

УДК 517.444::534.442:620.179.1::621.88/83 -045.79

АЛГОРИТМ ОЦЕНКИ ЧАСТОТЫ ПОВТОРЕНИЯ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ НА ОСНОВЕ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ВЕЙВЛЕТ-ПРЕОБРАЗОВАНИЯ

И.Г. ДАВЫДОВ, С.Ю. ВАСЮКЕВИЧ, А.В. ЦУРКО, И.М. СЕГЛЮК

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

Поступила в редакцию 24 июня 2014

Предложен алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования. Проверена эффективность алгоритма путем обработки данных моделирования и измерений. Подтверждена применимость алгоритма для вибрационной диагностики технического состояния ротационных узлов механических систем по моделям дефектов.

Ключевые слова: вибродиагностика, периодическое вейвлет-преобразование, частота повторения ударных импульсов.

Введение

Ротационные узлы современной техники, такие как подшипники, редукторы и передаточные механизмы, подвержены быстрому износу и поломкам в силу высоких нагрузок и скоростей вращения. Анализ сигналов вибрации этих узлов позволяет заблаговременно выявлять дефекты и планировать обслуживание. Наличие периодически повторяющихся ударных импульсов в сигнале свидетельствуют об источнике повышенного износа, зачастую это уже имеющийся в системе дефект.

Ударные импульсы, присутствующие в вибрационном сигнале, характеризуются рядом параметров, таких как резонансная частота, момент возникновения, декремент затухания, начальная амплитуда и частота повторения [1]. Приведенные параметры являются диагностическими признаками, отображающими физическое состояние механической системы, и используются при решении задач выявления и классификации дефектов.

Классический вейвлет-анализ позволяет оценить резонансную частоту и время возникновения [2], но не частоту повторения ударных импульсов. Применение Фурье-анализа малоэффективно при недостаточной длительности записи данных и обладает меньшими, чем вейвлеты, диагностическими возможностями [3].

С целью преодоления вышеуказанных проблем в работе предлагается алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования (ПВП). Выделение периодичностей с помощью аппарата вейвлет-анализа, рассмотрено в [3, 4]. Данная работа отличается использованием специальной материнской (базовой) вейвлет-функции и направленностью алгоритма на диагностирование по моделям дефектов.

Теоретический анализ

ПВП требует определения функционального базиса. Процедура выбора материнской вейвлет-функции не является формализованной. Выбор, как правило, производится исходя из информации, которую требуется извлечь из анализируемого сигнала [5]. Для оценки частоты следования ударных импульсов целесообразно применить периодическое продолжение

некоторого одиночного вейвлета $\Psi_m(t)$ на интервале наблюдения T исследуемого сигнала, имеющее вид:

$$\Psi(t, a, F) = \sum_{n=0}^N \Psi_m\left(t - \frac{n}{F}, a\right), \quad (1)$$

где F – частота повторения импульсов в герцах; $N = FT$ – количество вейвлетов $\Psi(t)$, укладываемых на интервале анализа T ; a – масштаб одиночного вейвлета.

Данное исследование в качестве базовой вейвлет-функции $\Psi_m(t)$ использует “sin_pow” [2], определяемую выражением (2). Одним из преимуществ функции “sin_pow” является линейный характер зависимости доминирующей частоты от масштабного коэффициента [6]. Доминирующей называется частота, которой соответствует максимум энергетического спектра вейвлет-функции при различных масштабных коэффициентах [2].

$$\Psi_m(t) = \begin{cases} \left(\frac{4}{\pi^2}\right) \left(\frac{\pi^2}{4} - (\omega t)^2\right) \exp\left(\frac{-2(\omega t)^2}{\pi^2}\right), & -\infty < t \leq 0 \\ \cos(\omega t) \exp\left(-\frac{t}{k}\right), & 0 < t < \infty \end{cases}, \quad (2)$$

где k – скорость убывания экспоненты, ω – доминирующая частота.

