

658.58+621.822

ДИАГНОСТИКА ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РОТОРНЫХ СИСТЕМ С ПОДШИПНИКАМИ ЖИДКОСТНОГО ТРЕНИЯ НА ОСНОВЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Асп. С.В. ШИРОКОВ, канд. техн. наук, доц. О.В. СОЛОМИН, д-р техн. наук, проф. Л.А. САВИН

Показаны достоинства применения непрерывного вейвлет-преобразования в анализе нестационарных вибрационных сигналов и в решении задач вибрационной диагностики дефектов роторных систем с подшипниками жидкостного трения.

Advantages of continuous wavelet transform application to analysis of non-stationary vibration signals and some problems of vibration diagnostics of faults of rotor systems with fluid-film bearings are presented in this article.

Современная тенденция в улучшении технико-экономических показателей турбомашин, основанная на повышении эффективности их работы при одновременном снижении габаритов, массы и стоимости агрегатов, приводит к необходимости увеличения частот вращения их роторов [1]. Следствием этого является рост сил, действующих в опорах и передаваемых на корпус агрегата, и повышение амплитуд колебаний ротора. Особенно остро эта проблема проявляет себя в роторных системах с опорами жидкостного трения высокоскоростных турбомашин (насосов, детандеров, компрессоров). Очевидно, что работа высокоскоростной машины в таких условиях требует организации соответствующих мероприятий по мониторингу ее технического состояния и диагностике зарождающихся дефектов в системе «ротор — подшипник».

В современных вибродиагностических системах анализ технического состояния роторных машин основан на традиционных методах обработки вибрационных сигналов, использующих преобразование Фурье: спектральный анализ, кепстральный анализ, анализ спектра огибающей и др. К сожалению, использование этих методов не всегда подходит для решения задач вибрационной диагностики. Если принять во внимание, что большинство процессов в роторных системах носит нестационарный характер [1], то использование преобразования Фурье в качестве основного инструмента видится нецелесообразным, поскольку при его использовании теряется важная информация о времени зарождения или действия дефекта. Например, диагностика развивающихся дефектов, где важнейшую роль играет именно временной фактор, практически невозможна с использованием Фурье-преобразования. Кроме того, некоторые дефекты роторных машин, например, дисбаланс и изгиб оси ротора, могут порождать очень похожие спектральные представления [1, 2].

Решение проблемы анализа нестационарных вибрационных сигналов с целью извлечения диагностической информации представляется перспективным на основе методологии непрерывного вейвлет-преобразования (НВП) [3]. Вейвлет-преобразование предоставляет возможность частотно-временной локализации дефектов.

Достоинства НВП, связанные с возможностью извлечения необходимой информации из нестационарных сигналов, делают его перспективным для решения задач вибрационной диагностики дефектов роторных систем с опорами жидкостного трения. Это тем более важно в связи с появлением возможности раннего обнаружения дефекта на стадии его зарождения. Основные положения теории вейвлетов достаточно подробно изложены авторами в [4—7].

Роторно-опорный узел современной высокоскоростной турбомашины с подшипниками скольжения представляет собой сложную гидромеханическую систему, в состав которой входят три основных взаимодействующих друг с другом элемента: цапфа ротора, втулка подшипника и смазочный слой, связывающий их и передающий силу с ротора на корпус турбоагрегата. Каждый из этих элементов, в общем случае, обладая определенными динамическими характеристиками (упругие, демпфирующие, инерционные свойства), способен оказывать существенное влияние на колебательные процессы в динамической системе «ротор—подшипники жидкостного трения».

Одним из наиболее эффективных способов изучения поведения ротора в зазоре подшипника жидкостного трения является метод траекторий, который учитывает нелинейность реакций смазочного слоя и позволяет оценить их влияние на процессы, происходящие в системе «ротор-подшипник жидкостного трения». Метод основан на совместном численном интегрировании системы уравнений гидродинамики несущего слоя и уравнений движения ротора.

Алгоритм реализации метода траекторий на примере динамики симметричного двухопорного ротора, опирающегося на одинаковые подшипники жидкостного трения, и исходная система уравнений движения подробно описаны в [7]. Расчет реакций смазочного слоя подшипников, являющийся основой для расчета траекторий движения ротора, рассмотрен в [8].

