

УДК 621.372

Н.И. БУРАУ¹, Ю.В. СОПИЛКА¹, Л.Л. ЯЦКО², Р.А. ТРОФИМЕНКО²¹ *Национальный технический университет Украины «КПИ»*² *ОАО «НТК «Электронприлад»*

ВЕЙВЛЕТНАЯ ФИЛЬТРАЦИЯ СИГНАЛОВ ПРИ ИЗМЕРЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

Рассматривается возможность использования вейвлетной фильтрации для уменьшения или исключения случайной составляющей сигналов при измерении частоты вращения ротора авиационного двигателя на нестационарных режимах эксплуатации. Сигнал частоты вращения на режиме запуска моделировался полиномом четвертого порядка, который аппроксимирует временную зависимость средних значений измеренного сигнала, и аддитивным случайным шумом, представляющим случайную составляющую измеренного сигнала. Для фильтрации использовалась вейвлет – функция db10 с разложением на 5 уровней. Показано, что однократное использование фильтрации позволяет на порядок уменьшить случайную составляющую измеренного сигнала частоты вращения ротора.

Ключевые слова: измерение частоты вращения ротора, нестационарные режимы, случайная составляющая измерений, вейвлетная фильтрация, разложение нестационарного сигнала.

Введение

На протяжении последних лет теория и практика технической диагностики газотурбинных двигателей (ГТД) развиваются в направлении универсализации методов и средств диагностирования, обеспечения высокой эффективности их использования, оптимизации разделения диагностических функций между бортовыми и наземными средствами контроля, использования комплексных диагностических систем. Среди многообразия методов и средств неразрушающего контроля и технической диагностики в практику контроля авиационных ГТД внедрены лишь те из них, которые наиболее применимы к ГТД, условиям их эксплуатации и удовлетворяют особенностям двигателей, как объектов контроля. Это методы диагностики по изменению параметров динамических процессов (вибрационная диагностика, диагностика по параметрам ГТД) и физико-механических параметров.

Выбор методов и средств диагностирования ГТД в условиях эксплуатации в значительной степени определяется контролепригодностью двигателя. Кроме этого, необходимо учитывать как сложность процессов, протекающих в ГТД на стационарных и переходных режимах, так и множество проявлений и влияний возможных неисправностей и повреждений на характеристики рабочих процессов. Главными источниками ошибок диагностирования являются шумы при измерении контролируемых параметров, ошибки моделирования при формировании диагностических признаков и ошибки опре-

деления технического состояния контролируемого объекта. Уменьшение ошибок диагностирования или их устранение является актуальной задачей, решение которой будет способствовать повышению достоверности диагностики и повышению безопасности эксплуатации ГТД.

1. Формулирование проблемы

Одним из важных параметров ГТД, который измеряется в процессе эксплуатации двигателя и используется для контроля его технического состояния, является частота вращения ротора.

Так, роторные гармоники являются наиболее информативными составляющими в общем спектре вибраций ГТД и используются для контроля вибрации и вибрационной диагностики поврежденных роторных элементов [1]. При использовании роторных гармоник в качестве диагностических признаков дефектов или повреждений в основном анализируются их уровни на резонансных режимах и характеристики их изменения в соответствии с изменением частоты вращения ротора. Более эффективным является применение синхронного следящего анализа, особенностью которого является переход от анализа по частоте к анализу по отношению частот. При этом кратность информативных спектральных составляющих определяется как отношение частоты этой составляющей к частоте вращения ротора. Значение частоты вращения и скорости изменения частоты вращения ротора используется для диагностики повреждения вала ротора на стационарных и пе-

реходных режимах [2].

Для определения частоты вращения ротора в авиационных двигателях используются штатные индукционные или индуктивные (магнитоиндуктивные) датчики [1], обладающие достаточной точностью измерения частоты вращения на установившихся режимах (погрешность не превышает 0,5%-1%). Но в переходных режимах (особенно в режиме запуска) точность измерения частоты вращения снижается за счет воздействия неконтролируемых факторов, что характеризуется наличием случайной составляющей $\Delta n(t)$ в канале измерения частоты вращения ротора, которая изменяется в процессе работы двигателя с изменением частоты вращения $n(t)$ (в обобщенном виде случайная составляющая представляется случайной функцией времени). Это существенно ухудшает качество следящего анализа, а также приводит к увеличению разброса значений скорости изменения частоты вращения, что может привести к ошибкам диагностирования. Поэтому уменьшение или исключение случайной составляющей $\Delta n(t)$ является важной задачей измерения и контроля частоты вращения, позволит уменьшить ошибки диагностирования и повысить безопасность эксплуатации ГТД.

