(a,b)^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Коректне настроювання банку фільтрів і урахування області достовірності вейвлет-перетворення дозволяють проаналізувати особливості сигналу щонайкраще.

Удосконалення методу аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації, що підвищує швидкодію й точність постановки діагнозу, також ґрунтується на визначенні значущих фільтрів і розрахунку їхнього взаємного спектра, що дозволяє виділити найбільш сильні ознаки в обробленому сигналі.

При настроюванні вейвлетного банку фільтрів варто також ураховувати вимоги до необхідної точності аналізу сигналу. Досягнення високої точності й детальності опису характеристик сигналу призводить до збільшення тривалості обробки сигналу. Тому однією із головних задач є раціональне настроювання методу обробки сигналу, щоб із прийнятною швидкістю одержати необхідний опис сигналу.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [3, 4, 12–15].

У **третьому розділі** наведено експериментальні дослідження ефективності розробленого методу аналізу вібраційних сигналів на основі безперервного вейвлет-перетворення для вирішення практичних задач діагностування зношування підшипників кочення.

Проаналізовано особливості задачі діагностування підшипників кочення шляхом аналізу вібраційних сигналів та визначено характерні ознаки зношування, що виникають у сигналі з розвитком дефектів на елементах підшипника.

У розділі досліджено ефективність двох методів діагностування технічного стану підшипників кочення: метод, заснований на статистичному аналізі вібрації підшипників, і метод на основі S-дискримінанту. Результати дослідження показали, що метод діагностики підшипників кочення, заснований на статистичному аналізі вібрації підшипників, дозволяє виявити появу дефекту, однак він не дозволяє оцінити ступінь розвитку деградаційних процесів, а також місце розташування дефекту.

Аналіз методу діагностики на основі S-дискримінанту дозволяє зробити висновок, що, крім самого значення S-дискримінанту, яке дозволяє судити про відхилення стану підшипника від нормального, форма кривої зміни значення S-дискримінанту також може бути використана для визначення місця розташування дефекту в підшипнику.

Крім того, було досліджено вплив довжини оброблюваного сигналу на поведінку значення S-дискримінанту. Результати аналізу показали, що зі збільшенням розміру вікна середнє значення S-дискримінанту перестає змінюватися й розкид значень зменшується. Однак з іншого боку, при виборі великої кількості малих вікон з'являється можливість знайти специфічні ділянки сигналу й визначити час виникнення різких змін у сигналі підшипника. Цей факт говорить про те, що суб'єкту діагностики потрібно мати досвід і певні навички при обробці сигналу.

Для більш якісного виділення характерних діагностичних частот, що відповідають тому або іншому типу дефекту підшипників кочення, використано розроблений метод на основі безперервного вейвлет-аналізу. Експериментальні дослідження показали його високу ефективність при виділенні характеристичних частот підшипників на ранніх стадіях розвитку дефекту.

Для аналізу вібраційних сигналів підшипників запропоновано використовувати взаємні спектри обвідної вейвлет-коефіцієнтів значущих фільтрів. Як параметри для експрес-аналізу, що дозволяють судити про виникнення й розвиток дефекту підшипника, пропонується використовувати максимальні амплітуди одержуваних взаємних спектрів.

Результати дослідження показали, що застосування вейвлет-фільтрації для аналізу вібраційних сигналів збільшує швидкодію й надійність постановки діагнозу.

Крім того, отримані результати дозволяють зробити висновок щодо універсальності запропонованого методу й можливості його ефективного застосування при аналізі інших типів нестационарних сигналів для ідентифікації дефектів двигуна: дефектів підшипників, зубчастих передач, дефектів роторів і статорів.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [1–4, 6–11].

Четвертий розділ присвячено розробці моделей діагностування вузлів ГТД.

Запропоновано два варіанти реалізації загальної моделі діагностування вузлів в САК ГТД під час експлуатації сучасних літальних апаратів. У першому варіанті на літаку не передбачається ніяких доробок, а реалізація розробленого методу діагностування здійснюється в наземному технологічному цифровому апаратно-програмному комплексі, що підключається до бортової апаратури контролю вібрації. Більш перспективним варто вважати другий варіант, що передбачає установку на борту літака бортового цифрового модуля контролю й діагностики.

Представлено принципову схему функціонування цифрового модуля контролю й діагностики, а також перелік задач, що вирішуються в ньому.

