

# НЕРАЗРУШАЮЩИЙ КОНТРОЛЬ И ДИАГНОСТИКА

---

## NONDESTRUCTIVE TESTING AND DIAGNOSTICS

УДК 004.421.2+004.92+534-13

Канд. техн. наук, доц. Бранцевич П.Ю., Леванцевич В.А., Деменковец Д.В.  
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Минск)

Ph.D., Associate professor Brancevich P.J., Levantsevich V.A., Demenkovets D.V.  
(The Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk)

## Организация системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния и диагностированию роторных агрегатов по вибрационным параметрам

---

## Organization of a decision support system according to technical condition assessment and diagnosing rotor aggregates by vibration parameters

---

Обоснована актуальность системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния оборудования по вибрационным параметрам, как элемента проактивной системы обслуживания механизмов и агрегатов. Рассмотрены составные компоненты такой системы, функции компьютерной программы обработки длинных реализаций вибрационных сигналов, виды решающих функций для оценки технического состояния контролируемого технического объекта.

The relevance of the decision support system for assessing the technical condition of equipment by vibration parameters, as an element of a proactive system for servicing mechanisms and assemblies, has been substantiated. The constituent components of such a system, the functions of a computer program for processing long realizations of vibration signals, the types of decisive functions for assessing the technical state of a controlled technical object are considered.

## Введение

Возрастающая конкуренция на потребительских рынках требует от производителей продукции и поставщиков услуг повышения эффективности производства и производительности труда, снижения эксплуатационных издержек. При этом, в ряде случаев, это приводит к тому, что повышается интенсивность эксплуатации машин и оборудования, увеличиваются нагрузочные режимы их работы, а это, в свою очередь, приводит к их скорейшему износу и повышению вероятности возникновения отказов и аварийных ситуаций.

В таких условиях, одной из важнейших задач является разработка эффективных средств контроля технического состояния эксплуатируемого оборудования, и внедрение современных регламентов технического обслуживания.

Состояние производственного объекта характеризуется многими параметрами, причем для механизмов и агрегатов, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одним из важнейших является вибрация. При длительном безостановочном функционировании мощного технического объекта требуется непрерывное наблюдение 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 компьютерные системы, которые определяют, отображают и регистрируют на носителе информации значения параметров вибрации через небольшие (не более нескольких секунд) промежутки времени, а также выполняют допусковой контроль, функции сигнализации и (или) защитного отключения [1,8].

Системы непрерывного стационарного мониторинга позволяют зафиксировать факт возникновения аномальной ситуации на контролируемом объекте и оперативно отреагировать на него стандартным образом или реализовать индивидуальные алгоритмы сигнализации и защиты [9].

Для выявления редких вибрационных всплесков проводится 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. Данный подход соответствует современной концепции обработки, называемой «Большие данные» [10,11]. Регистрацию таких вибрационных сигналов можно осуществить, используя измерительно-вычислительный комплекс «Тембр-М» [12-14]. Такие средства являются важным элементом системы обслуживания производственного оборудования по фактическому состоянию или проактивного обслуживания.

## Элементы системы поддержки принятия решений

Под системой поддержки принятия решений (СППР) будем понимать комплекс программных средств, назначением которых является автоматизация процесса принятия инженером-специалистом решения о фактическом техническом состоянии объекта и возможности его дальнейшей эксплуатации, а также планировании мероприятий по техническому обслуживанию и ремонту.

Исходными данными для СППР по оценке технического состояния объектов по вибрационным параметрам являются длинные временные реализации вибрационных сигналов, которые получают в ходе проводимых обследований или при работе систем вибрационного контроля и мониторинга. В качестве исходных данных могут использоваться и временные тренды параметров вибрационных сигналов, вычисляемых штатными системами мониторинга [15].

Данными на выходе СППР являются результаты, получаемые в результате преобразований и обработки исходных данных, и применения по отношению к ним решающих функций. Эти данные напрямую используются субъектом, принимающим решение, или предварительно анализируются подсистемой интеллектуального (интеллектуализированного) анализа и формулируются возможные варианты действий.

