

УДК 621.317;004.04

Использование спектрального анализа методом Берга при построении программно-математического обеспечения оптических систем вибродиагностики

Зайцев Е.А.¹, Сидорчук В.Е.², Шпилька А.Н.³

¹Институт электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, 03680, г. Киев - 57, Украина

²Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, 02156, г. Киев, Украина

³Полтавский национальный технический университет им. Ю. Кондратюка,
пр. Первомайский, 24, 36011, г. Полтава, Украина

Поступила 01.03.2016

Принята к печати 30.07.2016

Бесконтактное измерение параметров механических колебаний вращающихся диффузно отражающих поверхностей используется в условиях, когда контактные датчики не применяются по ряду причин, среди которых – затрудненный доступ к объекту, небольшие размеры контролируемого участка, контролируемый участок имеет высокую температуру или подвержен влиянию сильного электромагнитного поля. Целью настоящей работы являлась разработка и экспериментальная проверка программного обеспечения для спектрального анализа вибраций контролируемых объектов методом максимальной энтропии Берга для бесконтактной системы вибродиагностики. Для уменьшения влияния неинформативных параметров анализируемого сигнала, таких как шум и тренд (низкочастотные шумы, влияние температуры), программным образом реализован метод предварительной фильтрации на основе регрессионного анализа. Бесконтактный контроль параметров вибраций механических колебаний реализуется с помощью лазерной измерительной системы фазового типа (ЛИСФТ), которая построена на основе фотоэлектрического метода. Такая ЛИСФТ лишена недостатков систем, принцип работы которых основан на эффекте Доплера и интерференции, позволяющих измерять амплитуды и фазы гармонических вибраций, но с их помощью сложно исследовать полигармоничные (т.е. содержащие две и более гармоники) и большие по амплитуде вибрации. Для обеспечения анализа полученных вибросигналов для ЛИСФТ разработаны специальные программно-математические средства в среде графического программирования *LabVIEW*. Экспериментальные исследования предложенного метода анализа спектра мощности вибросигнала проверены при оценке диагностической информации, полученной при измерении вибрации обрабатываемой поверхности системы алмазного шлифования твердого сплава ВК8. В результате работы программно-математического комплекса получен спектр «очищенного» от неинформативных параметров сигнала, соответствующего вибрационным процессам наблюдаемого объекта.

Ключевые слова: метод Берга, метод максимальной энтропии, лазерный измеритель вибраций, спектральная плотность мощности.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

Адрес для переписки:

Сидорчук В.Е.
Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, 02156, г. Киев, Украина
e-mail: sudorchuk@ipnet.ua

Address for correspondence:

Sydorchuk V.E.
Kiev National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, 02156, Kiev, Ukraine
e-mail: sudorchuk@ipnet.ua

Для цитирования:

Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е., Шпилька А.Н.
Использование спектрального анализа методом Берга при построении программно-математического обеспечения оптических систем вибродиагностики.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 186–194.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

For citation:

Zaitsev E.O., Sydorchuk V.E., Shpilka A.N.
[Application of the spectrum analysis with using Berg method to developed special software tools for optical vibration diagnostics system].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 186–194 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

Application of the spectrum analysis with using Berg method to developed special software tools for optical vibration diagnostics system

Zaitsev E.O.¹, Sydorчук V.E.², Shpilka A.N.³

¹The Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine,
Peremogy Ave., 56, 03680, Kiev - 57, Ukraine

²Kiev National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, 02156, Kiev, Ukraine

³Poltava national technical Yuri Kondratyuk university,
Pervomayskiy Ave, 24, 36011, Poltava, Ukraine

Received 01.03.2016

Accepted for publication 30.07.2016

Abstract. The objective of this paper is development and experimental verification special software of spectral analysis. Spectral analysis use of controlled vibrations objects. Spectral analysis of vibration based on use maximum-entropy autoregressive method of spectral analysis by the Berg algorithm. For measured signals use preliminary analysis based on regression analysis. This analysis of the signal enables to eliminate uninformative parameters such as – the noise and the trend. For preliminary analysis developed special software tools. Non-contact measurement of mechanical vibrations parameters rotating diffusely-reflecting surfaces used in circumstances where the use of contact sensors difficult or impossible for a number of reasons, including lack of access to the object, the small size of the controlled area controlled portion has a high temperature or is affected by strong electromagnetic fields. For control use offered laser measuring system. This measuring system overcomes the shortcomings interference or Doppler optical measuring systems. Such as measure the large amplitude and inharmonious vibration. On the basis of the proposed methods developed special software tools for use measuring laser system. LabVIEW using for developed special software. Experimental research of the proposed method of vibration signals processing is checked in the analysis of the diagnostic information obtained by measuring the vibration system grinding diamond wheel cold solid tungsten-containing alloy TK8. A result of work special software tools was complex spectrum obtained «purified» from non-informative parameters. Spectrum of the signal corresponding to the vibration process observed object.

