

ОБРАБОТКА ДЛИННЫХ РЕАЛИЗАЦИЙ ВИБРАЦИОННЫХ СИГНАЛОВ И ДАННЫХ В СИСТЕМАХ ОЦЕНКИ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СЛОЖНЫХ ОБЪЕКТОВ



П.Ю. Бранцевич

Доцент кафедры ПОИТ,
научный руководитель
НИЛ систем вибродиагно-
стики БГУИР, кандидат
технических наук, доцент



Е.Н. Базылев

Младший научный со-
трудник НИЛ систем
вибродиагностики, аспи-
рант БГУИР, магистр
технических наук



С.Ф. Костюк

Заведующий НИЛ
систем вибродиагно-
стики НИЧ БГУИР

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Бе-
ларусь

E-mail: branc@bsuir.edu.by; branc@tut.by; yauheni.bazyleu@bsuir.by; kostjuk_vibro@mail.ru

Abstract. The hardware-software organization of computer multichannel 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.

Введение. Состояние производственного объекта характеризуется многими параметрами, имеющими различную физическую природу. Но для механизмов и агрегатов роторного типа, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров являются интенсивность и спектральный состав вибрации, причем при длительном безостановочном функционировании 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]. Для решения этих задач применяют многоканальные системы, которые определяют, отображают и регистрирующие на каком-то носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняют допусковый контроль, функции сигнализации и даже защитного отключения [1,8]. Во многих системах для представления полученных данных используются компьютеры, которые, однако, не задействуются непосредственно при вычислении параметров вибрации.

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, свидетельствует о существенном развитии определенного типа 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. Такой подход соответствует современной концепции обработки информации, называемой «Большие данные» [10].

Компьютерный вибрационный мониторинг. Концепция использования компьютера в качестве основного вычислительного блока параметров вибрации реализована в измерительно-вычислительном комплексе (ИВК) серии «Лукомль», разработанном и производимом научно-исследовательской лабораторией систем вибродиагностики БГУИР [8-9, 11-15]. Комплексы данного типа применяются в качестве штатной системы вибрационного контроля, мониторинга и защиты турбоагрегатов на электростанциях Беларуси.

Структурно ИВК представляет собой компьютер с типизированным модулем АЦП, подключаемым к его стандартному интерфейсу (ISA, PCI, USB), блока аналоговой обработки сигналов, на который подаются сигналы с первичных виброизмерительных каналов, и блока управления сигнализацией и защитным отключением. По сути, это перепрограммируемый компьютерный измерительный прибор, решающий специальные задачи. Его основными функциями являются:

- определение в режиме реального времени интенсивности вибрации в стандартизованных или задаваемых частотных диапазонах, частоты вращения вала, значений амплитудных и фазовых параметров, по крайней мере, до десяти спектральных составляющих вибрации, кратных частоте вращения (порядковый анализ), пик-фактора исходного сигнала;

- сравнение реально полученных значений с контрольными (величина которых может изменяться от точки к точке и с течением времени) и выработка

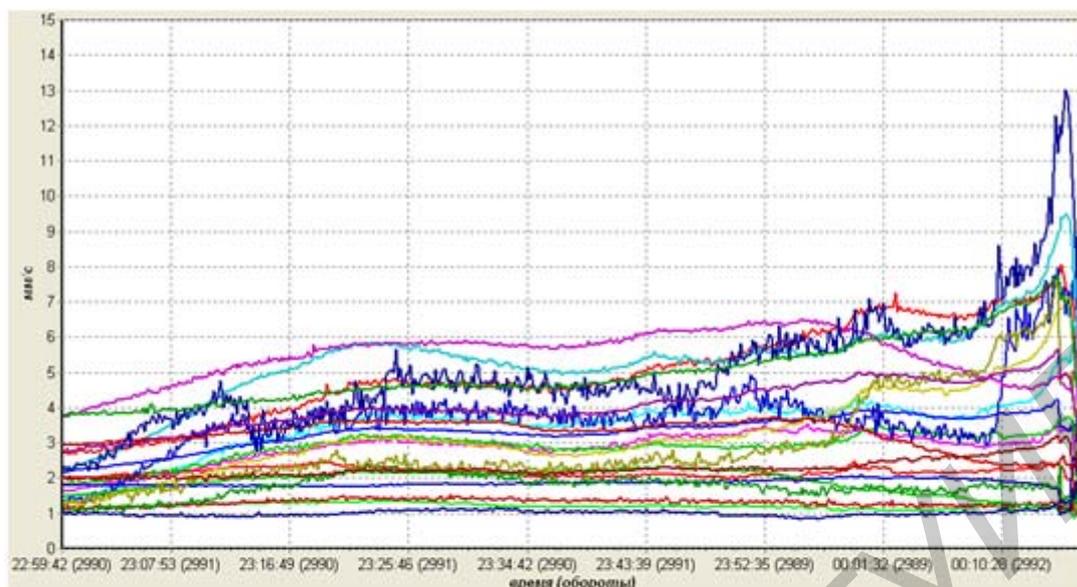
по определенным алгоритмам сигнализирующих сообщений, выдаваемых на отображающие и исполнительные устройства;

– реализация оригинальных алгоритмов защиты технических объектов по вибрационным параметрам, которые учитывают факторы низкочастотной вибрации, высокочастотной вибрации, первой оборотной составляющей вибрации, изменение вектора оборотной составляющей [16].

