

УДК 62:534

© 2003 г. Кулеш М.А., Матвеев В.П., Шардаков И.Н.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ ВИБРОДИАГНОСТИКИ ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Известно, что длительные вибрационные силовые воздействия в значительной степени определяют надежность и долговечность ответственных инженерных сооружений. В связи с этим развитие новых методов обработки экспериментальных вибродиагностических данных, как первичной информации для теоретического решения проблемы надежности и долговечности, является чрезвычайно важной и актуальной задачей.

Рассматриваются математические аспекты и примеры применения вейвлет-анализа для обработки экспериментальных данных, полученных путем непосредственных виброизмерений на реальных инженерных сооружениях.

Наиболее простой способ представления экспериментальных вибродиагностических данных – это сейсмограммы компонент векторов перемещений, скоростей либо ускорений выделенных точек конструкции для разных режимов динамического воздействия. Такие сейсмограммы для сложных систем случайны и неупорядочены, а период колебаний может изменяться в очень широких пределах.

Распространено несколько подходов к анализу нестационарных сигналов такого типа. Первый подход – локальное преобразование Фурье [1, 2], позволяющее получить спектр сигнала. Значительное распространение получила методика Прони [3, 4] и различные ее модификации [5, 6], позволяющая с высокой точностью выделять из сигнала характерные частоты и соответствующие им амплитуды, коэффициенты затухания и фазы. Третий подход – вейвлет-преобразование [7–15], применяемое тогда, когда результат анализа некоего сигнала должен содержать в себе не только простое перечисление его характерных частот (масштабов), но и сведения об определенных локальных координатах, при которых эти частоты проявляют себя.

Преобразование Фурье и метод Прони дают хорошее представление о спектральной структуре сигнала [8], однако не позволяют определить эволюцию этой структуры во времени. В случае, когда речь идет об анализе отклика инженерных сооружений и конструкций на некоторые динамические воздействия, сведения о времени возникновения и затухания колебаний на тех или иных частотах могут играть немаловажное значение. Поэтому основной акцент настоящей работы сделан на применение методов вейвлет-анализа.

Основные положения вейвлет-анализа для обработки экспериментальных данных. Рассмотрим виброперемещения $x(t)$, которые являются действительной функцией времени. Так как они получаются путем оцифровки сигнала с управляющей сейсмодатчиком ЭВМ, то вместо действительной непрерывной функции $x(t)$ будем рассматривать ряд равноотстоящих друг от друга значений x_n , $n = 1, \dots, N$, где $N = \gamma_{\max} (t_{\max} - t_{\min})$ зависит от частоты оцифровки γ_{\max} и временного интервала записи t_{\max} и t_{\min} .

Построим фурье-спектр виброперемещений x_n [1, 2]. При дискретном фурье-преобразовании исходному ряду x_n соответствует ряд комплексных фурье-коэффициентов, которые мы будем обозначать символом $(\hat{\cdot})$

$$\hat{x}_n = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{m=1}^N x_m \cdot e^{i(2\pi nm/N)}, \quad (1)$$

где i – мнимая единица.

Для представления значений этого ряда часто используется вещественная функция спектра мощности (а также энергетического спектра, или просто спектра Фурье) $\hat{x}(\gamma_n) = |\hat{x}_n|^2$, $\gamma_n = n \cdot \gamma_{\max}/N$.

Воспользуемся методом Прони. Для этого вводится в общем случае комплексный модельный сигнал как сумма P составляющих $y_n = \sum_{k=1}^P A_k e^{i\phi_k} e^{(\alpha_k + i\omega_k)(n-1)\delta t}$, где A_k – амплитуда, ϕ_k – начальная фаза, α_k – коэффициент затухания и ω_k – круговая частота k -й составляющей модельного сигнала. Эти параметры ищутся в дальнейшем из нелинейной задачи минимизации при соответствующих физических ограничениях $\sum_{n=1}^N |x_n - y_n|^2 \rightarrow \min$.

Для анализа временного распределения частот при динамическом воздействии на конструкцию осуществим вейвлет-преобразование виброперемещений x_n [7].

