

ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ГИЛЬБЕРТА-ХУАНГА В КОМПЬЮТЕРНОМ ВИБРАЦИОННОМ МОНИТОРИНГЕ

Д. В. МЕЛЕЩЕНЯ, П.Ю. БРАНЦЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
П. Бровка, 6, Минск, 220013, Беларусь*

Аннотация. Рассмотрены основные методы, применяемые в системах вибрационного контроля, их достоинства, недостатки и область применения. Предложено применение преобразования Гильберта-Хуанга для анализа нестационарных и нелинейных сигналов, получаемых системами вибромониторинга. Разработано программное средство, выполняющее декомпозицию сигнала на внутренние модовые функции, представлен пример исследования реального вибрационного сигнала.

Ключевые слова: вибрация, контроль, мониторинг, цифровая обработка сигналов, преобразование Фурье, Вейвлет-анализ, преобразование Гильберта-Хуанга.

Abstract. The main methods which are used in vibration control, their advantages, disadvantages and application areas are considered. The Hilbert-Huang transformation is considered in the context of its application to the analysis of non-stationary and nonlinear signals. The software tool that decomposes the signal into intrinsic mode functions is implemented and real vibration signals are investigated.

Keywords: vibration, monitoring, digital signal processing, Fourier transform, wavelet analysis, Hilbert-Huang transformation.

Введение

На предприятиях энергетики, газового хозяйства, нефтехимии, машиностроения и других отраслей эксплуатируется большое количество механизмов, агрегатов и устройств с вращательным движением. Состояние таких машин характеризуется параметрами колебательных процессов, происходящим внутри них и эффективно оценивается средствами виброакустической диагностики. Однако при этом встает вопрос выбора и формирования набора информационных признаков, которые будут отображать действительное техническое состояние исследуемого объекта [1-4].

На практике одним из самых популярных путей решения этой задачи является получение спектрального состава исследуемого сигнала. Для этого к исходному сигналу применяют дискретное преобразование Фурье (ДПФ), суть которого заключается в том, исходный сигнал отображается в частотный спектр. Ключевыми требованиями к исследуемой системе в этом случае являются ее линейность и стационарность. Однако большинство задач, связанных с цифровой обработкой, не позволяют исследовать сигнал на бесконечном интервале поскольку нет никаких данных о нем до начала измерений и в будущем. Частично эта проблема решается, если интерпретировать ограничение интервала, 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 определенных искажений в конечный спектр. Для минимизации некоторых эффектов прямоугольного окна, иногда применяют окна колоколоподобной формы (окна Ханна, Хэмминга, Блэкмана и т.д.) [5].

Также следует отметить, что исследуемая система не обязательно работает в установленном режиме, что обуславливает нестационарность анализируемых данных. Преобразование Фурье в данном случае не дает представления о локальных свойствах исследуемой функции, поскольку сигналы, в которых появляются и исчезают гармоники, будут представлены так, будто эти составляющие присутствуют на всем протяжении сигнала. Эти проблемы могут быть частично

решены, если размер оконной функции будет выбран таким образом, чтобы часть сигнала, покрываемая окном, была максимально близка к стационарной, а оконная функция при этом продвигается во времени по сигналу. По сути это 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 [6, 7].

При использовании ДПФ со скользящим окном встает проблема выбора ширины окна поскольку с уменьшением количества охватываемых окном отсчетов увеличивается временное разрешение и уменьшается частотное. Компромисса 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-функцией. Выбор базисной функции во многом определяется исходными данными [8, 9].

Еще одним подходом в исследовании сигналов является преобразование Вигнера-Вилля, которое применяется не к сигналу, а к комплексной функции, в которой действительная часть представлена компонентами исходного сигнала, а мнимая его преобразованием Гильберта. Преобразование в чистом виде обладает серьезным недостатком – интерференцией, возникающей между двумя точками в частотно-временной области. Для минимизации этого эффекта используют наложение временных окон, подобно с тем как это делается в преобразовании Фурье со скользящим окном. Этот метод получил название – псевдо-преобразование Вигнера-Вилля [5, 10].

Преобразование Гильберта-Хуанга

Преобразование Гильберта-Хуанга (Hilbert-Huang transformation, ННТ) не требует выбора функционального базиса разложения и может применяться для исследования нелинейных нестационарных систем. Достоинством преобразования Гильберта-Хуанга также является хорошее разрешение по частоте и времени.