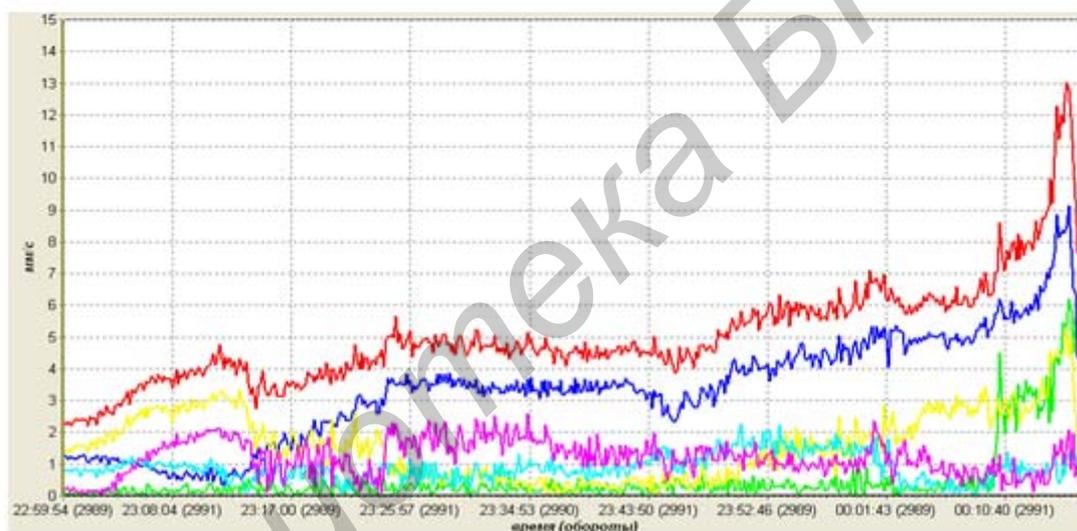
Так как основное назначение комплекса – работа в штатном режиме по обеспечению вибрационного контроля сложных технических объектов, то к нему предъявляются высокие требования по надежности функционирования, достоверности результатов, простоты и удобства работы пользователя. С целью удовлетворения этим требованиям тщательно проработаны процедуры запуска программы, управления файлами и алгоритмы функционирования.

Особое внимание уделено математическим методам обработки исходных, формируемых первичными виброизмерительными преобразователями (ВИП), сигналов, представляемых в единицах виброускорения. С целью повышения достоверности вычислений при переходе к единицам виброскорости и виброперемещения интегрирование производится во временной и в частотной областях отдельными программными модулями. В режиме реального времени реализовано удаление из первичных вибросигналов низкочастотных дрейфов, которые могут возникать при резком изменении температуры в местах установки ВИП или по каким либо другим причинам и существенно искажать вибрационный сигнал [17].

Отличительной особенностью работы является накопление больших объемов, вычисляемых в ходе вибрационного мониторинга параметров, которые записываются в суточные файлы на жестком диске, причем для каждой контролируемой подшипниковой опоры создается свой файл. Периодичность формирования записей по каждой точке контроля – 2-3 секунды. Эти файлы могут передаваться в производственную АСУ ТП или в хранилища данных (в том числе распределенные и удаленные) для последующей обработки в системах оценки технического состояния и диагностики. Накапливаемые данные представляют собой суточные, месячные, годовые архивы и являются первичными данными для построения систем поддержки принятия решений. За время эксплуатации комплексов «Лукомль» был зафиксирован ряд случаев существенного изменения п вибрации на контролируемых объектах, потребовавших оперативной реакции эксплуатирующего персонала [18]. На рисунке 1 в качестве примера представлены временные тренды параметров вибрации одной из таких ситуаций.



а) изменения СКЗ виброскорости в частотной полосе 10-1000 Гц по всем точкам контроля



б) изменения СКЗ виброскорости в частотной полосе 10-1000 Гц и СКЗ оборотных составляющих вибрации кратности 0,5, 1, 2, 3, 4 в точке максимального увеличения

Рис. 1. Изменения СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата мощностью 250 МВт, потребовавших его остановки

Анализ результатов длительного вибрационного мониторинга каждого из наблюдаемых объектов создает предпосылки для выработки индивидуальных критериев предупредительной сигнализации и защитного отключения по параметрам вибрации.

