*На правах рукописи*

**КУДРЯВЦЕВА Ирина Сергеевна**

# КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ОСНОВЕ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКОЙ ФУНКЦИИ ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СИГНАЛА

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий

**АВТОРЕФЕРАТ**
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

ОМСК – 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Омский государственный технический университет».

**Научный руководитель:** **Науменко Александр Петрович**
доктор технических наук, профессор

**Официальные оппоненты:** **Куменко Александр Иванович,**
доктор технических наук, доцент
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет «МЭИ» (г. Москва)

**Тарасов Евгений Владимирович,**
кандидат технических наук
ООО «Автоматика-Сервис» (г. Омск)

**Ведущая организация:** Закрытое акционерное общество «Научно-исследовательский институт интроскопии МНПО «Спектр» (г. Москва)

Защита диссертации состоится 29 июня 2021 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.178.01, созданного на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Омский государственный технический университет» по адресу: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, Главный корпус, ауд. П-202.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Омского государственного технического университета и на сайте https://www.omgtu.ru.

Автореферат разослан «___» _____2021 г.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью учреждения, просим направлять по адресу 644050, Омск, пр. Мира, 11, учёному секретарю диссертационного совета Д 212.178.01. Тел.: (3812) 65-24-79, e-mail: dissov_omgtu@omgtu.ru

Учёный секретарь
диссертационного совета Д 212.178.01
кандидат технических наук, доцент Завьялов С.А.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В современных условиях рыночной экономики для предприятий с непрерывным производством продукции *актуальными* являются проблемы, связанные с повышением ресурса работы технологического оборудования и обеспечением его безаварийной эксплуатации. Решение указанных проблем достигается путём использования средств диагностирования технических устройств, позволяющих на ранней стадии зафиксировать начало деструктивных изменений в узлах и деталях и отслеживать процесс их развития вплоть до перехода объектов контроля в предельное или опасное состояние.

Совершенствование методов и средств технической диагностики технических устройств неразрывно связано с поиском новых критериев состояния и диагностических признаков, что обеспечивает, в первую очередь, повышение достоверности определения состояния, а также снижение вероятности пропуска опасного состояния объекта контроля. Развитие виброакустической (ВА) диагностики, как основного метода контроля состояния и диагностирования машин и механизмов, также обусловлено выявлением и обоснованием новых критериев состояния и диагностических признаков неисправностей на основе параметров ВА сигналов. Создание определяющих критериев неисправностей объектов диагностирования на основе статистически независимых параметров характеристик ВА сигнала позволяет повысить достоверность диагностирования. Поэтому исследования в этой области являлись и являются *актуальными*, что обеспечивает развитии теории и практики технического диагностирования.

Данная работа посвящена исследованию характеристической функции (ХФ) виброакустического сигнала и выявлению её свойств, которые могут характеризовать состояние объекта контроля или диагностирования.

**Степень разработанности проблемы**. Исследованиями параметров ВА сигналов с конца 50-х годов прошлого века занимались научные, академические и научно-производственные организации в нашей стране и за рубежом, среди которых следует отметить ИМАШ им. А. А. Благонравова АН СССР (г. Москва, РАН), Ленинградский сельскохозяйственный институт (г. Пушкин), Сибирский научно-исследовательский институт механизации и электрификации сельского хозяйства СО АН СССР (г. Новосибирск, ныне ФБГНУ «СибИМЭ» СО РАН), ООО НПЦ «Динамика» (г. Омск), Ассоциация «ВАСТ» (г. Санкт-Петербург) и другие. К наиболее значимым работам в этой области можно отнести исследования таких учёных как Балицкий Ф.Я., Барков А.В., Баркова Н.А., Биргер И.А., Генкин М.Д., Герике Б.Л., Гиоев З.Г., Зусман Г.В., Иориш Ю.И., Клюев В.В., Костюков В.Н., Куменко А.И., Лукьянов А.В., Носов В.Б., Павлов Б.В., Рагульскис К.М., Соколова А.Г., Ball A. D., Gu F., Randall R.B. и другие. Однако ни в одном из исследований не упоминается об

использовании характеристической функции ВА сигнала для целей контроля состояния или диагностирования объекта. В России в последние десятилетия исследованиям свойств характеристической функции и её применениям в различных областях посвящены работы профессора Вешкурцева Ю.М. и его учеников.

**Основная идея работы** состоит в использовании закономерностей изменения свойств характеристической функции виброакустического сигнала в зависимости от изменения вибросостояния машин и механизмов для формирования критериев оценки их технического состояния.

**Цель диссертационной работы** – формирование критериев оценки вибросостояния оборудования на основе выявленных закономерностей изменения свойств характеристической функции виброакустического сигнала при изменении состояния машин и механизмов.

Для достижения цели были поставлены и решены следующие **задачи:**

1. Проведён анализ методов оценки состояния, диагностирования и формирования критериев оценки состояния, диагностических признаков неисправностей машин и механизмов на основе параметров ВА колебаний.

2. Проведено аналитическое исследование и показана взаимосвязь среднеквадратического отклонения мгновенных значений ВА сигнала и площади под кривой модуля ХФ ВА сигнала, что доказало обоснованность использования свойств ХФ ВА сигналов для оценки вибросостояния.

3. Проведён анализ свойств ХФ ВА сигналов, полученных при возникновении неисправностей подшипников качения машин и механизмов, узлов поршневого компрессора (ПК), и эмпирически подтверждена связь величины площади под модулем ХФ ВА сигнала и состоянием подшипниковых узлов и узлов компрессора.

4. Проведён анализ свойств ХФ ВА сигналов, полученных при возникновении неисправностей подшипников качения, узлов ПК, и эмпирически выявлена взаимосвязь между величиной модуля ХФ ВА сигнала при заданном значении аргумента ХФ и состоянием узлов, а также взаимосвязь величины аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ ВА сигнала и состоянием узлов.

5. Определены граничные значения предложенных критериев с использованием вероятностно-статистических методов принятия решений.

6. Разработана методика и алгоритм оценки предложенных критериев состояния на основе характеристической функции ВА сигналов.

**Область исследования** – методы получения, анализа характеристик виброакустического сигнала и выделения их параметров, содержащих информацию о вибрационном состоянии центробежных и поршневых машин, механизмов и их узлов.

**Предмет исследования** – параметры характеристик виброакустического сигнала, связанные с изменением вибрационного состояния объекта контроля.

**Научная новизна** работы заключается в следующем:

1. Впервые выдвинута и подтверждена гипотеза о возможности применения аппарата характеристической функции для целей контроля вибросостояния и диагностики путём анализа свойств характеристической функции виброакустических колебаний объекта контроля.

2. Впервые теоретически установлена и экспериментально подтверждена гипотеза о взаимосвязи вибросостояния объекта и величины площади под кривой модуля ХФ ВА сигнала, что доказало обоснованность использования свойств ХФ ВА сигналов для оценки состояния и позволило предложить критерий оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК на основе значений площади под модулем ХФ ВА сигнала, которая является интегральным свойством ХФ.

3. Впервые экспериментально установлена закономерность, которая заключается в существовании взаимосвязи величины модуля ХФ ВА при заданном значении аргумента ХФ и состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора, а также взаимосвязи величины аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ ВА сигналов и состояния подшипниковых узлов, узлов ПК, что позволило подтвердить гипотезу о взаимосвязи свойств ХФ и ВА сигнала при изменении вибросостояния и предложить критерий оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК на основе значений модуля и аргумента ХФ ВА сигнала.

4. Вероятностно-статистическими методами установлены граничные значения критериев оценки состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора на основе свойств ХФ ВА сигнала, которые независимо от типа узлов и механизмов лежат на интервале от 0 до 1.

**Практическая значимость** работы заключается в том, что:

1. Предложены критерии оценки состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора на основе свойств ХФ ВА сигнала и установлены их граничные значения, которые независимо от типа узлов и механизмов лежат на интервале от 0 до 1, что позволяет использовать предложенные граничные значения критериев независимо от абсолютной величины ВА сигнала.

2. Предложена методика и способ оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК по значениям площади под модулем ХФ ВА сигнала (патент №2517772 «Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации»), которые изменяются в диапазоне от значений близких к 0 (предельное состояние) до значений близких к 1 (приемлемое состояние), что существенно упрощает оценку состояния узлов.

3. Предложена методика и способ оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК по значениям модуля ХФ ВА сигнала при заданном аргументе ХФ и значениям аргумента ХФ при заданном модуле ХФ ВА сигнала (патент №2514119 «Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибра-

ции»), которые изменяются в диапазоне от значений близких к 0 (предельное состояние) до значений близких к 1 (приемлемое состояние), что существенно упрощает оценку состояния узлов независимо от абсолютного уровня их вибрации.

**Реализация работы.** Предложенные методики оценки свойств ХФ и критерии состояния на основе свойств ХФ используются в универсальном приборе неразрушающего контроля «ЮНИСКОП» (свидетельство об утверждении типа средств измерений рег. №71984-18).

Новизна результатов научной работы подтверждена патентами РФ № 2514119 «Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации» от 27.04.2014 г., № 2517772 «Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации» от 27.05.2014 г.

**Методы исследования.** Теоретические исследования базировались на применении методов теории вероятностей и математической статистики, технического диагностирования, методов принятия решения. Экспериментальные исследования проведены с учётом теории планирования эксперимента и путём натурных испытаний на стендах контроля состояния подшипников качения. Виброакустические сигналы поршневых компрессоров получены из баз данных систем мониторинга.

**Соответствие диссертации паспорту научной специальности.** Представленная диссертация удовлетворяет п.1, п.6 паспорта специальности 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды, веществ, материалов и изделий:

п. 1. Научное обоснование новых и усовершенствование существующих методов аналитического и неразрушающего контроля природной среды, веществ, материалов и изделий.

