

УДК 62-94
OECD 2.11

Сравнение двух методов оценки пиковых значений виброускорения, виброскорости и виброперемещения

Руденко Ю.К.¹, Воронков А.А.²

¹Инженер-физик ООО "ПКФ Цифровые приборы"
г. Москва, Россия

²Ведущий инженер ООО НПФ «ЭлектронДизайн»
г. Москва, Россия

Аннотация

В работе представлены два метода оценки пиковых параметров вибрации (виброускорения, виброскорости и виброперемещения): методом третьоктавного анализа и методом интегрирования сигнала виброускорения с последующим применением алгоритма быстрого преобразования Фурье (БПФ). Работа включала в себя запись сигнала виброускорения и текущих среднеквадратичных значений виброускорения в третьоктавных полосах частот при помощи виброметров-анализаторов спектра Экофизика-110А и одноканальных датчиков типа AP2006. С использованием программного обеспечения Signal+3G RTA полученные данные обрабатывались двумя разными методами с целью оценки пиковых значений виброускорения, скорости и перемещения. В результате было показано, что два метода коррелируют между собой при выявлении доминирующих составляющих частотного спектра, абсолютные значения пиковых величин, полученные разными методами, отличаются не более чем на 60 %.

Ключевые слова: виброускорение, виброскорость, виброперемещение, третьоктавный анализ, быстрое преобразование Фурье.

A comparison of two methods for evaluating the peak values of vibration acceleration, velocity and displacement

Rudenko Yu.K.^{1}, Voronkov A.A.²*

*¹Engineer-physicist, LLC "PKF Zifrovye pribory",
Moscow, Russia*

*²Leading engineer, LLC NPF «ElectronDesign»,
Moscow, Russia*

Abstract

Two methods for evaluating the peak values of vibration (vibration acceleration, vibration velocity and vibration displacement) are shown: the method of one-third octave analysis and the method of integrating the vibration acceleration signal with subsequent application of the fast Fourier transform (FFT) algorithm. The real-time signal and the current root mean square values in the one-third octave bands of vibration acceleration were recorded by the vibration meter and spectrum analyzer EKOPHYSIKA-110A with single-channel acceleration transducers AP2006. The obtained data were processed in two different ways by the software Signal+3G RTA to evaluate the peak-to-peak values of vibration acceleration, velocity and displacement. As a result a good correlation of two methods was shown when identifying the dominant components of the frequency spectrum. The difference in the absolute peak-to-peak values obtained by two methods is not more than 60%.

Keywords: *vibration acceleration, velocity, displacement, one-third octave analysis, fast Fourier transform algorithm.*

Введение

Измерение и оценка такого параметра, как пиковая виброскорость, необходимо в задачах строительной виброметрии, в том числе по ГОСТ Р 52892-2007 [1]. Для его анализа системами на базе вибометров-анализаторов спектра Экофизика-110А осуществляется запись зависимости сигнала виброускорения от времени с последующей обработкой либо обработка специализированным встроенным ПО прибора («Вибрация зданий ЭФБ-НФ»). При этом необходимо обладать специальным программным обеспечением, которое позволяет произвести интегрирование сигнала во временной области для получения сигнала виброскорости, и с помощью математической обработки, например, быстрого преобразования Фурье, получить спектр скорости.

В таких задачах часто приходится анализировать квазистационарные процессы, когда заранее известен ориентировочный спектральный состав вибрации. Например, при оценке воздействия вибрации на здания, находящиеся рядом с метро и наземным транспортом. В этих случаях можно оценить преобладающие (доминирующие) частоты и получить пиковую виброскорость более простым способом. В данной работе описан метод оценки этих параметров из третьоктавного спектра среднеквадратичных значений виброускорения и сравнение его с более точным методом анализа временной реализации сигнала. Помимо этого также приведено сравнение пиковых значений виброускорения и виброперемещения, полученных двумя разными способами.

1. Описание методов оценки

Исследуемый сигнал виброускорения был записан с помощью вибометра-анализатора спектра Экофизика-110А и малошумящих одноканальных датчиков типа AP2006. Точка измерения находилась на фундаменте строящегося здания в центральном районе города Москвы. Движение всех транспортных потоков (метро, трамваи, автотранспорт) в районе обследуемого здания было типичным для буднего дня. Предварительно выяснилось, что вибрация имела два вклада, один из которых был связан со случайной вибрацией, другой вклад носил периодический характер. Предполагалось, что источником случайной вибрации являлись строительные работы недалеко от точки измерения. При этом соотношение двух вкладов таково, что случайной вибрацией можно было пренебречь. Поэтому можно считать, что исследуемый процесс носил квазистационарный характер. В качестве анализа было выбрано вертикальное направление, так как уровни виброускорения по нему достигали больших значений, по сравнению с горизонтальным.