В качестве примера обнаружения дефектов роторной системы с подшипниками жидкостного трения рассмотрим некоторый вибрационный сигнал, полученный в результате вычислительного эксперимента [9]. Частота вращения ротора равна 1500 рад/с. Частота дискретизации сигнала равна 23800 Гц. Радиальный зазор в подшипнике 25 мкм. На рис. 1 приведены развертки колебаний и траектория движения центра цапфы ротора. Метками отмечены обороты ротора вокруг своей оси. Данная траектория свидетельствует о наличии дефекта «полускоростной вихрь» [1]. Этот дефект характеризуется тем, что за один оборот вращения вокруг центра подшипника ротор совершает два оборота вокруг своей оси.

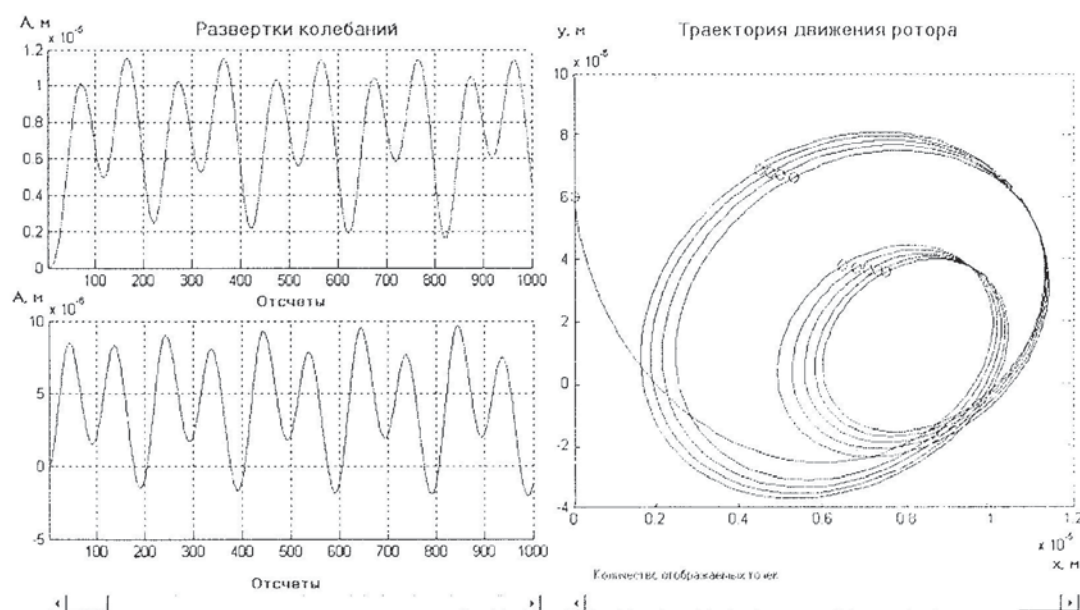


Рис. 1. Развертки колебаний и траектория движения ротора

Проанализируем сигнал развертки колебаний по оси X (верхний график на рис. 1) с помощью НВП. В качестве анализирующего вейвлета используем вейвлет Морле. Результат НВП представлен на рис. 2. Следует отметить, что на практике чаще используется 2D-изображение скейлограммы. Это связано с тем, что такое представление данных требует меньших затрат машинного времени и более удобно для выявления особенностей исследуемого сигнала. В дальнейшем используются только 2D-скейлограммы.

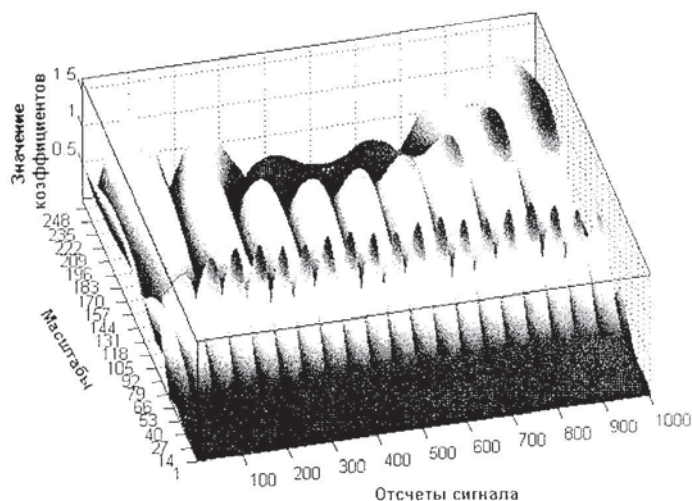


Рис. 2. 3D-скейлограмма вибрационного сигнала

На рис. 3 представлена 2D-скейлограмма того же сигнала. В качестве материнского вейвлета в данном случае применен вейвлет Морле и рассчитано 256 вейвлет-коэффициентов.

