

На правах рукописи

ВЕРХУТОВ АЛЕКСЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ДЕФЕКТОВКИ КОЛЕНЧАТЫХ ВАЛОВ
АВТОТРАКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ВИБРОАКУСТИЧЕСКОГО СПОСОБА**

**Специальность 05.20.03 Технологии и средства технического
обслуживания в сельском хозяйстве**

**Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Саратов - 2021

Работа выполнена в ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

Научный руководитель: **Денисов Александр Сергеевич**,
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Лялякин Валентин Павлович**,
доктор технических наук, профессор, главный специалист ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва

Фомин Андрей Иванович, кандидат технических наук, доцент кафедры технического сервиса машин ФГБОУ ВО «Мордовский государственный университет имени Н.П. Огарёва», г. Саранск

Ведущая организация: ФГБОУ ВО «Ульяновский государственный аграрный университет имени П. А. Столыпина», г. Ульяновск

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в 12.00 часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 220.061.03 на базе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет им. Н.И. Вавилова» по адресу: 410056 г. Саратов, ул. Советская, 60, ауд. 325.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова» и на сайте <http://www.sgau.ru>

Отзывы направлять учёному секретарю диссертационного совета по адресу: 410012, г. Саратов, Театральная пл., 1, E-mail: chekmarev.v@yandex.ru.

Автореферат разослан «____» _____ 2021 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Василий Васильевич Чекмарев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В себестоимости сельскохозяйственной продукции транспортные издержки составляют 10-12%, основная доля которых приходится на автомобильный транспорт. В агропромышленном комплексе в наиболее напряженные периоды сельскохозяйственных работ занято до 35% всего подвижного состава автомобильного транспорта, из которых более половины составляют автомобили семейства КАМАЗ. Кроме того, силовые агрегаты на базе двигателей КАМАЗ используются на различных видах сельскохозяйственной техники (тракторы, комбайны), а также стационарных силовых установках. Доля затрат на ТО и ремонт в себестоимости автомобильных перевозок достигает 12-15%. В результате за весь срок службы автомобиля затраты на обеспечение его работоспособности в 5-6 раз превышают затраты на его изготовление.

Анализ надежности автомобилей КАМАЗ показывает, что 32-37% отказов приходится на силовой агрегат, в том числе 25-30% на двигатель. Простои автомобилей КАМАЗ в эксплуатации вызваны отказами, в основном, двигателей, в том числе и коленчатого вала (КВ). Проведённые публичным акционерным обществом (ПАО) «КАМАЗ» и эксплуатационниками мероприятия, однако, не исключили отказов двигателей КАМАЗ из-за усталостных разрушений КВ.

При проведении текущего и особенно капитального ремонта двигателей важное место занимает дефектовка основных деталей. От её эффективности во многом зависят стоимость и вторичный ресурс двигателей. При выборе способа дефектовки следует учитывать его достоверность, сложность, квалификацию дефектовщиков, стоимость. В настоящее время наибольшее распространение на ремонтных предприятиях получил магнитно-порошковый способ, который не лишён ряда недостатков (требуется высокая квалификация дефектовщиков, не обнаруживает внутренние дефекты, высокая трудоёмкость и стоимость).

Всё большее распространение получают способы дефектовки, основанные на компьютерном распознавании (идентификации) дефектов деталей, позволяющем повысить достоверность операции и сократить её трудоёмкость. Поэтому исследование процессов развития и обнаружения усталостных разрушений коленчатых валов двигателя КАМАЗ безусловно, актуально. Актуальность данной работы подтверждена основными научными направлениями СГТУ имени Гагарина Ю.А.: проект 13В.01. Формирование основ обеспечения работоспособности автотранспортных средств.

Долговечность коленчатого вала, как одной из дорогостоящих деталей двигателя, определяется интенсивностью изнашивания и усталостного разрушения. Несмотря на большое количество работ, посвященных этим процессам, проблема повышения надежности коленчатого вала двигателя полностью не решена до настоящего времени.

Эксплуатация двигателей совершенствуется за счёт определенных мер по выполнению требований завода-изготовителя, касающихся организации технического обслуживания, применяемых масел, защиты двигателя от попадания пыли. Однако это не исключило отказов особенно форсированных двигателей КАМАЗ из-за усталостных разрушений коленчатого вала.

Степень разработанности темы исследования. Закономерности изменения технического состояния коленчатых валов в процессе эксплуатации двигателей исследованы в работах таких учёных, как Ф.Н. Авдонькина, А.Р. Асояна, В.Н. Баскова, Р.К. Галива, А.А. Гафиятуллина, М.А. Григорьева, И.Б. Гурвича, В.А. Долецкого, И.К. Данилова, А.С. Денисова, И.Е. Дюмина, В.В. Ефремова, К.Т. Кошкина, Е.С. Кузнецова, А.Т. Кулакова, А.Г. Липкинда, В.С. Лукинского, В.П. Лялякина, М.А. Масино, В.М. Михлина, И.А. Мишина, В.А. Наливкина, В.Н. Никишина, Н.И. Светличного, П.В. Сенина, А.Г. Степанова, А.М. Шейнина, В.А. Шадричева, А.И. Фомина, А.Л. Хохлова и других. На основании их трудов были обоснованы основные закономерности изнашивания и изменения геометрической формы элементов коленчатого вала в процессе эксплуатации. Однако при этом недостаточно рассмотрено усталостное разрушение коленчатых валов и способы их обнаружения.

Большая частота таких дефектов и многочисленность работ, посвящённых их причинам, свидетельствуют о недостаточности обоснования физической сущности развития и обнаружения усталостных разрушений. Нет четкого обоснования влияния конструктивных, технологических, эксплуатационных факторов, режимов работы двигателя на механизм развития отказов, способов обнаружения и устранения усталостных трещин. Поэтому исследование причин развития усталостных разрушений коленчатого вала двигателя и способов обнаружения их при ремонте двигателя, актуально и в настоящее время.

В настоящей работе на основе исследований усталостного разрушения коленчатого вала в процессе эксплуатации и способов обнаружения усталостных трещин разработана технология дефектовки коленчатого вала виброакустическим (ВА) способом. Исследования выполнены на примере коленчатого вала двигателей КАМАЗ.

Цель исследования: разработать алгоритм дефектовки коленчатых валов виброакустическим способом применительно к технологии их восстановления.

Задачи исследования.

1. Провести анализ основных этапов возникновения и роста усталостных трещин коленчатого вала в процессе работы и способов их обнаружения.
2. Обосновать основные численные параметры виброакустического сигнала и их связь с параметрами трещин, наработкой коленчатого вала и их предельные значения.

3. Исследовать закономерности и разработать методику определения степени разрушений КВ от величины усталостных напряжений при эксплуатации с использованием ВА способа.

4. Усовершенствовать технологию дефектовки коленчатого вала при восстановлении с использованием виброакустического способа.

5. Провести производственную проверку и дать технико-экономическую оценку результатов исследования.

Научная новизна

1. Математическая модель связи степени усталостных разрушений коленчатого вала с параметрами виброакустического сигнала, подтверждающая закономерности повышения его ресурсных показателей.

2. Алгоритм процесса дефектовки коленчатого вала методом импульсным воздействием.

Теоретическая и практическая значимость работы: исследован и обоснован способ обнаружения усталостных трещин коленчатого вала, основные параметры виброакустического сигнала и их связь с параметрами трещин, получена зависимость параметров виброакустического сигнала от наработки коленчатого вала и их предельные значения, усовершенствована операция дефектовки при восстановлении коленчатого вала с использованием виброакустического способа, обеспечивающего повышение эффективности использования его ресурса. Это позволило снизить на 24% удельные затраты на один автомобиль из-за сокращения трудоёмкости дефектовки по усталостному разрушению коленчатого вала.

