

Макаров Данила Андреевич

Далматов Иван Иванович

Васин Виктор Владимирович

студенты 1 курса магистратуры, факультет техносферная

безопасность и экология

ФГБОУ ВО «Балтийский государственный технический университет

«ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф.Устинова»

ЦИФРОВЫЕ ДВОЙНИКИ В МАШИНОСТРОЕНИИ: ИНТЕГРАЦИЯ ВИБРОАКУСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ И ИИ ДЛЯ ОЦЕНКИ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА КОНСТРУКЦИЙ

Аннотация: В статье рассматривается концептуальная архитектура и методология применения цифровых двойников (Digital Twins) для предиктивной оценки остаточного ресурса (Remaining Useful Life, RUL) машиностроительных конструкций. Традиционные методы расчета на усталостную прочность обладают высокой погрешностью при эксплуатации оборудования в нестационарных режимах. Предлагается подход, основанный на синергии физического моделирования и методов искусственного интеллекта (ИИ), где ключевым индикатором деградации выступают виброакустические характеристики объекта. Рассмотрены алгоритмы обработки сигналов (сверточные и рекуррентные нейронные сети), а также перспективы применения физически-информированных нейросетей (PINN) для решения проблемы «черного ящика» в инженерных задачах.

Ключевые слова: цифровой двойник, виброакустика, искусственный интеллект, машинное обучение, остаточный ресурс (RUL), предиктивная

аналитика, усталостное разрушение, физически-информированные нейросети.

Abstract: The article discusses the conceptual architecture and methodology of using Digital Twins for predictive evaluation of the Remaining Useful Life (RUL) of machine-building structures. Traditional methods of calculating fatigue strength have a high error rate when operating equipment in non-stationary conditions. An approach based on the synergy of physical modeling and artificial intelligence (AI) methods is proposed, where the key indicator of degradation is the vibro-acoustic characteristics of an object. Signal processing algorithms (convolutional and recurrent neural networks) are considered, as well as the prospects for using physically informed neural networks (PINNS) to solve the "black box" problem in engineering tasks.

Keywords: digital twin, vibroacoustics, artificial intelligence, machine learning, residual resource (RUL), predictive analytics, fatigue failure, physically informed neural networks.

Введение

В условиях перехода к парадигме Индустрии 4.0 обеспечение надежности и безопасности эксплуатации сложного технологического оборудования требует отказа от традиционных стратегий обслуживания (реактивного или по жесткому регламенту) в пользу предиктивной аналитики. Внезапное усталостное разрушение несущих конструкций, роторных систем или элементов привода приводит не только к колоссальным экономическим потерям, но и к техногенным авариям.

Классические методы оценки прочности, основанные на гипотезе линейного суммирования повреждений (правило Майнера) и кривых усталости (кривые Велера), хорошо работают на этапе проектирования. Однако в реальных условиях эксплуатации на объект воздействует сложный спектр стохастических нагрузок. В связи с этим возникает

необходимость непрерывного мониторинга состояния (Structural Health Monitoring, SHM).

Ключевым диагностическим параметром, отражающим динамику износа, является виброакустический отклик конструкции. Появление микротрещин, изменение жесткости узлов или износ подшипников мгновенно отражаются в вибрационном спектре. Цель данной статьи — рассмотреть методологию создания цифровых двойников, которые с помощью искусственного интеллекта способны в режиме реального времени транслировать виброакустические данные в точную оценку остаточного ресурса (RUL) конструкции.

1. Виброакустический портрет как индикатор деградации прочности

С точки зрения механики деформируемого твердого тела, накопление усталостных повреждений ведет к локальному изменению тензора жесткости материала и увеличению внутреннего демпфирования. Физически это выражается в сдвиге собственных (резонансных) частот конструкции, появлении новых гармоник и изменении амплитудно-частотных характеристик (АЧХ).

