

УДК 004.93:381.518.5

Т.В. ЮР¹, В.М. ХАРИТОНОВ², В.І. ДУБРОВІН¹¹ Запорізький національний технічний університет, Україна² ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ ВУЗЛІВ ГТД ЗА ПАРАМЕТРАМИ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ВЕЙВЛЕТ-ПЕРЕТВОРЕННЯ

В роботі запропоновано модель діагностування технічного стану вузлів ГТД з використанням методів спектрального аналізу вібраційних сигналів на основі безперервного вейвлет-перетворення, крос-спектрального аналізу та статистичного параметру S -дискримінанта. За рахунок використання математичного апарату вейвлет-фільтрації підвищено ефективність розпізнавання частотних ознак зношення деталей двигуна. Розроблена модель може бути використана при проектуванні перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестационарних сигналів та діагностування стану деталей та вузлів ГТД.

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

Вступ

Ефективність експлуатації авіаційних газотурбінних двигунів (ГТД) з одночасним виконанням вимог безпеки польотів визначається не тільки їхньою конструктивною досконалістю, але й постійним надійним і ефективним контролем і діагностуванням їхнього технічного стану.

Проблема розробки і впровадження оптимальних засобів і методів контролю, автоматизації процесу обробки інформації про стан двигуна є однією з актуальних задач.

1. Постановка задачі

Зношення в процесі експлуатації приводить до зміни стану й 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.

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

Розробка й впровадження сучасних і високочутливих систем технічної діагностики, що виявляють

появу й розвиток несправностей вузлів двигуна на ранніх стадіях їхнього розвитку, дозволить зменшити час простою двигуна завдяки проведенню робіт з технічного обслуговування і ремонту відповідно до фактичного стану ГТД, а також дозволить уникнути аварій і катастрофічних руйнувань.

2. Метод спектрального аналізу вібраційних сигналів на основі вейвлет-перетворення

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

На підставі проведеного аналізу було визначено, що існуючі методи вібраційної діагностики вузлів ГТД переважно ґрунтуються на часовому або спектральному аналізі вібраційних сигналів із використанням модифікацій перетворення Фур'є, що робить ці методи малочутливими до зародження дефектів і утрудняє спостереження за розвитком дефектів.

Найбільш перспективним з сучасних методів аналізу нестационарних сигналів, що використовуються для слідкування за технічним станом обладнання, є метод безперервного вейвлет-перетворення (БВП) [1, 2].

Результати проведеного практичного дослідження підтвердили значні переваги та більшу чутливість БВП при вирішенні задач спектрального аналізу вібраційних сигналів.

Для розробки ефективного методу оцінки технічного стану вузлів ГТД запропоновано використувати БПВ тракуючи його як операцію фільтрації аналізовано сигналу. Такий підхід дозволив інтерпретувати результати аналізу найліпшим образом з фізичної точки зору.

БВП як спеціальну операцію фільтрації з вейвлетом в якості ядра фільтра можна записати в наступній формі:

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

де a – масштабний коефіцієнт;

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

f – параметр частоти;

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

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

Обґрунтовано, що найбільш ефективним типом вейвлету для аналізу вібраційних сигналів є комплексний вейвлет Морле.

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.

Завдяки тому, що цей вейвлет більше за інших за формою подібний до імпульсних складових вібраційних сигналів, він є найбільш відповідним засобом аналізу сигналів такого виду. Крім того присутність домінуючої частоти в частотному образі вейвлету Морле дозволяє гнучко варіювати його вибірковість в частотній області.

Для зменшення спотворень, що вносяться в результати вейвлет-перетворення через розривну природу границь аналізованого сигналу, для вейвлету Морле авторами розроблено метод зменшення впливу граничних ефектів. Даний метод сполучає доповнення сигналу нулями до подвоєної довжини перед виконанням перетворення з наступним відсіканням розрахованої за допомогою запропонованого аналітичного виразу області коефіцієнтів, що містить викривлені значення, після ВП. Розроблений метод є універсальним та може бути розширений на все сімейство гаусових вейвлетів.

Для ефективного аналізу вібраційних сигналів ГТД із метою виділення характерних складових і

ознак зношування вузлів авторами модифіковано метод аналізу обвідної високочастотної випадкової вібрації шляхом застосування фільтрації сигналу за допомогою банків вейвлетних фільтрів і крос-спектрального аналізу [3, 4].

Запропоноване вдосконалення дозволило підвищити ефективність визначення характерних частотних особливостей сигналів за рахунок виділення не тільки гармонійних, але й імпульсних складових, дозволило підвищити співвідношення сигнал/шум в результатах спектрального аналізу та отримати більш чіткі ознаки відхилення стану вузлів двигуна від нормального стану.