ПВП определяется на основе (1) по аналогии с обычным (непрерывным) вейвлет-преобразованием следующим образом:

$$W_p(\nu, F) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) \Psi(t - \nu, F, a) dt, \quad \nu, F \in R, \quad (3)$$

где $x(t)$ – анализируемый сигнал, ν – временной сдвиг, значения a задаются явно.

Введенное вейвлет-преобразование (3) может быть представлено в виде свертки:

$$W_p(\nu, F) = x(\nu) * \bar{\Psi}_F(\nu), \quad (4)$$

где $\bar{\Psi}_F(t) = \Psi(-t, F)$, $*$ – операция свертки.

Известно, что свертка периодических функций также периодична, следовательно, ПВП $W_p(\nu, F)$ также имеет периодический характер вдоль оси временного сдвига ν .

На основе ПВП предлагается следующий алгоритм выделения диагностических признаков.

1. На основе базисной функции $\Psi_m(t)$ путем обычного вейвлет-преобразования строится скалограмма $E(a)$, по максимумам которой определяются коэффициенты a , соответствующие доминирующим (резонансным) частотам импульсов в составе сигнала.

2. Выбранные коэффициенты a , являясь входными параметрами $\Psi(t, a, F)$, задают масштаб одиночной функции $\Psi_m(t, a)$, которая размещается с периодом $T_r = 1/F$ на интервале наблюдения сигнала T .

3. Сигнал $x(t)$ посредством ПВП $W_p(\nu, F)$ отображается на плоскость с координатами $\nu \times F$ (временной сдвиг, с \times частота повторения, Гц).

4. С целью более компактного представления диагностической информации предлагается рассматривать не плоскость $\nu \times F$, а плоскость $a \times F$ (масштабный коэффициент \times частота повторения, Гц). Для перехода на плоскость $a \times F$ каждой паре параметров a и F ставится в соответствие глобальный максимум функции $W_p(\nu, F)$ вдоль оси ν . Полученная в координатах (a, F) двумерная функция обозначается как $G(a, F)$.

При анализе следует учесть, что функция $G(a, F)$ при фиксированном значении параметра a будет периодической. В случае единственной периодичности ударных импульсов частота повторения $G(a, F)$ равна частоте повторения импульсов в исследуемом сигнале. Это

обусловлено корреляцией исследуемого сигнала $x(t)$ с периодической базисной функцией $\Psi(t, F)$ не только на частоте повторения ударных импульсов, но и на частотах кратных ей в целое число раз. Поэтому, в простейшем случае после фиксации глобального максимума скалограммы и применения ПВП, вычисляется кепстр, глобальный максимум которого соответствует частоте повторения импульсного воздействия.

5. Для выделения частоты (частот) повторения ударных импульсов вычисляется кепстр $S(a, F)$ функции $G(a, F)$ и определяется его глобальный (локальные) максимумы.

Экспериментальная часть

Проверка эффективности алгоритма проведена путем моделирования в среде MATLAB. На основе модели дефекта зубчатой пары синтезирован модельный вибросигнал в виде последовательности из восьми ударных импульсов с резонансной частотой $f_r = 1 \text{ кГц}$ и декрементом затухания $\alpha = 500 \text{ с}^{-1}$ на интервале анализа $T = 1 \text{ с}$ в отсутствие шумов. На рис. 1, *a*, *б* представлены временная диаграмма вибросигнала $x(t)$ без шума и его скалограмма $E(a)$ при $a \in [1, 200]$.