Keywords: algorithm Berg, maximum entropy method, laser vibrodiagnostics, power spectral density.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

Адрес для переписки:

Сидорчук В.Е.
Киевский национальный торгово-экономический университет,
ул. Киото, 19, 02156, г. Киев, Украина
e-mail: sudorchuk@ipnet.ua

Address for correspondence:

Sydorchuk V.E.
Kiev National University of Trade and Economics,
Kyoto str., 19, 02156, Kiev, Ukraine
e-mail: sudorchuk@ipnet.ua

Для цитирования:

Зайцев Е.А., Сидорчук В.Е., Шпилька А.Н.
Использование спектрального анализа методом Берга при построении программно-математического обеспечения оптических систем вибродиагностики.
Приборы и методы измерений.
2016. – Т. 7, № 2. – С. 186–194.
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

For citation:

Zaitsev E.O., Sydorчук V.E., Shpilka A.N.
[Application of the spectrum analysis with using Berg method to developed special software tools for optical vibration diagnostics system].
Pribory i metody izmerenij [Devices and Methods of Measurements].
2016, vol. 7, no. 2, pp. 186–194 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-186-194

Введение

Системы бесконтактной вибродиагностики находят свое применение при технологическом и непрерывном контроле состояния специального инженерного оборудования. Так, например, при создании новых типов обрабатывающих инструментов на основе синтетических алмазов появилась возможность эффективного шлифования труднообрабатываемых материалов, таких как керамогранит, гранит, бетон, сталь, железобетон и прочие материалы. Такая обработка неразрывно связана с возникновением вибраций, параметры которых зависят от технического состояния оборудования и особенностей взаимодействия рабочей поверхности шлифовальных кругов с обрабатываемым материалом. В связи с этим возникает необходимость контроля механических колебаний в зоне обработки с целью эффективного применения методов их гашения. Также довольно актуальной задачей остается бесконтактный контроль параметров вибраций оборудования электроэнергетики. В этом случае интенсивность и характер возникающих вибраций в основном зависят от технического состояния оборудования.

При контроле состояния оборудования довольно часто приходится сталкиваться с условиями, когда применение контактных датчиков сложно или невозможно по ряду причин, среди которых – затрудненный доступ к объекту, небольшие размеры контролируемого участка, контролируемый участок имеет высокую температуру или подвержен влиянию сильного электромагнитного поля. Поэтому актуальной задачей остается бесконтактный контроль параметров вибраций в рабочей зоне.

Рассмотрению вопросов разработки и реализации мониторинговых систем бесконтактного контроля уделяется важное место в публикациях зарубежных и отечественных исследователей [1–5]. Среди описанных систем мониторинга наибольшее распространение получили системы, построенные на следующих методах контроля [5]:

- лазерные доплеровские виброметры;
- лазерные интерференционные виброметры;
- лазерные фотоэлектрические виброметры.

Системы вибродиагностики, принцип работы которых основан на эффекте Доплера и интерференции, позволяют измерять амплитуды и фазы гармонических вибраций, но с их помощью сложно исследовать полигармоничные и большие по амплитуде вибрации. Также к их недостаткам

можно отнести достаточно дорогую и сложную оптическую часть, жесткие требования к пространственной и временной когерентности лазерного источника излучения, высокие требования к качеству поверхности исследуемого объекта [1]. Перечисленных недостатков лишены лазерные виброметры фотоэлектрического типа. К системе, которая построена на основе фотоэлектрического метода, относится лазерная измерительная система фазового типа (ЛИСФТ), разработанная в Институте электродинамики НАН Украины. Такая ЛИСФТ позволяет измерять вибрации частотой от 15 Гц до 10 кГц и амплитудой до 1 см на расстоянии до 30 м до объекта наблюдения. Принцип работы ЛИСФТ основан на высокочастотной модуляции интенсивности лазерного излучения с последующим измерением фазового сдвига огибающей отраженного сигнала относительно излучаемого, при этом модуляция исследуемого фазового сдвига прямо пропорциональна вибрациям исследуемой поверхности. Как известно из [6], фазовые системы имеют наименьшую погрешность и обеспечивают наивысшую точность результата измерения. Поэтому перспективным направлением расширения функциональных возможностей ЛИСФТ является их включение в информационно-измерительные системы. Это обеспечивает создание сложных экспертных систем, способных решать диагностические задачи, возникающие во время эксплуатации различного оборудования.

