



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-101-108>

Оригинальная статья  
Original paper

УДК 681.5.09

## ИНТЕЛЛЕКТНАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ВЕЙВЛЕТ-АНАЛИЗА ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

ГУЛАЙ А.В., ЗАЙЦЕВ В.М.

*Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 25 сентября 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** При решении инженерных задач динамики машин часто возникает необходимость выявления гармонических составляющих акустических колебаний в узком временном строе. Это требует привлечения методов вейвлет-преобразования колебаний и введения интеллектуальных систем в состав используемых в эксперименте аппаратно-программных средств. Вейвлет рассматривается как короткое по продолжительности во времени сигнальное функциональное окно, которое имеет внутреннее строение в виде затухающего волнообразного всплеска и характеризуется масштабом отображения определенных событий в области частотного спектра сигнала, а также сдвигами по оси времени. В качестве вейвлет-функций используются вещественные непрерывные функции вещественных аргументов (вейвлеты Добеши, Гауссовы вейвлеты, МНат-вейвлеты), комплекснозначные функции вещественных аргументов (вейвлеты Морле и Пауля), а также вещественные дискретные функции (ХААРТ- и FНат-вейвлеты). Изложен метод вейвлет-анализа вибрационных сигналов при акустической диагностике машин и механизмов. Математической основой алгоритма обработки вибросигналов является цифровая реализация дискретных отсчетов вейвлетов с последующей визуализацией результатов в виде скейлотонов. Инженерный анализ и реконструкцию сигналов предложено выполнять путем реализации дискретизированных по аргументам прямого и обратного непрерывных вейвлет-преобразований. Рассмотрена структурно-функциональная схема многоканальной системы интеллектуального вейвлет-анализа вибрационных сигналов в машинах. Интеллектуальная система для исследования вибросигналов позволяет формировать совокупность фактографических параметров при расчете скейлотонов по вейвлет-функциям. Приведен пример экспериментальной реализации метода вейвлет-преобразования параметров вибрационных сигналов. Представлены результаты расчета скейлотонов при использовании МНат-вейвлета и DOG-вейвлета.

**Ключевые слова:** интеллектуальная технология, сенсорный контроль, вибрационный сигнал, вейвлет-анализ.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Гулай А.В., Зайцев В.М. Интеллектуальная технология вейвлет-анализа вибрационных сигналов. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 101-108.

## INTELLIGENT TECHNOLOGY OF WAVELET ANALYSIS OF VIBRATION SIGNALS

ANATOLY V. GULAI, VLADIMIR M. ZAITSEV

*Belarusian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus*

*Submitted 25 September 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract.** During solution of engineering problems of machinery dynamics a need of revealing the harmonic components often arises in the narrow timing gate. This requires the use of wavelet-transformation oscillation methods and introduction of intelligent systems to hardware and software used in the experiment. The wavelet is considered as a short in time signal functional window, which has its internal structure in the form of a fading wavelike burst, and it is characterized by a scale of display of certain events in the field of the signal frequency spectrum, as well as and by time axis shifts. Complex-functioned continuous functions of real arguments (Daubechies wavelets, Gaussian wavelets, MHat-wavelets), complex-valued functions of real arguments (Morlet and Paul wavelets), as well as real discrete functions (HAART- and FHat-wavelets) are used as wavelet functions. The wavelet analysis method of vibration signals is disclosed at acoustic diagnostics of machines and mechanisms. Digital implementation of discrete indications of wavelets with the subsequent visualization of results in the form of scalotons is the mathematical basis of the algorithm for procession of vibration signals. It has been suggested that engineering analysis and reconstruction of signals should be implemented by means of directed and reverse continuous wavelet conversions, which are discrete by arguments. The structural and functional scheme of the multichannel system of the intelligent wavelet analysis of vibration signals in machines has been considered. The intelligent system for study of vibration signals makes it possible to form the totality of photographic parameters, when scalotons are calculated by wavelet functions. An example of experimental implementation of the wavelet conversion method of vibration signals parameters is shown. Results of scalotons calculation are shown, when MHat-wavelet and DOG-wavelet are used.