1.1. Описание метода оценки с помощью третьоктавного анализа спектра

В предположении периодического постоянного и синусоидального характера виброускорения a зависимость от времени $a(t)$ выражается следующим образом:

$$a(t) = A * \sin(2\pi ft), \quad (1)$$

где A – амплитуда колебания, f – его частота. Тогда модуль виброскорости V и виброперемещения D можно выразить [2]:

$$V = \frac{A}{2\pi f}, \quad D = \frac{A}{4\pi^2 f^2}, \quad (2)$$

и связь уровней виброскорости и виброперемещения с уровнем виброускорения:

$$L_A = 20 \lg \left(\frac{A}{A_0} \right), \quad A_0 = \frac{10^{-6} \text{ м}}{c^2}, \quad (3)$$

$$L_V = 20 \lg \left(\frac{V}{V_0} \right) = L_A + 20 \lg \left(\frac{A_0}{2\pi f V_0} \right), V_0 = 50 * 10^{-9} \frac{\text{М}}{\text{с}},$$
$$L_D = 20 \lg \left(\frac{D}{D_0} \right) = L_D = L_A + 20 \lg \left(\frac{A_0}{4\pi^2 f^2 D_0} \right), D_0 = 10^{-12} \text{м}.$$

Для анализа были выбраны третьоктавные полосы частот 3.15 - 100 Гц. В данном частотном диапазоне источниками вибрации, воздействующей на здание, могут быть наземный транспорт (10 – 16 Гц) и поезда метрополитена (16 – 63 Гц) [3]. За пределами указанного частотного диапазона вклад в собственные колебания зданий пренебрежимо мал, вибрацию могут создавать специальные источники, которые в данном исследовании зафиксированы не были и поэтому не рассматриваются.

Третьоктавный спектр ускорения строился по текущим среднеквадратичным значениям ускорения за 5 сек (СКЗ 5 сек) в третьоктавных полосах частот. Третьоктавные спектры скорости и перемещения строились по значениям, полученным из уровней скорости и перемещения по формулам (3) с использованием уровней ускорения СКЗ 5 сек.

Чтобы рассчитать описываемым способом пиковые значения виброускорения (характеристика Пик-Пик), необходимо увеличить в $2\sqrt{2}$ раз максимальные текущие среднеквадратичные значения ускорения за 5 сек (СКЗ 5 сек) в третьоктавных полосах частот (так как сигнал в каждой третьоктавной полосе предполагается синусоидальным и рассматривается параметр пик-пик). Окончательная формула для расчета пикового ускорения имела вид:

$$a_{peak,5 sec} = \sum_{3.15-100 \text{ Hz}} a_{max rms,5 sec} \times 2\sqrt{2}, \quad (4)$$

аналогично выглядят формулы для пиковых скорости $v_{peak,5 sec}$ и перемещения $d_{peak,5 sec}$.

Данный метод основан на допущении, что измеряемый процесс является квазистационарным. Фактическое отсутствие источников вибрации в рассматриваемом диапазоне частот тоже можно отнести к квазистационарному процессу. Длительность исследуемого процесса много больше $1/f = 1/2.81 \text{ Гц}^{-1} = 0.4 \text{ сек}$.

Помимо этого предполагается, что вибрацию в каждой третьоктавной полосе можно заменить колебанием только на одной центральной частоте полосы. Метод предполагает суммирование пиковых значений по третьоктавам в исследуемом диапазоне частот, что также является допущением, так как в действительности общее пиковое значение было бы равно сумме значений амплитуд отдельных спектральных составляющих только в том случае, когда все эти составляющие имели бы одинаковую фазу, что на практике не реализуется. Поэтому оценка таким методом не является точной и заведомо предполагается завышенной.

Однако расчеты показали, что значение пиковых параметров при измерениях быстроменяющихся процессов (например, пир забивке свай) является меньше полученных более точным вторым методом. Это может быть объяснено выбором времени усреднения при измерении спектра (СКЗ 5 сек), которое существенно больше типового времени вибрационного события. Расчет с максимальными значениями из 1 сек СКЗ показал, что разница пиковых значений уменьшается в два раза. Вторая причина занижения результата оценки пикового ускорения через третьоктавный спектр в сравнении с прямым выделением пикового значения это эффекты, связанные с групповой задержкой при октавном анализе (особенно низкочастотном).

