

УДК 534-16+004.42

Н.В. ЛАПИЦКАЯ, канд. техн. наук; В.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ; С.Ф. КОСТЮК
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА–ХУАНГА ПРИ АНАЛИЗЕ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ МАШИН И АГРЕГАТОВ

Рассмотрены основные методы, применяемые для анализа вибрационных сигналов, их достоинства, недостатки. Исследована возможность применения преобразования Гильберта–Хуанга для анализа нестационарных сигналов, полученных в результате вибромониторинга. Разработан программный модуль, реализующий преобразования Гильберта–Хуанга.

Ключевые слова: *вибрация, мониторинг, цифровая обработка сигналов, преобразование Фурье, вейвлет-анализ, преобразование Гильберта–Хуанга*

Введение. При диагностике дефектов машинного оборудования необходимо учитывать нелинейную интерпретацию вибрационных процессов, поскольку деградация технического состояния узлов оборудования приводит к искажениям геометрии сопряженных деталей, появлению зазоров между ними, проскальзыванию и неравномерности движения, появлению ударного возмущения, автоколебательного режим. Такое нелинейное взаимодействие узлов приводит к амплитудной и частотной модуляции вибросигнала, что проявляется в виде многочисленных, трудно интерпретируемых комбинаций частот, маскирующих основные, физически обусловленные, частоты проявления дефектов [1–3].

В настоящее время для обработки вибросигналов в большинстве случаев применяются классические методы, основанные на дискретном преобразовании Фурье.

Смысл данного преобразования заключается в том, что исходный сигнал раскладывается на синусоидальные составляющие. Основными требованиями к исследуемой системе в этом случае являются ее линейность и стационарность. Однако большинство реальных систем не удовлетворяют этим требованиям. Частично эта проблема решается спектральным преобразованием Фурье на ограниченном интервале, который получается как произведение исходного сигнала на некую оконную функцию. В простейшем случае в качестве окна выступает прямоугольная функция, принимающая нулевые значения за пределами исследуемого интервала. Однако умножение на оконную функцию приводит к внесению искажений в конечный спектр. Для минимизации данного эффекта окно часто имеет форму отличную от прямоугольной (окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана и т. д.) [4].

Оконное преобразование Фурье эквивалентно тому, что исходный сигнал делится на интервалы меньшей длины, а преобразование Фурье выполняется для каждого интервала. Это позволяет перейти к частотно-временному представлению сигнала и отследить изменение частотного спектра во времени [4].

При использовании дискретного преобразования Фурье со скользящим окном встает проблема выбора ширины окна, поскольку с уменьшением количества охватываемых окном отсчетов увеличивается временное разрешение и уменьшается частотное. Некого компромисса в этом вопросе позволяет достичь вейвлет-преобразование, которое позволяет достаточно хорошо локализовать характеристики исследуемого сигнала как по времени, так и по частоте. Суть преобразования состоит в свертке

исследуемой функции с выбранной вейвлет-функции. Выбор базисной функции во многом определяется исходными данными. [5].

Следует отметить, что практически все методы требуют выбора исходных параметров обработки (будь то ширина окна либо форма вейвлета), что в свою очередь ведет к необходимости наличия экспертных знаний и опыта в обработке сигналов в достаточно узкой области.

Преобразование Гильберта–Хуанга. В основе преобразования Гильберта–Хуанга лежит предположение о том, что любой сигнал может быть представлен как сумма колебательных процессов, каждый из которых удовлетворяет условию симметричности и некоторого остатка, представляющего собой тренд.

Реализация преобразования Гильберта–Хуанга состоит из двух этапов [6–7]:

- на первом этапе над сигналом выполняется эмпирическая модовая декомпозиция (ЭМД), в результате которой он разлагается на ряд компонент, которые называются эмпирическими модами (ЭМ),
- на втором этапе к полученному разложению применяется преобразование Гильберта.

Для реализации эмпирической модовой декомпозиции на первом шаге необходимо определить все максимальные и минимальные значения исследуемого вибросигнала $y(t)$.

На втором шаге по полученным минимальным и максимальным значениям строится верхняя и нижняя огибающие $Y_{\max_i}(t)$ и $Y_{\min_i}(t)$. Для построения огибающей на интервале между двумя экстремумами, как правило, применяется интерполяция кубическими сплайнами.