**Keywords:** intelligent technology, touch control, vibration signal, wavelet analysis.

**Conflict of interests.** The authors declare no conflict of interest.

**For citation.** Gulai A.V., Zaitsev V.M. Intelligent technology of wavelet analysis of vibration signals. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 101-108.

### Введение

Одним из самостоятельных, интенсивно развивающихся направлений сенсорного (в том числе интеллектуального) контроля является акустическая диагностика машин и механизмов. В основе акустической диагностики технического состояния машин лежит предположение об обратимой функциональной зависимости между параметрами состояния контролируемого объекта и диагностическими признаками. В качестве параметров состояния выбирают величины, характеризующие структуру машины, режим ее работы, а также внешние условия ее функционирования. Диагностические признаки определяются с использованием сенсоров, воспринимающих сложные результирующие сигналы (вибрации, шумы), характеристики которых в общем случае зависят от всех параметров состояния машины.

Снижению вероятности ошибочного результата при акустическом контроле состояния машины способствует использование комбинированных диагностических признаков [1]. Это особенно эффективно, когда акустические сигналы объектов контроля являются случайными процессами и требуются статистические модели диагностики, выходные сигналы которых также носят случайный характер. При решении инженерных задач динамики машин достаточно часто возникает необходимость выявления гармонических составляющих акустических колебаний в узком временном строе. Это требует привлечения методов вейвлет-преобразования колебаний и введения интеллектуальных систем в состав используемых в эксперименте аналитических средств.

### Вейвлет-анализ вибрационных сигналов: сущность метода

Вейвлет-анализ относится к категории перспективных методов цифровой обработки сигналов и обеспечивает реализацию идеи многомасштабного исследования сигнальной информации. Вейвлет целесообразно рассматривать как короткое по продолжительности во времени сигнальное функциональное окно, которое имеет внутреннее строение в виде затухающего волнообразного всплеска и характеризуется масштабом отображения определенных событий в области частотного спектра сигнала, а также сдвигами по оси времени [2].

Отличительной особенностью вейвлет-анализа является использование упорядоченного набора особых функций  $\psi_i(t)$ , называемых базисными, с помощью которых исследуемый сигнал  $X(t)$  может быть единственным образом представлен в форме линейной комбинации (линейного разложения) следующего вида:

$$X(t) = \sum_{i=0}^{\infty} C_i \psi_i(t),$$

где  $C_i$  – коэффициенты разложения;  $\{\psi_i(t)\}$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots$  – вейвлет-функции, образующие базис разложения, которое принято называть обобщенным рядом Фурье.

В отличие от анализа по Фурье-технологиям в вейвлет-анализе для формирования базиса применяется некоторая материнская вейвлет-функция  $\psi(t)$  и набор ортогональных дочерних вейвлетов  $\psi_i(t)$ . По отношению к материнскому вейвлету  $\psi(t)$  и друг к другу формы представления и структуры дочерних вейвлетов  $\psi_i(t)$ , как математических объектов, обладают свойством подобия, и их, в известной мере, допустимо рассматривать в качестве фракталов.

Материнский вейвлет  $\psi(t)$  может образовывать вейвлет-базис в том случае, если:

– функция  $\psi(t)$  определена на пространстве комплекснозначных функций с ограниченной энергией, вследствие чего она имеет ограниченную норму

$$N[\psi(t)] = \left\{ \int_0^{\infty} |\psi(t)|^2 dt \right\}^{1/2} < \infty;$$

– является знакопеременной с нулевым средним

$$\sum_{-\infty}^{+\infty} \psi(t) = 0;$$

– по мере увеличения абсолютного значения аргумента  $t$  функция быстро убывает во временной (пространственной) области и сходится к нулю, то есть при любых вещественных  $D > 0$  и  $\rho > 0$  имеет место соотношение