п. 6. Разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах и средствах контроля, автоматизация приборов контроля.

**Основные научные результаты, выносимые на защиту:**

1. Закономерности изменений среднеквадратического отклонения (СКО) мгновенных значений ВА сигнала и площади под кривой ХФ ВА сигнала, что доказало обоснованность использования свойств ХФ ВА сигналов для оценки вибросостояния и позволило предложить критерий оценки состояния подшипниковых узлов и узлов поршневого компрессора на основе величины площади под модулем ХФ ВА сигнала, которая является интегральным свойством ХФ.

2. Закономерности изменений значений модуля ХФ ВА сигнала при заданном аргументе ХФ и значений аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ ВА сигнала в зависимости от вибросостояния, позволившие сформировать критерии оценки состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора и предложить их граничные значения, которые независимо от типа узлов и механизмов, абсолютной величины вибрации лежат на интервале от 0 до 1.

3. Критерии оценки состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора на основе свойств ХФ ВА сигнала и установленные их граничные значения, которые независимо от типа узлов и механизмов имеют значения на интервале от 0 до 1, что позволяет использовать предложенные граничные значения критериев независимо от абсолютной величины виброакустического сигнала.

**Степень достоверности научных положений и результатов** подтверждена результатами экспериментальных исследований, проведённых с использованием аттестованных и поверенных средств измерений, которые подтвердили результаты теоретические и аналитических исследований. Полученные результаты основываются на известных вероятностно-статистических методах и проверенных методиках планирования эксперимента, математической статистики и теории вероятностей.

**Апробация работы.** Основные положения и выводы диссертационной работы докладывались и обсуждались на региональных научно-технических конференциях «Наука. Образование. Бизнес» (Омск, 2010, 2011, 2014, 2016); на международных научно-технических конференциях «Динамика систем, механизмов и машин» (Омск, 2009, 2014, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020), «International conference on condition monitoring and machinery failure prevention technologies (CM/MFPT)» (UK, Oxford, 2015; France, Charenton-le-Pont, 2016), «Проблемы машиноведения» (Омск, 2019, 2020), «Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства» (Омск, 2015, 2016, 2019).

**Личный вклад автора.** Автором проведён аналитический обзор состояния вопроса, теоретические и экспериментальные исследования, обобщение и анализ результатов теоретических и экспериментальных исследований, апробация результатов, подготовка научных публикаций по работе. Автору принадлежит формулировка закономерностей и выводов, изложенных в диссертации. Подготовка к публикации полученных результатов проводилась совместно с соавторами на паритетной основе.

**Публикации.** Результаты диссертационного исследования опубликованы в 33 печатных работах, которые включают 2 патента РФ на изобретение способов диагностики, 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 9 публикаций проиндексированных Scopus, 4 статьи – Web of Science.

**Структура и объем работы.** Диссертация изложена на 152 страницах основного текста, содержит 41 рисунок и 16 таблиц, введение, 4 главы, основные выводы, библиографический список из 220 наименований и 5 приложений.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** рассмотрено состояние темы исследований и обоснована её актуальность, определены объект и область исследования, поставлена цель работы и задачи исследования, приведена оценка степени разработанности проблемы, указана научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

**В первой главе** на основе результатов теоретических и экспериментальных исследований, приведённых в работах Российских и зарубежных учёных, проведён анализ методов выделения критериев состояния, определены проблемы формирования критериев состояния и произведён выбор направления её решения.

В результате приведённых исследований и анализа методов оценки состояния, диагностирования и формирования критериев оценки состояния, диагностических признаков неисправностей машин и механизмов на основе параметров ВА сигнала установлено, что существующие критерии оценки состояния основаны, в том числе, и на статистических параметрах различных характеристик ВА сигнала, однако характеристическая функция ВА сигналов для формирования критериев состояния не использовалась, что и обусловило актуальность решения задачи по формированию критериев оценки состояния на основе свойств ХФ ВА сигнала.

**Вторая глава** посвящена обоснованию возможности применения аппарата ХФ для целей оценки вибросостояния путём анализа свойств характеристической функции виброакустических колебаний объекта контроля.

Характеристическая функция случайной величины $\xi$ представляет собой математическое ожидание комплексной случайной величины $\eta = \exp(iv\xi)$:

$$\theta(v) = m_1\{\exp(iv\xi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)e^{ivx}dx, \qquad (1)$$

где $v$ – произвольный, вещественный параметр (аргумент). Таким образом, ХФ является преобразованием Фурье плотности вероятности $f(x)$ значений случайной величины и, соответственно, является спектром плотности вероятности. Применив формулу Эйлера, получим другой вид записи ХФ:

$$\theta(v) = m_1\{\cos(v\xi)\} + im_1\{\sin(v\xi)\} = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)\cos(vx)dx + i\int_{-\infty}^{\infty} f(x)\sin(vx)dx \qquad (2)$$

где $m_1\{\cos(v\xi)\}$ – действительная, а $m_1\{\sin(v\xi)\}$ – мнимая часть ХФ

Виброакустические колебания могут быть описаны моделью нормального случайного процесса с нулевым математическим ожиданием, поскольку, как правило, реальные ВА колебания содержат стационарные случайные составляющие и достаточно большое число источников квазидетерминированных компонент, модулированных случайными составляющими, поэтому измеренный в ограниченном диапазоне частот за интервал времени, который в несколько раз превышает период наименьшей частотной составляющей, ВА сигнал представляет собой центрированный нормальный случайный процесс. В связи с этим в дальнейшем используются одномерные вероятностные характеристики.

Нетрудно найти выражение ХФ для нормального закона, для этого подставим выражение плотности вероятности нормального закона в (1):

$$\theta(v) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)\exp(ivx)dx = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\int_{-\infty}^{\infty}\exp\left(ivx - \frac{x^2}{2\sigma^2}\right)dx = \exp\left(-\frac{\sigma^2v^2}{2}\right), \qquad (3)$$

где $\sigma$ – среднее квадратическое значение (СКЗ) или отклонение (СКО) случайного процесса $x$. Применительно к ВА процессам, в качестве σ может использоваться СКЗ виброускорения ($м/с^2$), виброскорости ($мм/с$), виброперемещения ($мкм$).

Исходя из выражения (3), характеристическая функция нормального случайного ВА процесса с нулевым средним является действительной чётной функцией с переменной $v$. В случаях, когда ВА процесс не может быть отнесён к классу центрированных случайных процессов, ХФ будет иметь вид:

$$\theta(v) = \exp\left( imv - \frac{\sigma^2 v^2}{2} \right), \qquad (4)$$

где $m$ – математическое ожидание ВА процесса.

Формы кривых ХФ центрированных ВА процессов с различными значениями СКЗ приведены на рисунке 1.

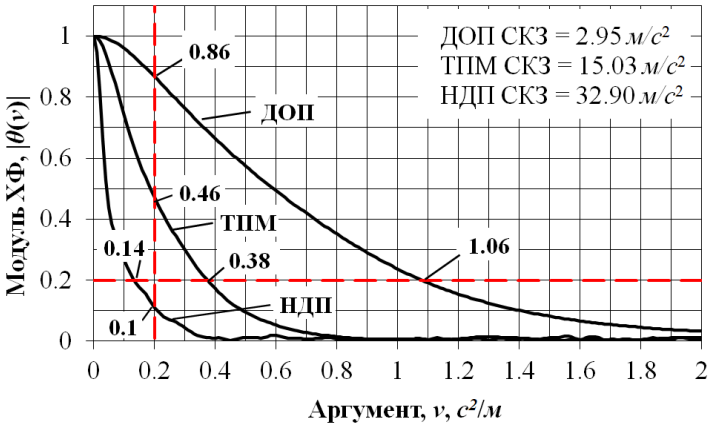



Рисунок 1. Зависимость модуля ХФ ВА сигналов от технического состояния узлов ХФ при различных значениях СКЗ виброускорения

Если известны начальные моменты $k$-го порядка, то можно определить ХФ этого процесса, воспользовавшись формулой связи ХФ с начальными моментами случайной величины (5).

$$\theta(v) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{m_k}{k!} (iv)^k . \qquad (5)$$

В частности, например, если известно, что ВА сигнал – это центрированный случайный процесс с известным СКЗ, то можно определить ХФ этого процесса. Используя (5), можно получить выражения для ХФ процесса, имеющего нормальный закона распределения.

Подставляя выражение для плотности вероятности в известную формулу определения моментов, произведя замену переменных и используя Гамма-функцию Г(), получим выражение для начальных моментов ВА сигнала:

$$m_k = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_{-\infty}^{\infty} x^k \exp\left( \frac{-x^2}{2\sigma^2} \right) dx = \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sigma^k 2^{(k-1)/2} \Gamma\left( \frac{k+1}{2} \right). \qquad (6)$$

Существование выражения (6) показывает, что интеграл существует и существуют начальные моменты всех порядков, и это является достаточным условием для расчёта значений ХФ случайной величины по формуле:

$$\theta(v) = 1 + \sqrt{\frac{2}{\pi}} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(iv)^k}{k!} \sigma^k 2^{(k-1)/2} \Gamma\left( \frac{k+1}{2} \right). \qquad (7)$$

Зависимость (7) представляет собой выражение для ХФ ВА процесса, распределённого по нормальному закону, которую получают через начальные моменты, что позволяет рассчитывать ХФ по известным теоретическим или эмпирическим параметрам функций распределения мгновенных значений ВА сигнала. Поэтому, зная СКЗ параметров вибрации, например из ГОСТ, можно получить ХФ ВА сигнала этих параметров и по величине модуля этой ХФ оценивать состояние объекта контроля.

Для классического (двухпараметрического) распределения Вейбулла-Гнеденко характеристическую функцию можно получить в следующем виде:

$$\theta(v) = 1 + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(iv)^k}{k!} \Gamma\left(1 + \frac{k}{\alpha}\right) \beta^{-\frac{k}{\alpha}}. \qquad (8)$$

где $a$ – параметр масштаба, $c$ – параметр формы ($a$ >0, $c$ >0).