На третьем шаге вычисляется среднее значение огибающих по формуле:

$$m_1(t) = \frac{Y_{\max_i}(t) + Y_{\min_i}(t)}{2}. \quad (1)$$

На четвертом шаге определяется первое приближение к первой функции эмпирической моды сигнала $y(t)$:

$$h_1(t) = y(t) - m_1(t). \quad (2)$$

На следующей итерации, принимая вместо функции $y(t)$ функцию $h_1(t)$ и повторяя шаги с первого по четвертый, находим второе приближение к первой функции моды $h_2(t)$. Аналогичным способом находим следующие приближения к первой функции моды. Итерации продолжают до тех пор, пока нормализованная

квадратичная разность между двумя приближениями $h_{i-1}(t)$ и $h_i(t)$ не станет меньше некоторого предельного значения:

$$\alpha = \sum_{i=0}^T \left(\frac{h_{i-1}(t) - h_i(t)}{h_{i-1}(t)} \right)^2 \quad (3)$$

Последнее значение $h_i(t)$ представляет первую эмпирическую моду $c_1(t) = h_i(t)$.

Далее первая эмпирическая мода вычитается из исходного сигнала:

$$y(t) - c_1(t) = r_1(t). \quad (4)$$

Для получения второй эмпирической моды $c_2(t)$ над остатком $r_1(t)$ повторяются те же преобразования, что и для получения моды $c_1(t)$. Просуммировав полученные значения $c_i(t)$ и последний полученный остаток $r_n(t)$, который может быть трендом или постоянной составляющей сигнала, получим разложение $y(t)$ в виде

$$y(t) = \sum_{i=1}^n c_i(t) + r_n. \quad (5)$$

На практике количество итераций для нахождения очередной модовой функции чаще всего не превышает 6–8. Стоит отметить, что при разложении длинных сигнальных реализаций могут наблюдаться скачки среднеквадратичной разницы и количество итераций алгоритма может достигать нескольких десятков.

Процесс определения новых эмпирических мод может быть остановлен в следующих случаях:

- сумма модовых функций, полученная по выражению (5), отличается от исходного сигнала на величину, которая не превышает заранее установленного значения;
- остаточная функция $r_n(t)$ становится монотонной функцией без экстремумов;
- величина остатка незначительна в сравнении с исходным сигналом.

После разложения исходного сигнала на эмпирические моды выполняется второй этап преобразования: для каждой моды можно найти преобразование Гильберта [3]:

$$H[c_i(t)] = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{c_i(\tau)}{t - \tau} d\tau. \quad (6)$$

Так как $c_i(t)$ и $H[c_i(t)]$ образуют комплексно-сопряженную пару аналитического сигнала $z_i(t)$, его можно представить в виде:

$$z_i(t) = c_i(t) + jH[c_i(t)] = A_i(t) * e^{j\varphi(t)}. \quad (7)$$

Амплитуду сигнала можно представить в виде:

$$A(t) = \sqrt{c_i^2(t) + H^2[c_i(t)]}. \quad (8)$$

Фаза сигнала определяется формулой

$$\varphi(t) = \arctg \frac{H[c_i(t)]}{c_i(t)}. \quad (9)$$

Мгновенная частота может быть определена по формуле:

$$f_i(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (10)$$

Преобразование Гильберта позволяет разделить модулирующие функции $A(t)$ и $f(t)$, т. е. получить временные реализации амплитудной и частотной огибающих и осуществить амплитудную и частотную демодуляцию [8].

Основными информативными признаками преобразования Гильберта–Хуанга являются амплитуда, мгновенная частота и фаза ЭМ, получаемые в результате эмпирической модовой декомпозиции исходного сигнала.

Исследование математической модели модулированного колебания. Для оценки эффективности применения преобразования Гильберта–Хуанга была исследована модель амплитудно-частотно модулированного сигнала, который в общем случае можно задать формулой [9]:

$$x(t) = A_0 [1 + M \sin(\omega_1 t)] \cos[\omega_0 t + m \sin(\Omega t)], \quad (11)$$

где ω_0 , ω_1 и Ω — частоты несущего, амплитудно- и частотно-модулирующих сигналов; M и m — коэффициенты амплитудной и частотной модуляции.