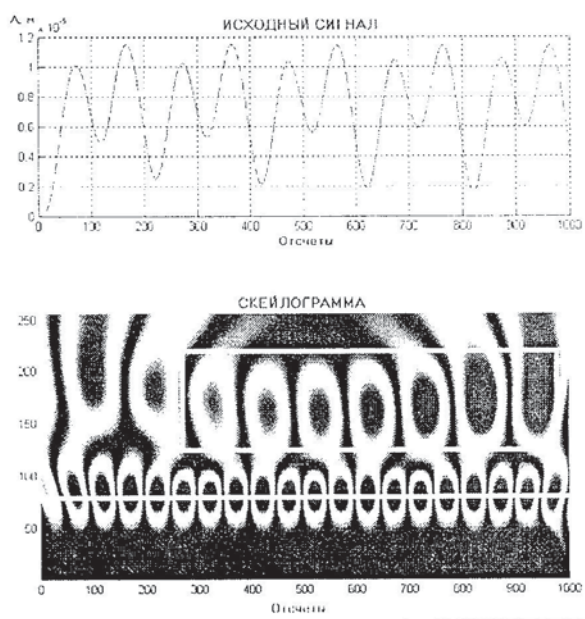


Рис. 3. 2D-скейлограмма вибрационного сигнала

Используя соотношение $S = f_n f_{11} / f$ [3], можно вычислить масштаб, на котором будет находиться оборотная частота ротора. Для выбранного вейвлета это будет 81-ый масштаб.

На рис. 3 оборотная частота ротора выделена белой сплошной линией. Белым прямоугольником выделена область возникновения «полускоростного вихря». Причем нетрудно заметить, что с течением времени амплитуда вибрации, соответствующей указанному выше дефекту, значительно увеличивается, что свидетельствует о развитии дефекта.

Рассмотрим еще несколько примеров того же дефекта, полученных в результате вычислительного эксперимента [9]. Траектории движения исследуемого ротора представлены на рис. 4.

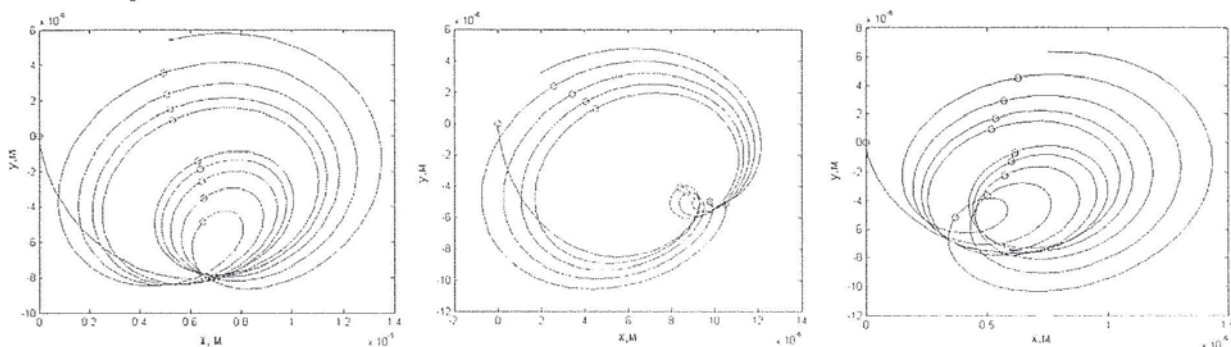


Рис. 4. Траектории движения ротора при «полускоростном вихре»

Проанализировав развертки колебаний с помощью непрерывного вейвлет-преобразования получим следующие результаты (рис. 5).

