

УДК 621.833:519.004

Н.И. БУРАУ

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Украина

ОЦЕНКА ИНФОРМАТИВНОСТИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ПРИЗНАКОВ ТРЕЩИННО-ПОДОБНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ В ЛОПАТКАХ ГТД

Исследуются диагностические признаки трещин в лопатках ГТД, полученные в результате цифровой обработки смоделированных виброакустических сигналов при стационарном вибрационном возбуждении рабочего колеса. Проведена оценка информативности признаков по критерию Фишера и по относительному изменению признака при изменении состояния объекта.

виброакустическая диагностика, трещинно-подобные повреждения, обработка сигналов, диагностические признаки, информативность признака

Введение

Среди актуальных проблем в авиационной технике, требующих первоочередного научно-технического обеспечения, следует отметить необходимость разработки, дальнейшего усовершенствования методов и средств диагностирования технического состояния систем и элементов авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) как во время эксплуатации, так и при проведении технического обслуживания и восстановления. Достигнутый на сегодняшний день уровень и перспективы развития методов и средств диагностирования, а также повышение уровня контролепригодности двигателей, обеспечивают возможность перехода к эксплуатации ГТД по состоянию с контролем параметров [1]. При этом основным принципом, за счет которого обеспечивается требуемый уровень безопасности полетов, является принцип предупреждения неисправностей, повреждений и отказов двигателей в полете.

Как показал анализ эксплуатационных неисправностей и повреждений ГТД, значительная часть отказов, приводящих к досрочному съему двигателя с эксплуатации, вызывается неисправностями элементов компрессора и турбины. Причем, практически для всех типов двигателей указанные отказы в основном вызываются такими характерными повреждениями, как забоины и вмятины лопаток ком-

прессора, трещины и обрывы лопаток компрессора, забоины, трещины и прогары лопаток турбины. Большинство таких трещинно-подобных повреждений в лопатках ГТД могут быть обнаружены на этапе начального развития при наличии постоянного мониторинга за состоянием элементов рабочих колес в эксплуатации.

1. Постановка задачи исследования

Для построения автоматической системы мониторинга технического состояния лопаток ГТД предлагается использовать методы вибрационной и виброакустической диагностики [2]. Дальнейшее развитие и усовершенствование данных методов применительно к элементам ГТД предполагает использование стационарных и нестационарных режимов вибрационного возбуждения лопаток рабочих колес и последующую обработку излучаемого вибрационного и акустического шума во временной, частотной, частотно-временной и масштабно-временной областях [3]. Проведенные теоретические исследования, модельные и физические эксперименты, позволили проанализировать влияние развивающихся трещинно-подобных повреждений на характеристики измеряемых сигналов, выбрать и исследовать эффективные методы обработки диагностической информации, выделить диагностические признаки и исследовать их зависимость от параметра трещины.

Однако практическая реализация системы мониторинга требует определения набора наиболее эффективных методов обработки информации, и, соответственно, наборов наиболее информативных и чувствительных к зарождению и начальному развитию трещины диагностических признаков для стационарных и нестационарных режимов ГТД.

Целью данной статьи является анализ информативности диагностических признаков развивающейся трещины в лопатке рабочего колеса ГТД при стационарном вибрационном возбуждении.

2. Выделение признаков и их анализ

Для решения поставленной задачи проведено моделирование виброакустических сигналов, излучаемых рабочим колесом при стационарном вибрационном возбуждении, их обработка во временной, частотной и частотно-временной областях, после чего были выделены и исследованы диагностические признаки трещины.

2.1. Моделирование виброакустических сигналов

Моделирование виброакустических сигналов на выходе модели рабочего колеса, содержащего 21 лопатку, проводилось при стационарном вибрационном возбуждении $P(t)$ колеса отдельными роторными гармониками с частотами 125 и 250 Гц, а также полигармоническим воздействием с указанными роторными гармониками. В качестве моделей бездефектных лопаток использовалась модель линейной колебательной системы с собственной частотой $f_* = 600$ Гц, а модель дефектной лопатки (с малой поверхностной усталостной трещиной) задавалась моделью колебательной системы с кусочно-линейной характеристикой восстанавливающей силы, импульсная характеристика которой имеет представление в виде разложения в ряд Фурье по гармоникам основной частоты модели лопатки с трещиной f_0 [2].