При этом, как показано в [7], для эффективной реализации экспертной системы используется программно-математическая обработка на основе быстрого преобразования Фурье. Применение быстрого преобразования Фурье имеет ряд недостатков, которые приводят к появлению ошибок и неточностей при диагностике [8]. К таким недостаткам относятся: «растекание» спектра, необходимость использования спектральных «окон», обогащение спектра сигнала при ограниченной выборке исследуемого сигнала во времени, неоднородности (т.е. непостоянство возникающих составляющих) вибросигналов во времени [9] и др.

В этой связи для исследования вибросигналов широкое применение получили авторегрессионные алгоритмы параметрического спектрального анализа [10]. Как показано в [1], перспективным в данном случае является применение метода максимальной энтропии Берга для построения программно-математического обе-

спечения измерительной системы с учетом условий, описанных в [11].

Целью настоящей работы являлась разработка и экспериментальная проверка программного обеспечения для спектрального анализа вибраций контролируемых объектов методом максимальной энтропии Берга для бесконтактной системы вибродиагностики на основе ЛИСФТ.

Основная часть

Измерительный сигнал, соответствующий вибрациям контролируемой поверхности, полученный с помощью ЛИСФТ, представим в виде дискретного массива данных $x[n]$. Тогда $x[n]$ согласно [12] можно описать выражением:

$$x[n] = x_{basic}[n] + x_{vibr}[n] + x_{noise}[n], \quad (1)$$

где $x_{basic}[n]$ – трендовая (постоянная) составляющая вибрационного процесса; $x_{vibr}[n]$ – информационная составляющая вибрационного процесса; $x_{noise}[n]$ – шум; n – целое число, $n = 1, 2, \dots, N$, где N – длина выборки временного ряда вибрационного процесса.

В рассматриваемом случае компонента $x_{basic}[n]$, входящая в формулу (1), описывает медленно изменяющийся тренд и мало информативна при обработке твердых материалов. Одной из наиболее характерных причин возникновения составляющей $x_{basic}[n]$, является наличие низкочастотных шумов, которые приобретают форму случайного, но медленно меняющегося тренда. Компонента $x_{noise}[n]$ описывает в первом приближении несущественные для контроля вибраций при обработке измерительного сигнала изменения, которые обычно рассматриваются с точки зрения решаемой задачи как некоторый высокочастотный шум. Наилучшим способом удаления перечисленных составляющих является применение соответствующих аналоговых фильтров. Также компоненты $x_{basic}[n]$ и $x_{noise}[n]$ можно удалить программным образом, например используя цифровую фильтрацию. В качестве такой цифровой фильтрации авторами использован алгоритм на основе линейной регрессии методом наименьших квадратов (МНК) [13] для разделения компонент $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$ и $x_{noise}[n]$. Для решения задачи фильтрации линейной регрессии на основе МНК использовалась тригонометрическая модель интерполяции [14]. Разделение компонент

$x_{basic}[n]$ и $x_{vibr}[n]$ в большинстве практических случаев возможно осуществить нормированием полученного временного ряда $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$.

Алгоритм предварительной обработки вибросигнала

Известно, что любая периодическая последовательность может быть разложена в ряд Фурье. При этом коэффициенты перед составляющими ряда Фурье принимаются за коэффициенты регрессии для оценки их величины. Для этого мы задаем непрерывную функцию $\varphi[n]$ для аппроксимации дискретной зависимости $x[n]$, которая минимизирует функционал следующего вида:

$$Q = \sum_{i=1}^n (\varphi[n] - x[n])^2 \rightarrow \min. \quad (2)$$

В этом случае функция $\varphi[n]$ описывает кривую, которая повторяет график начальной экспериментальной последовательности $x[n]$, но сама не чувствительна к случайным отклонениям измеряемой величины, т.е. к шуму $x_{noise}[n]$. Далее рассмотрим аппроксимацию выражения $\varphi[n]$ следующим образом:

$$\varphi[n] = c_0\varphi_0[n] + c_1\varphi_1[n] + \dots + c_m\varphi_m[n],$$

где $\varphi_0[n], \dots, \varphi_m[n]$ – произвольные базисные функции; c_0, \dots, c_m – неизвестные коэффициенты регрессии; m – количество базисных функций, которых должно быть меньше количества заданных точек для того, чтоб их суперпозиция определялась одним единственным образом.

