

# АНАЛИЗ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МАШИН С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭМПИРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЕКОМПОЗИЦИИ

КАН ШОУЧЯН, В. И. МИКУЛОВИЧ

*Представлен метод подавления шума в вибрационных сигналах машин на основе эмпирического метода декомпозиции (EMD), позволяющего любой произвольный сигнал разделить на семейство существенных модальных функций (IMF). Для более эффективного подавления шума в разных группах компонентов IMF предложено использовать различные методы вычисления уровня порога: метод мягкого порога EMD и метод оценки энергии шума. Приводятся результаты экспериментальных исследований вибрации вертолета с несбалансированным рулевым винтом, подтверждающие эффективность рассмотренного метода.*

*The paper presents a procedure of noise suppression in vibration signals of machines based on empirical method of decomposition (EMD), which allows dividing any arbitrary signal into a family of essential modal functions (IMF). For more effective noise suppression, it was proposed to use different methods of calculation of noise threshold: EMD method of soft threshold and method of noise energy assessment. Results of experimental studies of vibrations of a helicopter with unbalanced antitorque propeller are presented, confirming the effectiveness of the considered method.*

Функционирование промышленного оборудования с вращающимися деталями неразрывно связано с вибрацией корпусов, опор, составных частей и отдельных деталей. В зависимости от технического состояния машин интенсивность и характер вибрации проявляются самым разным образом. Углубленный и разноплановый анализ вибрационных сигналов позволяет решать многие задачи технической диагностики и прогнозирования, выявлять зарождающиеся дефекты на ранней стадии их возникновения. Однако сложная внутренняя структура вибрации, ее нестационарный характер и наличие разномасштабных локальных особенностей существенным образом затрудняют процесс обработки механических колебаний и выделения информативных (диагностических) признаков [1].

В настоящее время для обработки вибрационных сигналов в большинстве случаев применяется классический метод спектрального анализа, основанный на дискретном преобразовании Фурье. При этом предполагается, что анализируемые процессы являются стационарными или, по меньшей мере, квазистационарными. Вследствие такого допущения спектральный Фурье-анализ является малоинформативным при исследовании мгновенной структуры нестационарных процессов, так как не отражает их частотно-временных характеристик [2].

Указанные проблемы частично решаются переходом к кратковременному (скользящему) преобразованию Фурье с адаптацией временных окон структурным изменениям сигнала таким образом, чтобы гипотеза стационарности была приемлема.

Основным недостатком такого подхода является непреодолимое противоречие между временным и частотным разрешением [2, 3].

В настоящее время показано, что анализ сигналов скользящими окнами является частным случаем анализа в базисе вейвлетов. Вейвлетный анализ, как известно, является весьма эффективным современным методом обработки сложных сигналов, позволяющим детально анализировать их структуру в частотно-временном представлении [3].

Отличительной особенностью анализа в базисе вейвлетов является его высокая чувствительность к кратковременным высокочастотным флуктуациям сигнала, так как окно вейвлета обеспечивает адекватную оценку таких флуктуаций за счет одновременного увеличения амплитуды окна при уменьшении его ширины. При этом разрешающая способность анализа во временной области возрастает с увеличением частоты. Тем не менее, при выборе разных базисных функций разложение (декомпозиция) сигнала оказывается не единственным.

Наиболее эффективным для обработки сложных сигналов различной природы может быть преобразование Гильберта–Хуанга (Hilbert–Huang transform — ННТ), под которым понимается совокупность EMD нелинейных и нестационарных сигналов и преобразования Гильберта [2]. ННТ в целом представляет собой частотно-временной анализ данных и не требует выбора априорного функционального базиса из заранее известного набора, как это делается в Фурье и вейвлет-преобразованиях. Базисные функции, называемые «существенной модальной функцией» (intrinsic mode function — IMF) или эмпирическими модами, в этом случае адаптивно извлекаются из ана-



лизируемых сигналов процедурами отсеивания EMD. Причем разложение осуществляется с учетом локальных особенностей (экстремумов и нулей) и индивидуальной внутренней структуры сигналов: наличия амплитудной, частотной и фазовой модуляции, шумов и помех, выбросов.

