



МРНТИ 73.31.81

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2026-154-1-149-165>

Архитектура интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств и методика анализа вибрационных сигналов

М.Ж. Куатова^{1,2} , О. Кумархан¹ , Д.Б. Акпанбетов² ,
А.Ж. Абекова^{1,3*} 

¹Институт механики и машиноведения имени академика У.А. Джолдасбекова,
Алматы, Казахстан

²Международный инженерно-технологический университет, Алматы, Казахстан

³ Satbayev University, Алматы, Казахстан

E mail: ¹kuatova.moldyr@gmail.com, ¹oraz.9801@gmail.com, d.akpanbetov@metu.kz,
^{*}Abekova310792@gmail.com

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы разработки методики анализа вибрационных сигналов и формирования концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надежности и безопасности эксплуатации транспортных систем в условиях цифровизации и внедрения киберфизических технологий. В качестве основного метода обработки выбран спектральный анализ на базе быстрого преобразования Фурье, который позволяет выявлять доминирующие частотные компоненты и формировать диагностические признаки. Представлена экспериментальная реализация регистрации вибрационных ускорений с использованием многоканальных акселерометрических датчиков и цифровая обработка данных с расчетом интегральных и спектральных параметров. Предложенная архитектура предусматривает масштабируемость и модульность для адаптации к различным типам транспортных средств. Реализованный подход может стать основой для развития современных систем интеллектуальной диагностики в транспортной отрасли, способных эффективно предотвращать поломки и повышать эксплуатационную готовность транспортных средств.

Ключевые слова: вибрационная диагностика, быстрое преобразование Фурье, мониторинг технического состояния, киберфизические системы, предиктивная диагностика.

Введение

Цифровизация и внедрение киберфизических систем в автомобилестроении формируют устойчивую потребность в развитии интеллектуальных средств мониторинга технического состояния оборудования и транспортных средств. Усложнение конструкций приводных систем, рост доли электрических и автоматизированных транспортных комплексов, а также повышение требований к надёжности и безопасности эксплуатации обуславливают необходимость применения диагностических методов, обеспечивающих раннее выявление отклонений в работе механических узлов.

Обзор литературы

Одним из наиболее информативных и широко применяемых методов мониторинга технического состояния транспортных систем является вибрационная диагностика. Теоретические основы вибрационного анализа и его применение в машиностроении подробно рассмотрены в фундаментальных работах [1, 2]. Анализ вибрационных сигналов позволяет оценивать состояние приводов, редукторов, элементов ходовой части и узлов крепления груза, прогнозировать развитие неисправностей и реализовывать обслуживание по состоянию, что особенно важно для транспортных средств, функционирующих в условиях переменных нагрузок и скоростей [1, 2].

Эффективность вибрационной диагностики в значительной степени определяется корректным выбором методов обработки измеренных сигналов. К классическим подходам относятся временно-частотные методы анализа, включая вейвлет-преобразование и эмпирическую модальную декомпозицию [3], а также методы спектральной куртозы, позволяющие выявлять нестационарные процессы и локальные дефекты в механических узлах [4, 5]. Для анализа вибраций вращающихся элементов широко применяются методы ордер-треккинга и огибающего анализа [6], а также кепстральные методы, используемые для диагностики дефектов зубчатых передач и подшипников [7]. Применение корреляционного и спектрального анализа способствует разделению технологических и эксплуатационных источников вибраций и повышению достоверности диагностических выводов [8].

В последние годы значительное развитие получили методы автоматизированной обработки вибрационных данных на основе машинного обучения и глубоких нейронных сетей. В обзорных исследованиях показано, что свёрточные и рекуррентные нейронные сети способны эффективно классифицировать техническое состояние машин и механизмов по вибрационным сигналам, снижая зависимость диагностики от экспертных настроек [8–9]. Для диагностики транспортных и приводных систем предложены специализированные архитектуры глубокого обучения, адаптированные к нестационарным режимам работы и изменяющимся условиям эксплуатации [10, 11]. Современные интеллектуальные методы диагностики рассматриваются как основа для построения систем прогнозирования остаточного ресурса и обслуживания по состоянию [12–14].

Развитие интеллектуальных транспортных систем и электрических приводов обусловило рост исследований, направленных на вибрационную диагностику именно в контексте автомобилестроения. Показано, что для электрических и гибридных транспортных средств характерны специфические источники вибраций, связанные с работой электроприводов и трансмиссий, что требует адаптации методов анализа и архитектур диагностических систем [15–16]. В работах последних лет подчёркивается необходимость интеграции вибрационной диагностики с оценкой NVH-характеристик для

комплексного анализа технического состояния и эксплуатационного комфорта транспортных средств [16,17].

