



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 16 ноября 2020 года

В выпуске рубрики «Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования» специалисты ООО «БО-Энерго» подготовили обзор актуальных публикаций, которые касаются инновационных разработок и новых технологий в области мониторинга и диагностики электрооборудования. В данном выпуске даны обзоры статей и докладов на следующие темы:

1. [Определение дефектов крепления датчиков вибрации](#)
2. [Система контроля появления трещин во вращающихся машинах](#)
3. [Система мониторинга солнечных панелей при помощи радиометрических и термографических измерений](#)
4. [Повышение качества вибромониторинга РПН при помощи измерения разрядной активности](#)
5. [Мониторинг состояния ветряной турбины по данным вибрации и вырабатываемой мощности](#)
6. [Способ оптимизации затрат на обслуживание оборудование при помощи кластерного анализа записей журнала обслуживания](#)
7. [Способ определения происходящих одновременно коротких замыканий в магистральных сетях при помощи системы волнового ОМП](#)
8. [Применение распределённого оптического датчика для контроля состояния подводных кабелей](#)
9. [Контроль состояния подшипников качения при помощи оптоволоконного датчика](#)
10. [Оценка состояния элегазового выключателя методами машинного обучения](#)
11. [Перспективы перехода к полностью автоматическому определению наличия ЧР в электрооборудовании](#)

Подписывайтесь также на наш [Телеграм](#) или [Твиттер](#) или используйте [электронную почту](#) для связи.

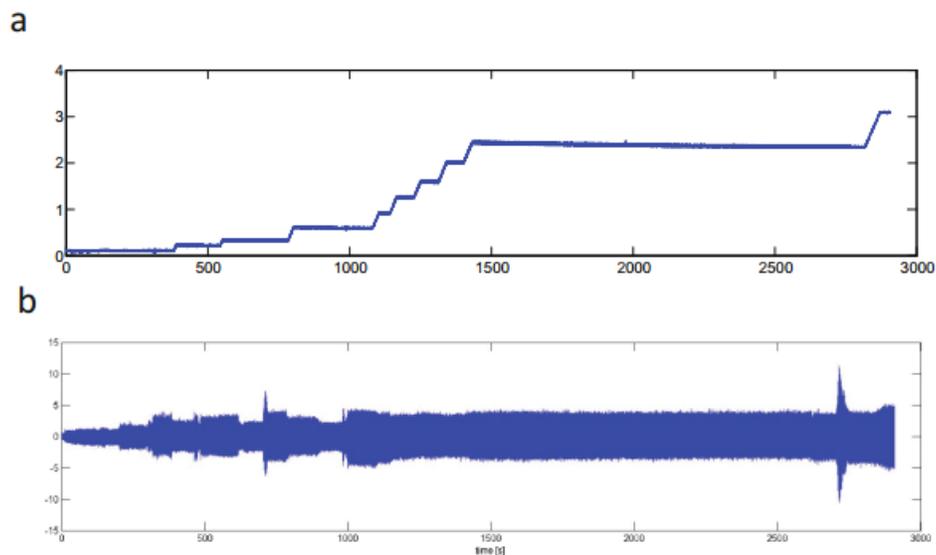
Определение дефектов крепления датчиков вибрации

Источник: D. Abboud, M. Elbadaoui, S. Becquerelle, M. Lalmi *Detection of Sensor Detachment in Aircraft Engines Using Vibration Signals, International Conference on Rotor Dynamics IFToMM 2018: Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM pp 351-365*

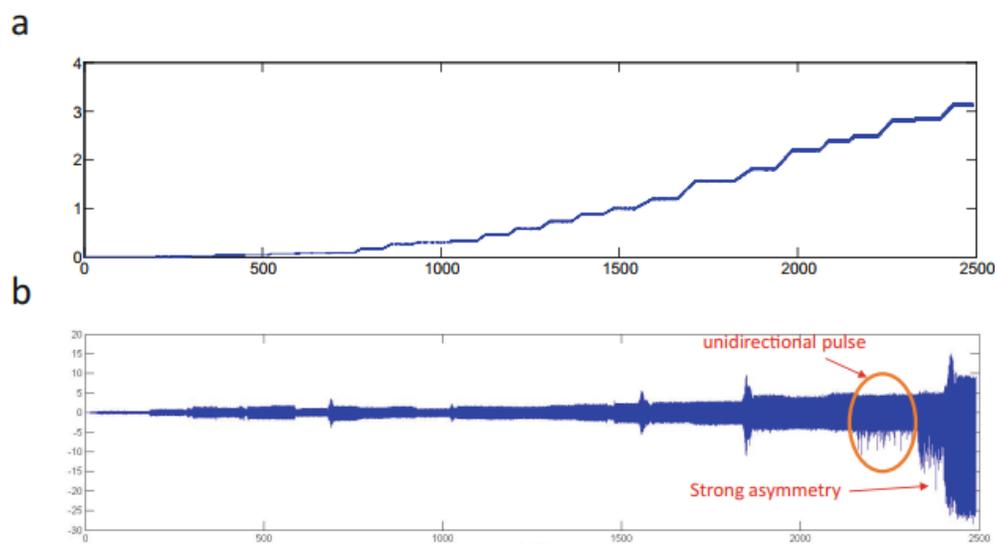
https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99268-6_25