Данный метод позволяет преодолеть проблему выбора базисных функций в вейвлетном преобразовании и существенно повысить точность получаемых результатов. Кроме того, на основе эмпирического метода декомпозиции можно решать и задачу понижения уровня шума, присутствующего в обрабатываемых сигналах, так как для восстановления сигнала могут использоваться выбранные компоненты IMF с фильтрацией или с установлением порога, ограничивающего уровень шума.

Целью предлагаемой работы является применение метода EMD для удаления шумов в вибрационных сигналах с тем, чтобы повысить достоверность выявления диагностических признаков в системах контроля состояния машинного оборудования.

**Алгоритм EMD.** Эмпирический метод декомпозиции, как было отмечено выше, включает разложение заданного сигнала  $x(t)$  на ряд существенных мод (IMF). Каждая IMF заменяет отдельные составляющие анализируемого сигнала в определенном масштабе или в определенной полосе частот и должна удовлетворять следующим условиям:

– во всем наборе данных число экстремумов и число пересечений нулевого уровня должно быть либо равным, либо отличаться максимум на единицу;

– в любой точке среднее значение огибающей, определенной локальными максимумами, и огибающей, определенной локальными минимумами, должно быть нулевым.

Разложение в EMD начинается с самой высокочастотной моды, содержащейся в сигнале  $x(t)$ , так что каждая последующая IMF содержит колебания более низкой частоты, чем предыдущая. Чтобы произошло успешное разложение на эмпирические моды, сигнал  $x(t)$  должен иметь, по крайней мере, два экстремума: один минимум и один максимум.

В общем виде алгоритм EMD включает следующую последовательность операций [2].

1. Определение всех экстремумов (максимумов и минимумов) исходного сигнала  $x(t)$ .

2. Нахождение верхней  $A_{\max}(t)$  и нижней  $A_{\min}(t)$  огибающей по всем локальным максимумам и минимумам соответственно. Для этой цели чаще применяется интерполяция кубическими сплайнами.

3. Вычисление среднего значения полученных огибающих  $m_1(t) = [A_{\min}(t) + A_{\max}(t)]/2$ .

4. Выделение разности  $h_1(t) = [x(t) - m_1(t)]$ .

Если  $h_1(t)$  не удовлетворяет двум условиям, указанным выше, то  $h_1(t)$  используется в качестве исходного сигнала для повторения пунктов (1–3) до тех пор, когда функция  $h_{1k}(t) = h_{1(k-1)}(t) - m_{1k}(t)$  будет удовлетворять им. В этом случае функция  $c_1(t) = h_{1k}(t)$  будет являться IMF1 сигнала  $x(t)$ .

Вычитая функцию  $c_1(t)$  из  $x(t)$ , получим:

$$x(t) - c_1(t) = r_1(t). \quad (1)$$

Функция  $r_1(t)$  используется далее для выполнения этапов (1–4). В результате будет получена функция  $c_2(t)$ , которая будет IMF2 сигнала  $x(t)$ .

Повторяя данную операцию, можно получить  $n$  компонентов IMF  $x(t)$ :

$$\begin{aligned} r_1 - c_2(t) &= r_2 \\ r_{n-1} - c_n(t) &= r_n \end{aligned} \quad (2)$$

Выражения (1) и (2) позволяют получить декомпозицию  $x(t)$  в  $n$ -эмпирическом приближении:

$$x(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n, \quad (3)$$

где  $r_n$  — последний остаток.

**Шумоподавление с использованием мягкого порога EMD.** Шумы, сопровождающие полезную информацию в сигнале, удовлетворяют приведенным выше определениям функций IMF и при разложении в EMD они в основном «отсеиваются» в высокочастотные компоненты IMF. Однако на эти же компоненты могут оказывать влияние и высокочастотные составляющие информационной части сигнала в зависимости от их положения в главном частотном диапазоне. Поэтому первоочередной становится задача формирования определенных критериев отбора только шумовых компонентов IMF для исключения их при последующей реконструкции сигнала. В этом случае все компоненты IMF можно разделить на компоненты с преобладающим шумом и компоненты с преобладающим полезным сигналом. Затем для удаления шума в каждой из этих групп компонентов IMF можно использовать метод мягкого порога EMD или метод оценки энергии шума. После чего по выбранным компонентам IMF можно восстановить сигнал с меньшим уровнем шума [4].