Для реализации такой функциональности в составе СППР необходимы следующие компоненты:

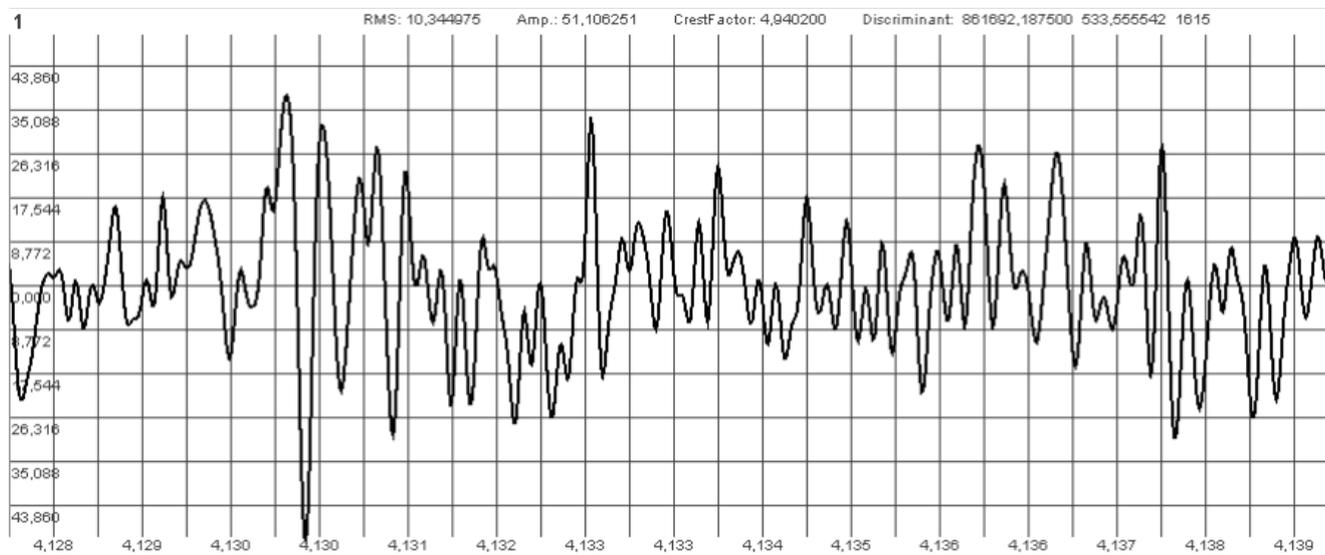
- 1) средства получения исходных данных;
- 2) хранилище (хранилища) исходных данных;
- 3) программные средства обработки, преобразования, анализа исходных данных;
- 4) хранилище (хранилища) векторов информативно-значимых параметров (ВИЗП), полученных при обработке исходных данных, и результатов обработки (характеристик) временных трендов параметров исходных сигналов;
- 5) подсистема формирования решающих функций;
- 6) программный обработчик ВИЗП и характеристик временных трендов;
- 7) подсистема принятия решений.

## Средства получения исходных данных

Можно выделить два основных типа исходных данных, обрабатываемых СППР:

- реализации вибрационных сигналов, отражающие изменение вибрационных колебаний в точках контроля исследуемого объекта;
- временные тренды параметров вибрационных сигналов.

Средствами для получения исходных данных являются разнообразные приборы, компьютерные системы и комплексы, микропроцессорные регистраторы



**Рис. 1. Фрагмент временной реализации вибрационного сигнала в единицах виброускорения ( $m/s^2$ ), ось абсцисс – время (с)**

данных [15,16]. Исходный вибрационный сигнал (рис. 1) является первичной информацией для всех последующих преобразований и вычисления информативно-значимых параметров.

Для получения оценок вибрационных параметров механизмов с вращательным движением требуется относительно небольшие временные реализации, соответствующие 5-10 оборотам ротора. Однако, это приемлемо только для стационарных или сопоставимых режимов работы объекта. Поэтому, в настоящее время особое значение приобретает продолжительность времени регистрации вибросигнала.

Фиксация вибрационного сигнала на временном интервале, который соответствует всем возможным изменениям режимов работы механизма или агрегата (это могут быть, например, часовые или суточные интервалы), позволяет получить достаточно полную информацию о состоянии объекта.

Временные тренды отражают изменение во времени параметров вибрационных сигналов. Такие данные обычно являются результатом работы систем вибрационного мониторинга, функционирующих в штатном непрерывном режиме, например, ИВК серии «Лукомль» [8]. Тренды также могут быть получены как результат обработки длинных реализаций вибрационных сигналов. Для трендов важным является период получения значений вычисляемого параметра, который зависит от быстродействия системы обработки, а также выбирается с учетом режимов работы исследуемого объекта.

