

УДК 621.391:519.6

ОЦЕНКА ПЕРИОДИЧНОСТИ УДАРНЫХ ИМПУЛЬСОВ ВИБРАЦИОННОГО СИГНАЛА

КЕЧИК Д. А., АСЛАМОВ Ю. П., ДАВЫДОВ И. Г., ЛОЩИН И. В.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

E-mail: ya.dan.kechik@yandex.by

Аннотация. В данной работе рассматриваются способы оценки периода сложных по форме сигналов – анализ пиков автокорреляционной функции и сегментированный авторегрессионный метод Прони.

Abstract. In this paper methods of periodicity estimation of signals of complicated form have been considered – analysis of peaks of autocorrelation function and segmented autoregression method Prony.

Введение

Вибрационный сигнал состоит из множества компонентов различной природы. Для диагностики важно разделить эти компоненты, оценить их параметры (амплитуды и частоты, например), которые в дальнейшем будут информативными признаками для оценки ТС ПО. В различных частотных областях вибрация различается по своему происхождению, составу, и, соответственно, математическому описанию [1].

Особый интерес представляет собой анализ огибающей высокочастотной вибрации: так можно обнаружить значительное число зарождающихся дефектов, получать информацию от ближайших к месту измерения элементов в силу быстрого затухания ВЧ колебаний [1]. ВЧ колебания могут порождаться ударными процессами, приводящими к появлению полседовательности импульсов с несущими частотами, равными резонансным частотам элементов, и частотой повторения, определяемой периодичностью соударений [1]. Так же в области высоких и средних частот присутствуют амплитудно модулированные (АМ) колебания. В качестве модулирующего и модулируемого процессов могут выступать как гармонические, так и случайные процессы. Например, гармоническая м-ция случ. виб-ции - признак появления дефекта как узла трения, периодически попадающего под нагрузку [1]. Несущая частота колебаний связана с резонансными частотами элементов конструкции, а частота повторения или модуляции – с периодическими воздействиями на элемент. Для точной локализации дефекта важно учитывать несущую частоту, форму колебания и периодичность огибающей [1, 2]. Для правильной диагностики так же важно разделить компоненты вибрации перед тем, как их выделять полосовой фильтрацией и анализировать частотный состав огибающей [1].

Разреженная декомпозиция скейлограммы – способ обнаружения частотных областей, содержащих компоненты вибрации, порождаемые дефектным элементом [2]. Скейлограмма представляет сглаженный спектр мощности, пики которого соответствуют компонентам вибрации на резонансных частотах. Различные по происхождению сигналы моделируются различными идеализированными сигналами: АМ колебания, биения, синусоидальные отрезки, импульсы с экспоненциальной или гауссовой огибающей [2]. На основании формы сигнала можно различать дефектные состояния и элементы оборудования [2], но так же важно и выявлять периодичность данного сигнала [3].

Компоненты вибрации на резонансных частотах зачастую имеют сложный спектральный состав, требуется учитывать наличие сигналов различной формы, что не всегда является простой задачей [4]. Так же надёжность выявления коротких последовательностей на фоне длительных реализаций существенно ниже [6]. Существуют различные методы измерения периодичности временного ряда, альтернативные спектральному анализу:

- По пересечению нуля. Метод хорошо работает для однокомпонентных сигналов при высоких ОСШ [5].
- Периодическое вейвлет-преобразование позволяет оценивать периодичность с высокой точностью, однако требует высоких ОСШ (более 5 дБ), зависит от формы сигнала [7].
- Анализ пиков автокорреляционной функции (АКФ) [8, 9].

- Метод Прони, сегментированный метод Прони [10].

В работе рассматриваются 2 метода поиска слабых периодичностей: по пикам АКФ [9] и сегментированный метод Прони [10].