Коэффициенты амплитудной и частотной модуляции определяется по формулам:

$$M = \frac{A_M}{A_0}; \quad (12)$$

$$m = \frac{\omega_d}{\Omega}, \quad (13)$$

где A_M и A_0 — частоты модулирующего и несущего колебаний; ω_d — отклонение несущей частоты ω_0 от среднего значения.

На основании (11) была выбрана модель:

$$x(t) = [1 + 0,3 \sin(2\pi 10t)] \cos[2\pi 100t + 0,6 \sin(2\pi 50t)] + \sin(2\pi 400). \quad (14)$$

Сигнал представляет собой сумму модулированной несущей с частотой 100 Гц и колебания с частотой 400 Гц. Амплитуда и частота несущей были промодулированы сигналами с частотами 10 Гц (амплитудная модуляция) и 50 Гц (частотная модуляция). Согласно (13) отклонение частоты несущей составит $f_d = \pm 30$ Гц и ее значение должно изменяться в диапазоне:

$$70 \text{ Гц} \leq f_d \leq 130 \text{ Гц}. \quad (15)$$

Такой же диапазон изменения частоты можно рассчитать, если продифференцировать значение фазы несущей в соответствии с (10).

Амплитуда несущей изменяется в пределах:

$$0,7 \leq (1 + 0,3 \sin(2\pi 10t)) \leq 1,3. \quad (16)$$

Анализируя разложения исходного сигнала (рисунки 1 а) на эмпирические моды (см. рисунок 1 б–д), можно отметить, что модовые функции с меньшим номером содержат гармоники с большей частотой.

Третья ЭМ (см. рисунок 1 е) имеет постоянный, близкий к нулю уровень, поэтому дальнейшее разложение теряет смысл.

Анализ спектра Гильберта показывает, что нулевая мода (рисунок 2 а) представляет собой колебание с постоянной частотой 400 Гц, что соответствует второму слагаемому формулы (14).

Частота первой моды (см. рисунок 2 б) изменяется в диапазоне от 70 до 130 Гц, с центром 100 Гц, что соответствует формуле (15). Период изменения частоты составляет около 0,02 с.

Можно заметить, что амплитуда нулевой моды (рисунок 3 а) имеет практически постоянное значение во времени, а амплитуда второй моды (см. рисунок 3 б) изменяется в пределах от 0,7 до 1,3, что соответствует формуле (16). Период изменения амплитуды составляет около 0,1 с, что соответствует частоте 10 Гц. В то же время частотный диапазон Фурье спектра не соответствует формуле (15), так как частоты 50 и 150 Гц лежат за пределами изменениями частоты реального сигнала.