Полученное выражение позволяет по известным теоретическим или эмпирическим параметрам распределения Вейбулла-Гнеденко определить ХФ и её параметры, поскольку, как правило, распределения некоторых параметров ВА сигнала в зависимости от технического состояния объекта соответствуют этому закону.

Для формирования адекватного алгоритма оценки технического состояния исследуемых объектов необходимо установить наличие взаимосвязи свойств ХФ ВА сигнала с существующими вероятностно-статистическими параметрами ВА сигнала (например, СКЗ), применяемыми для оценки состояний узлов и деталей,

Одним из предлагаемых вариантов решения данной задачи является использование такой интегральной характеристики, как площадь под кривой ХФ ВА сигнала. Площадь под кривой ХФ ВА сигнала можно найти, используя выражение (3):

$$S_\theta = \int_0^v \exp\left(\frac{-\sigma^2 v^2}{2}\right) dv = \frac{\sqrt{2}}{\sigma} \cdot \frac{\sqrt{\pi}}{2} \cdot \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^t \exp\left(-t^2\right) dt = \sqrt{\frac{\pi}{2}} \cdot \frac{1}{\sigma}, \qquad (9)$$

где $t = \sigma v / \sqrt{2}$.

Таким образом, величина площади под кривой ХФ ВА сигнала обратно пропорциональна СКЗ с коэффициентом $\sqrt{\pi/2}$ (Рисунок 2). Данный установленный факт указывает на взаимосвязь свойств ХФ ВА сигнала и технического состояния объекта диагностирования, поскольку, как известно, с увеличением значений СКЗ параметров ВА колебаний вибрационное состояние или, другими словами, техническое состояние

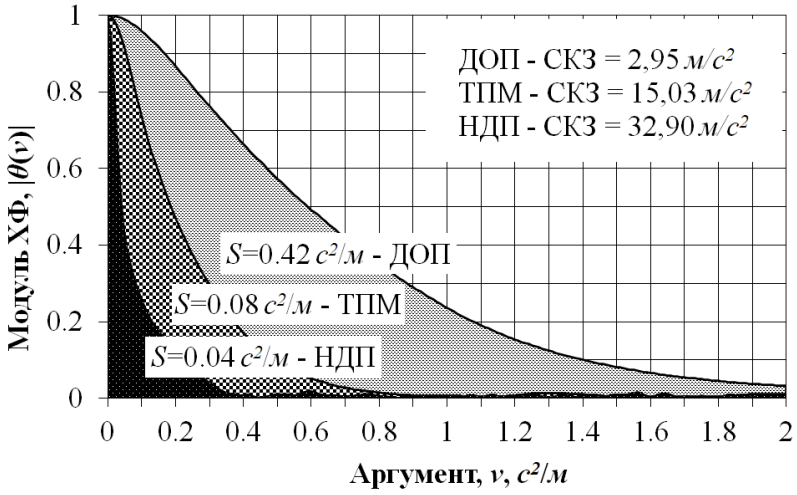



Рисунок 2. Зависимость площади под кривой модуля ХФ ВА сигналов от технического состояния узлов при различных значениях СКЗ виброускорения

машин и механизмов ухудшается. Вследствие этого, полученная интегральная характеристика (свойство), а именно, площадь под кривой ХФ, наравне с СКЗ определяет техническое состояние исследуемого объекта.

Ещё один полезный факт вытекает из выражения (9): значения площади под кривой модуля ХФ ВА сигнала при увеличении $\sigma$ стремятся к значению, близкому к нулю (Рисунок 2).

Такая особенность позволяет значительно ограничить диапазон нормированных значений, при диагностировании вибросостояния исследуемых объектов.

Основой второго подхода к оценке состояния узлов являются такие отличительные свойства ХФ, как непрерывность и ограниченность:

$$\theta(0) = \int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \quad \text{и} \quad \left|\theta(v)\right| \le 1. \tag{10}$$

Таким образом, в качестве критерия оценки состояния можно использовать величину модуля ХФ при постоянном значении аргумента $v$ = const. В случаях, когда центрированный ВА процесс имеет нормальное распределение, ХФ принимает только действительные значения и её график симметричен относительно оси ординат. Поэтому для получения конечного результата достаточно рассматривать значения ХФ на промежутке от 0 до $v$, причём величина аргумента $v$ определяется исходя из диапазона изменений значений ХФ для различных состояний объекта контроля (от нормального до недопустимого).

Обработка эмпирических данных показывает, что величина ХФ при заданном аргументе $v$ позволяет результативно оценивать состояния объекта диагностирования. При этом в отличие от абсолютных значений статистических параметров сигнала значения ХФ изменяются от нуля до единицы (Рисунок 1).

Поскольку в данном исследовании виброакустический сигнал представлен конечным числом мгновенных значений, то оценка характеристической функции может быть получена из определения (1) заменой интеграла пределом выборочного среднего, представляющим собой идеальный сумматор:

$$\theta^*(v) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \exp\left[ivX_i\right] \tag{11}$$

где $X_i = X(i\cdot\Delta t)$ – мгновенные значения реализации ВА сигнала, $N$ – объем выборочных значений, $\Delta t$ – интервал дискретности. Полученное выражение называется $t$-оценкой случайной величины. Для получения оценки характеристической функции ВА сигнала необходимо вычислить оценки её действительной $\mathrm{Re}\,\theta^*(v)$ и мнимой части $\mathrm{Im}\,\theta^*(v)$:

$$\mathrm{Re}\,\theta^*(v) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \cos\left[vX_i\right], \quad \mathrm{Im}\,\theta^*(v) = \lim_{N\to\infty} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} \sin\left[vX_i\right]. \tag{12}$$

Из (12) следует, что ХФ рассчитывается по реализации ВА сигнала.

На основании результатов, полученных в работах профессора Вешкурцева Ю.М. для непрерывных оценок ХФ, а также в работе Jiang G. J., Knight J. L., Yu J., посвящённой эмпирической характеристической функции и её применениям, в диссертационном исследовании показано, что оценка ХФ (11) обладает требуемыми статистическими свойствами, т.е. является эффективной, состоятельной и несмещённой.

**В третьей главе** решены задачи, направленные на практическую реализацию теоретических выводов, и разработаны методические основы оценки свойств характеристической функции ВА сигнала, адекватного выбора граничных значений критериев состояния, приведены сведения о погрешностях оценок и измерений.

Оценка технического состояния объектов по значениям модуля ХФ ВА сигналов состоит из последовательности действий, которые включают получение исходных данных с помощью программно-аппаратных средств измерительной системы в виде мгновенных значений ВА сигнала $X_i$ (виброускорение, виброскорость, виброперемещение) с узлов объекта контроля, получение ХФ и оценку состояния согласно известным нормативным значениям. Блок-схема алгоритма, разработанная по методике оценки ХФ, приведена на рисунке 3. На основе приведённой методики разработан способ вибродиагностики механизмов по ХФ вибрации (патент № 2514119) путём оценки модуля ХФ при заданном значении аргумента ХФ или путём оценки аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ (Рисунок 4).

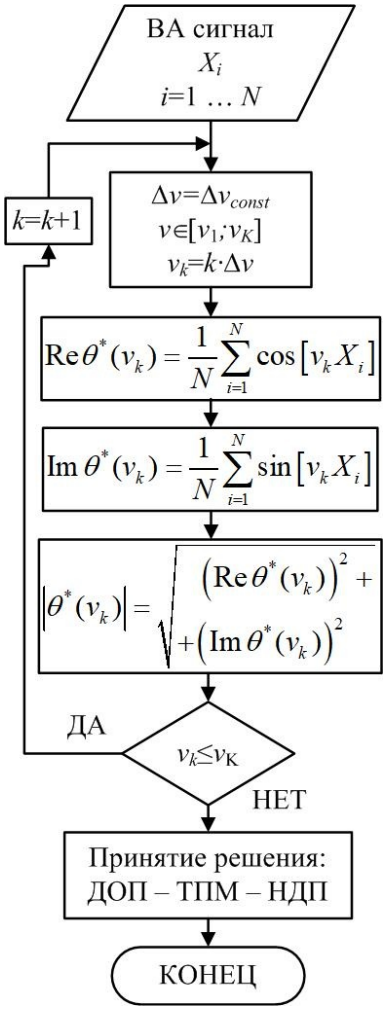



Рисунок 3. Фрагмент алгоритма оценки ХФ по эмпирическим данным

Методика оценки технического состояния объектов по величине площади под кривой модуля ХФ вибрации положена в основу способа вибродиагностики механизмов по ХФ вибрации (пат. на изобретение №2517772).