Для слідкування за амплітудами характеристичних частот, що було виділено з сигналу за допомогою розробленого методу спектрального аналізу на основі вейвлет-перетворення, запропоновано використувати статистичний параметр S-дискримінанта [5]. Це дозволило створити метод первинної експрес-діагностики відхилення технічного стану двигуна від нормального.

Ефективність розроблених методів перш за все було досліджено 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 запропонованих методів при виділенні характеристичних частот підшипників навіть на ранніх стадіях розвитку дефектів.

Результати проведеного дослідження показали, що застосування вейвлет-фільтрації збільшує швидкодію й надійність постановки діагнозу в порівнянні із традиційними статистичними методами й методами, заснованими на застосуванні модифікацій перетворення Фур'є.

Крім того, отримані результати дозволили зробити висновок про універсальність запропонованого методу та про можливість його ефективного застосування для ідентифікації різних дефектів двигуна: дефектів підшипників, зубчастих передач, дефектів роторних деталей, тощо.

Метою даної роботи є розробка моделі оцінки технічного стану вузлів ГТД за параметром вібрації з використанням вейвлет-перетворення, що може бути реалізована в САК двигуна.

3. Можливості реалізації методів 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 розроблених методів діагностування здійснюється в наземному технологічному цифровому апаратно-програмному комплексі, що підключається до бортової апаратури контролю вібрації.

У даного варіанта існує наступне обмеження. Практичне відпрацювання запропонованих методів аналізу вібраційних сигналів показало що залежність амплітуди характерних частот дефектів підшипників від рівня ушкоджень елементів підшипників носить нелінійний характер. Зменшення амплітуди, що має місце при середньому рівні ушкодження, може бути пропущене при періодичному контролі.

У такому випадку може бути некоректно визначений момент розвитку більше небезпечних і швидкоплинних значних рівнів ушкодження елементів конструкції підшипника.

Більше перспективним варто вважати другий варіант, що передбачає установа на борті літака цифрового модуля контролю й діагностики.

Цифровий модуль контролю й діагностики приймає аналогові сигнали від підсилювачів заряду штатної бортової апаратури контролю вібрації та виконує їхню обробку. У результаті обробки вирішується ряд задач по розпізнаванню технічного стану вузлів і систем двигуна:

- контроль роторних складових;
- контроль переднього редуктора на частотах шестерних і підшипникових складових;
- контроль заднього редуктора й валопровіда на частотах шестерних і підшипникових складових;
- контроль коробки приводів на частотах шестерних і підшипникових складових;
- контроль забруднення масла;
- оцінка стану вимірвальних трактів «датчик вібрації – підсилювач заряду»;
- контроль елементів газоповітряного тракту.

За результатами розпізнавання видаються керуючі впливи (повідомлення) до САК літака.

Для розв'язання перерахованих задач авторами запропоновано загальну модель діагностування вузлів ГТД, що використовує розроблені методи аналізу вібраційних сигналів.

4. Модель діагностування вузлів ГТД

Запропонована модель діагностування вузлів ГТД є удосконаленням існуючої моделі [6], що представляє систему вібродіагностування ГТД на основі застосування швидкого перетворення Фур'є. Модель була модифікована з урахуванням специфіки застосовуваних розроблених методів аналізу сигналів [7].

На рис. 1 представлено структуру загальної алгоритмічної 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.

До моделі діагностування надходить інформація двох видів: аналогова інформація від підсилювачів заряду датчиків вібрацій (V) (аналізований вібраційний сигнал) і цифрові дані по частотах обертання роторів, крутному моменту на валу гвинта та ін. ($N_{ВВ}$, $N_{СТ}$, $N_{ТК}$, $M_{КР}$). Вихідними даними моделі є повідомлення Y про технічний стан вузлів, що передаються до САК літака, тобто

$$Y = f(V, N_{ВВ}, N_{СТ}, N_{ТК}, M_{КР}). \quad (1)$$

В моделі попередньої обробки інформації (МПОІ) визначається режим роботи двигуна як динамічної системи. Якщо отримані параметри перебувають у стійко-незмінному стані в поточному часовому діапазоні, то такий режим вважається сталим (СР), в іншому випадку режим варто вважати перехідним (ПР).