Для решения задачи линейной аппроксимации в общем случае находятся условия минимизации суммы квадратов отклонений для формулы (2) поиском корней системы уравнений при условии $dQ/dc_k = 0$, где $k = 1, \dots, m$. После расчета соответствующих производных с учетом (2) получим систему алгебраических уравнений:

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^n (c_0\varphi_0[n] + c_1\varphi_1[n] + \dots + c_m\varphi_m[n] - x[n])\varphi_0[n] = 0 \\ \sum_{i=1}^n (c_0\varphi_0[n] + c_1\varphi_1[n] + \dots + c_m\varphi_m[n] - x[n])\varphi_1[n] = 0 \\ \dots \\ \sum_{i=1}^n (c_0\varphi_0[n] + c_1\varphi_1[n] + \dots + c_m\varphi_m[n] - x[n])\varphi_m[n] = 0. \end{cases} \quad (3)$$

Решение системы (3) относительно коэффициентов c_0, \dots, c_m проводится с помощью метода

МНК. В результате на основе найденных коэффициентов c_0, \dots, c_m строится аппроксимирующая кривая $\varphi[n]$, т.е. составляющая вибрационного процесса определяется по формуле:

$$\varphi[n] = x_{basic}[n] + x_{vibr}[n].$$

После удаления полученной кривой $\varphi[n]$ из экспериментального временного ряда $x[n]$ вибрационного сигнала получаем содержащий шум временной ряд $x_{noise}[n]$.

Основная обработка сигнала

Для спектрального анализа компонент полученного диагностического вибросигнала $x_{vibr}[n]$ предлагается использовать авторегрессионный анализ. Как показали проведенные ранее исследования [1], наибольшей потенциальной разрешающей возможностью при анализе коротких выборок вибросигналов обладает метод максимальной энтропии Берга. Для модели Берга выборку полученного сигнала $x_{vibr}[n]$ представим временным рядом вида:

$$x_{vibr}[n] = e[n] - \sum_{k=1}^p a[k] x_{vibr}[n-k],$$

где p – порядок модели; $e[n]$ – ошибка линейного предсказания; $a[k]$ – коэффициенты временного ряда; k – целое число.

В данном случае ошибки линейного предсказания определяются выражениями:

$$E_p^f[n] = x_{vibr}[n] + \sum_{i=1}^p a_p^f[i][n-i],$$

$$E_p^b[n] = x_{vibr}[n-p] + \sum_{i=1}^p a_p^b[i][n+i-p].$$

Рекурсивные выражения, связывающие ошибки линейного предсказания моделей порядков p и $p-1$, определяются следующими выражениями:

$$E_p^f[n] = E_{p-1}^f[n] + K_p E_{p-1}^b[n-1],$$

$$E_p^b[n] = E_{p-1}^b[n-1] + K_p E_{p-1}^f[n].$$

Выборочная дисперсия ошибки предсказания при каждом значении параметра p при условии минимизации арифметического значения средней мощности ошибок предсказания вперед и назад определяется как:

$$\rho_p = \frac{1}{2N} \left[\sum_{n=p+1}^N |E_p^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |E_p^b[n]|^2 \right]. \quad (4)$$

Приравняв производную выражения (4) по K_p , получим оценку коэффициента отражения:

$$\widehat{K}_p = - \frac{2 \sum_{n=p+1}^N E_{p-1}^f[n] E_{p-1}^b[n-1]}{\sum_{n=p+1}^N |E_{p-1}^f[n]|^2 + \sum_{n=p+1}^N |E_{p-1}^b[n]|^2}.$$

Критерии выбора порядка используемой модели являются целевыми функциями ошибки предсказания и рассчитываются на основе использования критерия Акаике [15].

Спектральной плотности мощности выборки сигнала $x_{vibr}[n]$ (конечной длины) методом Берга рассчитывается, исходя из выражения:

$$\widehat{P}_{AP}(f) = \frac{\rho_p^2 \Delta t}{\left| 1 + \sum_{k=1}^p a[k] e^{-j2\pi k f \Delta t} \right|^2},$$

где Δt – шаг дискретизации сигнала $x[n]$.

Практическая реализация

Для обеспечения работы системы ЛИСФТ были разработаны и использованы специальные программно-математические средства, включающие интерфейс, модуль управления и модуль обработки данных. Модули программно-математических средств предназначены для обеспечения взаимодействия устройства сбора данных, элементов лазерного сенсора, ПК, организации информационных потоков в системе, реализации алгоритмов обработки данных на основе метода Берга в процессе контроля вибраций объекта, а также отображения полученных результатов и элементов управления.

Программное обеспечение, реализующее предложенный авторами алгоритм спектрального анализа методом Берга, выполнено в среде графического программирования *LabVIEW*. Особенностью языка *LabVIEW* является возможность моделирования проведения имитационных исследований на тестовых сигналах, а также проведения анализа полученных вибросигналов. Результаты анализа и обработки данных могут быть представлены в виде графиков, таблиц или сохранены для дальнейшего использования [16].