Практическая реализация способа сводится к вычислению площади под кривой модуля ХФ, полученной по алгоритму согласно рисунку 3. Площадь под кривой вычисляется по известной формуле Симпсона (13), в которой приняты следующие обозначения: $a$, $b$ – границы интегрирования, при которых величина модуля ХФ, $|\theta(v)|$, принимает значения более 0,025 на всем интервале интегрирования, $n$ – количество равных элементарных отрезков на интервале $[a;b]$, при этом $v_0 = a$, $v_n = b$, $v_n$-1/2 – середины равных элементарных отрезков:

$$S_{|\theta(v)|} = \frac{b-a}{3n} \cdot \left( |\theta^*(v_0)| + |\theta^*(v_{2n})| + +2\sum_{j=1}^{N-1} |\theta^*(v_{2j})| + 4\sum_{j=1}^{N} |\theta^*(v_{2j-1})| \right) \qquad (13)$$

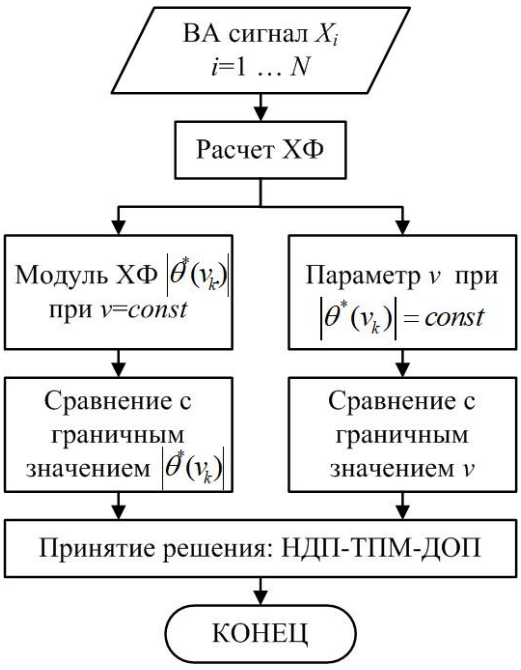



Рисунок 4. Фрагмент блок-схемы способа вибродиагностики механизмов по ХФ вибрации (пат. №2514119)

Затем производится оценка технического состояния узла исследуемого механизма в соответствие с полученными граничными значениями.

На основании положений теории статистических решений разработана методика определения граничных значений величин критериев на основе характеристической функции ВА сигнала, определяющих состояние исследуемого объекта, примеры использования которой приведены в четвертой главе диссертационного исследования при обработке экспериментальных данных.

В случае использования свойств характеристической функции ВА сигнала в качестве критериев состояния объектов, ухудшение их состояния характеризуется уменьшением величины контролируемого параметра ХФ (9). В ВА диагностике, как правило, увеличение вибрации свидетельствует об ухудшении состояния объекта контроля. Поэтому при использовании вероятностно-статистических методов принятия решения для обоснования граничных значений критериев состояния на основе свойств ХФ изменены математические выражения и алгоритм расчёта граничных значения, вероятностей ложной тревоги $P_{ЛТ}$, пропуска состояния $P_{ПД}$ и риска принятия решения $R$. Суть изменений иллюстрирована на рисунке 5. В данном случае плотность вероятности значения критерия с «плохим» состоянием находится слева, а с «хорошим» – справа, что приводит к тому, что для расчёта $P_{ЛТ}$, $P_{ПД}$ и риска $R$ в формулах необходимо изменить пределы интегрирования:

$$P_{ЛТ} = P(D_1) \cdot P([x < x_0]/D_1) = P_1 \cdot \int_{-\infty}^{x_0} f\left(x/D_1\right) dx = P_1 \cdot \left[1 - F\left(x_0/D_1\right)\right], \qquad (14)$$

$$P_{ПД} = P(D_2) \cdot P([x > x_0]/D_2) = P_2 \cdot \int_{x_0}^{\infty} f\left(x/D_2\right) dx = P_2 \cdot F\left(x_0/D_2\right), \qquad (15)$$

где $F(x_0/D_1)$ – вероятность исправного состояния на интервале от $-\infty$ до $x_0$; $F(x_0/D_2)$ – вероятность неисправного состояния на интервале от $x_0$ до $\infty$, $P_1=P(D_1)$ и $P_2=P(D_2)$ – априорные вероятности диагнозов $D_1$ и $D_2$, $f(x/D_2)$ и $f(x/D_1)$ – плотности вероятности диагнозов $D_1$ и $D_2$.

Для определения граничных величин критериев состояния разработана методика аппроксимации экспериментальных данных, согласно которой производился расчёт ХФ каждого ВА сигнала, полученного из баз данных систем мониторинга, и её площади, выделялись значения критерия и формировалась совокупность данных для статистического анализа.

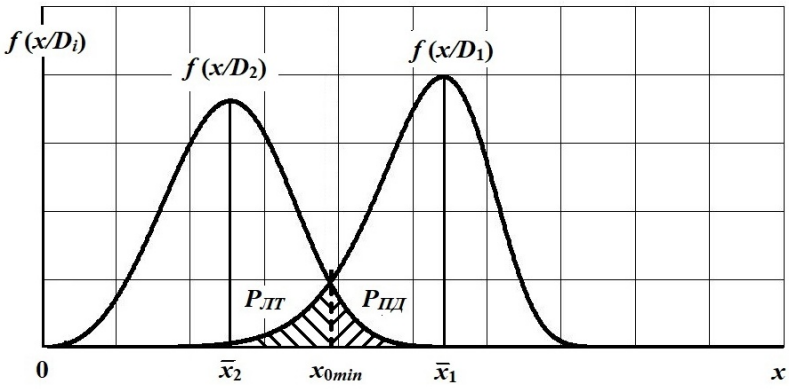



Рисунок 5. Плотности вероятностей критерия состояния $x$ для исправного $D_1$ и дефектного $D_2$ состояний; $P_{ПД}$ – вероятность пропуска дефекта, $P_{ЛТ}$ – вероятность ложной тревоги

По предложенной в работе методике рассчитывалась теоретическая функция распределения (ТФР) и соответствующая ей плотность вероятности совокупности данных. Процедура аппроксимации эмпирических функций распределения (ЭФР) и получения ТФР иллюстрирована на рисунках 6–9.

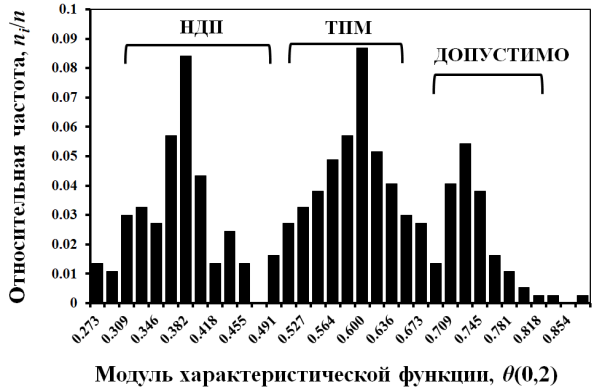



Рисунок 6. Гистограмма распределения *ХФ* ВА сигналов для всего набора данных (эмпирическая плотность вероятности)

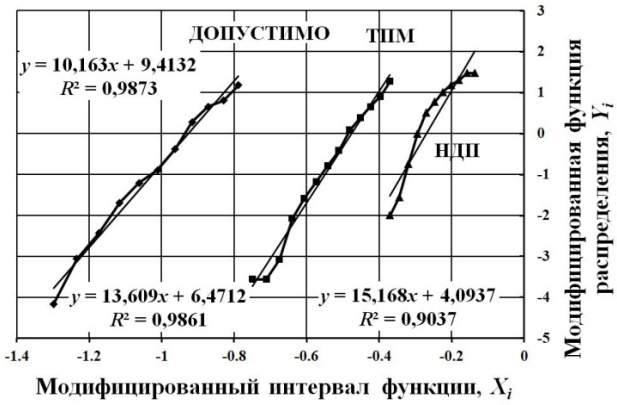



Рисунок 7. Модифицированные ЭФР $\theta(0,2)$ и их регрессионные модели, $R^2$ – величина достоверности аппроксимации

Далее полученные ТФР использовались для определения граничных значений критериев методами минимального риска, минимального числа ошибочных решений, наибольшего правдоподобия, минимакса и Неймана-Пирсона на основе знания величины отношения правдоподобия.

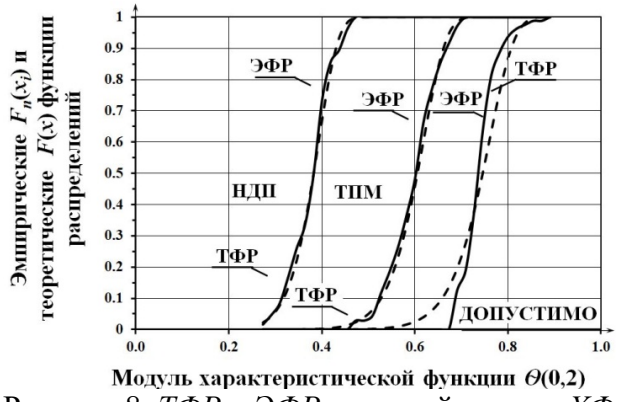



Рисунок 8. *ТФР* и *ЭФР* значений модуля *ХФ*

Рисунок 9. Плотности вероятности модуля *ХФ*

Погрешность определения значений характеристической функции ВА сигнала складывается из погрешности получения сигнала и статистической точности оценки, возникающих при расчёте искомых значений по формуле оценки (11).

Предел допускаемой относительной погрешности в рабочем диапазоне частот при измерении сигнала виброускорения составляет ±3,5%, диапазон рабочих частот при измерении СКЗ виброускорения варьируется в пределах от 2 до 10000 Гц, диапазон измерений СКЗ виброускорения – от 0 до 100 м/с² (Св.-во об утверждении типа средств измерения рег. №66781/1).

В соответствие с результатами исследования профессора Ю.М. Вешкурцева одним из путей по снижению методической погрешности, возникающей при получении оценки ХФ, является выбор оптимального шага дискретизации параметра $\Delta v$:

$$\Delta v_{ОПТ} = \frac{\pi}{2K_з\sigma}, \qquad (16)$$

где $K_З$ – коэффициент закона распределения, связывающий значение СКЗ, σ, с максимальным отклонением процесса от своего математического ожидания при уровне вероятности не менее 99,72%, например $K_З = 3$, если процесс имеет нормальное распределение, как и исследуемые ВА сигналы. Для оценки характеристической функции ВА сигнала, имеющего значение СКЗ 100 м/с$^2$, величина $\Delta v_{ОПТ}$ составит: $\Delta v_{ОПТ} = \pi / (2 \cdot 3 \cdot 100) = 0,005\ \ с^2/м.$

Для определения статистической точности оценки ХФ, полученной после выполнения всех вычислительных операций, а также выбора шага варьирования параметра ХФ ($\Delta v$), необходимого для получения оценки с заданной точностью, получено выражения нормированной среднеквадратической ошибки:

$$\varepsilon_r^2 = \frac{1}{\Delta v X_r} \qquad (17)$$

где $\Delta v$ – заданный шаг изменения параметра ХФ, $X_r$ – размах амплитуды исследуемого ВА сигнала $X_i$. Данная оценка справедлива при условии, что ошибки смещения пренебрежимо малы.