Пусть  $c_i(t)$  — детерминированные IMF конечной длины  $L$ , а  $IM_i$  — IMF с аддитивными шумами  $n_i(t)$  и дисперсией  $\sigma_i^2(t)$ :

$$IM_i(t) = c_i(t) + n_i(t). \quad (4)$$

Тогда оценка компонентов IMF  $\hat{c}_i(t)$  с учетом удаленного шума может быть определена таким образом:

$$\hat{c}_i(t) = \Gamma(IM_i, \tau_i), \quad (5)$$

где  $\Gamma(IM_i, \tau_i)$  — пороговая функция или метод фильтрации, определяемый параметрами  $\tau_i$ , применительно к  $IM_i$  сигнала.

Тогда восстановленный сигнал с пониженным уровнем шума  $\hat{x}(t)$  определяется как:

$$\hat{x}(t) = \sum_{i=1}^n \hat{c}_i(t) + r_n(t). \quad (6)$$

Для снижения уровня шума метод EMD можно комбинировать с методом фильтрации типа сглаживания Савицкого–Голэя или нелинейного преобразования с установлением мягкого порога [5].

**Удаление шумов с использованием мягкого порога EMD.** Сглаженный вариант входных данных можно получить путем установления порога IMF до восстановления сигнала. Если  $\Gamma(IM_i, \tau_i)$  — пороговая функция, а  $\tau_i$  — пороговое значение, то его можно определить многими способами [6].

Донохо и Джонстоун [6] предложили универсальный порог  $\tau_i$  для удаления гауссова шума, который задается посредством равенств:

$$\tau_i = \hat{\sigma}_i \sqrt{2 \log(n)}, \quad (7)$$

$$\hat{\sigma}_i = MAD_i / 0,6745, \quad (8)$$

где  $n$  — число компонентов IMF;  $\hat{\sigma}_i$  — дисперсия шума  $i$ -го компонента IMF;  $MAD_i$  — абсолютное среднее отклонение  $i$ -й IMF:

$$MAD_i = Med \{ |IM_i(t) - Med \{ IM_i(t) \}| \}. \quad (9)$$

Вместо установления одного глобального порога для исходных сигналов здесь в зависимости

от уровня шума используется совокупность порогов по одному для каждой IMF (масштабный уровень). Метод установления мягкого порога сжимает компоненты IMF на  $\tau_i$  по направлению к нулю следующим образом:

$$\hat{c}_i(t) = \begin{cases} IM_i(t) - \tau_i, & \text{если } IM_i(t) \geq \tau_i \\ 0, & \text{если } |IM_i(t)| < \tau_i \\ IM_i(t) + \tau_i, & \text{если } IM_i(t) \leq -\tau_i \end{cases} \quad (10)$$

**Оценка уровня энергии белого шума в EMD.**

Для компонентов IMF преобладающего полезного сигнала применение формулы (8) некорректно. Энергия гауссового шума может быть оценена непосредственно [4]:

$$E_i T_i = \text{const}, \quad (11)$$

где  $E_i$  — плотность энергии шума  $i$ -го компонента IMF;  $T_i$  — значение его среднего периода.

Средний период может быть получен усреднением мгновенной частоты преобразования Гильберта первого компонента IMF. На основании энергии этого шума и среднего периода текущего IMF можно оценить энергию шума следующим образом:

$$E_{i+1} = \text{const} / T_{i+1}. \quad (12)$$

**Экспериментальные исследования.**

В качестве иллюстрации возможностей разработанного метода ниже приводятся результаты обработки вибрационных сигналов с выхода датчика вибрации AP38, установленного на главном редукторе одного из вертолетов в исправном состоянии и с повышенной вибрацией. Первоначально предполагалось, что причиной этому является несба-

