

Оценка состояния технических объектов по параметрам вибрационного сигнала

П. Ю. Бранцевич, к. т. н., доцент, в. н. с.

НИЛ вибродиагностических систем

E-mail: branc@bsuir.edu.by

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, 220013,
г. Минск, Республика Беларусь

Н. В. Лапицкая, к. т. н., доцент, заведующая кафедрой
программного обеспечения информационных технологий

E-mail: lapan@bsuir.by

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, 220013,
г. Минск, Республика Беларусь

В. А. Леванцевич, м. т. н., старший преподаватель кафедры
программного обеспечения информационных технологий

E-mail: lvn@bsuir.by

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, 220013,
г. Минск, Республика Беларусь

Д. В. Деменковец, м.т.н., старший преподаватель кафедры про-
граммного обеспечения информационных технологий

E-mail: Demenkovets@bsuir.by

Белорусский государственный университет информатики
и радиоэлектроники, ул. П. Бровки, д. 6, 220013,
г. Минск, Республика Беларусь

Аннотация. Целью исследований, представленных в данной работе, является разработка нового способа обработки вибрационного сигнала. Рассмотрены основные первичные информативные параметры вибросигналов, используемые для оценки вибрационного состояния машин роторного типа. Предложен подход, основанный на использовании решающих функций, отличающийся тем, что они применяются по отношению, как к первичным информативным параметрам вибросигналов, так и к результатам статистической обработки временных трендов первичных параметров. Приведены примеры решающих функций. Представлен объединенный формат таблицы сведений о вибрационном состоянии технического объекта, который использован при создании реальных систем поддержки принятия решений.

Ключевые слова: вибрация, информативные признаки, вибрационное состояние, тренд, решающие функции, программное средство

Для цитирования: Бранцевич, П. Ю. Оценка состояния технических объектов по параметрам вибрационного сигнала / П. Ю. Бранцевич, Н. В. Лапицкая, В. А. Леванцевич, Д. В. Деменковец // Цифровая трансформация. – 2021. – № 2 (15). – С. 56–63.



© Цифровая трансформация, 2021

Assessment of the Technical Objects State by the Parameters of the Vibration Signal

P. J. Brancevich, Candidate of Sciences (Technology), Leading
Researcher, Research Laboratory of Vibrodiagnostic Systems

E-mail: branc@bsuir.edu.by

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka St., 220013 Minsk, Republic of Belarus

N. V. Lapitskaya, Candidate of Sciences (Technology), Associate Professor, Head of Information Technology Software Department
E-mail: lapan@bsuir.by

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka St., 220013 Minsk, Republic of Belarus

V. A. Levantsevich, Master of Science (Technology), Senior Lecturer of the Information Technology Software Department

E-mail: lvn@bsuir.by

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka St., 220013 Minsk, Republic of Belarus

D. V. Demenkovets, Master of Science (Technology), Senior Lecturer of the Information Technology Software Department

E-mail: Demenkovets@bsuir.by

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
6 P. Brovka St., 220013 Minsk, Republic of Belarus

Abstract. The aim of the research presented in this work is to develop a new method for processing a vibration signal. Among the considered the main primary informative parameters of vibration signals used to assess the vibration state of rotary-type machines. An approach based on the use of decisive functions is proposed, characterized by their application in relation to both the primary informative parameters of vibration signals and the results of statistical processing of temporal trends of primary parameters. The work also provides examples of decision functions. Also presented is the combined format of the information table on the vibration state of a technical object which is used to create real decision support systems.

Key words: vibration, informative characteristics, vibration state, trend, crucial functions, software tool

For citation: Brancevich P. J., Lapitskaya N. V., Levantsevich V. A., Demenkovets D. V. Assessment of the Technical Objects State by the Parameters of the Vibration Signal. *Cifrovaja transformacija* [Digital transformation], 2021, 2 (15), pp. 58–65(in Russian).

© Digital Transformation, 2021

Введение. Состояние производственного объекта характеризуется многими параметрами, имеющими различную физическую природу. Для механизмов и агрегатов роторного типа, в основу механического функционирования которых положено вращательное движение, одними из важнейших параметров являются амплитудный и спектральный состав вибрации [1-3]. Поэтому решение задачи проактивного технического обслуживания такого оборудования 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 вибрационных сигналов можно осуществлять, используя компьютерные измерительно-вычислительные комплексы, состоящие из: мобильного или настольного компьютера; модуля АЦП, подключаемого к стандартному интерфейсу вычислительной машины; виброизмерительных каналов с первичными пьезоэлектрическими преобразователями; проблемно-ориентированного программного обеспечения [4-5].