Методология и методы исследования. Теоретические исследования выполнены на основе законов механики разрушения, основных положений сопротивления материалов, материаловедения, теории колебаний. Экспериментальные исследования выполнены с использованием современных методик и соответствующего оборудования (измеритель шума и вибраций ВШ-003-МЗ, программных средств MATLAB, Excel, Statistica 6).

Положения, выносимые на защиту.

1. Математическая модель связи параметров усталостных разрушений коленчатого вала с добротностью ВА сигнала (вероятностного характера).

2. Предельные значения добротности ВА сигнала.

3. Технология дефектовки коленчатого вала виброакустическим способом.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается методологической базой исследования и проведением измерений репрезентативной выборки с использованием современного сертифицированного оборудования и подтверждается сходимостью теоретических результатов с экспериментальными данными. Это позволило обеспечить обоснованность и доказательность принятых подходов и полученных результатов.

Предложенные разработки внедрены в ОАО «Межгородтранс» и ООО «Газпром трансгаз Саратов», прошли производственную проверку в

эксплуатации. Результаты исследований также используются в учебном процессе и научной работе ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».

Основные научные положения диссертационной работы обсуждались на научно-практических конференциях:

1. Саратовский государственный аграрный университет имени Н.И. Вавилова, Межгосударственный постоянно действующий научно-технический семинар (Саратов 2013 - 2018г.);

2. Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., ежегодные научно-технические конференции (Саратов, 2013 – 2019 г.);

3. Международные научно-технические конференции. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ) – (Москва, 2016, 2017, 2018 г.);

4. Международные научно-технические конференции Орловского государственного университета имени И.С Тургенева (Орёл, 2017, 2018 г.).

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе две статьи в рецензируемых научных изданиях по перечню ВАК и одна в научном издании, включённом в базы Web of Science и Scopus. Общий объем публикаций составляет 9,35 п. л., из которых 4,5 п. л. принадлежат лично соискателю.

Диссертация состоит из введения, пяти разделов, общих выводов, списка использованной литературы, включающего 119 наименований, в том числе 12 источников на иностранных языках, и 3 приложения. Работа изложена на 150 страницах машинописного текста, содержит 48 рисунков, 11 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, представлена общая характеристика работы и определены основные направления исследования.

В первом разделе «Анализ состояния вопроса по дефектам коленчатых валов и способам их дефектовки при ремонте» проведён анализ основных дефектов коленчатого вала. Дан анализ методов дефектовки усталостных трещин коленчатого вала, обоснована целесообразность использования виброакустического способа, сформулированы задачи исследования для достижения цели работы.

Во втором разделе «Теоретические предпосылки зависимости степени усталостного разрушения и виброакустических параметров коленчатого вала от его наработки» проведён теоретический анализ изменения степени усталостного разрушения коленчатого вала в процессе эксплуатации, показано, что последовательность модели физического предела усталости такова: дислокации – субмикро – микро – макротрещины – разрушение. Показаны основные этапы и особенности распространения трещины в КВ.

Показано, что все показатели степени усталостного разрушения деталей (длина трещины и концентрация микротрещин) прямо пропорциональны глубине трещины и с ростом числа циклов нагружения возрастают по экспоненциальной зависимости.

Обоснование применимости ВА способа для обнаружения трещин в коленчатом вале (КВ) как в динамической системе при ударе, то есть построение соответствующей математической модели, решение которой позволит выполнить экспресс-анализ дефектов КВ в условиях ремонтных предприятий при ремонте двигателей. Для математического моделирования колебаний принята рабочая гипотеза о закономерном рассеивании энергии колебаний от преград, связанных с ростом поверхности трещин. При анализе дефектного состояния КВ необходимо рассматривать происходящие в нем колебательные процессы при импульсном воздействии. При этом получаем основные информативные параметры дефектов.

Для проведения экспериментальных исследований и построения математической модели ДС КВ, необходимо рассмотреть начальные ограничения, основанные на известных работах М.Д. Генкина, В.Л. Бидермана, С.А. Добрынина, В.В. Ключева:

1. При анализе свободных колебаний механических систем при импульсном воздействии значение имеют измерения вблизи резонансной частоты.

2. При ударе возмущающие силы возникают в результате взаимодействия соударяющихся объектов и могут быть найдены только в связи с изучением динамической деформации последних. При соударении двух тел (бойка и КВ по схеме на рис. 1) их общей деформации можно пренебречь из-за их незначительности по сравнению с местной. Вследствие того, что взаимодействие между КВ и бойком занимает крайне незначительное время (1,5...6 мс) при условии, что время переходного импульсного процесса в нашем случае 160...200 мс, входной импульс силы можно рассматривать как мгновенный

3. Импульс силы при проведении экспериментальных исследований подбирается такой величины, при котором в спектре полученного ВА сигнала будет минимум частотных составляющих, характерных тем, что слабый импульс силы вызовет в КВ виброакустические колебания малой амплитуды и это не позволит в полной мере оценить качество импульсной переходной функции (ИПФ).

4. Для получения стабильных результатов в одинаковых условиях при проведении экспериментальных исследований необходимо обеспечить минимальную шероховатость поверхности соударяющихся тел. В данной работе рассматривается КВ, поверхность которого является шлифованной и имеет параметр шероховатости $Ra \leq 0,16$ мкм, в свою очередь боёк имеет $Ra \leq 0,08$ мкм.

5. Расположение датчика на объекте контроля при свободных колебаниях при импульсном воздействии не имеет особого значения при

наличии местной деформации. Тем не менее, для создания одинаковых условий, датчик располагается под углом 180° по отношению к бойку.

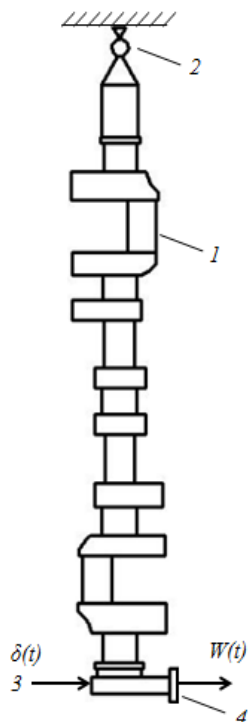


Рисунок 1 – Возбуждение колебаний в КВ импульсным воздействием и их приём вибропреобразователем: 1 – КВ; 2 – подвеска; 3 – боёк; 4 – датчик с вибропреобразователем;

Существует множество путей аппроксимации ударных воздействий классическими функциями. Наиболее часто при описании ударов δ – функция, широко используемая для решения задач автоматического управления, также применяется для описания ударных возмущающих воздействий, отвечающих условию при использовании полуволны синусоиды

$$y(t) = \sin(\omega t + \varphi), \quad (1)$$

$$\delta(t) = 0 \text{ при } t \neq 0, \delta(t) = \infty \text{ при } t = 0, \int \delta(t)dt = 1 + \infty - \infty \quad (2);$$

где ω – частота колебаний; t – время; φ – начальное значение отклонения.

При этом спектр δ – функции является постоянной величиной.

На основании приведенной в диссертации классификации наиболее подходящим для описания падающего шарика на поверхность КВ является применение δ – функции, так как она представляет собой импульс бесконечно малой длины и описывает ударное воздействие с продолжительностью намного меньшей длительности переходного процесса.