$$|\psi(t)| < D(1 + |t|)^{-1-\rho}.$$

В качестве вейвлет-функций используются разнообразные вещественные непрерывные функции вещественных аргументов (Гауссовы вейвлеты разных порядков, вейвлеты Добеши, МНат-вейвлеты типа «мексиканская шляпа»), а также комплекснозначные функции вещественных аргументов (вейвлеты Морле и Пауля) (табл. 1). Находят применение также вещественные дискретные функции, в том числе ХААРТ-вейвлеты и FNat-вейвлеты типа «французская шляпа». Для комплекснозначных вейвлетов дополнительно требуется вещественность Фурье-преобразований и их быстрое убывание в области отрицательных частот.

Если задан масштаб  $\mu$  и сдвиг по времени  $\tau$ , то дочерние вейвлеты, входящие в базис, связаны с материнским вейвлетом следующим соотношением:

$$\psi_i(\mu, \tau) = \mu^{-1/2} \psi[(t - \tau)/\mu],$$

при этом коэффициент  $\mu^{-1/2}$  обеспечивает сохранение нормы  $N[\psi_i(\mu, \tau)] = N[\psi(t)]$ . Таким образом, дочерние вейвлеты образуются путем растяжения или сжатия материнского вейвлета в соответствии со значением параметра  $\mu$  и последующим сдвигом на  $\tau$  единиц по оси времени.

**Таблица 1.** Виды вейвлет-функций  
**Table 1.** Types of wavelet functions

Вид вейвлет-функции Type of wavelet function	Наименование вейвлет-функции Name of wavelet function	Аналитическое представление вейвлет-функции Analytical presentation of a wavelet function
Вещественная непрерывная функция вещественной переменной	Вейвлеты Гаусса	$\psi(t) = (-1)^{n-1} d^n [\exp(-t^2/2)] / dt^n$ ; $n$ – порядок вейвлета
	DOG-вейвлеты	$\psi(t) = \exp[-t^2/2] - \exp[-t^2/8]$
	Вейвлеты Добеши	$\psi(r) = -0,25(1 + 3^{1/2})\varphi(2r - 1) + 0,25(3 + 3^{1/2})\varphi(2r) - 0,25(3 - 3^{1/2})\varphi(2r + 1) + 0,25(1 - 3^{1/2})\varphi(2r + 2)$ , где $\varphi(r)$ – коэффициенты сглаживания; $\varphi(0) = 0$ ; $\varphi(1) = 0,5(1 + 3^{1/2})$ ; $\varphi(2) = 0,5(1 - 3^{1/2})$ ; $\varphi(3) = 0$
	МНат – «мексиканская шляпа»	$\psi(t) = (1 - t^2)\exp(-t^2/2)$
Комплекснозначная непрерывная функция вещественной переменной	Вейвлеты Морле	$\psi(t) = \exp(-t^2/2)\exp(j\omega t)$
	Вейвлеты Пауля	$\psi(t) = \exp(-t^2/2)\exp(-jk_0 t)$ ; $k_0$ – параметр экспоненты

### Математическая модель вейвлет-анализа вибрационных сигналов

Вейвлет-преобразование основано на свертке сигнала  $X(t)$  с вейвлет-функцией, что переводит сигнал из области временного представления в частотно-временную область и позволяет выявить его особенности в зоне локализации вейвлета. При этом различают непрерывное и дискретное преобразования. Непрерывное вейвлет-преобразование наиболее эффективно применяется для спектрального анализа нестационарных сигналов, а дискретное вейвлет-преобразование – для дискретного кодирования и реконструкции сигналов.

Прямое непрерывное вейвлет-преобразование (ПНВП) задается соотношением

$$WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau) = \mu^{-1/2} \int_{-\infty}^{+\infty} X(t) \psi^* [(t - \tau)/\mu] dt,$$

где  $\psi^*$  – вещественная вейвлет-функция или комплексное сопряжение для комплекснозначной вейвлет-функции  $\psi$ . В ПНВП параметр сдвига  $\tau$  отображает точки временной оси, а параметр масштаба  $\mu$  с достаточной точностью соответствует точкам оси частот, при этом  $\omega = 2\pi f \approx \mu^{-1}$ .