Наряду с использованием измерительно-вычислительных комплексов для ввода и со-

хранения длительных вибрационных сигналов могут использоваться специальные автономные сборщики-регистраторы [6]. На рисунке 1 показан пример сигнала, полученного с помощью ИВК «Тембр-М» [5].

После регистрации вибрационного сигнала, выполняется его цифровая обработка для выявления аномальных всплесков [7] и (или) вычисления определенных параметров вибросигнала через заданные временные интервалы (построение их трендов во времени), по которым можно оценить техническое состояние объекта. В данной работе решается задача автоматизации процесса принятия решения по оценке технического состояния мониторируемого агрегата, путем анализа значений параметров вибрационного сигнала, отражающего колебания его подшипниковых опор. Данное направление научных исследований является решением одной из подзадач общей проблемы создания компьютерных систем вибрационного мониторинга и диагностики для автоматического принятия решений по защите контролируемых механизмов и агрегатов.

Основная часть. При оценке вибрационного состояния технического объекта используют, как правило, следующие основные пара-

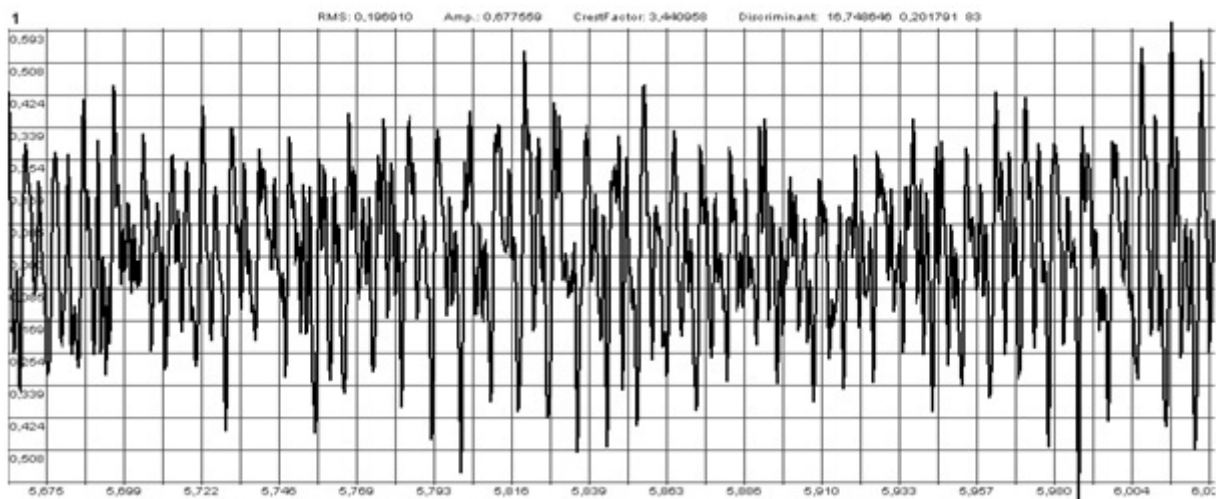


Рис. 1. Исходный вибрационный сигнал в единицах виброускорения, (ось абсцисс – время, с; ось ординат – виброускорение, м/с²)
 Fig. 1. The original vibration signal in units of vibration acceleration (abscissa axis – time, s; ordinate axis – vibration acceleration, m/s²)