В 2018 году на International Conference on Rotor Dynamics группа специалистов компании Safran Transmission Systems представила доклад о методе определения дефектов крепления датчиков вибрации. Такие дефекты могут приводить к искажению регистрируемого уровня вибрации и неверным результатам диагностики контролируемого оборудования. Проблема рассматривалась в первую очередь применительно к контролю вибрации в летательных аппаратах, где электрооборудование работает в условиях перегрузок, высокой вибрации и низкого давления.

Для исследования проблемы авторы рассмотрели сигналы вибрации, записанными датчиками летательного аппарата при разгоне. В одном случае сигнал записывался датчиком, не имеющим проблем с креплением. Во втором случае использовался датчик, крепление которого было ослаблено. Нормализованные значения мощности аппарата и вибрации показаны на изображениях ниже.



Мощность аппарата и вибрация, записываемая датчиком без дефекта крепления

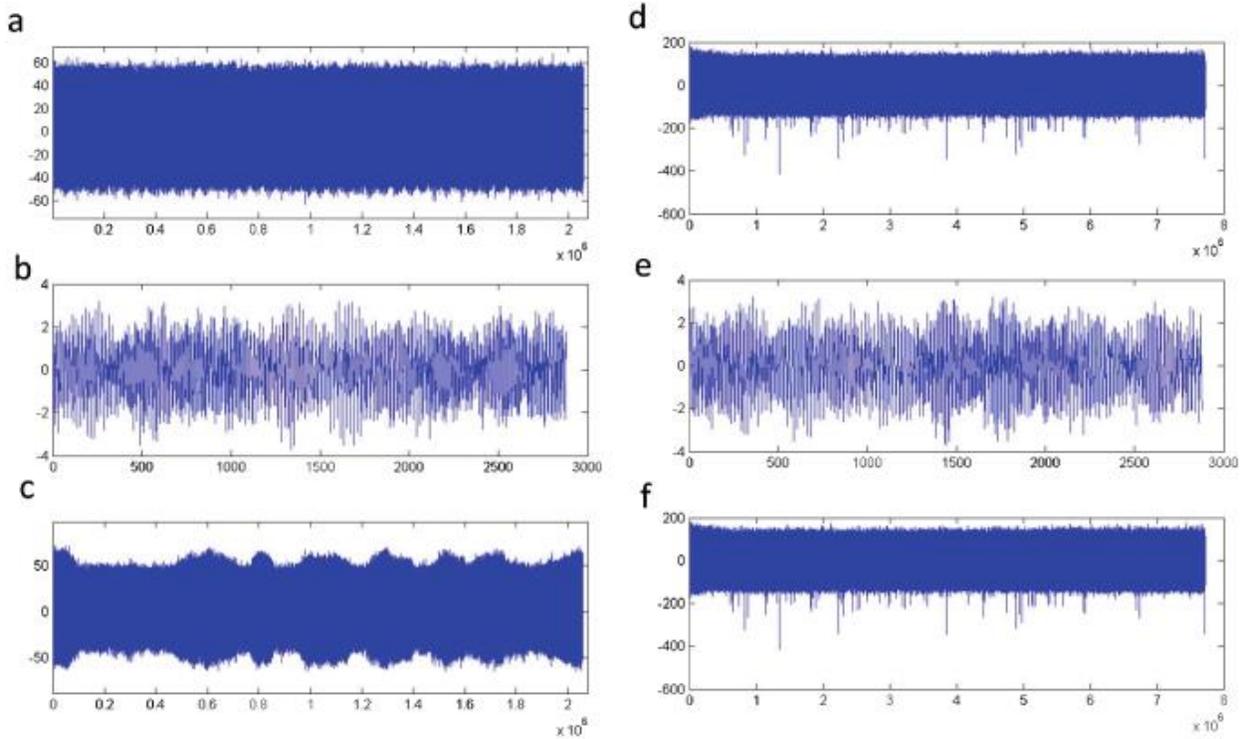


Мощность аппарата и вибрация, записываемая датчиком с ослабленным креплением

В данных, записанных датчиком с дефектом крепления, наблюдается явная асимметрия сигнала, которая увеличивается с разгоном аппарата. Это объясняется «отскоком» датчика в одном направлении от поверхности. Асимметрия сигнала приведёт к искажению спектра и неверным диагностическим выводам о состоянии агрегата.