Использование дельта-импульса позволяет производить анализ быстротекающих процессов. При известной продолжительности сигнала и закона изменения амплитуды с течением времени имеется возможность идентифицировать переходный процесс системы, и, следовательно, получить необходимую информацию о его параметрах. Одним из таких переходных процессов являются собственные колебания КВ при воздействии на него импульсным ударным возмущением в виде δ – импульса.

При использовании импульсного возмущающего воздействия на КВ можно получить импульсную переходную функцию на основании регистрации его свободных ВА колебаний. В реальных условиях свободные колебания в объекте протекают под действием сил сопротивления, в результате чего происходит уменьшение амплитуды колебаний. Наиболее распространённым является случай, когда скорость движения в упругой среде пропорциональна силе сопротивления:

$$F_c \sim v, F_c = -rv; \quad (3)$$

где r - коэффициент сопротивления, знак минус показывает разнонаправленность скорости v и силы F_c .

Для материальной точки, совершающей гармонические колебания в упругой среде, имеющей коэффициент сопротивления r используем второй закон Ньютона, описывающий колебательные движения:

$$ma = -kx - rv; \quad (4)$$

$$\frac{d^2x}{dt^2} + \frac{r}{m} \cdot \frac{dx}{dt} + \frac{k}{m} \cdot x = 0; \quad (5)$$

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m};$$

$$\alpha = \frac{r}{2m},$$

где α - коэффициент затухания, определяющий скорость затухания колебательного процесса. С затуханием колебаний, энергия колебательного процесса постепенно убывает.

Уравнение затухающего колебательно процесса может быть представлено с учётом (4 и 5) в дифференциальной форме:

$$\frac{d^2x}{dt^2} + 2\alpha \frac{dx}{dt} + \omega_0^2 x = 0, \quad (4')$$

а его решение в виде $x = A \cdot e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi_0)$. (5')

Одними из основных параметров колебательного процесса являются частота и период. Для затухающих колебаний они будут иметь вид:

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}; \quad T = \frac{2\pi}{\sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}}. \quad (6)$$

При $\alpha \rightarrow 0$, $T \rightarrow T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$, затухающие колебания являются гармоническими, амплитуда которых изменяется по закону:

$$A = A_0 e^{-\alpha t}. \quad (7)$$

Рассмотрим случай, при котором амплитуда уменьшилась в e раз в течение некоторого времени τ :

$$A(t) = A_0 e^{-\alpha t}; \quad (8)$$

$$A(t + \tau) = A_0 e^{-\alpha(t+\tau)}; \quad (9)$$

$$\frac{A(t)}{A(t+\tau)} = \frac{A_0 e^{-\alpha t}}{A_0 e^{-\alpha(t+\tau)}} = e^{\alpha \tau}; \quad (10)$$

$$\frac{A(t)}{A(t+\tau)} = e = e^{\alpha \tau} \rightarrow \alpha \tau = 1; \quad (11)$$

$$\alpha = \frac{1}{\tau}, \quad (12)$$

где τ - время релаксации.

На основании формулы (11) можно сделать вывод, что коэффициент затухания обратно пропорционален времени, за которое амплитуда уменьшится в e раз. Ещё одной характеристикой колебательного процесса

является декремент затухания D , равный отношению двух амплитуд, разница между которыми, по времени, период.

$$D = \frac{A(t)}{A(t+T)} = \frac{A_0 e^{-\alpha t}}{A_0 e^{-\alpha(t+T)}}. \quad (13)$$

На основании декремента затухания можно получить логарифмический декремент затухания, равный логарифму D . Значение логарифмического декремента затухания определяется числом колебаний, за которые амплитуда уменьшилась в e раз.

$$\lambda = \ln D = \alpha T = \ln \frac{A(t)}{A(t+T)}; \quad (14)$$

$$\lambda = \alpha T = \frac{T}{\tau} = \frac{1}{N_e}. \quad (15)$$

Рассмотренные характеристики колебательного процесса связаны с анализом временной зависимости колебаний, то есть с импульсной переходной функцией (ИПФ). Основной же характеристикой колебательной системы является добротность.

$$Q = \frac{\pi}{\lambda} = \pi N_e = \frac{\pi}{\alpha T}. \quad (16)$$

В нашем случае, энергия ВА колебаний рассеивается, следовательно, по мере увеличения параметров трещины, рассеивание энергии будет увеличиваться, а добротность ДС КВ снижаться. Добротность механической системы определяется по её резонансной кривой, или по амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) (рис. 2).

Для КВ добротность вычисляется из АЧХ, которую можно получить из передаточной функции. Передаточная функция в свою очередь определяется из ИПФ. Для определения добротности сигнала необходимо установить ширину резонансной кривой. Оно равно отношению максимальной амплитуды колебательного движения к корню из двух, то есть $A_p/\sqrt{2}$. На пересечении резонансной кривой и этого значения определяют границы ширины резонансной кривой f_2 и f_1 . Полученные частоты связаны с шириной следующим соотношением: $\Delta f = f_2 - f_1$. Добротность определяется отношение резонансной частоты к ширине резонансной кривой: $Q = f_p/\Delta f$

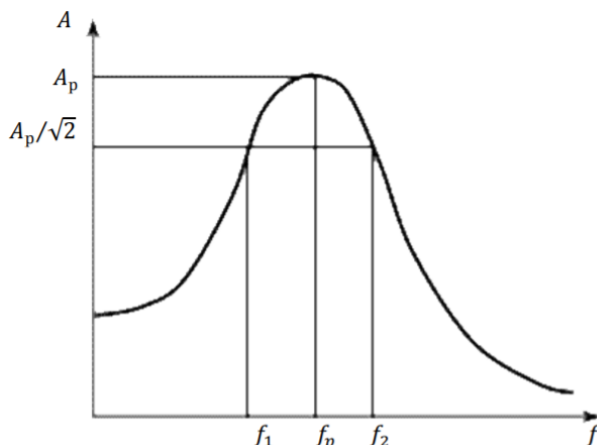


Рисунок 2 - Определение добротности колебательной системы по резонансной кривой

Наличие трещин обуславливает повышенное рассеяние энергии ВА колебаний. Таким образом, добротность является показателем качества динамической системы, который зависит от основных её характеристик, таких как резонансная частота и декремент затухания. Следовательно, добротность ДС служит идентификатором состояния КВ. Идентификация математической модели КВ, как динамической системы при импульсном воздействии, представляет добротность. Рассмотрим КВ как динамическую систему (ДС), у которой имеется входное воздействие, осуществляемое бойком, регистрируется вибродатчиком выходное воздействие, а сам КВ закреплён на подвеске (рис 1). При ударе шариком, играющим роль бойка, входное воздействие можно рассматривать как дельта-импульс, а выходное как импульсную переходную функцию $w(t)$. На основании импульсной переходной функции можно получить передаточную функцию динамической системы КВ, по которой определяется параметр, позволяющий однозначно идентифицировать состояние объекта контроля на наличие дефектов, а именно добротность. Добротность ДС напрямую связана с частотой собственных колебаний КВ и коэффициентом затухания колебаний. Типичная ИПФ для КВ без дефекта и с трещиной представлены на рис. 3.