В данной статье обосновывается возможность использования вейвлетной фильтрации для уменьшения случайной составляющей измерений частоты вращения на переходных режимах.

2. Решение проблемы

Для исключения случайной составляющей $\Delta n(t)$ при измерении частоты вращения ротора на нестационарных режимах (режимах увеличения частоты вращения) предложен алгоритмический метод на основе вейвлетной фильтрации [3]. В качестве примера используем результаты стендовых испытаний при запуске двигателя ВД АИ-450-МС [2,3]. Изменение средних значений частоты вращения ротора аппроксимируем полиномом четвертого порядка:

$$\bar{n}(t) = n_0 + n_1 t + n_2 t^2 + n_3 t^3 + n_4 t^4, \quad (1)$$

где коэффициенты полинома имеют значения: $n_0=0.2462$; $n_1=0.8639$; $n_2=0.7881$; $n_3=-0.1231$; $n_4=0.0071$.

С учетом случайной составляющей в канале измерения частоты вращения $\Delta n(t)$ измеренная частота представляется суммой

$$n(t) = \bar{n}(t) + \Delta n(t). \quad (2)$$

2.1. Теоретическое обоснование

Как известно [4], вейвлет – это волновая функция с нулевым средним значением, ограниченная в

частотном и временном измерениях. В процессе вейвлет – преобразование (ВП) происходит j -уровневое разложение анализируемого сигнала в иерархический набор аппроксимаций (приближений), которые характеризуют медленные изменения сигнала, и деталей, характеризующих быстропеременные (высокочастотные) составляющие анализируемого сигнала, т.е. анализируемый сигнал $x(t)$ представляется суммой:

$$x(t) = x_{j_m}^a(t) + \sum_{j=1}^{j_m} x_j^d(t), \quad (3)$$

где $x_{j_m}^a(t)$ – аппроксимация последнего уровня разложения;

$x_j^d(t)$ – деталь на j -м уровне разложения.

Для реализации последней зависимости используются зеркальные квадратурные фильтры, по коэффициентам g_k и h_k которых определяются вначале масштабирующая функция $\varphi(t)$, а затем вейвлет $\psi(t)$ в соответствии с выражениями:

$$\varphi(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k \varphi(2t - k) \quad \text{и} \quad \psi(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k \varphi(2t - k).$$

Масштабирующая функция и вейвлеты удовлетворяют условиям ортогональности. При этом масштабирующая функция отвечает условию нормирования ($\int \varphi(t) dt = 1$), а вейвлет – функция обладает свойством равенства нулю первых M ее моментов:

$$\int t^m \psi(t) dt = 0, \quad (4)$$

где $m \in [0; M-1]$; m и M – целые числа.

С использованием описанного подхода для разных значений M применительно к масштабирующей функции было получено семейство вейвлетов Добеши (Daubechies), в обозначении (dbM) которых M соответствует числу равных нулю моментов вейвлета и определяет его порядок [5].

Фундаментальное свойство вейвлет – функции (4) открывает возможность для разработки метода очистки измеренных значений частоты вращения от случайной составляющей. Свойство равенства нулю первых M моментов вейвлет – функции означает, что если использовать такую функцию для ВП сигнала, имеющего вид полинома r -го порядка от t , как, например, выражение (1), то в результате преобразования при условии $M=r$ такой сигнал будет подавлен в силу свойства (4). Если же применить ВП к сигналу, описываемому выражением (2), то в результате преобразования будет подавлена полиномиальная составляющая $\bar{n}(t)$, а случайная составляющая $\Delta n(t)$ будет представлена набором деталей $x_j^d(t)$ из выражения (3) с заданным числом уровней разложения j_m .

2.2. Реализация алгоритмического метода на основе вейвлетной фильтрации

С учетом изложенного выше теоретического обоснования для уменьшения или исключения случайной составляющей $\Delta n(t)$ из измеренного сигнала частоты вращения (2) и определения полезной полиномиальной составляющей предложен алгоритмический метод на основе вейвлетной фильтрации. Согласно данному методу обработка измеренного сигнала должна осуществляться в соответствии со схемой на рис. 1. Для усиления полученного эффекта процедуру исключения случайной составляющей можно проводить в два этапа, т.е. осуществить повторное использование алгоритмического метода к

уже очищенному на первом этапе сигналу $n(t) = \bar{n}(t) + \Delta_1 n(t)$.

На рис. 2 приведены результаты применения предложенного метода исключения случайной составляющей $\Delta n(t)$ при измерении частоты вращения ротора (в процентах) в процессе стендовых испытаний при запуске двигателя ВД АИ-450-МС. Для ВП использовалась вейвлет – функция db10 с разложением на 5 уровней. Как видно из приведенных результатов, предложенный метод позволяет эффективно очистить измеренный сигнал частоты вращения от случайной составляющей, причем даже однократное использование процедуры позволяет уменьшить интенсивность $\Delta n(t)$ по всем элементам разложения минимум в 10 раз.