Преобразование Гильберта-Хуанга выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется эмпирическая модовая декомпозиция, а затем к полученному на первом шаге разложению применяется преобразование Гильберта.

В случае применения ННТ, в качестве информативных признаков, характеризующих сигнал, выступают мгновенные амплитуда, частота и фаза, для вычисления которых используются сигнал, сопряженный по Гильберту с исходным. Чтобы преобразование Гильберта давало корректный результат, необходима симметричность исследуемой функции относительно нулевого уровня. Это условие не всегда может быть выполнимо применительно к реальным сигналам из-за наличия в них постоянной составляющей или тренда.

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. Задача состоит в нахождении этого разложения. Этот процесс получил название эмпирическая модовая декомпозиция (empirical mode decomposition, EMD).

Декомпозиция на модовые функции – итеративная процедура, ставящая в соответствие исходному сигналу набор эмпирических мод (intrinsic mode functions, IMF).). В классическом определении, данном Хуангом, IMF представляет функцию, удовлетворяющую следующим двум условиям:

- на всем наборе данных количество пересечений оси абсцисс и экстремумов должно быть равно или отличаться на единицу;
- в любой точке среднее значение огибающих определяемых максимумами и минимумами должно быть равным нулю.

В результате разложения сигнал $x(t)$ может быть представлен выражением (1):

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

где $c_i(t)$ – модовые функции, $r(t)$ – остаточный тренд или постоянная составляющая.

Фактически алгоритм модовой декомпозиции, или просеивания, сводится к следующему. В исходном сигнале выделяются локальные экстремумы – минимумы и максимумы. По полученным точкам строится верхняя (по максимумам) и нижняя (по минимумам) огибающие. Для нахождения значений огибающей на интервале между двумя соседними экстремумами чаще всего применяется интерполяция кубическими сплайнами.

В качестве интерполяционного может использоваться сплайн Катмула-Рома [11]. Суть метода заключается в том, что для каждого интервала исходной функции находится свой полином, описывающий кривую на данном участке. При этом значение в некоторой точке произвольного интервала определяется по следующей формуле (2):

$$p(x) = h_{00}(t)p_k + h_{01}(t)p(x_{k+1} - x_k)m_k + h_{01}(t)p_{k+1} + h_{11}(t)(x_{k+1} - x_k)m_{k+1},$$

где

$$t = (x - x_k) / (x_{k+1} - x_k), \quad (2)$$

$$m_n = (p_{n+1} - p_{n-1}) / (t_{n+1} - t_{n-1}),$$

$h_{00}, h_{01}, h_{10}, h_{11}$ – базисные функции Эрмита.

Преимущество этого метода заключается в том, что коэффициенты интерполирующего полинома на интервале не зависят от значений на других интервалах, что позволяет выполнять интерполяцию параллельно.

После того, как получены огибающие вычисляется функция средних значений между ними (3):

$$m_i(t) = \frac{u_i(t) + v_i(t)}{2}, \quad (3)$$

где u_i и v_i – верхняя и нижняя огибающие.

Полученная функция вычитается из исходного сигнала (4), давая в результате первое приближение к IMF:

$$h_i(t) = y_i - m_i(t). \quad (4)$$

Далее процесс повторяется до тех пор, пока нормализованная квадратичная разность между двумя приближениями не станет меньше некоего заданного предела (5):

$$\partial > \sum_t (h_{i-1}(t) - h_i(t))^2 / h_{i-1}^2(t). \quad (5)$$

Очередная найденная IMF вычитается из исходного сигнала и описанные действия продельваются над остатком. Критериев полагать, что все компоненты сигнала найдены может быть несколько:

- 1) остаток представляет собой монотонную функцию, т.е. не содержит экстремумов;
- 2) сумма модовых функций, которая по сути представляет собой реконструированный сигнал, отличается от исходного сигнала на величину не превышающую некоего предварительно установленного предела;
- 3) величина остатка незначительна в сравнении с исходным сигналом [12-16].

Разложение вибрационного сигнала на внутренние модовые функции

Основная задача вибрационного анализа – выделение информационных признаков в исходном сигнале и выявление аномалий в результате мониторинга. В преобразовании Гильберта-Хуанга такими признаками выступают мгновенные частота, фаза и амплитуда внутренних модовых функций, или параметры этих модовых функций, рассматриваемых как составляющие вибрационного сигнала. Поскольку исходный сигнал состоит из совокупности мод, информация, характеризующая сигнал, распределяется по всему набору модовых

функций. На рисунке 1 изображен исходный сигнал, полученный в ходе исследования вибрационного состояния турбоагрегата, и результат его разложения на модовые функции (IMF1-6).