Вейвлет-преобразование одномерного сигнала состоит в его разложении по базису, сконструированному из обладающей определенными свойствами солитоноподобной функции (вейвлета) посредством масштабных изменений и переносов. Каждая из функций этого базиса характеризует определенную пространственную (временную) частоту и ее локализацию в физическом пространстве (времени).

При анализе сейсмических сигналов наибольшее распространение получил комплексный анализирующий вейвлет, который строится на основе хорошо локализованного в физическом (временном) и Фурье (частотном) пространствах вейвлета Morlet

[7, 15] $\phi_0(r) = \pi^{-1/4} e^{i\omega_0 r} e^{-r^2/2}$. Функцию $\phi_0(r)$ часто называют материнским-вейвлетом. Она представляет собой плоскую волну, модулированную функцией Гаусса единичной ширины. С увеличением коэффициента ω_0 возрастает частотная избирательность базиса, но ухудшается временная. При этом должно выполняться условие $\omega_0 \geq 2\pi$.

В основной массе своей работы, касающиеся практического использования вейвлет-преобразования, содержат результаты расчетов, в которых применяются дискретные вейвлеты. Такое предпочтение связано с тем, что обычно используемые базисы на основе непрерывных вейвлетов не являются ортонормированными. С дискретными вейвлетами таких проблем не возникает и они приводят обычно к более точному преобразованию, в особенности к его обратному восстановлению [11]. Однако часто при анализе сигналов более удобным является непрерывное вейвлет-преобразование. Его некоторая избыточность, связанная с непрерывным изменением масштабного коэффициента и параметра сдвига становятся здесь положительным качеством, так как позволяет более полно и четко представить и проанализировать, содержащуюся в данных, информацию.

Для непрерывного вейвлет-преобразования сконструируем базис пространства $L^2(R)$ с помощью непрерывных масштабных преобразований и переносов

$$\phi_{ab}(\tau) = \frac{1}{\sqrt{a}} \phi_0\left(\frac{\tau - b}{a}\right), \quad a, b \in R, \quad \phi_{ab}(\tau) \in L^2(R), \quad (2)$$

где b – временный сдвиг материнского вейвлета; a – частотный масштаб, обратный к физической частоте $a = \gamma_{\max} \omega_0 / (2\pi\gamma)$.

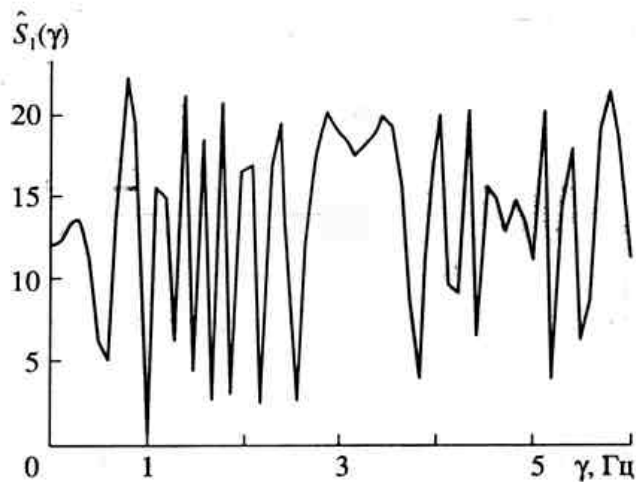


Рис. 1

На основе (2) запишем непрерывное вейвлет-разложение исходной функции

$$x(t) = \frac{1}{C_f} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{W_{ab}}{a^2} \cdot \phi_{ab}(t) da db,$$

где $C_f = \int_{-\infty}^{\infty} |\hat{\phi}_0(\gamma)|^2 |\gamma|^{-1} d\gamma$ – нормирующий коэффициент вейвлета.

Комплексные коэффициенты W_{ab} являются коэффициентами непрерывного вейвлет-преобразования

$$W_{ab} = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) \phi_{ab}^*(\tau) d\tau. \quad (3)$$

Вейвлет-спектр W_{mn} одномерного сигнала представляет собой поверхность в трехмерном пространстве. Способы визуализации этой поверхности могут быть различными. Один из способов – это построение изоуровней модуля комплекснозначного числа W_{mn} на плоскости (γ_m, t_n) . Это позволяет проследить изменение интенсивности амплитуд вейвлет-преобразования на разных масштабах и во времени.