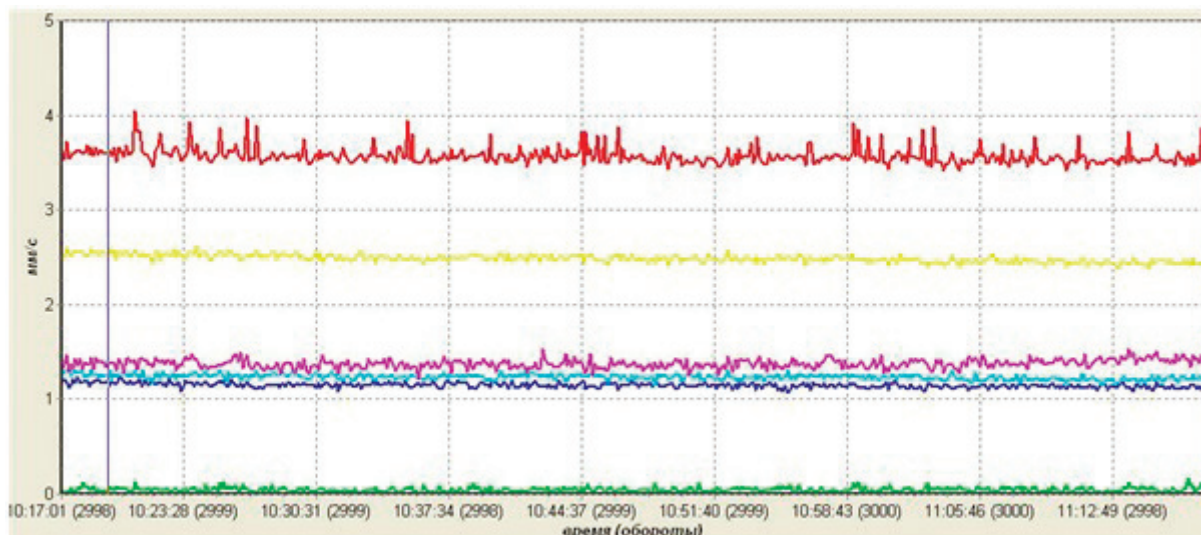


Рис. 2. Изменение СКЗ виброскорости в частотной полосе 10-1000 Гц и СКЗ частотных составляющих 50, 100, 150, 200, 25 Гц
 Fig. 2. Modification RMS vibration speed in the frequency range 10-1000 Hz and RMS frequency components 50, 100, 150, 200, 25 Hz

метры, вычисляемые путем математической обработки исходного вибрационного сигнала: амплитуды спектральных составляющих вибросигнала на фиксированных частотах (например, $f_1=25$ Гц, $f_2=50$ Гц, ..., $f_k=2000$ Гц); мощность или среднее квадратичное значение (СКЗ) вибрации в полосе частот $f_n \div f_k$ (может задаваться несколько полос); пик-фактор; эксцесс; асимптота; коэффициент модуляции огибающей вибросигнала; СКЗ составляющих вибрации, выделяемых ветвями с определенными центральными частотами своих АЧХ [8].

При наличии высокопроизводительных вычислителей обработка вибросигнала может быть произведена параллельно с его регистрацией.

На рисунке 2, в качестве примера, пред-

ставлен часовой тренд ряда параметров, вычисленных при обработке вибрационного сигнала, полученного при контроле вибрации подшипниковой опоры турбоагрегата.

Визуальный анализ трендов параметров вибрации позволяет обнаружить их возможные изменения и, соответственно, изменение технического состояния контролируемого объекта. Однако его проведение связано со значительными временными затратами технического специалиста, к тому же, желательно получить какие-то численные оценки обрабатываемых данных. Поэтому актуальна автоматизация этой процедуры.

Обработка данных временных трендов выполняется по алгоритмам теории вероятностей



Рис. 3. Результаты обработки суточного временного тренда СКЗ виброскорости подшипника генератора при его нормальной работе
 Fig. 3. Results of processing the daily RMS time direction vibration speed of the generator bearing during its normal operation

и математической статистики [9], которые достаточно просто реализуются программно [10]. На рисунке 3 показан пример такой обработки, в результате которой получена гистограмма распределения СКЗ виброскорости по уровню и численные значения, определяющие отличительные особенности его изменения.