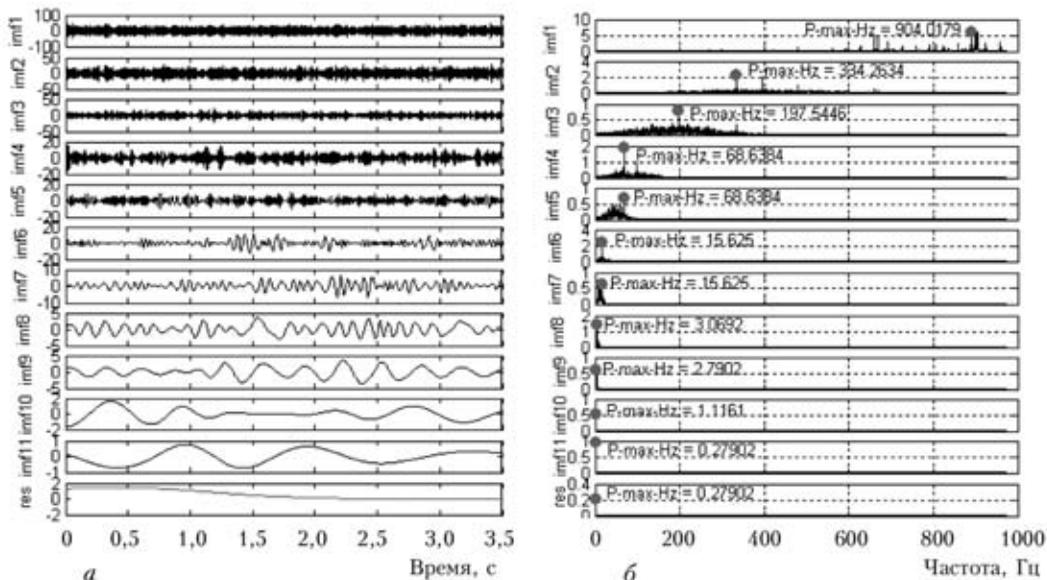


Рис. 1. Результаты декомпозиции вибрации (а) и амплитудный спектр компонентов IMF (б) (исправное состояние)

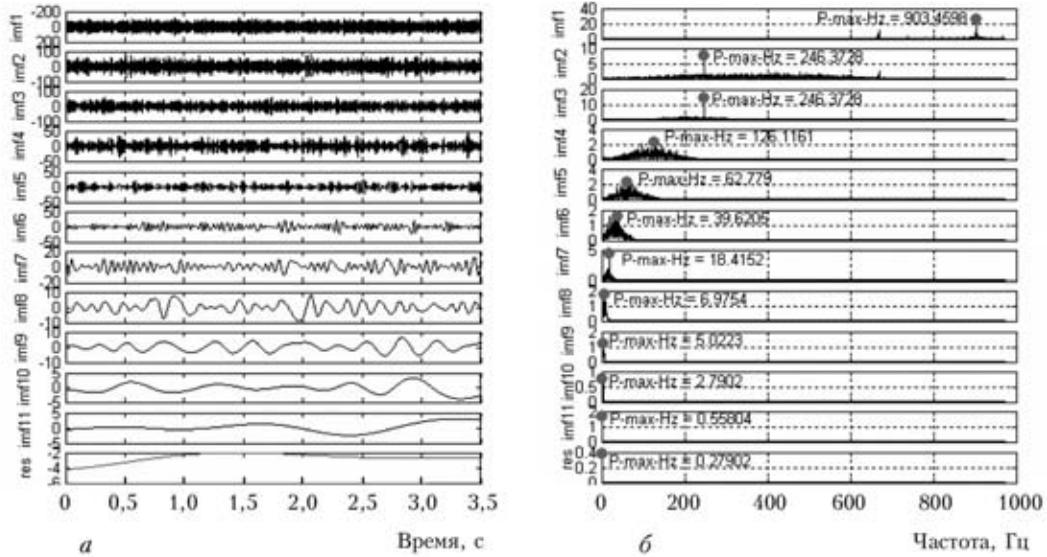


Рис. 2. Результаты декомпозиции вибрации (а) и амплитудный спектр компонентов IMF (б) (неисправное состояние)