В качестве обобщенного параметра трещины принимается относительное изменение жесткости на полувращения деформирования ϑ , которое при моделировании изменялось в пределах 0,01 ... 0,05.

На выходе рабочего колеса сигнал получен путем свертки входного сигнала $P(t)$ с импульсной характеристикой колеса $G(t, \tau)$. Моделирование проводилось на временном интервале 1 с с периодом дискретизации $\Delta T = 2 \cdot 10^{-4}$ с, обеспечивая общее количество точек $N = 5000$. Для обработки использовались смоделированные на выходе колеса сигналы, а также аддитивная смесь этих сигналов и стационарного гауссова шума, моделирование которого проведено с использованием генератора случайных чисел с соответствующими коэффициентами для обеспечения значения отношения сигнал/шум в интервале 10...10⁵.

2.2. Обработка информации и выделение диагностических признаков

Для обработки использовались смоделированные сигналы для колеса с неповрежденными лопатками и при наличии трещины в одной из лопаток с указанным выше диапазоном значений ϑ . Обработка диагностической информации проведена с использованием следующих методов [2 – 5].

Определение безразмерных амплитудных дискриминант виброакустических сигналов $x(t)$:

$$J_T = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^n p(x) dx \right]^{\frac{1}{n}} \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^m p(x) dx \right]^{-\frac{1}{m}},$$

где $p(x)$ – одномерная плотность вероятности мгновенных значений процесса $x(t)$.

Наибольшей чувствительностью к зарождению и начальному развитию трещины обладают коэффициент импульсности J_3 ($n \rightarrow \infty; m = 1$) и коэффициент фона J_4 ($n \rightarrow \infty; m = 0,5$), которые при

использовании данного метода обработки являются диагностическими признаками трещины [4].

Частотно-временной анализ на основе преобразования Вигнера-Вайла:

$$W_x(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} g(\tau) x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) \exp(-j\omega\tau) d\tau,$$

где $x(u)$ – временной сигнал;

$x^*(u)$ – его комплексное сопряжение;

$g(\tau)$ – весовая функция скользящего окна Гаусса.

В результате преобразования получаем спектральные оценки процесса в плоскости переменных частота-время, которые позволяют определить когда и какие именно частотные составляющие анализируемого сигнала имеют место и как их интенсивность изменяется во времени [3]. Полученные оценки имеют ряд экстремумов, в качестве диагностического признака используем отношение интенсивности локального максимума к интенсивности глобального максимума $D_v = I_{vl}/I_{vg}$.

Биспектральный анализ. Спектральная функция двух частот – биспектр $S(f_1, f_2)$, определяется путем преобразования Фурье кумулянта третьего порядка $C_{3x}(k, l)$ процесса $x(n)$:

$$S(f_1, f_2) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} \sum_{l=-\infty}^{\infty} C_{3x}(k, l) \exp(-j2\pi f_1 k) \exp(-j2\pi f_2 l),$$

где $C_{3x}(k, l) = E\{x^*(n)x(n+k)x(n+l)\}$;

$E\{\bullet\}$ – обозначает усреднение по ансамблю;

* – знак сопряжения.

Результат преобразования представляет собой оценку модуля биспектра в плоскости переменных f_1 и f_2 [5], которая имеет глобальные и локальные экстремумы. В качестве диагностического признака используем отношение интенсивностей глобального и локального максимумов оценки модуля биспектра $D_b = I_{bg}/I_{bl}$.

2.3. Анализ диагностических признаков

В результате проведенного моделирования (для описанных выше состояний объекта диагностики (ОД), видов возбуждения и уровня аддитивного шума) и обработки полученных сигналов указанными методами, получены множества значений диагностических признаков J_3, J_4, D_v и D_b . Все признаки являются относительными величинами, что позволяет исключить их зависимость от ряда оказывающих влияние побочных факторов [6, 7]. В табл. 1 приведены значения математических ожиданий m_i и среднеквадратических отклонений σ_i признаков для различных состояний ОД, которые в дальнейшем использовались для оценки информативности признаков. Значению $\vartheta = 0$ соответствует бездефектное состояние объекта.

