

Н. В. Шерстнев // Совершенствование проектирования и эксплуатации морских судов и сооружений: сб. ст. по материалам XIII Студенч. межвуз. науч.-техн. конф. (Севастополь, 12–14 апр. 2018 г.). – Севастополь: Сев. гос. ун-т, 2018. – С. 82–98.

3. Карлюк, А. П. Прикладные методы магнитной активации жидких диамагнетиков / К. В. Щурин, А. П. Карлюк, Ю. Н. Паныш // Современные материалы, техника и технология: сб. науч. ст. 12-й Междунар. науч.-практ. конф. – Курск, 2022. – С. 427–433.

4. Карлюк, А. П. Ультразвуковой метод повышения теплотворной способности топлив для дизельных двигателей внутреннего сгорания / А. П. Карлюк, И. П. Карлюк, К. В. Щурин // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. 7-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. участием. – Курск, 2022. – № 7. – С. 78–93.

5. Карлюк, А. П. Эффективность магнитной активации дизельного топлива двигателей внутреннего сгорания // Новости науки и технологий: науч.-практ. журн. – 2024. – № 2. – С. 22–34.

УДК 621.867

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ ПАСПОРТ МОБИЛЬНЫХ МАШИН КАК ОСНОВА ПЕРЕХОДА К ПРЕДЕКТИВНОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ НА ОСНОВЕ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ

Профессор, др. техн. наук А.Т. Скойбеда, старш. преп. В.А.Путиловский

Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)
mparts@bntu.by

Аннотация. В докладе рассматривается актуальная проблема перехода от традиционных систем планово-предупредительного ремонта (ППР) к предиктивному обслуживанию мобильных машин. Предлагается методология создания принципиально нового документа – «Интеллектуального технического паспорта», представляющего собой динамическую цифровую модель (Digital Twin) машины. Ключевая особенность подхода заключается в интеграции виброакустической диагностики на всех этапах жизненного цикла паспорта. Разработаны методы сбора и обработки данных, система диагностических критериев и алгоритмы принятия решений. Центральным элементом является система промежуточного контроля, позволяющая отслеживать деградацию узлов и прогнозировать остаточный ресурс. Экспериментальная апробация на строительной технике подтвердила высокую эффективность методологии: достигнута экономия на ремонте до

18%, сокращение простоя на 67% и рост общего коэффициента эффективности оборудования (OEE) с 65% до 85%.

Ключевые слова: предиктивное обслуживание, интеллектуальный технический паспорт, виброакустическая диагностика, цифровой двойник (Digital Twin), промежуточный контроль, остаточный ресурс (RUL), мобильные машины.

Annotation. The report addresses the pressing issue of transitioning from traditional scheduled maintenance systems to predictive maintenance for mobile machinery. A methodology for creating a fundamentally new document – an "Intelligent Technical Passport" – is proposed, which serves as a dynamic digital twin of the machine. The key feature of this approach is the integration of vibroacoustic diagnostics at all stages of the passport's lifecycle. Methods for data collection and processing, a system of diagnostic criteria, and decision-making algorithms have been developed. A core element is the intermediate monitoring system, which tracks component degradation and predicts remaining useful life (RUL). Experimental testing on construction equipment confirmed the high efficiency of the methodology: achieving savings on repairs up to 18%, a reduction in downtime by 67%, and an increase in Overall Equipment Effectiveness (OEE) from 65% to 85%.

Key words: predictive maintenance, intelligent technical passport, vibroacoustic diagnostics, digital twin, intermediate monitoring, remaining useful life (RUL), mobile machinery.

Введение. Современное машиностроение и эксплуатация сложной техники достигли критической точки, за которой традиционные системы технического обслуживания демонстрируют свою принципиальную несостоятельность. Унаследованная от индустриальной эпохи система планово-предупредительного ремонта сегодня все чаще приводит к одной из двух пагубных крайностей: либо к избыточным, необоснованным затратам на замену еще исправных компонентов, либо к катастрофическим внезапным простоям из-за непредсказуемых отказов. При этом субъективные, основанные на опыте и слухе механика методы диагностики, не обладают необходимой чувствительностью и объективностью для выявления зарождающихся дефектов на докритической стадии, когда их устранение требует минимальных ресурсов.