Для мониторинга используются два основных типа сигналов:

1. Низкочастотные вибрации (до 10-20 кГц): фиксируются акселерометрами и позволяют выявлять макродефекты — дисбаланс, расцентровку, ослабление резьбовых соединений и развитие крупных трещин.
2. Акустическая эмиссия (АЭ) (от 20 кГц до нескольких МГц): высокочастотные упругие волны, возникающие в момент пластической деформации или зарождения микротрещины.

Главная проблема заключается в том, что полезный сигнал, свидетельствующий о начале разрушения, на ранних стадиях тонет в эксплуатационном шуме агрегата. Классический спектральный анализ (на

основе быстрого преобразования Фурье) часто оказывается бессилён перед нестационарными зашумленными сигналами. Именно здесь на первый план выходят методы машинного обучения.

2. Архитектура цифрового двойника для оценки RUL

Цифровой двойник в контексте оценки прочности — это не просто 3D-модель, а динамически обновляемая виртуальная копия физического объекта, связанная с ним двусторонним потоком данных. Архитектура такой системы включает три базовых уровня:

1. Физический уровень: Сам агрегат, оснащенный сетью пьезоэлектрических акселерометров, микрофонов и тензодатчиков. Здесь же располагаются системы Edge Computing (периферийные вычисления) для первичной фильтрации данных и их оцифровки.
2. Уровень интеграции данных: Облачная или локальная база данных, где происходит синхронизация телеметрии с историей режимов работы оборудования.
3. Виртуальный (аналитический) уровень: Ядро цифрового двойника. Здесь функционирует гибридная модель, объединяющая метод конечных элементов (МКЭ) и алгоритмы ИИ. МКЭ предоставляет базовое понимание напряженно-деформированного состояния (НДС), а ИИ корректирует модель на основе реальных виброакустических данных, вычисляя текущую степень деградации и прогнозируя RUL.

3. Искусственный интеллект: от сырых вибраций к прогнозу ресурса

Внедрение ИИ в анализ виброакустики кардинально изменило подход к извлечению признаков (Feature Extraction). Современные алгоритмы позволяют отказаться от ручного подбора диагностических маркеров.

Сверточные нейронные сети (CNN)

Сырой временной ряд вибраций с помощью оконного преобразования Фурье или вейвлет-преобразования переводится в 2D-формат —

спектрограмму или скалограмму. Для нейросети такое изображение становится аналогом фотографии. CNN эффективно выявляют скрытые паттерны в спектрограммах, классифицируя текущее состояние конструкции (например: «норма», «зарождение трещины», «критическое развитие дефекта»).

Рекуррентные сети и архитектура LSTM

Оценка остаточного ресурса — это классическая задача анализа временных рядов. Сети долгой краткосрочной памяти (Long Short-Term Memory, LSTM) способны «запоминать» историю изменения виброакустического фона на протяжении месяцев работы оборудования. Анализируя тренд изменения скрытых признаков, LSTM экстраполирует кривую деградации до пересечения с порогом предельного состояния, выдавая прогноз RUL в часах или циклах нагружения.

Физически-информированные нейросети (PINN)

Наиболее перспективное направление, решающее проблему недоверия инженеров к ИИ как к «черному ящику». В архитектуре PINN функция потерь (Loss function) включает в себя не только ошибку предсказания по данным, но и штрафы за нарушение физических законов (например, дифференциальных уравнений теории упругости или законов сохранения энергии). Это позволяет цифровому двойнику делать точные прогнозы даже при малом объеме обучающей выборки, что критически важно, так как данных о реальных разрушениях (Run-to-Failure data) в промышленности всегда не хватает.

3.1. Практическая реализация: Оценка остаточного ресурса подшипникового узла промышленного редуктора

Рассмотрим применение описанной архитектуры цифрового двойника на примере мониторинга главного подшипника тяжелонагруженного промышленного редуктора. Традиционно

усталостное выкрашивание (питтинг) тел качения или беговых дорожек приводит к внезапному заклиниванию механизма.