Таким образом, для получения исходных данных о вибрационном состоянии исследуемых объектов, на основе которых можно формулировать обоснованные выводы и решения, представляется целесообразным использовать компьютерные приборы, системы и комплексы.

### **Хранилища исходных данных**

Для хорошей работы СППР важным является выбор места хранения полученных исходных данных и способов доступа к ним. В простейшем случае исходные вибрационные сигналы или тренды параметров могут храниться в файлах, располагаемых в каталогах на жестких дисках. Имена файлов и каталогов выбираются такими, чтобы по ним можно было определить объект контроля, дату и время получения данных. Подобная система предполагает хорошо продуманную, многоуровневую организацию каталогов, а также наличие специальной прикладной программы для движения по каталогам с целью нахождения нужных данных.

Для более удобной работы данные размещаются в специально спроектированной базе данных, и работа с данными выполняется под управлением СУБД.

Так как данных может быть очень много, то возникает проблема их хранения на одном компьютере. Для решения этой проблемы используют вычислительные кластеры и активно используемые в настоящее время облачные хранилища. Проблема создания хранилищ исходных вибрационных данных для СППР является актуальной, сложной и требует отдельных проработок и исследований.

### Программные средства обработки, преобразования, анализа исходных данных

Типовым образцом такого средства является программа, предназначенная для анализа и обработки вибрационных и фазовых сигналов, полученных в ходе обследования технического состояния механизмов с вращательным движением с помощью измерительно-вычислительных комплексов «Тембр» и «Тембр-М» [18,19].

Программа используется при решении задач системы поддержки принятия решений по оценке технического состояния механизмов с вращательным движением. Задача, решаемая данной программой, относится к классу цифровой обработки сигналов, в ходе которой выполняются действия по исследованию вибрационных сигналов, полученных в ходе экспериментальных исследований механических колебаний механизмов с вращательным движением

Программа выполняет следующие основные действия:

- 1) обработка исходных сигналов:
  - визуальный просмотр на экране дисплея временной реализации вибрационного сигнала;
  - скользящий спектральный анализ вибрационного сигнала, реализуемый методом дискретного преобразования Фурье, с отображением амплитудного спектра. В качестве параметра задается размер (количество дискретных отсчетов) преобразования. Начало выборки для преобразования соответствует точке реализации, отображенной на графике временной реализации в начале координат;
  - вычисление и отображение полосового амплитудного спектра сигнала, когда частотный диапазон исследуемого вибросигнала разбивается на полосы и определяется интенсивность вибрации в каждой из частотных полос;
  - анализ распределения сигнала по амплитудным уровням и отображение гистограммы распределения;
  - при отображении графиков пользователь может управлять положением курсора, причем в соответствии с положением курсора отображаются значения аргумента и функции.
- 2) действия по совместной обработке вибросигналов и синхронизирующих фазовых сигналов:
  - выбор типа фазовой метки;
  - выбор полярности метки;
  - выбор уровня детектирования метки;
  - вычисление оборотных составляющих вибросигналов (от 1 до 10 или 20);
  - отображение изменения оборотных составляющих во времени;
  - сохранение изменения оборотных составляющих в файл.

3) преобразование вибрационных сигналов:

- цифровая фильтрация;
- интегрирование и двойное интегрирование для перехода от единиц виброускорения к единицам вибро скорости и виброперемещения;
- выделение компонент вибросигналов с помощью гауссовых вейвлетов 1-4 порядка и вейвлета Морле;
- выделение огибающей сигнала (преобразование Гильберта);
- разложение исходного вибросигнала на периодическую и шумоподобную составляющие;
- разложение вибросигнала на моды (преобразование Гильберта-Хуанга);
- вычисление временных трендов для параметров вибрационного сигнала.

Отображение графиков временных реализаций и спектров производится в скользящем режиме, когда временное окно наблюдения накладывается на определенный отрезок длинной реализации вибросигнала и определяются параметры сигнала для этого временного окна. При работе с программой имеется возможность задавать количество дискретных точек для временного окна анализа из множества значений: 1024, 2048, 4096, 8102, 16384, 32768, что позволяет управлять частотным разрешением спектрального анализа [15].

Хранилище (хранилища) векторов информативно-значимых параметров (ВИЗП), полученных при обработке исходных данных, и результатов обработки (характеристик) временных трендов параметров исходных сигналов строятся по принципам, подобным хранилищу исходных данных и должны обеспечивать быстрый и удобный поиск и извлечение требуемых для дальнейшей обработки параметров.