Запропоновано загальну модель діагностування вузлів ГТД на основі безперервного вейвлет-аналізу і S-дискримінанту, що дозволяє виявляти зношування деталей на більш ранніх етапах розвитку. Існуюча модель була модифікована з урахуванням специфіки запропонованих методів діагностування вібраційних сигналів.

На рис. 3 представлено структуру загальної моделі діагностування вузлів ГТД, що є сукупністю взаємопов'язаних моделей, що описують елементи процесу аналізу вібраційного сигналу та розпізнавання технічного стану редуктора приводу

повітряного гвинта турбогвинтового ГТД і вентиляторної ступені двоконтурного ГТД.

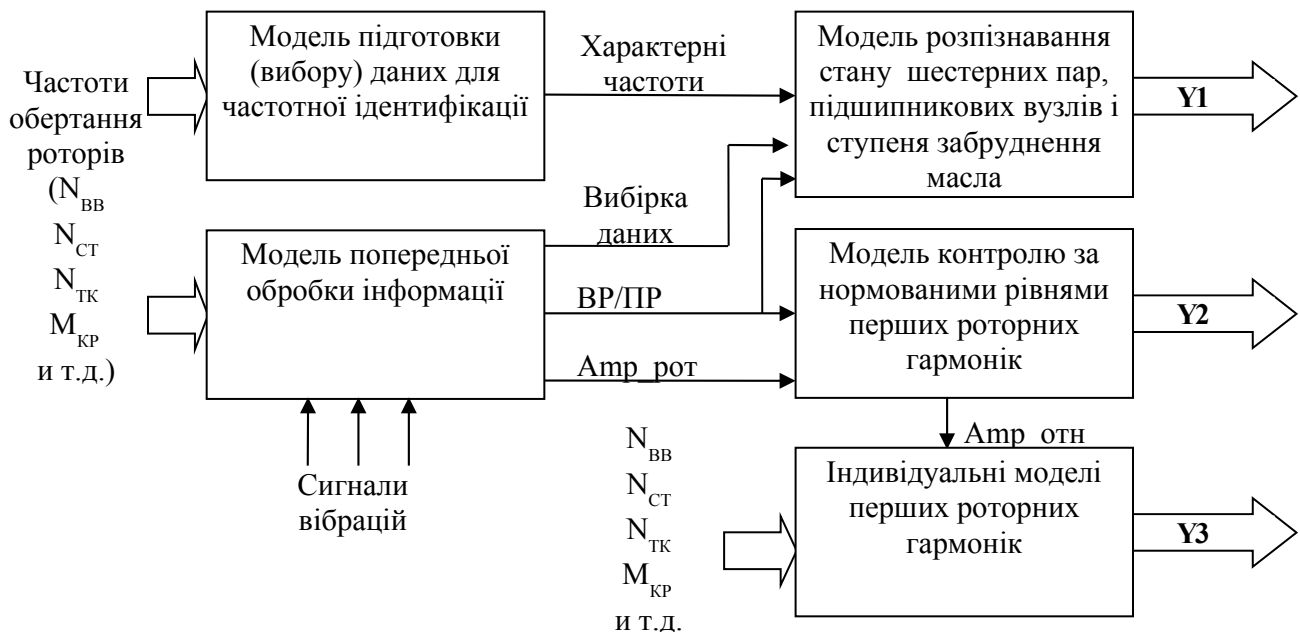


Рисунок 3 – Структура загальної моделі діагностування вузлів в САК ГТД

Розроблено рекомендації для застосування запропонованих моделей на основі безперервного вейвлет-перетворення і S-дискримінанту під час проектування перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестационарних сигналів і діагностування станів деталей і вузлів ГТД.

У рамках уніфікації методів спектрального аналізу, наданих у представленій дисертації, була проведена перевірка їх працездатності при вирішенні задачі побудови детектора можливих режимів автоколивань лопаткового вінця вентилятора ГТД при порушенні цілісності бандажа.

Основні результати розділу опубліковано у роботах [5, 16–17].

У **п'ятому розділі** наведена програмна реалізація розроблених методів у середовищі Scilab, а також у ПАК «WinПОС».

Розроблена тестова версія системи діагностування вібраційних сигналів була реалізована для аналізу властивостей безперервного вейвлет-перетворення, а також експериментальних досліджень ефективності розроблених методів.