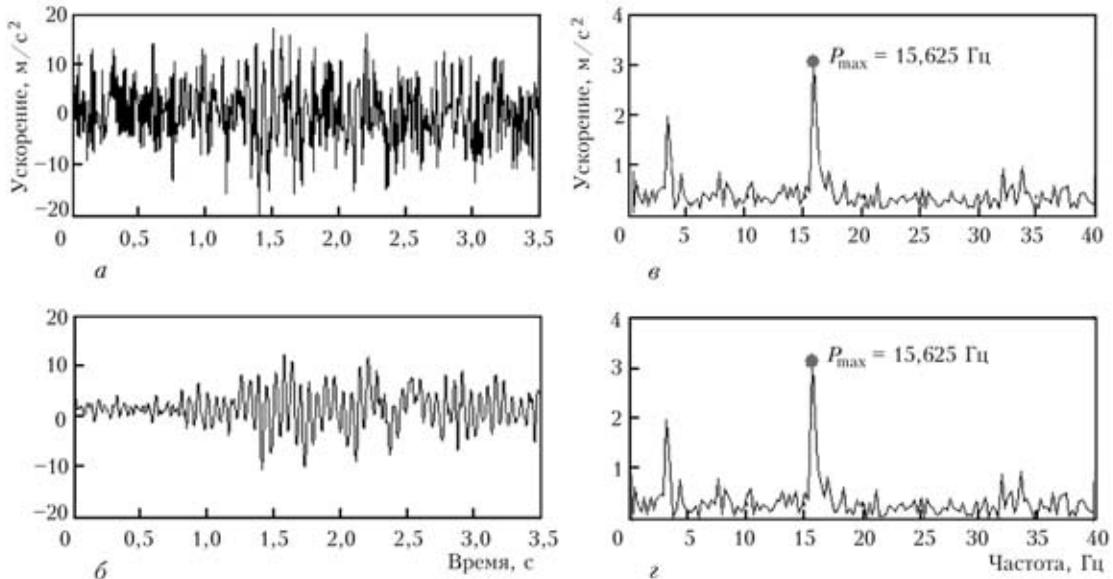


Рис. 3. Восстановленные сигналы до (а) и после шумоподавления (б) и их амплитудные спектры (в, з) для исправного вертолета

лансированность несущего винта. Однако его балансировка не давала ожидаемых результатов.

Для выявления источника повышенной вибрации были выбраны следующие частотные диапазоны: 2...20 Гц (несущий винт) и 10...30 Гц (рулевой).

На рис. 1 представлены результаты декомпозиции вибрации исправного и неисправного вертолета на 11 компонентов IMF и остаток *res*, а их амплитудные спектры — на рис. 2.

В соответствии с определенным частотным диапазоном для дальнейшего анализа выбраны компоненты IMF5-IMF11. На рис. 3 показаны восстановленные на основе выбранных компонентов IMF сигналы и их амплитудные спектры до и после шумоподавления с использованием методов

мягкого порога EMD и оценки энергии шума для исправного, а на рис. 4 — неисправного вертолета.

Как видно, амплитудные спектры, представленные на рис. 3, 4, позволяют лучше обнаружить присутствие мощных гармонических составляющих в полосе частот от 18 до 19 Гц, которые отсутствовали в амплитудном спектре вибрации исправного вертолета.

Как оказалось, в данной частотной полосе расположена первая гармоника вибрации рулевого винта, которая появилась вследствие несбалансированности хвостового винта, вызванная дефектом сборки его редуктора. После выполнения соответствующих работ по его балансировке вибрация вертолета стала соответствовать нормальному уровню.