Параметр «Среднее значение виброскорости за период наблюдения» – $V_{med,CKЗвск}$, может быть использован для общей оценки технического состояния контролируемого объекта. Для этого применяется решающая функция [11, 12]:

$$FR(V_{med,CKЗвск}) = \begin{cases} 0.25, & \text{если } V_{med,CKЗвск} \leq V_{A,med,CKЗвск}; \\ 0.5, & \text{если } V_{A,med,CKЗвск} < V_{med,CKЗвск} \leq V_{B,med,CKЗвск}; \\ 0.75, & \text{если } V_{B,med,CKЗвск} < V_{med,CKЗвск} \leq V_{C,med,CKЗвск}; \\ 1.0, & \text{если } V_{C,med,CKЗвск} < V_{med,CKЗвск}, \end{cases} \quad (1)$$

где $V_{A,med,CKЗвск}$, $V_{B,med,CKЗвск}$, $V_{C,med,CKЗвск}$ – значения СКЗ виброскорости, соответствующие граничным уровням технического состояния, причем $V_{A,med,CKЗвск} < V_{B,med,CKЗвск} < V_{C,med,CKЗвск}$. Конкретные величины этих уровней могут определяться: стандартами; путем анализа изменения вибрационного состояния достаточно большого числа однотипных объектов; на основе экспертных оценок. Уровни обычно отличаются друг от друга на 4-8 дБ [1].

Если $FR(V_{med,CKЗвск}) = 0.25$, то механизм находится в очень хорошем вибрационном состоянии (это обычно новые (после ремонта), прошедшие приработку машины) и может эксплуатироваться без временных ограничений. Если $FR(V_{med,CKЗвск}) = 0.5$, то механизм находится в удовлетворительном вибрационном состоянии и может эксплуатироваться еще в течение нескольких месяцев или тысяч часов. Если $FR(V_{med,CKЗвск}) = 0.75$, то состояние механизма оценивается как недостаточно удовлетворительное и на эксплуатацию механизма накладываются ограничения на допустимое время эксплуатации, обычно это несколько дней или десятков-сотен часов. Если $FR(V_{med,CKЗвск}) = 1$, то состояние механизма аварийно-опасное и требуется оперативное реагирование, вплоть до его незамедлительной остановки.

Однако, предоставляя обобщенную характеристику вибросостояния объекта на длительном временном интервале, параметр $V_{med,CKЗвск}$ не отражает возможные изменения амплитудно-частотного состава вибрации на отдельных режимах работы, когда могут наблюдаться её существенные изменения, определяемые «максимальным значением» – $V_{max,CKЗвск}$. При оценке состояния по отношению к $V_{max,CKЗвск}$ также можно применить решающую функцию вида (1), учитывая при этом режимные факторы и предвари-

тельно удалив из выборки возможные случайные выбросы. Изменчивость $V_{med,CKЗвск}$ характеризуется «СКЗ разброса значений виброскорости за период наблюдения» – $S_{СКЗвск}$, а также диапазоном изменения – $D_{СКЗвск}$. Установить граничные уровни решающей функции для этих параметров значительно сложнее. В качестве $S_{A,CKЗвск}$, $D_{A,CKЗвск}$ могут быть приняты, увеличенные на 20-25 процентов, значения $S_{СКЗвск}$, $D_{СКЗвск}$, полученные при эксплуатации новых, приработанных машин, при прохождении ими всех типовых режимов эксплуатации. Границы зон B и C целесообразно выбирать на основе результатов длительной эксплуатации объектов контроля и с учетом экспертных оценок. Рост параметра $S_{СКЗвск}$ или $D_{СКЗвск}$ свидетельствует об определенном изменении технического состояния объекта, даже при незначительном увеличении $V_{med,CKЗвск}$.

Такую же решающую функцию можно применить к другим параметрам. В общем виде она имеет вид:

$$FR(P_i) = \begin{cases} 0.25, & \text{если } P_i \leq P_{A,i'}; \\ 0.5, & \text{если } P_{A,i'} < P_i \leq P_{B,i'}; \\ 0.75, & \text{если } P_{B,i'} < P_i \leq P_{C,i'}; \\ 1.0, & \text{если } P_{C,i'} < P_i, \end{cases} \quad (2)$$

где P_i – i -ый параметр 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.

На основе решающих функций по отдельным параметрам можно формировать обобщающие решающие функции для группы параметров.