Розроблена система реалізує такі функції (рис. 4):

- побудова банку вейвлетних фільтрів з необхідними аналізуючими властивостями;
- вибір найкращого фільтра в банку шляхом дослідження статистичних характеристик сигналу, пропущеного через кожний фільтр банку;
- безперервне вейвлет-перетворення завантаженого сигналу для ідентифікації частотних складових сигналу й діагностування зношування деталей ГТД;
- статистична оцінка вейвлет-коефіцієнтів, одержаних внаслідок перетворення;

- графічне подання результатів аналізу;
- розрахунок характеристичних частот для підшипників кочення.

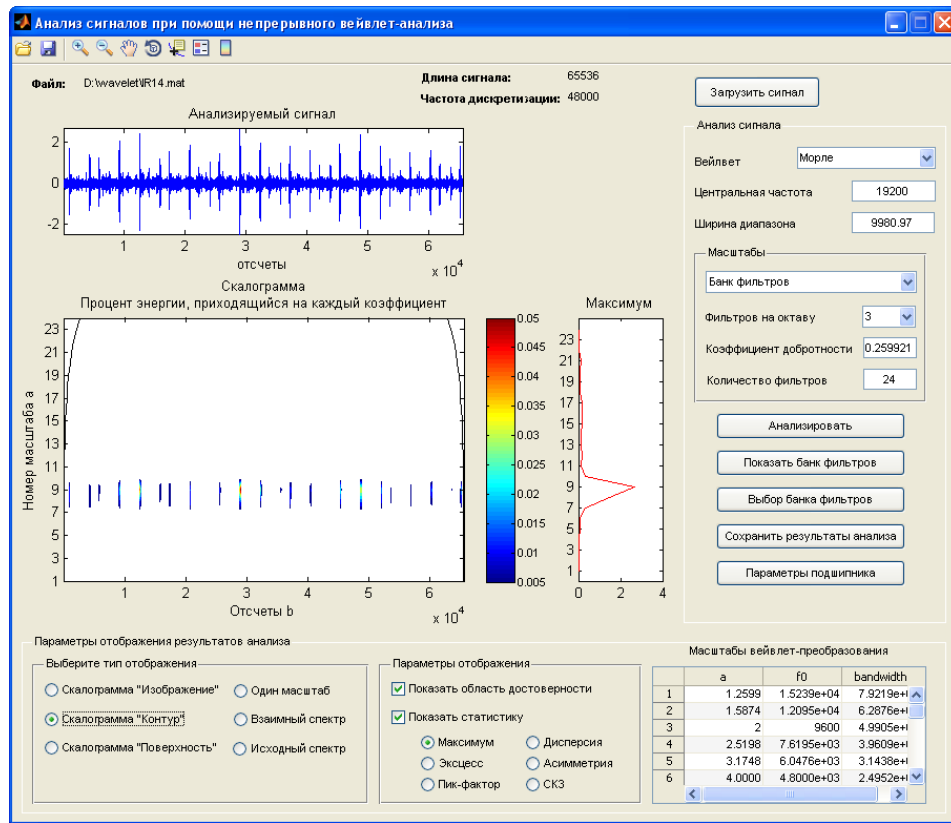


Рисунок 4 – Головне вікно розробленої системи діагностування вібраційних сигналів

Розроблена система діагностування вібраційних сигналів впроваджена на ДП «Івченко-Прогрес» для дослідження стану вузлів ГТД.

Основні результати використання розробленої системи для аналізу досліджуваних сигналів опубліковано в роботах [2–4].

Висновки містять основні наукові й практичні результати дисертаційної роботи.

Додатки містять характеристики сигналів і ознаки дефектів ГТД, результати експериментальних досліджень, а також копії документів про впровадження й приналежність результатів роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено важливу науково-практичну задачу розробки методів, моделей і комплексу програм для раннього діагностування виникнення й розвитку дефектів деталей газотурбінного двигуна (таких як редуктор приводу повітряного гвинта турбогвинтового ГТД і вентиляторна ступінь двоконтурного ГТД). Результати проведених досліджень полягають у такому.

1. Головним науковим результатом роботи є обґрунтування доцільності та практичної можливості застосування математичного апарату теорії безперервного

вейвлет-перетворення під час побудови системи автоматичного діагностування вузлів ГТД із покращенням показників виділення ознак зношування.