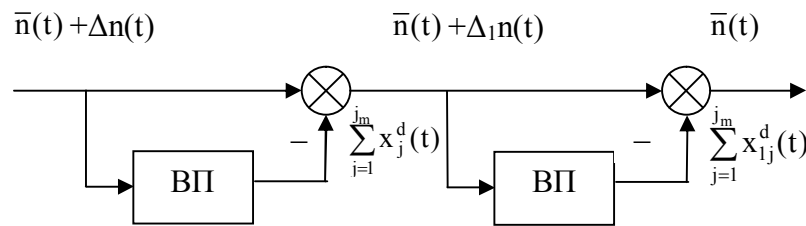


Рис. 1. Схема реализации алгоритмического метода исключения случайной составляющей частоты вращения ротора на нестационарных режимах

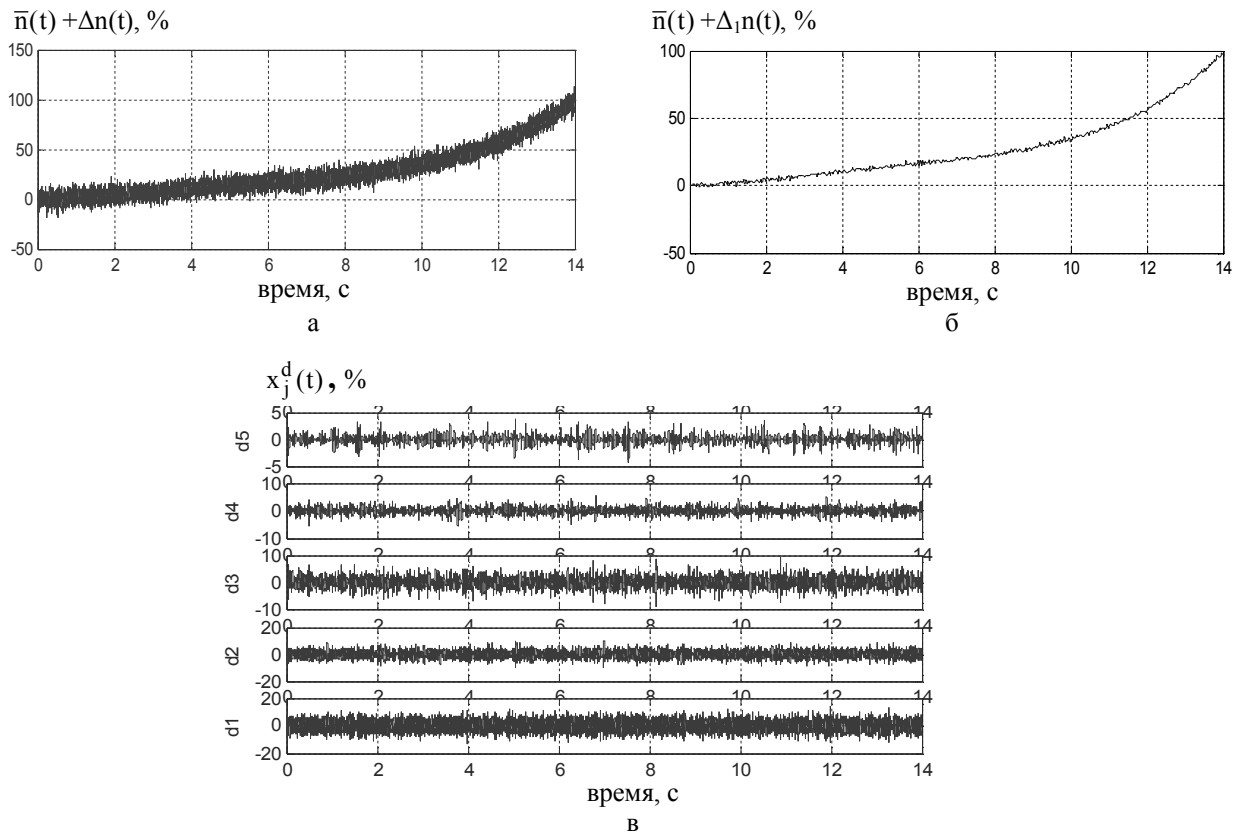


Рис. 2. Результаты исключения случайной составляющей при измерении частоты вращения ротора: а – исходный сигнал; б – сигнал после фильтрации; в – разложение случайной составляющей на 5 уровней

Заключення

Для підвищення точності вимірювання частоти обертання ротора в перехідних режимах і достовірності діагностики роторних елементів ГТД при використанні інформації о частоті обертання пропонується алгоритмічний метод усунення випадкової складової вимірюваної частоти обертання ротора на основі вейвлетної фільтрації. Показано, що однократне використання фільтрації дозволяє, як мінімум на порядок зменшити випадкову складову по всім елементам вейвлет-розкладання.