Вищеописана характеристика режиму роботи двигуна важлива як на етапі підготовки даних (визначення кількості точок у вибірці та кількості груп вибірок даних по вібрації), так і на етапі контролю і діагностики. У МПОІ відбувається оцифровка вібраційного сигналу з відбракуванням збійних груп даних на основі допускного та перехресного контролю. Після цього дані піддаються вейвлет-фільтрації з подальшим спектральним аналізом отриманих коефіцієнтів. Зі спектрів виділяються складові перших роторних гармонік роторів турбокомпресора, гвинта і трансмісії. Амплітудні значення виділених складових спектрів передаються до моделі контролю за нормованими рівнями, де відбуватися їхнє порівняння із трьома типовими рівнями.

Обмежувальні рівні «Небезпечна вібрація» (НВ) і «Підвищена вібрація» (ПВ) устанавлюються виходячи з комплексних вимог міцності конструкції двигуна і його комплектуючих агрегатів і їхньої довговічності протягом виробітку життєвого циклу.

Іншими словами значення НВ і ПВ обумовлюються параметрами точності. Якщо поточне значення амплітуди перевищить зазначені рівні, і це перевищення стійко буде фіксуватися протягом певного часу, то до САК літака буде видане відповідне аварійне повідомлення.

Інформаційний рівень «Статистичний типовий» представляє залежність амплітуди тієї або іншої роторної гармоніки (статистично максимально

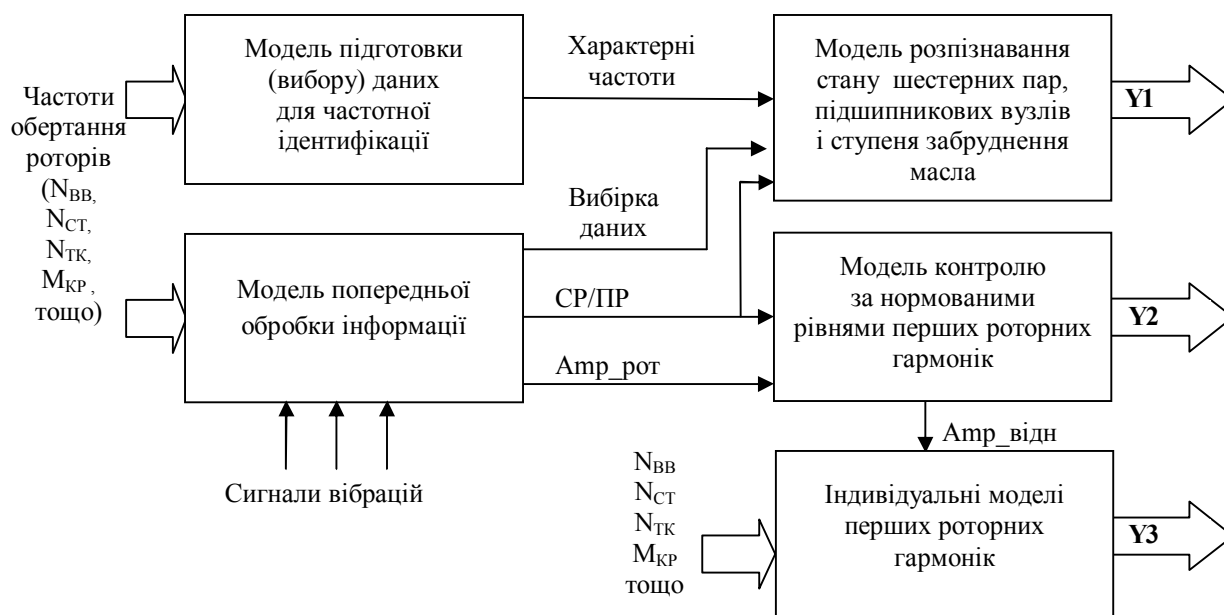


Рис. 1. Структура загальної моделі діагностування вузлів в САК ГТД

ймовірної для парку двигунів даного типу) від частоти обертання відповідного ротору або крутного моменту. Даний рівень використовується для щойно встановлюваного на літак двигуна на період формування індивідуальних моделей перших роторних гармонік (ІМПРГ).

Одночасно в МПОІ виконується обчислення поточних значень відносних амплітуд роторних гармонік наступним чином:

$$\text{Amp}_i \text{ _відн} = 20 \log \frac{\text{Amp}_i \text{ _пот}}{\text{Amp}_i \text{ _НВ}}, \text{ дБ}, \quad (2)$$

де $\text{Amp}_i \text{ _пот}$ – поточне значення амплітуди,

$\text{Amp}_i \text{ _НВ}$ – значення амплітуди для рівня небезпечної вібрації.

