

1. Букашкин С.А., Кузиев Э.М. Синтез алгоритмов цифровых рекурсивных демодуляторов АМ- и ЧМ-сигналов // Радиоэлектроника. 1989. № 12. С.34—41. 2. Ланнэ А.А. Нелинейные динамические системы: синтез, оптимизация, идентификация. Л., 1985. 3. Применение цифровой обработки сигналов/Под ред. Э. Оппенгейма. М., 1980. 4. Tymoshchuk P.V. and Shapovalov Y.I., Synthesis of electronic devices on the determination and digitization of implicit algebra-differential equations base // Radioelectronics and Communications Systems. Vol.41. April, 1998. P.41—43.

УДК 620.22

Качмарек З., Дробніца А.

Політехніка Свентокшиска, Кельце, Польща

## МЕТОД КОРЕКЦІЇ ДИСПЕРСІЙНИХ СПОТВОРЕНЬ І ЗГАСАННЯ В МЕХАНІЧНОМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧІ

© Качмарек З., Дробніца А., 2000

Подано дослідний метод корекції спотворень, викликаних дисперсією, а також згасання у в'язкопружному механічному перетворювачі. Суть методу полягає в дослідному визначенні поширювальних властивостей перетворювача, описуваних дисперсійною кривою і згасанням. Для визначення дисперсійної кривої перетворювача використано перетворення Wavelet, а згасання визначене зі спектральної передавальної функції відрізка перетворювача. Для верифікації запропонованого методу експериментально досліджувалося відтворення імпульсних тисків, створюваних електричними розрядами у воді. Подано результати цих досліджень.

### 1. Вступ

Сталевий циліндричний стрижень часто використовується як перетворювач для вимірювання імпульсних механічних величин [6]. Обмеженням його застосування у діапазоні високих частот є деформація перетворювання, яка викликана явищем дисперсії і згасанням. Ці явища належить брати до уваги для деформуєчих хвиль, довжина яких така сама або менша за діаметр стрижня. Питання корекції дисперсійних спотворень у механічному перетворювачі типу стрижня Хопкінсона було темою попередніх праць авторів [3-5]. У цих працях застосовано пружну модель механічного перетворювача і зауважено тільки ефекти дисперсії. З експериментальних досліджень видно, що у діапазоні високих частот деформацій треба зважити на в'язке згасання у перетворювачі [1]. У праці наведено дослідні методи корекції дисперсійних деформацій і згасання в механічному перетворювачі з метою застосування для відтворення перебігу процесів ударних тисків.

### 2. Суть запропонованого методу

Метод відтворення перебігу процесу змушування можна поділити на два етапи. У першому етапі коректується тільки вплив дисперсії, внесеної механічним перетворювачем, натомість на другому етапі розглядається його згасання. Сигнал змушування відтворюється з використанням вихідних сигналів з двох тензометричних перетворювачів, розміщених на стрижні на відстані відповідно  $L$  і  $2L$  від його початку [6]. Будову сконструйованого таким чином давача наведено на рис.1.

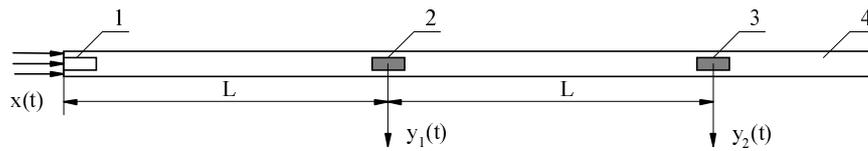


Рис.1. Будова датчика для вимірювання імпульсних механічних величин:  
 1 – гіпотетичний механо-електричний перетворювач;  
 2, 3 – механо-електричні перетворювачі; 4 – механічний перетворювач

## 2.1. Корекція впливу дисперсії

У запропонованому методі часові запізнення окремих частотних складових спотвореного дисперсією сигналу отримуються на основі експериментально визначеної дисперсійної характеристики стрижня, яка описує залежність часу поширення хвиль напруження функцією частоти. Здійснюється це часово-частотним аналізом сигналів  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$  з датчика. Результатом цього аналізу є залежність часового запізнення  $\Delta t$ , що утворюється на довжині  $L$  поширюваної хвилі напруження, від частоти  $f$ . Ця характеристика описує дисперсійні властивості застосовуваного в експерименті механічного перетворювача. Враховуючи велику роздільність часово-частотного аналізу в широкій області частот, для цього аналізу використано перетворення Wavelet, яке визначається як [2]:

$$(Wf)(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left( \frac{t-b}{a} \right) dt, \quad (1)$$

де  $a$  – масштабний коефіцієнт;  $b$  – коефіцієнт зсуву;  $\psi(t)$  – аналізуюча функція.