Недавние исследования в области интеллектуальной вибрационной диагностики транспортных средств ориентированы на разработку распределённых и иерархических систем мониторинга, объединяющих сенсорный уровень, встроенную обработку данных и интеллектуальный анализ. Применение глубоких нейронных сетей и гибридных архитектур анализа данных позволяет автоматизировать выявление дефектов автомобильных редукторов, приводов и трансмиссий в условиях переменных режимов эксплуатации [18–19]. Отдельное внимание уделяется вопросам устойчивости диагностических моделей к шумам и внешним возмущениям, характерным для реальных условий движения транспортных средств [20].

Развитие измерительной базы также является важным фактором повышения эффективности интеллектуальных систем вибрационной диагностики. Использование микромеханических акселерометров и оптических систем измерения вибраций позволяет реализовать распределённый мониторинг динамических процессов и повысить точность регистрации вибрационных сигналов [18]. Интеграция сенсорных систем с цифровыми платформами мониторинга рассматривается как основа для построения киберфизических диагностических систем транспортных средств.

Анализ современных научных работ показывает актуальность разработки формализованной методики анализа и обработки вибрационных сигналов, ориентированной на условия эксплуатации транспортных средств и мобильных транспортных комплексов. В данной работе основное внимание уделяется разработке методики анализа вибрационных сигналов с использованием спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье как универсального и воспроизводимого инструмента оценки вибрационного состояния механических узлов. Предлагаемая методика рассматривается как самостоятельный инженерный инструмент, который на последующем этапе используется при формировании архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств.

Научная новизна работы заключается в формализации методики обработки и анализа вибрационных сигналов транспортных систем на основе экспериментально зарегистрированных данных и в разработке концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики, интегрирующей сенсорный уровень регистрации вибрационных ускорений, аналитический уровень спектральной обработки сигналов и интеллектуальный уровень анализа данных. Предложенный подход даст возможность использовать полученные спектральные признаки в системах интеллектуальной диагностики и предиктивного мониторинга технического состояния транспортных средств.

Методология

Предлагаемая методика анализа вибрационных сигналов основана на последовательной обработке измеряемых ускорений с целью получения информативных спектральных признаков, характеризующих техническое состояние механических узлов транспортного средства. Методика включает этапы регистрации сигнала, предварительной обработки (калибровка, фильтрация, удаление постоянной

составляющей), спектрального анализа и формирования диагностических показателей. Для уменьшения спектральных утечек перед выполнением быстрого преобразования Фурье к анализируемому сигналу предлагается применить окно Ханна. Использование оконной функции обусловлено тем, что при анализе конечного фрагмента сигнала предполагается его периодическое продолжение, что при наличии скачков на границах временного интервала приводит к искажению спектра. Схематично последовательность обработки представлена на (рисунок 1).



Рисунок 1 – Блок-схема методики анализа и обработки вибрационных сигналов

Регистрация вибрационных сигналов осуществлялась с использованием акселерометрических датчиков, установленных в диагностически значимых точках конструкции исследуемого узла. В качестве измерительных модулей применялись цифровой трёхосевой акселерометр MPU6050, предназначенный для регистрации низко- и среднечастотных вибраций, а также аналоговый акселерометр ADXL377, обеспечивающий фиксацию высокоамплитудных ускорений. Считывание данных выполнялось микроконтроллером Arduino Nano с последующей записью измерений на карту памяти microSD в формате CSV. Такая конфигурация обеспечивала автономность измерений и возможность последующей офлайн-обработки данных в специализированной программной среде. Контроль корректности работы измерительного модуля осуществлялся через интерфейс Serial Monitor Arduino IDE. На рисунке 2 представлен экспериментальный измерительный модуль для регистрации вибраций двигателя (рисунок 2).



Рисунок 2 – Экспериментальный измерительный модуль для регистрации вибраций двигателя

Акселерометрические датчики крепились к корпусу исследуемого двигателя с обеспечением жёсткой механической связи, что позволяло минимизировать паразитные колебания и повысить достоверность регистрации вибрационных ускорений. Перед началом измерений выполнялась автоматическая калибровка датчиков в неподвижном состоянии, позволяющая определить нулевые смещения по измерительным осям и компенсировать постоянную составляющую сигнала. В рамках экспериментального

исследования была выполнена регистрация вибрационных ускорений с использованием инерциальных датчиков, подключённых к системе сбора данных через последовательный интерфейс. Измеренные значения ускорений сохранялись в CSV-файл с временной привязкой каждого отсчёта. Файл содержал синхронные данные по трём осям акселерометров. Для последующего анализа был выбран сигнал ускорения по оси Z акселерометра MPU6050 как наиболее чувствительный к направлению вибрационного воздействия. Таблица 1 демонстрирует фрагмент зарегистрированного массива данных, содержащего временные отметки и значения ускорений, полученные с использованием инерциальных сенсоров MPU. Полученные временные ряды использовались в дальнейшем для проведения спектрального анализа методом быстрого преобразования Фурье и определения частотных характеристик вибрационных процессов исследуемого объекта.