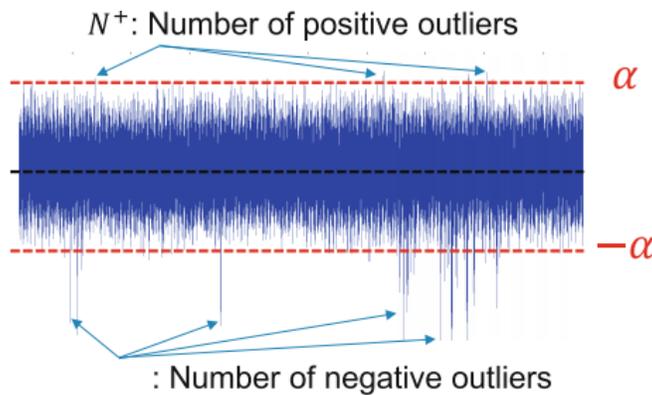
Суть метода контроля дефектов крепления датчиков, предложенного авторами статьи, заключается в разложении сигнала на детерминистическую и случайную часть. Детерминистическая часть показывает развитие уровня сигнала и определяется такими методами, как сглаживание со скользящей средней. Случайная часть отражает случайные воздействия на сигнал и определяется как разность между оригинальным сигналом и детерминистической частью. Наличие асимметрии в случайной части сигнала будет указывать на проблемы с креплением.

Результаты определения детерминистической и случайной частей в записанных сигналах показаны на изображении ниже.



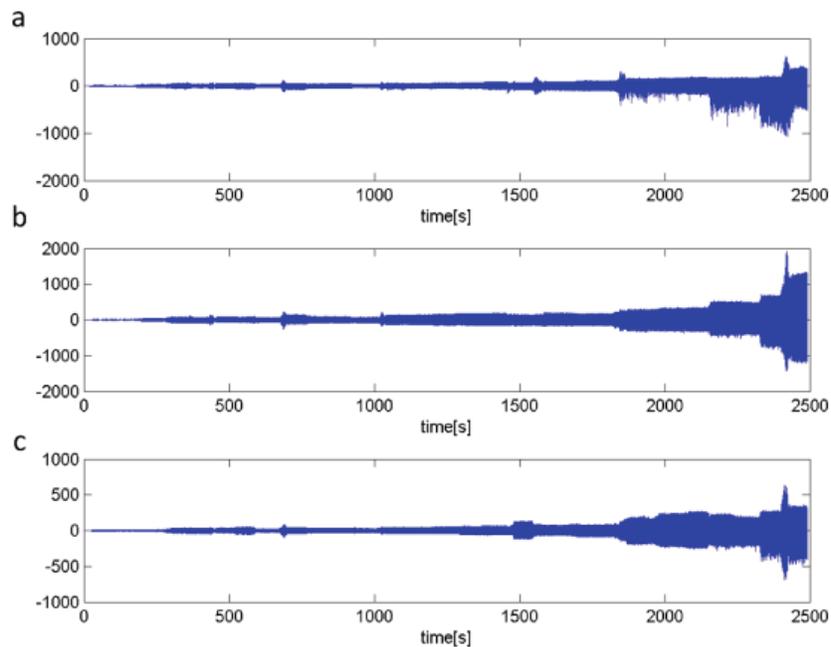
Оригинальный сигнал, детерминистическая и случайная части: a, b, c – записанные датчиком без дефекта крепления, c, d, e – записанные датчиком с дефектом крепления

Для повышения надёжности метода авторы статьи разработали отдельные математические методы обработки сигнала. Для определения детерминистической части использовалась кепстр-обработка, для определения асимметрии в случайной части сигнала рассчитывалось количество раз, когда значение случайной части выходило за определённые границы. По соотношению переходов границ сверху и снизу от центральной линии определялась асимметрия случайной части. Поясняющее изображение показано ниже.