Для одномерного сигнала  $X(t)$  ПНВП создает его отображение на плоскости в координатах время-частота. Это позволяет при выполнении анализа осуществлять двухкоординатную локацию с привязкой событий частотной области к определенным моментам времени. Результатами ПНВП в общем случае являются комплексные значения  $WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)$ , модули которых  $|WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)|$  могут выступать в качестве меры наличия частот  $\omega \approx \mu^{-1}$  в спектре сигнала  $X(t)$  в моменты времени, которые соответствуют сдвигам  $\tau$ .

Модуль комплексного значения  $WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)$  отражает степень корреляционной связи вейвлета и сигнала на рассматриваемом интервале времени, то есть степень их схожести. Конкретный результат зависит от вида вейвлета. В качестве масштабного коэффициента  $\mu$  рационально выбирать числовые значения, обратно пропорциональные частоте  $f$ . Поверхность  $|WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)|$  в трехмерной системе координат  $\{\mu, \tau, WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)\}$  образует скейлотон.

Операция определения модуля  $WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)$  приводит к локальным деформациям поверхности скейлотона. Для корректного выполнения вейвлет-анализа с получением инженерно значимых результатов важно сохранять взаимное расположение точек поверхности. В качестве рационального приема предлагается использовать минимально возможный предварительный «подъем» всей поверхности в знакоположительную область пространства и последующее нормирование координат  $WX_{\text{нвп}}(\mu, \tau)$  ее точек:

$$\{\mu, \tau, WX_{\text{НВП}}(\mu, \tau)\} \rightarrow \{\mu, \tau, WX_{\text{НВП}}^*(\mu, \tau)\} \rightarrow \{\mu, \tau, WX_{\text{НВП}}^{(n)}(\mu, \tau)\};$$

$$WX_{\text{НВП}}^*(\mu, \tau) = WX_{\text{НВП}}(\mu, \tau) + |\min\{WX_{\text{НВП}}(\mu, \tau) < 0\}|;$$

$$WX_{\text{НВП}}^{(n)}(\mu, \tau) = WX_{\text{НВП}}^*(\mu, \tau) / (\max\{WX_{\text{НВП}}^*(\mu, \tau)\}).$$

Координаты  $0 < WX_{\text{НВП}}^{(n)}(\mu, \tau) < 1$  точек скейлотона в те или в иные моменты времени могут трактоваться как значения функций принадлежности конкретных частот  $\omega \approx \mu^{-1}$  к нечеткому множеству частот спектра сигнала при сдвигах  $\tau$ .

Обратное непрерывное вейвлет-преобразование (ОНВП) определяется интегральными операциями реконструкции сигнала  $X(t)$ :

$$X(t) = C_{\psi}^{-1} \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} WX_{\text{НВП}}(\mu, \tau) \mu^{-1/2} \psi[(t - \tau)/\mu] d\tau (\mu^{-2}) d\mu,$$

$$C_{\psi} = \int_{-\infty}^{+\infty} |F\psi(j\omega)|^2 |\omega| d\omega,$$

где  $F\psi(j\omega)$  – преобразование Фурье для функции  $\psi[(t - \tau)/\mu]$

$$F\psi(j\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} \psi[(t - \tau)/\mu] \exp(-j\omega t) dt.$$

Приближенная схема инженерного анализа и реконструкции сигналов может быть получена с использованием численных методов на принципах реализации дискретизированных по аргументам интегральных преобразований (соответственно, дискретизированных по аргументам прямого и обратного непрерывных вейвлет-преобразований ДА-ПНВП и ДА-ОНВП).

