

## УДК 621.9



**Н.В. Лищенко,**  
к.т.н., доцент  
Одесская национа-  
льная академия пи-  
щевых технологий  
e-mail:  
odmnv@rabler.ru



**В.П. Ларшин,**  
д.т.н., профессор,  
Одесский национа-  
льный политехниче-  
ский университет  
e-mail: vplar-  
shin@rambler.ru

## ФОРМИРОВАНИЕ ИНФОРМАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ ВИБРАЦИЙ НА СТАНКАХ С ЧПУ

*Н.В. Лищенко, В.П. Ларшин.*  
*Формирование информационных сигналов при исследовании вибраций на станках с ЧПУ.* Разработан метод формирования временных информационных сигналов виброскорости и виброперемещения из предварительно фильтрованного временного сигнала виброускорения. Другие информационные сигналы получены на основе частотного представления указанных временных информационных сигналов.

*N.V. Lishchenko, V.P. Larshin.*  
*Information signals design in the study of vibrations on CNC machine.* A method for forming vibration velocity and displacement time domain information signals by means of mathematical processing of the pre-filtered acceleration time domain information signal is developed. Other information signals are obtained on the basis of frequency representation of the time domain information signals mentioned.

**Введение.** При исследовании вибраций, возникающих в упругой системе металлорежущего станка, в качестве первичных датчиков информации в основном используют виброакселерометры, выходной сигнал которых пропорционален величине ускорения корпуса вибродатчика. Экспериментальные исследования виброакселерометров AP2019 на станке мод.500V/5 при использовании системы сбора данных NI-DAQmx с программным обеспечением NI-LabVIEW показали, что выходной сигнал этих датчиков достаточно чувствителен к возникающим в зоне резания виброколебаниям, причем в широком частотном диапазоне: 0...25 кгц. Было также установлено, что, например, по мере износа сверл малого диаметра (2,85 мм и 4,7 мм) в частотном спектре сигнала виброускорения происходят непрерывные изменения двух видов. Во-первых, спектр сигнала из дискретного (решетчатого) типа превращается в непрерывный (признак неперiodического исходного временного сигнала). Во-вторых, на отдельных частотных интервалах появляются гармоники с нарастающими амплитудами по мере износа сверла, что выглядит как непрерывно-

изменяющаяся зависимость амплитуды от частоты. В момент, который предшествует поломке сверла, амплитуды этих гармоник максимальны, и это можно использовать для диагностики состояния сверла малого диаметра [1].

Исследование процесса плоского фрезерования концевой фрезой диаметром 18 мм также показало высокую чувствительность выходного сигнала виброакселерометра AP2019 к режимам фрезерования и жесткости технологической системы. Например, многофакторное планирование эксперимента позволило выявить однозначную зависимость сигнала виброакселерометра от следующих независимых элементов режима резания: глубины фрезерования, частоты вращения фрезы и подачи на зуб [2]. Однако для получения связи между виброграммами информационного сигнала датчика и профилограммами обработанной поверхности кроме исходного сигнала виброускорения необходимо иметь сигналы виброскорости и виброперемещения. Первый (виброскорость) может быть использован для оценки кинетической энергии колебаний, а второй (виброперемещение) – для оценки формирующейся при обработке микро – и макрогеометрии поверхности.

Целью настоящей статьи является разработка метода формирования информационных сигналов виброскорости и виброперемещения и их исследование на примере фрезерования заготовки с переменной статической жесткостью.

**Материал и результаты исследования.** Экспериментально наблюдаемое преобразование спектра сигнала виброускорения из решетчатого его вида в непрерывный вид является признаком его неперидичности. Это означает, что динамика упругой системы резания не может быть описана обыкновенными дифференциальными уравнениями с постоянными коэффициентами. Следовательно, упругая динамическая система является нестационарной в связи с теми изменениями, которые происходят в зоне резания по мере изменения жесткости заготовки, износа режущего инструмента, при изменении режимов резания и т.п. В этой связи наиболее адекватный метод изучения динамики технологической системы должен базироваться на фактически получаемой информации о процессе с последующей её цифровой обработкой, направленной на выявление диагностических признаков. Теоретический метод исследования динамики технологической системы должен заключаться не только в разработке и исследовании исходной математической модели упругой системы (дифференциальное уравнение колебаний и т.п.), но прежде всего в разработке математической модели информационного сигнала (при непрерывнодействующем источнике этого сигнала) и теории его преобразования для диагностики состояния технологической системы.