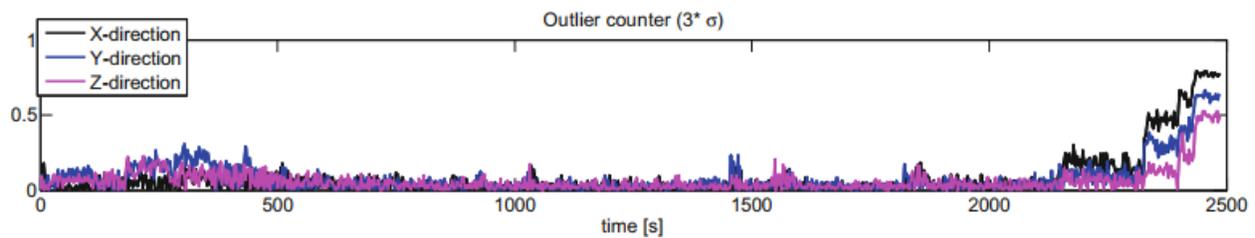


Принцип определения асимметрии

Дальнейшие испытания метода показали его применимость для решаемой задачи. Результаты одного из испытаний показаны на изображении ниже.



Данные вибрации по трём осям, записанные при одном из испытаний с использованием плохо закреплённого датчика при разгоне аппарата



Развитие коэффициентов асимметрии по трём осям

Из графика развития коэффициента асимметрии видно, что рост коэффициента корректно указывает на проблемы с креплением датчика.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



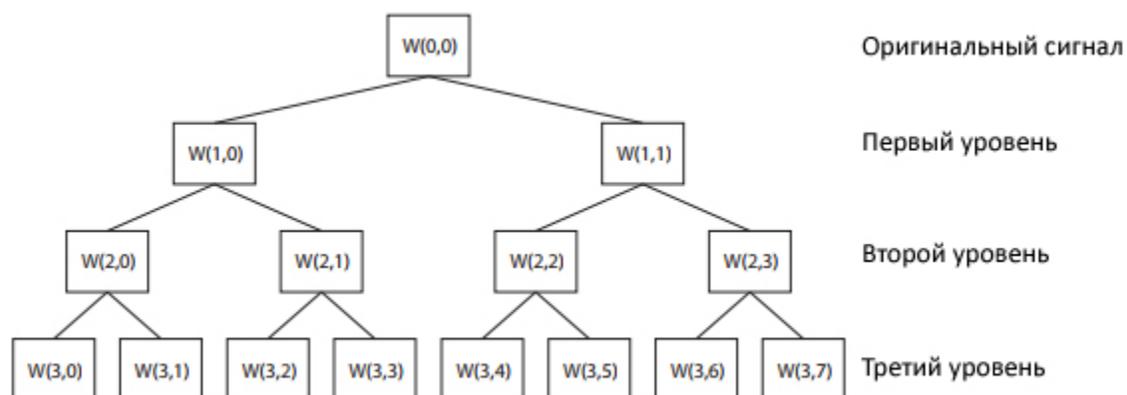
Система контроля появления трещин во вращающихся машинах

Источник: M.J. Gómez, C. Castejón, J.C. García-Prada, *Automatic condition monitoring system for crack detection in rotating machinery, Reliability Engineering & System Safety, Volume 152, 2016, Pages 239-247, ISSN 0951-8320*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832016300035>

Исследователи из Университета Карлоса III в Мадриде разработали способ контроля появления трещин в валах вращающихся машин на основе данных вибрации. Соответствующая статья была опубликована в издании *Reliability Engineering and System Safety* в апреле 2016 года.

Суть метода состоит в идентификации характеристик сигнала виброускорения, определяющих состояние машины, и применения искусственной нейронной сети для определения степени развития трещины. Ключевые характеристики определялись при помощи разложения по вейвлет-пакетам (WPT). Этот метод последовательно применяет к вейвлет-преобразование к сигналу, который проходит фильтры высоких и низких частот. Чем выше уровень разложения, тем большее число раз к сигналу будут применены фильтры и тем больше характеристик сигнала (пакетов) получается в результате преобразования. С повышением уровня разложения также растёт вычислительная сложность алгоритма. Поясняющая схема разложения сигнала показана на изображении ниже.



Поясняющая схема WPT-преобразования. Показаны получаемые характеристики сигнала (пакеты) на каждом уровне преобразования

Применяемая для идентификации состояния вала нейронная сеть была сетью прямого распространения с числом слоёв не менее 3.

В рамках исследования решалась задача оптимизации уровня WPT-разложения и числа слоёв нейронной сети, при которых точность определения степени развития трещины была наилучшей.

Для проверки алгоритма использовалась установка, показанная на изображении ниже.



