

# АНАЛИЗ ДЛИННЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ В СИСТЕМАХ ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПО ОЦЕНКЕ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ МЕХАНИЗМОВ

**П. Ю. Бранцевич, Е. Н. Базылев**

---

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники  
Минск, Беларусь  
e-mail: [branc@bsuir.edu.by](mailto:branc@bsuir.edu.by)*

Рассмотрена аппаратно-программная организация компьютерных распределенных систем вибрационного контроля. Применение таких систем обеспечивает проведение в режиме реального времени мониторинга вибрационного состояния технических объектов, решение задач сигнализации и защиты по индивидуальным критериям в автоматическом режиме. Предложены способы обработки длинных реализаций вибрационных сигналов при решении задач оценки состояния технических объектов.

*Ключевые слова:* вибрация; мониторинг; анализ; решение; диагностика.

## ANALYSIS OF LONG THE VIBRATORY SIGNALS IN DECISION SUPPORT SYSTEM FOR THE ASSESSMENT OF TECHNICAL STATE OF COMPLEX MECHANISMS

**P. Y. Brancevich, E. N. Bazyleu**

---

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics  
Minsk, Belarus*

The hardware-software organization of computer distributed systems of vibration control is considered. Use of such systems provides execution in real time of monitoring of a vibration condition of technical objects, the solution of problems of the alarm system and protection on individual criteria in the automatic mode. Ways of processing of long realization of vibration signals at the solution of problems of an assessment of a condition of technical objects are offered.

*Keywords:* vibration; monitoring; analysis; decision; diagnostics.

### ВВЕДЕНИЕ

Для механизмов и агрегатов роторного типа, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров, характеризующими его техническое состояние, являются интенсивность и спектральный состав вибрации, причем при длительном безостановочном функциони-

ровании технического объекта требуется непрерывное наблюдение или слежение за его вибрационным состоянием [1–5].

При эксплуатации сложных и дорогостоящих агрегатов (турбогенераторы, газоперекачивающие установки и т. п.) стандартами определены правила проведения непрерывного контроля и мониторинга их вибрационного состояния [6–8]. Системы непрерывного стационарного мониторинга позволяют зафиксировать факт возникновения аномальной ситуации на контролируемом объекте и оперативно отреагировать на него стандартным образом или реализовать алгоритмы сигнализации и защиты, учитывающие индивидуальные особенности контролируемых объектов [9].

Однако значительные изменения среднего квадратического значения (СКЗ) вибрационного сигнала или амплитуд отдельных или группы гармонических составляющих, выявляемые такими системами или переносными приборами, свидетельствуют об уже существенном развитии какого-то дефекта.

Если же стоит задача создания системы проактивного технического обслуживания оборудования, то возникает потребность проведения тщательного изучения изменений вибрационного состояния технических объектов на протяжении их эксплуатации. Представляет интерес обнаружение редких кратковременных изменений структуры вибрационного сигнала и последующее выявление причинно-следственных связей между их появлением и развитием дефектов, которые требуют определенного реагирования.

Для этого целесообразно проводить анализ непрерывных вибрационных сигналов, отражающих вибрационное состояние объекта, на протяжении длительных временных интервалов (часы и даже сутки), которые соответствуют некоторому циклу изменения режимов функционирования оборудования [10].

## АНАЛИЗ ДЛИННЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ

Решение задачи проактивного технического обслуживания производственного оборудования с быстрым реагированием требует непрерывного слежения за вибрацией его узлов и обнаружения самых незначительных изменений в вибрационных сигналах, которые могут быть индикатором начальной стадии износа и дефектов. Регистрацию таких вибрационных сигналов можно осуществить, используя измерительно-вычислительный комплекс «Тембр-М» [11–14]. Также ввод и сохранение длительных вибрационных сигналов производится с помощью специальных сборщиков-регистраторов [15].