**Четвертая глава** посвящена вероятностно-статистическим исследованиям эмпирических данных, полученных в результате стендовых испытаний подшипников качения, а также сигналов, которые получены из баз данных систем мониторинга поршневых компрессоров.

Анализ свойств ХФ ВА сигналов, которые были получены на стенде виброиспытаний четырёх подшипников качения с искусственными и естественными дефектами внутреннего и внешнего колец, тел качения и полностью исправного подшипника показали, что мера Линдера ($R^2$), как величина отклонения теоретических (ТХФ) от эмпирических (ЭХФ) характеристических функций, имеет величину не менее 0.99. ТХФ получены по формулам второй главы и параметрам функций распределения мгновенных значений ВА сигналов. ЭХФ получены по методикам, которые приведены в третьей главе (Рисунок 10). Установлено, что состояние подшипников и наличие дефектов подтвердили закономерности изменения ХФ, установленные ранее (рис. 1 и 2, ф-ла (9)).

Практическое применение разработанные методики нашли при обработке сигналов поршневых компрессоров. Выбор ПК в качестве объекта исследований обусловлен

тем, что ремонт ПК производится на месте эксплуатации, результаты ремонта фиксируются в журнале ремонтов на технологической установке и это позволяет проверить дефекты. Насосы и электродвигатели, как правило, ремонтируются в ремонтном производстве и реальные дефекты и ремонтные работы установить затруднительно.

Анализ сигналов и результатов ремонтов позволил установить, что не все дефекты и неисправности узлов ПК однозначно коррелированы как с величиной СКЗ, пиковым значением, так и величиной модуля ХФ и площадью ХФ (Рисунок 11, Рисунок 12). Поэтому использование свойств ХФ как критериев состояния позволяет увеличить глубину диагностирования, снизить риск пропуска опасного состояния и, соответственно, повысить достоверность оценки состояния.

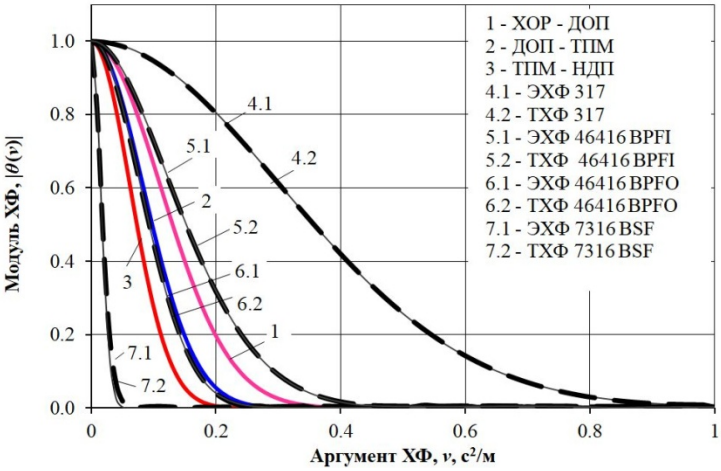
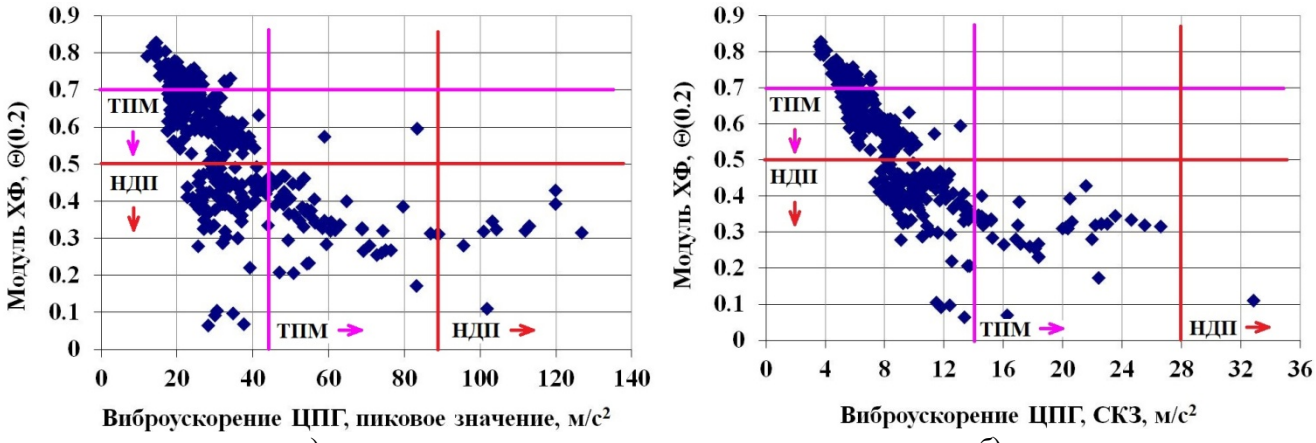



Рисунок 10. Теоретические ХФ и эмпирические ХФ ВА сигналов подшипников качения




*а*) *б*)

Рисунок 11. Корреляционные зависимости между критериями на основе ХФ и параметрами вибрации

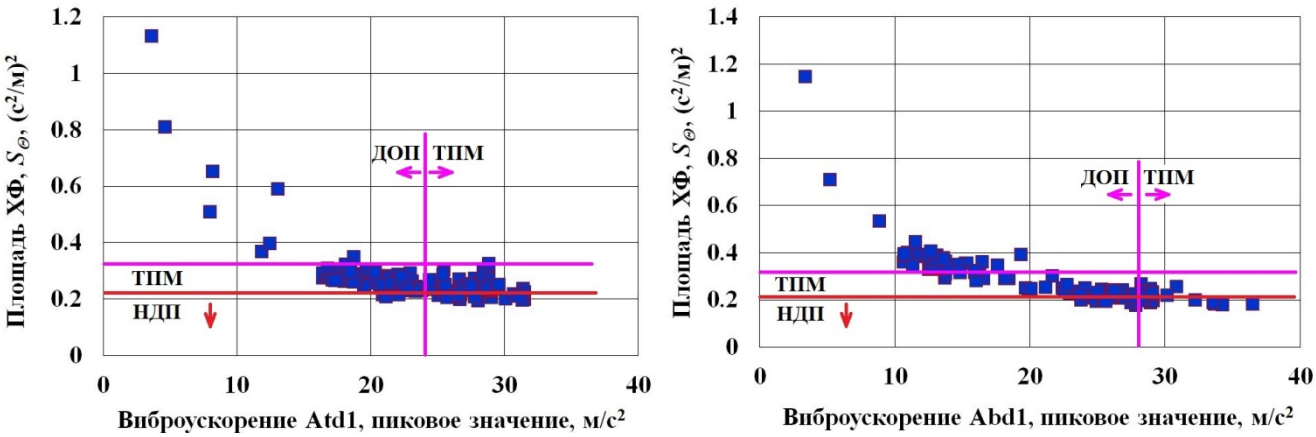
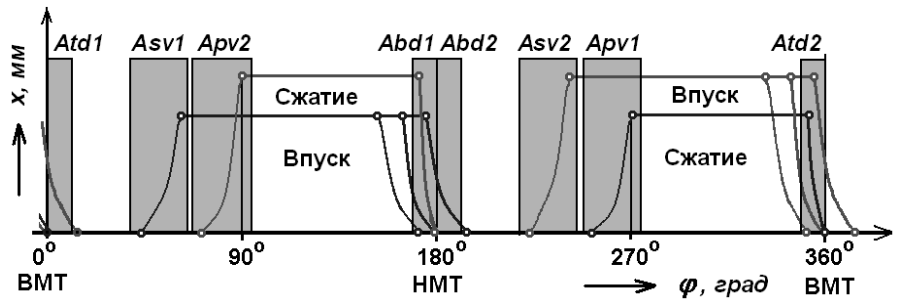



Рисунок 12. Корреляция между площадью ХФ и пиковыми значениями

Для оценки состояния поршневых компрессоров по величине критериев на основе ХФ вибрации использовались ВА сигналы, разделённые на сегменты по углу поворота вала в соответствие с циклограммой работы компрессора (Рисунок 13).




ВМТ – верхняя мёртвая точка
НМТ – нижняя мёртвая точка
*Asv*1, *Asv*2, *Apv*1, *Apv*2, *Atd*1, *Atd*2, *Abd*1, *Abd*2 – интервалы по углу поворота вала выделения реализаций ВА сигнала

Рисунок 13. Циклограмма работы поршневого компрессора

На каждом интервале анализу были подвергнуты не менее 128 реализаций ВА сигналов за 5 оборотов вала. Таким образом, для анализа использовалось не менее 640 сегментов временных реализаций ВА сигналов для каждого интервала по углу поворота вала. Расчёт величин критериев на основе ХФ каждой реализации по разработанным методикам показал, что вид ХФ изменяется в достаточно широких пределах в зависимости от состояния объекта контроля (Рисунок 14), что позволило получить адекватные граничные значения критериев состояния, таких как площадь под кривой модуля ХФ и значения модуля ХФ при постоянном аргументе.

При обосновании предельных величин критериев соответствующих различным состояниям узлов поршневого компрессора использовалась разработанная методика, основанная на вероятностно-статистических методах принятия решения и определяющая решающее правило исходя из условий оптимальности, например, из условия минимального риска, минимизация одной из ошибок постановки диагноза при заданном уровне другой.