Испытательная установка

В установке использовался двигатель мощностью 0.75 кВт и максимальной скоростью вращения 10 000 об/мин, который вращал вал, установленный на двух шарикоподшипниках. Нагрузкой вала служил его собственный вес. Скорость вращения двигателя задавалась регулятором. Данные вибрации снимались акселерометром в вертикальном направлении. Акселерометр был закреплён на корпусе одного из подшипников.

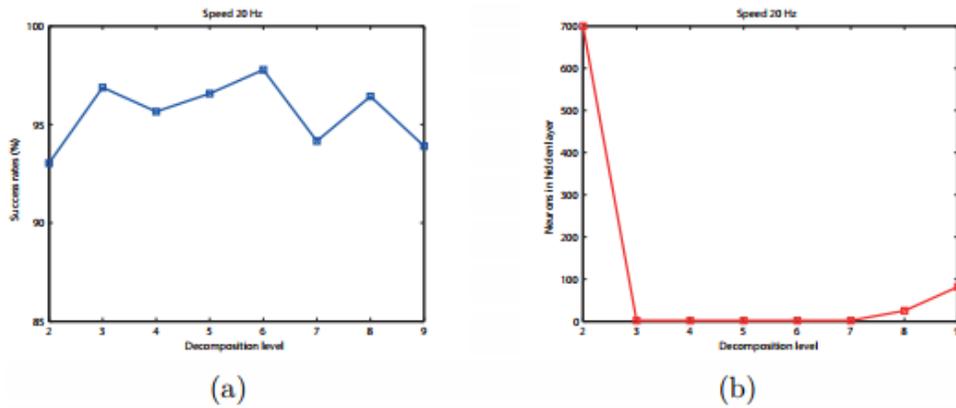
Для создания дефекта в вале выполнялся выпил. Глубина выпила менялась в 10 шагов от 0% до 50% диаметра вала. Изображение выпила в вале показано ниже.



Выпил в вале

Испытания для каждой глубины выпила проводились при частотах вращения 20, 40 и 60 Гц. Полученные данные разбивались на набор для обучения метода и набор для проверки точности метода.

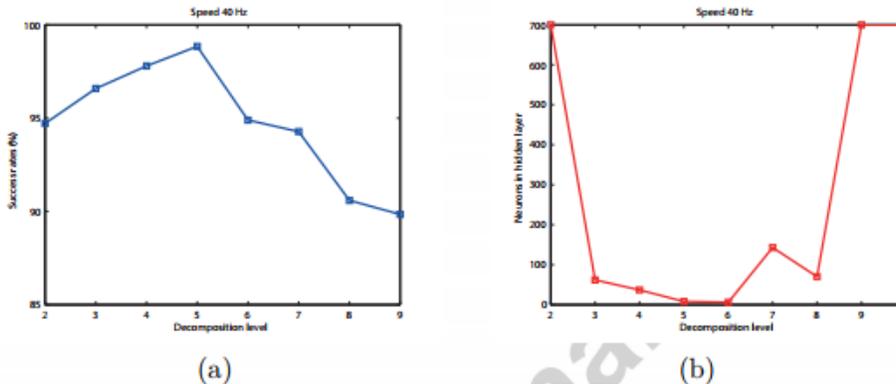
Результаты для частоты вращения 20 Гц показаны на графике ниже.



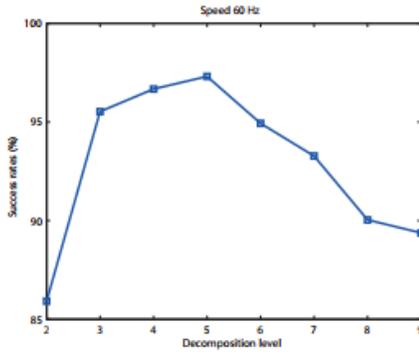
Результаты для частоты 20 Гц: а) зависимость точности метода от уровня разложения в WPT-преобразовании, б) зависимость числа слоёв нейронной сети от уровня разложения в WPT-преобразовании

Из результатов видно, что при уровне разложения 2 алгоритм показал наихудшие результаты, поскольку архитектура нейронной сети содержала максимальное число слоёв (700). Результаты при других уровнях разложения были примерно одинаковы.