Анализ пиков АКФ

Известно, что АКФ периодического сигнала имеет пики, частота повторения которых соответствует периоду сигнала. АКФ смеси сигнала и аддитивного белого гауссова шума (АБГШ) также представляет собой периодическую функцию, причём основная энергия шума сосредоточена в начале, при нулевой задержке значение АКФ шума равно дисперсии шума, а с увеличением задержки корреляционные связи шума ослабевают [8]. Объясняется это тем, что АКФ суммарного сигнала можно представить в виде суммы АКФ сигнала, АКФ шума и их удвоенной взаимной корреляционной функции, отсчёты АБГШ не коррелированы ни с соседними отсчётами, ни с отсчётами сигнала.

Предложенный метод поиска периодичностей учитывает особенности обработки реальных сигналов вибрации. Предварительно выделяются компоненты вибрации методом разреженной декомпозиции скейлограммы. Вычисляется огибающая каждой компоненты как модуль аналитического сигнала и АКФ огибающей. Первый пик, соответствующий шумовым корреляциям, отсекается по первому минимуму, который соответствует первому максимуму временного ряда, обратного АКФ. На примерах АКФ различных сигналов (рис. 1 б-г) видно, что оставшаяся часть АКФ также зашумлена, что может быть объяснено отклонением закона распределения реального шума от нормального закона. В силу этого, необходимо учитывать не все пики АКФ. В таком случае целесообразно устанавливать пороги, выше которых обнаруживаются пики. В данной работе предложено устанавливать адаптивные пороги, которые вычисляются относительно самого высокого пика. Как правило, амплитуды пиков АКФ убывают медленно, поэтому возможно обнаружить несколько пиков и измерить их период, в том числе в случаях, когда периодичность слабая.