### Подсистема формирования решающих функций

Базовая решающая функция, применяемая к параметрам вибрационных сигналов, имеет вид [18]:

$$FR(P) = \begin{cases} 0,25, & \text{если } P_i \leq P_{A,i} \\ 0,5, & \text{если } P_{A,i} < P_i \leq P_{B,i} \\ 0,75, & \text{если } P_{B,i} < P_i \leq P_{C,i} \\ 1,0, & \text{если } P_{C,i} < P_i \end{cases}$$

где  $P_i$  – текущее значение  $i$ -го параметра вибрационного сигнала;

$P_{A,i}, P_{B,i}, P_{C,i}$  – значения  $i$ -го параметра, соответствующие граничным уровням технического состояния, причем  $P_{A,i} < P_{B,i} < P_{C,i}$

Основной проблемной задачей при этом является выбор конкретных значений  $P_{A,i}, P_{B,i}, P_{C,i}$  и определение допустимых временных интервалов эксплуатации оборудования, соответствующих граничным уровням этого параметра. Конкретные величины этих уровней могут

определяться: а) стандартами; б) путем анализа изменения вибрационного состояния достаточно большого числа однотипных объектов; в) на основе экспертных оценок. Уровни, обычно, отличаются друг от друга на 4-8 дБ, иногда до 12 дБ.

На основе решающих функций по отдельным параметрам можно сформировать обобщающие решающие функции для группы параметров. В простейшем случае – это линейная комбинация решающих функций по отдельным параметрам. Например:

$$FR_{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{k_{i,max}} FR(P_i)$$

где  $FR_{\Sigma}$  – значение обобщающей решающей функции;

$N$  – количество решающих функций по отдельным параметрам вибрационного сигнала;

$FR(P_i)$  – значение решающей функции по  $i$ -му параметру;

$k_i$  – весовой коэффициент для решающей функции  $FR(P_i)$ ;

$k_{i,max}$  – максимальный весовой коэффициент из всех весовых коэффициентов для значений решающих функций, используемых для вычисления значения обобщающей решающей функции.

В качестве определяющего в системе принятия решений может быть принято и значение решающей функции, которое имеет максимальную величину с учетом нормирующих коэффициентов:

$$FR_{\Sigma} = \max \left( \frac{k_i}{k_{i,max}} FR(P_i) \right)$$

$$i = \frac{1}{N}; k_{i,max} = \max(k_1, k_2, \dots, k_N).$$

Решающая функция для группы параметров вибрационного сигнала представляется как некая функция от решающих функций по отдельным параметрам:

$$FR_{\Sigma,f} = f[FR(P_1), FR(P_2), \dots, FR(P_N)],$$

или как решающая функция  $FR_{S_{\varphi}}$  по отношению к некоторому обобщающему параметру  $S_{\varphi}$ , который, в свою очередь, является функцией от группы параметров:

$$S_{\varphi} = \varphi(P_1, P_2, \dots, P_N).$$

Решающие функции могут быть построены и на основе нечетких правил. Вывод о том, в каком состоянии находится объект, в зависимости от значения характеризующего его параметра  $x$ , формируется на основе значений функций принадлежности [15]:

$$FP_{A, \text{Cocm.}}(x) = \exp \left( -\frac{(x - X_{\min})^2}{2(X_A - X_{\min})^2} \right), \text{ если } x > X_{\min};$$

$$FP_{B, \text{Cocm.}}(x) = \begin{cases} \exp \left( -\frac{(x - X_A)^2}{2(X_A - X_{\min})^2} \right), & \text{если } x \leq X_A \\ \exp \left( -\frac{(x - X_A)^2}{2(X_B - X_A)^2} \right), & \text{если } x > X_A \end{cases};$$

$$FP_{B, \text{Cocm.}}(x) = \begin{cases} \exp \left( -\frac{(x - X_B)^2}{2(X_C - X_B)^2} \right), & \text{если } x \leq X_B \\ \exp \left( -\frac{(x - X_C)^2}{2(X_C - X_B)^2} \right), & \text{если } x > X_C \end{cases};$$

$$FP_{D, \text{Cocm.}}(x) = \begin{cases} \exp \left( -\frac{(x - X_D)^2}{2(X_D - X_C)^2} \right), & \text{если } x \leq X_D \\ 1, & \text{если } x > X_D \end{cases}.$$

где  $x$  – параметр, относительно которого определяется значение функции принадлежности;

$X_j$  – значения параметра  $x$ , которые соответствуют определенным состояниям, причем  $x_{\min} < X_A < X_B < X_C < X_D$ . Их количественные значения выбираются на основе экспертных оценок и накапливаемых экспериментальных данных.