В простейшем случае – это линейная комбинация решающих функций по отдельным параметрам [12]. Например:

$$FR_{\Sigma} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{k_i}{k_{i,max}} FR(P_i), \quad (3)$$

где FR_{Σ} – 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 коэффи-

циент 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:

$$FR_{\Sigma} = \max \left(\frac{k_i}{k_{i,max}} FR(P_i) \right), \quad (4)$$

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

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

$$FR_{\Sigma f} = f[FR(P_1), FR(P_2), \dots, FR(P_N)], \quad (5)$$

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

$$S_{\varphi} = \varphi(P_1, P_2, \dots, P_N). \quad (6)$$

Далее представлены примеры таких функций [12]:

$$FR_{\Sigma f} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [FR(P_i)]^2}; \quad (7)$$

$$FR_{\Sigma f} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [FR(\frac{k_i}{k_{i,max}} P_i)]^2}; \quad (8)$$

$$S_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (P_i)^2}; \quad (9)$$

$$S_{\varphi} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\frac{k_i}{k_{i,max}} P_i)^2}; \quad (10)$$

$$S_{\varphi} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \left(\frac{k_i}{k_{i,max}} 201g \frac{P_i}{P_{0,i}} \right), \quad (11)$$

где $P_{0,i}$ – опорный уровень для параметра P_i .

Таблица вибрационного состояния технического объекта. Сведения о вибрационном состоянии технического объекта содержат информативные параметры, значения которых вычисляются в результате обработки исходных вибрационных сигналов. Для упрощения последующей обработки и сравнительного анализа

в системах поддержки принятия решений (СППР) требуется их структуризация. К сожалению, каждое производственное предприятие, как правило, использует свою форму паспорта технического состояния механизмов и агрегатов. Поэтому, для решения этой проблемы предлагается унифицировать форму таблицы для записи и хранения параметров вибрационных сигналов в ниже представленном формате.

Заголовок, в котором указывается:

- наименование предприятия и его атрибуты (министерство, место расположения, адрес, телефон и т.п.), строка 80 символов;
- подразделение (цех, участок, филиал и т.п.), строка 40 символов;
- тип механизма и его атрибуты (наименование, год выпуска, срок эксплуатации, мощность, основные рабочие частоты, дата последнего ремонта, основные технические характеристики (до 10 параметров)), 15 строк по 40 символов;
- дата и время измерений, строка 80 символов;
- режим работы во время проведения измерений, строка 40 символов;
- резервные информационные поля (до трех), 3 строки по 80 символов.

Информационные строки таблицы содержат следующие поля:

- порядковый номер, 3 символа;
- тип параметра, 2 символа;
- значение параметра, 18 символов;
- атрибуты параметра (единица измерений (10 символов), уточняющие характеристики (до трех полей по 12 символов), наименование параметра (40 символов)).

Параметры подразделяются на следующие типы:

1. Численное значение, обобщающей характеристики вибрационного сигнала, вычисленной в результате обработки конечного временного отрезка вибрационного сигнала.

Например, СКЗ виброскорости (виброускорения) в частотной полосе 10-1000 Гц, пик-фактор, эксцесс, асимптота.

2. Амплитуды отдельных спектральных составляющих в единицах виброускорения или виброскорости (в качестве атрибута указывается значение частоты).

3. СКЗ виброускорения (виброскорости) в относительно узкой полосе частот, как элемент полосового спектра (в качестве атрибутов указываются значения нижней и верхней границ частотной полосы).

4. Параметры вейвлет-преобразования.

Например, СКЗ виброускорения или виброскорости, пик-фактор, составляющей вибрационного сигнала, выделенной вейвлетом (атрибутами являются, тип вейвлета, центральная частота частотной характеристики вейвлета).

5. Амплитудные параметры оборотных составляющих.

Например, амплитуда первой оборотной составляющей в единицах виброскорости, виброускорения или виброперемещения (атрибутами являются, частота вращения ротора, кратность оборотной составляющей по отношению к частоте вращения).

6. Фазовые параметры оборотных составляющих.

Например, фаза первой оборотной составляющей в единицах виброскорости, виброускорения или виброперемещения (атрибутами являются частота вращения ротора, кратность оборотной составляющей по отношению к частоте вращения).

7. Сдвиг фазы частотных составляющих относительно базовой частотной составляющей (атрибутами являются частота базовой составляющей и частота данной составляющей).

8. Параметры полигармонической составляющей (СКЗ виброскорости (виброускорения), пик-фактор, эксцесс, асимптота).

9. Параметры шумоподобной составляющей (СКЗ виброскорости (виброускорения), пик-фактор, эксцесс, асимптота).

10. Параметры модовых компонент, полученных в результате обработки исходного вибросигнала преобразованием Гильберта-Хуанга (СКЗ виброскорости (виброускорения), пик-фактор, эксцесс, асимптота, амплитуды частотных составляющих).