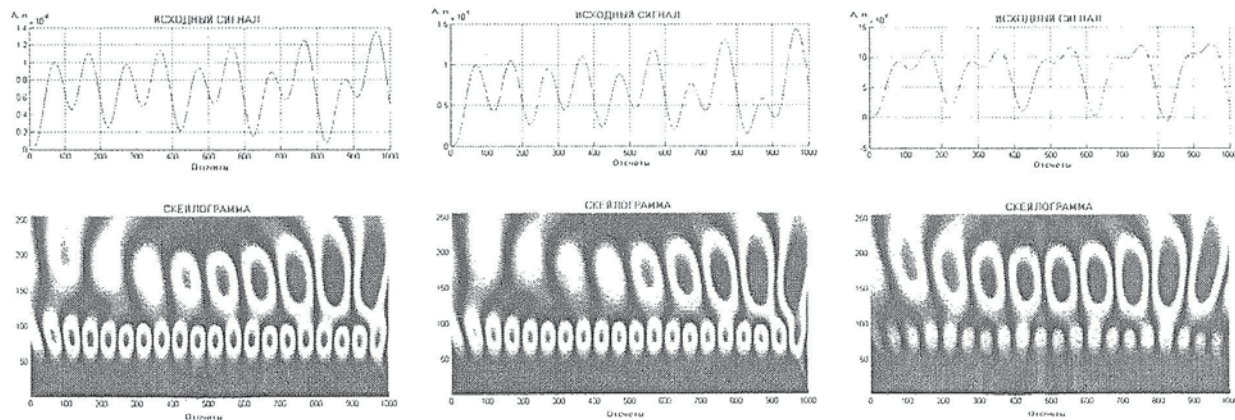


Рис. 5. Скейлограммы дефекта «полускоростной вихрь»

При анализе в качестве материнского вейвлета был использован вейвлет Морле. Анализируя скейлограммы, можем сделать вывод, что во всех случаях дефект развивается, т.е. наблюдается увеличение амплитуды гармоники, равное половине вращения ротора. Но в первом и втором случаях дефект сначала проявляется слабо (амплитуда второй гармоники значительно меньше амплитуды оборотной частоты), а затем происходит дальнейшее развитие дефекта (амплитуда второй гармоники становится существенно больше амплитуды оборотной частоты). В третьем же случае амплитуда второй гармоники изначально существенно больше амплитуды оборотной частоты и продолжает только увеличиваться, что свидетельствует об усилении дефекта.

Далее рассмотрим реальный вибрационный сигнал, снятый с экспериментальной установки [10]. Данный сигнал снят с частотой дискретизации 12500 Гц и описывает

горизонтальное перемещение цапфы ротора в радиальном зазоре подшипника. Частота вращения ротора составляет 60 Гц, о чем свидетельствует характерный пик на спектре (рис. 6).

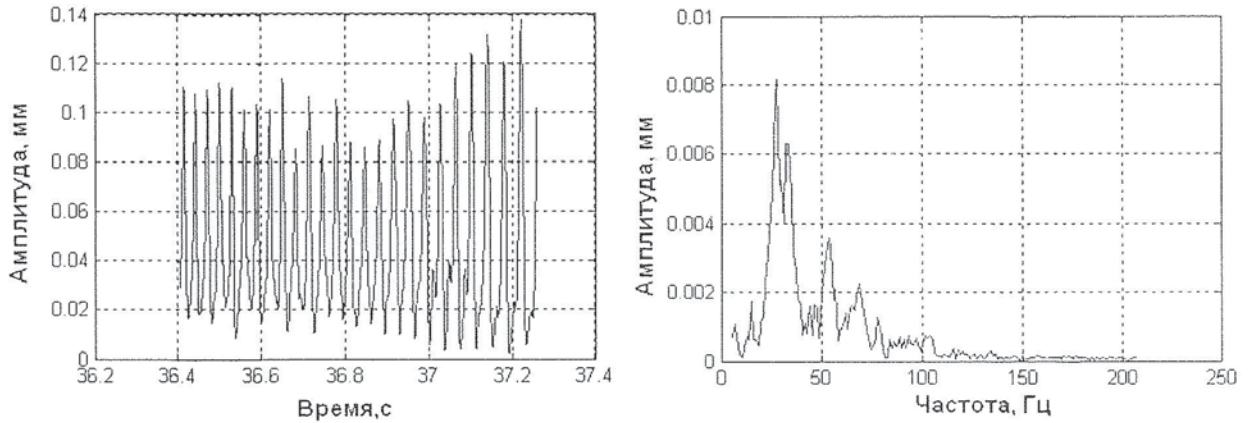


Рис. 6. Вибрационный сигнал и его спектральное представление

В то же время на спектре присутствует значительный пик на частоте около 28 Гц. Появление дополнительной вибрационной компоненты на частоте, равной примерно половине частоты вращения, свидетельствует о развитии дефекта, известного в гидродинамических подшипниках как «полускоростной вихрь» [1, 2]. Однако по спектральному составу сигнала невозможно определить время начала развития дефекта.