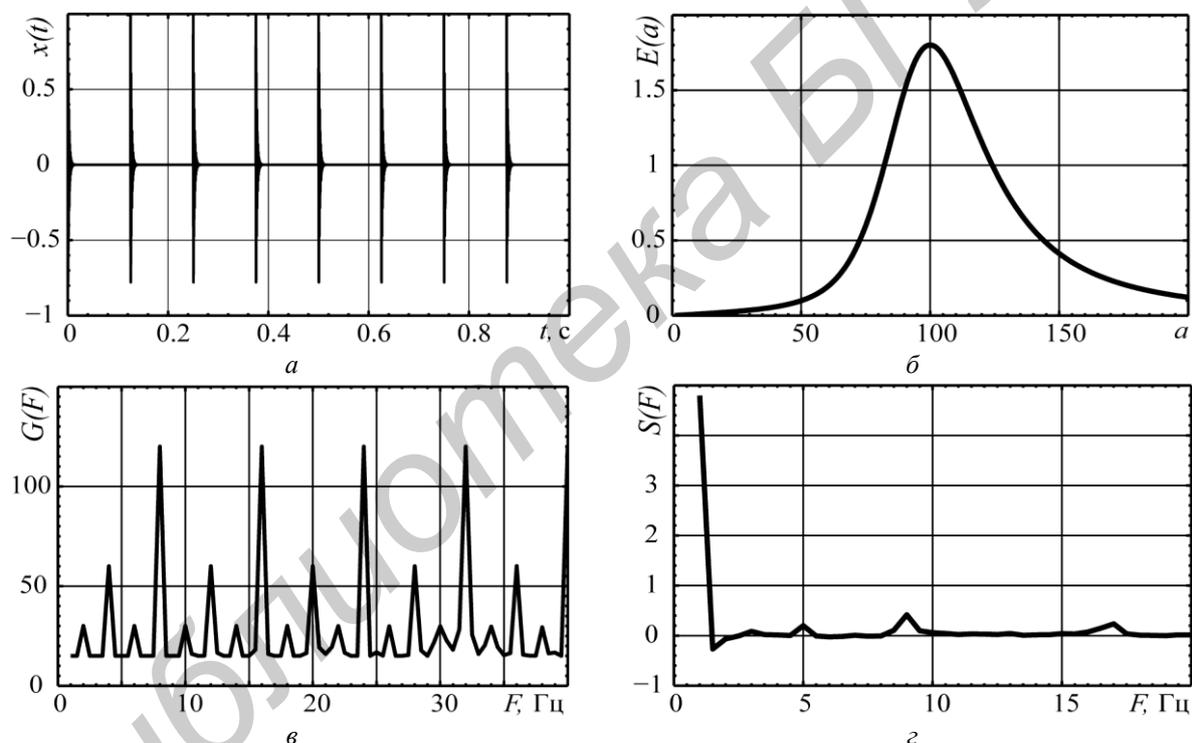


Рис. 1. Вибросигнал без шума: *a* – временная диаграмма; *б* – скалограмма; *в* – вейвлет-спектр; *г* – кепстр

Из скалограммы видно, что глобальный максимум находится при масштабном коэффициенте $a = 100$, что соответствует резонансной частоте сформированного сигнала $f_r = 1 \text{ кГц}$. При фиксации масштабного коэффициента $a = 100$ плоскость $a \times F$, содержащая результат ПВП, редуцируется к оси F . Результаты вычисления ПВП в форме $G(F)$ для масштабного коэффициента $a = 100$, шага $\Delta F = 0,5 \text{ Гц}$ и диапазона частот повторения базисной функции $\Psi(t, a, F) \in [1, 40] \text{ Гц}$ и его кепстра $S(F)$ представлены на рис. 1, *в*, *г*.

Анализ вейвлетного спектра $G(F)$ показывает, что с периодом 8 Гц, равным частоте повторения импульсов в модельном сигнале, периодически повторяется основной пик на частоте 8 Гц, а также побочные пики на частотах 2 и 4 Гц с амплитудами соответственно 50 %

и 25 % от основного. Глобальный максимум в кепстре $S(F)$ на частоте 9 Гц приближенно (с погрешностью 12,5 %) отражает период вейвлет-спектра и соответствует частоте повторения импульсов.

В продолжение эксперимента к модельному сигналу добавлен шум до соотношения сигнал/шум $snr = 5$ дБ. В качестве модели шума использован аддитивный белый гауссовский шум (АБГШ). На рис. 2, *a*, *б* представлены временная диаграмма зашумленного вибросигнала $x(t)$ в присутствии шума и его скалограмма $E(a)$ при $a \in [1, 200]$.

