

УДК 621.372

ПОВЫШЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ДИСКРИМИНАНТНЫХ ПРИЗНАКОВ ТРЕЩИНЫ В ЗАДАЧАХ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕМЕНТОВ РОТОРНЫХ СИСТЕМ

Н. И. БУРАУ, Ю. В. СОПИЛКА

Национальный технический университет Украины “КПИ”, Киев

Получено 20.08.2003

Для повышения чувствительности безразмерных амплитудных дискриминант, которые используются в качестве диагностических признаков в задачах виброакустической диагностики усталостных трещин в элементах роторных систем, проведена предварительная обработка измеренного акустического сигнала с применением вейвлет-преобразования. Показана эффективность двухуровневой обработки акустического сигнала, излучаемого имитатором роторной системы на стационарных и нестационарных режимах работы, для диагностики усталостной трещины.

Для підвищення чутливості безрозмірних амплітудних дискримінант, які використовуються як діагностичні ознаки в задачах віброакустичної діагностики втомних тріщин в елементах роторних систем, проведено попередню обробку виміряного акустичного сигналу із застосуванням вейвлет-перетворення. Показано ефективність застосування двох рівнів обробки акустичного сигналу, випромінюваного імітатором роторної системи на стаціонарних і нестаціонарних режимах роботи, для діагностики втомної тріщини.

In order to increase the sensitivity of amplitude discriminates serving the fault features for vibroacoustical diagnosis of fatigue cracks in the elements of rotary systems a preliminary wavelet decomposition of measured acoustical signal is used. The effectiveness of the two-level processing of acoustic signal, radiated by the imitator of rotary system at stationary and non-stationary regimes of operation, for diagnosis of fatigue crack is shown.

ВВЕДЕНИЕ

Обеспечение вибрационного и виброакустического мониторинга состояния роторных элементов авиационных двигателей (лопаточного аппарата рабочих колес) – крайне актуальная и сложная проблема авиационного двигателестроения. С механической точки зрения рабочие колеса газотурбинных двигателей (ГТД) являются одними из наиболее напряженных элементов, поэтому большая часть прочностных дефектов двигателя, имеющих вибрационное происхождение, приходится именно на лопаточный аппарат. В связи с этим повышение надежности, ресурса и предотвращение катастрофических разрушений двигателей в процессе эксплуатации, наряду с конструкторско-технологическим обеспечением вибрационной прочности современных ГТД, требует создания систем вибрационного и виброакустического мониторинга состояния элементов их рабочих колес с целью выявить прочностные повреждения и дефекты на стадии их зарождения и начального развития [1–3].

При разработке систем вибрационного и виброакустического мониторинга технического состояния сложных систем и диагностики дефектов, зарождающихся в процессе эксплуатации, решается ряд специальных задач. К ним относятся:

- получение информации о вибрационном состоянии объекта диагностики (ОД);
- преобразование и обработка измеренных сигналов с целью выделения информативных диагностических признаков;
- анализ признаков и принятие решения о техническом состоянии объекта [2, 3].

От результатов решения каждой из перечисленных задач зависит эффективность выполнения непосредственно следующих за ней этапов и процесса мониторинга в целом.

ГТД как объект виброакустической диагностики зарождающихся прочностных дефектов элементов рабочих колес представляет собой сложную динамическую систему со множеством связей и вибрационных возбуждений механического и аэродинамического происхождения [4]. Поэтому обработку диагностической информации и выделение информативных диагностических признаков можно отнести к наиболее важным и ответственным этапам процесса мониторинга. Выбор эффективных методов обработки диагностической информации в данном случае определяется как характером измеряемых сигналов на стационарных и нестационарных режимах эксплуатации двигателя, так и сравнительно малыми изменениями поле-

зного сигнала при зарождении и начальном развитии дефекта. Последнее обстоятельство в значительной степени усложняет процедуру выделения и анализа диагностических признаков в реальных условиях измерения широкополосного сигнала.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