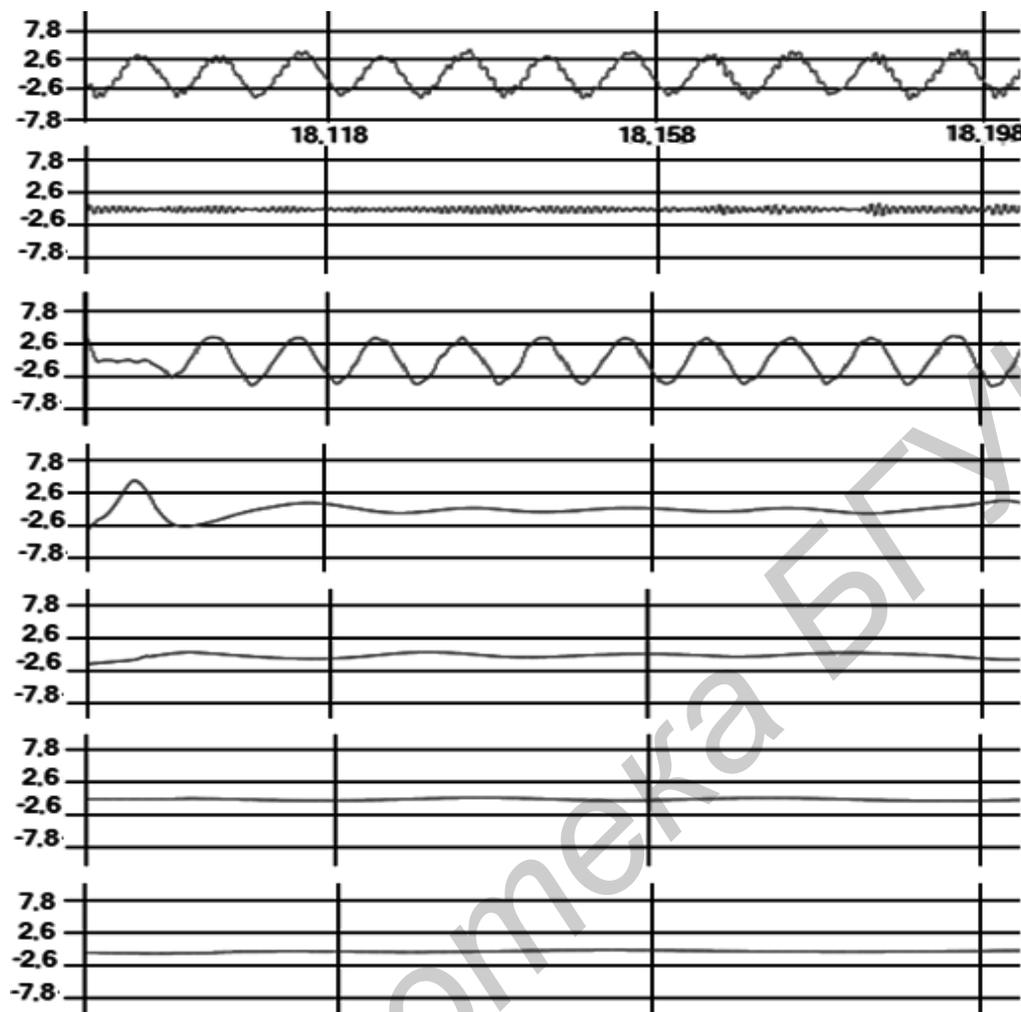


Рис. 1 – Пример разложения исходного сигнала на эмпирические модовые функции (По оси ординат амплитуда (m/s^2), по оси абсцисс – время в секундах)

Критерием остановки процесса просеивания в данном случае выступает разностная функция, получаемая после вычитания очередной моды из сигнала. В момент, когда результат вычитания представляет собой монотонную функцию, так что построение огибающих не представляется возможным, разложение считается завершенным. На рисунке 2 представлена функция, полученная путем суммирования всех модовых функций разложения и остаточного тренда, практически повторяющая форму исходного сигнала.