Таблица 1 – Фрагмент зарегистрированных вибрационных данных (VIB.csv)

Время, мс	MPU_x	MPU_y	MPU_z
4376	-59.34	53.56	-0.44
4401	64.66	89.56	11.56
4425	36.66	29.56	-140.44
4451	-23.34	33.56	-100.44
4475	-11.34	-46.44	-20.44
4500	28.66	25.56	39.56
4525	-39.34	-98.44	-232.44
4550	-31.34	-42.44	11.56
4575	-91.34	17.56	-0.44
4599	-7.34	133.56	7.56
4624	-23.34	-34.44	-92.44
4658	-35.34	-30.44	55.56
4682	100.66	37.56	51.56
4707	76.66	53.56	107.56
4731	12.66	-46.44	151.56
4757	-7.34	-38.44	27.56
4782	-3.34	-30.44	-8.44
4806	68.66	-10.44	27.56

4831	44.66	-74.44	99.56
4855	108.66	-2.44	-20.44
4881	-3.34	-82.44	107.56
4905	36.66	21.56	-16.44
4930	-75.34	-82.44	91.56
4959	-11.34	37.56	-40.44
4983	-23.34	1.56	159.56
5008	48.66	77.56	103.56
5032	-19.34	-6.44	71.56
5057	-35.34	41.56	27.56
5083	-43.34	25.56	-44.44
5107	-55.34	13.56	-176.44
5132	-7.34	-38.44	95.56
5156	8.66	9.56	-136.44
5181	-3.34	-50.44	-68.44
5207	-39.34	65.56	51.56
5231	44.66	5.56	51.56
5256	8.66	53.56	-24.44
5283	-43.34	37.56	-108.44

Во временной реализации (рисунок 3) отчётливо прослеживается переход от состояния покоя к рабочему режиму двигателя. В начальный момент наблюдается низкоамплитудный шумовой сигнал. После включения двигателя фиксируется резкое увеличение амплитуды колебаний, появление квазипериодических колебаний и импульсных компонентов. Перед выполнением спектрального анализа проводилась предварительная обработка сигнала.

Регистрация вибрационных сигналов осуществлялась при фиксированной частоте дискретизации 200 Гц, что в соответствии с теоремой Найквиста обеспечивает корректное представление спектра вибрационных сигналов в диапазоне частот до 100 Гц. Указанный диапазон охватывает основные низко- и среднечастотные компоненты вибраций, характерные для динамических процессов в транспортных системах, включая колебания приводных механизмов, элементов трансмиссии и конструктивных узлов. Таким образом, выбранная частота дискретизации является достаточной для проведения спектрального анализа вибрационных сигналов и формирования диагностических признаков в рамках

рассматриваемой методики. Как уже упоминалось, измеренные значения ускорений по трём ортогональным осям сохранялись для последующего анализа. В дальнейшем для спектральной обработки использовалась ось, наиболее чувствительная к направлению основного вибрационного воздействия.

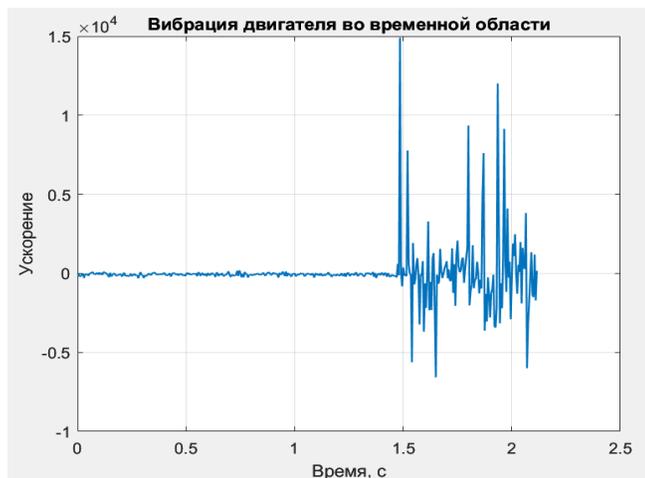


Рисунок 3 – Вибрация двигателя во временной области

Анализ проводился в диапазоне 1–100 Гц, что соответствует рабочему диапазону вибраций исследуемого двигателя. На амплитудном спектре (рисунок 4) отчётливо выделяется доминирующая частота порядка 86 Гц. Данная частота соответствует эквивалентной скорости вращения двигателя около 5200 об/мин, что согласуется с его рабочим режимом. Наличие выраженных гармонических составляющих свидетельствует о регулярной природе вибрационного процесса.