2. На практиці підтверджено, що значні перспективи у вирішенні задачі аналізу вібраційних сигналів відкриває безперервний вейвлет-аналіз. На відміну від традиційно використовуваних методів, заснованих на застосуванні перетворення Фур'є, метод безперервного вейвлет-перетворення дозволяє варіювати частотно-часову роздільну здатність аналізу. За рахунок цього вейвлет-перетворення є більш чутливим при виявленні характеристичних частотних складових сигналу й дозволяє виділяти більшу кількість ознак зношування елементів двигуна й на більш ранніх стадіях розвитку дефектів. Для розробки ефективного методу оцінки технічного стану вузлів ГТД запропоновано використовувати безперервне вейвлет-перетворення, трактуючи його як операцію фільтрації аналізованого сигналу. Такий підхід також дозволяє інтерпретувати результати аналізу щонайкраще із фізичної точки зору.

3. Обґрунтовано, що найбільш ефективним типом вейвлету для аналізу вібраційних сигналів є комплексний вейвлет Морле. Для цього вейвлету запропонований метод зменшення впливу граничних ефектів на результати аналізу сигналів. Запропонований метод сполучає у собі доповнення аналізованого сигналу нулями із наступним усіканням області, що містить спотворені значення вейвлет-коефіцієнтів. Для визначення границь області, підданої граничним ефектам, уперше запропоновано аналітичний вираз, що враховує параметри аналізуючого вейвлету Морле й аналізованого сигналу.

4. Запропоновано метод побудови банку фільтрів на основі комплексного вейвлету Морле. У цьому методі вейвлет Морле розглядається як смуговий фільтр, характеристики центральної частоти і смуги пропущення якого можуть бути задані. Вейвлет-перетворення в такий спосіб може бути розглянуте як операція фільтрації з постійною відносною смугою частот.

5. Для виділення характеристичних ознак зношування деталей ГТД при аналізі вібраційних сигналів запропоновано вдосконалення методу аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації, що відрізняється від існуючого застосуванням банків вейвлетних фільтрів і крос-спектрального аналізу. Таке вдосконалення дозволяє виділити більшу кількість характеристичних частотних складових вібраційних сигналів за рахунок виділення не тільки гармонійних, але й імпульсних складових сигналу, що дає більш чіткі ознаки відхилення поточного стану елементів двигуна від нормального стану.

6. Удосконалено статистичний метод аналізу вібраційних сигналів за рахунок застосування S-дискримінанту, що дозволило створити метод первинної експрес-діагностики відхилення технічного стану двигуна від нормального.

7. Ефективність розроблених методів досліджена при вирішенні задачі діагностування стану підшипників кочення. Технічний стан підшипників кочення є визначальним при діагностуванні стану двигуна загалом. Крім того, такий вид дефектів є одним із найскладніших при діагностуванні (у порівнянні з дефектами інших вузлів двигуна). Експериментальні дослідження показали високу ефективність запропонованого методу, заснованого на застосуванні безперервного

вейвлет-перетворення при виділенні характеристичних частот підшипників на ранніх стадіях розвитку дефекту. Результати дослідження показали, що застосування вейвлет-фільтрації для аналізу вібраційних сигналів збільшує швидкодію й надійність постановки діагнозу.

8. Одержані результати дозволяють зробити висновок щодо універсальності запропонованих методів і можливості їхнього ефективного застосування при аналізі інших типів нестационарних сигналів для ідентифікації дефектів обладнання.

9. Розроблена в дисертаційній роботі програма, що реалізує запропоновані методи, дозволяє визначити технічний стан переднього редуктора двигуна ТВЗ-117ВМА-СБМ

10. Одержали подальший розвиток моделі діагностування вузлів ГТД, що відрізняються від існуючих застосуванням безперервного вейвлет-аналізу та S-дискримінанту, що дозволяють виявляти зношування деталей на більш ранніх етапах розвитку дефектів та слідкувати за їхнім розвитком.

Отримані в роботі теоретичні й практичні результати використані в науково-дослідній роботі ДП «Івченко-Прогрес» (акт впровадження від 22.11.2011 р.) і в навчальному процесі Запорізького національного технічного університету (акт впровадження від 21.11.2011 р.) і Запорізького національного університету (акт впровадження від 25.11.2011 р.).