Проводя анализ формы вибрационных сигналов, отражающий интенсивность механических колебаний корпусных элементов механизмов роторного типа, функционирование которых предполагает вращательное движение, и их амплитудных спектров, можно заметить, что в большинстве случаев такие вибрационные сигналы содержат периодическую компоненту, состоящую из гармоник, кратных частоте вращения, и некоторую шумоподобную составляющую. Поэтому, в целях более детального исследования, предлагается представить исходный вибросигнал в виде суммы периодической и шумоподобной составляющих [16–17]:

$$x(nt_d) = p(nt_d) + s(nt_d) = \sum_{m=1}^L A_m \cos[2\pi \cdot k_m f_o \cdot nt_d - \varphi_m] + s(nt_d), \quad (1)$$

где  $p(nt_d)$  – периодическая составляющая вибрационного сигнала;  $s(nt_d)$  – шумоподобная составляющая вибрационного сигнала;  $n$  – номер дискретного отсчета,

$n = 0, 1, 2, \dots$ ;  $t_d$  – интервал дискретизации;  $f_o$  – частота вращения ротора или вала привода (оборотная частота);  $k_m$  – кратность  $m$ -й гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно  $f_o$ ;  $A_m, f_m, \varphi_m$  – амплитуда, частота, начальная фаза  $m$ -й гармоники,  $f_m = k_m f_o$ .  $L$  – число гармоник, выбранных для периодической составляющей вибросигнала.

Кратность гармоник, входящих в состав периодической составляющей вибросигнала, определяется с учетом параметров подшипников, зубчатых передач, схемы редуктора контролируемого узла и его других конструктивных особенностей и может быть как целочисленной, так и дробной. Если точно известна частота  $f_o$ , то амплитуда и начальная фаза  $m$ -ой гармоники легко вычисляются с помощью дискретного преобразования Фурье, причем количество дискретных точек преобразования выбирается таким, чтобы интервал анализа был кратным (в рамках возможностей дискретизации) периоду.

Когда частота  $f_o$  известна, периодическая составляющая сигнала  $p(nt_d)$  вычисляется по формуле первого слагаемого выражения (1), а шумоподобная составляющая находится как

$$s(nt_d) = x(nt_d) - p(nt_d). \quad (2)$$

Однако на практике для контроля интенсивности вибрации и регистрации вибрационных сигналов часто используют приборы, в которых отсутствует измерительный канал для фазового датчика, формирующего сигнал, применяемый для определения частоты вращения и фазовых сдвигов оборотных составляющих вибрации. Традиционный же спектральный анализ позволяет точно вычислить первую и другие оборотные частоты, только в том случае, если они кратны фундаментальной частоте спектрального анализа. При проведении исследований вибрационного состояния реальных объектов такой кратности удается достигнуть далеко не всегда. Следствие этого – размывание оборотной частотной составляющей по соседним спектральным линиям и проблемы с определением ее частоты. В таких случаях для определения значения оборотной частоты представляется целесообразным применение способа вычисления выраженной спектральной составляющей на основе значений соседних спектральных составляющих [8, 14].

После разделения вибрационного сигнала на полигармоническую и шумоподобную составляющие определяются параметры каждой из составляющих в отдельности. При этом можно сделать предположение, что изменения параметров периодической составляющей – следствие достаточно существенного изменения технического состояния объекта, а локальные изменения шумоподобной составляющей – это проявление зарождающихся дефектов.

Пример исследования вибросигнала, иллюстрирующий данный подход, приведен на рисунке.

