

## МЕТОД НЕРАЗРУШАЮЩЕГО КОНТРОЛЯ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАРОЖДАЮЩИХСЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПОМОЩИ ФУРЬЕ- И ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА

*А.М. Захезин*

**Представлен метод неразрушающего контроля для структурного мониторинга состояния (СМС) механической системы (МС) в эксплуатационных режимах работы и определение повреждений с использованием Фурье- и вейвлет-анализа вибрационного сигнала.**

*Ключевые слова:* Фурье-анализ, частотный анализ, вейвлет-анализ, коэффициент демпфирования.

Основная идея этого метода заключается в определении и анализе коэффициентов вейвлетного разложения вибрационного сигнала, установление связи с жесткостными и демпфирующими параметрами для обнаружения дефектного состояния механической системы.

Проблемы с повышенной вибрацией в строительных конструкциях появляются везде, где обрабатывающие машины, транспортеры помещены внутри здания. Последствиями таких воздействий могут быть структурные повреждения, нарушения технологического процесса, превышение санитарных норм. Своевременная информация о причинах, частотном составе вибросигнала, времени появления повышенного уровня вибрации могут предотвратить катастрофические последствия. Для решения этой задачи предлагаются различные критерии, по которым установлена оценка структурных повреждений. Эти требования, как правило, задокументированы в различных инженерных стандартах, ГОСТах и нормалях [1–3].

Эти критерии являются необходимыми как для проектирования строительных конструкций, удовлетворяющих условиям прочности, так и для оценки виброактивности зданий и оборудования в эксплуатационных режимах работы.

Вибрации в зданиях в общем случае оцениваются по следующим критериям:

- 1) ограничение структурной целостности;
- 2) ограничение для окружающей среды (из-за дискомфорта человека, повышенной виброактивности оборудования, ненормативных характеристик технологического процесса);
- 3) определение жесткостных и демпфирующих характеристик при обследовании и мониторинге технического состояния.

Принятые критерии появились, как правило, из эксперимента и практики. Эти критерии получены на основе детерминированных характеристик случайных процессов вибрации и описаны на основе частного анализа в российских нормативных документах [4–8].

При анализе вибрационных сигналов техногенного характера или отклика физических систем численные значения параметров сигнала практически всегда связаны с массово-геометрическими характеристиками и кинематическими параметрами объекта. Это возможно, поскольку функциональные свойства объекта описываются точной физической моделью.

При анализе виброактивности объекта в реальных условиях работы, тем более при возникновении дефектов, такой модели практически никогда не бывает. Поэтому при анализе вибросигнала приходится ориентироваться на ранее встречающиеся аналогии, и по возможности выходить на физику вибрационного сигнала. Применение того или иного метода обработки вибросигнала подсказывает его характер. Так, если мы имеем стационарный детерминированный сигнал, то можно ограничиться обработкой во временной области с определением основных гармоник. Влияние на вибрационный сигнал большого количества возмущающих факторов требует для его обработки применение спектрального Фурье-анализа. Спектральный анализ, основанный на преобразовании Фурье, эффективен при обработке стационарных случайных сигналов. Правда, при анализе взаимосвязанных сигналов нужно определить фазовые отношения между несколькими спектрами.

Различного рода местные повреждения, снижение жесткости, образование трещин, увеличение демпфирования, изменение массово-геометрических параметров системы как во времени, так и в пространстве приведет к нестационарности вибрационного сигнала. Общим свойством большинства практических нестационарных сигналов является то, что их можно подразделять на участки, в которых они имеют характер квазистационарных сигналов. С анализом такого рода сигналов хорошо справляется вейвлет-анализ. Используя разложение по осциллирующим функциям, локализованным как во временной, так и в частотной областях, вейвлет-преобразование отражает

одномерный сигнал на плоскость время-частота, описывая спектральный состав сигнала в каждый момент времени. Следует учитывать сильное влияние вида применяемого вейвлет-базиса к анализу вибрационного сигнала сложной формы. Для качественного анализа вибрационного сигнала в достаточно широкой полосе частот следует использовать несколько различных базисов. Для установления информативных характеристик аномальных измерений вибросигнала во времени в низкочастотной области применим вейвлет-базис в виде непрерывной функции, в более высокочастотной области в виде кусочно-непрерывной функции, либо вейвлет с большей центральной частотой. Полная информация семейства вейвлет-функций приведена [9].

