

Список выкарыстаных крыніц

1. Beale G., Schofield J., Austin J. The archaeology of the digital periphery: computer mice and the archaeology of the early digital era // Journal of Contemporary Archaeology, 5(2), 2019. – pp. 154-173.
2. oldmouse.com. Mouse museum. – 08/10/2021. – Режим доступа: <https://web.archive.org/web/20211008211229/https://www.oldmouse.com/>
3. Lyon R.F. The Optical Mouse: Early Biomimetic Embedded Vision / Advances in Embedded Computer Vision. – Springer, 2014. – pp. 3-22.
4. McLoughlin I. Computer Peripherals. Chapter 5. Mouse and Trackball / School of Computer Engineering. Nanyang Technological University. Singapore. – 16/10/2001. – Режим доступа: <https://www.lintech.org/comp-per/05MS.pdf>.
5. Atwood J. Meet the inventor of the mouse wheel. / CODING HORROR: programming and human factors. – 16 May 2007. – Режим доступа: <https://blog.codinghorror.com/meet-the-inventor-of-the-mouse-wheel/>

УДК 620.179.18

АНАЛИЗ И ОБРАБОТКА ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ СИГНАЛОВ

А. Н. Парфиевич, В. А. Сокол, Ю. Н. Саливончик

Брестский государственный технический университет, Брест, Беларусь

The article is devoted to the study of various methods of processing vibroacoustic signals to assess the condition of gears in multi-shaft drives. Such approaches as spectral analysis, cepstral analysis, correlation analysis, spectrum trimming, synchronous accumulation of vibroacoustic data, analysis of the envelope of the vibroacoustic signal, the method of shock pulse analysis and strobing of the vibroacoustic signal are considered. Their unique characteristics are described, as well as their advantages and disadvantages. The study also suggests some promising areas for further development of methods for vibroacoustic diagnostics of gears in multi-shaft drives.

Введение

Работа многовальных приводов и механизмов на основе зубчатых передач сопровождается разнообразным виброакустическим фоном. Корректность интерпретации полученных данных существенно зависит от выбранных методов выделения значимых частотных составляющих виброакустического сигнала. В зависимости от конструкции механизма и возможных дефектов используются различные методики [1,2]. При диагностировании зарождающегося дефекта возникают сложности, связанные с его малой энергией на фоне общих помех во время работы механизма [2]. При выборе определенного метода виброакустической диагностики необходимо учитывать постав-

ленные задачи и уметь выделять из общего сигнала информативные составляющие, которые помогут в формировании правильного диагноза состояния объекта.

Основная часть

Спектральный анализ

Методы виброакустической диагностики, особенно спектральный анализ виброакустического сигнала, получили широкое распространение благодаря накопленному опыту [2,3,4]. Этот метод активно использовался для оценки качества зубчатых колес в массовом производстве, основываясь на уровне шума и вибрации [5]. Однако его критиковали за необходимость проведения экспериментов в специализированных условиях и за то, что анализировалась только конкретная пара, что не позволяло оценить работу всего механизма.

При спектральном анализе важным является получение данных о месте и времени изменений частоты сигнала, что не всегда удается. Данный недостаток был устранен благодаря использованию преобразования Фурье, которое позволяет исследовать сигнал в заданном диапазоне времени.

Кроме того, выбор частотного диапазона для анализа имеет большое значение, т.к. на первичный преобразователь поступает общая информация как от механизма, так и от окружающих устройств. На низких частотах могут вноситься помехи от близко расположенных устройств, на средних фиксируется активность работающих узлов, а на высокие частоты быстро затухают. Это создает трудности в диагностировании начинающих дефектов, поскольку изменения в исправных зубчатых колесах могут быть более выраженными, чем у поврежденных [2].

Несмотря на недостатки, спектральный анализ имеет свои достоинства, такие как высокая помехозащищенность и информативность, позволяющие получать данные о каждом элементе исследуемого объекта [2].

Кепстральный анализ акустических сигналов.

При оценке состояния механизмов, состоящих из множества элементов и производящих разные частоты в спектре виброакустического сигнала, возникает задача отслеживания изменений объекта в зависимости от отклонений от первоначального состояния спектра. В таких случаях целесообразно использовать кепстральный анализ, который позволяет получить более сжатую и понятную информацию [6].

Кепстр можно представить как квадрат преобразования Фурье логарифмического спектра мощности акустического сигнала [6]:

$$K(\tau) = \left\{ \int_0^{\infty} \lg |F(\omega)|^2 \cos(\omega\tau) d\omega \right\}^2$$

где $F(\omega)$ – спектр мощности сигнала;

τ – независимая переменная, которая носит название квефренси и имеет размерность времени.