Данная ИПФ описывается выражением:

$$A(t) = A_0 e^{-\alpha t} \sin(\omega_0 \cdot t), \quad (17)$$

где α – коэффициент затухания, ω_0 – частота собственных колебаний системы, A_0 – начальная амплитуда переходного процесса. Применяя преобразование Лапласа к импульсной переходной функции (17), получим передаточную функцию КВ как динамической системы (ДС):

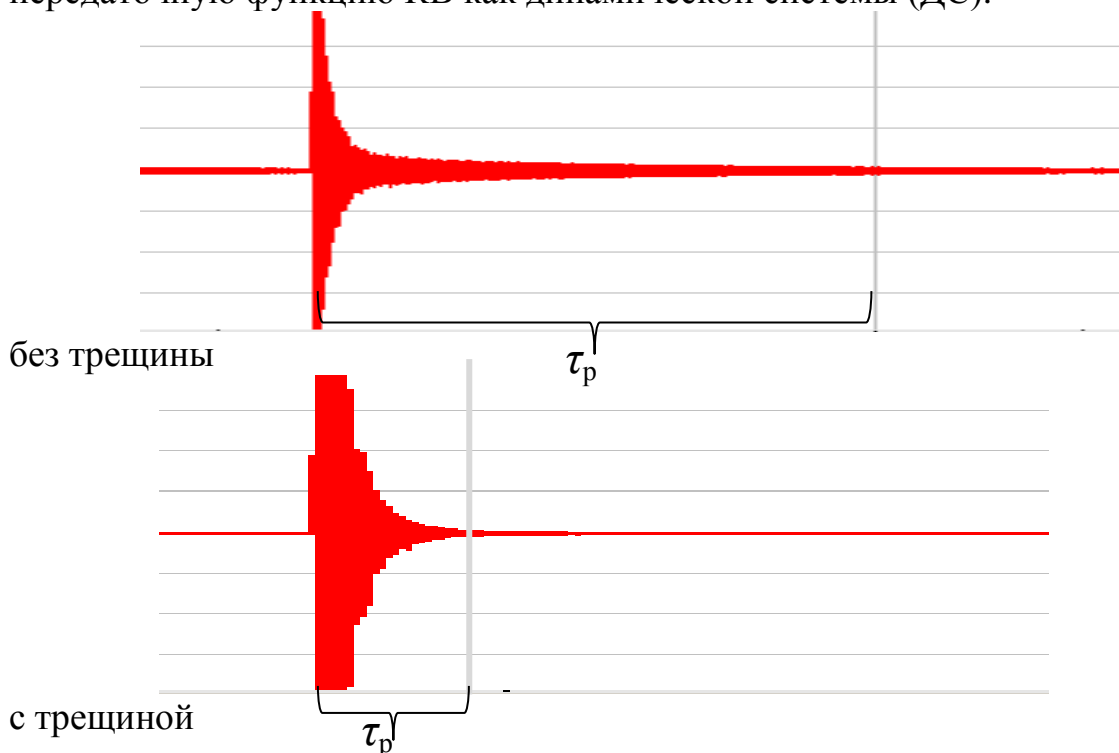


Рисунок 3 - Импульсная переходная функция для ДС КВ.

Далее определяем амплитудно-частотную характеристику (АЧХ) динамической системы КВ по формуле:

$$A^2(\omega) = |W(j\omega)|^2. \quad (18)$$

На основании полученной АЧХ строится график и определяется добротность динамической системы (рис. 4.).

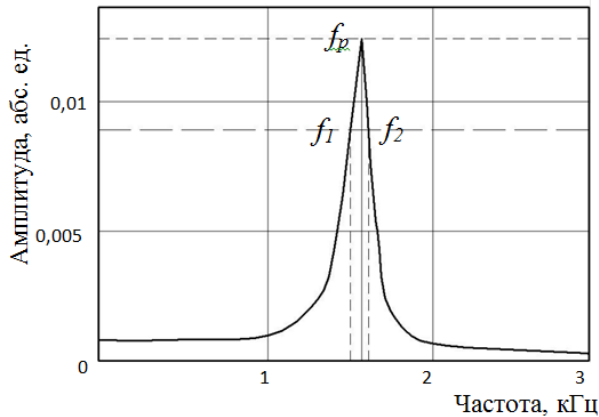


Рисунок 4 – Амплитудно-частотная характеристика ДС КВ без трещины

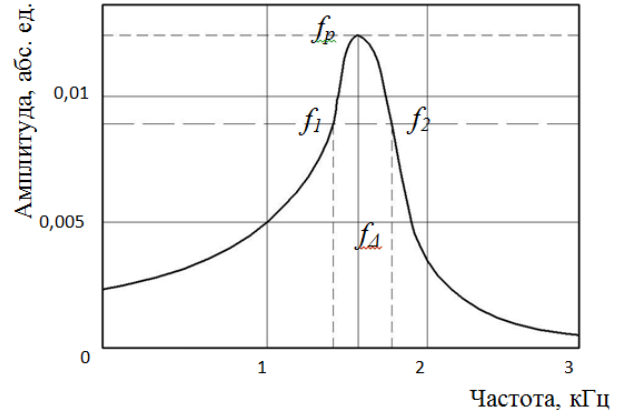


Рисунок 5 - Амплитудно-частотная характеристика ДС КВ с трещиной

На основании амплитудно-частотной характеристики определяется добротность ДС по формуле (10), то есть, $Q = f_p / (f_2 - f_1) = f_p / \Delta f$. Таким образом, получена передаточная функция КВ, как элемента ДС. Значение параметров k , T , γ зависят от размеров, массы и материалов КВ, следовательно, передаточная функция определяется типом КВ и для её идентификации необходим специальный эксперимент. Идентификация модели КВ с трещиной (рис. 5) производится в том же порядке.

На основании амплитудно-частотной характеристики можно получить добротность ДС, которая для КВ с трещиной будет ниже, чем у КВ без дефекта. Таким образом, методика определения добротности КВ на основании анализа его, как динамической системы может быть представлена в виде ряда этапов (рис. 6):

1. Измерение ВА колебаний в КВ при импульсном воздействии.
2. Применение к полученному ВА сигналу низкочастотной фильтрации.
3. Аппроксимация импульсной переходной функции при помощи аналитических выражений.
4. Вычисление передаточной функции ДС КВ.
5. Построение амплитудно-частотной характеристики ДС КВ по передаточной функции при помощи программного продукта MATLAB.
6. Определение добротности системы по полученной АЧХ.
7. Сравнение полученной добротности ДС с эталонным (бездефектным) значением добротности.
8. Отбраковка КВ в случае выявления в нём дефекта и отправка на утилизацию.

9. В случае соответствия добротности ДС рассматриваемого КВ нормативным значениям, производится его восстановление.