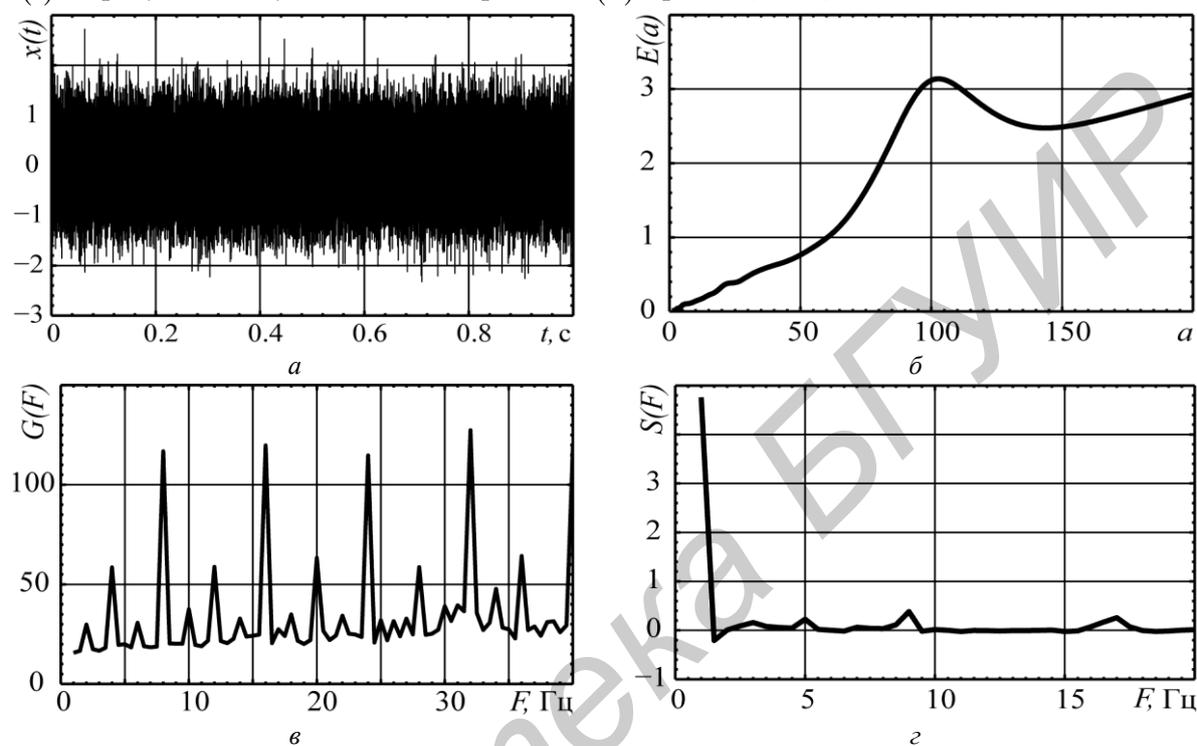


Рис. 2. Вибросигнал в присутствии шума: *a* – временная диаграмма; *б* – скалограмма; *в* – вейвлет-спектр; *г* – кепстр

По скалограмме видно, что при $snr = 5$ дБ отчетливо выражен глобальный максимум при масштабном коэффициенте $a = 103$. В то же время, значительное повышение отклика на масштабах более 150 означает, что при $snr \leq 5$ дБ метод окажется непригодным. На рис. 2, *в*, *г* представлены результаты вычисления ПВП в форме $G(F)$ при $a = 103$, $\Delta F = 0,5$ Гц, $\Psi(t, a, F) \in [1, 40]$ Гц и его кепстра $S(F)$, из которых следует, что уровень побочных максимумов возрос незначительно (до 10 %) и внесение АБГШ практически не повлияло на качество определения частоты повторения ударных импульсов. Глобальный максимум в кепстре $S(F)$, как и в случае отсутствия шума, располагается на частоте 9 Гц и приближенно (с той же погрешностью 12,5 %) отражает период вейвлет-спектра.