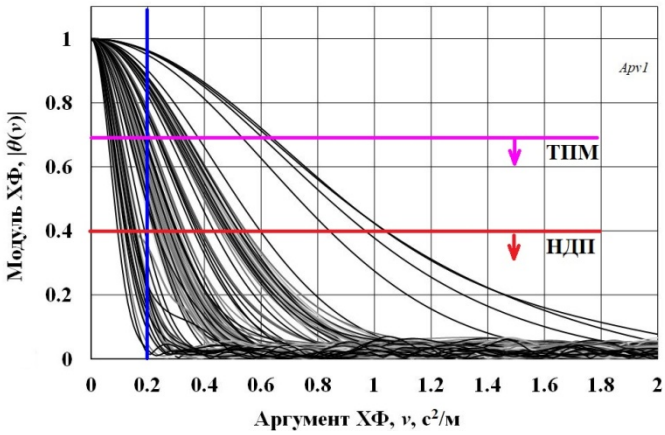



Рисунок 14. ХФ ВА сигнала на интервале *Apv*1

Определение граничного значения критерия осуществляется на основе расчёта минимума функции риска принятия решения

$$R(x)=C_{11}P_1\int_x^{\infty} f(x/D_1)dx+C_{21}P_1\int_{-\infty}^{x} f(x/D_1)dx+C_{12}P_2\int_x^{\infty} f(x/D_2)dx+C_{22}P_2\int_{-\infty}^{x} f(x/D_2)dx, \quad (18)$$

что приводит к условию, которое называют отношением правдоподобия:

$$\lambda=\frac{f(x/D_1)}{f(x/D_2)}=\frac{(C_{12}-C_{22})P_2}{(C_{21}-C_{11})P_1}, \quad (19)$$

где $C_{21}$ и $C_{12}$ – стоимости ложной тревоги и пропуска дефекта, $C_{11}$, $C_{22}$ – цены правильных решений.

Расчёты различными методами принятия решения, проведённые в ходе исследований, показали, что в большинстве случаев для определения граничной величины критерия достаточно использовать минимаксный критерий, который является частным случаем критерия Байеса и обеспечивает минимизацию максимально возможного риска. В критических случаях, при значительной разнице в стоимости ложной тревоги и пропуска дефекта следует воспользоваться методам Неймана-Пирсона, который обеспечивает минимизации вероятности пропуска опасного состояния при заданной величине ложной тревоги.

Проведённые расчёты позволили определить граничные значения критериев для всех интервалов *Atd*1, *Atd*2, *Abd*1, *Abd*2, *Asv*1, *Asv*2, *Apv*1, *Apv*2 методом минимакса и Неймана-Пирсона. Получены данные как для модуля ХФ при заданном аргументе функции, так и для площади модуля ХФ ВА сигналов на заданных интервалах по углу поворота вала (Рисунок 16, Рисунок 15, Таблица 1, Таблица 2).

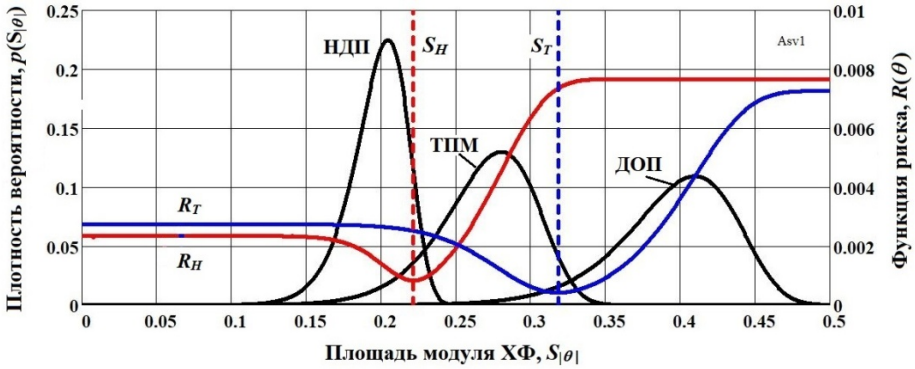



Рисунок 15. Плотности вероятности (НДП, ТПМ, ДОП) площади модуля ХФ ВА сигналов на интервале *Asv1*, кривые риска ($R_H$, $R_T$) и граничные значения ($S_H$ и $S_T$), (метод минимакс)

Анализ полученных данных показывает, что величины критерия на основе модуля ХФ имеют различия в абсолютных значениях, как и величины пиковых значений ВА сигналов по ГОСТ Р 56233 (Таблица 1). Однако, оценочные расчёты показывают, что величины критериев мало зависят от типоразмера машины и позволяют для одноименных точек измерения вибрации принят их одинаковыми. Данная закономерность вполне объяснима сохранением формы закона распределения мгновенных значений ВА сигнала при одинаковых дефектах и неисправностях для различных типоразмеров машин.

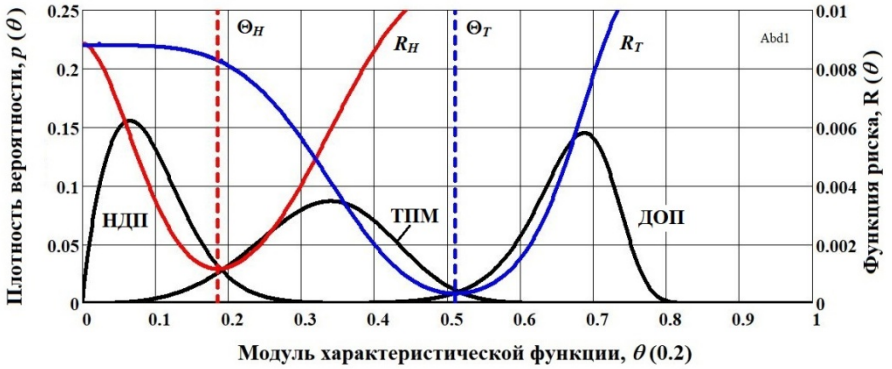



Рисунок 16. Плотности вероятности (НДП, ТПМ, ДОП) модуля ХФ ВА сигналов на интервале *Abd*1, кривые риска ($R_H$, $R_T$) и граничные значения ($\Theta_H$ и $\Theta_T$), (метод минимакс)

Свойство ограниченности ХФ (10) приводит к практически неизменным граничным величинам критерия вне зависимости от вида дефекта или неисправности.

Таблица 1 – Сводные результаты расчёта граничных значений модуля ХФ при $\nu$=0.2

| **Параметр** | **Интервалы** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***Abd*1** | ***Abd*2** | ***Atd*1** | ***Atd*2** | ***Apv*1** | ***Apv*2** | ***Asv*1** | ***Asv*2** |
| | Метод минимакса | | | | | | | |
| $\Theta_H$ | **0.185** | **0.263** | **0.259** | **0.139** | **0.398** | **0.38** | **0.232** | **0.128** |
| $P_{ЛТ}$ | $6.49\cdot10^{-4}$ | $1.65\cdot10^{-3}$ | $4.41\cdot10^{-3}$ | $2.43\cdot10^{-3}$ | $3.33\cdot10^{-4}$ | $9.59\cdot10^{-4}$ | $2.85\cdot10^{-3}$ | $5.03\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $5.16\cdot10^{-4}$ | $1.53\cdot10^{-3}$ | $1.55\cdot10^{-3}$ | $1.39\cdot10^{-3}$ | $5.17\cdot10^{-4}$ | $7.22\cdot10^{-4}$ | $1.64\cdot10^{-3}$ | $9.75\cdot10^{-4}$ |
| $\Theta_T$ | **0.511** | **0.41** | **0.395** | **0.306** | **0.669** | **0.628** | **0.383** | **0.265** |
| $P_{ЛТ}$ | $1.81\cdot10^{-4}$ | $5.50\cdot10^{-4}$ | $1.63\cdot10^{-3}$ | $9.90\cdot10^{-4}$ | $4.52\cdot10^{-4}$ | $1.32\cdot10^{-3}$ | $8.77\cdot10^{-4}$ | $1.03\cdot10^{-3}$ |
| $P_{ПД}$ | $1.43\cdot10^{-4}$ | $1.60\cdot10^{-4}$ | $1.59\cdot10^{-3}$ | $9.05\cdot10^{-4}$ | $2.26\cdot10^{-4}$ | $5.02\cdot10^{-4}$ | $4.03\cdot10^{-4}$ | $4.19\cdot10^{-4}$ |
| | Метод Неймана-Пирсона | | | | | | | |
| $\Theta_H$ | **0.2** | **0.256** | **0.261** | **0.15** | **0.408** | **0.399** | **0.248** | **0.14** |
| $P_{ЛТ}$ | $6.96\cdot10^{-4}$ | $2.15\cdot10^{-3}$ | $3.94\cdot10^{-3}$ | $3.26\cdot10^{-3}$ | $6.83\cdot10^{-4}$ | $1.43\cdot10^{-3}$ | $2.24\cdot10^{-3}$ | $8.43\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $4.31\cdot10^{-4}$ | $7.86\cdot10^{-4}$ | $1.96\cdot10^{-3}$ | $7.81\cdot10^{-4}$ | $2.60\cdot10^{-4}$ | $4.04\cdot10^{-4}$ | $1.47\cdot10^{-3}$ | $6.56\cdot10^{-4}$ |
| $\Theta_T$ | **0.525** | **0.473** | **0.398** | **0.299** | **0.693** | **0.681** | **0.395** | **0.285** |
| $P_{ЛТ}$ | $2.31\cdot10^{-4}$ | $1.167\cdot10^{-3}$ | $1.95\cdot10^{-3}$ | $1.06\cdot10^{-3}$ | $5.40\cdot10^{-4}$ | $1.75\cdot10^{-3}$ | $1.02\cdot10^{-3}$ | $2.69\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $10\cdot10^{-5}$ | $1.28\cdot10^{-6}$ | $1.29\cdot10^{-3}$ | $7.81\cdot10^{-4}$ | $9.39\cdot10^{-5}$ | $7.80\cdot10^{-5}$ | $2.74\cdot10^{-4}$ | $4.59\cdot10^{-4}$ |
| | Сводные данные | | | | | | | |
| $\Theta_H$ | **0.19** | **0.25** | **0.25** | **0.14** | **0.40** | **0.40** | **0.25** | **0.14** |
| $\Theta_T$ | **0.52** | **0.41** | **0.41** | **0.29** | **0.67** | **0.67** | **0.41** | **0.29** |

В результате обработки экспериментальных значений критериев площади под кривой модуля ХФ для всех интервалов результаты получены с отклонением от среднего значения +10% … -7% для $S_H$ и +6.5 … - 4.5% для $S_T$ (Таблица 2).