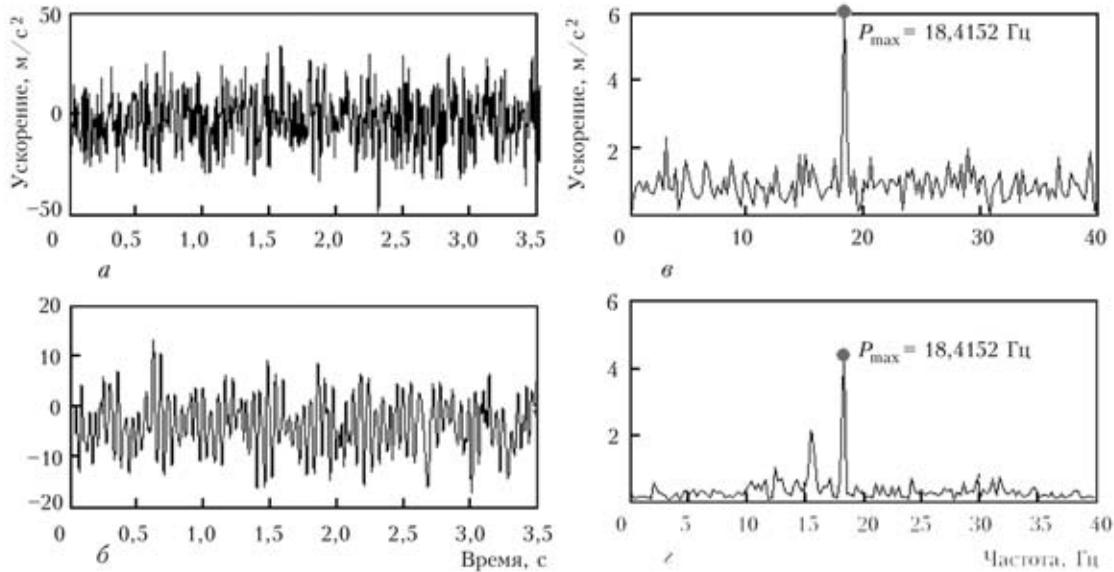


Рис. 4. Восстановленные сигналы до (а) и после шумоподавления (б) и их амплитудные спектры (в, з) для неисправного вертолета

Для сравнения вибрационные сигналы вертолета в исправном и неисправном состоянии с использованием вейвлета Добеши-5 были разложены на отдельные компоненты с масштабом декомпозиции  $j = 5$ . На рис. 5, 6 представлены амплитудные спектры выбранного коэффициента аппроксимации для пятого масштаба (частотный диапазон 0...30,5175 Гц) до и после шумоподавления с использованием метода мягкого порога.

Как видно, шумоподавление с применением этого метода в данном случае неидеально для низких частот, и, кроме того, получаемые результаты

неоднозначны при выборе различных базисных функций вейвлета.

Сравнение результатов шумоподавления в вейвлет-анализе и методе EMD совместно с Фурье-анализом показывает, что метод EMD позволяет получать лучшие результаты, чем вейвлет-анализ, и не требует предварительного выбора подходящей базисной функции, что в вейвлет-анализе составляет достаточно сложную проблему. При этом отношение сигнал — шум увеличивается более чем на 8 дБ.

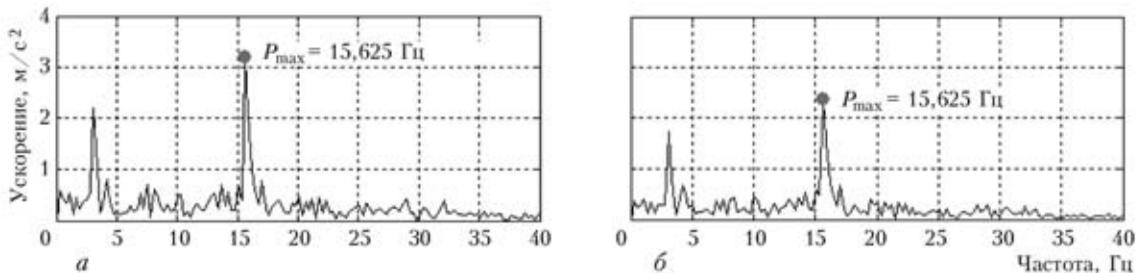


Рис. 5. Спектр вибрации исправного вертолета до (а) и после шумоподавления (б)

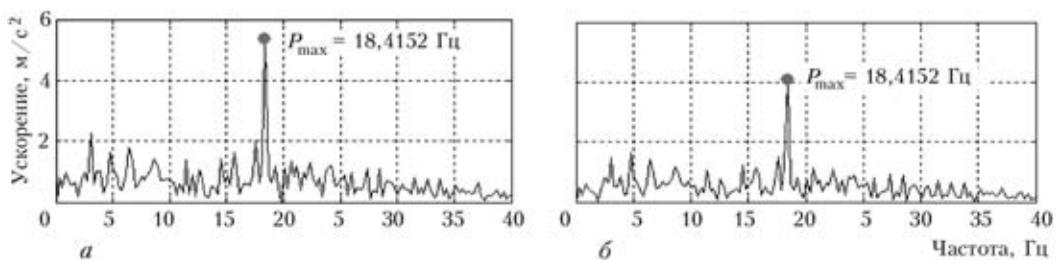


Рис. 6. Спектр вибрации неисправного вертолета до (а) и после шумоподавления (б)

**Выводы.**

В результате проведенных исследований установлено, что метод EMD характеризуется вполне определенной частотной избирательностью на каждом уровне компонентов IMF.