В работах [3, 5] предложены методы анализа стационарных и нестационарных сигналов во временной, частотной, частотно-временной и масштабнo-временной областях, адаптированные к применению для решения задач диагностики зарождающихся усталостных трещин в лопатках рабочих колес ГТД. Для различных режимов функционирования двигателя проведено формирование подпространств диагностических признаков и проанализирована эффективность использования некоторых из них [3]. Среди рассмотренных признаков особое внимание целесообразно уделить безразмерным параметрам виброакустических сигналов – так называемым, “безразмерным амплитудным дискриминантам” [6]. Дело в том, что диагностические признаки, связанные с абсолютными значениями характеристик измеряемых сигналов, зачастую не являются инвариантными и зависят от значительного числа факторов, изменяющих их величины при неизменном состоянии ОД. Дискриминантные же признаки лишены этого недостатка.

Для стационарного режима эксплуатации двигателя в работе [7] проведено исследование эффективности использования в качестве признаков малой усталостной трещины в лопатке рабочего колеса безразмерных амплитудных дискриминант, определяемых как

$$J_r = \bar{x}_n / \bar{x}_m, \quad r = \overline{1, 4}. \quad (1)$$

В уравнении (1) \bar{x}_n , \bar{x}_m – средние значения амплитуды виброакустического процесса $x(t)$ с одномерной плотностью вероятности его мгновенных значений $p(t)$, которое определяется как корень степени n (или m) из момента того же порядка:

$$\bar{x}_\nu = \left[\int_{-\infty}^{+\infty} |x|^\nu p(x) dx \right]^{1/\nu}, \quad \nu = n, m. \quad (2)$$

Для четырех различных сочетаний значений n и m в уравнении (1) определяются следующие безразмерные амплитудные дискриминанты: коэффициент формы $J_1(n=2; m=1)$, коэффициент вероятности $J_2(n \rightarrow \infty; m=2)$, коэффициент импульсности $J_3(n \rightarrow \infty; m=1)$ и коэффициент фона $J_4(n \rightarrow \infty; m=0.5)$.

Проведенные в [7] исследования показали, что наиболее чувствительны к зарождению и начальному росту усталостной трещины коэффициенты импульсности J_3 и фона J_4 . Следует, однако, отметить, что относительная скорость изменения признаков при переходе от бездефектного состояния ОД к дефектному при малых (до 7 %) значениях относительного изменения жесткости дефектного объекта существенно уменьшается при выделении их на фоне помех (к последним можно отнести все неинформативные составляющие измеренного на выходе рабочего колеса акустического сигнала). В нашем случае в качестве неинформативных будем рассматривать компоненты акустического сигнала, представляющие собой реакции бездефектных лопаток рабочего колеса на приложенное вибрационное воздействие и аддитивный стационарный гауссов шум.

Для повышения чувствительности дискриминантных признаков к зарождению и начальному росту усталостной трещины предлагается проводить предварительную обработку измеренного акустического сигнала в масштабнo-временной области с использованием вейвлет-преобразования. В результате преобразования анализируемый сигнал представляется в виде разложения в иерархический набор аппроксимаций, характеризующих медленные изменения сигнала, и деталей, являющихся высокочастотными компонентами сигнала [5]. Каждый из полученных элементов разложения может быть использован на втором уровне обработки информации как отдельный анализируемый сигнал, для которого в соответствии с уравнением (1) определяются безразмерные амплитудные дискриминанты.

Цель данной статьи – анализ эффективности предварительной обработки акустического сигнала для повышения чувствительности безразмерных амплитудных дискриминант, используемых в качестве диагностических признаков усталостной трещины в задаче виброакустической диагностики элементов роторных систем.

2. ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОБРАБОТКА АКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

Анализируемый акустический сигнал был получен в ходе экспериментальных исследований вынужденных колебаний имитатора рабочего колеса при стационарных и нестационарных вибрационных воздействиях. В качестве имитатора колеса использовался контролируемый образец из алюминиевого сплава Д16, имеющий восемь ло-

пастей. Собственные частоты элементов образца (лопастей) определялись экспериментально путем спектральной обработки импульсных откликов каждого из них. Они находятся в диапазоне $91.5 \div 100$ Гц. Образец закреплялся на валу приводного механизма экспериментальной установки, а вибрационное воздействие на элементы образца осуществлялось вращающимся ротором с частотой $f_p = 46.7$ Гц на временном интервале $t = 10$ с. Акустический сигнал, излучаемый имитатором колеса при его вращении, определялся на фоне шума экспериментальной установки (отношение сигнал/шум составляло 10^{-1}) с помощью измерительной системы. Для преобразования сигнала в цифровую форму использовалась звуковая карта ПЭВМ. Выбранный период дискретизации составлял $\Delta T = 2 \cdot 10^{-4}$ с, что обеспечило $N = 5 \cdot 10^4$ точек-отсчетов на указанном временном интервале. Исследовались бездефектный образец, а также образец с концентратором дефекта (надрезом на боковой кромке одной из лопастей). Для каждого из указанных технических состояний было проведено по 10 испытаний.

На рис. 1 представлена одна из реализаций измененного акустического сигнала, излучаемого при вращательном движении бездефектным образцом, и ее отдельные фрагменты, соответствующие режиму разгона с линейным изменением частоты вращения ротора (часть 1), переходному режиму в элементах образца после их вибрационного возбуждения (часть 2), стационарному режиму вращения с постоянной частотой (часть 3) и режиму выбега (часть 4). Подобные реализации получены и для случая наличия дефекта в элементе контролируемого образца. Разбиение реализации измененного сигнала на отдельные выборки разной длительности (части 1–4) для дальнейшей обработки обуславливалось необходимостью исследовать эффективность использования рассматриваемых признаков для различных режимов функционирования двигателя. Такой подход важен для построения эффективной системы вибрационного и виброакустического мониторинга состояния элементов рабочих колес двигателя [3].

Для предварительной обработки выделенных выборок акустического сигнала в масштабнo-временной области использовалась базовая вейвлет-функция db10 из семейства Добеши с разложением каждой выборки на пять уровней (результаты разложения приведены на рис. 2). Порядок вейвлет-функции и количество уровней разложения выбраны в соответствии с рекомендациями, приведенными в [8]. Таким образом, для определения безразмерных амплитудных

дискриминант в качестве исходной информации выступают элементы разложения a5 и d1–d5. Длина каждого из них соответствует длине обрабатываемой выборки сигнала (см. рис. 1) для бездефектного состояния контролируемого образца. Для дефектного состояния используются выборки такой же длины.

Средние значения амплитуд элементов разложения в соответствии с уравнением (2) определялись для длины обрабатываемой выборки N_i , $i = \overline{1, 4}$ и четырех сочетаний параметров n и m , указанных выше:

$$\bar{x}_\nu = \left[\frac{1}{N_i} \sum_{j=1}^{N_i} |x_j|^\nu \right]^{1/\nu}, \quad \nu = n, m.$$

После этого были вычислены безразмерные амплитудные дискриминанты (1).

Для проведения сравнительного анализа чувствительности исследуемых признаков к наличию дефекта дискриминанты были определены и для выделенных частей 1–4 измеренного акустического сигнала, не подвергнувшегося предварительной обработке.

3. АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

В результате проведенного анализа диагностической информации определены значения J_r , которые по всей совокупности выделенных выборок и их элементов вейвлет-преобразования находятся в следующих пределах:

- $J_1 = 1.2109, \dots, 3.0785$; $J_2 = 2.5850, \dots, 10.1840$; $J_3 = 3.1540, \dots, 31.3511$; $J_4 = 3.6182, \dots, 85.6443$ для бездефектного контролируемого образца;
- $J_1 = 1.1937, \dots, 2.7021$; $J_2 = 2.3695, \dots, 7.6520$; $J_3 = 2.9624, \dots, 20.6763$; $J_4 = 3.5264, \dots, 45.6294$ для образца с концентратором дефекта одного элемента.