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» на базе мобильного компьютера, модуля АЦП с USB интерфейсом, виброизмерительных каналов с первичными пьезоэлектрическими преобразователями и проблемно-ориентированного программного обеспечения [11-15]. Также ввод и сохранение длительных вибрационных сигналов производится с помощью специальных сборщиков-регистраторов [19].

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, с целью более детального исследования, предлагается представить исходный вибросигнал в виде суммы периодической и шумоподобной составляющих [20-21]:

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

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 -ой гармоники, включенной в периодическую составляющую, относительно f_o ;

A_m, f_m, ϕ_m – амплитуда, частота, начальная фаза m -ой 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:

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

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 2.

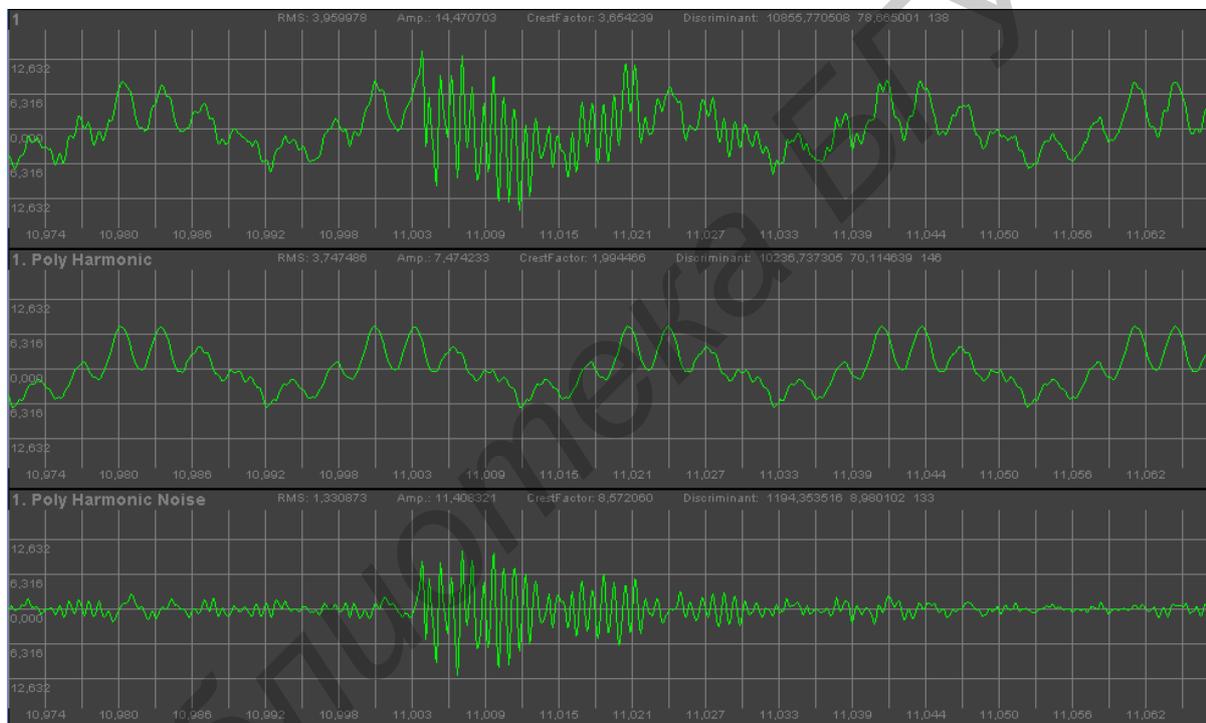


Рис. 2. Форма исходного вибрационного сигнала, его периодической и шумоподобной составляющих в единицах виброускорения при локализации вибрационных возмущений

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 следующую формулу для вычисления a_p :

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

где k_e – повышающий коэффициент выбирается большим удлинителем 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.

Заключение. Разложение исходных вибрационных сигналов, отражающих 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.