1.2. Описание метода оценки с использованием сигнала виброускорения

Оценка вторым методом предполагает использование алгоритмов фильтрации в временной области частот и последующем выделении пикового значения в временной форме сигнала [4]. Все указанные процедуры реализовывались ПО Signal+3G RTA [5]. Измеренный сигнал виброускорения с начальной частотой дискретизации 750 Гц с применением фильтра высоких частот и децимации приводился к сигналу с нижней частотой полезного сигнала, равной 2,8 Гц, и частотой дискретизации 250 Гц. Сигнал виброускорения и виброперемещения получался путем интегрирования и двойного интегрирования из сигнала виброускорения в том же ПО. В алгоритме преобразования Фурье использовалось окно 32 768 точек, что при частоте дискретизации 250 Гц соответствует 131 сек. В качестве временного окна применялось окно Вишнякова (модифицированное окно Flap-Top (ISO 18431) [6].

Пиковые значения (характеристика Пик-Пик) соответствовали размаху (максимальному разбросу) зарегистрированных мгновенных значений сигнала. Дополнительно к выделению пикового значения для ускорения, скорости и перемещения рассчитывался узкополосный спектр с применением алгоритма БПФ. По сравнению с вышеизложенным методом данный метод позволяет проводить спектральный анализ сигнала с большим разрешением по частоте и фиксировать точные пиковые значения величин без предварительного усреднения по времени.

Результаты измерений для одного и того же временного фрагмента двумя методами представлены в пункте 2.

2. Сравнение пиковых величин и спектров, полученных разными методами

2.1. Сравнение пиковых величин

На рис. 1-3 представлены записи сигналов ускорения, скорости и перемещения в зависимости от времени в частотном диапазоне 2,8 - 125 Гц (время показано в секундах относительно начала анализируемого фрагмента). На графиках показано, как было рассчитано пиковое значение виброускорения вторым способом.