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Федорончак (Юр) Т.В. Диагностика дефектов подшипников качения при помощи вейвлет-преобразования / В.И. Дубровин, Т.В. Федорончак (Юр) // Вісник двигунобудування. – 2008. – № 2. – С. 132–135.
2. Федорончак (Юр) Т.В. Диагностирование технического состояния подшипников качения / Т.В. Федорончак (Юр), В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2009. – № 7 (64). – С. 166–170.
3. Юр Т.В. Метод анализа технического состояния подшипников качения, основанный на использовании вейвлет-математики / Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 10 (77). – С. 187–191.
4. Юр Т.В. Исследование фильтрующих свойств вейвлет-преобразования / Т.В. Юр, В.И. Дубровин, В.Н. Харитонов // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2010. – № 2 (23). – С. 157–165.
5. Юр Т.В. Модель диагностирования узлов газотурбинных двигателей с применением вейвлет-преобразования и S-дискриминанта / Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2011. – № 2 (25). – С. 60–64.
6. Федорончак (Юр) Т.В. Диагностика состояний подшипников качения при помощи вейвлет-преобразования / Т.В. Федорончак (Юр) // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 12-й междунар. молодеж. форум, 1–3 апреля 2008 г.: сб. материалов. – Харьков, 2008. – Ч. 2. – С. 131.

7. Федорончак (Юр) Т.В. Применение вейвлет-преобразования в вибродиагностике подшипников / В.И. Дубровин, Т.В. Федорончак (Юр) // Тижень науки: наук.-техн. конф., 21–25 квітня 2008 р.: зб. тез доп. – Запоріжжя, 2008. – Т. 2. – С. 56–57.
8. Федорончак (Юр) Т.В. Определение диагностических признаков состояния подшипников качения при помощи вейвлет-анализа / В.И. Дубровин, Т.В. Федорончак (Юр) // Интеллектуальные системы принятия решений и проблемы вычислительного интеллекта: междунар. науч. конф., 19–23 мая 2008 г.: сб. материалов. – Евпатория, 2008. – Т. 3 (часть 1). – С. 113–116.
9. Федорончак (Юр) Т.В. Вейвлет-анализ при идентификации дефектов подшипников / В.И. Дубровин, Т.В. Федорончак (Юр) // Автоматика-2008: 15 междунар. конф. по автоматическому управлению, 23-26 сентября 2008 г.: сб. докладов. – Одесса, 2008. – С. 168–170.
10. Федорончак (Юр) Т.В. Диагностика дефектов подшипников на основе вейвлет-анализа и дискриминантных признаков / Т.В. Федорончак (Юр) // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке: 13-й междунар. молодеж. форум, 30 марта – 1 апреля 2009 г.: сб. материалов. – Харьков, 2009. – Ч. 2. – С. 134.
11. Федорончак (Юр) Т.В. Застосування вейвлет-фільтрації та дискримінальних ознак в задачах вібродіагностики підшипників кочення / Т.В. Федорончак (Юр) // Тижень науки: наук.-техн. конф., 13–17 квітня 2009 р.: зб. тез доп. – Запоріжжя, 2009. – Т. 1. – С. 300–302.
12. Юр Т.В. Применение вейвлет-фильтрации в анализе вибрационных сигналов / Т.В. Юр // Тижень науки – 2010: щоріч. наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів, студентів ЗНТУ, 12–16 квітня 2010 р.: зб. тез доп. – Запоріжжя, 2010. – Т. 2 – С. 138–139.
13. Юр Т.В. Построение банка фильтров на основе комплексного вейвлета Морле / Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: V Міжнар. наук.-практ. конф., 22–24 вересня 2010 р.: зб. тез доп. – Запоріжжя, 2010. – С. 204–206.
14. Юр Т.В. Вейвлетная фильтрация в вибрационной диагностике ГТД / Т.В. Юр, В.Н. Харитонов, В.И. Дубровин // Автоматика 2010: XVII Міжнар. конф., 27–29 вересня 2010 р.: зб. тез доп. – Харків, 2010. – Т. 1. – С. 311–313.
15. Юр Т.В. Применение вейвлет-фильтрации для обнаружения диагностических признаков в вибрационных сигналах / Т.В. Юр // Системи обробки інформації: II наук.-практ. конф. «Проблеми і перспективи розвитку ІТ-індустрії», 18–19 листопада 2010 р.: зб. тез доп. – Харків, 2010. – № 7 (88). – С. 238.
16. Юр Т.В. Применение метода непрерывного вейвлет-преобразования в задаче диагностирования узлов газотурбинного двигателя / Т.В. Юр // Тижень науки – 2011: щоріч. наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів, студентів ЗНТУ, 11–15 квітня 2011 р.: зб. тез доп. – Запоріжжя, 2011. – Т. 2. – С. 66–68.
17. Юр Т.В. Методы и модели диагностирования в системе автоматического управления ГТД на основе вейвлет-анализа / Т.В. Юр // Радиоэлектроника и

молодеж в ХХІ веке: 15-й междунар. молодеж. форум, 18–20 апреля 2011 г.: сб. материалов. – Харьков, 2011. – Т. 2. – С. 265–266.