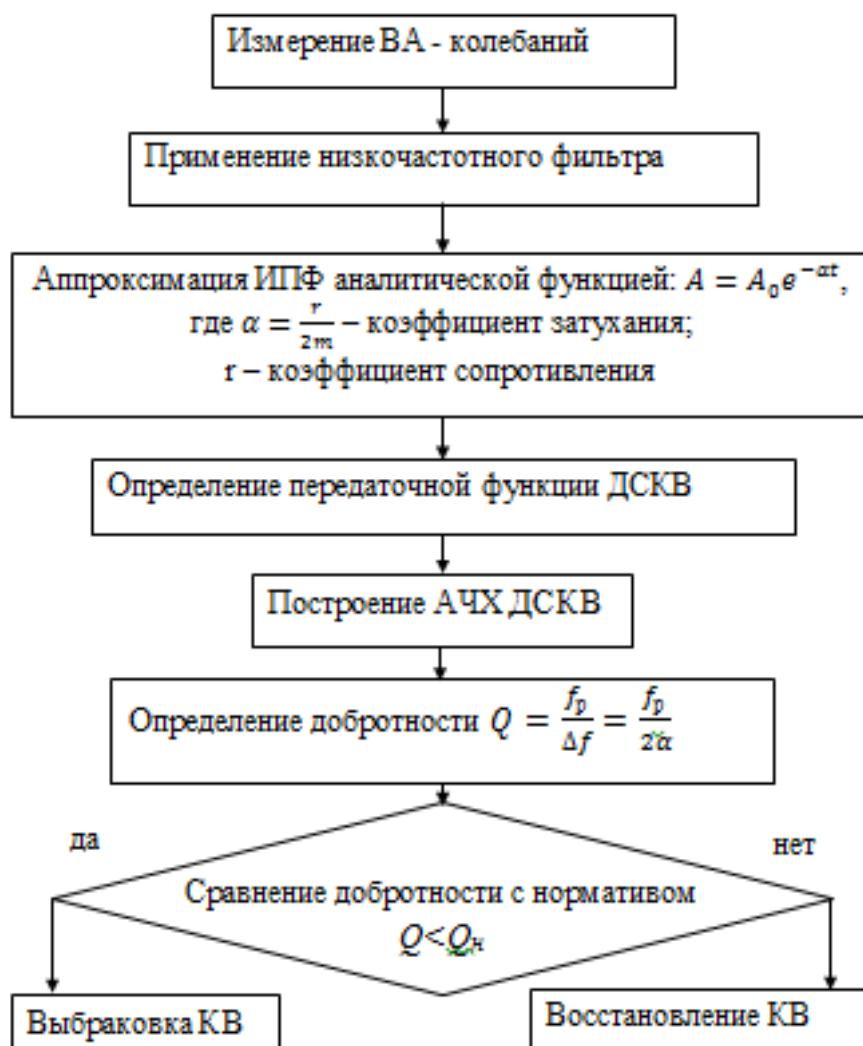


Рисунок 6 - Алгоритм идентификации ДС КВ и вычисления добротности

Таким образом, разработанная методика определения добротности ДС КВ основана на её анализе. Она может быть представлена в виде ряда относительно самостоятельных этапов. Как показал проведённый анализ способов виброакустической (ВА) дефектовки деталей, для коленчатого вала наиболее целесообразным является импульсное воздействие.

При отсутствии дефектов (трещин) ВА сигнал затухает относительно долго. То есть, его энергия слабо рассеивается в относительно плотной (сплошной) среде материала вала. При наличии дефектов (трещин) сплошность материала ухудшается и ВА сигнал рассеивается за счёт отражения от границы раздела двух сред на поверхности трещин. Величина или степень рассеивания сигнала будет пропорциональна глубине трещин. Следовательно, добротность сигнала с ростом размеров трещин (дефектов) будет снижаться. Вследствие сложного характера сигнала и развивающихся усталостных трещин зависимость эту достаточно аппроксимировать линейной убывающей зависимостью в виде

$$Q = Q_0 - b \cdot X, \quad (19)$$

где Q_0 – добротность ДС эталонного (бездефектного) вала; b – коэффициент пропорциональности; X – размер (длина или глубина) трещины.

Добротность ДС КВ с ростом трещин снижается. Размер же трещин (длина, глубина) с ростом наработки в процессе эксплуатации возрастает по экспоненциальной зависимости. С учётом предыдущей зависимости (19) получим зависимость добротности колебательной системы КВ от наработки

$$Q = Q_0 - b(X_0 \exp(cl)). \quad (20)$$

Имея в виду, что зависимость является четырёхпараметрической, для практических целей можно аппроксимировать полиномом второй степени, параметры которого определим по методу наименьших квадратов на основе экспериментальных данных.

$$Q = Q_0 - al - dl^2, \quad (21)$$

где все параметры с учётом знаков формулы (21) положительны.

Таким образом, обоснован параметр дефектовки КВ как добротность колебательной системы и доказана экспоненциальная зависимость её от наработки КВ.

В третьем разделе «Программа и методика проведения работы» приводится общая методика проведения работы и программа исследования, а также частные методики экспериментальных проверок.

Для исследований ВА колебаний КВ используется обоснованный интегральный способ свободных колебаний, возбуждённых в объекте импульсным (ударным) воздействием. ВА колебания в виде ИПФ регистрируются измерителем шума и вибраций. В нём звуковые и механические колебания объектов контроля преобразуются в пропорциональные им электрические сигналы, которые затем усиливаются и измеряются. Измеритель использует вибропреобразователи ДН-3-М1 и ДН-4-М1, которые закрепляются на КВ.

Контролируемый КВ крепится к подвеске за передний фланец. К заднему противовесу крепится на магните пьезодатчик. Рядом с КВ устанавливается кронштейн с подвешенным на нити грузом, который представляет собой шарик из стали ШХ-15. В месте крепления груза имеется шкала в градусах для отслеживания силы удара шарика о поверхность КВ.

Измеритель шума и вибраций ВШ-003-М3 в данной системе представляет согласующее устройство между пьезодатчиком и персональным компьютером (ПК). Он подключается с помощью разъёма размером 3,5 дюйма к аудиокарте, служащей аналого-цифровым преобразователем (АЦП). ПК со специализированным программным обеспечением для записи виброакустических колебаний с КВ (рис. 7) осуществляет это в файлы формата wav для последующей обработки.

Длину трещин определяли с использованием магнитного дефектоскопа и мерной линейки с ценой деления 1 мм. Измерения выполняли на участке

дефектовки в лаборатории кафедры ОПБС ИнЭТС СГТУ имени Гагарина Ю.А. и на участке дефектовки КВ завода «Ремдизель».

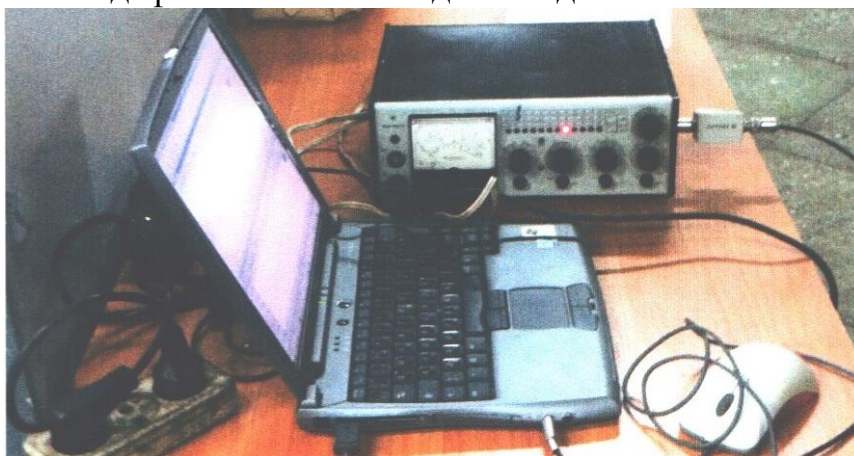


Рисунок 7 - Измерительный комплекс ВА дефектовки КВ

Анализ полученных записей виброакустических колебаний КВ выполняет программное обеспечение, реализованное в MATLAB. Оно обеспечивает как предварительную обработку, основанную на применении быстрого преобразования Фурье и анализе гармонических составляющих колебаний и основную составляющую, базирующуюся на аппроксимации виброакустического сигнала для получения передаточной функции динамической системы КВ и её АЧХ, по которой определяется добротность ДС КВ.