Непрерывное вейвлет-преобразование дает возможность получить ценную информацию и о спектре Фурье. Так называемый вейвлет-спектр можно построить, вычислив для каждого значения временного масштаба среднее значение модуля ко-

эффициента вейвлет-преобразования $W(\gamma) = (1/N) \sum_{k=1}^N |W_{\gamma k}|$. Это дает усредненную

величину обычного спектра в окрестности заданной частоты. Усреднение тем грубее, чем выше частота. Тем самым проводится разумное сглаживание спектра, позволяющее лучше представить его качественное поведение.

Приведем пример, демонстрирующий основные отличия и особенности вейвлет-преобразования по сравнению с фурье-преобразованием. Сконструируем сигнал, несущий в себе две частоты, одна из которых линейно уменьшается со временем, а другая линейно увеличивается $S_1(t) = 5 \sin(2\pi k_1(t)t) + 5 \sin(2\pi k_2(t)t)$. Фурье-спектр функции $S_1(t)$ в этом случае не дает много информации о поведении сигнала (рис. 1).

Однако на вейвлет-спектре четко различаются две изменяющихся частоты, которые образуют данный сигнал (рис. 2).

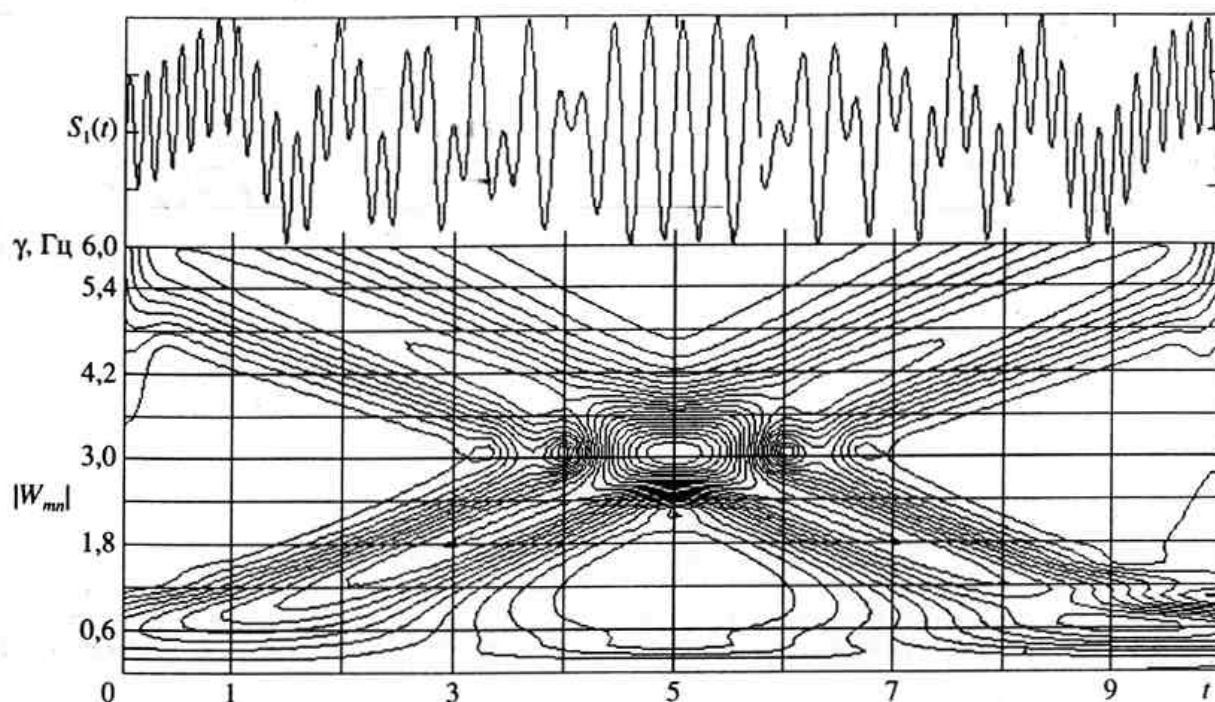


Рис. 2

Вибродиагностика автомобильного моста. С применением вейвлет-преобразования приведем пример обработки экспериментальных данных, зафиксированных в ходе вибродиагностического эксперимента на автомобильном мосту.