Известно, что при наличии исходного сигнала виброускорения переход к сигналам виброскорости и виброперемещения может быть выполнен методом математического интегрирования исходного сигнала. Первое интегрирование по времени дает виброскорость, а второе (интегрирование виброскорости) – виброперемещение. Однако попытки выполнить такое математическое преобразование сигнала часто оказываются безуспешными в связи с особенностями исходного сигнала виброускорения. Например, исходный сигнал фактического виброускорения (рис.1, а) независимо от степени его сложности в каждый момент времени может быть представлен его спектральным составом в виде амплитудно-частотной характеристики, которую в системе NI-DAQmx получают методом быстрого преобразования Фурье (БПФ). Эта процедура как правило не вызывает трудностей (рис.2,а). Что касается интегрирования сигнала виброускорения, то часто такая процедура не удаётся в связи с наличием в сигнале постоянной составляющей. Известно, что математическая операция интегрирования сигнала, содержащего постоянную составляющую, приводит к нарастающему отклонению результата интегрирования от нулевой линии. Причем величина этого отклонения намного превышает собственно переменную составляющую сигнала виброскорости. Поэтому смысл такого интегрирования теряется уже на этапе формирования сигнала виброскорости.

Правильно откалиброванный асселерометр должен давать сигнал без постоянной составляющей. Это следует из тривиального рассуждения о том, что математическая процедура дифференцирования сигнала виброскорости или виброперемещения по определению устраняет постоянную составляющую сигнала (производная от постоянной величины равна нулю). Однако на практике реально действующий источник сигнала виброускорения (первичный вибродатчик) содержит не только постоянную, но также медленно изменяющуюся низкочастотную часть этого сигнала. Это сводит на нет возможность математического получения информационных сигналов виброскорости и виброперемещения из первичного сигнала датчика виброускорения. Наличие постоянной составляющей сигнала виброускорения можно увидеть в спектре этого сигнала (рис.2, а).

Таким образом, необходимо перед интегрированием убрать постоянную составляющую из сигнала виброускорения, например, с помощью высокочастотного фильтра (highpass filter), который не пропускает постоянную и низкочастотную составляющие первичного сигнала виброускорения. Путь к такому фильтру в системе NI-DAQmx (с программным обеспечением NI-LabVIEW) следующий: Functions → Express → Signal Analysis → Filter. При этом необходимо правильно указать частоту среза этого фильтра (cutoff frequency). Полученный после фильтрации сигнал

виброускорення можна проконтролювати, наблюдаючи його частотний склад (рис.2, б), поскольку в самом сигнале виброускорення постоянная составляющая визуально не видна (рис.1 а и б).

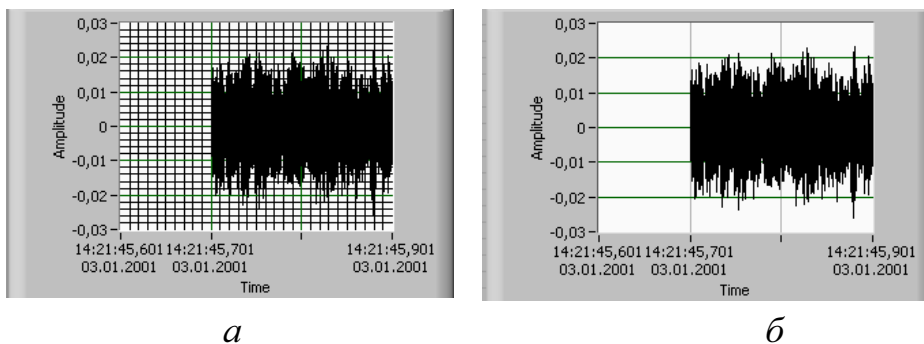


Рис. 1. Временной сигнал виброускорення исходный (а) и после фильтра с частотой среза 20 Гц (б) при расположении вибродатчика на шпиндельном узле по оси X станка.