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования предложенного метода обработки вибросигнала с целью анализа спектра мощности были проверены при анализе диагностической информации, полученной при измерении вибрации обрабатываемой поверхности, возникающих в процессе плоского шлифования алмазным кругом твердого вольфрамосодержащего сплава ВК8.

На приведенных рисунках показан процесс анализа вибраций при холостом ходе системы шлифования. На рисунке 1*a* представлено изменение амплитуды вибраций во времени, а именно сигнал, в котором присутствуют все три составляющие вибрационного процесса (трендовая, информационная и шумовая).

Результат аппроксимации входной экспериментальной последовательности значений вибросигнала с помощью МНК представлен на рисунке 1*b*. Это выделенные медленно изменяющиеся составляющие процесса вибрации обрабатываемой поверхности $\varphi[n] = x_{basic}[n] + x_{vibr}[n]$. После удаления этих составляющих из измеренного вибросигнала получаем остаточную высокочастотную составляющую $x_{noise}[n]$

(рисунок 1*c*). На рисунке 1*d* представлен вычисленный спектр информативных составляющих вибросигнала после его нормировки. Надо отметить, что в спектре явно видна гармоника на частоте $x_{vibr}[n]$. Что касается $x_{basic}[n]$, то эта составляющая на холостом ходу является постоянной величиной.

Аналогичные характеристики мы наблюдаем на рисунке 2, но в данном случае – в момент прижатия шлифующей кромки к заготовке. Поэтому в выделенной в результате аппроксимации медленно изменяющейся составляющей вибросигнала обрабатываемой поверхности $\varphi[n] = x_{basic}[n] + x_{vibr}[n]$ на рисунке 2*b* наблюдается явно выраженная затухающая составляющая $x_{basic}[n]$, которая в случае холостого хода была некоторой постоянной величиной и не наблюдалась в явном виде. В спектре (рисунок 2*d*) появились составляющие на иных, чем $x_{vibr}[n]$ частотах, в отличие от предыдущего случая (рисунок 1).

На рисунке 3 приведены диаграммы, полученные при наблюдении процесса шлифования заготовки. Описанные характеристики близки к характеристикам во время холостого хода.

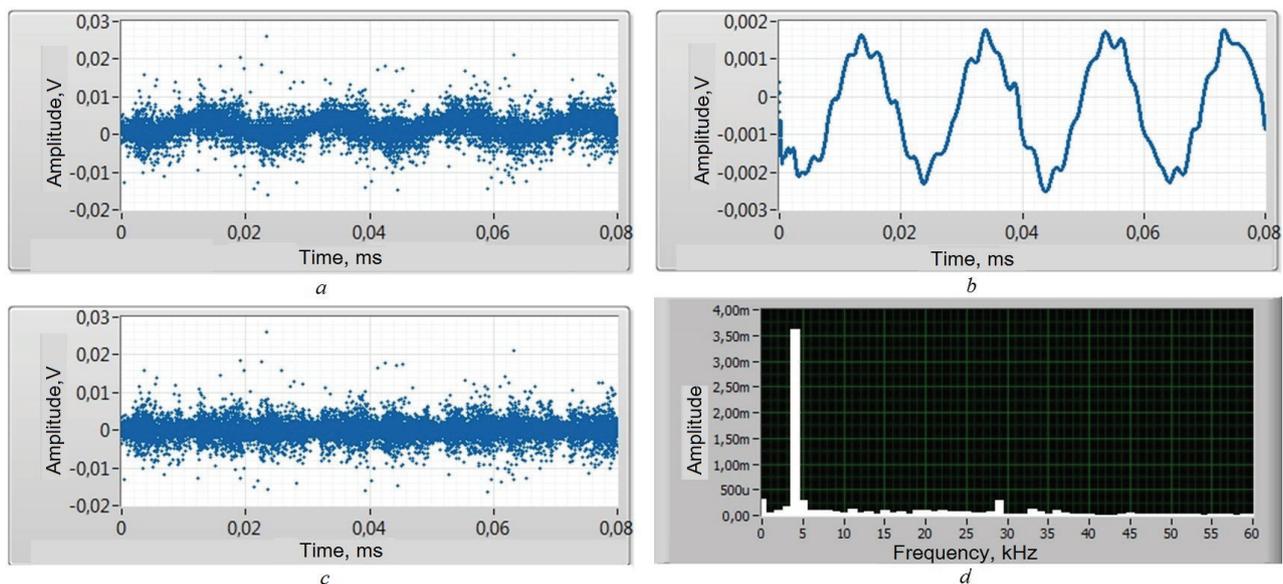


Рисунок 1 – Анализ процесса вибраций при холостом ходе: *a* – наблюдаемый вибросигнал; *b* – сигнал ($x_{basic}[n] + x_{vibr}[n]$); *c* – выделенная шумовая составляющая вибросигнала $x_{noise}[n]$; *d* – спектр сигнала $x_{vibr}[n]$