Таблица 1
Зависимость признаков от параметра ϑ

Признаки		Состояние объекта диагностики		
		$\vartheta = 0$	$\vartheta = 0,03$	$\vartheta = 0,05$
J_3	m_{J3}	2,016	2,139	2,245
	σ_{J3}	0,0814	0,1122	0,0987
J_4	m_{J4}	2,306	2,463	2,576
	σ_{J4}	0,0621	0,1066	0,0791
D_v	m_{Dv}	0,576	0,768	0,931
	σ_{Dv}	0,0154	0,0912	0,0697
D_b	m_{Db}	1,211	1,301	1,372
	σ_{Db}	0,0117	0,0252	0,0142

Согласно [4, 6, 7] основными требованиями, которым должны удовлетворять диагностические признаки, являются большая относительная скорость изменения признака при переходе от бездефектного к дефектному состоянию, а также минимальные значения дисперсии признаков при условии значительного отличия их средних значений для различных состояний. В соответствии с этим информативность полученных диагностических признаков оцениваем по информационному критерию Фишера:

$$K_{\phi} = \frac{[m(D/S_0) - m(D/S_1)]^2}{\sigma^2(D/S_0) + \sigma^2(D/S_1)},$$

где $m(\bullet)$ и $\sigma^2(\bullet)$ – соответственно математическое ожидание и дисперсия признака (D) для бездефектного (S_0) и дефектного (S_1) состояний объекта, и по относительному изменению математического ожидания признака для дефектного состояния:

$$Y = m(D/S_1)/m(D/S_0).$$

На рис. 1 приведены графики зависимости коэффициентов информативности Фишера, а на рис. 2 – графики зависимости относительных изменений средних значений признаков от значения параметра трещины ϑ .

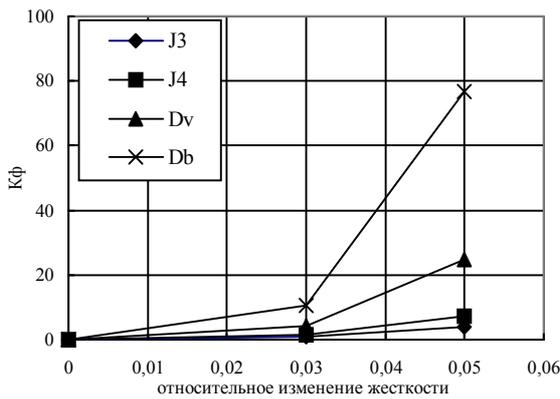


Рис. 1. Графики зависимости коэффициента K_{ϕ} от значения относительного изменения жесткости ϑ

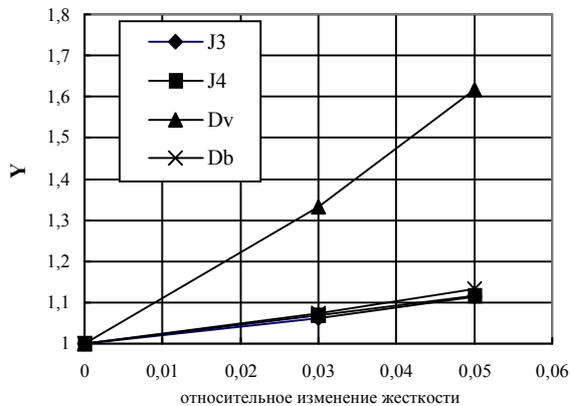


Рис. 2. Графики зависимости коэффициента Y от значения относительного изменения жесткости ϑ

Как видно из приведенных графиков, наибольшей информативностью по критерию Фишера обладает диагностический признак D_b , полученный в результате многомерного спектрального анализа (оценка модуля биспектра) виброакустического сигнала. Информативность коэффициентов импульсности J_3 и фона J_4 самая низкая среди анализируемых признаков. С увеличением параметра трещины ϑ значение коэффициента K_{ϕ} возрастает.