У роботі в ролі аналізуючої функції використано функцію Габора, визначену як [7]:

$$\psi_g(t) = \frac{1}{\sqrt[4]{\pi}} \sqrt{\frac{\omega_0}{\gamma}} \exp \left[ -\frac{(\omega_0/\gamma)^2}{2} t^2 + j\omega_0 t \right], \quad (2)$$

де  $\omega_0, \gamma$  – додатні сталі.

У роботі значення цих сталих прийнято такими:  $\gamma = \pi\sqrt{2/\ln 2}$ ,  $\omega_0 = 2\pi/T$  де  $T$  означає час тривання аналізованого сигналу.

Корекція впливу дисперсії проводиться у частотній області через відповідну корекцію фазових зсувів окремих частотних складових вимірюваного сигналу  $y_1(t)$  [5].

Реєстрований сигнал  $y_1(t)$  можна записати так:

$$y_1(t) = \sum_k A_k \cos(k\omega_0 t) + B_k \sin(k\omega_0 t), \quad (3)$$

де  $A_k, B_k$  – коефіцієнти розкладу;  $\omega_0$  – основна частота, пов'язана з часом реєстрації сигналу.

Сигнал  $y_{01}(t)$  з гіпотетичного механо-електричного перетворювача, розташованого на початку стержня, який є мірою ходу процесу  $x(t)$ , що діє на передню поверхню стрижня, можна записати так:

$$y_{01}(t) = \sum_k A_k \cos(k\omega_0 t + \varphi_k) + B_k \sin(k\omega_0 t + \varphi_k), \quad (4)$$

де

$$\varphi_k = k\omega_0 \cdot \Delta t(f_k). \quad (5)$$

У вище наведеному рівнянні  $\Delta t(f_k)$  означає часову затримку, отриману з часово-частотного аналізу для частоти  $f_k = \frac{k\omega_0}{2\pi}$ .

## 2.2. Корекція згасання

У випадку в'язкопружного стрижня крім дисперсійних спотворень похибка вимірювання спричинюється також згасанням, яке є функцією частоти. Із теоретичного аналізу явища поширення хвиль напружень у в'язкопружному стрижні з вільними кінцями видно, що спектральна передавальна характеристика відрізка перетворювача  $L$  дорівнює [1]:

$$|H(j\omega)| = \frac{|E_2(j\omega)|}{|E_1(j\omega)|} = e^{-\alpha(\omega)L}, \quad (6)$$

де  $E_1(j\omega)$ ,  $E_2(j\omega)$  – перетворення Фур'є процесів деформації  $\varepsilon_1(t)$  і  $\varepsilon_2(t)$  у перерізах відповідно перетворювачів 2 і 3,  $\alpha(\omega)$  – коефіцієнт згасання.

Експериментальні дослідження показали, що модуль передавальної функції перетворювача, який є функцією згасання, можна апроксимувати залежністю:

$$|H(j\omega)| = e^{-a \cdot f^2 \cdot L}, \quad (7)$$

де  $a$  – стала.

У роботі експериментально знайдено модуль передавальної функції за формулою

$$|H_e(j\omega)| = \frac{|Y_2(j\omega)|}{|Y_1(j\omega)|}, \quad (8)$$

де  $|Y_1(j\omega)|$ ,  $|Y_2(j\omega)|$  – модулі перетворень Фур'є відповідно сигналів  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$ .

Застосовуючи метод найменших квадратів, залежність (8) апроксимовано функцією (7), визначаючи таким чином функцію згасання  $|\tilde{H}_e(j\omega)|$ . Корекція впливу згасання була проведена у частотній області через знаходження перетворень Фур'є відтвореного сигналу за формулою:

$$Y_{02}(j\omega) = \frac{Y_{01}(j\omega)}{|\tilde{H}_e(j\omega)|}, \quad (9)$$

де  $Y_{01}(j\omega)$  - перетворення Фур'є функції  $y_{01}(t)$ , отриманої корекцією впливу дисперсії на попередньому етапі.