Следует отметить, что максимальные значения признаков для выделенных частей сигналов, а также для элементов их вейвлет-преобразования наблюдаются при обработке информации, которая характеризует нестационарные режимы (в первую очередь, режим разгона – часть 1). При обработке данных, соответствующих стационарному режиму и режиму выбега (части 3 и 4), значения признаков стремятся к минимальным величинам в указанных диапазонах их изменения. Такая тенденция характерна для всех признаков. Влияние дефекта проявляется в изменении значения каждого

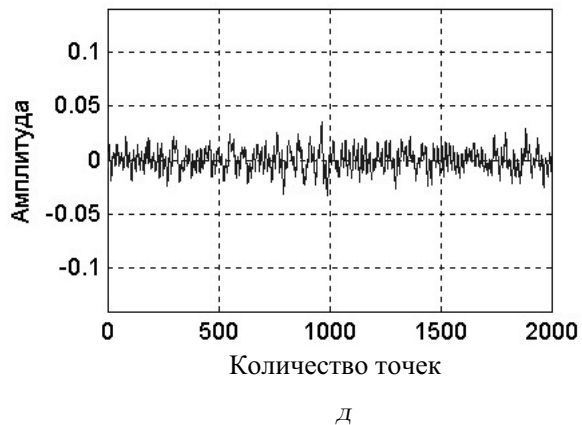
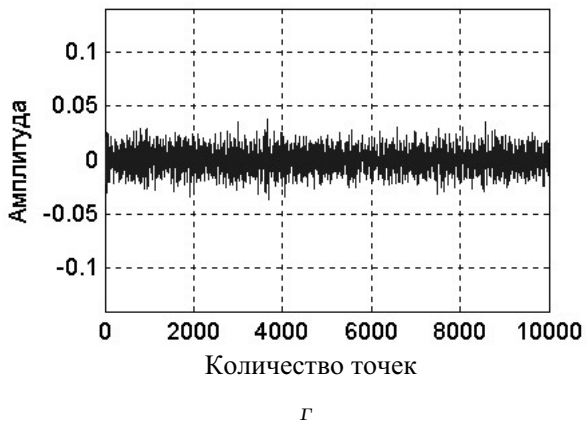
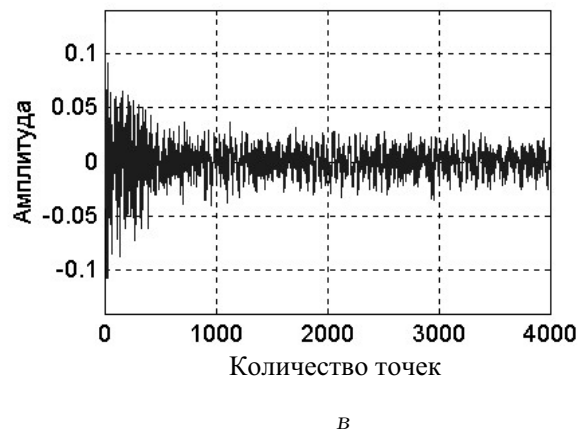
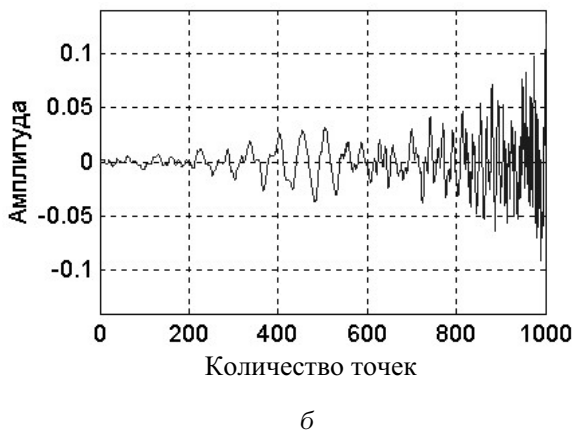
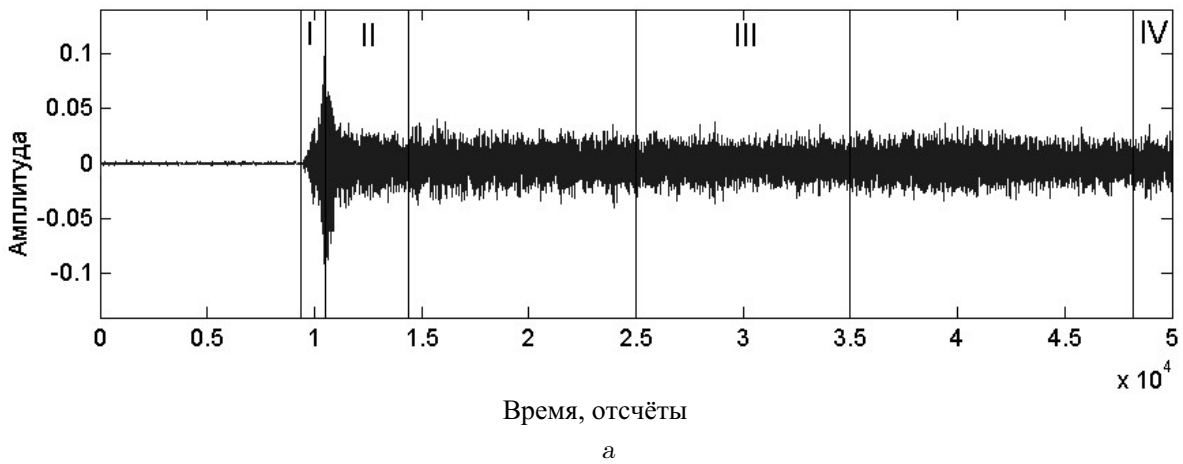