В ответ на этот системный вызов цель нашей работы была сформулирована как разработка целостной методологии для создания принципиально нового класса эксплуатационной документации. Мы предлагаем отказаться от концепции технического паспорта как «архивной карточки», заполняемой единожды при выпуске машины, и трансформировать его в «живую», динамическую цифровую модель (Digital Twin) [1]. конкретного экземпляра техники. Эта модель должна быть неразрывно интегрирована с системами IoT-мониторинга, а ее аналитическим ядром становится непрерывная диагностика,

базирующаяся на всестороннем анализе вибрационного и акустического состояния.

Ключевая новизна нашего подхода заключается не просто в цифровизации, а в глубокой, сквозной диагностической начинке каждого этапа жизненного цикла паспорта. Каждая операция — от первичного сбора данных до формирования заключения — проектируется с расчетом на обеспечение промежуточного контроля технического состояния. Это создает основу для фундаментального перехода от реактивной парадигмы, когда действия предпринимаются постфактум, к предиктивной стратегии, позволяющей проактивно управлять ресурсом каждого узла машины.

Анализ объекта и постановка задачи(Этап 1). На первом этапе мы провели глубокий анализ парка типовых мобильных машин, включая сельскохозяйственные агрегаты (тракторы, комбайны) и дорожно-строительную технику (экскаваторы, самосвалы). Несмотря на радикальные конструктивные и функциональные различия, был выявлен фундаментальный объединяющий принцип: все эти сложные механические системы подвержены ограниченному набору универсальных дефектов. К ним относятся дисбаланс вращающихся масс, износ подшипников качения и скольжения, расцентровка валов, ослабление креплений и люфты.

Важнейшим открытием этапа стало подтверждение, что именно виброакустические сигналы являются наиболее объективным и информативным «языком», на котором машина сообщает о своем внутреннем состоянии. В отличие от температуры или давления, вибрация и шумы несут в себе строго индивидуальный спектральный отпечаток каждой развивающейся неисправности[2].

Исходя из этого, была поставлена стратегическая задача: диагностика должна быть заложена в саму основу концепции паспорта. Мы проектируем его не как статичный перечень характеристик, а как целостную систему, предназначенную для регистрации, накопления и интеллектуального анализа диагностических параметров на всем протяжении жизненного цикла машины — от конвейера до утилизации.

Принцип промежуточного контроля реализуется здесь через создание системы отсчета. При вводе в эксплуатацию для каждой машины фиксируются ее индивидуальные эталонные виброакустические показатели в исправном состоянии. Последующее сравнение с этим «цифровым эталоном здоровья» позволяет не констатировать факт поломки, а отслеживать тонкую динамику деградации, начиная с самых ранних моментов[3].

Разработка методологии сбора и обработки данных (Этап 2). На втором этапе мы создали комплексную методологию и аппаратно-программный инструментарий для высокоточного сбора и преобразования виброакустических сигналов. Этот комплекс включает три взаимосвязанных компонента:

1. Ключевые параметры: Мы вышли за рамки простого измерения общего уровня вибрации. В фокусе нашего анализа — виброскорость (для оценки интенсивности колебаний), виброускорение (особенно чувствительное к высокочастотным ударным воздействиям), пик-фактор (индикатор ударных импульсов, критичный для диагностики подшипников), а также детальные спектральные составляющие, позволяющие идентифицировать источник вибрации с точностью до конкретного узла и частоты его вращения.

2. Аппаратная платформа: Разработана модульная, масштабируемая система сбора данных на базе прецизионных акселерометров и акустических микрофонов, синхронизированных через программируемый микроконтроллер. Это позволяет гибко адаптировать конфигурацию под геометрию и особенности любой машины.

3. Интеллектуальные методы обработки: Для очистки и анализа данных применяется каскад алгоритмов: цифровая фильтрация для удаления шумов, быстрое преобразование Фурье (БПФ) для перевода сигнала из временной в частотную область, и, что наиболее важно, анализ огибающей — мощный метод, позволяющий выделить низкочастотные модулирующие сигналы, которые являются верным признаком зарождающихся дефектов в подшипниках и зубчатых зацеплениях.