Переход ОД от бездефектного состояния к дефектному и увеличение параметра дефекта в наибольшей степени отражаются в изменении среднего значения признака D_v , полученного на основании частотно-временного анализа виброакустического сигнала. Значения относительных изменений средних значений остальных признаков практически совпадают в рассматриваемом диапазоне изменения параметра ϑ .

Кроме рассмотренных критериев оценки информативности диагностических признаков, целесообразно оценить коэффициенты их вариаций, которые характеризуют стабильность признаков для каждого из рассматриваемых состояний ОД:

$$K_v = \sigma(D/S_i)/m(D/S_i).$$

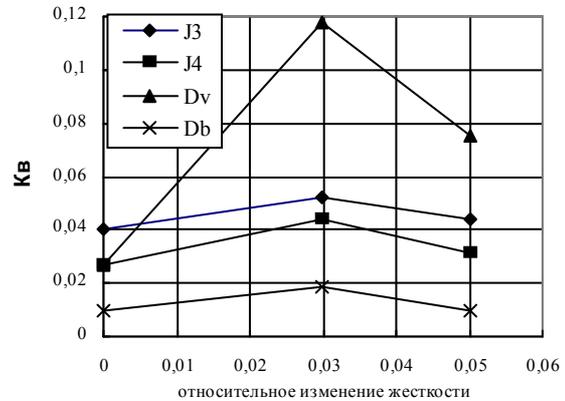


Рис. 3. Графики зависимости коэффициента K_v от значения относительного изменения жесткости ϑ

Графики зависимости коэффициентов K_B от состояния ОД и от значения параметра трещины ϑ для дефектного состояния приведены на рис. 3. Как видно из приведенных графиков, наиболее стабильным в рассматриваемом диапазоне значений ϑ является признак D_B . Наибольшие значения коэффициент вариации принимает для признака D_V при дефектном состоянии ОД, а стабильность признаков J_3 и J_4 находится в интервале достаточно близких значений.

Заключение

Проведена оценка информативности признаков трещинно-подобных повреждений, которые могут быть использованы для мониторинга состояния лопаток рабочих колес и диагностики их начальных повреждений на стационарных режимах функционирования ГТД.

Наибольшей информативностью обладает биспектральный признак D_B , который также является и наиболее стабильным среди анализируемых признаков. К достоинствам данного признака можно отнести и возможность проведения безошибочного распознавания состояния лопаток ГТД с использованием вероятностной нейронной сети в интервале малых значений параметра трещины $\vartheta = 0,005 \dots 0,1$ [5].

Использование остальных анализируемых в данной работе признаков трещины может быть целесообразным после предварительной обработки измеренных сигналов, например, в масштабной временной области [3].

Литература

1. Шереметьев А.В. Анализ опыта эксплуатации зарубежных газотурбинных двигателей по

техническому состоянию // *Авіаційно-космічна техніка і технологія*. – Х.: НАКУ „ХАГ”. – 2003. – Вип. 40/5. – С. 5 – 8.

2. Бурау Н.И. О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей // *Вибрации в технике и технологии*. – 2001. – № 4(20). – С. 45 – 48.

3. Бурау Н.И., Марчук П.И., Тяпченко А.Н. Анализ современных методов обработки акустический сигналов для их использования в задачах виброакустической диагностики // *Акустичний вісник*. – 2001. – № 4. – С. 3 – 10.

4. Бурау Н.И., Сопілка Ю.В. Виділення діагностичних ознак початкових міцнісних дефектів в елементах машин і механізмів // *Наукові вісті НТУУ “КПІ”*. – К.: НТУУ “КПІ”. – 2002. – № 5. – С. 54 – 58.

5. Бурау Н.И., Зажицкий А.В., Сопилка Ю.В. Распознавание состояния объекта виброакустической диагностики по результатам многомерного спектрального анализа // *Техническая диагностика и неразрушающий контроль*. – 2004. – № 2. – С. 3 – 8.

6. Карасев В.А., Максимов В.П., Сидоренко М.К. Вибрационная диагностика газотурбинных двигателей. – М.: Машиностроение, 1978. – 132 с.

7. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение, 1987. – 288 с.

Поступила в редакцию 10.05.2004

Рецензент: д-р техн. наук, проф. С.Р. Игнатович, Национальный авиационный университет, Киев.