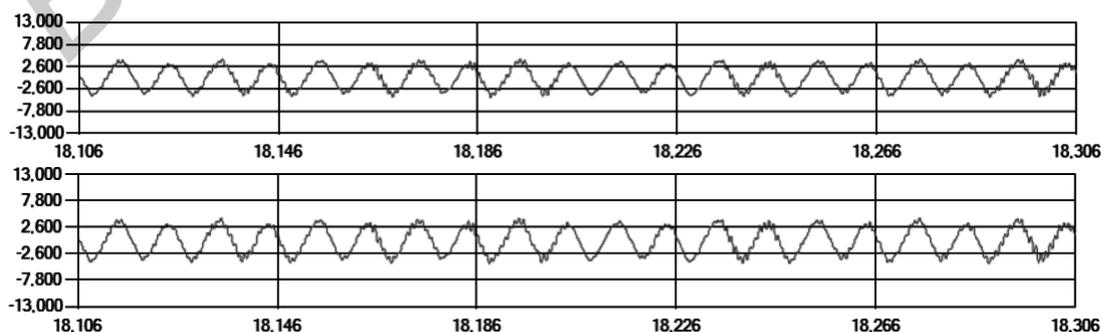


Рис. 2 – Исходный сигнал (верхний график) и сигнал полученный суммированием эмпирических мод (По оси ординат амплитуда (m/s^2), по оси абсцисс – время в секундах)

Как видно из рисунка 3, модовые функции с меньшим номером содержат гармоники с большей частотой, а с ростом номера частотный спектр смещается в область низких частот.

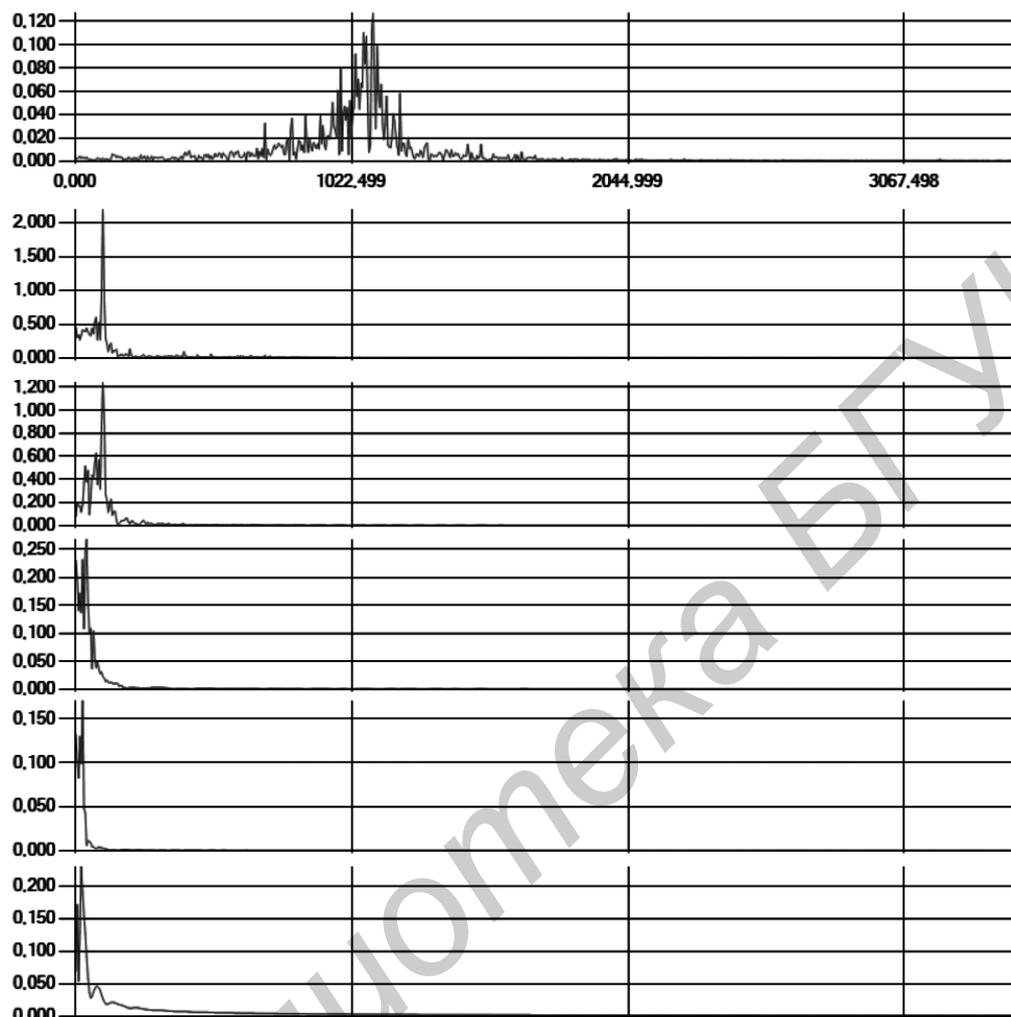


Рис. 3 – Спектральный состав внутренних модовых функций (По оси ординат амплитуда (m/s^2), по оси абсцисс – частота в герцах)