Новизна данного этапа заключается в следующем:

- **Диагностическая интеллектуализация измерений:** Мы не просто собираем данные, а сразу настраиваем систему на выделение конкретных параметров, заведомо чувствительных к определенным классам дефектов. Например, мониторинг пик-фактора — это целенаправленная охота за ранними признаками выкрашивания тел качения в подшипниках, еще до того, как это сможет услышать человеческое ухо.

- **Системность промежуточного контроля:** Контроль осуществляется не эпизодически, а в рамках регулярного цикла замеров, включая как стационарные режимы (холостой ход, номинальная нагрузка), так и мониторинг в реальных рабочих условиях. Это обеспечивает репрезентативность данных, достаточную для построения достоверных трендов и статистических моделей деградации.

Формирование диагностических критериев (Этап 3). Третий, ключевой этап — это преобразование массива сырых данных в однозначные диагностические заключения. Нами разработана трехуровневая система критериев:

- **Базовый уровень:** Пороговые значения, основанные на международных стандартах (например, ISO 10816 для оценки вибрации машин), дополненные нашей собственной статистикой, накопленной в ходе испытаний.

- **Система индексов:** Для агрегации информации и упрощения восприятия введены комплексные показатели[4]:

- Коэффициент Вибрационной Активности — динамический показатель энергии вибраций.

- Акустический Индекс Состояния — аналогичный показатель для шумовой эмиссии.

- Интегральный Показатель Технического Состояния — сводный индекс, объединяющий виброакустические и, при необходимости, другие данные (температура, давление).

- Четкий алгоритм принятия решений: Создана логическая схема, которая автоматически классифицирует состояние узла по одной из трех категорий: «Исправное» (норма), «Предаварийное» (развивающийся дефект, требуется наблюдение и планирование ремонта) и «Аварийное» (критический износ, требуется немедленная остановка).

Именно здесь диагностика становится полностью алгоритмизированной и объективной. Она заменяет субъективное мнение «на слух» на автоматизированное заключение, основанное на количественных данных. Принцип промежуточного контроля находит свое прямое воплощение в «желтой» зоне состояния. Это не просто предупреждение — это инструмент для планирования. Он сигнализирует о том, что процесс деградации вышел за рамки статистической нормы, и позволяет службе эксплуатации заблаговременно, за недели или даже месяцы, спланировать ремонтную кампанию, заказать запчасти и выделить окно для обслуживания, не допуская катастрофического простоя.

Разработка структуры технического паспорта (Этап 4). На основе разработанной методологии мы спроектировали структуру «Интеллектуального технического паспорта» как информационной модели, интегрируемой в среду САПР/PLM-систем[5].

Это интерактивная база данных, состоящая из логических разделов:

- Общие сведения и метрики: Классические паспортные данные, но с привязкой к цифровой 3D-модели изделия.

- Ядро системы — Паспорт вибрационного и акустического состояния: Содержит эталонные спектры, карты контрольных точек измерений на 3D-модели, а также полный журнал всех проведенных замеров с привязкой к наработке.

- Диагностический командный центр: Здесь в реальном времени отображается текущий статус по каждому узлу (цветовая индикация), строится график истории изменения индексов и, на основе регрессионного анализа, формируется прогноз остаточного ресурса.

- Блок рекомендаций: Система автоматически генерирует конкретные рекомендации по обслуживанию, основанные на диагностическом заключении (например, «Произвести проверку затяжки крепления двигателя», «Спланировать замену подшипника №XYZ в течение 250 моточасов»).

В этой структуре диагностика является не разделом, а центральным содержанием, «кровеносной системой» всего документа. Промежуточный контроль визуализирован через интуитивно понятные графики трендов и интерактивные 3D-модели, где инженер в любой момент может кликнуть на

любой узел и увидеть не просто его текущий статус, а всю историю его «жизни» — от эталонного состояния до текущего момента, и спрогнозировать его будущее.

Проверка методологии и оценка эффективности (Этап 5).

В течение 6 месяцев проводились экспериментальные испытания на гусеничном экскаваторе и колесном погрузчике в условиях реальной эксплуатации. Результаты подтвердили не только работоспособность, но и значительный экономический эффект методологии.