Решение о том, что объект находится в состоянии  $j$  принимается в том случае, если  $FP_{j, \text{Cocm.}}(x)$  имеет максимальное значение из всех вычисленных  $FP_{j, \text{Cocm.}}(x)$ . Если,  $FP_{j, \text{Cocm.}}(x) = FP_{(j+1), \text{Cocm.}}(x)$ , то считается, что объект находится в  $j$ -ом состоянии.

Если решение о состоянии объекта принимается на основании нескольких параметров, то в этом случае обобщенная функция принадлежности для  $J$ -го состояния имеет вид:

$$FP_{j, \text{Cocm.}} = \sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot FP_{j, \text{Cocm.}}(x_i),$$

где  $FP_{j, \text{Cocm.}}(x_i)$  – значение функции принадлежности к  $J$ -му состоянию по параметру  $x_i$ ;

$\alpha_i$  – весовой коэффициент значимости параметра  $x_i$ ;

$N$  – число параметров, значение которых учитывается при принятии решения.

Вывод о том, что объект находится в состоянии  $J$ , делается в том случае, если  $FP_{J, \text{Cocm.}}$  имеет максимальное значение из функций принадлежности, вычисленных для всех возможных состояний объекта.

Если окажется, что для нескольких состояний функции принадлежности  $FP_{j, \text{Cocm.}}$  имеют одинаковое значение, то отнесение объекта к определенному состоянию осуществляется на основании функции принадлежности для параметра, который имеет наибольший весовой коэффициент. В такой ситуации, когда все параметры равнознач-

ны, следует руководствоваться дополнительными правилами по отнесению объекта к определенному состоянию в зависимости от целевых и стоимостных критериев.

Система поддержки принятия решений должна предоставлять пользователю удобные механизмы выбора и формирования требуемой решающей функции.

### Обработчик ВИЗП и характеристик временных трендов

Основной функцией этой компоненты СППР является визуализация полученных данных и представление их в удобной для пользователя форме, в виде таблиц, графиков, диаграмм. На рис. 2-4 показан вариант цвето-амплитудных диаграмм интенсивности вибрации подшипниковых опор турбоагрегата в единицах виброскорости (мм/с).

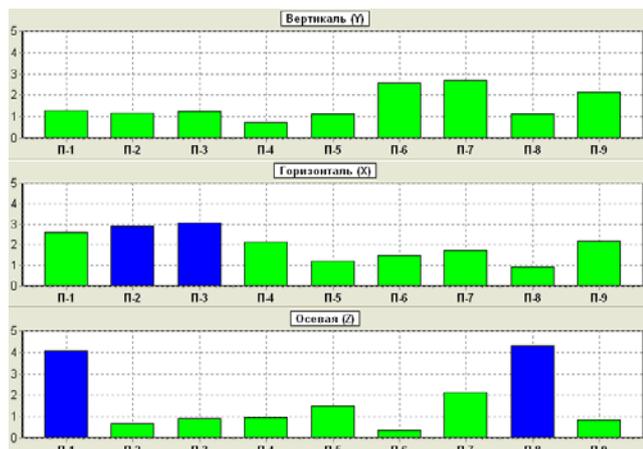


Рис. 2. Нормальное вибрационное состояние турбоагрегата в ходе эксплуатации

### Заключение.

При принятии решений приходится сталкиваться с рядом неопределенностей, к которым следует отнести: неполноту знаний о проблеме; невозможность точного учета реакции реальных объектов на воздействия, формируемые субъектом принятия решения; неточное понимание своих целей, лицом, принимающим решение. Помимо этого, данные, характеризующие состояние объектов, по которым принимается решение, обладают некоторой долей недостоверности. Переход от неопределенностей к каким-то формализованным категориям является субъективным. Однако, при принятии решений существует и объективная составляющая, обычно представляющая собой ограничения, накладываемые реальными условиями, такими как возможность вмешательства