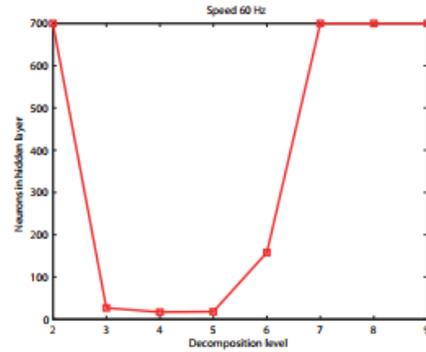
Результаты для частот вращения 40 и 60 Гц показаны на графиках ниже. В обоих случаях оптимальная производительность достигается при уровне разложения 5 с более высокой точностью при 60 Гц.



Результаты для частоты 40 Гц



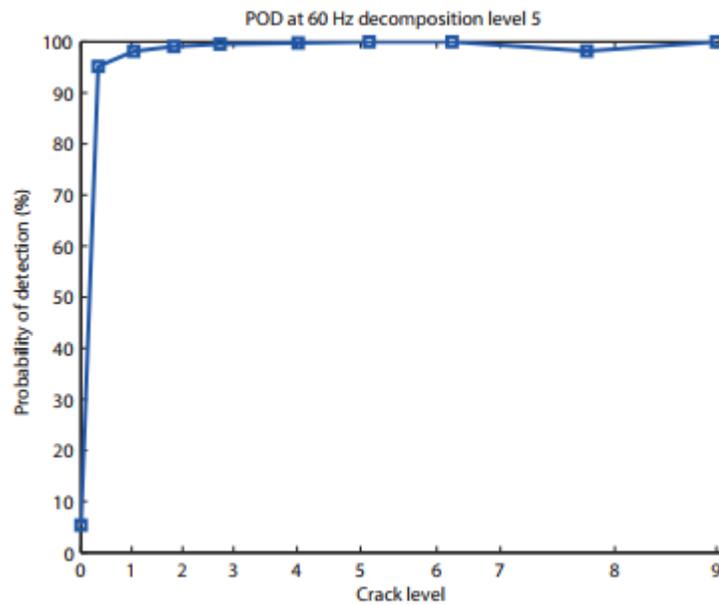
(a)



(b)

Результаты для частоты 60 Гц

Результаты дальнейших испытаний зависимости точности метода от степени развития трещины показали общую применимость метода. Результаты определения также были выше на скорости вращения 60 Гц по сравнению с двумя другими скоростями. Пример результатов одного из испытаний показан на изображении ниже.



Зависимость точности определения от степени развития трещины для испытаний при 60 Гц и 5 уровнях разложения

В заключении исследования указывается, что в качестве перспективного направления развития метода рассматривается применения разных уровней разложения сигнала для повышения точности определения и снижения требуемой вычислительной мощности.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



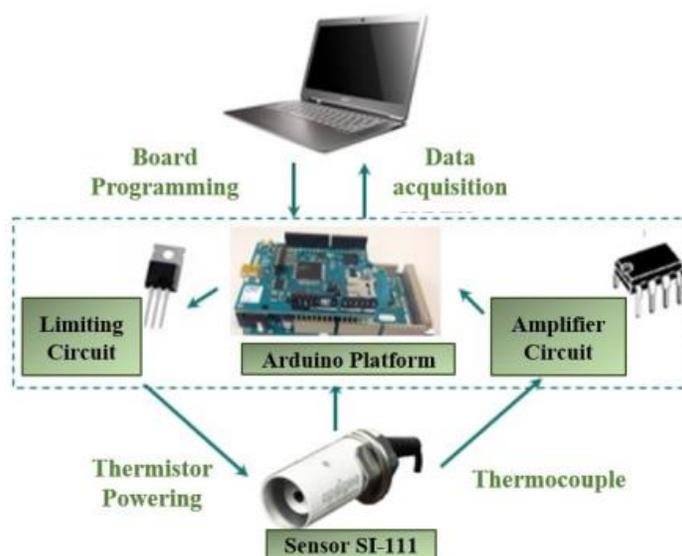
Система мониторинга солнечных панелей при помощи радиометрических и термографических измерений

Источник: Fausto Pedro García Márquez, Isaac Segovia Ramírez, *Condition monitoring system for solar power plants with radiometric and thermographic sensors embedded in unmanned aerial vehicles*, *Measurement*, Volume 139, 2019, Pages 152-162, ISSN 0263-2241

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224119301630>

Эффективность работы солнечных панелей во многом определяется условиями окружающей среды, в которой панели работают. Группа исследователей из Университета Кастилия-Ла-Манча в Испании разработали систему мониторинга степени загрязнения поверхности солнечных панелей, в которой используются радиометрические и термографические измерения, выполняемые с беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Соответствующая статья была опубликована в издании *Measurement* в июне 2019 года.