В качестве первого приближения можно использовать для базисной функции вейвлет Морле, данная функция дает минимальное расхождение с Фурье-анализом вибрационного сигнала. Вейвлет Морле обладает частотной локализацией, лучшей

среди других базисов, и в связи с этим является наиболее рекомендуемым для решения задачи представления вибрационного сигнала в широком диапазоне частот. Если мы интересуемся не только высокочастотными составляющими, а хотим отразить и нижние частоты, то масштабный коэффициент нужно взять достаточно большим. Пределы изменения масштабного коэффициента зависят от выбора вейвлета и от того, какие частоты мы хотим отобразить в результате разложения. Для количественного описания экспериментальных записей и идентификации возможных дефектов привлекались методы спектрального анализа, основанные на Фурье-преобразовании и вейвлетном преобразовании. Определение параметров частотного спектра осуществлялось на основе двухвариантного анализа. На (рис. 1–4) представлены результаты Фурье-анализа вибрационного сигнала обрабатывающего центра в процессе эксплуатации. Экспериментальные измерения параметров вибрации проводили с помощью аппаратуры фир-

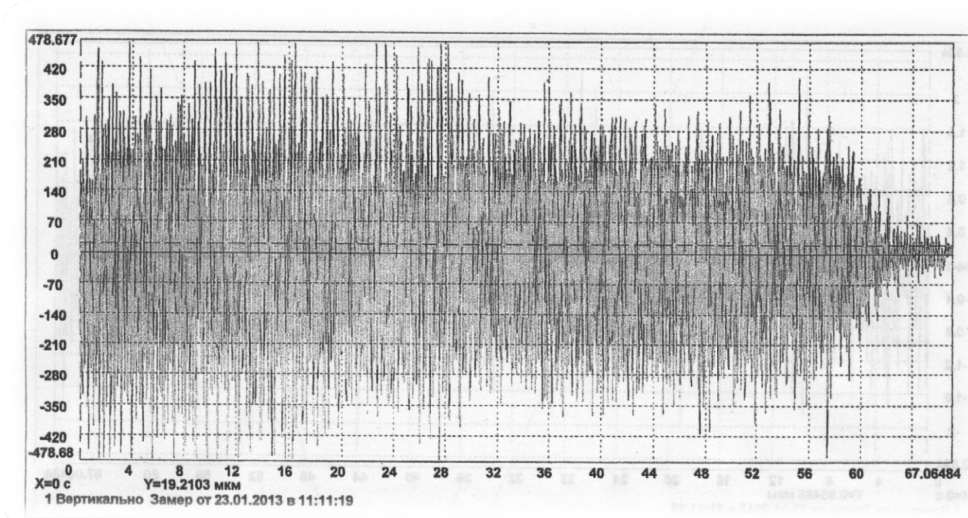


Рис. 1. Экспериментальные виброперемещения фундамента обрабатывающего центра с дефектом