Проверка эффективности алгоритма на реальных данных осуществлена при помощи среды MATLAB. Реализация сигнала представляет собой запись вибрации редуктора клетки прокатного стана длительностью $T = 1$ с, в котором присутствует дефект одного из зубчатых колес, вращающегося с частотой $F_d = 12,9$ Гц. На рис. 3, *a*, *б* представлены временная диаграмма вибросигнала $x(t)$ и его скалограмма $E(a)$ при $a \in [1, 200]$.

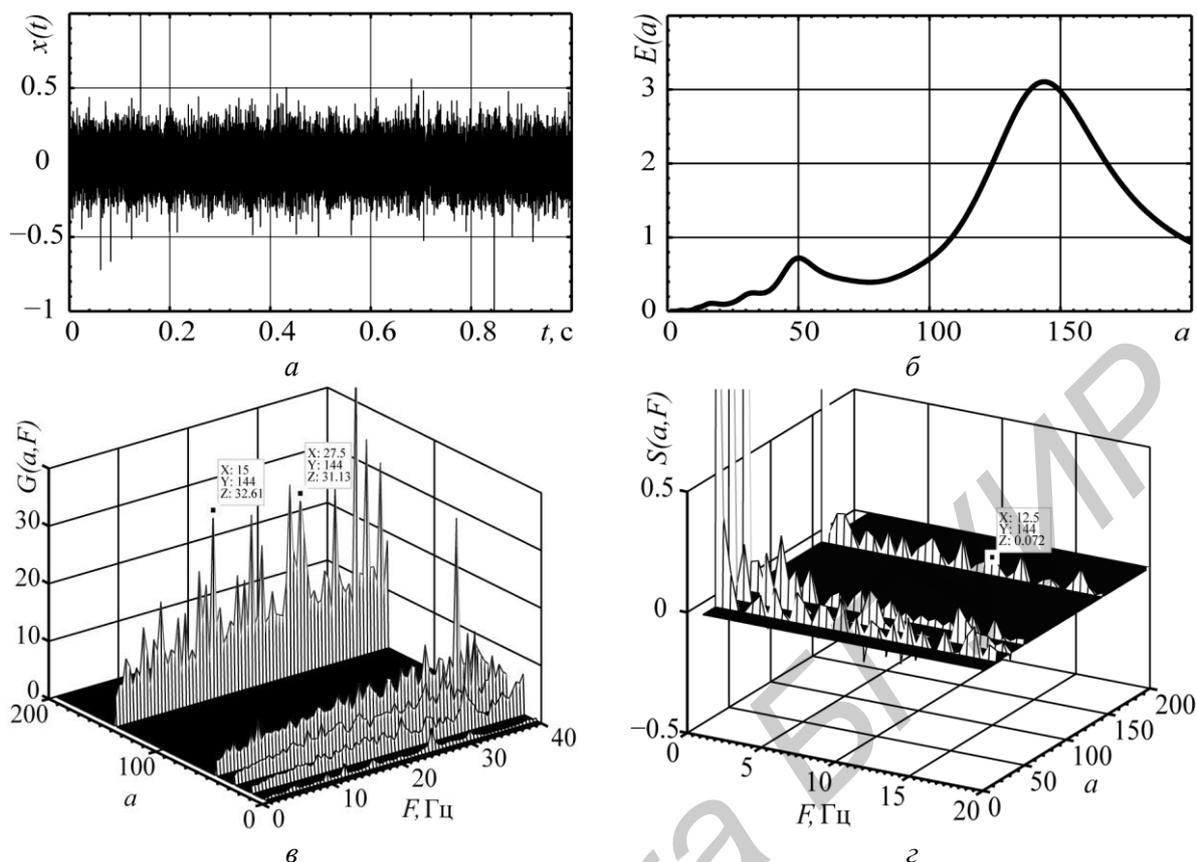


Рис. 3. Вибросигнал редуктора: *a* – временная диаграмма; *б* – скалограмма; *в* – вейвлет-спектр; *г* – кепстр