Основным элементом системы являлся БПЛА типа DJI S900, на котором закреплялся радиометрический датчик типа SI-111, фиксирующий уровень инфракрасного излучения поверхности панели. Чем сильнее загрязнена панель, тем ниже температура её поверхности и тем ниже уровень излучения. Данные датчика обрабатывались одноплатным компьютером Arduino, после чего передавались на сервер системы по каналу WiFi. Схематичное изображение элементов системы и связей между ними показано на изображении ниже.



Элементы системы

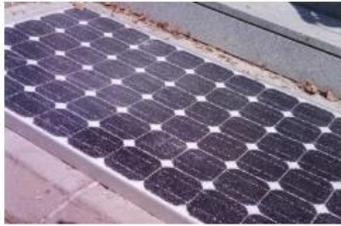
На БПЛА также устанавливалась термокамера типа Workswell WIRIS, ведущая запись в инфракрасной и видимой частях спектра. Данные, регистрируемые термокамерой использовались для верификации данных, регистрируемых радиометрическим датчиком.

В испытаниях использовалась солнечная панель Trina Solar TSM-170D, показанная на изображении ниже.

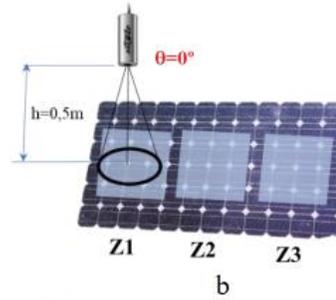


Солнечная панель, используемая в испытаниях

Поверхность панели была условно разбита на три зоны. Для испытаний системы использовались несколько сценариев с разной степенью загрязнённости разных зон и разными углами между поверхностью панели и направлением на БПЛА. Примеры нескольких испытательных сценариев показаны на изображении ниже.



a

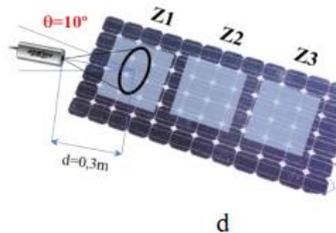


b

Scenario 1.1



c

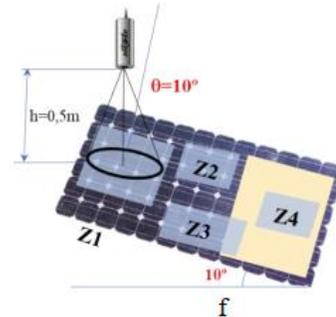


d

Scenario 1.2



e



f

Scenario 1.3

Примеры испытательных сценариев

Испытания показали стабильные значения температуры незагрязнённых участков поверхности в разных сценариях. Температура загрязнённых участков была ниже уровня температуры незагрязнённых на несколько градусов. Такие снижения температуры успешно фиксировались системой и указывали на участки панелей, работающих с пониженной производительностью.

Отдельной особенностью разработанного метода контроля являлось использование некалиброванного радиометрического датчика. Сравнение результатов замера температуры поверхности при помощи датчика и термокамеры показало расхождение до 10% измеренных ими температур. Однако, как подчёркивается в статье, в основе метода лежал контроль относительного изменения температуры по поверхности, что позволило не предъявлять к датчику требования высокой точности измерения.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



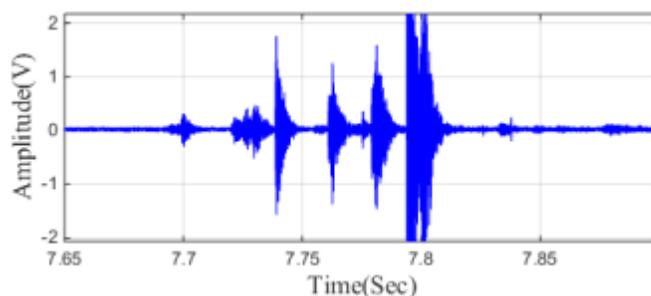
Повышение качества вибромониторинга РПН при помощи измерения разрядной активности

Источник: J. Seo, H. Ma and T. K. Saha, "A Joint Vibration and Arcing Measurement System for Online Condition Monitoring of Onload Tap Changer of the Power Transformer," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 32, no. 2, pp. 1031-1038, April 2017, doi: 10.1109/TPWRD.2016.2531186.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/7410100>