Литература

- [1]. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика /Ф.Я. Балицкий и др. М.: Машиностроение, 2005. – 485 с.
- [2]. Ширман, А.Р. Практическая вибродиагностика и мониторинг состояния механического оборудования / А.Р. Ширман, А.Б. Соловьев. – Москва, 1996. – 276 с.
- [3]. Барков, А.В. Мониторинг и диагностика роторных машин по вибрации / А.В. Барков, Н.А. Баркова, А.Ю. Азовцев. – СПб. : Изд. центр СПбГМТУ, 2000. – 169 с.
- [4]. Bently, D.E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics/ D.E. Bently, C.N. Hatch, V. Grissom. – Canada.: Bently pressurized bearing company, 2002. – 726 pp.
- [5]. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. М.: Машиностроение, 1999. –344 с.
- [6]. ГОСТ ИСО 10816–1–97. Вибрация. Контроль состояния машин по результатам измерений вибрации на невращающихся частях. Часть 1. Общие требования. – Введ. 1999–07–01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2007. – 18 с.
- [7]. ГОСТ 25364–97. Агрегаты паротурбинные стационарные. Нормы вибрации опор валопроводов и общие требования к проведению измерений. – Введ. 1999–07–01. – Минск. Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации: ИПК Изд-во стандартов, 1998. Стандартиформ, 2011.– 12 с.
- [8]. Бранцевич, П.Ю. ИВК «Лукомль -2001» для вибрационного контроля /П.Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК. –2008. – № 12 (69), –с. 19–21.
- [9]. Бранцевич, П.Ю. Организация и опыт применения систем вибрационного мониторинга и защиты / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк // Достижения физики неразрушающего контроля: сб. научн. тр. / Под ред. Н.П. Мигуна – Мн.: Институт прикладной физики НАН Беларуси, 2013. – с. 67-74.
- [10]. Фрэнкс, Б. Укрощение больших данных: как извлекать знания из массивов информации с помощью глубокой аналитики / Б. Фрэнкс; пер. с англ. А. Баранова. – М.: Манн, Иванов и Фербер, 2014. – 352 с.

[11]. Бранцевич, П.Ю. Компьютерные вибродиагностические системы / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев, В.Э. Базаревский // 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. статей IV международной заочной научно-технической конференции / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти: Изд-во: ПВГУС, 2014. – с. 55-67.

[13]. Бранцевич, П.Ю. Аппаратные и программные средства для решения задач вибрационного контроля и диагностики / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев, В. Э. Базаревский // Приборостроение-2014. Материалы 7-й Международной научно-технической конференции, Минск, 19-21 ноября 2014 г. / Белорус. нац. техн. ун-т ; редкол.: О. К. Гусев (председатель) [и др.]– Минск: БНТУ, 2014, – с.39-40

[14]. Бранцевич, П.Ю. Решение задач вибрационного контроля, мониторинга, оценки технического состояния механизмов и турбоагрегатов с помощью компьютерных комплексов / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 2 (88). – с. 148-152.

[15]. Бранцевич, П.Ю. Компьютерный вибрационный мониторинг механизмов и турбоагрегатов/ П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7 (93). – с. 5-10.

[16]. Brancevich, P. Organization of the vibration-based monitoring and diagnostics system for complex mechanical system / P. Brancevich, X. Miao, Y. Li // 20th International Congress on Sound and Vibration. Bangkok, Thailand, 7-11 July 2013. – Curran Associates, Inc., NY 12571 USA, –pp. 612-619.

[17]. Бранцевич, П.Ю. Способ удаления низкочастотного дрейфа при обработке экспериментальных данных / П.Ю. Бранцевич // Актуальные проблемы информатики: Сб. Трудов 6 Международной научн. конф. Ч.2. - Мн: БГУ, 1998. - с. 336 -343.

[18]. Бранцевич, П.Ю. Разработка методики, алгоритмов, программных средств оценки технического состояния сложных механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев; УО «БГУИР». – Мн., 2015. – 223 с. : Деп. в ГУ «БелИСА» 16.13.2016 г., № Д201603.

[19]. Бранцевич, П.Ю. Измерительно-вычислительная система распределенного сбора и централизованной обработки виброметрических данных / П.Ю. Бранцевич // Датчики и преобразователи информации систем измерения, контроля и управления. Сборник материалов 12-ой научно-технической конференции с участием зарубежных специалистов. Под ред. В.Н. Азарова. М.: МГИЭМ, 2000. - с. 170-171

[20]. Бранцевич, П.Ю. Применение разложения вибрационных сигналов на периодическую и шумоподобную составляющие при исследовании технического состояния механизмов с вращательным движением / П.Ю. Бранцевич, В.Э. Базаревский, С.Ф. Костюк // Механика 2011: сб. науч. тр. V Белорусского конгресса по теорет. и прикладной механике, Минск, 26–28 окт. 2011 г.: в 2 т. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. – Минск, 2011. – Т. II. – с. 27–31.

[21]. Бранцевич, П. Ю. Способ анализа вибрационных сигналов при исследовании технического состояния механизмов / П.Ю. Бранцевич // Информационные технологии. Радиоэлектроника. Телекоммуникации (ITRT–2012) : сб. ст. II международной заочной научно-технической конференции. Ч. 1 / Поволжский гос. ун-т сервиса. – Тольятти : Изд-во ПВГУС, 2012. – с. 244 – 250.