Після зворотного перетворення Фур'є остаточно отримуємо оцінку змушувального процесу  $y_{02}(t)$ .

## 3. Результати експериментальних досліджень

Для практичної верифікації описаного у розділі 2 методу корекції імпульсних механічних процесів він був застосований для відтворення перебігу процесів імпульсних тисків, що утворюються внаслідок електричних розрядів у воді [6]. Зареєстровані процеси  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$  з тензометричних перетворювачів, розташованих на стрижні на відстанях відповідно 1 м і 2 м від його початку, подано на рис. 2, 3.

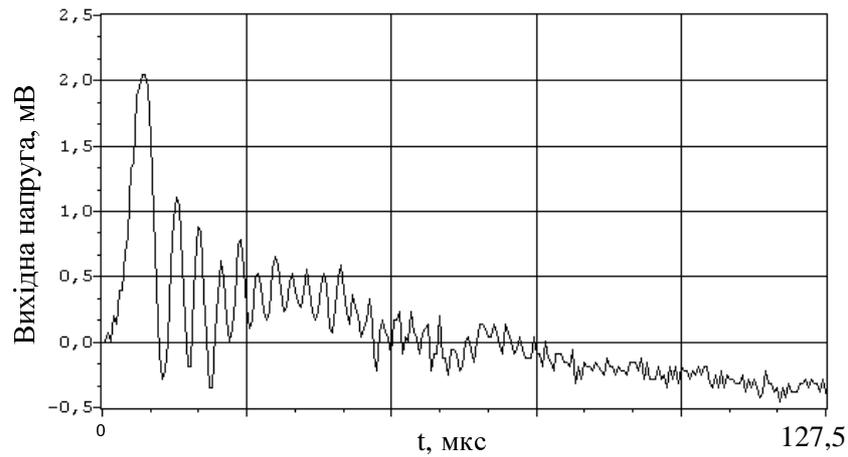


Рис.1. Вихідний сигнал  $u_1(t)$  перетворювача, розташованого на відстані 1 м від початку стрижня

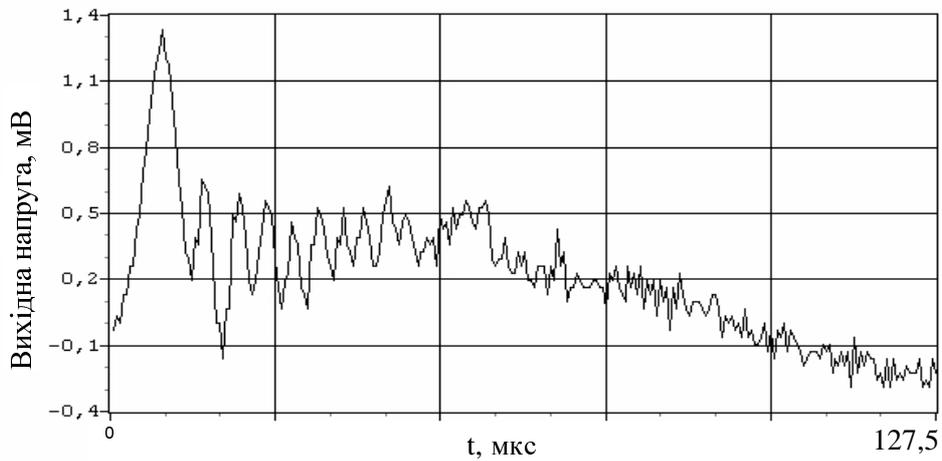


Рис.3. Вихідний сигнал  $u_2(t)$  перетворювача, розташованого на відстані 2 м від початку стрижня

Обидва сигнали були піддані перетворенню Wavelet, описаному в попередньому розділі. Модулі перетворень Wavelet тих процесів показані на рис.4, 5.