В ходе эксперимента динамическое воздействие осуществляли движущейся колонной груженых автомобилей КАМАЗ-5511 массой 19,2 т каждый. Колонна состояла из 5 автомобилей с расстояниями между ними 20–25 м. Было осуществлено 12 режимов движения: в двух направлениях движения по двум полосам со скоростями 50, 40 и 30 км/ч.

В качестве первичных элементов для регистрации колебаний были использованы сейсмические датчики, разработанные в Конструкторском бюро геофизического приборостроения РАН: СМ-4Б – датчик виброускорений (акселерометр) с рабочим диапазоном измеряемых частот 0,6–40 Гц; КВЭ-3Б – датчик виброскоростей (велосиметр) с рабочим диапазоном 0,01–10 Гц.

Датчики были установлены в концевых зонах внутри коробов ригельных блоков на специальных металлических горизонтальных площадках (рис. 3).

В ходе эксперимента регистрировали временные сигналы (в вольтах), являющиеся напряжением i -го датчика и характеризующие вертикальные составляющие виброускорений (для акселерометра СМ-4Б) или виброскоростей (для велосиметра КВЭ-3Б) в точке его расположения. Путем численного интегрирования виброускорения или виброскорости пересчитываются в виброперемещения $x(t)$. Для виброперемещений были осуществлены Фурье (1) и вейвлет (3) преобразования (рис. 4).

Анализ подобных спектральных характеристик ригельного блока для всех датчиков и всех режимов движения позволяет сделать ряд заключений, которые можно использовать для прогнозирования надежности и долговечности конструкции. Анализ спектрограмм перемещений всех режимов показывает, что колебания являются полигармоническими с собственными частотами 0,6, 1,0, 1,7, 2,2 и 3,7 Гц, которые проявляют себя в разное время. В большинстве случаев по спектру мощности доминируют низшие частоты 0,6–1,0 Гц. Причем для рассматриваемой конструкции отклик на внешнее воздействие ранее фиксируется и позже затухает именно на этих частотах (рис. 4).

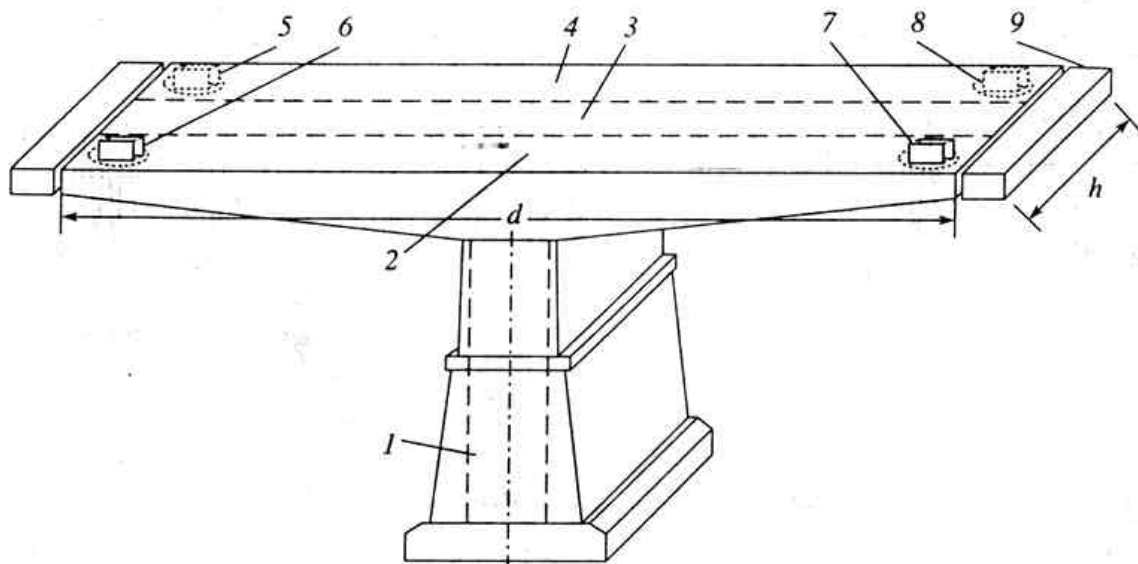


Рис. 3. Схема пролета моста и расположения датчиков: 1 – опора, 2 – нижний ригельный блок, 3 – средний ригельный блок, 4 – верхний ригельный блок, 5–7 – датчики СМ-4Б, 8 – датчик КВЭ-3Б, 9 – подвесной блок