Получение достоверных результатов экспериментального исследования возможно не только за счёт программного обеспечения, но и путём использования идентичности условий опытов, в частности массы бойка. Для сопоставления состояния дефектовки конструктивно различных КВ необходимо обосновать массу бойка.

Экспериментально определяли характеристики ВА сигнала при различных массе и материала бойка. При этом использовали свинцовые бойки массой 20, 32, 40, 60 г и стальных массой 7, 9, 17, 25, 52, 113 г. При каждом опыте число испытаний было принято равным 25.

В соответствии с критерием Стьюдента, учитывающего вариацию результатов измерения и заданную их точность (погрешность). Частично результаты измерений при различных массах и материалах бойка приведены в приложении. Сравнение ВА сигналов показало, что наиболее приемлем боёк (шарик) из стали массой 20-25 г. В этом случае в ВА сигнале наблюдается меньше высокочастотных составляющих. Кроме того, стальной шарик в отличие от свинцового не подвержен пластической деформации.

Следующим условием импульсного воздействия на КВ является угол отклонения бойка, который должен быть постоянным и рациональным при всех экспериментах. Проведённые опыты при значениях угла отклонения от 10 до 60 градусов (по 25 измерений) показали, что с увеличением угла отклонения груза в ИПФ появляются дополнительные искажающие

частотные составляющие. Для их снижения их воздействия угол отклонения приняли равным 30 градусам.

Частично результаты измерений при различных углах отклонения бойка приведены в приложении. Аналогично было определено место установки вибродатчика на КВ. По форме ВА сигнала определили, что рациональным местом является нижний противовес КВ.

Обработка виброакустического сигнала динамических систем показала наличие в нём трёх составляющих: низкочастотных, среднечастотных и высокочастотных относительно частоты собственных колебаний.

Далее программное обеспечение путём преобразования Фурье установлены параметры экспоненциальной зависимости амплитуды сигнала от времени. По времени кривая ограничивается временем релаксации τ_p (достижения амплитуды заданного значения, чаще всего это 5 % от исходно значения амплитуды)

Добротность динамической системы определяется по формуле

$$Q = \frac{\pi}{\alpha T} = \frac{\pi}{\frac{1}{\tau_p} T} = \frac{\pi \tau_p}{T}, \quad (22)$$

$$Q = \frac{\pi \tau_p}{\frac{1}{\omega}} = \omega \pi \tau_p, \quad (23)$$

где T – период колебаний, обратно пропорционален частоте, то есть ω .

Из полученных выражений следует, что добротность колебательной системы прямо пропорциональна времени релаксации τ_p при определённой частоте колебаний. Время релаксации определяется по импульсной переходной функции с дисплея компьютера с использованием специальной заставки (ограничителя).

Таким образом, исследована и разработана методика вычисления добротности СД КВ и установлена её линейная связь с временем релаксации.

В четвёртом разделе «Анализ результатов экспериментального исследования» определялись коэффициенты зависимости виброакустических параметров в коленчатом вале от показателей уровня его усталостного разрушения. Всего было обследовано 95 КВ, из которых 38 базовых, а остальные ЕВРО (без полости грязеуловителей в шатунных шейках). В результате анализа были получены зависимости добротности ДС КВ от параметров, характеризующих степень его усталостного разрушения, которые приведены на рис. 8, 9, 10, 11.

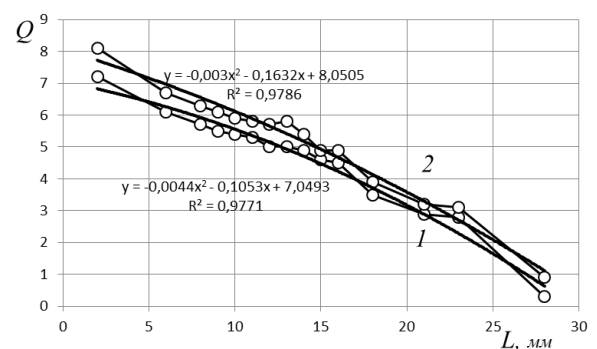
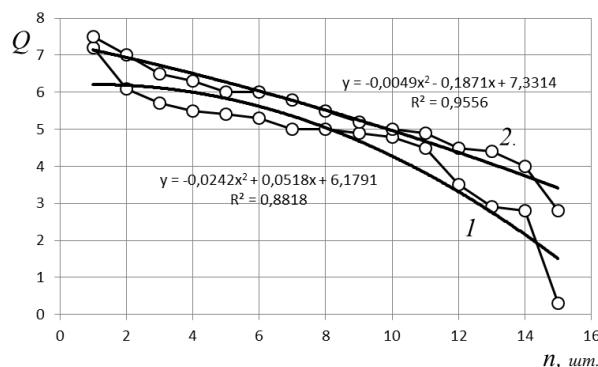


Рисунок 8 - Зависимость добротности ДС КВ от количества трещин:

Из рис. 8 видно, что с ростом количества трещин добротность снижается нелинейно (параметр достоверности R^2 у полинома выше, чем у линейной зависимости в среднем на 7,5 %). Объяснить увеличение темпов снижения добротности с ростом длины трещины можно тем, что длина трещины не прямо пропорционально связана со степенью усталостного разрушения.

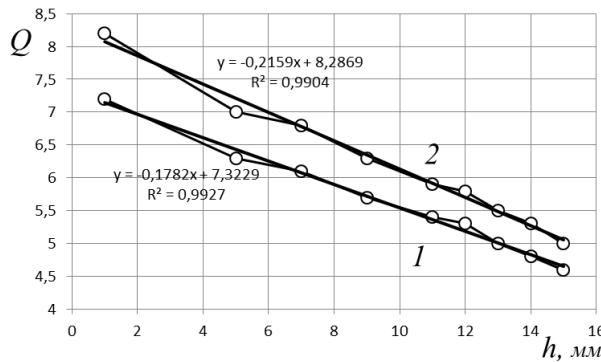


Рисунок 10 - Зависимость добротности ДС КВ от глубины трещины: 1 – ЕВРО; 2 – базовый

Судя по параметрам, эта зависимость линейная, что подтверждает обоснованную ранее зависимость в отношении глубины трещины, как оценочного параметра степени усталостного разрушения. Поскольку в реальной практике измерение глубины трещины затруднено, то можно при принятии решения о годности КВ пользоваться длиной трещины.

К дефектовочным параметрам предъявляются такие же требования, как и диагностическим: однозначности, чувствительности, стабильности и информативности. Добротность ДС КВ, как дефектовочный параметр с доверительной вероятностью не ниже 0,95 информативен и соответствует остальным требованиям.

Судя по параметру достоверности сходимость опытных и расчётных данных высокая (0,99-0,995). В процессе эксплуатации КВ добротность ДС закономерно снижается в 2,5-2,8 раза (рис. 10, 11). Данные зависимости целесообразно использовать при прогнозировании технического состояния КВ в процессе эксплуатации и разработке нормативов.

В пятом разделе «**Практические рекомендации по виброакустической дефектовке коленчатого вала и технико-экономическая эффективность исследования**» определены предельные значения добротности ДС КВ по технико-экономической методике по экономическому критерию – минимуму суммарных удельных затрат на предупреждение усталостного разрушения КВ и устранения последствий его усталостной поломки.