Проанализируем этот же сигнал, используя НВП. Используя в качестве анализирующего вейвлета вейвлет Добеши 5-го порядка, получим следующую картину (рис. 7). На рис. 7 белой линией выделена частота вращения ротора, а прямоугольником — область развития полускоростного вихря.

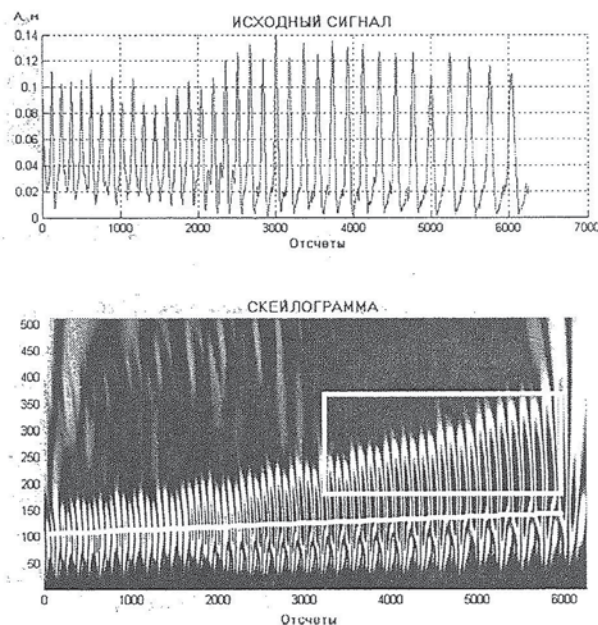


Рис. 7. Сигнал и его скейлограмма (развитие полускоростного вихря)

В качестве еще одной иллюстрации применения НВП к решению задач вибрационной диагностики рассмотрим следующий пример такого же дефекта. Временная реализация исходного сигнала и его спектр приведены на рис. 8. Анализ показывает, что спектры Фурье на рис. 6 и 8 качественно практически не отличаются. На спектре нового сигнала (рис. 8) также отчетливо наблюдается характерный пик на частоте 0,42—0,48 от оборотной частоты вращения ротора (в данном случае 50 Гц).

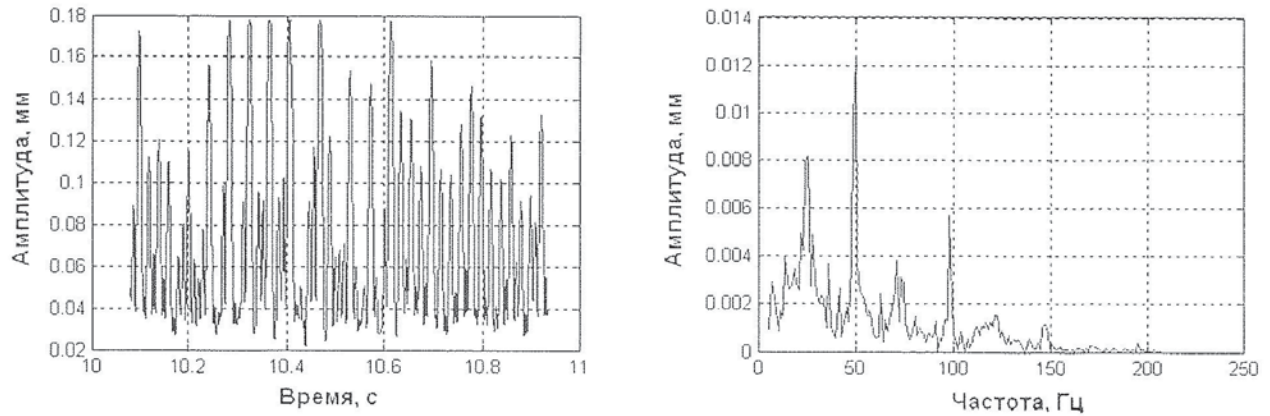


Рис. 8. Сигнал и его спектр (полускоростной вихрь)

Однако анализ этого сигнала с помощью вейвлета Добеши 5-го порядка позволяет увидеть (рис. 9), что дефект типа «полускоростной вихрь» существует достаточно короткий промежуток времени, а затем исчезает.