Для последовательности сдвигов  $\tau = \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{\max}$  с шагом  $\Delta\tau$  и последовательности масштабов  $\mu = \mu_1, \mu_2, \dots, \mu_{\max}$  с шагом  $\Delta\mu$  ряд наблюдений и регистраций сигнала, состоящий из  $M1$  его отсчетов  $X(t_i)$ ,  $i = 0, 1, 2, \dots, M1 - 1$ , может подвергаться ДА-ПНВП. Это обеспечивается путем выполнения точечных вычислений определенных интегралов преобразования на интервале времени  $[t_0; t_{M1-1}]$  с помощью технологии правосторонних прямоугольников:

$$WX_{\text{ДА-НПВП}}(\mu, \tau) = \mu^{-1/2} \sum_{i=0}^{M1-2} X(t_i) \psi^*[(t_i - \tau)/\mu] \Delta t.$$

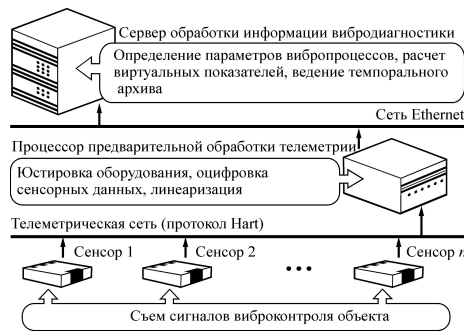
Таким образом, определяется совокупность из  $\tau_{\max} \times \mu_{\max}$  точек, принадлежащих поверхности ДА-ПНВП  $WX_{\text{ДА-НПВП}}(\mu, \tau)$ , которая отображает вейвлет-спектр. Этот же прием, в принципе, может применяться при выполнении ДА-ОНВП:

$$X(t) = C_{\psi}^{-1} \Delta\mu \Delta\tau \sum_{\mu=\mu_1}^{\mu_{\max}} \sum_{\tau=\tau_1}^{\tau_{\max}} WX_{\text{ДА-НПВП}}(\mu, \tau) \mu^{-3/2} \psi[(t - \tau)/\mu].$$

### Экспериментальная реализация вейвлет-анализа вибрационного сигнала

Практическое применение вейвлет-анализа вибрационных сигналов в силу значительной измерительно-вычислительной сложности требует наличия специализированной информационной системы, включающей высокоэффективные аппаратно-программные средства [3–5]. Аппаратура и программное обеспечение такой системы позволяют в реальном масштабе времени проводить измерения и накопление информации о временных рядах параметров колебательных процессов, а также численно осуществлять необходимые интегральные преобразования указанных рядов. Построение аппаратно-программной

интеллектуальной системы для комплексных исследований механических колебаний целесообразно на основе использования схемы, представленной на рис. 1.

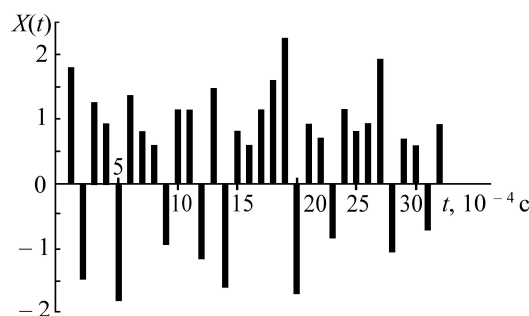


**Рис. 1.** Структура интеллектуальной системы анализа колебательных процессов  
**Fig. 1.** Structure of the intellectual system of the vibration process analysis

Интеллектуальная система для исследования вибросигналов выполняет формирование совокупности фактографических параметров при расчете скейлтонов по вейвлет-функциям. Исходные данные с выхода сенсоров через телеметрическую и станционную сети доставляются в сервер вибродиагностики. Предварительную обработку сигналов технологически рационально возлагать на встраиваемые процессоры «переднего края» [6]. Их программные компоненты выполняют функции оцифровки и фильтрации результатов измерений в режиме реального времени, осуществляют вспомогательные операции юстировки, линейаризации, калибровки, преобразования форматов данных и их упаковки в транзакции.