Рисунок 9 - Зависимость добротности ДС КВ от максимальной длины трещины

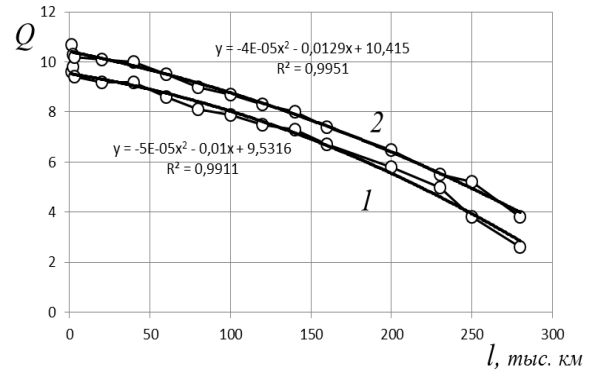


Рисунок 11 - Зависимость добротности ДС КВ от наработки: 1 – ЕВРО; 2 – базовый

С ростом наработки сокращается добротность ДС КВ, а, значит, возрастает вероятность его поломки. Следовательно, удельные затраты на устранение последствий поломки КВ без проведения дефектовки возрастают.

Их значения определяются с учётом вероятности достижения предельной величины добротности ДС

$$C_p = \frac{S_p \cdot P(Q)}{L}, \quad (24)$$

где C_p – удельные затраты на устранение поломки КВ; S_p – абсолютные затраты; $P(Q)$ – вероятность достижения предельной величины добротности; L – наработка КВ, тыс. км.

Удельные затраты на предупреждение поломки КВ за счёт роста наработки сокращаются по гиперболической зависимости

$$C_n = S_n / L, \quad (25)$$

где S_n – затраты на предупреждение поломки КВ (стоимость замены КВ, сопутствующих разборочных и сборочных операций); L – наработка КВ, тыс. км.

Сумма этих удельных затрат достигает минимума при предельном значении добротности ДС КВ.

Для КВ базового двигателя

$S_p = 150$ тыс. руб. (включает затраты на замену КВ, а также вероятные замену блока цилиндров и других деталей двигателя).

Суммируя эти затраты (рис. 12, кривая 3) определяем их минимум и предельное значение добротности ДС КВ. Для КВ базового двигателя КАМАЗ-740 это значение составляет 9 при наработке 100 тыс. км (рис. 11).

По такой же методике определяем предельное значение добротности, которое составляет 8 при наработке 100 тыс. км ($S_p = 210$ тыс. руб.)

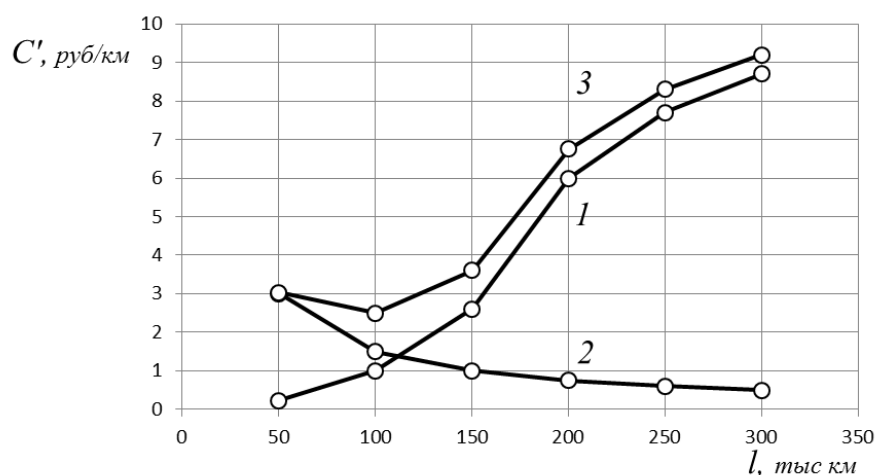


Рисунок 12 - Зависимость удельных затрат на ремонт КВ базового двигателя -1, на предупреждение отказов – 2 и суммарных- 3 от наработки.

На основе проведенных теоретических и экспериментальных исследований усовершенствован технологический процесс дефектовки КВ двигателей КАМАЗ-740 и КАМАЗ-ЕВРО при их восстановлении. Основное отличие от сложившейся

технологии восстановления КВ состоит в применении разработанной ВА дефектовки. Эта дефектовка выполняется по схеме, включающей блок, которой вычисляет добротность ДС КВ. При не снижении добротности ДС допустимого значения (превышении глубины трещины половины ремонтного припуска), обычно принимаемого на 20 % выше предельного, выполняется наплавка (*H*) и дальнейший ремонт, включающий шлифование шеек, правку чеканкой и полирование шеек. При не соблюдении этого условия вал направляется в утиль.

Экономические расчёты стоимости операций разработанной технологии ВА дефектовки и традиционной МП дефектовки по результатам хронометража и с учётом расходов на материалы показали, что относительное снижение удельных затрат из-за сокращения трудоёмкости дефектовки по усталостным трещинам составляет 24%. Это значение необходимо учитывать при экономической оценке эффективности результатов исследования.

Кроме того необходимо учитывать, что ВА дефектовка позволяет обнаружить внутренние трещины, которые не обнаруживает МП дефектовка. Это снижает усталостные отказы КВ в послеремонтный период эксплуатации. За счёт снижения затрат на обеспечение работоспособности двигателей из-за сокращения трудоёмкости дефектовки КВ по усталостным трещинам и потерь доходов автомобилей из-за снижения простоев в ремонте годовой экономический эффект составляет 2240 рублей для базовых двигателей и 3320 рублей для двигателей ЕВРО.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации решен комплекс задач имеющих важное значение для экономики сельскохозяйственной отрасли по повышению эффективности использования ресурса коленчатых валов автотракторных двигателей. Это позволяет снизить затраты на обеспечении их работоспособности на 24 %.

1. Один в числе наиболее дорогостоящих отказов двигателя это закономерно развивающееся усталостное разрушение коленчатого вала (11% отказов), и которое возможно обнаружить и прогнозировать с использованием виброакустической дефектовки. Кинетику разрушения при усталости задают движения и взаимодействия дислокаций и других дефектов кристаллической решетки. Результатом анализа литературных данных можно представить последовательность этапов схемы предела усталости: **дислокации – субмикро – микро – макротрещины – разрушение.**

В процессе работы коленчатого вала, высокие циклические нагрузки, несут шатунные шейки и щеки. Особенности разрушенной поверхности коленчатого вала показывает на преобладающее действие изгибающих моментов. Меньшее действие оказывает крутящий момент.

2. Из многообразия способов дефектовки коленчатого вала предпочтение отдано виброакустическому. Он использует ударный импульс. На этом основании разработан алгоритм действий по получению и обработке виброакустического сигнала на основе программного обеспечения. С

возрастанием количества циклов нагрузки в детали систематически увеличивается вероятность разрушения и количество разрушенных пластических элементов. Это ведёт и к преодолению предела текучести и предела прочности. Ослабленное сечение детали и дальнейшем испытывает хрупкое разрушение. При дальнейшей работе амплитуда фактических напряжений в несущих элементах детали возрастает - это вызовет экспоненциальную зависимость глубины трещины от количества нагружений и наработки, что позволяет прогнозировать наработку до разрушения.

3. Теоретически доказана актуальность применения виброакустической дефектовки для выявления трещин в КВ путём воздействия на него ударного импульса. Разработаны математические модели ДС КВ с дефектом (трещиной) и без дефекта. Они необходимы для построения амплитудно-частотной характеристики, которая определяет его добротность, как критерий степени разрушения (16). Установлен алгоритм определения дефектов в структуре КВ на основе распознавания импульсной переходной функции, по которой вычисляется добротность ДС КВ. Доказана линейная связь добротности и времени релаксации (23).