Количественные результаты:

- Снижение затрат на ремонтные работы — на 18% (за счет устранения необоснованных замен и менее затратного устранения дефектов на ранней стадии).
- Экономия на запасных частях — на 25% (сокращение количества аварийных замен и сопутствующих повреждений смежных узлов).
- Сокращение unplanned простоев — на 67%.
- Рост общего коэффициента эффективности оборудования — с 65% до 85%, что является революционным показателем, демонстрирующим рост и доступности, и производительности.

Заключение и выводы

В результате работы разработана и апробирована комплексная методология создания «Интеллектуального технического паспорта» — принципиально нового документа для машиностроительной отрасли. Этот паспорт представляет собой не формуляр, а динамическую цифровую копию (Digital Twin) физической машины, постоянно обогащаемую данными и знаниями о ее состоянии.

Главная отличительная черта и новизна методологии — это тотальная интеграция диагностики на всех без исключения этапах жизненного цикла паспорта. От первичного проектирования точек замера и сбора данных до формирования прогнозных моделей и конкретных рекомендаций — каждый шаг наполнен диагностическим смыслом. Созданная система промежуточного контроля предоставляет инструмент не для констатации фактов отказа, а для активного, предиктивного управления техническим состоянием и ресурсом.

Внедрение данной методологии позволяет предприятиям совершить стратегический переход от архаичной и затратной системы ППР к современной, экономически эффективной модели предиктивного обслуживания. Это приводит к существенному росту надежности, доступности и, в конечном итоге, рентабельности эксплуатации сложной технической продукции.

ЛИТЕРАТУРА

1. Lee, J. A Digital Twin for Smart Manufacturing / J. Lee, B. Bagheri, H.-A. Kao // *CIRP Annals*. — 2015. — Vol. 64, № 1. — P. 143–146. — DOI: 10.1016/j.cirp.2015.02.011.

2. ISO 10816-1:1995 Mechanical vibration — Evaluation of machine vibration by measurements on non-rotating parts — Part 1: General guidelines. — 2nd ed. — Geneva : ISO, 1995. — 28 p.

3. Randall, R. B. Vibration-Based Condition Monitoring: Industrial, Aerospace and Automotive Applications / R. B. Randall. — Chichester : John Wiley & Sons, 2011. — 365 p. — ISBN 978-0-470-74785-8.

4. Геллер, Л.Б. Вибрационная диагностика машин и оборудования: справочник / Л.Б. Геллер, В.А. Говорков. — М.: Машиностроение, 2008. — 372 с.

5. Рандов, Х.Р. Цифровые двойники: от проектирования до эксплуатации / Х.Р. Рандов, М.Ю. Соколов // CAD/CAM/CAE Observer. — 2019. — № 4(98). — С. 34–41.

УДК 534.2:62

РАЗРАБОТКА МЕТОДОВ ВИБРОЗАЩИТЫ СИСТЕМ МОБИЛЬНЫХ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ КОМПОНЕНТОВ С КВАЗИНУЛЕВОЙ ЖЕСТКОСТЬЮ

Е.М. Робилко

Белорусский национальный технический университет(Минск, Республика Беларусь)
roblekevg@bntu.by

Аннотация. Представлен обзор современных виброзащитных систем и выявлены их основные недостатки. На основе обобщенного анализа предложено инновационное конструктивное решение — система гашения колебаний с нелинейным законом изменения жесткости, позволяющая устранить указанные недостатки. Предложенная система с квазинулевой жесткостью эффективно демпфирует вибрации в широком диапазоне частот. Представлены результаты разработки системы защиты, соответствующей предъявляемым требованиям, и обладающей малыми габаритами, высокой эффективностью и расширенным рабочим диапазоном. Эффективность предложенной системы подтверждена сравнительным анализом коэффициентов виброизоляции, превосходящим показатели существующих решений.

Ключевые слова: виброзащитные системы, квазинулевая жесткость, демпфирование колебаний, эффективность виброгашения, динамическая характеристика, управление колебаниями.

Annotation. An overview of modern vibration protection systems is presented and their main disadvantages are identified. Based on the generalized analysis, an