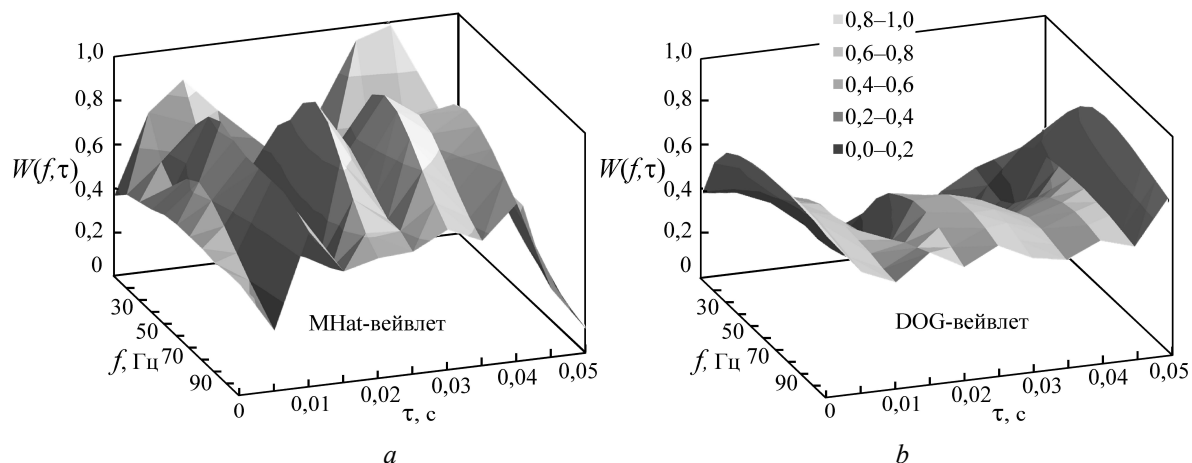
Высокая эффективность функционирования системы достигается при использовании протокола HART (Highway Addressable Remote Transducer). Он допускает применение в полудуплексном режиме проводных каналов со скоростью 1200 бит/с при дальности связи до 1500 м. Доступ к каналу организуется «мастером» – многоканальным прибором приема и накопления данных по принципу «ведущий – ведомый». При подключении к сети до 15 сенсоров с аналоговыми выходами и при вынесении аналого-цифровых преобразователей за пределы сенсорных устройств используется топология сенсорной сети типа «звезда». В случае организации взаимодействия сенсоров исключительно с цифровыми выходами в протоколе HART предусмотрено применение шинной топологии с 15 ведомыми абонентами и двумя «мастерами». При использовании радиоканалов реализуется восьмипозиционная фазовая манипуляция на частоте несущего сигнала 2400–2483,5 МГц в соответствии с беспроводным промышленным протоколом Wireless HART на скорости 9600 бод/с.

Выполнялись измерения виброперемещений корпуса гусеничной машины, предназначенной для транспортирования радиоэлектронного оборудования. Вибрационные процессы регистрировались во время стоянки машины при работающем навесном мотор-генераторе для автономного электроснабжения аппаратуры. Частотный диапазон колебаний транспортной машины составляет 10–1000 Гц. На рис. 2 приведен фрагмент периодограммы, содержащий 32 отсчета исходного сигнала, который отражает общий характер развития вибрационного процесса во времени. Шаг дискретизации процесса выбран равным  $10^{-4}$  с, величина сигнала показана в относительных единицах.



**Рис. 2.** Фрагмент периодограммы исходного вибрационного сигнала  
**Fig. 2.** A fragment of the original vibration signal periodogram

На рис. 3, *a, b* представлены результаты расчета скейлтонов при использовании соответственно МНат-вейвлета и DOG-вейвлета. Чередование сегментов, имеющих более темные и более светлые оттенки, объясняется следующими обстоятельствами. При наличии в спектре исследуемого сигнала составляющих с определенной частотой, вейвлет-функция имеет более высокое значение для соответствующего интервала времени, что отражает плотность окраски полученной поверхности.