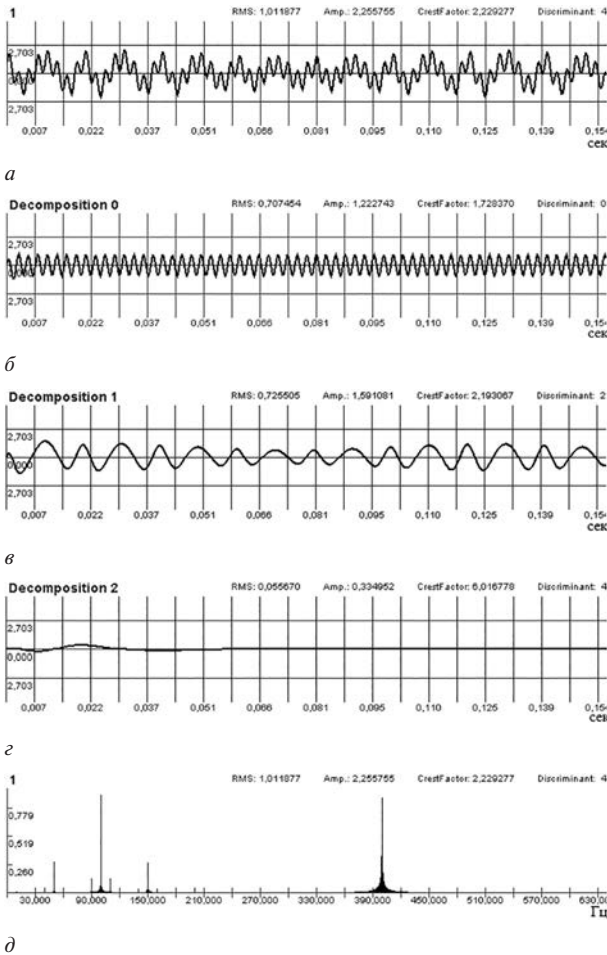


Рисунок 1 — Пример разложение на эмпирические моды:
a — исходный сигнал; *б–д* — полученные эмпирические моды; *д* — спектр Фурье исходного сигнала



Рисунок 2 — Спектр Гильберта для первой (*a*) и второй (*б*) моды в герцах

Таким образом, можно сделать вывод, что преобразование Гильберта–Хуанга позволяет устранить «фиктивные» гармонические колебания, которые присутствуют в спектре Фурье при анализе нелинейных и нестационарных процессов.

Экспериментальные исследования. В качестве инструмента исследований использовался разработанный программный модуль, реализующий преобразование Гильберта–Хуанга. Данный модуль включен в состав контрольно-измерительного комплекса «Тембр».

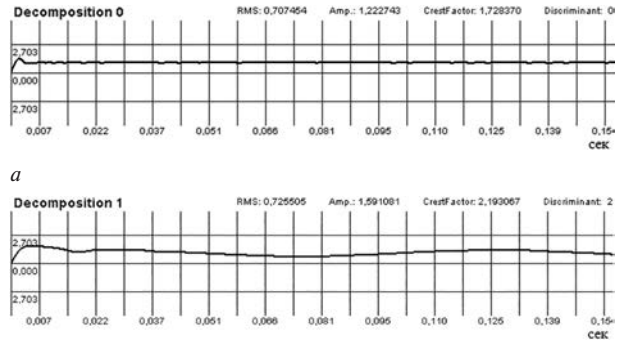


Рисунок 3 — Звисмость амплитуды нулевой (*a*) и первой (*б*) мод от времени

Анализ вибрационных сигналов механизмов роторного типа, в которых используется вращательное движение, показал, что они содержат периодическую компоненту, состоящую из гармоник, кратных частоте вращения, и некоторую шумоподобную составляющую. При этом предполагается, что изменения параметров периодической составляющей — есть следствие достаточно существенного изменения технического состояния объекта, а локальные изменения шумоподобной составляющей — это проявление зарождающихся дефектов. Поэтому с целью более детального исследования, исходный вибросигнал разделяют на периодическую и шумоподобную составляющие [10].

При наблюдении и анализе вибрационного сигнала на достаточно длительном временном интервале можно выявить некоторые аномальные явления, которые сложно проявляются в спектре Фурье. Так, при анализе вибросигнала с электродвигателя исследовательской установки (рисунок 4 *a*) были выявлены кратковременные возмущения.

Разложение вибросигнала на периодическую и шумоподобную составляющие (см. рисунок 4 *б, в*) позволяют предварительно локализовать кратковременные возмущения. Для повышения обнаруживающей способности возникающих возмущений и их более детального анализа наиболее часто применяется вейвлет-преобразование шумоподобной составляющей [5].

Для эксперимента в качестве преобразующего вейвлета был выбран вейвлет Морле (рисунок 5 *a*). Центральные частоты преобразования последовательно выбирались из ряда 2000, 2150, 2300 Гц, при этом максимальные значения амплитуды сигнала, полученные после вейвлет-преобразования, для каждой из центральных частот составили 4,8; 7,3; 5,1 соответственно.

Как видно (см. рисунок 5 *б–г*), наиболее оптимальной из выбранных частотой для вейвлет-преобразования является частота 2150 Гц.

Основными проблемами использования вейвлет-преобразования является выбор типа вейвлета и центральной частоты его частотной характеристики [5].

В качестве альтернативного способа локализации и анализа кратковременных возмущений к исходному сигналу было применено преобразование Гильберта–Хуанга. Из разложения исходного сигнала (рисунок 6 *a*) на две эмпирические моды (см. рисунок 6 *б, в*) видно, что кратковременные возмущения проявляются в нулевой моде на временном отрезке 11,585–11,588 с.