Рис. 1. Реализация измеренного акустического сигнала при отсутствии дефектов контролируемого образца:
 а – сигнал, б – часть 1, в – часть 2, г – часть 3, д – часть 4

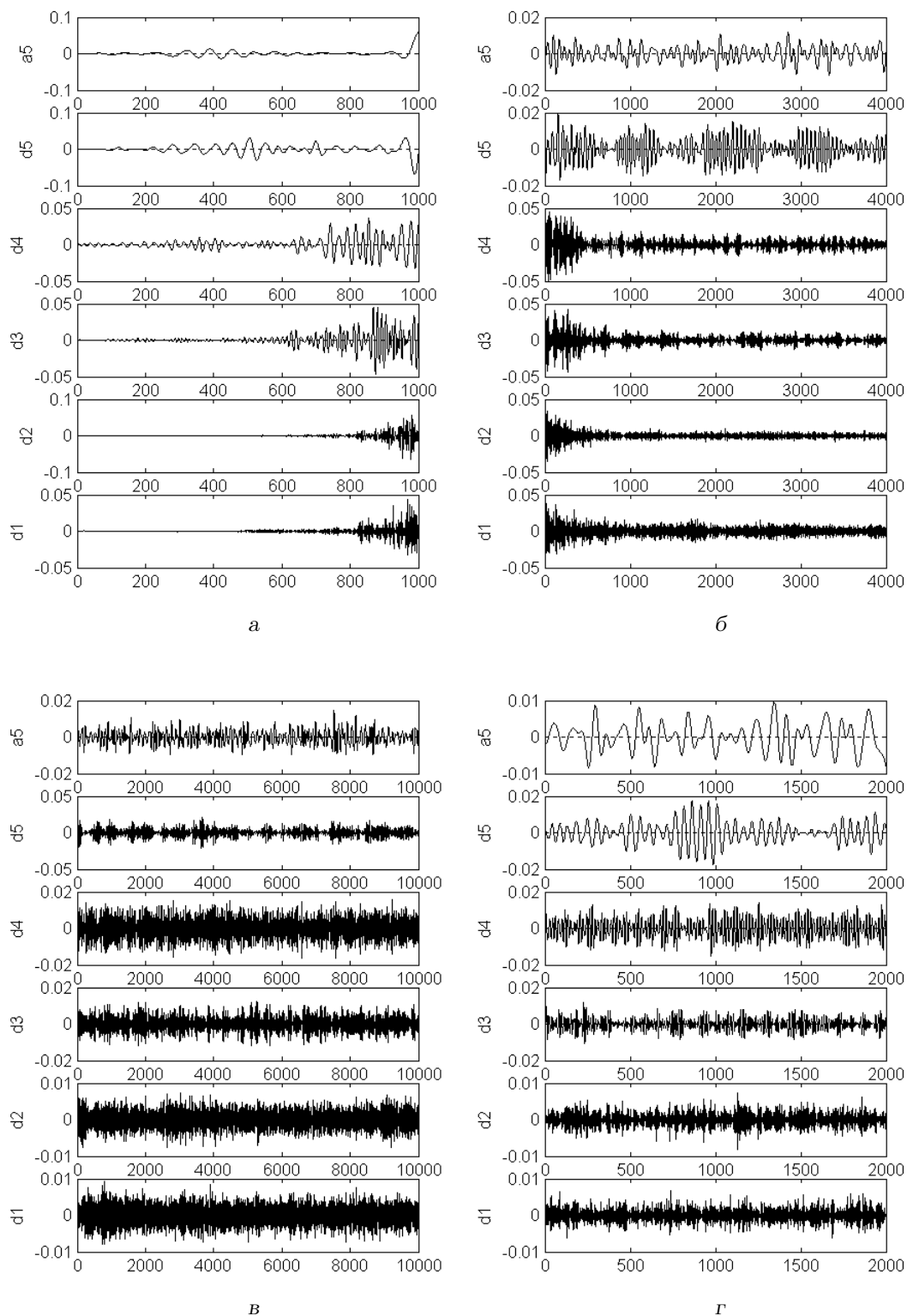


Рис. 2. Результаты вейвлет-разложения:
 а – часть 1, б – часть 2, в – часть 3, г – часть 4

признака. Кроме того, характер изменения зависит от режима вибрационного возбуждения.

Чувствительность выделенных диагностических признаков к наличию дефекта, как и в [7], целесообразно проанализировать по значению относительной скорости изменения признака при переходе от бездефектного состояния объекта к дефектному:

$$V_{J_r} = |J_r - J_r^*|/J_r^*.$$

Здесь J_r^* и J_r – значения безразмерных амплитудных дискриминант при отсутствии и наличии дефекта соответственно.

Результаты расчетов относительных скоростей изменения признаков (в процентах) для каждой из выделенных на рис. 1 частей измеренных акустических сигналов и элементов их вейвлет-преобразования приведены в виде диаграмм на рис. 3. Как видно из них, для каждого из режимов вибрационного возбуждения контролируемого образца есть от двух до пяти компонент анализа, для которых скорости изменения признаков превосходят значения, полученные при анализе экспериментальных данных без предварительной обработки (компонента анализа на рис. 3 – “сигнал”). При этом в некоторых случаях наблюдается увеличение скорости в шесть раз. Это означает, что предварительная обработка диагностической информации с использованием вейвлет-преобразования дала возможность значительно повысить чувствительность анализируемых диагностических признаков к появлению дефекта для всех рассмотренных режимов вибрационного возбуждения контролируемого образца. В общем случае наиболее чувствительными из рассмотренных признаков оказались коэффициенты фона J_4 , импульсности J_3 и вероятности J_2 . Коэффициент формы J_1 содержит в числителе среднеквадратическую амплитуду, что увеличивает значимость составляющих анализируемого процесса, имеющих большую относительную колебательную энергию. Поэтому чувствительность этого признака к изменениям составляющих с малой колебательной энергией (наличие которых и обуславливается появлением дефекта) достаточно низка. Следовательно, данный коэффициент нецелесообразно использовать в качестве диагностического признака.