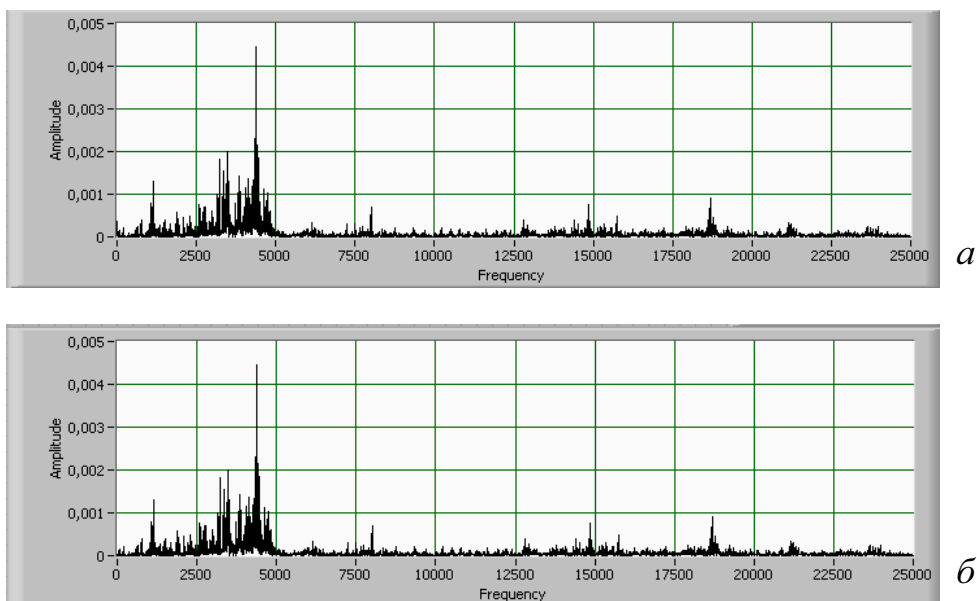


Рис. 2. Спектрограмма виброускорення, полученная из нефильтрованного (а) и фильтрованного (б) временного сигнала на интервале частот 0...25000 Гц.

После получения сигнала виброускорения, не содержащего постоянную и низкочастотную составляющую, процедура математического интегрирования в системе NI-DAQmx (с программным обеспечением NI-LabVIEW) выполняется по схеме: Functions → Mathematics → Integral & Diff → Time Domain Math ( $\int f(x)$ ). Далее производится настройка блока Integral (Sum[Xdt]).

Сформированные информационные сигналы виброскорости (рис.3, а) и виброускорения (рис.3, б) в системе NI-DAQmx можно использовать для диагностики состояния технологической системы металлорежущего станка с ЧПУ не только с точки зрения стойкости режущего инструмента для последующего управления стойкостью, но также для прогнозирования микро – и макрогеометрии обработанной поверхности. Этому будет посвящена следующая статья «Влияние вибраций на волнистость обрабатываемой поверхности при фрезеровании». А здесь следует дать анализ полученных информационных сигналов. Сравнивая полученные данные (рисунки 1, а; 2, а; 2, б), можно видеть, как последовательно (переходя от виброускорения к виброперемещению, минуя виброскорость) изменяется характеристика указанных сигналов, прежде всего по её частотному составу: уменьшается доля высокочастотных гармонических составляющих.

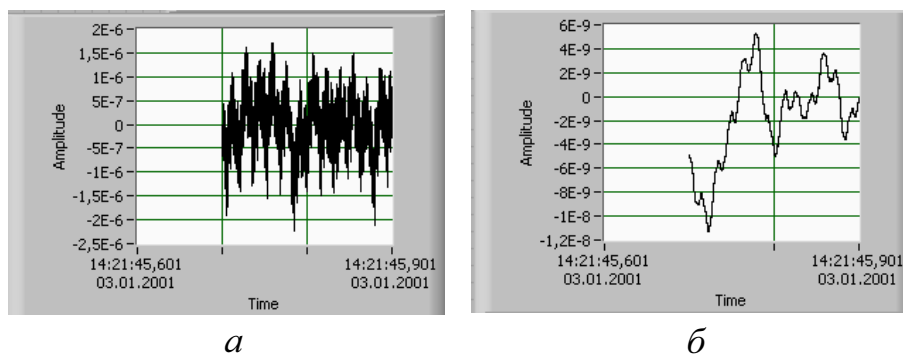


Рис. 3. Временной сигнал виброскорости (а) и виброперемещения (б) при расположении вибродатчика на шпиндельном узле по оси X станка.

Этот вывод можно подтвердить более наглядно, если построить спектрограммы сигналов виброускорения, виброскорости и виброперемещения (рис.4).