АНОТАЦІЯ

Юр Т.В. Моделі і методи спектрального аналізу технічного стану вузлів газотурбінних двигунів. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Харківський національний університет радіоелектроніки Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України, Харків, 2012.

Дисертаційна робота присвячена розробці методів і моделей діагностування стану вузлів в системі автоматичного керування ГТД із використанням безперервного вейвлет-аналізу.

У роботі обґрунтовано доцільність використання апарату теорії безперервного вейвлет-перетворення при аналізі вібраційних сигналів ГТД із покращенням показників виділення ознак зношення. Запропоновано метод зменшення впливу граничних ефектів на результати вейвлет-перетворення, яке виконується за допомогою комплексного вейвлету Морле, що дозволило зменшити похибку при аналізі складових сигналу. Розроблено удосконалений метод аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації, який за рахунок використання банку вейвлетних фільтрів та крос-спектрального аналізу дозволяє виділяти більшу кількість характеристичних частотних складових вібраційних сигналів за рахунок виділення не тільки гармонічних, але й імпульсних складових сигналів. Це дозволило отримати більш чіткі ознаки відхилення поточного стану вузлів двигуна від нормального і дозволило практично обґрунтувати можливість побудови автоматичної системи діагностування стану вузлів ГТД. На основі розробленого методу набули подальшого розвитку моделі діагностування вузлів ГТД, що дозволяють виявити зношення деталей на більш ранніх стадіях.

Ключові слова: газотурбінний двигун, система керування, зношування, безперервне вейвлет-перетворення, модель діагностування, вібраційна діагностика.

АННОТАЦИЯ

Юр Т.В. Модели и методы спектрального анализа технического состояния узлов газотурбинных двигателей. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники Министерства образования и науки, молодежи и спорта Украины, Харьков, 2012.

В диссертационной работе решена важная научно-практическая задача разработки методов, моделей и комплекса программ для раннего диагностирования возникновения и развития дефектов деталей и узлов газотурбинного двигателя (таких как редуктор привода воздушного винта турбовинтового ГТД и

вентиляторная ступень двухконтурного ГТД). Результаты проведенных исследований состоят в следующем.

В работе обоснована целесообразность и практическая возможность применения математического аппарата теории непрерывного вейвлет-преобразования при построении системы автоматической диагностики элементов ГТД с улучшением показателей выделения признаков износа.

На практике подтверждено, что значительные перспективы в решении задачи анализа вибрационных сигналов открывает непрерывный вейвлет-анализ. В отличие от традиционно используемых методов, основанных на применении преобразования Фурье, метод непрерывного вейвлет-преобразования позволяет варьировать частотно-временное разрешение анализа. За счет этого вейвлет-преобразование является более чувствительным при выявлении характеристических частотных составляющих сигнала и позволяет выделять большее количество признаков износа элементов двигателя и на более ранних стадиях развития дефектов. Для разработки эффективного метода оценки технического состояния узлов ГТД предложено использовать непрерывное вейвлет-преобразование, трактуя его как операцию фильтрации анализируемого сигнала. Такой подход также позволяет интерпретировать результаты анализа наилучшим образом с физической точки зрения.

Обосновано, что наиболее эффективным типом вейвлета для анализа вибрационных сигналов является комплексный вейвлет Морле. Для данного вейвлета предложен метод уменьшения влияния краевых эффектов на результаты анализа сигналов. Предложенный метод сочетает в себе дополнение анализируемого сигнала нулями с последующим усечением области, содержащей искаженные значения вейвлет-коэффициентов. Для определения границ области, подверженной краевым эффектам, впервые предложено аналитическое выражение, учитывающее параметры анализирующего вейвлета Морле и анализируемого сигнала.