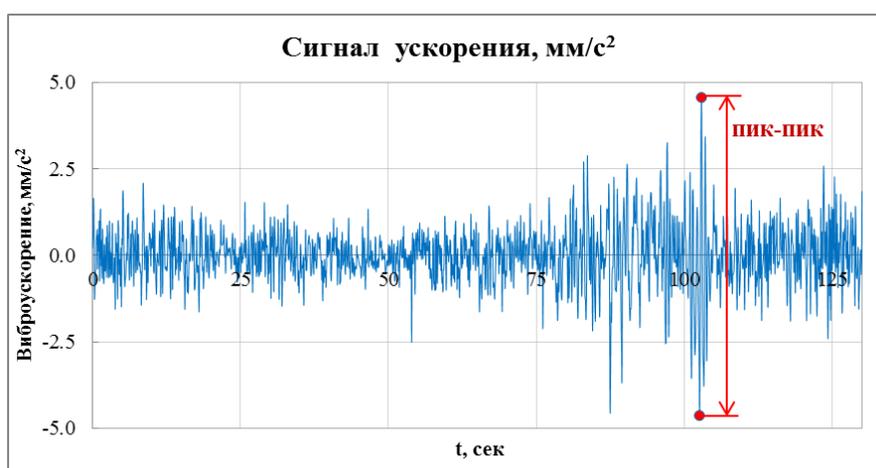


Рис. 1. Зависимость значения виброускорения от времени

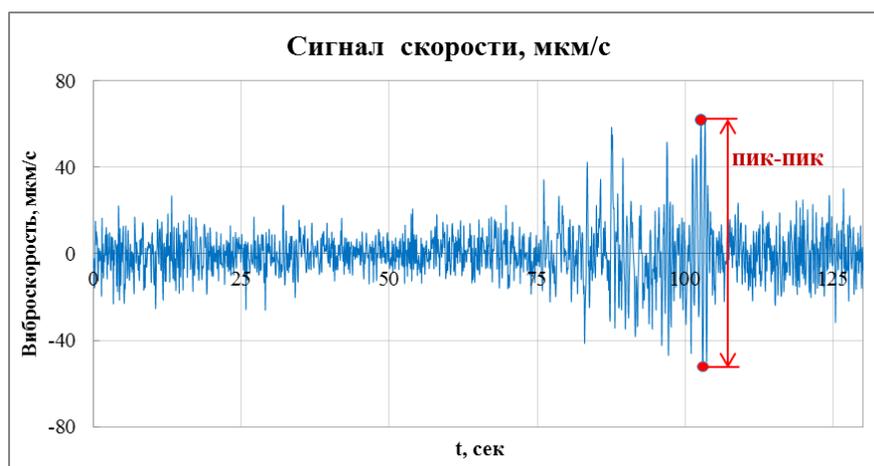


Рис. 2. Зависимость значения виброскорости от времени

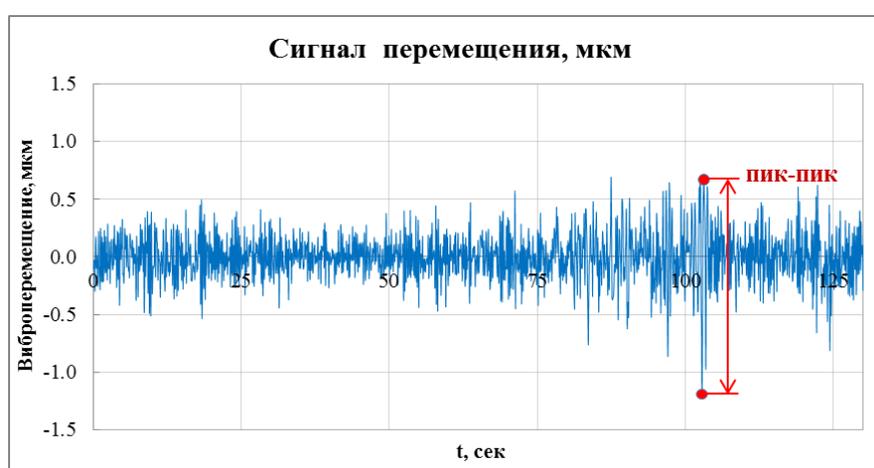


Рис. 3. Зависимость значения виброперемещения от времени

В таблице 1 представлено сравнение параметров пик-пик величин, полученных разными методами. Метод суммирования по третьоктавам дает завышенную оценку по сравнению с методом, в котором анализируется сигнал, как было указано в пункте 1.2. Также помимо представленных выше измерение измерений было проведено аналогичное сравнение расчёта пиковых значений двумя методами для вибрации от забивки свай. В данном случае оценка по первому методу была меньше, чем по второму (объяснение также приведено в п. 1.2), но отличие составляло не более 50%.

Таблица 1

Пиковые величины ускорения, скорости и перемещения

Параметр	Первый метод (третьоктавный анализ)	Второй метод (анализ сигнала)	Соотношение
Ускорение, пик-пик, мм/с ²	17,2	10,9	58%
Скорость, пик-пик, мкм/с	196	164	20%
Перемещение, пик-пик, мкм/с	3,34	2,46	36%

2.2. Сравнение спектров

В результате обработки двумя различными методами были получены спектры виброускорения (рис. 4, 5), виброскорости (рис. 6, 7) и перемещения (рис. 8, 9). По оси X, соответствующей оси частот, был выбран логарифмический масштаб.