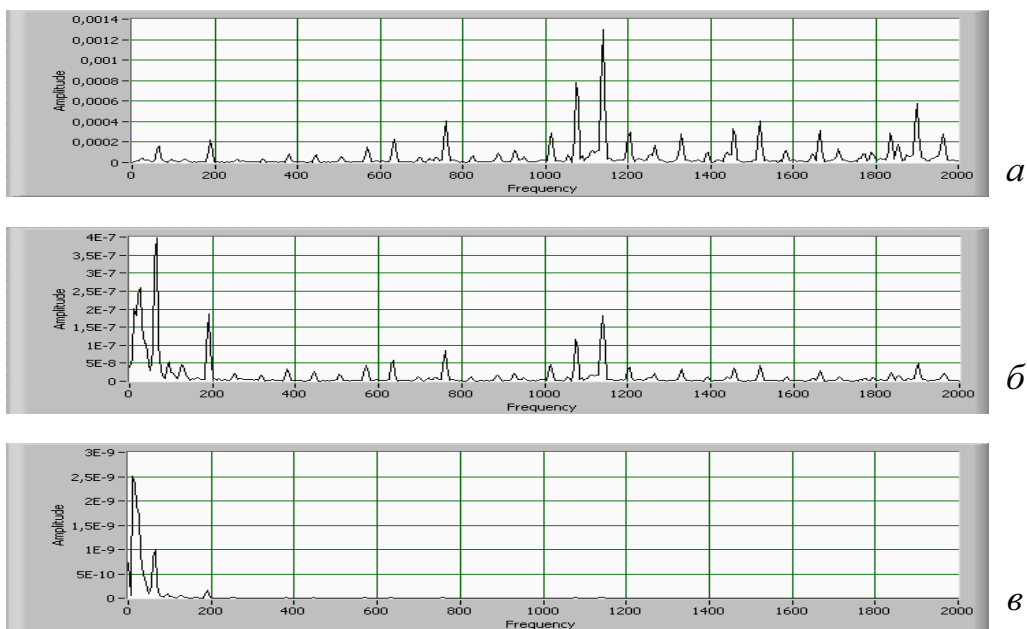


Рис. 4. Спектрограммы временного сигнала виброускорения (а), вибро- скорости (б) и виброперемещения (в) в интервале частот 0...2000 Гц при расположении вибродатчика на шпиндельном узле по оси X станка.

Видно, что по мере перехода от спектрограммы виброускорения (рис.4, а) к спектрограмме виброскорости (рис.4, б) и далее к спектрограмме виброперемещения (рис.4, в) доля высокочастотных составляющих сигнала последовательно уменьшается. Кроме того, наблюдая за амплитудами гармоник, имеющих одну и ту же частоту на различных спектрограммах, можно видеть, что, например, двум соседним гармоникам, имеющим определенное соотношение амплитуд на спектрограмме виброускорения (рис.4, а), соответствует противоположное соотношение амплитуд на спектрограмме виброскорости (рис.4, б). То же самое можно сказать, сравнивая между собой спектрограммы виброскорости (рис.4, б) и виброперемещения (рис.4, в). Этот вывод совпадает с аналогичным выводом, сформулированным в работе [3]. Пояснить отмеченную тенденцию можно следующим образом. Представим сигнал виброускорения суммой определенного числа гармонических составляющих как

$$a(t) = \sum_{i=1}^n A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i), \text{ где } A_i, \omega_i \text{ и } \varphi_i - \text{ амплитуда, угловая частота и фаза}$$

за  $i$ -й гармоніки. Після інтегрування цього сигналу як математическої часової функції, одержимо математическе вираженє для виброшкороности  $v(t) = -\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\omega_i} \cos(\omega_i t + \varphi_i)$ . Наступуюче інтегруванє цього вираженє дозволяє одержати математическе вираженє для сигналу виброперемещенє  $x(t) = -\sum_{i=1}^n \frac{A_i}{\omega_i^2} \sin(\omega_i t + \varphi_i)$ .