Figure 1 – Analysis the process of vibration. System is the idling: *a* – the observed signal of vibration; *b* – signal ($x_{basic}[n] + x_{vibr}[n]$); *c* – selections noise signal of vibration $x_{noise}[n]$; *d* – spectrum of signal $x_{vibr}[n]$

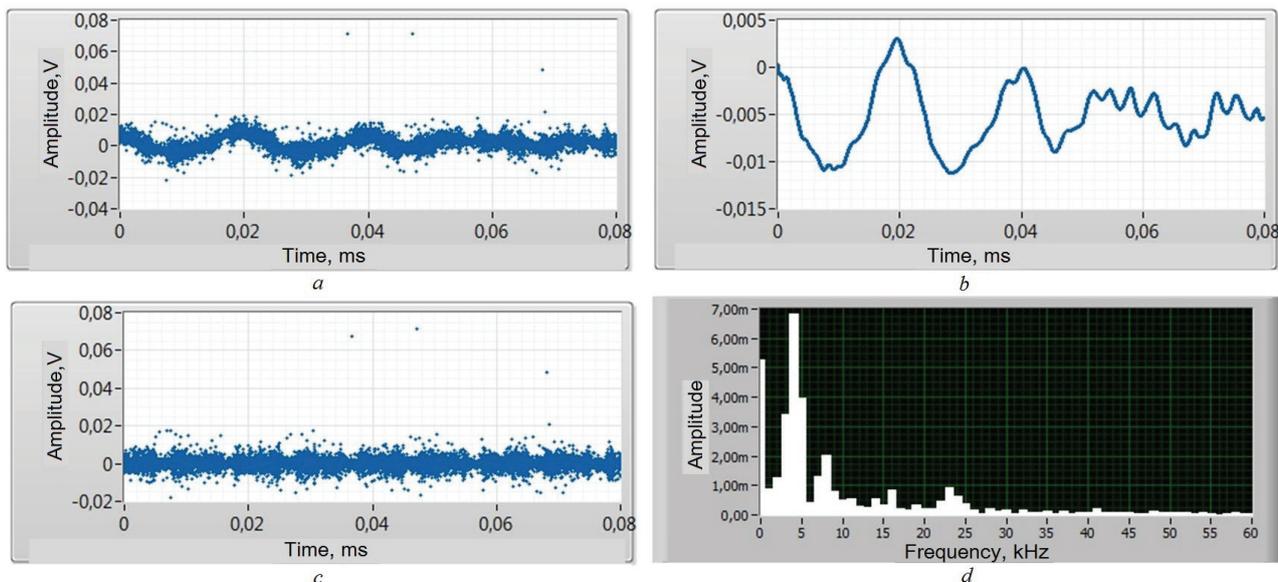


Рисунок 2 – Анализ процесса вибраций в момент прижатия рабочей поверхности круга к заготовке: *a* – наблюдаемый вибросигнал; *b* – сигнал $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$; *c* – выделенная шумовая составляющая вибросигнала $x_{noise}[n]$; *d* – спектр сигнала $x_{vibr}[n]$

Figure 3 – Analysis the process of vibration. Time pressing of the grinding edge to a workpiece: *a* – the observed signal of vibration; *b* – signal $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$; *c* – selections noise signal of vibration $x_{noise}[n]$; *d* – spectrum of signal $x_{vibr}[n]$