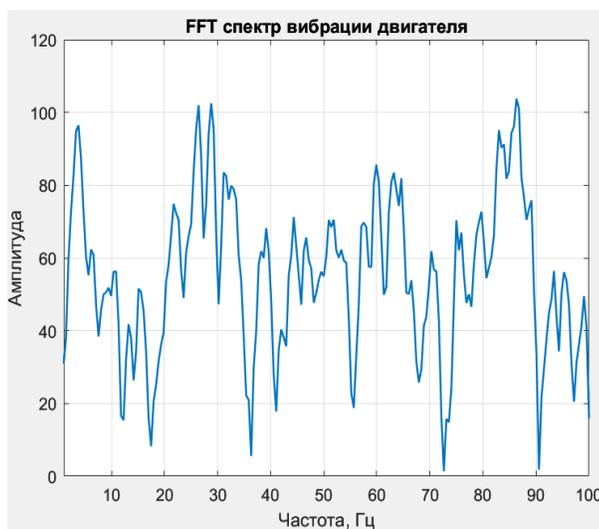


Рисунок 4 – FFT-спектр вибрации двигателя

Спектральный анализ позволяет определить основную частоту вибрации, амплитуду доминирующей гармоники, характер распределения спектральной энергии по частотному диапазону, а также среднеквадратичное значение вибрации (RMS), рассматриваемое как интегральный количественный показатель уровня динамической нагрузки механического узла. В процессе спектрального анализа вибрационных сигналов формируется набор диагностических признаков, используемых для количественной оценки вибрационного состояния исследуемого объекта. Основные диагностические признаки, используемые в работе, представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Диагностические признаки вибрационного сигнала

Диагностический признак	Обозначение	Способ определения	Назначение
Основная частота вибрации	f_0	частота максимума амплитудного спектра FFT	определение режима работы механического узла
Амплитуда доминирующей гармоники	A	амплитуда соответствующего спектрального пика	оценка интенсивности вибрации
Среднеквадратичное значение	RMS	вычисление по временной реализации сигнала	интегральная оценка уровня динамической нагрузки
Спектральная энергия	E	интегрирование спектральной плотности	анализ распределения вибрационной энергии

Полученные результаты предварительно подтверждают корректность реализованной экспериментальной установки и выбранной методики цифровой обработки сигналов. В рамках предложенной методики анализ вибрационных сигналов осуществляется в несколько последовательных этапов, включающих регистрацию вибрационных ускорений с использованием акселерометрических датчиков, формирование временных рядов измерений и предварительную обработку сигналов. На этапе аналитической обработки выполняется спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье, позволяющий перейти от временного представления сигнала к его частотной структуре. На основе полученного спектра формируется набор диагностических признаков, включающий доминирующую частоту вибрации, амплитуды спектральных гармоник, распределение спектральной энергии и среднеквадратичное значение вибрации. Сформированные спектральные признаки послужат основой для последующей интеграции в интеллектуальные алгоритмы диагностики и автоматической классификации технического состояния транспортных систем.

Результаты и обсуждение

На основе разработанной методики спектрального анализа вибрационных сигналов предлагается концепция архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств, ориентированная на комплексное объединение сенсорного уровня регистрации данных, аналитического уровня цифровой обработки и интеллектуального уровня интерпретации результатов. В отличие от существующих решений, в которых акцент делается преимущественно либо на алгоритмах обработки сигналов, либо на машинном обучении, предложенная архитектура формируется исходя из последовательной интеграции физического измерения, математической обработки и интеллектуального анализа, что соответствует современным подходам к построению распределённых диагностических систем транспортных средств [15, 18].

Интеллектуальная система вибрационной диагностики в рамках настоящей работы рассматривается как многоуровневая распределённая структура, обеспечивающая непрерывный переход от регистрации динамических параметров к формированию диагностического решения. На сенсорном уровне реализуется метод многоканальной регистрации вибрационных ускорений с использованием акселерометрических датчиков, размещённых в диагностически значимых точках конструкции транспорта. Регистрация осуществляется по ортогональным осям, что позволяет учитывать пространственный характер колебательных процессов и формировать информативный массив первичных данных, отражающих реальное динамическое состояние объекта. Использование многоканальной регистрации обеспечивает повышение чувствительности к локальным дефектам и соответствует современным требованиям к системам мониторинга автомобильных приводов и трансмиссий.

Собранные данные передаются на уровень сбора и хранения, где выполняется их временная синхронизация и структурированное сохранение. Такой подход обеспечивает автономность эксперимента, воспроизводимость обработки и возможность последующего офлайн-анализа, что является важным элементом распределённых диагностических платформ в транспортных системах [18]. Наличие структурированного массива данных создаёт основу для построения масштабируемых систем мониторинга, интегрируемых с цифровыми платформами эксплуатации.

Аналитический уровень архитектуры формируется на основе методики, представленной в предыдущей главе. На данном этапе выполняется предварительная цифровая обработка вибрационных сигналов, включающая устранение постоянной составляющей, очистку данных от некорректных значений и нормализацию временных рядов. Для количественной оценки вибрационной активности рассчитываются интегральные показатели, в частности среднеквадратичное значение вибрации, характеризующее общий уровень динамической нагрузки. Ключевым этапом аналитического уровня является спектральный анализ методом быстрого преобразования Фурье, позволяющий перейти от временного представления сигнала к частотному и выявить доминирующие частотные компоненты, связанные с режимами работы и конструктивными особенностями транспортного узла. Такой подход соответствует современным исследованиям в области интеллектуального мониторинга автомобильных трансмиссий и электрических приводов, где частотные признаки рассматриваются как основа для построения диагностических моделей [15]. Результаты аналитического уровня

формируют набор информативных временных и спектральных признаков, отражающих динамическое состояние механической системы. Эти признаки могут быть использованы на интеллектуальном уровне архитектуры для решения задач классификации технического состояния, оценки режимов работы и построения предиктивных моделей. Последние исследования показывают, что применение алгоритмов машинного обучения, включая нейронные сети и гибридные архитектуры анализа данных, существенно повышает точность диагностики автомобильных узлов в условиях переменных режимов эксплуатации. При этом устойчивость моделей к шумам и внешним возмущениям, характерным для реального движения транспортных средств, является ключевым фактором практической применимости системы. Формализованная структурная блок-схема архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики приведена на рисунке 5.