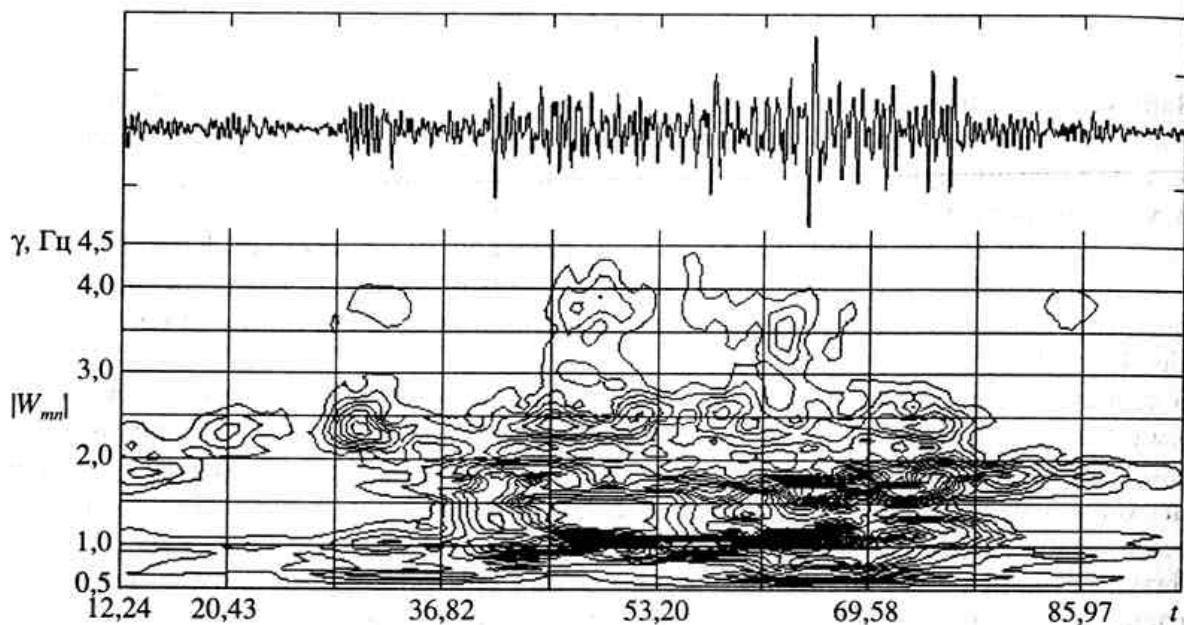


Рис. 4. Спектральные характеристики виброперемещений ригельного блока для СМ-4Б при одном из замеров

Были рассчитаны углы, характеризующие противофазные колебания ($\alpha_1(t)$ – первого и второго, $\alpha_2(t)$ – второго и третьего датчиков) $\alpha_1(t) = \arcsin[(x_1(t) - x_2(t))/d]$, $\alpha_2(t) = \arcsin[(x_2(t) - x_3(t))/h]$, и построены спектры этих углов. Из полученных спектральных распределений можно сделать вывод, что частоты диапазона 0,6–1,0 Гц соответствуют чисто изгибным формам колебаний блока, а частоты 1,7–2,6 Гц диапазона – изгибно-крутильным.

Сравнение спектрограмм для различных режимов показывает, что при изменении скоростей движения транспорта от 30 до 40 км/ч практически при всех режимах движения происходит “незначительное” увеличение амплитудных параметров перемещений. Однако в диапазоне 40–50 км/ч значения амплитудных параметров перемещений возрастают значительно.