Таблица 2 – Сводные результаты расчёта граничных значений площади модуля ХФ

| **Параметр** | **Интервалы** | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ***Abd*1** | ***Abd*2** | ***Atd*1** | ***Atd*2** | ***Apv*1** | ***Apv*2** | ***Asv*1** | ***Asv*2** |
| Метод минимакса | | | | | | | | |
| $S_H$ | **0.248** | **0.223** | **0.248** | **0.237** | **0.211** | **0.213** | **0.221** | **0.212** |
| $P_{ЛТ}$ | $7.19\cdot10^{-4}$ | $5.67\cdot10^{-4}$ | $1.18\cdot10^{-3}$ | $1.03\cdot10^{-3}$ | $1.95\cdot10^{-4}$ | $1.62\cdot10^{-3}$ | $6.34\cdot10^{-4}$ | $6.71\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $2.10\cdot10^{-4}$ | $2.96\cdot10^{-4}$ | $5.55\cdot10^{-4}$ | $6.89\cdot10^{-4}$ | 4.85·10-5 | $5.46\cdot10^{-4}$ | $1.93\cdot10^{-4}$ | $3.05\cdot10^{-4}$ |
| $S_T$ | **0.337** | **0.307** | **0.306** | **0.306** | **0.324** | **0.308** | **0.318** | **0.334** |
| $P_{ЛТ}$ | $2.40\cdot10^{-3}$ | $8.25\cdot10^{-4}$ | $1.89\cdot10^{-4}$ | $1.27\cdot10^{-5}$ | $7.2\cdot10^{-4}$ | $7.33\cdot10^{-4}$ | $3\cdot10^{-4}$ | $1.81\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $1.56\cdot10^{-3}$ | $3.06\cdot10^{-4}$ | $4.66\cdot10^{-5}$ | $2.63\cdot10^{-6}$ | $1.19\cdot10^{-4}$ | $1.8\cdot10^{-4}$ | $1.13\cdot10^{-4}$ | 9.80·10-5 |
| Метод Неймана-Пирсона | | | | | | | | |
| $S_H$ | **0.25** | **0.226** | **0.245** | **0.237** | **0.211** | **0.214** | **0.226** | **0.213** |
| $P_{ЛТ}$ | $4.22\cdot10^{-4}$ | $4.68\cdot10^{-4}$ | $6.73\cdot10^{-4}$ | $7.95\cdot10^{-4}$ | $1.63\cdot10^{-4}$ | $1.64\cdot10^{-3}$ | $4.12\cdot10^{-4}$ | $1.64\cdot10^{-4}$ |
| $P_{ПД}$ | $4.12\cdot10^{-4}$ | $3.41\cdot10^{-4}$ | $1.26\cdot10^{-3}$ | $9.28\cdot10^{-4}$ | $7.69\cdot10^{-5}$ | $5.24\cdot10^{-4}$ | $2.34\cdot10^{-4}$ | $7.71\cdot10^{-4}$ |
| $S_T$ | **0.338** | **0.306** | **0.303** | **0.310** | **0.320** | **0.307** | **0.317** | **0.335** |
| $P_{ЛТ}$ | $1.46\cdot10^{-3}$ | $2.69\cdot10^{-4}$ | $2.73\cdot10^{-5}$ | $4.88\cdot10^{-6}$ | $3.61\cdot10^{-4}$ | $3.66\cdot10^{-4}$ | $6.06\cdot10^{-5}$ | $8.28\cdot10^{-5}$ |
| $P_{ПД}$ | $2.49\cdot10^{-3}$ | $9.21\cdot10^{-4}$ | $3.75\cdot10^{-4}$ | $2.75\cdot10^{-6}$ | $6.04\cdot10^{-4}$ | $5.74\cdot10^{-4}$ | $3.82\cdot10^{-4}$ | $1.76\cdot10^{-4}$ |
| | Сводные данные | | | | | | | |
| $S_H$ | **0.23** | **0.23** | **0.23** | **0.23** | **0.23** | **0.23** | **0.23** | **0.23** |
| $S_T$ | **0.32** | **0.32** | **0.32** | **0.32** | **0.32** | **0.32** | **0.32** | **0.32** |

Учитывая, что в ГОСТ Р 56233 граничные величины квантилей виброускорения на интервалах *Atd*1, *Atd*2, *Abd*1, *Abd*2, *Asv*1, *Asv*2, *Apv*1, *Apv*2 для одного типоразмера машин, разделяющие состояния ТПМ и НДП, отличаются на 15…20% (в

зависимости от типоразмера машины), полученные данные позволяют установить единую величину граничных значения критериев $S_H$ и $S_T$ для всех интервалов граничных значений признаков.

С учётом особенностей технологического процесса компримирования водородосодержащего газа, например, на установках гидроочистки бензина, дизельных топлив, такой разброс граничного значения признака является вполне допустимым, поскольку сам процесс компримирования может иметь значительные отклонения вследствие появления в продукте «мокрого газа», конденсата.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В результате проведённого анализа методов и способов оценки состояния, диагностирования и формирования критериев оценки состояния, диагностических признаков неисправностей машин и механизмов по параметрам ВА сигнала *установлено*, что существующие критерии оценки состояния основаны, в том числе, и на статистических параметрах различных характеристик ВА сигнала, однако характеристическая функция ВА сигналов для формирования критериев состояния не использовалась, что и обусловило актуальность решения задачи по формированию критериев оценки состояния на основе параметров ХФ ВА сигнала.

2. Впервые выдвинута и подтверждена гипотеза о возможности применения аппарата характеристической функции для целей контроля вибросостояния и диагностики путём анализа свойств характеристической функции виброакустических колебаний объекта контроля.

3. В результате проведённых аналитических исследований *теоретически установлено* и *экспериментально подтверждено*, что величина площади под кривой ХФ ВА сигнала обратно пропорциональна СКО мгновенных значений ВА сигнала, что доказало обоснованность использования свойств ХФ ВА сигналов для оценки вибросостояния и позволило предложить критерий оценки состояния подшипниковых узлов и узлов поршневого компрессора на основе величины площади под модулем ХФ ВА сигнала.

4. Впервые *экспериментально установлена закономерность* изменений величины модуля ХФ ВА при заданном значении аргумента ХФ, а также изменение аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ ВА сигналов при изменении состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора.

5. Предложены критерии оценки состояния подшипниковых узлов, узлов поршневого компрессора на основе свойств ХФ ВА сигнала и вероятностно-статистическими методами *установлены* их граничные значения, которые независимо от типа узлов и механизмов имеют величину на интервале от 0 до 1.

6. Предложена методика и способ оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК по величине площади под модулем ХФ ВА сигнала (патент на изобретение №2517772), которая изменяется в диапазоне от значений близких к 0 (предельное состояние) до значений близких к 1 (приемлемое состояние).

7. Предложена методика и способ оценки состояния подшипниковых узлов и узлов ПК по величине модуля ХФ ВА сигнала при заданном значении аргумента ХФ и величине аргумента ХФ при заданном значении модуля ХФ ВА сигнала (пат. №2514119), которые изменяются в диапазоне от значений близких к 0 (предельное состояние) до значений близких к 1 (приемлемое состояние), что существенно упрощает оценку состояния узлов независимо от абсолютного уровня их вибрации;

В качестве направлений дальнейших исследований можно определить изучение влияния на предложенные критерии на основе ХФ изменений состояния других различных узлов, механизмов, машин и технических устройств, а также исследования по влиянию различных неисправностей и дефектов на свойства ХФ, которые мало влияют на другие характеристики вибросигналов.

Выполненные исследования позволили предложить новые научно обоснованные технические решения в виде методик и способов мониторинга технического состояния и диагностирования центробежного оборудования и машин возвратно-поступательного действия с использованием в качестве критериев состояния свойств характеристической функции виброакустического сигнала оборудования, что имеет существенное значение для развития теории и методов мониторинга состояния объектов и позволяет повысить безопасность эксплуатации динамического оборудования в различных отраслях промышленности.

**Список работ, опубликованных по теме диссертации:**

***Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендуемых ВАК:***

1. Кудрявцева, И. С. Методика оценки статистических свойств характеристических функций / И. С. Кудрявцева // Омский научный вестник. Сер. Приборы, машины и технологии. – 2016. – № 5 (149). – С. 121–124.

2. Формирование вектора диагностических признаков на основе характеристической функции виброакустического сигнала / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева // Контроль. Диагностика. – 2016. – № 8. – С. 22–29.

3. Кудрявцева, И. С. Критерии оценки вибросостояния объектов по параметрам характеристической функции сигнала / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. М. Демин // Омский научный вестник. – 2019. – № 4 (166). – С. 97–105.

***Патенты:***

4. Патент № 2514119 Российская Федерация, МПК G01M 7/02, G01M 13/04. Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации : № 2012100600 : заявл. 10.01.2012 : опубл. 20.07.2013 / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева ; заявитель ООО «НПЦ «Динамика». – 9 с.