Ітак, перше звено інтегруванє має на вході виброшкороенє  $a(t)$ , а на выході – виброшкороенє  $v(t)$ . Коєффіциєнт усиленє цього звена вираженє отношенєм амплитуд и равен  $1/\omega_i$  для кожної  $i$ -й гармоніки спектра. Фазовий сдвиг (дополнительно к начальной фазе  $\varphi_i$ ) составляет  $-\pi/2$ . Таким образом, коєффіциєнт усиленє звена обратно пропорционален углової шкороности  $\omega_i$ . Т.е. с ростом  $\omega_i$  коєффіциєнт усиленє уменшаєся. Аналогичная закономерность наблюдается для второго звена інтегруванє. При этом передаточное отношенє двух последовательно соединенных интеграторов составляет  $1/\omega_i^2$ .

Описаний спосіб усунєння постійної и низкочастотної составляющих в исходном сигнале виброшкороенє позволил надежно формировать сигналы виброшкороности и виброперемещенє. Первый из этих сигналов (виброшкороенє) можно использовать для оценки кинетической энергии колебаний, а второй (виброперемещенє) – для прогнозирования параметров микро – и макрогеометрии поверхности, образуемой при фрезеровании.

Представляет интерес ещё один способ формирования информационных сигналов для системы технологической диагностики, основанный на алгоритме перехода от временного представления сигнала к его частотному представлению. Для этого формируются временные макро – и микровыборки исходного временного сигнала. Протяженность каждой макровыборки составляет в нашем случае 0,2 секунды и характеризует разрешающую способность информационного сигнала по времени для оценки состояния технологической системы. Учитывая, что длительность технологических переходов резания при обработке заготовок на металлорежущих станках с ЧПУ составляет гораздо большее время (от нескольких секунд до нескольких минут и более), можно заключить, что указанный макрошаг дискретизации по времени (0,2 секунды) является приемлемым для систем технологической диагностики.

Временные микровыборки исходного сигнала от датчика определяются частотой дискретизации первичного сигнала датчика. В нашем слу-

чае это 50 кГц, что соответствует требованиям известной теоремы Котельникова (в зарубежной литературе: the sampling theorem). Следовательно, период снятия одного отсчета аналогового (непрерывного во времени) сигнала составляет  $0,2 \cdot 10^{-4}$  секунд. То есть, в течение временного интервала 0,2 секунды передается последовательность отсчетов мгновенных амплитуд сигнала, состоящая из  $N = 0,2 / (0,2 \cdot 10^{-4}) = 10^4$  отсчетов. Все эти  $10^4$  отсчетов заменяются «одной точкой» «на графике» изменения соответствующего значения параметра сигнала во времени (рис.5). Следующая «точка» информационного сигнала появляется через интервал 0,2 секунды и так далее. Здесь следует отметить условность термина «на графике», т.к. по определению это набор чисел, отстоящих друг от друга на интервал времени  $0,2 \cdot 10^{-4}$  секунды при квантовании первичного аналогового сигнала во временной области его изменения и 0,2 секунды при формировании нового дискретного информационного сигнала.

В качестве информационной оценки содержания указанной «одной точки» можно выбрать одну из предлагаемых опций для временного представления сигнала: RMS (среднеквадратическое значение, т.е. значение корня квадратного из делённой на количество отсчётов, т.е на  $10^4$ , суммы квадратов мгновенных амплитуд) или Range (размах, т.е. разность между наибольшим и наименьшим значениями мгновенных амплитуд временного сигнала на интервале времени 0,2 секунды). Кроме того, имеется возможность работы со спектром сигнала (распределение амплитуд гармонических составляющих сигнала по оси частот или спектральная плотность), т.е. с его частотным представлением. Это частотное представление получено методом БПФ из временного представления на участке макровыборки длительностью 0,2 секунды. В размерность спектральной плотности  $S(\omega)$  или  $S(f)$ , при  $\omega = 2\pi f$ , входит размерность амплитуды сигнала в первой степени. Поэтому функцию спектральной плотности  $S(f)$  называют амплитудным спектром [4]. В блоке Configure Spectral Measurements эту функцию называют Magnitude (peak). В более узком смысле амплитудный спектр – это модуль функции спектральной плотности, т.е.  $|S(f)|$ .