Обчислені значення відносних амплітуд передаються для співставлення з ІМПРГ.

Індивідуальні моделі представляються у вигляді дворівневих залежностей відносних амплітуд від частот обертання відповідних роторів і крутного моменту.

Модель для сталих режимів являє собою набір піддіапазонних статистично-імовірнісних оцінок (максимальних і мінімальних, середніх значень і границь кліппування) відносних амплітуд, визначених по першим Z польотам.

Модель для перехідних режимів представляє постійне значення для всіх частот обертання роторів і крутного моменту, визначене як максимально-досягнуте значення у всіх умовах експлуатації по першим Z польотам.

ІМПРГ зберігаються в енергонезалежній пам'яті. В моделі діагностування передбачено оцінку тренда цих моделей у процесі виробітку ресурсу.

Оцінка трендів за часом виробітку ресурсу будується на обчисленні S -дискримінанта середніх значень моделей для сталих режимів. Якщо поточне значення S -дискримінанта в будь-якому піддіапазоні перевищить заздалегідь встановлене значення (з досвіду експериментальних досліджень роботи методу рекомендується значення, що дорівнює семи), то до САК літака видається діагностичне повідомлення.

Оцифровані дані із МПОІ поступають до моделі розпізнавання стану шестерних пар, підшипникових вузлів і ступеня забруднення масла (МРСШПМ), де піддаються «переупакуванню» відносно частоти обертання гвинта. Дана операція виконується для того, щоб компенсувати вплив низькочастотних процесів у системі «турбокомпресор-трансмісія-гвинт». Іншими словами дані по вібрації розбиваються на вибірки, кожна з яких відповідає одному обороту повітряного гвинта. Відсортовані в такий спосіб дані проходять вейвлет-перетворення відповідно до розроблених методів спектрального аналізу.

Модель підготовки (вибору) даних для частотної ідентифікації (МПДЧІ) виконує розрахунок характеристичних частот вузлів двигуна залежно від частот обертання роторів.

На підставі інформації, що надходить із моделі вибору даних для контролю шестерень і підшипників редукторів і коробки приводів, у МРСШПМ формуються завдання частотної ідентифікації спектрів вейвлет-коефіцієнтів і взаємних спектрів вейвлет-коефіцієнтів. Потім виробляється амплітудне порівняння складових, виділених відповідно до завдання частотної ідентифікації.

Відповідно до завдання частотної ідентифікації спектри вейвлет-коефіцієнтів і взаємні спектри вейвлет-коефіцієнтів проходять обробку в спеціальних погоджувачих фільтрах. У загальному вигляді ці фільтри можуть бути представлені таким виразом:

$$\text{Conform Filter (CF)} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (V_i \cdot w_i)^2}, \quad (3)$$

де

$$w_i = \left[\frac{1}{k} \sum_{t=1}^k V_i(t) \right]^{-1}, \quad k < N. \quad (4)$$

Ці фільтри призначені для оцінки бічних і комбінаційних складових щодо основних характерних складових. Ціль такої обробки – раннє виявлення змін у відповідних вузлах. При відсутності або незначних змінах вихідне значення фільтра прагне до одиниці. У протилежному випадку – до нуля. Результати фільтрації й амплітудних порівнянь надалі проходять через процедури узагальнення в індивідуальних моделях і оцінку трендів. У МРСШПМ також передбачена оцінка ступеня забруднення масла на основі обробки даних у частотному діапазоні 800-1800 Гц.

Передбачена в переліку завдань по розпізнаванню технічного стану вузлів і систем двигуна оцінка стану вимірювальних трактів «датчик вібрації - підсилювач заряду» заснована на порівняльній оцінці (за схемою погоджувачих фільтрів) складових у частотному діапазоні 1-10 Гц (самі вищі масштаби вейвлет-перетворення) і складової зубозачеплення ступеня перебору (середні масштаби вейвлет-перетворення).

Висновки

У даній роботі одержала подальший розвиток модель діагностування вузлів ГТД, що відрізняється від існуючих застосуванням безперервного вейвлет-аналізу, крос-спектрального аналізу та S-дискримінанта.

Проведені експериментальні дослідження розроблених методів аналізу вібраційних сигналів показали їхню ефективність при виділенні ознак зношування вузлів двигуна.

За допомогою вдосконаленого статистичного методу пропонується проводити загальну експрес-діагностику відхилення технічного стану двигуна від нормального та стежити за ступенем розвитку дефектів. За допомогою методу, заснованого на застосуванні вейвлетної фільтрації, проводиться спектральний аналіз вібраційного сигналу з метою виді-

лення частотних характеристичних складових, що дозволяють судити про місце виникнення дефекту.