Для каждого из режимов возбуждения нет необходимости определять дискриминанты для всех элементов вейвлет-преобразования. На втором уровне обработки целесообразно использовать только те элементы, для которых скорость изменения признаков максимальна или превышает определенное пороговое значение. На нестационарном

режиме разгона ротора (часть 1) такими элементами являются аппроксимация а5 и деталь d1, для части 2 – это детали d4 и d1, для стационарного режима – аппроксимация а5 и деталь d3, а для режима выбега – детали d2 и d4 или d5.

ВЫВОДЫ

Проведен анализ эффективности использования предварительной обработки диагностической информации с применением вейвлет-преобразования для повышения чувствительности безразмерных амплитудных дискриминант, используемых в качестве диагностических признаков усталостной трещины в задачах виброакустической диагностики элементов роторных систем. В результате обработки экспериментальных данных на стационарных и нестационарных режимах вибрационного возбуждения контролируемого образца при отсутствии и наличии концентратора дефекта показано, что относительная скорость изменения дискриминантных признаков отдельных элементов вейвлет-преобразования на всех исследуемых режимах вибрационного возбуждения значительно превышает значение скорости изменения признаков, полученных без предварительной обработки. Даны рекомендации по использованию анализируемых признаков при обработке стационарных и нестационарных сигналов. Полученные результаты целесообразно использовать при разработке системы виброакустического мониторинга состояния элементов рабочих колес авиационных двигателей, диагностики и оценивания зарождающихся в них усталостных повреждений.

1. *Зиньковский А. П., Матвеев В. В.* Оценка и предотвращение опасной вибронпряженности лопаточного аппарата рабочих колес ГТД // Вибр. в техн. и технол.– 2001.– N 4(20).– С. 16–18.
2. *Балицкий Ф. Я., Иванова М. А., Соколова А. Г., Хомяков Е. И.* Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов.– М.: Наука, 1984.– 119 с.
3. *Бурау Н. И.* О новых направлениях в развитии виброакустических методов диагностики прочностных дефектов в лопатках газотурбинных двигателей // Вибр. в техн. и технол.– 2001.– N 4(20).– С. 45–48.
4. *Бурау Н. И.* Динамическая модель газотурбинного двигателя как объекта виброакустической диагностики усталостных трещин в лопатках рабочих колес // Вибр. в техн. и технол.– 2001.– N 1(17).– С. 28–32.
5. *Бурау Н. И., Марчук П. И., Тяпченко А. Н.* Анализ современных методов обработки акустических сигналов для использования в задачах виброакустической диагностики // Акуст. вісн.– 2001.– 4, N 4.– С. 3–10.