Для более эффективного подавления шума в разных группах компонентов IMF лучше использовать различные методы вычисления уровня порога: метод мягкого порога EMD и метод оценки энергии белого шума. Применение одинакового метода вычисления порога приводит к значительным искажениям в реконструированных сигналах.

Спектральный анализ отдельных компонентов IMF, соответствующих определенным частотным диапазонам вибрации, является наиболее эффективным для вибрационной диагностики машин.

1. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. — С.-Пб.: Изд-во АО ВАСТ, 1997. — 240 с.
2. The empirical mode decomposition method and the Hilbert spectrum for non-stationary time series analysis / N. E. Huang, Z. Shen, S. R. Long et al. // Proc. R. Soc. Lond. — 1998. — A454. — P. 903–995.
3. Дьяконов В. П. Вейвлеты. От теории к практике. — М.: СОЛОН-Р, 2002. — 448 с.
4. Zhaohua Wu, Norden E. Huang. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method // Ibid. — 2004. — A454. — P. 1597–1611.
5. Savitzky A., Golay M. J. E. Smoothing and differentiation, of data by simplified least squares procedures // Analytical chemistry. — 1964. — 36. — P. 1627–1639.
6. Donoho D. L., Johnstone I. M. Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage // Biometrika. — 1994. — 81, № 3. — P. 425–455.

Белорус. гос. ун-т, Минск  
Харбинский науч.-техн. ун-т, Китай

Поступила в редакцию  
14.01.2010



## Новости УО НКТД

С 7 по 11 июня 2010 г. в Москве в выставочном комплексе "Экспоцентр" на Красной Пресне проходила 10-я Европейская конференция по неразрушающему контролю (10 ECNDT) и выставка средств НК и ТД. По данным аналитического центра 10 ECNDT в работе конференции приняли участие более 5000 человек из 60 стран мира. На выставке разместили свои стенды 150 фирм. Особенностью этого мероприятия было то, что рабочим языком конференции был английский.

Учеными Украины было представлено 30 докладов по разным проблемам НК и ТД. Наиболее интересными из них были доклады Бондаренко А. И. по проблемам дальнедействующего низкочастотного УЗК; Посыпайко Ю. Н. и др. по магнитно-оптическому методу; Учанина В. Н., Казакевича М. Л. и др.

За неделю до начала конференции прошло пять заседаний технического комитета ТС-135 Всемирной организации по стандартизации ISO, в работе которых приняли участие 65 ученых из 24 стран. Впервые в работе ТС-135 участвовали украинские специалисты. Двое из них (Троицкий В. А. и Казакевич М. Л.) вошли в состав ТС-135. Самые многочисленные делегации были из Бразилии, Японии и Германии. Это было 17-е заседание ISO/ТС-135. Решения, принимаемые ISO/ТС, изучаются во всех странах и кладутся в основу континентальных (например, EN) и национальных (ДСТУ) норм.

Украинская делегация приняла участие в подготовительных и генеральных заседаниях Европейской федерации (EFNDT) и Интернационального комитета (ICNDT). Были заслушаны отчеты этих организации и представлены доклады о направлениях работы EFNDT и ICNDT. Обе международные организации вручили УО НКТД свои Membership Certificate.

На выставочных стендах было представлено 43 различных общества NDT. Интересные, информационно наполненные стенды были США (ASNT), Англии, Южно-Африканской республики, России, Чехии и др. стран. Проведен конкурс на лучший стенд, победителем которого признана ЮАР. Стенд Украины оказался одним из наиболее посещаемых, было распространено много наших книг и журналов, рекламных материалов.