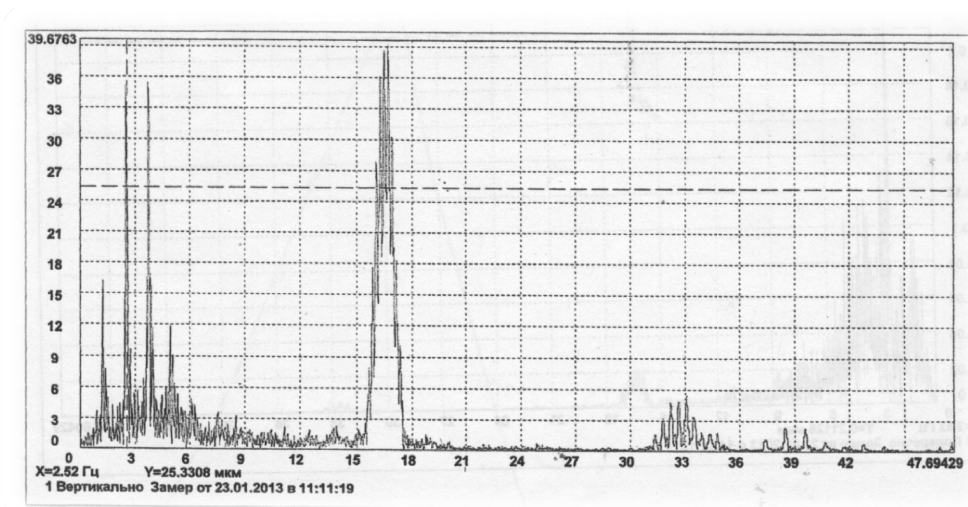


Рис. 2. Спектр виброперемещений фундамента обрабатывающего центра с дефектом

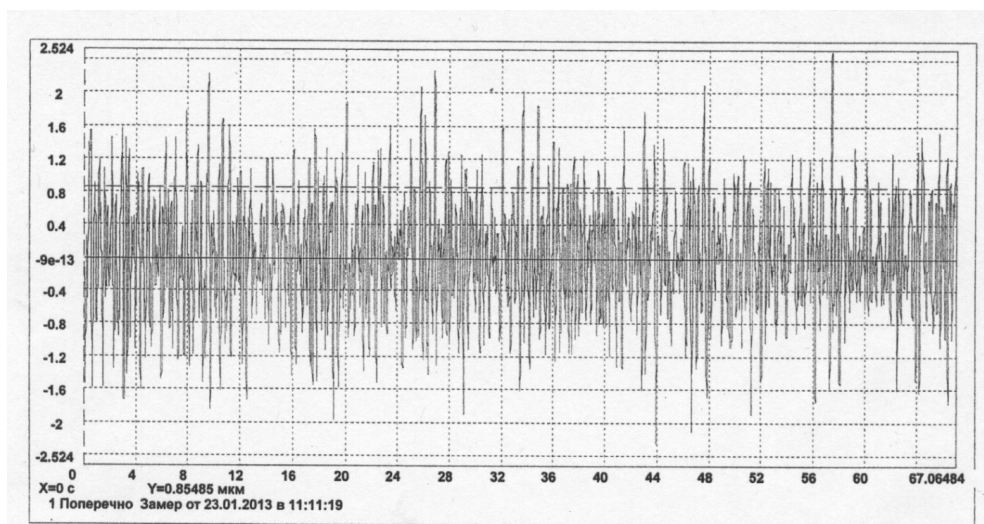


Рис. 3. Экспериментальное виброперемещение фундамента обрабатывающего центра

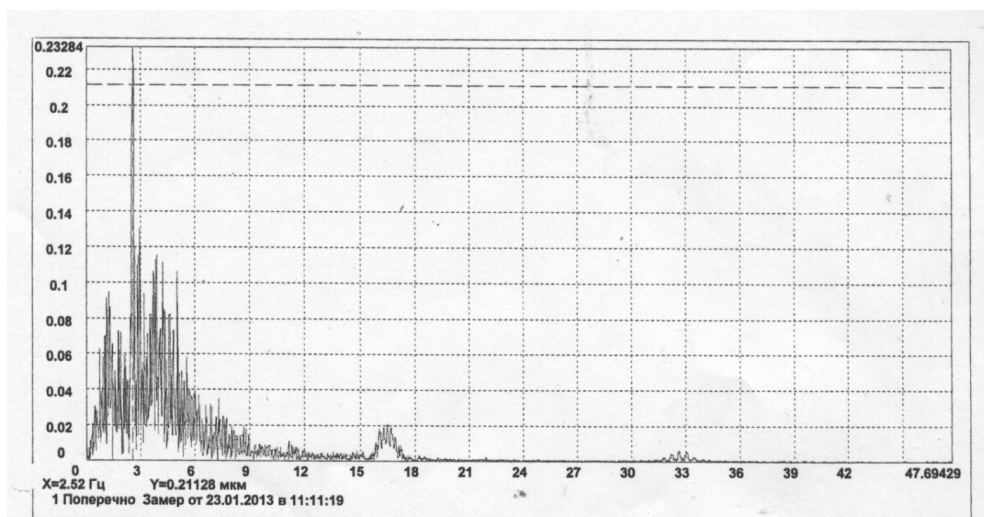


Рис. 4. Спектр виброперемещений фундамента обрабатывающего центра

мы «Брюль и Кьер», низкочастотного датчика измерения виброперемещений 8306, 4370 предусилителя сигналов 2635. Оцифровку и обработку сигналов измерения выполняли с помощью многоканального синхронного регистратора и программных средств регистратора «Атлант» [10]. Датчики были установлены на раме обрабатывающего центра и фундаменте станка. На полученных спектрах виброперемещений хорошо заметны характерные частоты системы для двух одинаковых центров, работающих в одних и тех же, эксплуатационных условиях. Отличие наблюдается только в спектральных характеристиках в более высоком частотном диапазоне. Предварительный анализ результатов Фурье-преобразования позволяет обоснованно выбрать длину реализации вибросигнала, ширину полосы частот, вид вейвлета и центральную частоту вейвлета-преобразования. Чрезмерное увеличение частоты дискретизации нежелательно, так как приведёт к большому объёму выборки экспериментальных данных и многократно увеличит тру-

доемкость расчётов с использованием вейвлет-преобразования.

На рис. 5–7 показаны результаты вейвлет-анализа этих же сигналов, где видно, что основные гармоники остаются устойчивыми на протяжении всего временного промежутка.