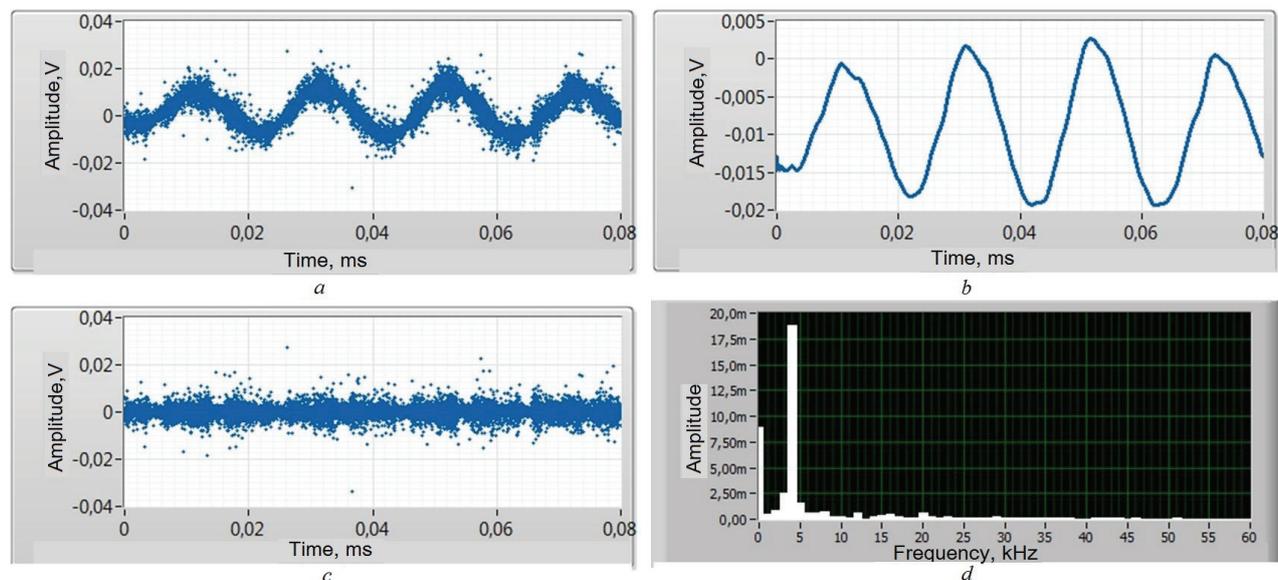


Рисунок 3 – Анализ процесса вибраций при шлифовании заготовки: *a* – наблюдаемый вибросигнал; *b* – сигнал $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$; *c* – выделенная шумовая составляющая вибросигнала $x_{noise}[n]$; *d* – спектр сигнала $x_{vibr}[n]$

Figure 3 – Analysis the process of vibration. The workpiece is grinding: *a* – the observed signal of vibration; *b* – signal $(x_{basic}[n] + x_{vibr}[n])$; *c* – selections noise signal of vibration $x_{noise}[n]$; *d* – spectrum of signal $x_{vibr}[n]$

Заклучение

Применение предложенного способа анализа вибросигналов на основе метода Берга в сочетании с их предварительной обработкой на основе авторегрессионного анализа позволило создать программно-математические средства для лазер-

ной измерительной системы фазового типа, предназначенной для бесконтактного наблюдения за вибрационными процессами диффузно отражающих поверхностей и последующего их анализа.

Разделение составляющих механических колебаний позволяет провести более детальный спектральный анализ периодических и шумовых

составляющих вибрационного процесса механической обработки твердых материалов. Это создает предпосылки для решения нескольких задач: оценки текущего состояния оборудования, анализа процессов, вызывающих появление вибраций, и выбора методов для их устранения, прогнозирование рабочего ресурса оборудования.

Список использованных источников

1. Зайцев, Е.О. Застосування метода Берга для аналізу вібросигналів, отриманих за допомогою лазерних сенсорів / Е.О. Зайцев, М.В. Лісогор // Електроніка та зв'язок: науково-технічний журнал. – 2014. – Т. 19, № 6 (83). – С. 66–72.

2. Зварич, В.Н. Линейные процессы авторегрессии с периодическими структурами как модели информационных сигналов / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко // Известия вузов. Радиоэлектроника. – 2011. – Т. 54, № 7. – С. 25–30.

3. Зварич, В.Н. Линейные процессы авторегрессии в задачах вибродиагностики узлов электрических машин / В.Н. Зварич, Б.Г. Марченко // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. – 1996. – № 1. – С. 45–54.

4. Марченко, Б.Г. Вибродиагностика подшипниковых узлов электрических машин / Б.Г. Марченко, М.В. Мыслович. – Киев : Наукова думка, 1992. – 196 с.

5. Застрогин, Ю.Ф. Лазерные приборы вибрационного контроля и точного позиционирования / Ю.Ф. Застрогин, О.Ю. Застрогин, А.З. Кулебякин. – М. : Машиностроение, 1995. – 315 с.

6. Зандер, Ф.В. Алгоритмы оптимальной оценки параметров радиосигнала при времени измерения менее периода и некратном периоде с привязкой результата к началу измерительного интервала / Ф.В. Зандер // Измерительная техника. – 2003. – № 2. – С. 43–46.

7. Брагинец, И.А. Лазерные фазовые датчики вибраций и перемещений в диапазоне частот от 15 до 1000 / И.А. Брагинец, Е.А. Зайцев // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск, частина 2. – 2010. – С. 186–191.

8. Брагинец, И.А. Помехоустойчивость фазовых лазерных датчиков вибраций / И.А. Брагинец, Е.А. Зайцев // Технічна електродинаміка. – 2010. – № 3. – С. 67–73.