Из скалограммы определены локальные максимумы при масштабных коэффициентах $a = 5, 17, 33, 50, 144$. Результаты вычисления ПВП в форме $G(a, F)$ при вышеуказанных значениях a , $\Delta F = 0,5$ Гц, $\Psi(t, a, F) \in [1, 40]$ Гц и его кепстра $S(a, F)$ представлены на рис. 3, *в*, *г*. В полученном вейвлет-спектре при $a = 144$ выражен пик на частоте 15 Гц, и его повторение на 27,5 Гц. Соответствующий локальный максимум кепстра расположен на частоте 12,5 Гц, что соответствует искомой частоте дефекта $F_d = 12,9$ Гц с погрешностью 3,1 %.

Заключение

Предложен алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов в вибрационных сигналах на основе периодического вейвлет-преобразования и вейвлета “sin_pow”.

Эффективность алгоритма проверена путем обработки данных модели дефекта зубчатой пары, а также данных измерений аналогичного дефекта редуктора клетки прокатного стана на РУП БМЗ.

В чистом сгенерированном сигнале однозначно выделена частота повторения ударных импульсов с погрешностью 12,5 %. Добавление к сигналу БГШ до отношения сигнал/шум 5 дБ вызвало незначительное повышение уровня побочных максимумов (до 10 %), что не повлияло на точность определения частоты моделируемого дефекта. Использование алгоритма при отношении сигнал/шум менее 5 дБ оказалось невозможным.

Поиск в наборе реальных данных возможных дефектов на основе их моделей привел к верному обнаружению присутствующих в сигнале импульсных периодичностей и выявлению дефекта зубчатой пары (с погрешностью выявления частоты 3,1 % относительно модельной). Обнаружено, что слабым местом предложенного алгоритма является применение кепстрального анализа в чистом виде, так как на данном шаге в автоматическое определение частот повторения импульсов вносится наибольшая погрешность.

Таким образом, подтверждена применимость алгоритма для вибрационной диагностики

технического состояния ротационных узлов механических систем по моделям дефектов. Предложенный способ определения периодичностей продемонстрировал удовлетворительные результаты, что позволяет рекомендовать его к внедрению в практическую диагностику ротационных узлов. Предметом дальнейшего исследования предлагается сделать эффективность автоматического выявления дефектов описанных большим числом различных моделей и улучшение способов анализа на последнем шаге алгоритма.

SHOCK PULSE REPETITION FREQUENCY ESTIMATION BY PERIODIC WAVELET TRANSFORM

I.G. DAVYDOV, S.U. VASIUKEVICH, A.V. TSURKO, I.M. SEGLIUK

Abstract

The algorithm for shock pulse repetition frequency estimation based on periodic wavelet transform was proposed. The algorithm was applied to both synthesized and real vibration data. The applicability of the algorithm for vibration diagnostics of rotating machinery health by model defects was confirmed.

Список литературы

1. *Генкин М.Д., Соколова А.Г.* Виброакустическая диагностика машин и механизмов. М., 1987.
2. *Давыдов И.Г., Лыньков Л.М., Левкович В.Н.* // Докл. БГУИР. 2005. Т. 1, № 3. С. 48–52.
3. *Щукин Е.Л.* Разработка метода анализа импульсных составляющих случайных процессов вибрации приводов горных машин : Дисс. ... канд. техн. наук. Кемерово, 2003.
4. *Benedetto J.J., Pfander G.E.* // SIAM Journal on Applied Mathematics. 2006. Vol. 62, Is. 4 P. 1329–1368.
5. *Астафьева Н.М.* // Успехи физических наук. 1996. Т.166, № 11. С. 1145–1170.
6. *Васюкевич С.Ю., Давыдов И.Г., Мигалевич С.А.* // Тез. докл. VIII Белорусско-российской НТК «Технические средства защиты информации». Браслав, 24–28 мая 2010. С. 106.