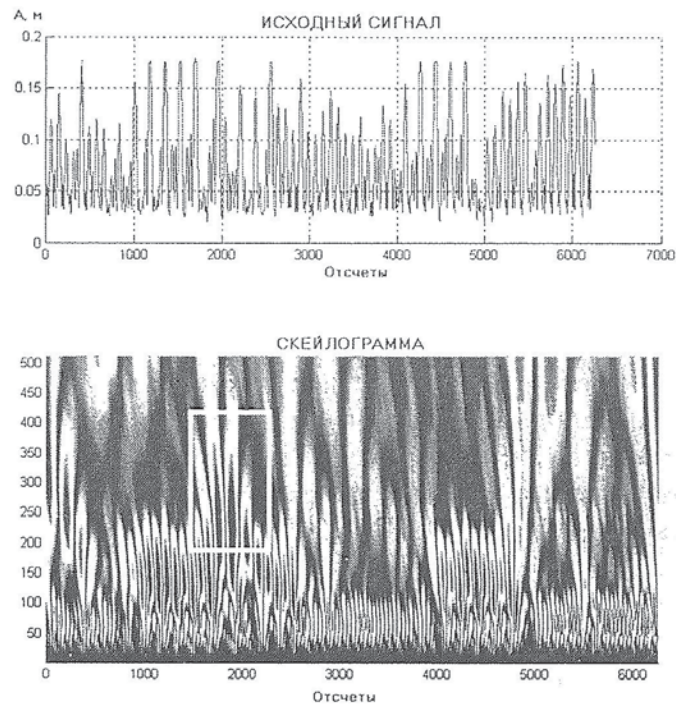


Рис. 9. Сигнал и его скейлограмма (полускоростной вихрь)

Диапазон существования этого дефекта выделен прямоугольником на рис. 9. Таким образом, применение НВП делает возможным и определение продолжительности существования того или иного дефекта.

В заключение необходимо отметить следующее. Применение вейвлет-анализа в практике вибрационной диагностики роторных систем с опорами жидкостного трения открывает существенные преимущества перед традиционными методами анализа сигналов. Это связано с тем, что использование вейвлет-анализа дает частотно-временное представление сигнала, поэтому он наиболее хорошо подходит к анализу нестационарных процессов в роторных системах. Кроме того, применение дискретного вейвлет-преобразования в обработке сигналов позволяет использовать вейвлеты в качестве фильтров. Таким образом, на предварительном этапе обработки сигналов (фильтрация) и на этапе анализа можно использовать один математический аппарат, что является несомненным преимуществом при программной реализации вибродиагностических систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г о л ь д и н А. С. Вибрация роторных машин. — М. Машиностроение. — 2000. — 344 с.
2. Лукьянов А.В. Классификатор вибродиагностических признаков дефектов роторных машин. — Иркутск: Изд-во ИргТУ, 1999. — 228 с.
3. Д о б е ш и И. Десять лекций по вейвлетам. — Ижевск: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2001. — 464 с.
4. С о л о м и н О. В., Ш и р о к о в С. В. Эффективность применения непрерывного вейвлет-преобразования к анализу вибрационных сигналов роторных систем с опорами жидкостного трения // Вестник компьютерных и информационных технологий, 2006. — № 8. — С. 23—32.
5. Д ь я к о н о в В. П. Вейвлеты. От теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.
6. M i s i t i M. et al. Wavelet toolbox for use in MATLAB: User's Guide. — Natick: The MathWork Inc., — 2005. — 1032 p.
7. P e n g Z. Vibration signal analysis and feature extraction based on reassigned wavelet scalogram // Journal of Sound and Vibration. — 2002. — Vol. 253(5). — P. 1087—1100.
8. С а в и н Л. А., С о л о м и н О. В. Расчет подшипников скольжения, работающих в условиях двухфазного состояния смазочного материала // Известия вузов. Машиностроение. — 2004. — №2. — С. 36—42.
9. С а в и н Л. А., С о л о м и н О. В. Динамика жесткого ротора на подшипниках скольжения, смазываемых криогенной жидкостью // Известия вузов. Машиностроение, 2004. — №4. — С. 27—38.
10. С о л о м и н О. В., П о л я к о в Р. Н., К о м а р о в М. В. Экспериментальный стенд для исследования динамики и вибрационной диагностики роторных систем с комбинированными опорами // Известия вузов. Машиностроение. — 2005. — № 6. — С. 9—19.