Таким чином, модель діагностування, що поєднує в собі розроблені методи, уможливило виявлення ознак зношування вузлів ГТД на більш ранніх етапах розвитку й дозволяє в автоматичному режимі стежити за ступенем розвитку дефектів.

Розроблена модель діагностування може бути використана при проектуванні перспективних систем керування силових установок сучасних літальних апаратів для аналізу особливостей нестационарних сигналів і діагностування станів деталей і вузлів ГТД.

Література

1. Bendjama, H. *Application of Wavelet Transform for Fault Diagnosis in Rotating Machinery [Text] / H. Bendjama, S. Bouhouche, M. S. Boucherit // International Journal of Machine Learning and Computing. – 2012. – Vol. 2, No. 1. – P. 82 – 87.*
2. Peng, Z.K. *Application of the wavelet transform in machine condition monitoring and fault diagnostics [Text] / Z.K. Peng, F.L. Chu // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2004. – Vol. 18, № 2. – P. 199 – 221.*
3. Юр, Т.В. *Метод анализа технического состояния подшипников качения, основанный на использовании вейвлет-математики [Текст] / 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 [Текст] / Т.В. Юр, В.И. Дубровин, В.Н. Харитонов // Радиоэлектроника. Информатика. Управление. – 2010. – № 2. – С. 157 – 165.*
5. Соколова, А.Г. *Вибромониторинг машинного оборудования и раннее обнаружение эксплуатационных повреждений [Текст] / А.Г. Соколова, Ф.Я. Балицкий // Вестник научно-технического развития. – 2008. – № 7 (11). – С. 45 – 50.*
6. Patent US 7013210 B2. *Vibration monitoring system for gas turbine engines / McBrien, Gary M. (Glastonbury, CT), Gottwald, James (Amherst, NH); Goodrich Pump & Engine Control Systems, Inc. (West Hartford, CT, US). – № US 10/801,301; – filed on 16-Mar-2004, published on 14-Mar-2006.*
7. Юр, Т.В. *Методы и модели вибрационной диагностики узлов газотурбинных двигателей [Текст] / Т.В. Юр // Зб. тез доп. VI Міжнар. наук.-практ. конф. Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій, 19-21 вересня 2012. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2012. – С. 146 - 147.*

Рецензент: д-р техн. наук, проф., зав. каф. «Технології авіадвигунів» А.Я. Качан, Запорізький національний технічний університет, Запоріжжя.

МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ УЗЛОВ ГТД ПО ПАРАМЕТРАМ ВИБРАЦИИ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

Т.В. Юр, В.М. Харитонов, В.И. Дубровин

В работе предложена модель диагностирования технического состояния узлов ГТД с применением методов спектрального анализа вибрационных сигналов на основе непрерывного вейвлет-преобразования, кросс-спектрального анализа и статистического параметра S-дискриминанта. За счет применения математического аппарата вейвлет-фильтрации повышена эффективность распознавания частотных признаков износа деталей двигателя. Разработанная модель может быть использована при проектировании перспективных систем управления силовых установок современных летательных аппаратов для анализа особенностей нестационарных сигналов и диагностирования состояния деталей и узлов ГТД.

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

MODEL FOR EVALUATION OF GAS-TURBINE ENGINE ELEMENTS TECHNICAL STATE BY VIBRATION PARAMETERS BASED ON WAVELET-TRANSFORM

T.V. Yur, V.N. Haritonov, V.I. Dubrovin

Diagnostic model for gas turbine elements based on spectral analysis of vibration signals with use of wavelet transform, cross-spectral analysis and S-discriminant statistical parameter is proposed in the work. Mathematical tool of wavelet filtering allowed improving an efficiency of recognition of characteristic frequency features of elements wear. The developed model could be used in construction of perspective control systems of aircraft engine units to analyze non-stationary signals and to give a diagnosis of engine units' state.

Key words: gas-turbine engine, wear, fault, control system, vibration monitoring, model of diagnostics, continuous wavelet transform.

Юр Тетяна Василівна – канд. техн. наук, ст. викладач кафедри «Програмні засоби» Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, Україна, e-mail: tetyana.yur@gmail.com.

Харитонов Віктор Миколайович – інженер-конструктор ДП «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, e-mail: 03510@ivchenko-progress.com.

Дубровін Валерій Іванович – канд. техн. наук, професор, зав. кафедри «Програмні засоби» Запорізького національного технічного університету, Запоріжжя, e-mail: vdubrovin@gmail.com.