11. Параметры огибающей, выделенной для частотной полосы исходного сигнала, – коэффициент модуляции, амплитуды частотных составляющих (в качестве атрибутов указываются значения нижней и верхней границ частотной полосы).

12 – 18. Параметры, аналогичные параметрам 1 – 6, но вычисленные в результате обработки временных трендов соответствующих параметров.

Заключение. Анализ вибрационного состояния технических объектов по информативным признакам и их трендам, вычисленным на основе анализа вибросигнала, представляет собой нетривиальную задачу, которая сопряжена со зна-

чительными временными затратами и требует высокой квалификации инженерно-технического персонала. За более, чем 20-летний период эксплуатации ИВК «Лукомль-2001» [13-16] на предприятиях энергетики Беларуси, получен и продолжает накапливаться, большой объём данных, которые требуют систематизации и последующей обработки [17,18]. Создание СППР, основу логического анализа в которых выполняют решающие функции, направлено на автоматизацию процес-

са обработки вибрационных сигналов, временных трендов вибрационных параметров и предоставления пользователям удобного инструмента для облегчения решения задач данного плана. Предложен подход для решения задачи автоматизации процесса принятия решения по оценке технического состояния мониторируемого агрегата, путем сравнительного анализа значений параметров вибрационных сигналов, отражающих колебания его подшипниковых опор.

Список литературы

1. Неразрушающий контроль. Справочник. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика /Ф. Я. Балицкий и др. М.: Машиностроение, 2005. – 485 с.
2. Bently, D.E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics/ D.E. Bently, C.N. Hatch, B. Grissom. – Canada.: Bently pressurized bearing company, 2002. – 726 pp.
3. Гольдин, А.С. Вибрация роторных машин / А.С. Гольдин. М.: Машиностроение, 1999. –344 с.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. 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.
9. Вентцель, Е.С. Теория вероятностей и её инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. Теория вероятностей и её инженерные приложения. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1988. – 488 с.
10. Бранцевич П. Ю. Оценка технического состояния механизмов вращательным движением на основе анализа вибрационных характеристик пусков и выбегов. –Минск: Четыре четверти. – 2021. – 236 с.
11. Бранцевич, П.Ю. Система контроля и анализа технического состояния механизмов по вибрационным параметрам / П.Ю. Бранцевич // Интеллектуальные системы: Труды четвертого международного симпозиума. Под ред. К.А. Пупкова. - М.: РУСАКИ, 2000. с. 244-247.
12. Brancevich, P.J. Organization of intellectual system of the assessment technical conditions composite mechanisms / P.J. Brancevich, Y. Li // Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS-2013): Materials III Intern. scientific and engineering. Conf. (Minsk, 21-23 February 2013). –Minsk: BSUIR, 2013. pp. 569-572.
13. Бранцевич, П.Ю. ИВК «Лукомль-2001» для вибрационного контроля / П.Ю. Бранцевич // Энергетика и ТЭК, № 12 (69), 2008, с.19-21
14. Патент на полезную модель. 8654 Республика Беларусь. Устройство для измерения параметров вибрации и защиты механизмов с вращательным движением / П.Ю. Бранцевич, С.Ф. Костюк; заявлено 21.03.2012; опубл. 30.10.2012, Официальный бюллетень. Изобретения, полезные модели, промышленные образцы. № 5., 2012– с. 230–231.
15. МРБ МП.МН 2238-2012. Измерительно-вычислительный комплекс «Лукомль-2001(4)». Методика поверки [Текст]. – Введ. 2012–05–14. – Минск: Белорусский государственный институт метрологии, 2012. –19 с.
16. 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.

17. Бранцевич, П. Ю. Разработать программное обеспечение для обработки результатов, полученных с помощью измерительно-вычислительного комплекса «Тембр» (Отчет о НИР № ГР 20090025) [Электронный ресурс] / П. Ю. Бранцевич ; УО «БГУИР». — Мн., 2009. — 140 с. — Рус. — Деп. в ГУ «БелИСА» 26.02.2010 г., № Д201010.
18. 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 [etc.]. – Minsk, BSUIR, 2017. – с. 144-149.