Рисунок 5 – Формализованная архитектура интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств

Интеграция предлагаемой архитектуры с системами оценки NVH-характеристик и цифровыми платформами мониторинга позволяет реализовать обслуживание по состоянию и элементы предиктивной диагностики транспортных комплексов. Такой подход соответствует концепции киберфизических систем и интеллектуальных транспортных платформ, в которых измерение, обработка и принятие решений объединены в единую цифровую среду. В отличие от существующих подходов, в которых, как правило, рассматриваются отдельные методы обработки вибрационных сигналов или алгоритмы интеллектуальной диагностики [8– 14, 18– 20], предлагаемая архитектура объединяет сенсорный уровень регистрации вибрационных ускорений, аналитический уровень спектральной обработки сигналов и интеллектуальный уровень анализа данных в рамках единой диагностической структуры. Предлагаемая архитектура ориентирована на масштабируемость и адаптацию к различным типам транспортных средств, включая мобильные транспортные комплексы и электрические платформы.

Представленная архитектура носит концептуальный характер и в настоящее время находится на стадии разработки. Реализована и экспериментально апробирована сенсорная и аналитическая часть системы, включающая регистрацию вибрационных сигналов и спектральную обработку методом FFT. Дальнейшая работа будет направлена на разработку и верификацию интеллектуального уровня системы, формирование обучающих выборок и оценку точности классификации технического состояния в условиях реальной эксплуатации. Особое внимание планируется уделить экспериментальной проверке устойчивости алгоритмов к изменяющимся режимам работы и интеграции системы в цифровые платформы мониторинга транспортных средств.

Предложенная архитектура формирует основу для перехода от изолированной обработки вибрационных сигналов к построению интеллектуальной системы мониторинга технического состояния транспортных средств.

Заключение

В статье рассмотрены вопросы разработки методики анализа вибрационных сигналов и формирования концепции архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики транспортных средств. Актуальность исследования обусловлена необходимостью повышения надёжности и безопасности эксплуатации современных транспортных систем в условиях цифровизации и внедрения киберфизических технологий.

В работе обоснован выбор спектрального анализа на основе быстрого преобразования Фурье в качестве базового метода обработки вибрационных сигналов. Показано, что применение FFT позволяет достоверно выделять доминирующие частотные компоненты, оценивать амплитудно-частотные характеристики вибрационного процесса и формировать информативные диагностические признаки, отражающие динамическое состояние механических узлов. Следует отметить, что метод быстрого преобразования Фурье предполагает квазистационарность анализируемого сигнала и может иметь ограничения при анализе резко изменяющихся режимов работы или нестационарных вибрационных процессов. В таких случаях для более точного анализа могут применяться временно-частотные методы обработки сигналов, включая вейвлет-анализ и методы огибающего анализа, позволяющие выявлять локальные изменения спектральных

характеристик во времени. В рамках настоящего исследования FFT используется как базовый инструмент спектрального анализа для формирования диагностических признаков, а применение более сложных методов анализа нестационарных сигналов рассматривается как направление дальнейших исследований.

Реализована экспериментальная схема регистрации вибраций с использованием многоканальных акселерометрических датчиков и выполнена цифровая обработка данных с расчётом интегральных и спектральных параметров.

На основе разработанной методики предложена концепция многоуровневой архитектуры интеллектуальной системы вибрационной диагностики, включающей сенсорный, аналитический и интеллектуальный уровни. Архитектура ориентирована на интеграцию методов спектральной обработки с алгоритмами машинного обучения и цифровыми платформами мониторинга, что обеспечивает переход от изолированного анализа сигналов к формированию систем обслуживания по состоянию и предиктивной диагностики. Предложенный подход соответствует современным тенденциям развития интеллектуальных транспортных систем и распределённых киберфизических диагностических комплексов.

Полученные результаты подтверждают возможность использования спектральных признаков вибрационных сигналов в качестве основы для построения интеллектуальных диагностических моделей. Разработанная методика и концептуальная архитектура создают фундамент для дальнейших исследований, направленных на верификацию интеллектуального уровня системы, оценку точности классификации технического состояния в условиях реальной эксплуатации и интеграцию диагностического модуля в цифровые платформы транспортных комплексов.