Рис. 4. Третьооктавный спектр ускорения

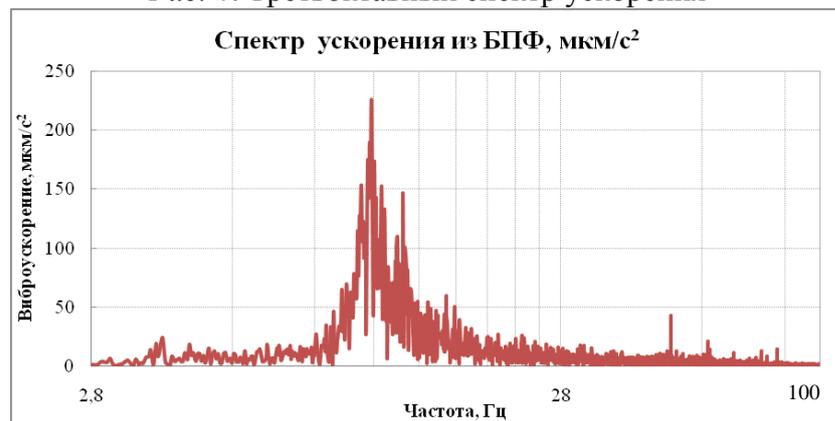


Рис. 5. Спектр ускорения, полученный из БПФ сигнала



Рис. 6. Третьооктавный спектр скорости

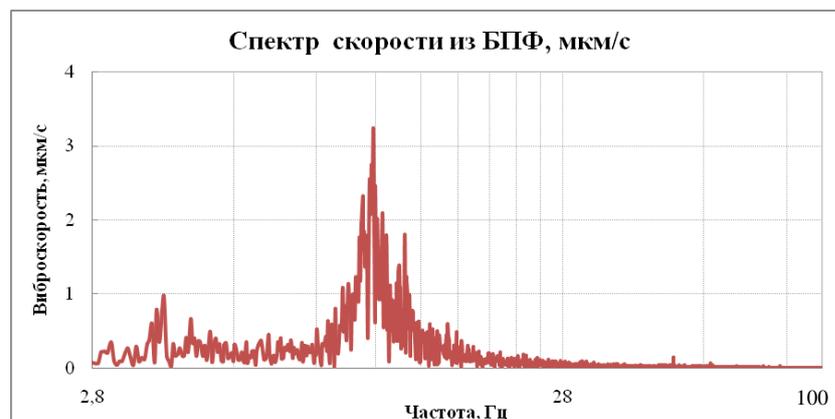


Рис. 7. Спектр скорости, полученный из БПФ сигнала



Рис. 8. Третьоктавный спектр перемещения

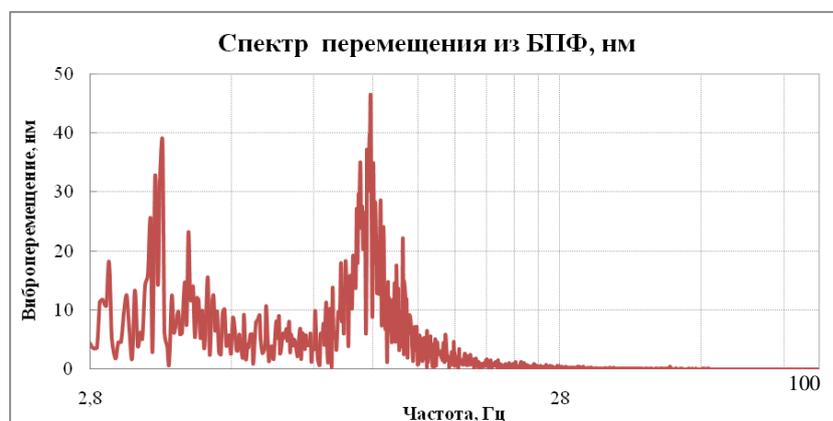


Рис. 9. Спектр перемещения, полученный из БПФ сигнала

Сравнивая полученные двумя разными способами графики спектров, можно сделать вывод, что частотные диапазоны, в которых сосредоточена энергия измеряемых вибрационных процессов, коррелируют между собой.

Заключение

В работе было проведено сравнение двух различных методов получения спектров пиковых виброускорения, скорости и перемещения для процесса, который предполагается квазистационарным. Сравнение показало, что методом спектрального анализа ускорения в третьоктавных полосах частот можно верно оценить частоты доминирующих составляющих и использовать данный метод, как более простой и менее трудоемкий, по сравнению с более точным узкополосным спектральным анализом. Пиковые значения скорости и перемещения совпадают с точностью до 50%, виброускорения – с точностью до 60%, что говорит о том, что методом суммирования по третьоктавам можно приближенно оценивать пиковые параметры вибрации.

Список литературы

1. ГОСТ Р 52892-2007. Измерение вибрации и оценка ее воздействия на конструкцию : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2008-10-01 / Федеральное агентство по техническому регулированию. – Текст : электронный // URL: <http://www.aero.garant.ru> (дата обращения: 20.02.2021)

2. Иванов, Н. И. Инженерная акустика. Теория и практика борьбы с шумом : учебник / Н. И. Иванов. Москва : Логос, 2008. - 422 с. - ISBN 978-5-98704-659-3. - Текст : непосредственный.

3. Цукерников, В.А. Экспериментальные исследования уровней вибрации перекрытий жилых зданий, вызванных движением поездов метрополитена Текст : непосредственный. / Цукерников, И.Е., Смирнов В.А. // Строительство и реконструкция. – 2016. - № 66. – С. 85 – 91.

4. ООО НПФ «ЭлектронДизайн». МИ ПКФ-16-029. Методика измерений скорости и ускорения вибрации строительных конструкций и грунтов / Аттестующая организация : ООО "ПКФ Цифровые приборы". Номер в реестре : ФР. 1.36.2016.24830. No. свид-ва об аттестации : 029-01.00279-2016. Дата свид-ва об аттестации : 08.08.2016. Текст : непосредственный.

5. ООО "ПКФ Цифровые приборы". Программное обеспечение Signal+3G. Инструкция пользователя. ПКДУ.411100.001.018. Редакция 3G.05. Текст : непосредственный.

6. ISO 18431. Mechanical vibration and shock — Signal processing — Part 1: General introduction : дата введения 2005-11 / Технический комитет : ISO/TC 108 Mechanical vibration, shock and condition monitoring. Текст : электронный // URL: <https://www.iso.org/ru/standard/35588.html> (дата обращения: 24.02.2021)