При этом нельзя говорить о какой-либо закономерности в избирательности частот определённой модой, поскольку в случае с эмпирической модовой декомпозицией любая частота может быть размазана по всему разложению. Так, к примеру, гармоника с частотой 100 Гц четко видна в спектре как первой, так и второй и третьей моды, однако амплитуда ее меньше чем в спектре исходного сигнала.

Для построения эмпирической модовой декомпозиции и ее исследования было разработано программное средство, позволяющее обрабатывать сигналы, получаемые измерительно-вычислительными комплексами «Тембр» и «Тембр-М» в ходе экспериментальных исследований механических колебаний механизмов, агрегатов, конструкций [17-18]. Программа позволяет осуществлять следующие действия:

- оконное преобразование Фурье;
- разложение исходного сигнала на внутренние модовые функции;
- визуализировать сигнал, его разложение на моды;
- отображать частотные спектры как исходной, так и модовых функций.

Особенностью реализации алгоритма эмпирической модовой декомпозиции является то, что в качестве критерия останова поиска очередной модовой функции наряду с вычисление квадратичной разницы установлен предел количества итераций. Для длинных и сложных сигналов это позволяет избежать трудоемких вычислений без существенного ухудшения качества отсеивания.

Заключение

Преобразование Гильберта-Хуанга может использоваться для анализа нелинейных и нестационарных данных. Отсутствие необходимости выбора базиса разложения и его исходных параметров позволяют применять его для достаточно широкого круга задач, где целесообразно представление сложного исследуемого сигнала в виде композиции более простых составляющих. Метод позволяет получить новые типы информативных признаков, характеризующих вибрационный сигнал. Разработанное программное средство, позволяет выполнять разложение на внутренние модовые функции сигналов, полученных с помощью комплексов «Тембр» и «Тембр-М», или сигналов, которые имеют аналогичный формат данных. Архитектура программы построена таким образом, что обработка сигнала может распределяться по нескольким вычислительным узлам. Это особенно актуально, если необходимо исследовать сигналы, длительность от нескольких десятков минут до суточных временных интервалов, поскольку преобразование Гильберта-Хуанга представляет собой достаточно ресурсоемкую задачу.

Список литературы

- Клюев В.В. // Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика. М., 2005.
- Бранцевич, П.Ю. // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – с. 5-10.
- Бранцевич П.Ю., Базаревский В.Э., Костюк С.Ф. // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике. Минск. 26–28 окт. 2011г. Т. II. С. 27-31.
- Бранцевич П.Ю. // Проблемы вибрации, виброналадки, вибромониторинга и диагностики оборудования электрических станций. Сб. докл. Москва, ОАО «ВТИ», 2005. С. 115–121.
- Марпл С.Л. // Цифровой спектральный анализ. М., 1990.
- Оппенгейм А., Шаффер Р. // Цифровая обработка сигналов. Москва: Техносфера. 2006.
- Лайонс Р. // Цифровая обработка сигналов. Москва: Бином. 2006.
- Daniel T.L. Lee // Wavelet Analysis: Theory and Applications. Hewlett-Packard Journal. 1994.
- Chang S. G., Yu B. // Image Processing. Vetterli: IEEE Trans. 2000.
- Wigner E. // On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Physical Review. 1932.
- Роджерс Д., Адамс Дж. // Математические основы машинной графики. М.: Мир, 2001.
- Huang E., Samuel S.P // The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing.
- Huang E., Shen Z., Long S. R. // The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
- Huang E. // An Introduction to Hilbert-Huang Transform: A Plea for Adaptive Data Analysis. Research Center for Adaptive Data Analysis.
- Quek, S., Tua, P., and Wang, Q. // Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert-Huang transform of real signals. Smart Materials and Structures 12, 2003, pp. 447-460.
- Давыдов В.А., Давыдов А.В. // Очистка геофизических данных от шумов с использованием преобразования Гильберта-Хуанга. Электронное научное издание "Актуальные инновационные исследования: наука и практика". 2010, № 1.
- Бранцевич П.Ю., Костюк С.Ф. // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. Минск. Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. С. 67-74.
- Бранцевич П.Ю., Базылев Е.Н., Костюк С.Ф. // Современные методы и приборы контроля качества и диагностики состояния объектов: сб. ст. 6-й Междунар. науч.-техн. конф. Могилев, Белорус. -Рос. ун-т, 2017. С. 418-423.