Это преобразование делает кепстр, что отличает его от традиционного спектра, менее чувствительным к вариациям исследуемого сигнала. При проведении кепстрального анализа следует учитывать, как местоположение, так и амплитуду пиков на полученном кепстре. Особенно важно при диагностике механизмов с зубчатыми передачами обратить внимание на гармоники в низкочастотной области, так как они могут вызывать пики на кепстре и вводить в заблуждение в процессе постановки диагноза.

Огибающая виброакустического сигнала.

Огибающая виброакустического сигнала представляет собой важный аспект диагностики многовальных механизмов, использующих зубчатые передачи, где требуется выделить информативную составляющую из комплексного сигнала, состоящего из периодических и статических случайных факторов [3]. Процесс выявления огибающей описан в [2].

При применении этой методики возможно обнаружение как эксплуатационных, так и локальных дефектов на контактирующих поверхностях (например, зубчатые колеса, подшипники качения и скольжения). Для диагностики первых используются значения, отражающие глубину амплитудной и фазовой модуляции основных частот вынужденных колебаний, а для определения вторых – k -мерные векторы, формируемые из спектральных элементов огибающей на одной из частот, связанной с дефектом [1]. При наличии эксплуатационных дефектов (царапины, трещины и пр.), изменяющих работу механизма, наблюдается усиление модуляции виброакустических процессов как на вынужденных, так и на собственных частотах [7].

Метод огибающей отличается высокой чувствительностью к выявлению дефектов, даже на ранних стадиях, а также способен точно локализовать проблемные узлы и прогнозировать состояние объекта по единственному измеренному виброакустическому сигналу. Он широко используется в диагностике дефектов как зубчатых колес, так и подшипников качения [7].

Метод анализа ударных импульсов.

Метод анализа ударных импульсов представляет собой альтернативу методу огибающей виброакустического сигнала, преимущественно используемую для диагностики подшипников качения.

Существует две основные модификации данного метода:

1. Первая модификация базируется на анализе виброакустических эффектов, возникающих на резонансной частоте исследуемого объекта [2,7]. Метод предполагает, что последовательно возникающие удары, вызванные локальным дефектом, приводят к отклику всей системы на собственных частотах дефектного элемента, что выявляется в спектре как комбинированные гармоники. При известности собственных частот узлов и частот дефектов можно создать градиент эталонного состояния, что позволяет сравнивать результаты диагностики с известными методами. Преимущества данной модификации заключаются в высокой чувствительности к начальным дефектам и возможности их локализации.

2. Вторая модификация сосредоточена на анализе величин виброакустической активности, связанных с резонансной частотой первичного регистратора [2,7]. Этот подход, реализованный компанией SKF в 1968 году, основывается на том, что даже исправные подшипники сопутствуют микроударам, интенсивность которых возрастает с развитием дефекта [2,7].

Метод обладает рядом преимуществ, таких как отсутствие требования к периодичности импульсов, что позволяет обнаруживать разрывы масляной пленки, и высокая чувствительность к зарождающимся дефектам. Однако имеются и недостатки: метод не всегда позволяет выявить все дефекты подшипников, сложность в классификации дефектов из-за их схожести и низкая эффективность при диагностике низкооборотных подшипников [8]. Дополнительно, требуется, чтобы первичный преобразователь находился максимально близко к обойме подшипника.

Стробирование виброакустического сигнала.

Временной анализ виброакустического сигнала (стробирование) применяется для выделения интервалов, которые отражают периодичность происходящих процессов. Именно поэтому стробирование находит широкое применение в диагностике машин и механизмов, функционирующих по заданной циклической схеме. В этом контексте энергия виброакустического сигнала поглощается последовательными ударами элементов, что обусловлено кинематикой устройства [7,9].

Само же стробирование, согласно [7], может быть описано следующим образом:

$$y(t) = \sum_{k=0}^n x(t)g(t - kT - \tau),$$

где T – период следования выделяемых импульсов в диагностируемом узле.

$$g(t) = \begin{cases} 1, & \text{при } kT + \tau < t \leq kT + \tau + t'' \\ 0, & \text{при всех других } t \end{cases}$$

где $t'' - t' = \Delta t$ – ширина импульса стробирования;

τ – время запаздывания импульса стробирования $g(t)$ относительно синхронного импульса $\xi(t)$ с датчика оборотов.

Использование метода стробирования в анализе акустического сигнала при диагностике машин и механизмов с циклическим режимом работы позволяет при высоком уровне фоновых шумов извлекать важные данные о состоянии рассматриваемого объекта, что в свою очередь способствует правильной интерпретации собранной информации.

Корреляционный анализ виброакустического сигнала.