В рамках создания цифрового двойника физический объект был оснащен трехосевыми пьезоэлектрическими акселерометрами. Алгоритм работы системы выстроен следующим образом:

1.Предобработка: Сырой вибросигнал, содержащий сильный эксплуатационный шум, преобразуется с помощью непрерывного вейвлет-преобразования (CWT) в двумерные скалограммы. Это позволяет визуализировать нестационарные ударные импульсы, возникающие при прохождении тел качения через микродефекты.

2.Извлечение признаков: Сверточная нейронная сеть (CNN), интегрированная в виртуальную модель, анализирует скалограммы в режиме реального времени. Сеть обучена распознавать паттерны, соответствующие ранним стадиям зарождения трещин, игнорируя фоновые вибрации от соседних узлов.

3.Прогноз RUL: Извлеченные скрытые признаки передаются на вход рекуррентной сети (LSTM). Анализируя тренд изменения этих признаков за последние несколько недель работы, LSTM экстраполирует кривую деградации.

4.Обновление цифрового двойника: Полученные данные о степени повреждения подшипника автоматически корректируют граничные условия в конечно-элементной (МКЭ) модели цифрового двойника. Система пересчитывает текущую жесткость узла и выдает оператору прогноз: «Остаточный ресурс до достижения критического уровня вибрации (согласно ISO 10816) составляет 420 часов при сохранении текущего режима нагрузки».

Такой подход позволяет перейти от планово-предупредительного ремонта к обслуживанию по фактическому состоянию, исключая риск аварийной остановки.

4. Вызовы и ограничения

Несмотря на высокий потенциал, широкое внедрение интеллектуальных цифровых двойников сталкивается с рядом барьеров:

Проблема переноса домена (Domain Shift): Модель ИИ, обученная на виброакустических данных лабораторного стенда, часто показывает резкое падение точности при переносе на реальный цеховой объект из-за изменения акустической среды и граничных условий.

Высокая стоимость разметки данных: Для обучения supervised-моделей требуются огромные массивы данных, размеченных инженерами-экспертами.

Вычислительная сложность: Синхронизация тяжелых конечно-элементных моделей с потоковыми данными нейросетей в реальном времени требует колоссальных вычислительных мощностей.

Заключение

Интеграция виброакустических данных и методов искусственного интеллекта в структуру цифровых двойников открывает новую эру в управлении жизненным циклом машиностроительных конструкций. Вибрация и акустическая эмиссия, будучи прямыми следствиями изменения физико-механических свойств материалов, служат идеальным сырьем для алгоритмов глубокого обучения.

Переход от чисто математического (МКЭ) или чисто статистического моделирования к гибридным системам (с использованием PINN и LSTM) позволяет не просто констатировать факт наличия дефекта, но и с высокой точностью прогнозировать траекторию дальнейшего усталостного разрушения. В ближайшем будущем фокус исследований сместится в сторону разработки методов трансферного обучения (Transfer Learning) для адаптации цифровых двойников к работе в условиях сильных промышленных помех и дефицита данных о поломках.

Список литературы:

1. Машиностроение: ключевые тренды 2024 года / И.С. Лола (рук. авт. кол.), Д.Г. Асосков, А.Д. Рахимова, Н.А. Усов; Нац. исслед. ун-т «Высшая школа экономики». М.: НИУ ВШЭ, 2025. 23 с.
2. Царев М.В., Андреев Ю.С. Цифровые двойники в промышленности: История развития, классификация, технологии, сценарии использования. [https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye -dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya?ysclid=mafe8flcm11274476](https://cyberleninka.ru/article/n/tsifrovye-dvoyniki-v-promyshlennosti-istoriya-razvitiya-klassifikatsiya-tehnologii-stsenarii-ispolzovaniya?ysclid=mafe8flcm11274476).
3. Жарасов Б.С., Абрамов В.И. Цифровые двойники в управлении производством: принципы создания, проблемы внедрения и перспективы развития // Современная экономика: проблемы и решения. 2024. № 6.
4. Иванов А.А. Автоматизация технологических процессов. – М.: Форум, 2022.