References

- Klyuyev V.V. // Nerazrushayushchiy kontrol'. Spravochnik. Tom 7. Kniga 2. Vibrodiagnostika. M., 2005.
- Brantsevich, P.YU. // Doklady BGUIR. – 2015. – № 7 (93). – с. 5-10.
- Brantsevich P.YU., Bazarevskiy V.E., Kostyuk S.F. // Mekhanika 2011: sb. nauch. tr. V Belorusskogo kongressa po teoret. i prikladnoy mekhanike. Minsk. 26–28 okt. 2011g. T. II. С. 27-31.
- Brantsevich P.YU. // Problemy vibratsii, vibronaladki, vibromonitoringa i diagnostiki oborudovaniya elektricheskikh stantsiy. Sb. dokl. Moskva, ОАО «ВТИ», 2005. S. 115–121.
- Marpl S.L. // Tsifrovoy spektral'nyy analiz. M., 1990.
- Oppengeym A., Shaffer R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva: Tekhnosfera. 2006.

- Layons R. // Tsifrovaya obrabotka signalov. Moskva: Binom. 2006.
- Daniel T.L. Lee // Wavelet Analysis: Theory and Applications. Hewlett-Packard Journal. 1994.
- Chang S. G., Yu B. // Image Processing. Vetterli: IEEE Trans. 2000.
- Wigner E. // On the quantum correction for thermodynamic equilibrium. Physical Review. 1932.
- Rodzhe D., Adams Dzh. // Matematicheskiye osnovy mashinnoy grafiki. M.: Mir, 2001.
- Huang E., Samuel S.P // The Hilbert-Huang transform and its applications. World Scientific Publishing.
- Huang E., Shen Z., Long S. R. // The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. Proceedings of R. Soc. London, Ser. A, 454, pp. 903-995, 1998.
- Huang E. // An Introduction to Hilbert-Huang Transform: A Plea for Adaptive Data Analysis. Research Center for Adaptive Data Analysis.
- Quek, S., Tua, P., and Wang, Q. // Detecting anomalies in beams and plate based on the Hilbert-Huang transform of real signals. Smart Materials and Structures 12, 2003, pp. 447-460.
- Davydov V.A., Davydov A.V. // Ochistka geofizicheskikh dannykh ot shumov s ispol'zovaniyem preobrazovaniya Gil'berta-Khuanga. Elektronnoye nauchnoye izdaniye "Aktual'nyye innovatsionnyye issledovaniya: nauka i praktika". 2010, № 1.
- Brantsevich P.YU., Kostyuk S.F. // Dostizheniya fiziki nerazrushayushchego kontrol: sb. nauchn. tr. Minsk. Institut prikladnoy fiziki NAN Belarusi, 2013. S. 67-74.
- Brantsevich P.YU., Bazylev Ye.N., Kostyuk S.F. // Sovremennyye metody i pribory kontrolya kachestva i diagnostiki sostoyaniya ob'yektov: sb. st. 6-y Mezhdunar. nauch. -tekhn. konf. Mogilev, Belarus. -Ros. un-t, 2017. S. 418-423.

Сведения об авторах

Мелешеня Д.В., аспирант кафедры ПОИТ
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники.

Бранцевич П.Ю., к.т.н., доцент, доцент кафедры
ПОИТ Белорусского государственного
университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-81;
e-mail: branc@bsuir.edu.by
Бранцевич Петр Юльевич

Information about the authors

D.U. Meliashchenya, PG student of the software for
information technologies department of Belarusian
state university of informatics and radioelectronics.

P.J. Brancevich, PhD, associate professor, associate
professor the software for information technologies
department of Belarusian state university of
informatics and radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian state university
of informatics and radioelectronics
tel. +375-17-293-88-81;
e-mail: branc@bsuir.edu.by
Brancevich Petr Julianovich