В то время, как выявленные гармоники высших порядков со временем затухают (см. рис. 3, 4).

Результат непрерывного вейвлет-анализа оценивается вейвлет-спектром (скалограммой). Таким образом, мы получаем распределение энергии сигнала по масштабам. При построении скалограммы, точки на плоскости параметров (**a**, **b**) отображают в зависимости от величины коэффициентов цветом различной интенсивности. На представленных скалограммах по горизонтальной оси отложена величина сдвига вейвлет-функции – **a**, по вертикальной – масштаб – **b**. Черный цвет соответствует минимальному значению, которое принимают вейвлет-коэффициенты, серый – максимальному. Максимумы выделенных скелетов и будут оп-

ределять временные сдвиги, на которых реализуются резонансные колебания по той или иной гармонике. Имеющиеся гребни позволяют определить зависимость мгновенной частоты каждой гармоники от времени (см. рис. 5, 6). При выделении гребней могут быть использованы либо амплитудный, либо фазовый метод, однако алгоритм реализации амплитудного метода проще.

Изображение вейвлет-спектров достаточно

ясно выявляет наличие разномасштабной периодичности, содержащейся в анализируемых зависимостях. При этом ясно показывает наличие появившихся частотных составляющих, которые не соответствуют собственным частотам рассматриваемой механической системы. На рис. 5, 6 имеются спектральные полосы, у которых периоды и амплитуды изменяются с течением времени.