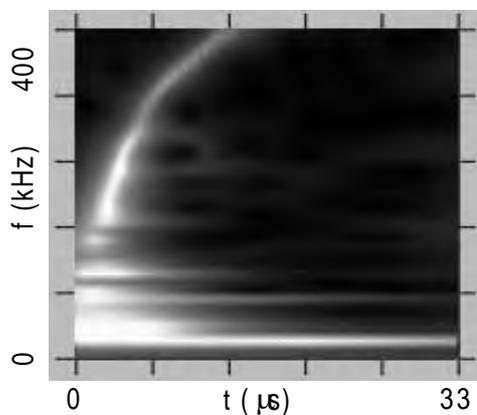


Рис.4. Модуль перетворення Wavelet, проведеного над сигналом  $u_1(t)$

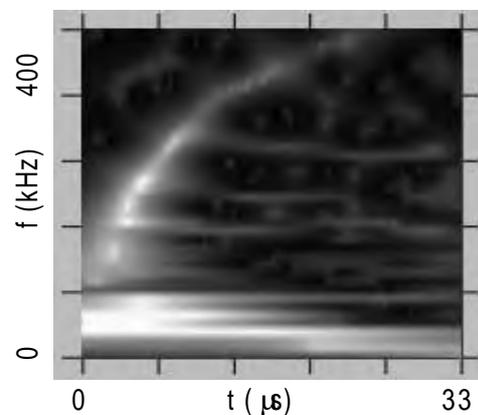


Рис.5. Модуль перетворення Wavelet, проведеного над сигналом  $u_2(t)$

Результати проведеного аналізу дозволили безпосередньо визначити часову затримку  $\Delta t$  окремих частотних складових поширюваного сигналу в діапазоні до 400 кГц. З порівняння графіків, наведених на рис.4, 5, отримана характеристика  $\Delta t = g(f)$ , яка подана на рис.6.

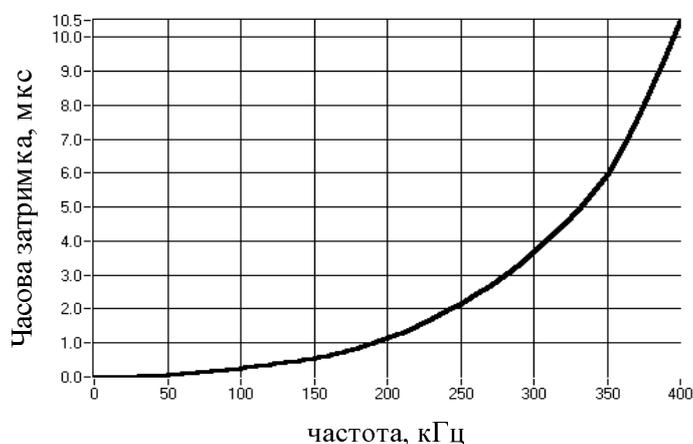


Рис.6. Часова затримка  $\Delta t = g(f)$  хвилі напружень як функція частоти, отримана внаслідок перетворення *Wavelet*

Ця характеристика дала можливість відтворити хід змушувального процесу  $y_{01}(t)$  після корекції впливу дисперсії способом, описаним у підрозділі 2.2. Цей процес показаний на рис.7.