**Рис. 3.** Результаты расчета скейлтонов при использовании МНат-вейвлета (*a*) и DOG-вейвлета (*b*)  
**Fig. 3.** Result of the calculation of scaletones, when (*a*) MNat-wavelet and (*b*) DOG-wavelet

### Список литературы

1. Артоболевский И.И. *Введение в акустическую динамику машин*. Москва: Наука; 1979.
2. Новиков Л.В. *Основы вейвлет-анализа сигналов*. Санкт-Петербург: МОДУС; 1999.
3. Витязев В.В. *Вейвлет-анализ временных рядов*. Санкт-Петербург: СПбГУ; 2001.
4. Яковлев А.Н. *Введение в вейвлет-преобразование*. Новосибирск: НГГУ; 2003.
5. Штарк Г.Г. *Применение вейвлетов для ЦОС*. Москва: Техносфера; 2007.
6. Гулай А.В., Зайцев В.М. *Архитектура интеллектуальных систем*. Минск: ИВЦ Минфина; 2018.

### References

1. Artobolevskij I.I. [Introduction to the acoustic dynamics of machinery]. Moscow: Nauka; 1979. (In Russ.).
2. Novikov L.V. [Basics of the wavelet-analysis of signals]. St. Petersburg:MODUS; 1999. (In Russ.).
3. Vityazev V.V. [Wavelet-analysis of time-series]. St. Petersburg: SPbGU; 2001. (In Russ.).
4. Yakovlev A.N. [Introduction to wavelet-transformation]. Novosibirsk: NGGU; 2003. (In Russ.).
5. Shtark G.G. [Application of wavelets for DSP]. Moscow: Tehnosfera; 2007. (In Russ.).
6. Gulaj A.V., Zajtsev V.M. [Architecture of the intelligent systems]. Minsk: IVTs Minfina; 2018. (In Russ.).

### Вклад авторов

Гулай А.В. провел анализ проблем акустической диагностики машин по спектрам колебаний; поставил задачи по исследованию частотных спектров случайных сигналов; обобщил результаты вейвлет-анализа параметров колебаний и подготовил выводы.

Зайцев В. М. провел анализ технологии исследования частотного спектра случайного сигнала; построил модель вейвлет-анализа колебаний при акустической диагностике машин; определил спектральный состав случайных колебаний транспортной машины.

### Authors contribution

Gulay A.V made an analysis of the problems of acoustic diagnostics of machines according to vibrational spectra; set the task of studying the frequency spectra of random signals; summarized the results of the wavelet analysis of the oscillation parameters and prepared conclusions.

Zaitsev V.M. conducted an analysis of the technology for studying the frequency spectrum of a random signal; built a model of wavelet analysis of vibrations in acoustic diagnostics of machines; determined the spectral composition of random vibrations of the transport machine.

#### **Сведения об авторах**

Гулай А. В., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Интеллектуальные и мехатронные системы» Белорусского национального технического университета.

Зайцев В. М., к.т.н., доцент, доцент кафедры «Интеллектуальные и мехатронные системы» Белорусского национального технического университета.

#### **Information about the authors**

Gulay A.V., Ph.D., docent, head of the Department of Intelligent and Mechatronic Systems of Belarusian National Technical University.

Zaitsev V.M., Ph.D., docent, Associate Professor at the Department of Intelligent and Mechatronic Systems of Belarusian National Technical University.

#### **Адрес для корреспонденции**

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, пр. Независимости, д. 65,  
Белорусский национальный  
технический университет  
тел. +375-29-251-46-42;  
e-mail: is@bntu.by  
Гулай Анатолий Владимирович

#### **Address for correspondence**

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, Nezavisimosti av., 65,  
Belarusian National Technical University  
tel. +375-29-251-46-42;  
e-mail: is@bntu.by  
Gulay Anatoly Vladimirovich