Предложен метод построения банка фильтров на основе комплексного вейвлета Морле. В данном методе вейвлет Морле рассматривается в качестве полосового фильтра с настраиваемыми характеристиками центральной частоты фильтра и полосы пропускания, а вейвлет-преобразование таким образом может быть рассмотрено как операция фильтрации с постоянной относительной полосой частот.

Для выделения характеристических признаков износа деталей ГТД при анализе вибрационных сигналов предложен усовершенствованный метод анализа огибающей высокочастотной случайной вибрации, который отличается от существующего применением банков вейвлетных фильтров и кросс-спектрального анализа. Такое усовершенствование позволяет выделить большее количество характеристических частотных составляющих вибрационных сигналов за счет выделения не только гармонических, но и импульсных составляющих сигнала, что дает более четкие признаки отклонения текущего состояния элементов двигателя от нормального состояния.

Усовершенствован статистический метод анализа вибрационных сигналов за счет применения S-дискриминанта, что позволило создать метод первичной

экспресс-диагностики отклонения технического состояния двигателя от нормального.

Эффективность разработанных методов исследована при решении задачи диагностирования состояния подшипников качения. Техническое состояние подшипников качения является определяющим при диагностировании состояния двигателя в целом. Кроме того, данный вид дефектов является одним из наиболее сложных при диагностировании (по сравнению с дефектами других узлов двигателя). Экспериментальные исследования показали высокую эффективность предложенного метода, основанного на применении непрерывного вейвлет-преобразования при выделении характеристических частот подшипников на ранних стадиях развития дефекта. Результаты исследования показали, что применение вейвлет-фильтрации для анализа вибрационных сигналов увеличивает быстродействие и надежность постановки диагноза.

Полученные результаты позволяют сделать вывод об универсальности предложенных методов и возможности их эффективного применения для анализа других типов нестационарных сигналов с целью идентификации дефектов оборудования.

Разработанная в диссертационной работе программа, реализующая предложенные методы, позволяет определить техническое состояние переднего редуктора двигателя ТВЗ-117ВМА-СБМ.

Получили дальнейшее развитие модели диагностирования узлов ГТД, которые отличаются от существующих применением непрерывного вейвлет-анализа, что позволяет выявлять износ деталей на более ранних этапах развития дефектов и следить за их развитием.

Полученные в работе теоретические и практические результаты использованы в научно-исследовательской работе ГП «Ивченко-Прогресс» (акт внедрения от 22.11.2011 г.) и в учебном процессе Запорожского национального технического университета (акт внедрения от 21.11.2011 г.) и Запорожского национального университета (акт внедрения от 25.11.2011 г.).

Ключевые слова: газотурбинный двигатель, система управления, износ, непрерывное вейвлет-преобразование, модель диагностирования, вибрационная диагностика.

ABSTRACT

Yur T.V. Models and methods of spectral analysis of gas-turbine engine elements technical state. – As the Manuscript.

Dissertation for a candidate of technical science (Ph.D) degree in speciality 01.05.02 – mathematical modelling and computational approaches. – Kharkiv National University of Radio Electronics of the Ministry of Education and Science, Youth and Sport of Ukraine, Kharkiv, 2012.

The dissertation is devoted to development and improvement of methods and models of technical state diagnosis of elements for automatic control system of gas turbine engine.

In the work effectiveness and practical possibility to use continuous wavelet transform in system of automated diagnostics of gas turbine engine elements is proved. The proposed method allows improving performance of wear feature extraction. Method of eliminating edge effects in the results of wavelet transform performed with complex Morlet transform is proposed. The method of high frequency random vibration envelope analysis obtained further development by means of wavelet filter banks and cross-spectral analysis. Such an improvement gave the ability to extract more characteristic frequency components of the signal which include harmonic and impulsive components. This allows getting for elements more accurate indication of deviation from normal state. Based on the developed methods models of technical state diagnosis for gas turbine engine elements are proposed.

Keywords: gas-turbine engine, control system, wear, continuous wavelet transform, diagnostics model, vibration diagnostics.

Підп. до друку 24.04.2012.	Формат 60x84 1/16.	Спосіб друку – ризографія.
Умов. друк. арк. 1,0.	Облік. вид. арк. 1,2.	Тираж 100 прим.
Ціна договірна	Зам № 2-417.	

ХНУРЕ. Україна. 61166, Харків, просп. Леніна, 14

Віддруковано в навчально-науковому
видавничо-поліграфічному центрі ХНУРЕ
61166, Харків, просп. Леніна, 14