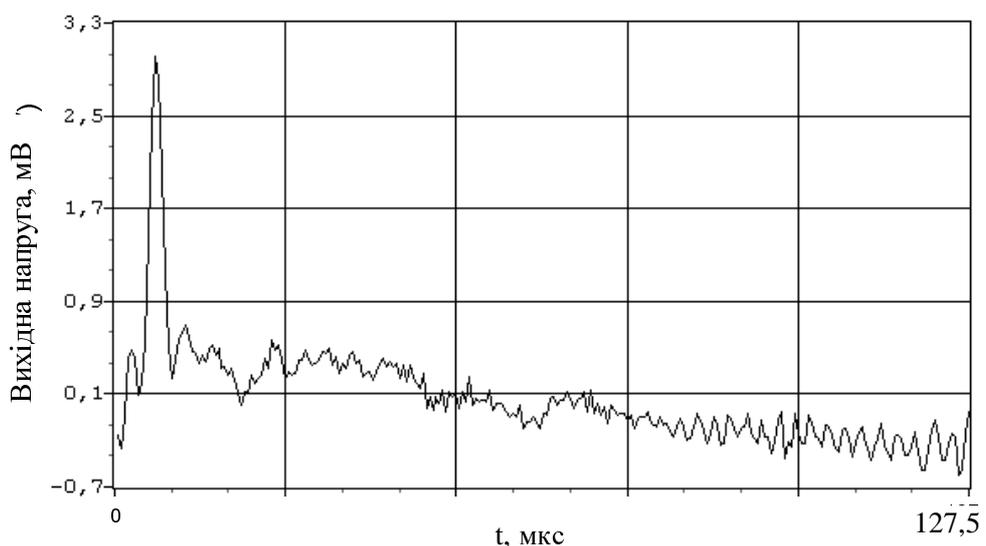


Рис.7. Відтворений процес  $y_{01}(t)$

З метою визначення згасання, яке вносить механічний перетворювач, знайдено модулі перетворень Фур'є сигналів  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$  (рис. 8). Залежність згасання від частоти, яка визначена з використанням методу, описаного у підрозділі 2.3, показана на рис.9. Значення сталої згасання, визначеної методом найменших квадратів, становить  $a=11,3 \cdot 10^{-12} \text{ Гц}^{-2} \cdot \text{м}^{-1}$ . Враховуючи високий рівень шумів, функцію згасання визначено у діапазоні частот до 470 кГц.

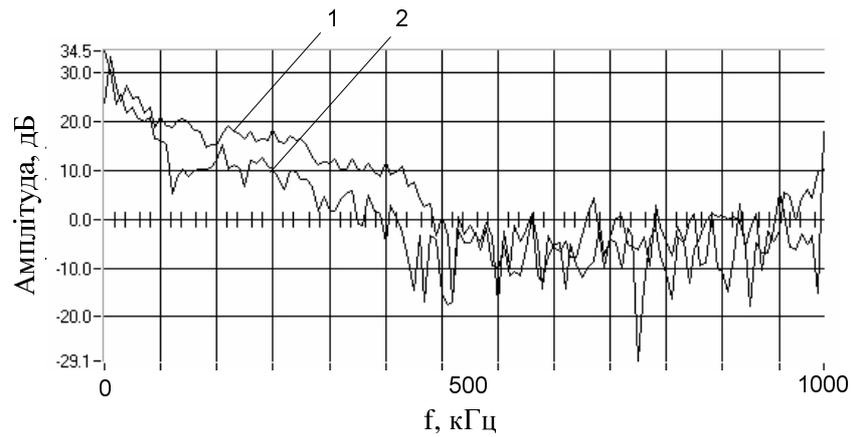


Рис.8. Амплітудні спектри  $|Y_1(j\omega)|$  і  $|Y_2(j\omega)|$  (позначені на рис. відповідно 1 і 2) вимірювальних сигналів  $y_1(t)$  і  $y_2(t)$

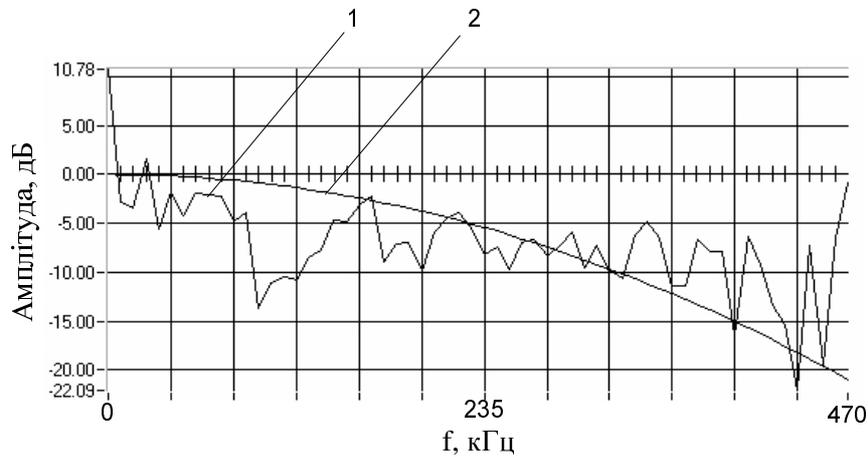


Рис.9. Залежність  $|H_e(j\omega)|$  і її апроксимуюча функція  $|\tilde{H}(j\omega)|$  (позначені на рис. відповідно 1 і 2)

Відтворений згідно з описаним у підрозділі 2.3 процес тиску  $y_{02}(t)$ , який діє на передню поверхню стрижня, показаний на рис.10.