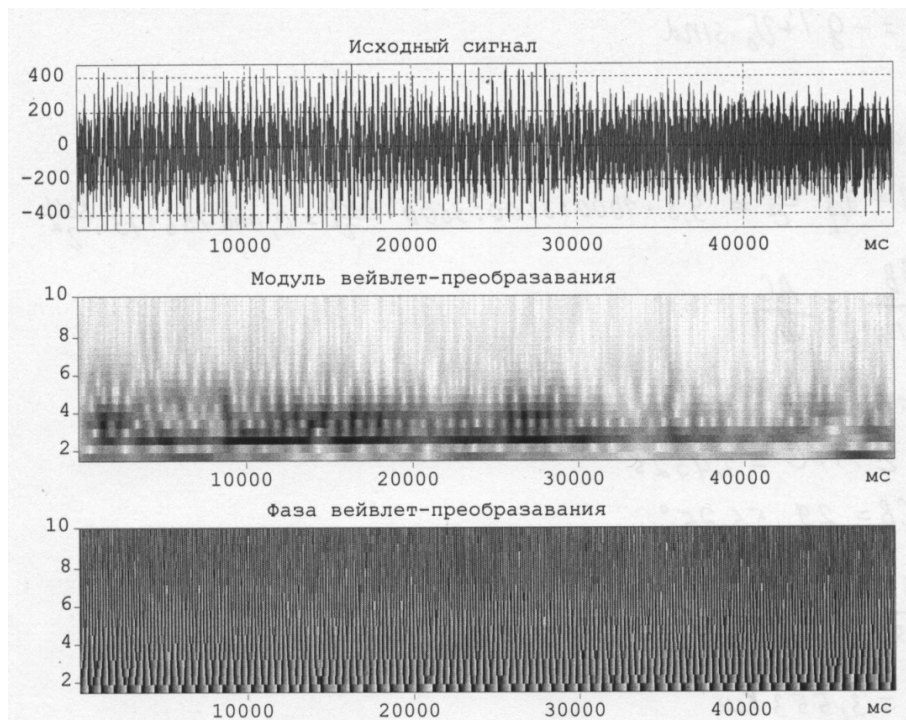


Рис. 5. Результаты вейвлет-анализа виброперемещений фундамента обрабатывающего центра с дефектом

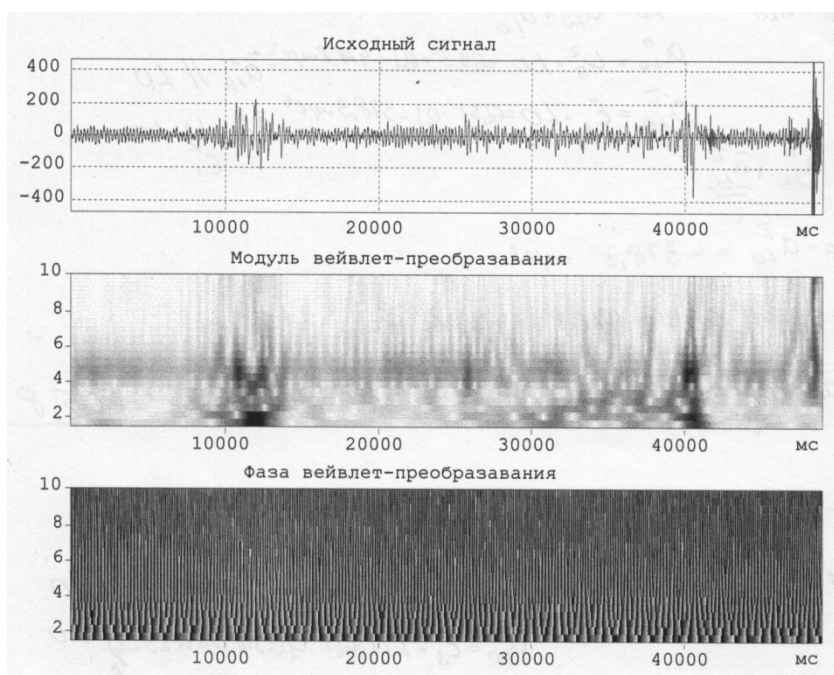


Рис. 6. Результаты вейвлет-анализа виброперемещений фундамента обрабатывающего центра