Література

1. Дорошко С.М. Контроль і діагностування технічного стану газотурбінних двигачей по вібраційним параметрам / С.М. Дорошко. – М.: Транспорт, 1984. – 128 с.

2. Яцко Л.Л. Комплексна діагностика технічного стану роторів авіаційних двигачей на стаціонарних та нестационарних режимах: автореф. дис.... канд. техн. наук: 05.11.13 / Яцко Ласло Ласлович, НТУУ «КПІ». – К., 2008. – 20 с.

3. Пат. 31598 Україна, МПК G01P 15/09, G01H 11/00. Спосіб визначення частоти обертання обладнання/ Аврутова І.В., Бурау Н.І., Сопілка Ю.В., Павловський О.М., Яцко Л.Л.; Власник НТУУ «КПІ». - № 200714833; заявл. 26.12.2007; опубл. 10.04.2008, Бюл. №7. – 3 с.: іл.

4. Бурау Н.І. Аналіз сучасних методів обробки акустичних сигналів для їх використання в задачах віброакустичної діагностики / Н.І. Бурау, П.І. Марчук, А.Н. Тяпченко // Акустичний вісник. – 2001. – №4. – С. 3-10.

5. Daubechies I. Wavelet Transform, Time-Frequency Localization and Signal Analysis / I. Daubechies // IEEE Trans. Infor. Theor. – 1990. – Vol.36. – No.5. – P.961-1005.

Поступила в редакцію 11.05.2009

Рецензент: д-р техн. наук, проф., декан ФЛА С.Р. Ігнатювич, Національний авіаційний університет, Київ.

ВЕЙВЛЕТНА ФІЛЬТРАЦІЯ СИГНАЛІВ ПРИ ВИМІРЮВАННІ ЧАСТОТИ ОБЕРТАННЯ

Н.І. Бурау, Ю.В. Сопілка, Л.Л. Яцко, Р.А. Трофіменко

Розглянуто можливість використання вейвлетної фільтрації для зменшення чи вилучення випадкової складової сигналів при вимірюванні частоти обертання ротора авіаційного двигача на нестационарних режимах експлуатації. Сигнал частоти обертання на режимі запуску моделювався поліномом четвертого порядку, який апроксимує часову залежність середніх значень вимірюваного сигналу, та адитивним випадковим шумом, що є випадковою складовою вимірюваного сигналу. Для фільтрації використана вейвлет-функція db10 з розкладанням на 5 рівнів. Показано, що одноразове застосування фільтрації дозволяє на порядок зменшити випадкову складову вимірюваного сигналу частоти обертання ротора.

Ключові слова: вимірювання частоти обертання ротора, нестационарні режими, випадкова складова вимірювань, вейвлетна фільтрація, розкладання нестационарного сигналу.

WAVELET SIGNALS FILTRATION AT THE ROTATING FREQUENCY MEASURING

N.I. Bouraou, Yu. V. Sopilka, L.L. Yatsko, R.A. Trofimenko

The opportunity of wavelet filtration usage for reduction or exceptions of a casual component of signals is considered at measurement of frequency of rotor rotation of the aviation engine on non-steady-state modes of operation. The signal of rotation frequency on a mode of start was modeled by a polynomial of the fourth order, which approximates time dependence of average values of the measured signal, and the additive random noise representing a random component of the measured signal. For a filtration is used wavelet - function db10 with decomposition on 5 levels. It is shown, that unitary use of a filtration allows to reduce a random component of the measured signal of rotation frequency by the order.

Key words: measurement of frequency of rotor rotation, non-steady-state modes, random component of the measurement, wavelet filtration, decomposition of non-stationary signal.

Бурау Надежда Ивановна – д-р техн. наук, проф., завідувача кафедри приборів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «КПІ», Київ, Україна; e-mail: bourau@pson.ntu-kpi.kiev.ua.

Сопілка Юрій Валерьевич – асистент кафедри приборів і систем орієнтації і навігації Національного технічного університету України «КПІ», Київ, Україна, e-mail: sopilk@ukr.net.

Яцко Ласло Ласлович – канд. техн. наук, начальник бригади – ведучий конструктор ОАО «НТК «Електронприлад», Київ, Україна, e-mail: iatsko@mail.ru.

Трофіменко Руслан Анатольевич – ведучий інженер відділу ОАО «НТК «Електронприлад», Київ, Україна.