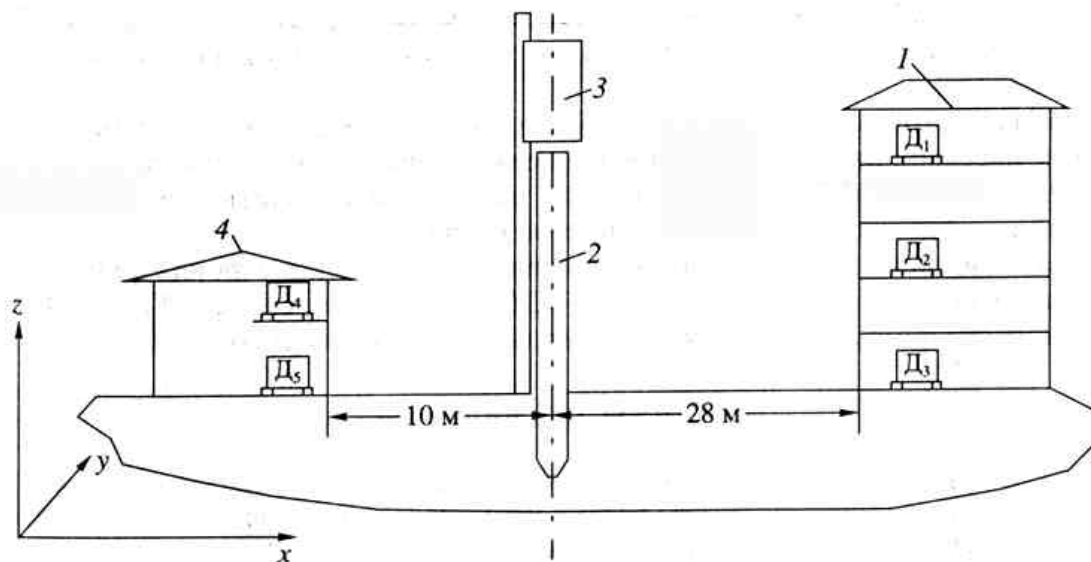


Рис. 5. 1 – жилой дом, 2 – свая, 3 – копр, 4 – ЦТП, Д₁–Д₅ – датчики

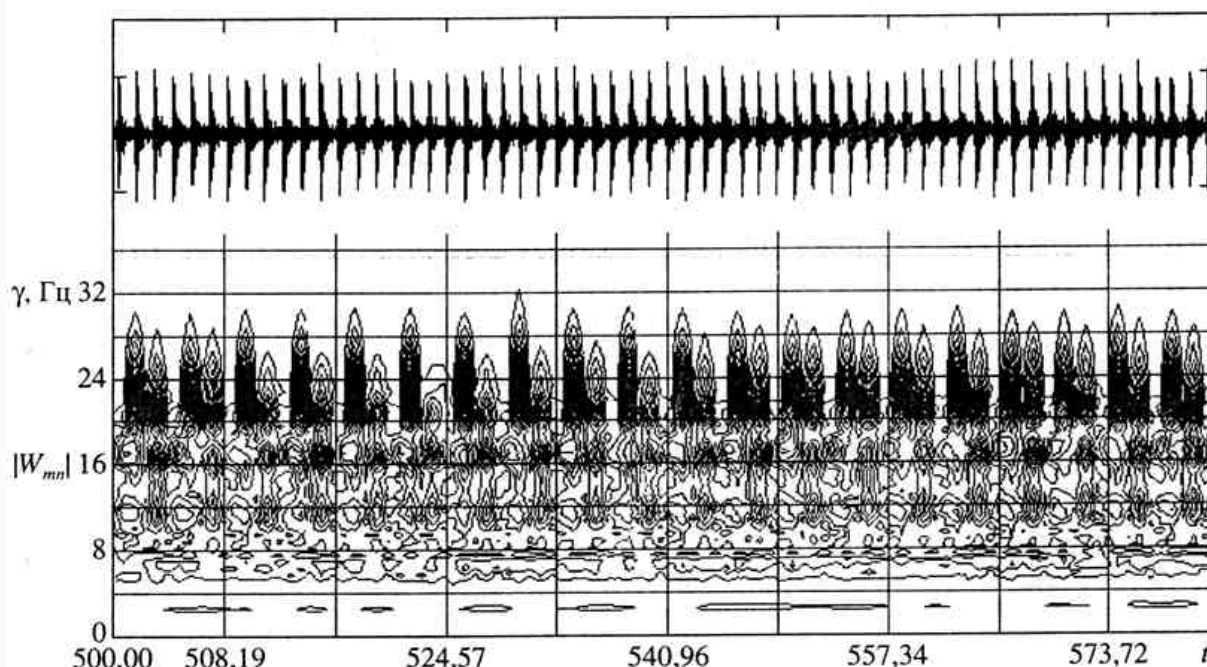


Рис. 6

Вибродиагностика жилого дома. Рассмотрим пример определения динамического воздействия на жилой дом и ЦТП (центральную тепловую подстанцию), возникающего при забивке свай в непосредственной близости от них (рис. 5).

В качестве первичного элемента для регистрации колебаний был использован трехкомпонентный сейсмоприемник ТС1, разработанный в Конструкторском бюро геофизического приборостроения РАН. Он предназначен для преобразования в электрический сигнал трех проекций векторов скорости и перемещения колебаний и позволяет регистрировать колебания в диапазоне частот 0,5–40 Гц.

При забивке свай регистрировали проекции вектора скорости фундамента и различных этажей исследуемых объектов. Путем численного дифференцирования виброскорости пересчитываются в виброускорения $a(t)$. Для них были осуществлены Фурье (1) и вейвлет (3) преобразования. Спектральные характеристики виброускорений для датчика № 1 приведены на рис. 6.

Полученные экспериментальные данные и результаты их фурье и вейвлет-обработки служат основой для оценки надежности жилого дома и ЦТП в процессе нового строительства.

Описанная методика позволяет: сохранить экспериментальные результаты в виде числовых массивов на ПЭВМ для последующей обработки; установить распределение амплитуд колебаний в зависимости от частоты; установить временную зависимость амплитудно-частотных характеристик сигнала.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (Проект Урал РФФИ 02-01-96408) и из средств Гранта PE-009-0 Американского фонда гражданских исследований и развития (АФГИР).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блейхуд Р. Быстрые алгоритмы цифровой обработки сигналов. М.: Мир, 1998. 448 с.