Таким образом, представленное исследование формирует методологическую и архитектурную основу для создания интеллектуальных систем вибрационной диагностики транспортных средств и может быть использовано при разработке распределённых систем мониторинга технического состояния в автомобилестроении и смежных областях машиностроения.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансировалось за счет гранта Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (номер гранта: BR31715767).

Вклад авторов.

Куатова Молдир – концепция исследования и архитектуры системы, написание статьи, интерпретация результатов, утверждение окончательного варианта статьи для публикации, ответственность за целостность и достоверность данных;

Кумархан Ораз – сбор данных, проведение экспериментальных работ, интерпретация результатов;

Акпанбетов Дархан Берикович – сбор данных, анализ результатов, написание отдельных разделов статьи;

Абекова Айдана – сбор данных, интерпретация результатов.

Список литературы

1. Randall R. B. Vibration-based condition monitoring: Industrial, automotive and aerospace applications. Chichester: Wiley, 2011. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119961260> - книга
2. Калинов А. П. Анализ методов вибродиагностики электрических машин // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений. 2012. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigateley>-книга
3. Huang N. E. et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis // Proceedings of the Royal Society A. 1998. Vol. 454. P. 903–995. DOI: 10.1098/rspa.1998.0193-журнал
4. Antoni J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals // Mechanical Systems and Signal Processing. 2006. Vol. 20, No. 2. P. 282–307. DOI: 10.1016/j.ymssp.2004.09.001- статья
5. Randall R. B. Applications of spectral kurtosis in machine diagnostics and prognostics // Key Engineering Materials. 2005. Vol. 293–294. P. 21–32. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.293-294.21-статья
6. Chen H., Li J.-m., Wang X.-B., Yu L.-Q., Yang Z.-X. Review of intelligent fault diagnosis for rotating machinery under imperfect data conditions // Expert Systems with Applications. 2025. Vol. 285. Article 127726. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127726>-статья
7. Randall R. B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics // Mechanical Systems and Signal Processing. 2017. Vol. 97. P. 3–19. DOI: 10.1016/j.ymssp.2016.12.026- статья
8. Lei Y. et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap // Mechanical Systems and Signal Processing. 2020. Vol. 138. Article 106587. DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106587- статья
9. Zhao R. et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring // Mechanical Systems and Signal Processing. 2019. Vol. 115. P. 213–237. DOI: 10.1016/j.ymssp.2018.05.050- статья
10. Nguyen V.-T., Diep Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation // PLOS ONE. 2025. Vol. 20, No. 7. Article e0324905. DOI: 10.1371/journal.pone.0324905- статья
11. Wang X. et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network // Measurement. 2021. Vol. 173. Article 108518. DOI: 10.1016/j.measurement.2020.108518- статья
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method // IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2018. Vol. 65, No. 7. P. 5990–5998. DOI: 10.1109/TIE.2017.2774777/ статья
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics – A comprehensive review // IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 104518–104538. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2972859- статья
14. Rajesh K., Parameshwaran A. B., Sridharan N. V., Vaithyanathan S. Vibration-based fault diagnosis of automotive suspension systems using voting-based ensemble learning. Results in Engineering, 2025, Vol. 28, 107635. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107635> -

статья

15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application // Journal of Sound and Vibration. 2025. Vol. 597, Part B. Article 118818. DOI: 10.1016/j.jsv.2024.118818- статья
16. Horváth K. Noise, vibration, and harshness (NVH) challenges in hydrogen internal combustion engine vehicles // Energy Science & Engineering. 2025. P. 1–14. DOI: 10.1002/ese3.70400- статья
17. Masri, J.; et al. A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness. Ain Shams Engineering Journal 2024, 15 (10): 102957. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102957> -
18. Ali Y., Tlija M., Shah S. W., Arif A., Siddiqi M. R. Intelligent condition monitoring of gear system at variable load and variable speed using vibration data // Advances in Mechanical Engineering. 2025. Vol. 17, No. 9. DOI: 10.1177/16878132251364692- статья
19. Kumar P., Shih G.-L., Yao C.-K., Hayle S. T., Manie Y. C., Peng P.-C. Intelligent vibration monitoring system for smart industry utilizing optical fiber sensor combined with machine learning // Electronics. 2023. Vol. 12. Article 4302. DOI: 10.3390/electronics12204302- статья
20. Shah, R.; Mittal, V.; Lotwin, M. Recent Advances in Vibration Analysis for Predictive Maintenance of Modern Automotive Powertrains. Vibration 2025, 8, 68. <https://doi.org/10.3390/vibration8040068> - статья

М.Ж. Куатова^{1,2}, О. Кумархан¹, Д.Б. Акпанбетов², А.Ж. Абекова^{1,3*}

¹ Академик Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан

² Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Алматы, Қазақстан

³ Satbayev University, Алматы, Қазақстан

Көлік құралдарының дірілдік диагностикасының зияткерлік жүйесінің архитектурасы және діріл сигналдарын талдау әдістемесі