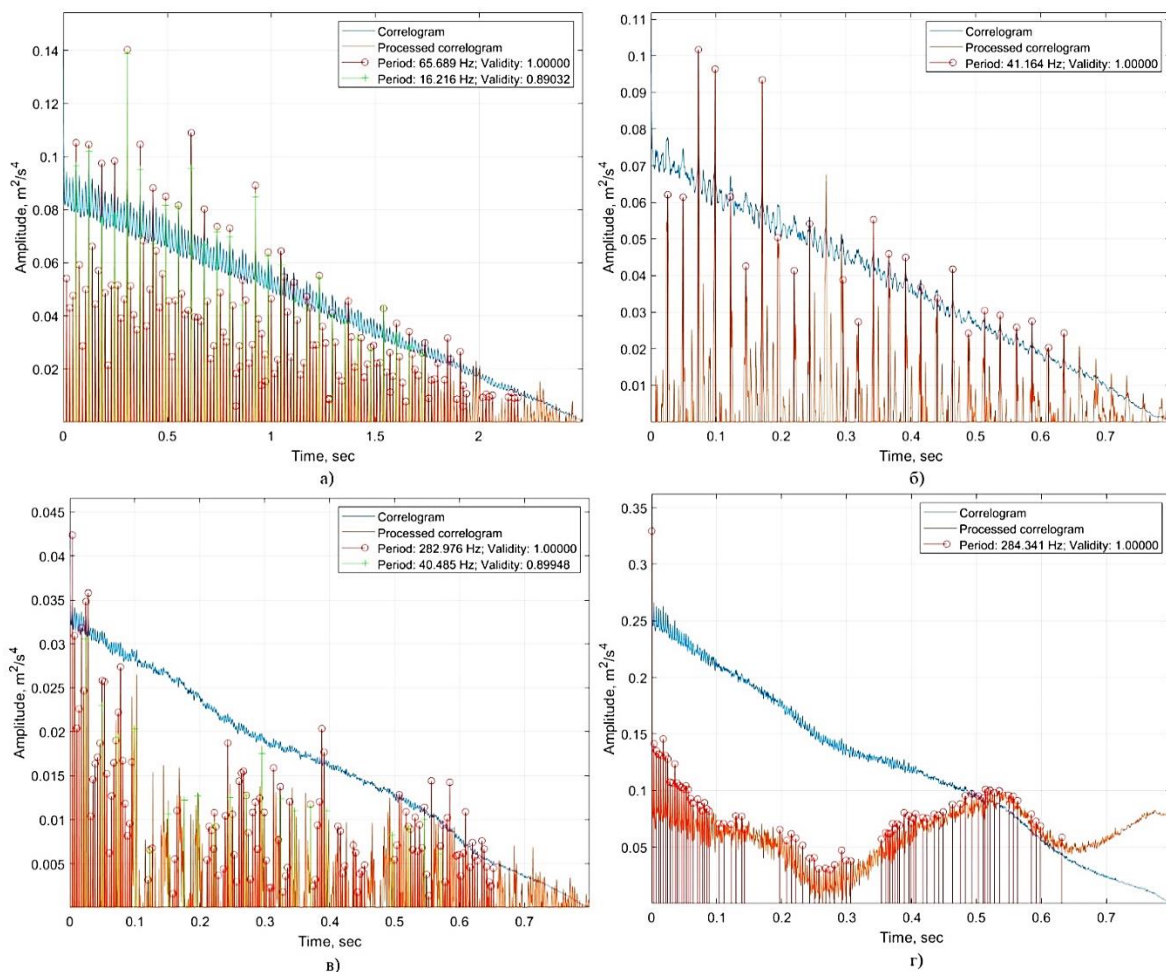


Рис. 1. АКФ и пики периодичностей компонент вибрации подшипника: 1 – Подшипник 6213; 2 - 4 – Сигналы из набора данных, использованного в работе [13].

Рассмотрим примеры встречающихся на практике АКФ и их пиков компонентов вибрации подшипника (рис. 1). Периоды пиков соответствуют подшипниковым частотам – частотам взаимодействия элементов подшипника, которые рассчитываются из его геометрических размеров и оборотной частоты [1, 11]. В ряде других случаев амплитуды пиков одной периодичности могут изменяться по более сложному закону (рис. 1 а-г), что возможно объяснить дополнительной АМ, возникающей при попадании дефекта в зону нагружения. В ряде случаев АКФ содержит две и более периодичности, что так же усложняет задачу (рис. 1 а, в). Для обнаружения пиков, различных по амплитуде, предложено обнаруживать пики АКФ, выраженной в логарифмическом масштабе.

Вследствие низкого ОСШ и наличия нескольких периодичностей, период во многих случаях невозможно оценить усреднением расстояния между пиками. Для обнаружения последовательности повторяющихся пиков и оценки периода повторения предложено разбивать последовательности пиков на перекрывающиеся окна, оценивать в каждом окне среднее значение и СКО расстояния между пиками. Считается, что окно содержит искомую последовательность, если отношение СКО в среднем меньше 0,25.

Чтобы учесть различные случаи – разнообразие форм сигнала, амплитудные соотношения пиков и наличие нескольких периодичностей, целесообразно производить поиск с различными порогами, шириной окна сглаживания, в линейном и логарифмическом масштабе. Для сравнения и выбора среди близких по периоду последовательностей оценивается число выраженных пиков, принадлежащих последовательности. В отдельных случаях требуется вычитание линейного тренда либо низкочастотной аддитивной компоненты. Оценить тренд можно функцией `detrend` пакета `MatLab`, низкочастотные компоненты можно выделить скользящим средним или медианным сглаживанием [12] либо гармонической аппроксимацией методом наименьших квадратов [9].

Самый простой способ учесть разнообразие случаев и выбрать наилучший метод автоматически – оценить периодичности без удаления НЧ компоненты и с предварительным её вычитанием различными способами и оценкой числа пиков. Для повышения достоверности результата, наличие периодичности подтверждается на ансамбле сигналов, аналогично наличию информативных признаков дефектов в частотной области [14].