Можно сформировать сигнал, характеризующий площадь под амплитудной спектрограммой. Величина этого сигнала для каждого интервала времени (0,2 секунды) может быть представлена выражением

$$\int_0^{f_{\max}} |S(f)| df \approx \sum_{i=1}^n S(f_i) \Delta f = \Delta f \sum_{i=1}^n S(f_i)$$

Последовательность отсчетов, полученных по указанному выражению при  $n = 5000$ ,  $\Delta f = 5$  Гц,  $f_{\max} = 25$  кГц и расположенных по оси времени фрезерования (с дискретностью 0,2 секунды), представляет собой информаци-



онный сигнал, показанный, например, на рис.5 при следующих условиях фрезерования на станке мод. 500V/5 (обрабатывающий центр). Частота вращения фрезы  $n = 3800 \text{ мин}^{-1}$ , подача  $S_z = 0,1 \text{ мм/зуб}$ , глубина резания  $t = 0,5 \text{ мм}$ . Режущий инструмент: фреза концевая  $\text{Ø}18 \text{ мм}$  из быстрорежущей стали P6M5 с числом зубьев  $z = 6$ . Заготовка призматической формы из материала Ст.3, имеющая переменную статическую жесткость по длине фрезерования 210 мм (участок “Cutting” на рис.5), причем жесткость уменьшается от начала указанного участка к его концу.

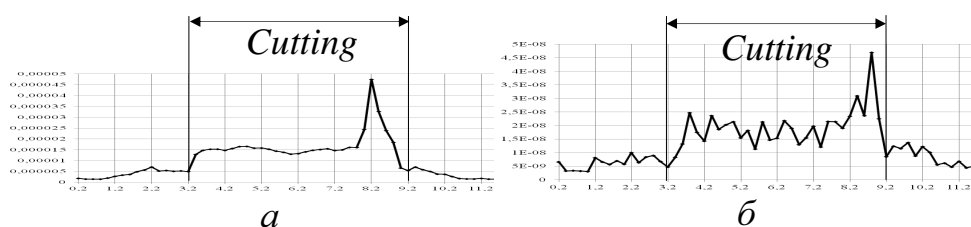


Рис. 5. Изменение площади под кривой амплитудной спектрограммы виброскорости (а) и виброперемещения (б) при расположении вибродатчика по оси  $X$  станка на шпиндельном узле при фрезеровании.

Видно, что сформированные информационные сигналы (рис.5) отражают особенности указанной обработки, причем сигнал, характеризующий виброперемещение, отражает не только участок с наименьшей жесткостью (виброперемещение шпинделя увеличивается в конце технологического перехода), но также макрогеометрию обработанной поверхности: колебательный процесс на участке резания “Cutting”.

Описанный способ формирования информационных вибросигналов использован для разработки системы технологической диагностики по критериям стойкости режущего инструмента и качества обработанной поверхности.

**Выводы.** 1. Сформулирован новый теоретический метод исследования динамики упругой системы резания, заключающийся в разработке математической модели информационного сигнала, характеризующего состояние технологической системы металлорежущего станка. 2. Разработан способ формирования временных информационных сигналов виброскорости и виброперемещения путем математической обработки временного информационного сигнала виброускорения с предварительной фильтра-

цией этого сигнала. 3. Предложен новый информационный сигнал, характеризующий состояние технологической системы – изменение площади под амплитудной спектрограммой временных информационных сигналов виброускорения, виброскорости и виброперемещения, причем соответствующую спектрограмму получают методом БПФ на фиксированном временном участке изменения соответствующего информационного сигнала.

### Литература

1. Ларшин, В.П. Исследование виброустойчивости инструмента при сверлении отверстий малого диаметра / В.П. Ларшин, Н.В. Лищенко, Р.Р. Башаров // Межвузовский научный сборник «Современные тенденции в технологиях металлообработки и конструкциях металлообрабатывающих машин и комплектующих изделий». – Уфа: УГАТУ, 2013. – С.20-25.

2. Лищенко, Н.В. Исследование вибраций в технологической системе на основе многофакторного планирования эксперимента // Перспективні технології та прилади: збір-ник наукових праць. – Луцьк, 2014. – Вип. 5 (листопад 2014) . – С.88-93.

3. Branscombe, E.A. Investigation of vibration related signals monitoring of large open-pit rotary electric blasthole drills. A thesis for the degree of Master of Applied Science [Электронный ресурс]. – Электрон. текстовые данные (9,48 Мб) // <http://yandex.ua/yandsearch?lr=145&clid=1976626&text=3.%09> (дата 09.01.2015).

4. Гутников, В.С. Фильтрация измерительных сигналов / В.С. Гутников. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1990. – 192 с.

*Надійшла до редакції 19.01.2015*