Применение вероятностных исследовательских методов для анализа колебательных процессов, происходящих в любом механизме, возможно при условии их трактовки как случайных величин. В таких случаях изменяющиеся

статистические параметры, описывающие виброакустический сигнал, могут указывать на происходящие изменения в процессе работы устройства [2]. Оптимальные результаты при наличии линейных взаимосвязей между процессами обеспечиваются через корреляционный анализ [2]. Этот метод наиболее часто используется для оценки воздействия дефектов, возникших при производстве или сборке механизма [1,2,7]. Корреляционный анализ виброакустического сигнала предоставляет набор характеристик, необходимых для диагностики состояния объекта: такие как функция автокорреляции, функция взаимной корреляции, спектральная плотность мощности и взаимоспектральная плотность мощности. Основой этого подхода являются корреляционные преобразования, способствующие фильтрации помех, возникающих в ходе работы механизма. Это, в свою очередь, позволяет улучшить «чистоту» анализируемого сигнала и упрощает процесс диагностики.

Заключение

Анализ наиболее распространенных методов преобразования виброакустического сигнала при диагностике многовальных зубчатых приводов показывает, что эта проблема исследуется уже длительное время. При этом практически во всех известных системах и методах вибромониторинга выделяются несколько нерешенных вопросов [10]:

- возможность диагностики оборудования лишь в квазистационарных и безударных режимах;
- отсутствие алгоритмов, которые могли бы отделить информативную составляющую из анализируемого сигнала, вызванного внешними воздействиями на объект диагностики;
- низкий уровень автоматизации диагностического процесса, что требует присутствия высококвалифицированных специалистов в области виброакустической диагностики;
- наличие жестких алгоритмов, из-за которых изменение программной конфигурации вычислительных средств становится невозможным.

Таким образом, наиболее многообещающими направлениями в сфере виброакустической диагностики зубчатых передач многовальных приводов могут быть:

- усовершенствование методов нормирования виброакустической активности компонентов для кластеризации их технического состояния;
- создание общедоступных экспериментальных баз данных по виброакустическим характеристикам исследуемых зубчатых приводов для повышения достоверности диагностики;
- разработка экспертной системы, основанной на синтезе возможностей существующих методов преобразования сигнала и искусственного интеллекта;
- внедрение бортовых систем постоянного мониторинга для перехода на обслуживание зубчатых передач в зависимости от фактического состояния.

Список использованных источников

1. Виброакустическая диагностика зарождающихся дефектов / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – М. : Наука, 1984. – 120 с.
2. Генкин, М. Д. Виброакустическая диагностика машин и механизмов / М. Д. Генкин, А.Г. Соколова. – М. : Машиностроение, 1987. – 288 с.
3. Азовцев, Ю. А. Диагностика и прогноз технического состояния оборудования целлюлозно-бумажной промышленности в условиях рыночной экономики / Ю. А. Азовцев, Н. А. Баркова, В. А. Доронин // Целлюлоза, бумага, картон. – 1999. – № 5. – С. 102–105.
4. Антипенко, Г. Л. Влияние единичных дефектов зубьев привода на его динамическую нагруженность / Г. Л. Антипенко, М. Г. Шамбалова. – Механика машин, механизмов и материалов. – 2013. – № 3(24) – С. 33–38.
5. Абрамов, Ю. А. Аппаратура для обнаружения дефектов зубчатых передач по их шумам и вибрациям / Ю. А. Абрамов, А. А. Грачев, М. С. Козлов // VI Акустическая конференция: Тез. докл. – М. : Акустич. ин-т АН СССР, 1968.
6. Артоболевский, И. И. Введение в акустическую динамику машин / И. И. Артоболевский, Ю. И. Бобровницкий, М. Д. Генкин. – М. : Наука, 1979. – 296 с.
7. Современные методы и средства вибрационной диагностики машин и конструкций / Ф. Я. Балицкий [и др.]. – Научно-технический прогресс в машиностроении. – М. : Международный центр научной и технической информации, 1990. – Вып. 25. – 115 с.
8. Барков, А. В. Вибрационная диагностика машин и оборудования: учеб. пособие / А. В. Барков, Н. А. Баркова: М-во образования и науки Рос. Федерации, С.-Петер. гос. морской техн. ун-т. – СПб.: СПбГМТУ, 2002. – 152 с.
9. Вибродиагностика [Электронный ресурс] / Инженерно-технический центр «Вибродиагностика». – Северодонецк: Официальный сайт, 2016. – Режим доступа: <http://vibro.lg.ua>. – Дата доступа: 12.10.2018.
10. Ишин, Н.Н. Вибродиагностика зубчатых передач мобильных машин в эксплуатации / Н.Н. Ишин, А.М. Гоман, А.С. Скороходов // Неразрушающий контроль и диагностика. – 2017. – Вып. № 2. – С. 3–17.