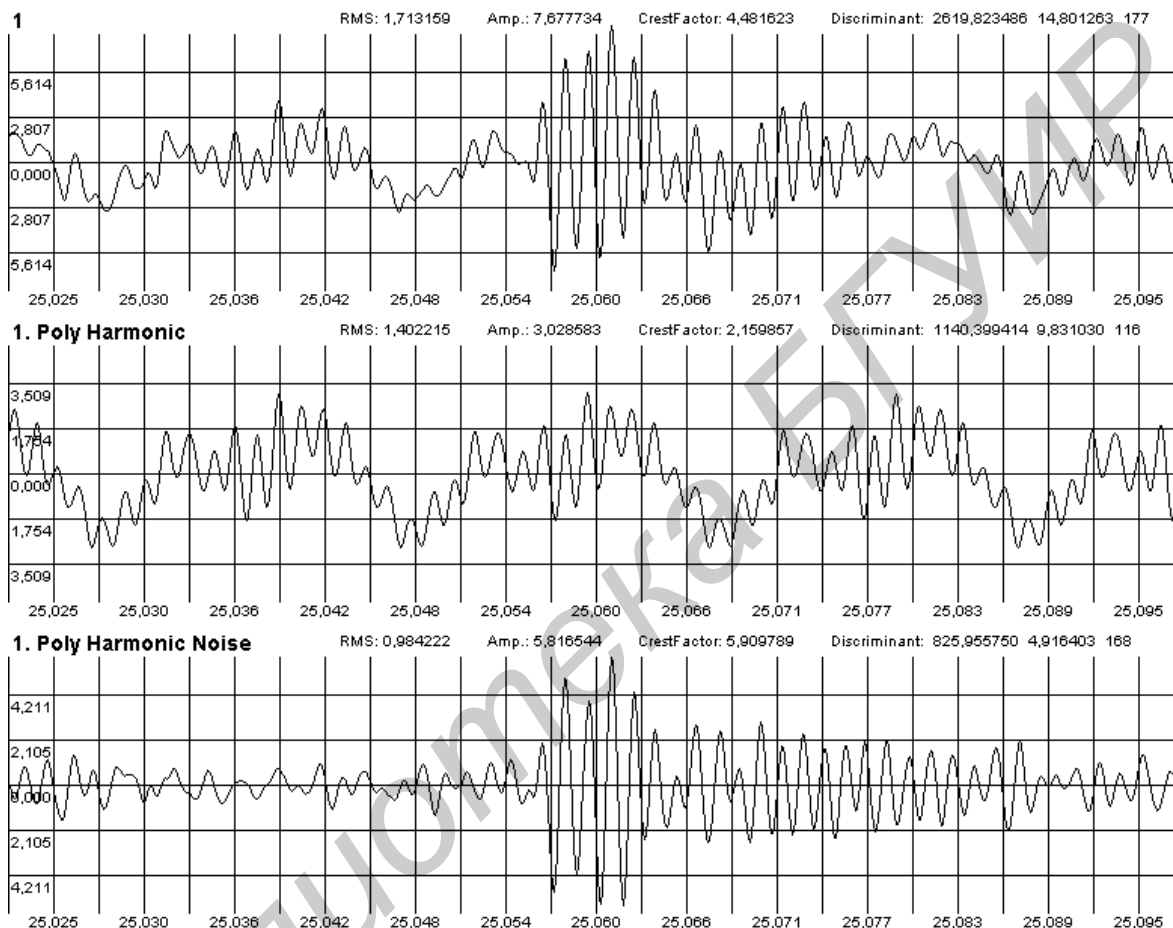
В качестве вибрационного всплеска или возмущения можно признать превышение шумоподобной составляющей вибрационного сигнала по абсолютной величине некоторого порогового уровня  $a_p$ . Уровень  $a_p$  определяется для нормального вибрационного состояния контролируемого объекта на временном интервале, соответствующем 4–8 оборотам ротора (вала).

Предлагается следующая формула для вычисления  $a_p$  :

$$a_p = k_e a_{RMS} PF, \quad (3)$$

где  $k_e$  – повышающий коэффициент выбирается большим единицы с учетом однородности шумоподобной составляющей;  $a_{RMS}$  – СКЗ шумоподобной составляющей;  $PF$  – пик-фактор шумоподобной составляющей.

Сравнивая абсолютные значения шумоподобной составляющей с уровнем всплеска  $a_p$  и обнаруживая превышения этого уровня, локализуются моменты всплесков и ударов, присутствующих в исходном сигнале.