Аңдатпа. Мақалада вибрациялық сигналдарды талдаудың әдістемесін әзірлеу мәселелері және көлік құралдарының вибрациялық диагностикасының зияткерлік жүйесінің архитектурасын құру қарастырылған. Зерттеудің өзектілігі – көлік жүйелерін пайдаланудың сенімділігі мен қауіпсіздігін арттыру қажеттілігінде, цифрландыру мен киберфизикалық технологияларды енгізу жағдайында. Негізгі әдіс ретінде Фурье тез түрлендіруіне (FFT) негізделген спектрлік талдау таңдалды, ол басты жиіліктік компоненттерді анықтауға және диагностикалық белгілерді қалыптастыруға мүмкіндік береді. Вибрациялық үдеулердің жазылуы үшін көпарнадағы акселерометрлер пайдаланыла отырып, эксперимент жүзеге асырылды және деректер цифрлық өңдеуден өткізіліп, интегралды және спектрлік параметрлер есептелді. Жасалған әдістемеге сүйене отырып, көп деңгейлі зияткерлік жүйе архитектурасының концепциясы ұсынылды, ол сенсорлық, аналитикалық және зияткерлік деңгейлерді қамтиды. Бұл тәсіл цифрлық мониторинг платформаларымен бірігу және күй бойынша қызмет көрсетуді жүзеге асыруға бағытталған, бұл диагностика тиімділігін және транспорт құралдарының жұмысқа қабілеттілігін арттырады. Ұсынылған архитектура масштабталатын және модульдік

болып табылады, әртүрлі көлік түрлеріне бейімделуге мүмкіндік береді. Бұл тәсіл қазіргі заманғы зияткерлік диагностика жүйелерін дамытуға негіз болуы мүмкін, ол ақауларды алдын алуға және көлік құралдарының жұмысқа дайындығын арттыруға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: дірілдік диагностика, жылдам Фурье түрлендіруі, техникалық жағдай мониторингі, киберфизикалық жүйелер, болжамдық диагностика.

M.Zh. Kuvatova^{1,2}, O. Kumarkhan¹, D.B. Akpanbetov², A.Zh. Abekova^{1,3*}

¹ *U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Kazakhstan*

² *International Engineering and Technological University, Almaty, Kazakhstan*

³ *Satbayev University, Almaty, Kazakhstan*

Architecture of an Intelligent Vibration Diagnostics System for Vehicles and Methodology for Vibration Signal Analysis

Abstract. The article addresses issues related to developing methods for analyzing vibration signals and forming the architecture of an intelligent vehicle vibration diagnostics system. The relevance of the research stems from the need to enhance the reliability and safety of transportation systems amid digitalization and the implementation of cyber-physical technologies. The primary processing method chosen is spectral analysis based on the fast Fourier transform, which enables the identification of dominant frequency components and the formation of diagnostic features. An experimental implementation of vibration acceleration recording was carried out using multi-channel accelerometer sensors, and digital data processing was performed to calculate integral and spectral parameters. Based on this methodology, a concept for a multi-level architecture of an intelligent system was proposed, including sensor, analytical, and intellectual levels. This approach integrates with digital monitoring platforms and implements condition-based maintenance, increasing diagnostic efficiency and improving vehicle reliability. The developed approach can serve as a basis for advancing modern intelligent diagnostic systems in the transportation industry, capable of effectively preventing failures and increasing vehicle operational readiness.

Keywords: vibration diagnostics, Fast Fourier Transform (FFT), technical condition monitoring, cyber-physical systems, predictive diagnostics.

References

1. Randall R.B. *Vibration-based Condition Monitoring: Industrial, Automotive and Aerospace Applications*. Chichester: Wiley, 2011. Dostup: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781119961260>
2. Kalinov A.P. *Analiz metodov vibrodiagnostiki elektricheskikh mashin*. Energetika. Izv. vyssh. ucheb. zavedenij, 2012. Dostup: <https://cyberleninka.ru/article/n/analiz-metodov-vibrodiagnostiki-asinhronnyh-dvigatelye> [in Russian]
3. Huang N.E.; et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis. *Proc. Royal Society A*, 1998, 454: 903–995. <https://doi.org/10.1098/rspa.1998.0193>