Сегментированный метод Прони

В данной работе рассматривается реализация сегментированного метода Прони [10], основанная на минимизации ошибок аппроксимации авторегрессионной (АР) модели. На первом этапе сигнал разделяется на частотные каналы ДПФ-модулированным банком фильтров. Соседние частотные области перекрываются и покрывают широкий частотный диапазон, в котором предполагается наличие полезного сигнала по априорной информации или анализу спектральной плотности мощности. Сигналы в каждом канале разбивались на перекрывающиеся временные окна. Методом Прони в каждом окне оценивалась средняя частота сигнала и ошибки аппроксимации АР-модели $\epsilon_{i,j}$, где i, j – индексы по времени и частоте. Чтобы учесть различную мощность сигнала в каждом окне анализа, рассчитывается отношение дисперсий ошибок аппроксимации и сигнала в данном частотно-временном окне. В каждый момент времени полученные соотношения сравниваются во временных окнах, в которые попадает текущий отсчёт сигнала, во всех каналах. Значение мгновенной частоты однокомпонентного сигнала в данный момент времени принимается равным оценке, полученной методом Прони в частотно-временном окне, где данные соотношения меньше. Реализация рассмотренного метода доступна по ссылке [15].

Сравнение рассмотренных методов

Устойчивость к помехам проверялась на модельных сигналах – последовательности импульсов с экспоненциальной огибающей. Сигнал считался обнаруженным в случае его выделения алгоритмом разреженной декомпозиции скейлограммы. Обнаружение сигнала методом Прони проверялось сравнением средней $\epsilon_{i,j}$ смеси сигнала и шума, шума той же мощности. На основании 100 значений $\epsilon_{i,j}$, полученных на зашумлённом сигнале и на шуме, вычислялся порог, минимизирующий ОР. Вероятность правильного обнаружения сигнала методом Прони приближалась к 100% при ОСШ более -5 дБ и резко снижалась до 0% при уменьшении ОСШ. Вероятность правильного обнаружения сигнала методом разреженного разложения скейлограммы составила 87% при ОСШ выше -8 дБ.

Периодичность считалась обнаруженной, если отношение среднего значения к СКО периода менее 0,25. Вероятность правильного обнаружения периодичности методом Прони составила более 80% при ОСШ более 1 дБ, анализом пиков АКФ – 80% при ОСШ выше -7 дБ. Точность оценки периода измерялась средней квадратичной ошибкой: $RMSE = [1/n \sum (x_i - \hat{x}_i)^2]^{(1/2)}$.

Анализ реальных вибросигналов

Обнаружение периодичностей по пикам АКФ проверялось на наборе вибрационных сигналов, использованном в работе [3] и опубликованном [16]. Набор [16] содержит 20 сигналов вибрации исправного подшипника и 20 – подшипника с дефектом наружного кольца.

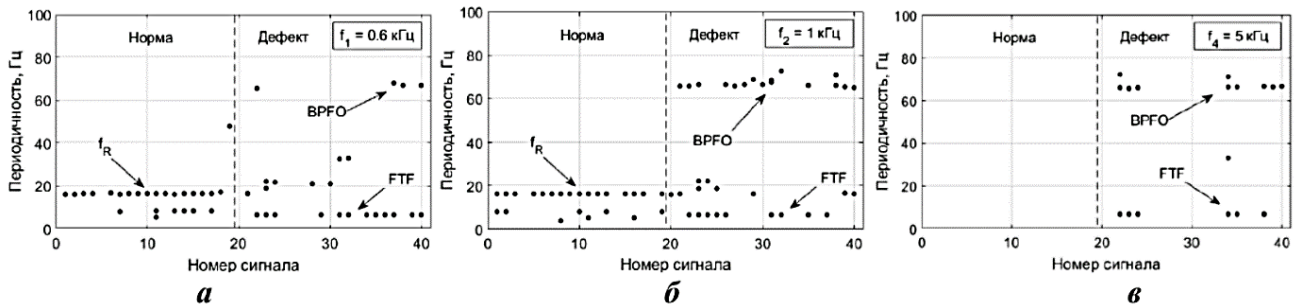


Рис. 2. Найденные по пикам АКФ компоненты вибрации с центральными частотами: а) – 0,6 кГц, б) – 1 кГц, в) – 5 кГц.