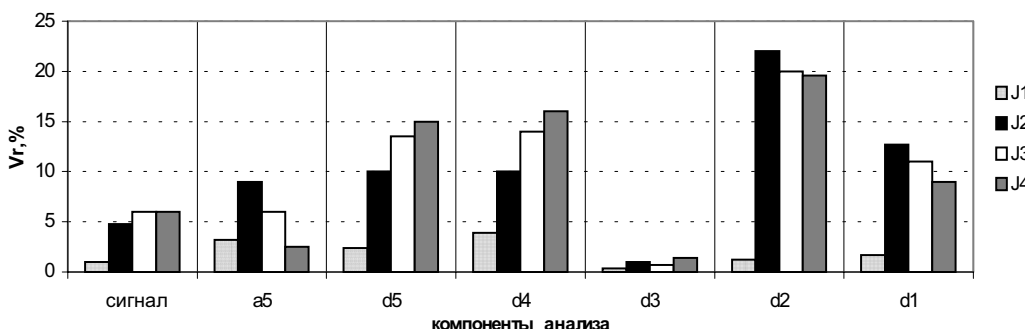
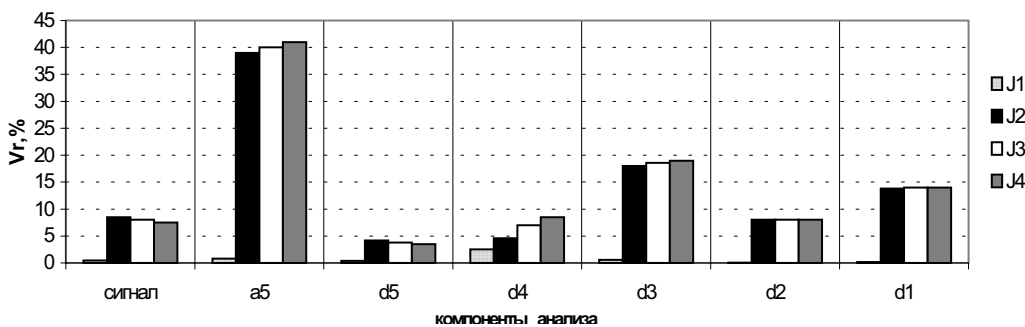
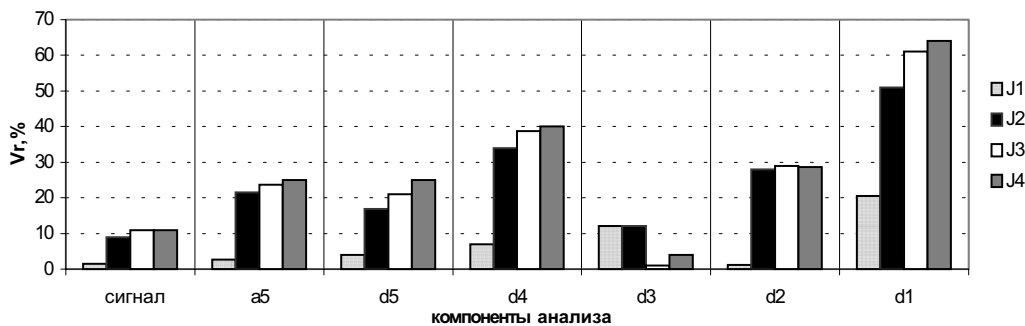
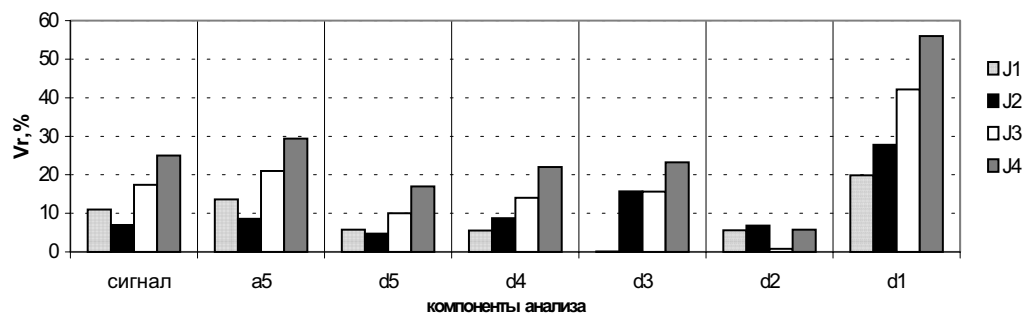


Рис. 3. Значения относительных скоростей изменения признаков:
 а – часть 1, б – часть 2, в – часть 3, г – часть 4

6. Генкин М. Д., Соколова А. Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов.– М.: Машиностроение, 1987.– 288 с.
7. Бурау Н. И., Сопилка Ю. В. Виділення діагностичних ознак початкових міцнісних дефектів в елементах машин і механізмів // Наук. вісті НТУУ “КПІ”.– 2002.– N 5.– С. 54–58.
8. Перов Д. В., Ринкевич А. Б., Смородинский Я. Г. Вейвлетная фильтрация сигналов ультразвукового дефектоскопа // Дефектоскопия.– 2002.– N 12.– С. 3–20.