Анализ частоты нулевой моды от времени (рисунок 7 *a*) показал, что на участке 11,685–11,688 с из-

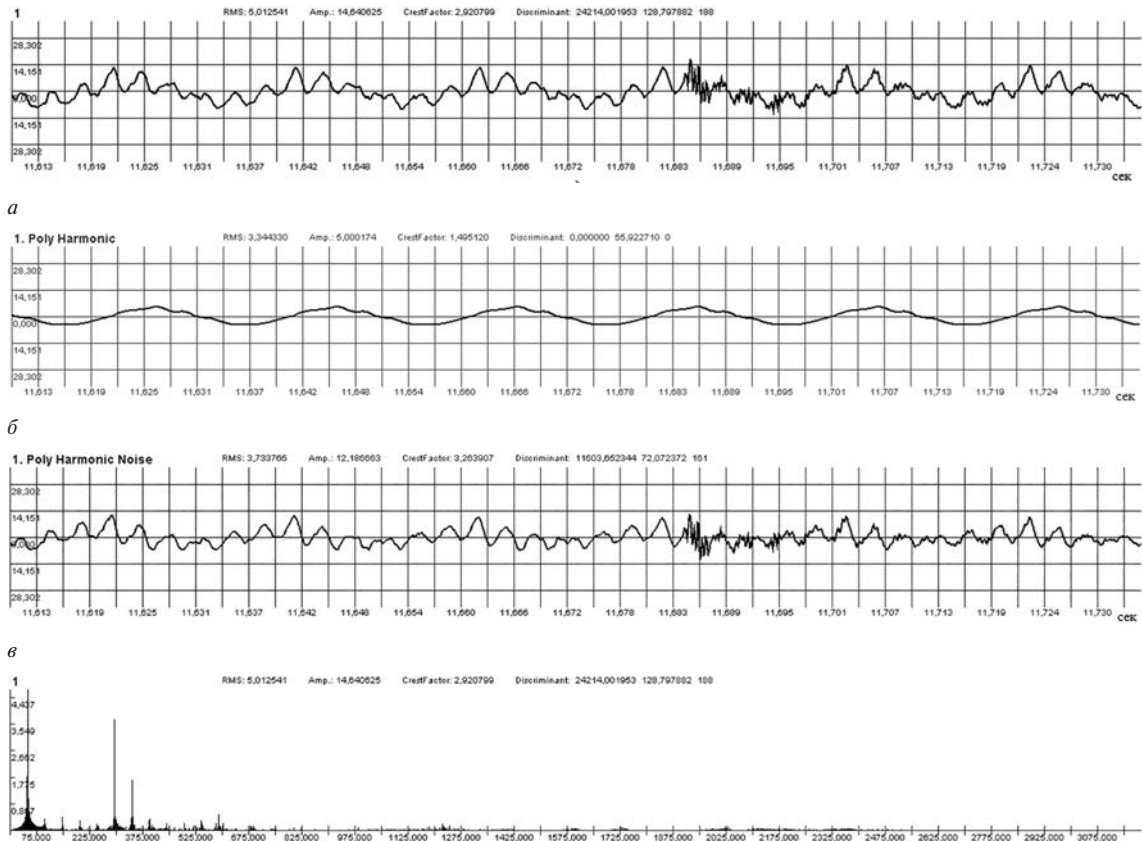


Рисунок 4 — Разложение исходного сигнала (а) на периодическую (б) и шумоподобную (в) составляющие и его спектр Фурье (з)