2. Roberts R.A. Digital signal processing. Addison Wesley Publishing Company, Colorado, 1987.
3. Prony R. Essai experimental et analytique // LTecole Polytech. V. 1. 1975.
4. Kay S.M. Modern spectral estimation. Theory and application. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1988.
5. Lang S.W., Kurkjian A.L., McClellan J.H. и др. Estimating slowness dispersion from arrays of sonic logging waveforms // Geophysics. 1987. V. 52. № 4. P. 530–544.
6. Ellefsen K.J., Cheng C.H., Tubman K.M. Estimating phase velocity and attenuation of guided waves in acoustic logging data // Geophysics. 1989. V. 54. № 8. P. 1054–1059.
7. Астафьева Н.М. Вейвлет-анализ: основы теории и примеры применения // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 11. С. 1145–1170.
8. Болотин В.В., Радин В.П., Трифанов О.В. и др. Влияние спектрального состава сейсмического воздействия на динамическую реакцию конструкций // Изв. РАН. МТТ. 1993. № 3. С. 150–158.
9. Воробьев В.И., Грибунин В.Г. Теория и практика вейвлет-преобразования. СПб.: Изд-во ВУС, 1999. 208 с.
10. Добеши И. Десять лекций по вейвлетам. Ижевск: НИЦ “Регулярная и хаотическая динамика”, 2001. 464 с.
11. Дремин И.М., Иванов О.В., Нечитайло В.А. Вейвлеты и их использование // Успехи физических наук. 2001. Т. 171. № 5. С. 465–561.
12. Новиков Л.В. Адаптивный вейвлет-анализ сигналов // Научное приборостроение. 1999. Т. 9. № 2.
13. Стаховский И.Р. Вейвлетный анализ временных сейсмических рядов // ДАН. 1996. Т. 350. № 3. С. 393–396.
14. Чуи К. Введение в вейвлеты. Пер. с англ. М.: Мир, 2001. 412 с.
15. Holschneider M. Wavelets An Analysis Tool. CNRS, Marseille, France, 1995.

Пермь

Поступила в редакцию 21.V.2003