4. Antoni J. The spectral kurtosis: A useful tool for characterising non-stationary signals. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2006, 20(2): 282–307. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2004.09.001>
5. Randall R.B. Applications of Spectral Kurtosis in Machine Diagnostics and Prognostics. *KEM* 2005; 293–294: 21–32. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.293-294.21>
6. Chen H., Li J.-m., Wang X.-B., Yu L.-Q., Yang Z.-X. Review of intelligent fault diagnosis for rotating machinery under imperfect data conditions. *Expert Systems with Applications*, 2025. Vol. 285. Article 127726. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127726>
7. Randall R.B. A history of cepstrum analysis for machine diagnostics. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 97: 3–19. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2016.12.026>
8. Lei Y.; et al. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2020, 138: 106587. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587>
9. Zhao R.; et al. Deep learning and its applications to machine health monitoring. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, 115: 213–237. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2018.05.050>
10. Nguyen V.-T.; Diep Q. B. Vibration-based gearbox fault diagnosis using a multi-scale CNN with depth-wise feature concatenation. *PLOS ONE*, 2025, 20(7): e0324905. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0324905>
11. Wang X.; et al. Bearing fault diagnosis based on vibro-acoustic data fusion and 1D-CNN network. *Measurement*, 2021, 173: 108518. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2020.108518>
12. Wen L., Li X., Gao L., Zhang Y. A new convolutional neural network-based data-driven fault diagnosis method. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, Vol. 65(7): 5990–5998. <https://doi.org/10.1109/TIE.2017.2774777>
13. Zhang S., Zhang S., Wang B., Habetler T. G. Deep learning algorithms for bearing fault diagnostics - A comprehensive review. *IEEE Access*, 2021, Vol. 9: 104518–104538. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2972859>
14. Rajesh K., Parameshwaran A. B., Sridharan N., Vaithyanathan. Vibration-based fault diagnosis of automotive suspension systems using voting-based ensemble learning. *Results in Engineering*, 2025, Vol. 28: 107635. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107635>
15. Bi Z., Yu X., Huangfu Y., Yao J., Zhou P., He Q., Peng Z. Vibration source inversion-based fault diagnosis: Approach and application. *Journal of Sound and Vibration*, 2025, Vol. 597, Part B: 118818. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2024.118818>
16. Horváth K. Noise, Vibration, and Harshness (NVH) Challenges in Hydrogen Internal Combustion Engine Vehicles. *Energy Science & Engineering*, 2025. <https://doi.org/10.1002/ese3.70400>
17. Masri J.; et al. A survey of modern vehicle noise, vibration, and harshness. *Ain Shams Engineering Journal*, 2024, 15(10): 102957. <https://doi.org/10.1016/j.asej.2024.102957>
18. Ali Y, Tlija M, Shah SW, Arif A, Siddiqi MR. Intelligent condition monitoring of gear system at variable load and variable speed using vibration data. *Advances in Mechanical Engineering*, 2025; 17(9). <https://doi.org/10.1177/16878132251364692>
19. Kumar P.; Shih G.-L.; Yao C.-K.; Hayle S.T.; Manie Y.C.; Peng P.-C. Intelligent Vibration Monitoring System for Smart Industry Utilizing Optical Fiber Sensor Combined with Machine Learning. *Electronics*, 2023, 12(4302).

<https://doi.org/10.3390/electronics12204302>

20. Shah R.; Mittal V.; Lotwin M. Recent Advances in Vibration Analysis for Predictive Maintenance of Modern Automotive Powertrains. *Vibration*, 2025, 8(68). <https://doi.org/10.3390/vibration8040068>

Сведения об авторах :

Қуатова Мөлдір Жангелдіқызы — PhD, Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Әл-Фараби даңғылы, 89/21, Алматы, Қазақстан

Кумархан Ораз — Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университетінің 2-курс докторанты.

Ақпанбетов Дархан Берікович — техника ғылымдарының кандидаты, Халықаралық инженерлік-технологиялық университет, Әл-Фараби даңғылы, 89/21 (Әл-Фараби даңғылы, 93Г/5), Алматы, Қазақстан

Абекова Айдана Жумағалиевна — техника ғылымдарының магистрі, Satbayev университеті, ғылыми қызметкер, Ө.А. Жолдасбеков атындағы Механика және машинатану институты, Алматы, Қазақстан

Қуатова Молдир Жангелдиевна — PhD, Международный инженерно-технологический университет, проспект Аль-Фараби, 89/21, 050060, Алматы, Казахстан

Кумархан Ораз — докторант 2 курса Казахского национального университета имени аль-Фараби, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, проспект аль-Фараби, 71, Алматы, Казахстан

Ақпанбетов Дархан Берікович — к.т.н., Международный инженерно-технологический университет, проспект Аль-Фараби, 89/21 (проспект Аль-Фараби, 93Г/5), Алматы, Казахстан

Абекова Айдана Жумағалиевна — магистр технических наук, Satbayev University, научный сотрудник Институт механики и машиноведения имени У.А. Джолдасбекова, Алматы, Казахстан

Moldir Zhangeledikyzy Kumatova - PhD, International Engineering and Technological University. Address: 89/21 Al-Farabi Avenue, Almaty

Kumarkhan Oraz - PhD student, Al-Farabi Kazakh National University, 71 Al-Farabi Avenue, Almaty, Kazakhstan

Darkhan Berikovich Akpanbetov - Candidate of Technical Sciences, International Engineering and Technological University, 89/21 Al-Farabi Avenue (93G/5 Al-Farabi Avenue), Almaty, Republic of Kazakhstan

Abekova Aidana Zhumagalievna - Master of Technical Sciences, Satbayev University, Researcher at the U. Joldasbekov Institute of Mechanics and Engineering, Almaty, Republic of Kazakhstan



Copyright: © 2026 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)