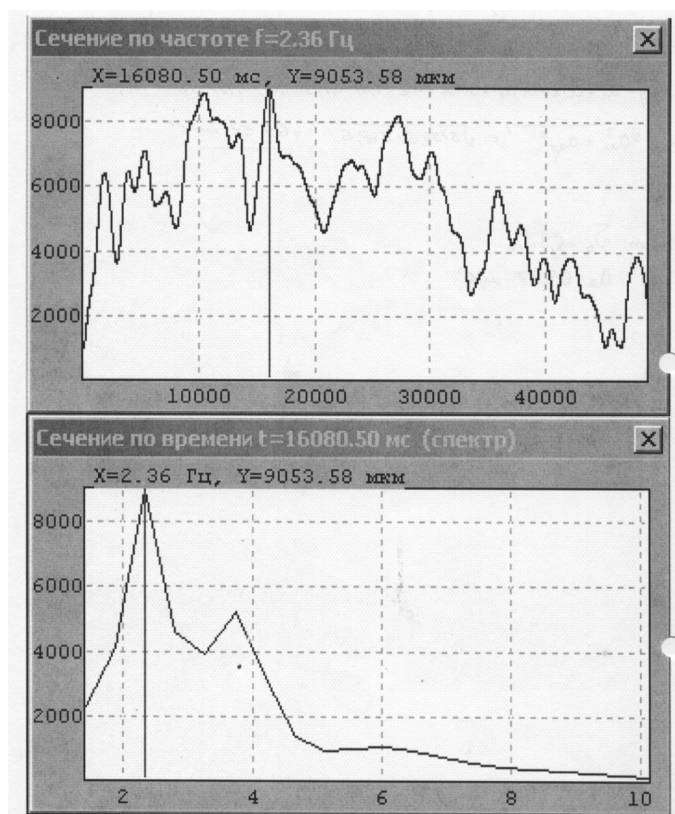


Рис. 7. Результаты вейвлет-анализа виброперемещений фундамента обрабатывающего центра с дефектом

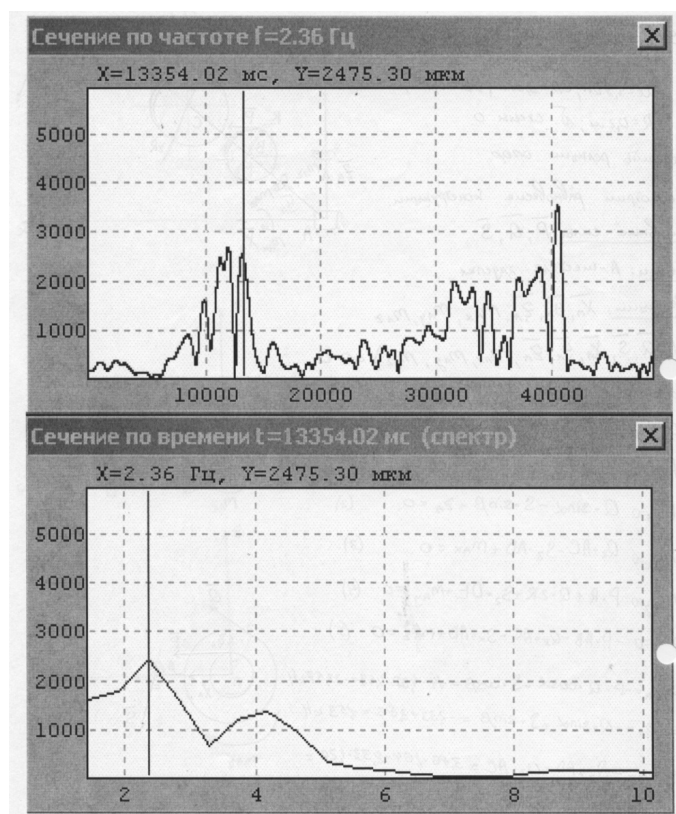


Рис. 8. Результаты вейвлет-анализа виброперемещений фундамента обрабатывающего центра

Целью работы является обоснование использования параметров вейвлет-преобразования для повышения информативности спектрального анализа данных вибросигнала диагностики изменений во времени состояния массива фундамента обрабатываемого центра. Таким образом, Фурье- и вейвлет-спектрограммы дополняют друг друга. Первая обнаруживает в анализируемых вибросигналах гармонические и квазигармонические компоненты (см. рис. 2, 4), а вторая позволяет локализовать гармоники по времени (рис. 7, 8).