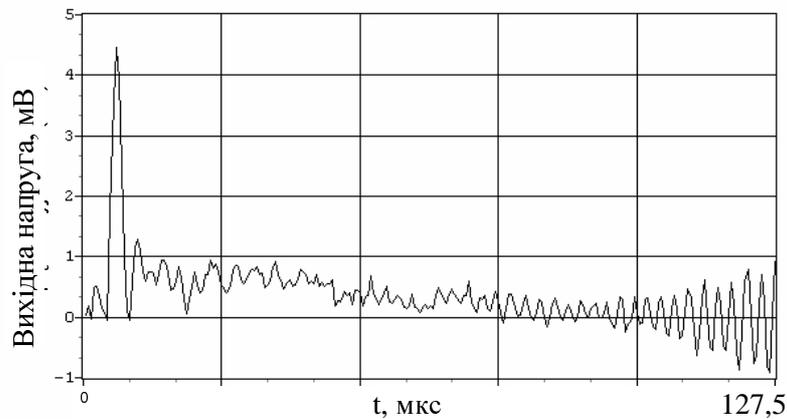


Рис.10. Відтворений хід процесу  $y_{02}(t)$  тиску, що діє на передню поверхню стрижня

#### 4. Висновки

З отриманих результатів випливає, що амплітуда імпульсу тиску, отриманого в результаті корекції впливу дисперсії, приблизно на 50 % більша, ніж амплітуда сигналу з тензOMETричного перетворювача, розміщеного на віддалі 1 м від початку стрижня. Додаткова корекція згасання, спричиненого стрижнем, призводить до того, що відтворений імпульс вищий від зареєстрованого імпульсу більше, ніж на 100 %. Крім того, час тривання відтвореного імпульсу становить 4.2 мкс при часі тривання зареєстрованого імпульсу, що дорівнює 8.1 мкс.

Результати експериментальних досліджень показують, що перетворення Wavelet може бути використане для корекції дисперсійних спотворень, які вносяться вимірювальним перетворювачем типу стержня Хопкінсона. При часово-частотному аналізі належить звернути увагу на його роздільність, яка впливає на точність, з якою можна визначити часові затримки окремих частотних складових аналізованого сигналу. Експериментальні дослідження показали також, що в реальному механічному перетворювачі враховувати тільки дисперсію недостатньо для правильного відтворення процесу змушування. У цих випадках потрібно враховувати також його згасання.

Корекція була виконана в діапазоні частот до 400 кГц. Її поширення на вищі частоти, де треба враховувати високий рівень шумів вимірювання, вимагає додаткових досліджень.

1. Bacon C. *An Experimental Method for Considering Dispersion and Attenuation in a Viscoelastic Hopkinson Bar* // *Experimental Mechanics*. Vol.38. No 4. 1998. 2. Chui C. K. *An Introduction to Wavelet*. San Diego, 1992. 3. Kaczmarek Z., Drobniа A. *A Numerical Correction of Dispersive Distortion in Mechanical Transducer by Means of Wavelet Transform* // *International Conference on Modern Problems of Telecommunications, Computer Science and Engineers Training TCSET'2000*. Lviv-Slavsko, P.5-6. February 14-19, 2000. 4. Kaczmarek Z., Drobniа A. *A Reconstruction Method of Impulsive Pressure and Force Waveform by Means of Wavelet Transform* // *International Symposium on Non-Linear Electromagnetic Systems*, Pavia 10-12 May 1999. 5. Kaczmarek Z., Drobniа A. *Numeryczna korekcja zniekształceń dyspersyjnych w przetworniku mechanicznym z wykorzystaniem przekształcenia czasowo-częstotliwościowego* // *IX Sympozjum MiSSP, Krynica Górska, 1999*. 6. Kaczmarek Z., Drobniа A. *Waveform reconstruction of impulsive force and pressure by means of deconvolution* // *Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics*. Vol.13, IOS Press. P.438-441, 1998. 7. Kishimoto K., Inoue H., Hamada M., Shibuya T. *Time Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform* // *Transactions of the ASME*. Vol.62. 1995. P.841-846.