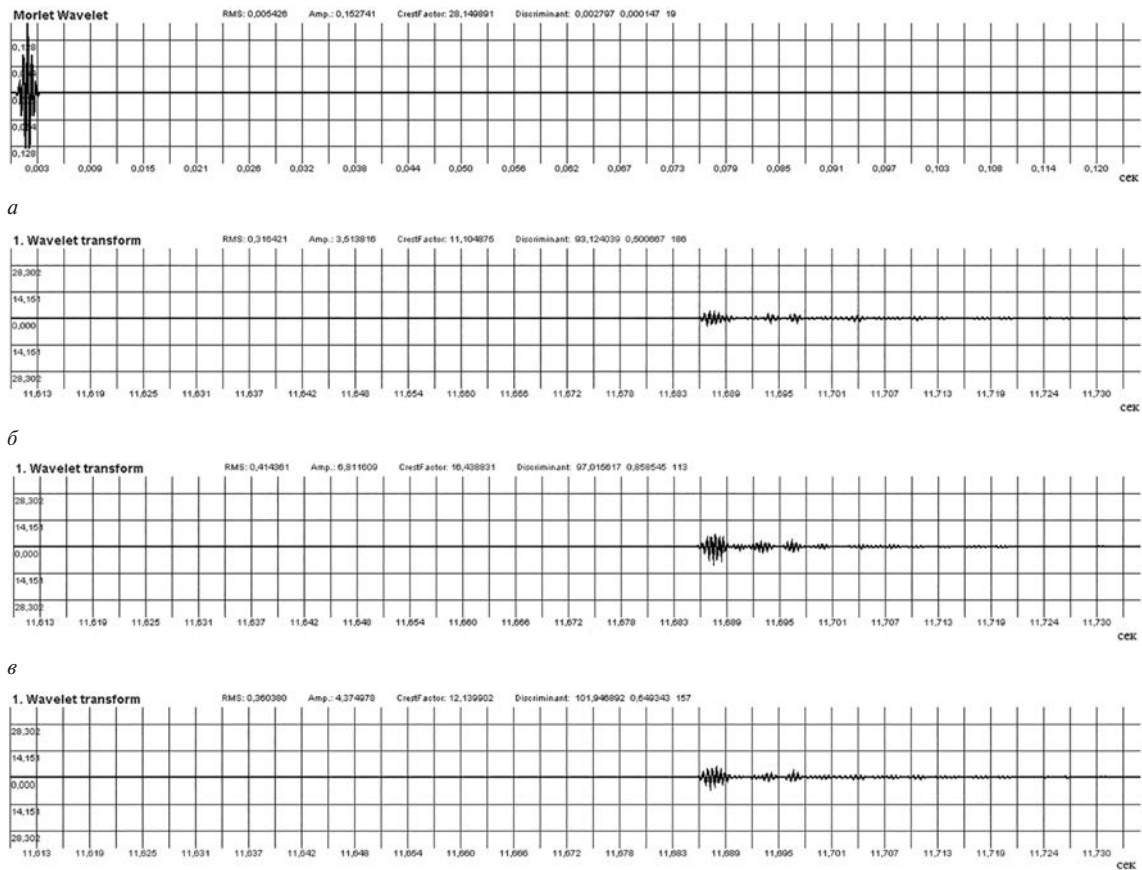


Рисунок 5 — Результаты преобразования базового вейвлета Морле (а) и сигнала на центральной частоте 2000 (б), 2150 (в), 2300 Гц (з)

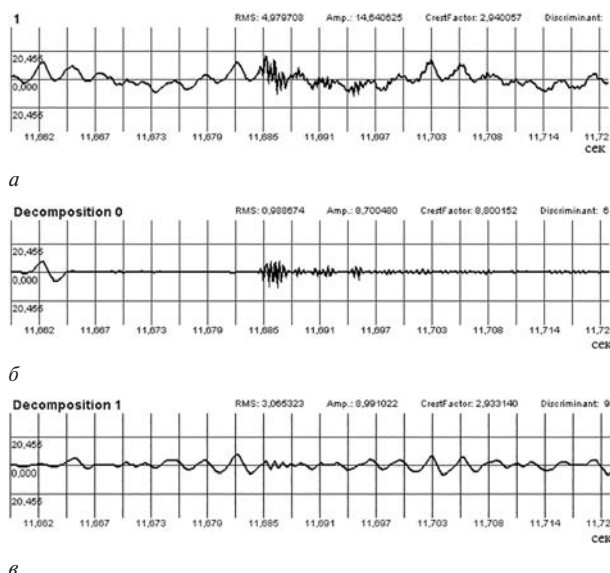


Рисунок 6 — Разложение шумоподобного сигнала (а) на нулевую (б) и первую (в) эмпирические моды