Данный факт позволяет сделать вывод, что с помощью Фурье- и вейвлет-анализа можно распознать признаки аномальных проявлений изменения дефектного состояния фундамента по коэффициенту демпфирования [11, 12]. Увеличение коэффициента демпфирования фундамента первого станка позволяет оценить появление новых трещин и раскрытие старых в его фундаменте, т. е. вейвлет-преобразование обладает существенным преимуществом: позволяет своевременно выявлять зарождающиеся дефекты и, следовательно, контролировать технологический процесс работы обрабатываемого центра, а значит, снизить процент брака обрабатываемых изделий.

#### Литература

1. ISO 4866. *Механические вибрации и удар. Вибрация зданий. Руководящие положения по измерению вибраций и оценке их воздействий на здание. 1990-08-01. Изменение 1. 1994-12-01. Изменение 2. 1996-12-15.*
2. Institute Standard Organization (1975). *Evaluation and Measurement of Vibration in Buildings. Draft Proposal ISO/DP 4866.*
3. German Institute for Standard (1983). *Structural Vibration in Buildings. Part 3. Effect on structure. Draft DIN 4150.*
4. ГОСТ 12.1.012-2004. *Вибрационная безопасность. – Введ. 01-07-08. – М.: Нац. стандарты РФ: Изд-во Стандартиформ, 2008.*
5. ГОСТ 31191.1-2004. *Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека. Ч. 1: Общие требования. – Введ. 30-06-08. – М.: Нац. стандарты РФ: Изд-во Стандартиформ, 2010.*
6. ГОСТ 31191.2-2004. *Вибрация и удар. Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека. Ч. 2: Вибрация внутри здания. – Введ. 01-07-08. – М.: Нац. стандарты РФ: Изд-во Стандартиформ, 2008.*
7. ГОСТ 31319-2006. *Измерение общей вибрации и оценка её воздействия на человека. Требования к проведению измерений на рабочих местах. – Введ. 30-06-08. – М.: Нац. стандарты РФ: Изд-во Стандартиформ, 2008.*
8. ГОСТ Р 53778-2010. *Здания и сооружения. Правила обследования и мониторинга технического состояния. – Введ. 25-03-10. – М.: Нац. стандарт РФ: Изд-во Стандартиформ, 2011.*
9. Смоленцев, Н.К. *Основы теории вейвлетов. Вейвлеты в MATLAB / Н.К. Смоленцев. – М.: Изд-во ДМК, 2008. – 448 с.*
10. Многоканальный электронный регистратор «Атлант»: *рук. пользователя. – Пермь, 1997.*
11. Захезин, А.М. *Изменение деформативных свойств бетона при многократном нагружении / А.М. Захезин, Т.В. Малышева // Бетон и железобетон. – 2009. – № 4. – С. 2–6.*
12. Захезин, А.М. *Мониторинг и прогнозирование несущей способности здания в эксплуатационных режимах его работы / А.М. Захезин // Актуальные проблемы компьютерного моделирования конструкций и сооружений: тез. докл. IV Междунар. симпозиума. – Челябинск, 2012.*

Захезин Альберт Михайлович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Теоретическая механика и основы проектирования машин», Южно-Уральский государственный университет, Челябинск. Тел.: 89026074629; a.zakhezin@gmail.ru.

**Bulletin of the South Ural State University  
Series "Construction Engineering and Architecture"  
2013, vol. 13, no. 2, pp. 28–33**

## METHOD OF NON-DESTRUCTIVE TESTING TO DETECT THE INCIPIENT DEFECTS WITH THE HELP OF FOURIER AND WAVELET ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL

A.M. Zakhezin, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, a.zakhezin@gmail.ru

The article considers the method of non-destructive testing for structural condition monitoring (SCM) of a mechanical system (MS) in normal operating modes and detection of defects with the use of Fourier and wavelet analysis of vibration signal.

Keywords: Fourier analysis, frequency analysis, wavelet analysis, damping factor.

Поступила в редакцию 13 мая 2013 г.