4. Установлено, что зависимость добротности ДС КВ от глубины трещины как оценочного показателя усталостного разрушения линейная (19). На этом основании принимается решения о годности КВ. Сходимость экспериментальных данных и обоснованной зависимости добротности ДС КВ от наработки (21) высокая ($R^2=0,99$). В процессе эксплуатации добротность ДС КВ закономерно снижается в 2,5-2,8 раза (рис. 10, 11). Полученные зависимости полезно использовать для прогнозирования технического состояния КВ в процессе использования и разработке предельных значений добротности его сигнала при восстановлении. Предельная (нормативная) величина добротности ДС коленчатого вала базового двигателя составляет 9, а коленчатого вала двигателя ЕВРО - 8.

5. Сокращение трудоёмкости дефектовки по параметрам усталостных трещин приводит к снижению удельных затрат на 24%, что составляет 0,029 руб./км для базового двигателя и 0,048 руб./км. для двигателей ЕВРО. Разработан технологический процесс ВА дефектовки при восстановлении коленчатых валов двигателей КАМАЗ-740 и КАМАЗ-ЕВРО. Годовой экономический эффект от внедрения ВА дефектовки составляет 2240 рублей для базовых двигателей и 3320 рублей для двигателей ЕВРО.

Рекомендации производству

Проведённые исследования позволяют рекомендовать ремонтному производству по автотракторным двигателям внедрение технологического процесса виброакустической дефектовки коленчатых валов с разработанными нормативами.

Перспективы дальнейшей разработки темы

В дальнейшем целесообразно разработать алгоритм и технологию без разборной диагностики коленчатого вала виброакустическим способом

непосредственно на двигателе. Это целесообразно включить в учебный процесс при подготовке специалистов ремонтного производства.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:
В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ

1. Верхутов, А.А. Алгоритм дефектовки коленчатого вала при ремонте / А.С. Денисов, А.А. Видинеев, А.А. Верхутов, В.М. Юдин // Научное обозрение. -2015. - № 6. - С.12-15. (0,25/0,07 п.л).

2. Верхутов, А.А. Теоретические предпосылки виброакустической дефектовки коленчатого вала автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, Е.Ю. Горшенина // Научная жизнь. – 2019. Т. 14 Вып. 11. - С.1714-1723. (0,375/ 0,18 п.л).

3. Verkhutov Alexey Change of Carrying Shaft Innovative Capacity in The Process of Growth of Fatal Cracks /Aleksandr Denisov1, Artur Asoyan1 , Alexey Verkhutov1, Natalija Kokodeeva1 , and Dmitrij Nikitin1 // Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya str., Saratov. (15, 01, 2021) 1-6. (0,31/0,06 п.л.) (Scopus)

Публикации в других изданиях

4. Верхутов, А.А. Оценка изменения несущей способности коленчатого вала в процессе усталостного разрушения / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, А.А. Видинеев, В.М. Юдин // Наука – 21 век. – 2015. - № 3. - С.35-39. (0,31/0,16 п.л).

5. Верхутов, А.А. Определение наличия трещин в коленчатых валах виброакустическим методом при импульсном воздействии /А.А. Игнатъев, В.А. Добряков, М.В. Виноградов, А.А. Верхутов // Автоматизация и управление в машино- и приборостроении: сб. науч. тр. Саратов – СГТУ. – 2016. – С.49-51. (0,2/0,01 п.л).

6. Верхутов, А.А. Дефектовка коленчатого вала по виброакустическим параметрам /А.С. Денисов, А.А. Верхутов // Научная мысль. – 2016. - № 5. - С.197-200. (0,25/0,13 п.л).

7. Верхутов, А.А. Определение наличия трещин в коленчатых валах виброакустическим методом при импульсном воздействии / А.А. Верхутов // Актуальные проблемы гуманитарных и социально-экономических наук. 2017. Т.. 11. № S1. С. 72-73. (0,13/0,13 п.л.)

8. Верхутов, А.А. Преимущества использования виброакустической дефектации коленчатых валов над существующими методами дефектовки / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, К.А. Маркелов, Е.О. Воронкевич // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок и безопасности движения: сборник материалов Международной научно-практической конференции (25 апреля 2018г., г. Саратов). – Киров: - Изд-во МЦИТО. – 2018.- С.236-241. (0,36/0,09 п.л).

9. Верхутов, А.А. Использование виброакустической дефектовки коленчатых валов автотракторных двигателей / А.С. Денисов, А.А. Верхутов // Актуальные вопросы организации автомобильных перевозок и безопасности движения: сборник материалов Международной научно-практической

конференции (25 апреля 2018 г., г. Саратов). - Киров: Изд-во МЦИТО. - 2018 С. 265-273. (0,6/0,3 п.л).

10. Верхутов, А.А. Целесообразность использования виброакустической дефектации коленчатых валов в автосервисе / К.А. Маркелов, А.С. Денисов, А.А. Верхутов, С.А. Власов // Сб. научных трудов по материалам Всероссийской научно - практической конференции « Роль опорного вуза в развитии транспортно-энергетического комплекса Саратовской области (ТРАНСЭНЕРГОКОМ)», том 2.- Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А. – 2018. - С.98-102. (0,33/0,08 п.л).

11. Верхутов, А.А. Виброакустическая дефектовка коленчатых валов автомобильных дизелей автомобилей КАМАЗ / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, Е.Ю. Горшенина, К.А. Маркелов, Д.В. Беляков // Сб. матер. 14 Междунар. науч.-тех. конференции «Совершенствование автотранспортных систем и сервисных технологий». – Саратов: СГТУ имени Гагарина Ю.А. – 2018. - С.211-218. (0,45/0,09 п.л).

12. Верхутов, А.А. Исследование метода виброакустической дефектации сборочных единиц автотранспортных средств / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, Маркелов К.А. // В сборнике: Актуальные вопросы организации транспортных средств. Сборник научных трудов по материалам XIV Международной научно-технической конференции, 2019. С. 378-388. (0,625/0,2 п.л.)

13. Верхутов, А.А. Эффективность виброакустической дефектовки коленчатых валов двигателей / А.С. Денисов, А.А. Верхутов, Е.Ю. Горшенина // Сб. научных трудов кафедры ЭАТиС МАДИ. Проблемы технической эксплуатации и автосервиса подвижного состава автомобильного транспорта. М:– 2019. – С.145-148. (0,33/0,08 п.л).

15. Верхутов, А.А. Обоснование применимости способа виброакустической дефектации для обнаружения дефектов в коленчатом вале /К.А. Маркелов, А.С. Денисов, А.А. Верхутов // Сб. научных трудов Всероссийской научно-технической конференции «Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем». – Курск: Юго-Западный гос. н-т.– 2019. – С.42-44. (0,2/0,01 п.л).

16. Верхутов, А.А. Результаты исследования математической модели, процессов распространения виброакустической волны в коленчатом вале / К.А. Маркелов, А.С. Денисов, А.А. Верхутов Сб. научных трудов Всероссийской научно-технической конференции « Управление качеством на этапах жизненного цикла технических и технологических систем». – Курск: – 2019. – С.45-47. (0,2/0,01 п.л).

Монография:

17. Верхутов, А.А. Виброакустический способ дефектовки коленчатых валов двигателей семейства КАМАЗ / А.А. Верхутов, В.Н. Кудашкин // Монография. – Вольск: ВВИМО. Саратов. Амирит. 2019. 85 с. (5,31/3,0 п.л.).