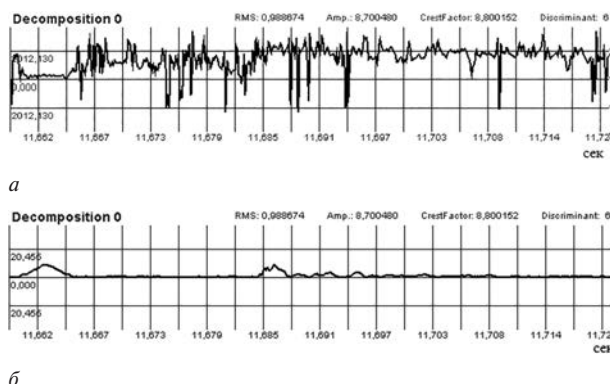


Рисунок 7 — Зависимость частоты (а) и амплитуды (б) нулевой эмпирической моды от времени

менение мгновенной частоты составляет приблизительно 1620–2660 Гц.

Таким образом, можно отметить, что средняя мгновенная частота сигнала составляет около 2145 Гц, что практически совпадает с центральной частотой вейвлет-преобразования Морле.

Выводы. Результаты моделирования и экспериментальных исследований показали, что:

- в отличие от большинства классических подходов цифровой обработки сигналов, преобразование Гильберта–Хуанга не требует для своей реализации выбора функционального базиса разложения, он формируется из самих данных;
- преобразование Гильберта–Хуанга может быть использовано для анализа вибрационных сигналов различной природы и исследования нелинейных, нестационарных систем;
- преобразование Гильберта–Хуанга имеет хорошее разрешение по частоте и времени, что позволяет достаточно точно определять частотный спектр и момент появления или исчезновения определенных частот.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль: справ.: в 7 т. — Т. 7: Вибродиагностика / Ф.Я. Балицкий [и др.] // М.: Машиностроение, 2005. — 829 с.
2. Бранцевич, П.Ю. Проблемы вибрации, виброналдки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций / П.Ю. Бранцевич // Сб. докл. — М.: ОАО «ВТИ», 2005. — С. 115–121.
3. Соколова, А.С. Анализ параметров модулированных вибрационных процессов и их огибающих по результатам имитационного моделирования / А.С. Соколова, Ф.Я. Балицкий, Г.В. Долаберидзе // Вестн. науч.-техн. развития. — 2014. — № 8(84). — С. 39–53.
4. Лайонс, Р. Цифровая обработка сигналов / Р. Лайонс. — М.: Бинум, 2006. — 656 с.
5. Бранцевич, П.Ю. Применение вейвлетов при анализе вибрационного состояния механизмов и агрегатов / П.Ю. Бранцевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: С.Н. Поддубко [и др.]. — 2014. — Вып.3. — С. 220–228.
6. Алимуратов, А.К. Повышение точности измерения частоты основного тона на основе оптимизации процесса декомпозиции речевых сигналов на эмпирические моды / А.К. Алимуратов, Ю.С. Квитка // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. — 2018. — № 4(26). — С. 53–65.
7. Кан, Ш.Ч. Анализ нестационарных сигналов на основе преобразования Гильберта–Хуанга / Ш.Ч. Кан, А.В. Микулович, В.И. Микулович // Информатика. — 2010. — № 2. — С. 36–47.
8. Feldman, M. Hilbert Transformation Application in Mechanical Vibration // M. Feldman. — A John Wiley and sons, Ltd Publication, 2011. — 292 p.
9. Баскаков, С.И. Радиотехнические цепи и сигналы / С.И. Баскаков. — М.: Высш. шк., 1992. — 291 с.
10. Бранцевич, П.Ю. Способ анализа вибрационных сигналов при исследовании технического состояния механизмов / П.Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT–2012): сб. ст. II Междунар. заочной науч.-техн. конф. / Поволжский гос. ун-т сервиса. — Тольятти, 2012. — Ч. 1. — С. 244–250.

Lapitskaya N.V., Levantsevich V.A., Kostjuk S.A.

Application of Hilbert–Huang transform in analysis of vibration signals of machines and units

The article considers main methods used to analyze vibration signals, their advantages and disadvantages. The possibility of using the Hilbert–Huang transform is studied for the analysis of non-stationary signals obtained as a result of vibration monitoring. A software module is developed that implements the Hilbert–Huang transforms.

Поступила в редакцию 12.08.2020.