References

1. Non-destructive testing. Directory. Volume 7. Book 2. Vibration diagnostics. F. Ya. Balitsky et al. M.: Mashinostroenie, 2005. – 485 p.
2. Bently D.E. Fundamentals of Rotating Machinery Diagnostics. D.E. Bently, C.N. Hatch, B. Grissom. - Canada.: Bently pressurized bearing company, 2002. 726 pp.
3. Goldin A.S. Vibration of rotary machines. A.S. Goldin. M.: Mashinostroenie, 1999. –344 p.
4. Brancevich P. J. Methods of using the measuring and computing complex "Timbre-M" in assessing the vibration state of mechanisms and assemblies. Information technology. Radio electronics. Telecommunications (ITRT-2014): Sat. articles of the IV international correspondence scientific and technical conference. Volga State. un-t service. Togliatti: Publishing house: PVGUS, 2014. p. 55-67.
5. Brancevich, P. J. Kostyuk S.F., Bazylev E.N., Bazarevsky V.E. Hardware and software for solving problems of vibration control and diagnostics. Instrument-making-2014. Materials of the 7th International Scientific and Technical Conference, Minsk, November 19-21, 2014. Belarus.nats. tech. un-t; editorial board.: O. K. Gusev (chairman) [and others]. Minsk: BNTU, 2014. p. 39-40.
6. Brancevich, P. J. Measuring and computing system for distributed collection and centralized processing of vibrometric data. Sensors and converters of information of measurement, control and management systems. Collection of materials of the 12th scientific and technical conference with the participation of foreign experts. Ed. V.N. Azarov. M.: MGIEM, 2000. p. 170-171.
7. Brantsevich P.Yu. Bazylev E.N. Big data in vibration control systems, monitoring, diagnostics. Non-destructive testing and diagnostics. 2016. No. 3. p. 28-41.
8. 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. pp. 612-619.
9. Wentzel E.S. Ovcharov L.A. Probability theory and its engineering applications. Probability theory and its engineering applications. M.: Science. Ch. ed. phys.-mat. lit. 1988.- 488 p.
10. Brancevich P. J. Assessment of the technical state of mechanisms by rotary motion based on the analysis of vibration characteristics of starts and runs. Minsk: Four quarters. 2021.- 236 p.
11. Brancevich P.J. System for monitoring and analyzing the technical state of mechanisms by vibration parameters. Intelligent systems: Proceedings of the fourth international symposium. Ed. K.A. Pupkov. M.: RUSAKI, 2000. p. 244-247.
12. Brancevich P.J., Li Y. Organization of intellectual system of the assessment technical conditions composite mechanisms. Open Semantic Technology for Intelligent Systems (OSTIS-2013): Materials III Intern. scientific and engineering. Conf. (Minsk, 21-23 February 2013). Minsk: BSUIR, 2013. pp. 569-572.
13. Brantsevich P.J. IVK "Lukoml-2001" for vibration control. Energy and Fuel and Energy Complex, No. 12 (69), 2008, pp. 19-21
14. Brancevich P.J., Kostyuk S.F. Patent for utility model. 8654 Republic of Belarus. Device for measuring vibration parameters and protection of mechanisms with rotary motion; declared 03/21/2012; publ. 10/30/2012, Official Bulletin. Inventions, utility models, industrial designs. No. 5., 2012. p. 230-231.
15. MRB MP.MN 2238-2012. Measuring and computing complex "Lukoml-2001 (4)". Verification method [Text]. - Introduction. 2012-05-14. Minsk: Belarusian State Institute of Metrology, 2012. 19 p.
16. Brantsevich P.J. Kostyuk S.F., Bazylev E.N. The solution of problems of vibration control, monitoring, assessment of the technical condition of mechanisms and turbine units using computer systems. Reports of BSUIR. 2015. No. 2 (88). p. 148-152.
17. Brancevich P. J. To develop software for processing the results obtained using the measuring and computing complex "Timbre" (Research report No. GR 20090025). UO "BSUIR". Mн., 2009. 140 p. Rus. Dep. in GU "BelISA" on February 26, 2010, No. D201010.
18. Brancevich P.J., Bazylev E.N., Kostyuk S.F. Obtaining and analysis of large volumes of vibrometric data and signals. 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 [etc.]. Minsk, BSUIR, 2017. p. 144-149.

Received: 15.10.2020

Поступила: 15.10.2020