В работе [3] рассмотрено появление периодичностей при появлении дефекта. На дефектных сигналах появляются периодичности, соответствующие частотам дефектов, что видно на рис. 2. [3].

Выводы

Анализ пиков АКФ подходит для периодических сигналов различной формы и более устойчив к широкополосному шуму. В то же время, метод Прони меньше зависит от амплитудных соотношений между импульсами. Метод анализа пиков АКФ применим для анализа реальных вибрационных сигналов и применения в диагностике оборудования.

Список использованных источников

1. Барков, А. В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А. В. Барков, Н. А. Баркова, А. Ю. Азовцев. – СПб : Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 159 с.
2. Sparse Wavelet Decomposition with Redundant Dictionary for Vibration Waveform Analysis / Y.P. Aslamov [и др.] // 14th International Conference on Pattern Recognition and Information Processing. – Minsk, BSUIR, 2019. – С. 6.
3. Асламов, Ю. П. Система контроля работоспособности роторного оборудования на основе анализа временной структуры вибрационных сигналов : диссертация кандидата технических наук : 05.13.01 / Ю.П. Асламов ; БГУИР. – Минск, 2019. – 244 с.
4. Анализ параметров модулированных вибрационных процессов и их огибающих по результатам имитационного моделирования / А. Г. Соколова [и др.] // Вестник Научно-Технического Развития. – 2014. – Т. 84, № 8. – С. 39-53.
5. Groth, A. Estimation of periodicity in time series by ordinal analysis with application to speech : Preprint series DFG-SPP 1114 / A. Groth. – Bremen : Zentrum für Technomathematik, Univ. Bremen, 2002. – 13 с. – Вып. 14.
6. Воскобойников, Ю. Е. Фильтрация сигналов и изображений : фурье и вейвлет алгоритмы (с примерами в Mathcad) : монография / Ю. Е. Воскобойников, А. В. Гочаков, А. Б. Колкер. – Новосибирск : Новосиб. гос. архитектур.-строит. ун-т (Сибстрин), 2010. – 188 с.
7. Алгоритм оценки частоты повторения ударных импульсов на основе периодического вейвлет-преобразования / И. Г. Давыдов [и др.] // Доклады Белорусского Государственного Университета Информатики И Радиоэлектроники. – 2014. – Т. 84, № 6. – С. 22-27.
8. Вольфовский, Б. Н. Способ корреляционной обработки смеси гармонического сигнала с шумом / Б. Н. Вольфовский. – 2013.

9. Токмакова, А. А. Выделение периодической компоненты из временного ряда / А. А. Токмакова // Машинное Обучение И Анализ Данных. – 2011. – Т. 1, № 1. – С. 40-50.
10. Кечик, Д. А. Оценка мгновенной частоты спектральных составляющих нестационарного виброакустического сигнала оконным методом прони / Д. А. Кечик // III Всероссийская акустическая конференция / Политех-пресс. – СПб, 2020. – С. 7.
11. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования. Анализ вибрации. Учебное пособие / А.В. Барков, Н. А. Баркова. – Санкт-Петербург : СПбГМТУ, 2004. – 156 с.
12. Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median / C. Leys [et al.] // J. Exp. Soc. Psychol. – 2013. – Vol. 49, № 4. – P. 764-766.
13. Воробьев, В. И. Методы межкомпонентной фазовой обработки спектральных составляющих нестационарных сигналов вибрации / В. И. Воробьев, С. Ю. Борисенко // XXVII сессия Российского акустического общества, посвященная памяти ученых-акустиков ФГУП Крыловский государственный научный центр А. В. Смольякова и В. И. Попкова. – 2014.
14. Космач, Н. В. Способ вибрационной диагностики подшипников качения / Н. В. Космач, Ю. П. Асламов. – 2020.
15. Кечик, Д. А. SegmentedAutoregression [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/Dan-Kechik/SegmentedAutoregression>. – Дата доступа: 12.02.2020.
16. Kechik, D. Bearing 6213 Norm/OR Dataset / D. Kechik, Y. Aslamov, I. Davydov. – 18.10.2020.