5. Патент № 2517772 Российская Федерация, МПК G01M 7/02 (2006.01). Способ вибродиагностики механизмов по характеристической функции вибрации : №

2012143962/28 : заявл. 15.10.2012 : опубл. 27.05.2014 / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева ; заявитель ООО «НПЦ «Динамика». – 10 с.

***Научные работы, опубликованные в изданиях, индексируемых в международной реферативной базе данных Scopus и Web of Science:***

6. Probabilistic and Statistical Criterions for Assessing the Condition by Vibroacoustic Signal Parameters / I. S. Kudryavtseva, A. P. Naumenko, A. I. Odinets, A. M. Demin. – DOI: 10.1109/Dynamics47113.2019.8944684 // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2019) : conference proceedings (Omsk, 5–7 November 2019). – Omsk : Omsk State Technical University, 2019. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8944684 (date accessed: 21.03.2021).

7. New diagnostic signs of the technical condition of piston compressors on the basis of characteristic function of the vibroacoustic signal / I. S. Kudryavtseva, A. P. Naumenko, A. I. Odinets, V. E. Bardanov. – DOI: 10.1088/1742-6596/1260/3/032023 // Journal of Physics: Conference Series. – 2019. – Vol. 1260. – P. 032023.

8. Kudryavtseva, I. S. Diagnostic signs on the basis of characteristic functions of vibroacoustic oscillations. – DOI: 10.1063/1.5122150 / I. S. Kudryavtseva, A. P. Naumenko, A. I. Odinets // AIP Conference Proceedings. – 2019. – Vol. 2141 (1). – P. 050007.

9. Naumenko, A. P. Evaluation of Peak Values of the Oscillation Processes Parameters / A. P. Naumenko, I. S. Kudryavtseva, A. I. Odinets. – DOI: 10.1109/Dynamics.2018.8601451 // Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dynamics 2018) : conference proceedings (Omsk, 13–15 Nov. 2018). – Omsk, 2018. – URL: https://ieeexplore.ieee.org/document/8601451/ citations#citations (date accessed: 21.03.2021).

10. Kostyukov, V. N. Assessment of characteristic function modulus of vibroacoustic signal given a limit state parameter of diagnosed equipment / V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko, I. S. Kudryavtseva. – DOI:10.1088/1742-6596/944/1/012063 // Journal of Physics: Conference Series. – 2018. – Vol. 944 (1). – P. 012063.

11. Formation of diagnostic features vector based on characteristic function of vibroacoustic signal / V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko, I. S. Kudryavtseva, S. N. Boychenko. – DOI: 10.14489/td.2016.08.pp.022-029 // 13th International Conference on Condition Monitoring and Machinery Failure Prevention Technologies (CM2016 / MFPT2016) : proceedings (France, Charenton-le-Pont, 10–12 October 2016). – Charenton-le-Pont, 2016. – P. 171–181.

12. Kostyukov, V. N. Usage of characteristic function as informative diagnostic feature / V. N. Kostyukov, A. P. Naumenko, I. S. Kudryavtseva. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.649 // Procedia Engineering. – 2016. – Vol. 152. – P. 521–526.

13. The research of rotation frequency influence and technical state condition upon the level of vibration spectrum components of rolling bearings / D. V. Kazarin, V. V. Bazakin, I. S. Kudryavtseva [et al.] // Procedia Engineering. – 2015. – Vol. 113. – P. 332–336. DOI : 10.1016/j.proeng.2015.07.274

***Научные работы, опубликованные в других изданиях:***

14. Исследование влияния условий испытаний подшипников качения на информативность оценки их технического состояния / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. И. Одинец, В. В. Басакин // Проблемы машиноведения : материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 17–19 марта 2020 г.). – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2020. – С. 361–367.

15. Кудрявцева, И. С. Развитие системы диагностических признаков поршневых компрессоров / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. И. Одинец // XXII Всеросс. конф. по неразр. контр. и техн. диагностике «Трансформация неразрушающего контроля и технической диагностики в эпоху цифровизации. Обеспечение общества в изменяющемся мире» : сб. тр. Москва, 3-5 марта 2020 г. – М. : ИД «Спектр», 2020. – С. 244-247.

16. Новые диагностические признаки технического состояния поршневых компрессоров на основе характеристической функции виброакустического сигнала / И. С. Куд-

рявцева, А. П. Науменко, А. И. Одинец, В. Е. Барданов // Проблемы машиноведения : материалы III Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 23–24 апр. 2019 г.) : в 2 ч. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – Ч. 2. – С. 207–214.

17. Диагностические признаки неисправностей на основе характеристической функции виброакустических колебаний / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. И. Одинец, В. Е. Барданов // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 9-й Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 26–28 февр. 2019 г.). – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2019. – С. 196–197.

18. Вероятностно-статистический критерий оценки состояния по параметрам виброакустического сигнала / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко, А. М. Демин, А. И. Одинец // Динамика систем, механизмов и машин. – 2019. – Т. 7, № 2. – С. 113–122.

19. Науменко, А. П. Вероятностно-статистические методы принятия решений: теория, примеры, задачи : учеб. пособие / А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева, А. И. Одинец ; ОмГТУ. – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2018. – 105 с. – ISBN 978-5-8149-2720-0.

20. Науменко, А. П. Оценка пиковых значений параметров колебательных процессов / А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева, А. И. Одинец // Динамика систем, механизмов и машин. – 2018. – Т. 6, № 4. – С. 47–52.

21. Костюков, В. Н. Оценка модуля характеристической функции виброакустического сигнала при заданном параметре для предельных состояний объекта диагностирования / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева // Динамика систем, механизмов и машин. – 2017. – Т. 5, № 4. – С. 239–244.

22. Кудрявцева, И. С. Оценка количественных критериев параметров характеристической функции для различных состояний объекта диагностирования / И. С. Кудрявцева, А. П. Науменко // Наука, образование, бизнес : материалы Междунар. науч.-практ. конф. ученых, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвящ. Дню радио (Омск, 7 мая 2016 г.). – Омск : Образование-информ, 2016. – С. 193–209.

23. Костюков, В. Н. Характеристическая функция как информативный диагностический признак / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 6-й Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 25–30 апр. 2016 г.). – Омск : Изд-во ОмГТУ, 2016. – С. 113–114.

24. Костюков, В. Н. Особенности оценки количественных критериев параметров диагностических сигналов для предельных состояний объекта диагностирования / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева // Оценка и управление индустриальными рисками в промышленной безопасности. Мониторинг рисков сложных и уникальных объектов : сб. материалов VI школы-семинара. (Омск, 24 авг. 2016 г.). – Омск : Золотой тираж (ООО «Омскбланкиздат»), 2016. – С. 137–146.

25. Костюков, В. Н. Методические основы оценки пиковых значений параметров виброакустических сигналов / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, С. Н. Бойченко, И. С. Кудрявцева // Динамика систем, механизмов и машин. – 2016. – № 1. – С. 51–58.

26. Исследование влияния частоты вращения и технического состояния на уровень спектральных составляющих вибрации подшипников качения / Д. В. Казарин, В. В. Басакин, И. С. Кудрявцева, В. Н. Костюков // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства : материалы 5-й Междунар. науч.-техн. конф. (Омск, 25–30 апр. 2015 г.). – Омск : Изд-во ИНТЕХ, 2015. – С. 79–80.

27. Костюков, В. Н. Диагностика подшипников качения по параметрам характеристической функции / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Кудрявцева // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 142–145.

28. Методика экспериментальных исследований вибрации подшипников / В. В. Басакин, И. С. Кудрявцева, А. О. Тетерин, А. В. Зайцев // Динамика систем, механизмов и машин. – 2014. – № 4. – С. 112–115.

29. Исследование зависимости величины вибропараметров подшипника от радиальной нагрузки / В. В. Басакин, А. О. Тетерин, И. С. Кудрявцева [и др.] // Наука, образование, бизнес : материалы Всерос. науч.-практ. конф. учёных, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвящ. Дню радио (Омск, 29 апр. 2014 г.) / ИРСИД. – Омск : КАН, 2014. – С. 118–123.

30. Исследование зависимости величины вибропараметров подшипника от осевой нагрузки / В. В. Басакин, А. О. Тетерин, И. С. Кудрявцева [и др.] // Наука, образование, бизнес : материалы Всерос. науч.-практ. конф. учёных, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвящ. Дню радио (Омск, 29 апр. 2014 г.) / ИРСИД. – Омск : КАН, 2014. – С. 123–128.

31. Науменко, А. П. Анализ характеристических функций виброакустических сигналов клапанов поршневых компрессоров / А. П. Науменко, И. С. Сидоренко // Наука, образование, бизнес : матер. регион. науч.-практ. конф. учёных, преподавателей, аспирантов, студентов, специалистов промышленности и связи, посвящ. Дню радио (Омск. 7 мая 2010 г.). – Омск : КАН, 2010. – С. 259–264.

32. Костюков, В. Н. Использование характеристической функции для диагностики поршневых машин / В. Н. Костюков, А. П. Науменко, И. С. Сидоренко // Динамика систем, механизмов и машин. – 2009. – № 2. – С. 32–35.

## Благодарности

Автор выражает особую благодарность д.т.н., профессору Костюкову Владимиру Николаевичу за неоценимую поддержку, формирование устойчивой мотивации к выполнению работы, настойчивость в направлении к цели.

Автор благодарит научного руководителя д.т.н., профессора Науменко А.П. за постоянную помощь в работе, полезные советы и поддержку на протяжении всех этапов исследования.

Печатается в авторской редакции
Подписано в печать 26.04.2021 г. Формат 60x84/16.
Отпечатано на дупликаторе. Усл.печ.л. 1,4..
Тираж 100 экз. Заказ 40

Типография: 644050, г. Омск, пр. Мира, 11, т.: 65-32-08
Омский государственный технический университет,
отдел научной информации