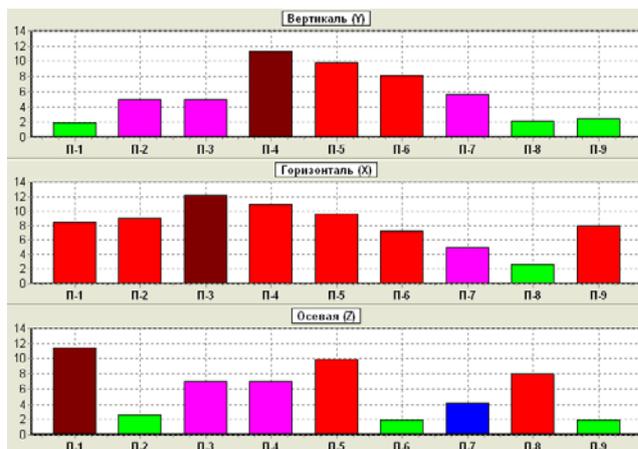


Рис.4. СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата в момент его аварийного останова

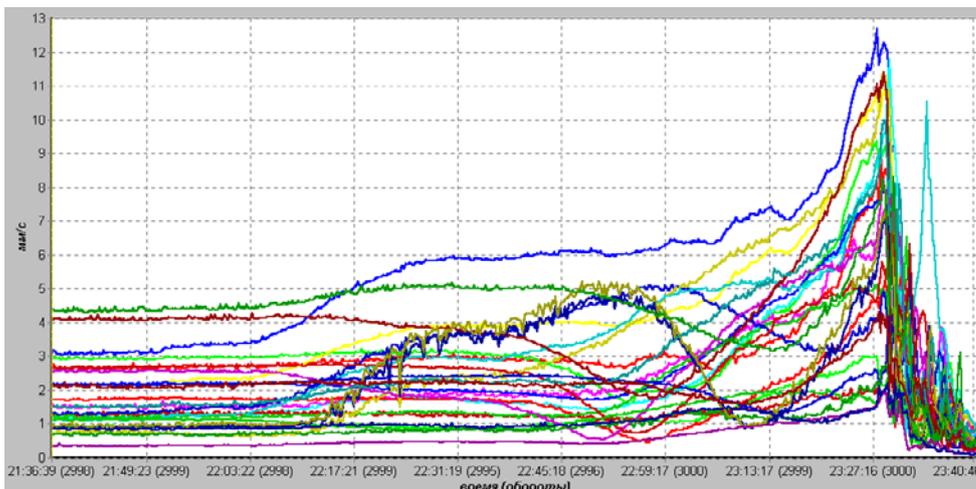


Рис. 3. Изменение СКЗ виброскорости подшипниковых опор турбоагрегата, с его последовавшей аварийной остановкой

в технологический процесс, наличие ресурсов, сроки, квалификация персонала и т.п..

Для разработки и реализация подобных систем необходимы значительные усилия, наличие соответствующих компьютерных контрольно-измерительных систем, длительные экспериментальные наблюдения и исследования. Также требуются значительные временные затраты квалифицированных экспертов и специалистов-разработчиков, а также заинтересованность и терпение потенциальных потребителей подобных систем.

### 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, B. 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. Бранцевич П.Ю. Большие данные в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / П.Ю. Бранцевич, Е.Н. Базылев // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2016. – № 3, – с. 28-41.
11. 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.
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. 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, – с. 148-152.
14. Бранцевич П.Ю. Компьютерный вибрационный мониторинг механизмов и турбоагрегатов / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк, Е.Н. Базылев // Доклады БГУИР. – 2015. – № 7, – с. 5-10.
15. Бранцевич П.Ю. Получение и анализ больших объемов виброметрических данных и сигналов / П.Ю. Бранцевич, Е.Н. Базылев, С.Ф. Костюк // BIG DATA and Advanced Analytics: collection of materials of the third international scientific and practical conference. (Minsk, Belarus, May, 3–4, 2017) / Editorial board: M. Batura [etс.]. – Minsk, BSUIR, 2017, – с. 144-149.
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. Базылев Е.Н. Особенности применения встроенных систем в системах вибрационного контроля, мониторинга, диагностики / Е.Н. Базылев, П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк // International Congress on Computer Science: Information Systems and Technologies [Электронный ресурс]: материалы междунар. науч. конгресса, Республика Беларусь, Минск, 24-27 окт. 2016 г. – Минск : БГУ, 2016, – с. 759-762.
18. Бранцевич П.Ю. Оценка технического состояния механизмов с вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов. – Минск: Четыре четверти, 2021. – 236 с.
19. Бранцевич П.Ю. Анализ причин изменения вибрационного состояния агрегата роторного типа / П.Ю. Бранцевич // Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр. / Объедин. ин-т машиностроения НАН Беларуси; редкол.: А.А. Дюжев [и др.]. – 2013, – с. 277-283.