Форма исходного вибрационного сигнала, его периодической и шумоподобной составляющих в единицах виброускорения при локализации вибрационных возмущений

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разложение исходных вибрационных сигналов, отражающих техническое состояние механизмов и агрегатов с вращательным движением, на периодическую и шумоподобную составляющие, с последующим их отдельным анализом, позволяет на шумоподобной составляющей выявлять редко возникающие аномальные вибрационные всплески. А непрерывный анализ вибрационного состояния сложного производственного оборудования предполагает разработку новых способов решения задач технической диагностики и формирования стратегий обслуживания и ремонтов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Неразрушающий контроль: справ. / Ф. Я. Балицкий [и др.]. М. : Машиностроение, 2005. Т. 7. Кн. 2. Вибродиагностика.
2. Ширман А. Р., Соловьев А. Б. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования. М., 1996.
3. Барков А. В., Баркова Н. А., Азовцев А. Ю. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации. СПб. : Издат. центр СПбГМТУ, 2000.
4. Bently D. E., Hatch C. N., Grissom V. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. Canada : Bently pressurized bearing company, 2002.
5. Гольдин А. С. Вибрация роторных машин. М. : Машиностроение, 1999.
6. ГОСТ ИСО 10816-1-97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Ч. 1. Общие требования. Введ. 1999-07-01. Минск : ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2007.
7. ГОСТ 25364-97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. Введ. 1999-07-01. Минск. ИПК Изд-во стандартов, 1998; Стандартиформ, 2011.
8. Бранцевич П. Ю. ИВК «Лукомль -2001» для вибрационного контроля // Энергетика и ТЭК. 2008. № 12 (69). С. 19-21.
9. Бранцевич П. Ю., Костюк С. Ф. Организация и опыт применения систем вибрационного мониторинга и защиты // Достижения физики неразрушающего контроля : сб. науч. тр. / под ред. Н. П. Мигуна. Минск : Ин-т прикладной физики НАН Беларуси, 2013. С. 67-74.
10. Фрэнкс Б. Укрощение больших данных: как извлекать знания из массивов информации с помощью глубокой аналитики / пер. с англ. А. Баранова. М. : Манн, Иванов и Фербер, 2014.
11. Компьютерные вибродиагностические системы / П. Ю. Бранцевич [и др.] // Междунар. науч.-техн. конф., приуроченная к 50-летию МРТИ-БГУИР : материалы конф. Минск : БГУИР, 2014. Ч. 1. С. 430-431.
12. Бранцевич П. Ю. Методика применения измерительно-вычислительного комплекса «Тембр-М» при оценке вибрационного состояния механизмов и агрегатов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2014) : сб. ст. IV Междунар. заоч. науч.-техн. конф. / Поволжский гос. ун-т сервиса. Тольятти : ПВГУС, 2014. С. 55-67.
13. Аппаратные и программные средства для решения задач вибрационного контроля и диагностики / П. Ю. Бранцевич [и др.] // Приборостроение-2014 : материалы 7-й междунар. науч.-техн. конф., Минск, 19-21 нояб. 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (предс.) [и др.]. Минск : БНТУ, 2014. С. 39-40.
14. Brancevich P., Miao X., Li Y. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013. Curran Associates, Inc., NY 12571 USA. P. 612-619.
15. Бранцевич П. Ю. Измерительно-вычислительная система распределенного сбора и централизованной обработки виброметрических данных // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления : сб. материалов 12-й науч.-техн. конф. с участием зарубежных специалистов / под ред. В. Н. Азарова. М. : МГИЭМ, 2000. С. 170-171.
16. Бранцевич П. Ю., Базаревский В. Э., Костюк С. Ф. Применение разложения вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие при исследовании технического состояния механизмов с вращательным движением // Механика-2011: сб. науч. тр. V Белорус. конгр. по теорет. и прикладной механике, Минск, 26-28 окт. 2011 г. : в 2 т. / Объед. ин-т машиностроения НАН Беларуси ; редкол.: М. С. Высоцкий [и др.]. Минск, 2011. Т. 2. С. 27-31.
17. Бранцевич П. Ю. Способ анализа вибрационных сигналов при исследовании технического состояния механизмов // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT-2012) : сб. ст. II Междунар. заоч. науч.-техн. конф. / Поволж. гос. ун-т сервиса. Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2012. Ч. 1. С. 244-250.