9. Марпл, С.Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения / С.Л. Марпл; пер.с англ. – М. : Мир. – 1990. – 584 с.

10. Mulgrew, B. Digital signal processing: concepts and applications / B. Mulgrew, P. Grant, J. Thompson // New York, McMillan Press Ltd. – 1999. – 408 p.

11. Ulrych, J. Tad. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition / Tad J. Ul-

rych, Thomas N. Bishop // Reviews of Geophysics. – 1975. – No. 1(13). – P. 183–200.

12. Srbulov, M. Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples / M. Srbulov. – Netherlands : Springer, 2010. – 233 p.

13. Отнес, Р. Прикладной анализ временных рядов. Прикладные методы / Р. Отнес, Л. Эноксон; пер. с англ. – М. : Мир. – 1982. – 429 с.

14. Попов, Ю.В. О выделении периодической компоненты из временного ряда показателя количества катастроф / Ю.В. Попов // Проблемы безопасности полетов. – 2008. – № 8. – С. 10–17.

15. Anderson, T.W. The Statistical Analysis of Time Series / T.W. Anderson // New York : Wiley-Interscience. – 1994. – 720 p.

16. Travis J., Kring J. LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun. Third Edition / J. Travis, J. Kring. – Crawfordsville : Prentice Hall. 2007. – 1236 p.

References

1. Zaitsev E.O., Lisogor M.V. [Application of the method by Berg for the analysis of vibration signals which were obtained using laser sensors]. *Electronics and communications*, 2014, vol. 19, no. 6 (83), pp. 66–72 (in Ukrainian).

2. Zvaritch V.N., Martchenko B.G. [Autoregressive linear processes with periodic structures as models of information signals]. *Proceedings of the universities. Radioelectronics*, 2011, no. 7, pp. 25–30 (in Russian).

3. Zvaritch V., Martchenko B. [Linear processes of autoregressive in problems vibrodiagnostics nodes electric cars]. *Technical diagnostics and nondestructive testing*, 1996, no. 1, pp. 45–54 (in Russian).

4. Martchenko B., Mislovitch M. *Vibrodagnostika podshipnikovykh uzlov elektricheskikh mashin* [Vibration diagnostics of bearing assemblies of electrical machines]. Kiev, Naukova Dumka Publ., 1992, 196 p. (in Russian).

5. Zastrogin, Yu.F. *Lazernye pribory vibracionnogo kontrolya i tochnogo pozicionirovaniya* [Laser Devices of vibration control and accurate positioning]. Moscow, Mashinostroeniye Publ., 1995, 315 p. (in Russian).

6. Zander F.V. Algorithms for the Optimum Estimation of the Parameters of a Radio Signal in a Measurement Time of Less Than a Period and a Nonmultiple of a Period in Which the Result Is Tied to the Beginning of the Measurement Interval. *Measurement Techniques*, 2003, vol. 46, Issue 2, pp. 172–176.

7. Brahynets I.A., Zaitsev E.A. [Laser Sensors phase displacements and vibrations in the frequency range 15 to 1000]. *Technical Electrodynamics*. Special issue, 2010, vol. 2, no. 3, pp. 186–191 (in Russian).

8. Brahynets I. A., Zaitsev E. A. [Noise resistance of phase laser vibration sensors]. *Technical Electrodynamics*, 2010, no. 3, pp. 67–73 (in Russian).

9. Marple S.L. *Cifrovoj spektral'nyj analiz i ego prilozheniya* [Digital spectral analysis with applications]. Moscow, Mir Publ., 1990, 584 p. (in Russian).
10. Mulgrew B. *Digital signal processing: concepts and applications*. New York, McMillan Press Ltd., 1999, 408 p.
11. Tad J. Ulrych, Thomas N. Bishop. Maximum entropy spectral analysis and autoregressive decomposition. *Reviews of Geophysics*, 1975, no. 1(13), pp. 183–200.
12. Srbulov M. *Ground Vibration Engineering: Simplified Analyses with Case Studies and Examples*. Netherlands., Springer Publ., 2010, 233 p.
13. Otnes R., Enokson L. *Prikladnoj analiz vremennykh ryadov. Prikladnye metody* [Applied time series analysis. Basic methods]. Moscow, Mir Publ., 1982, 429 p. (in Russian).
14. Popov Yu.V. [On the selection of the periodic components of a time series index of the number of accidents]. *Problems of aviation safety*, 2008, no. 8, pp. 10–17 (in Russian).
15. Anderson T.W. *The Statistical Analysis of Time Series*. New York, Wiley-Interscience Publ., 1994, 720 p.
16. Travis J., Kring J. *LabVIEW for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. Third Edition. Crawfordsville, Prentice Hall, 2007, 1236 p.