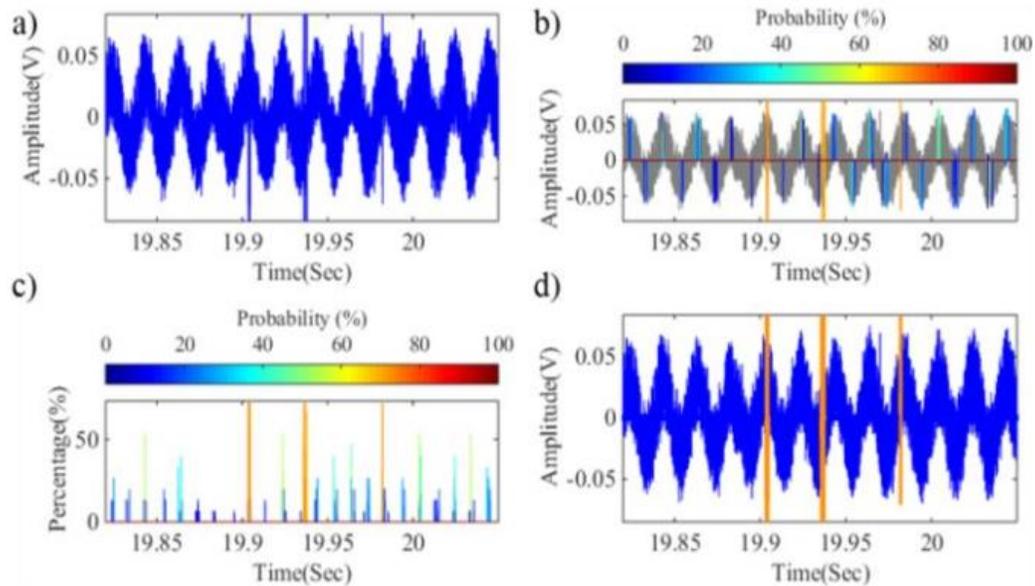
Группа исследователей из Университета Квинсленда в Австралии рассмотрела вопрос повышения качества вибромониторинга РПН силовых трансформаторов за счёт выделения и учёта компонентов вибрации, вызванных переключениями контактов РПН и не связанных напрямую с состоянием РПН. Соответствующая статья была опубликована в *IEEE Transactions on Power Delivery* в феврале 2016 года.

Контроль состояния РПН по вибрации применяется на некоторых предприятиях Австралии, Канады и европейских стран. Сравнивая уровни вибрации при разных положениях РПН можно проводить оценку его состояния. Однако при переключении РПН создаётся дополнительная вибрация, которая может затруднить интерпретацию. Пример одной из осциллограмм, содержащей одновременно данные вибрации от переключения и данные, характеризующие собственное состояние РПН, показан на изображении ниже.



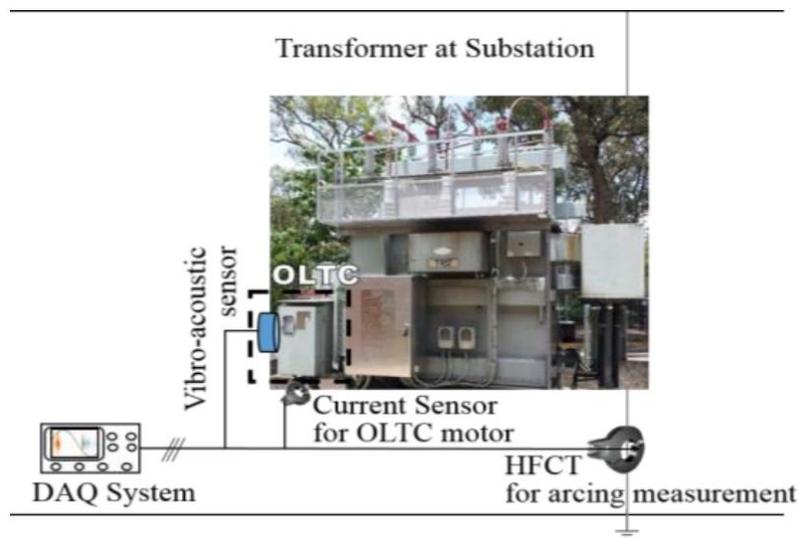
Пример вибрации РПН

В предложенном исследователями подходе данные о переключениях РПН регистрируются по создаваемой при этом разрядной активности, которая фиксируется при помощи высокочастотного трансформатора тока (ВЧТТ), устанавливаемого на заземление трансформатора. При этом отдельную сложность представляет обработка сигнала ВЧТТ, который будет зашумлён. Для очистки сигнала применялось вейвлет-преобразование с выделением из сигнала коэффициентов, по значениям которых можно принимать решение о наличии в оригинальном сигнале компонентов, вызванных разрядной активностью при переключениях. Пример разложения показан на изображении ниже.



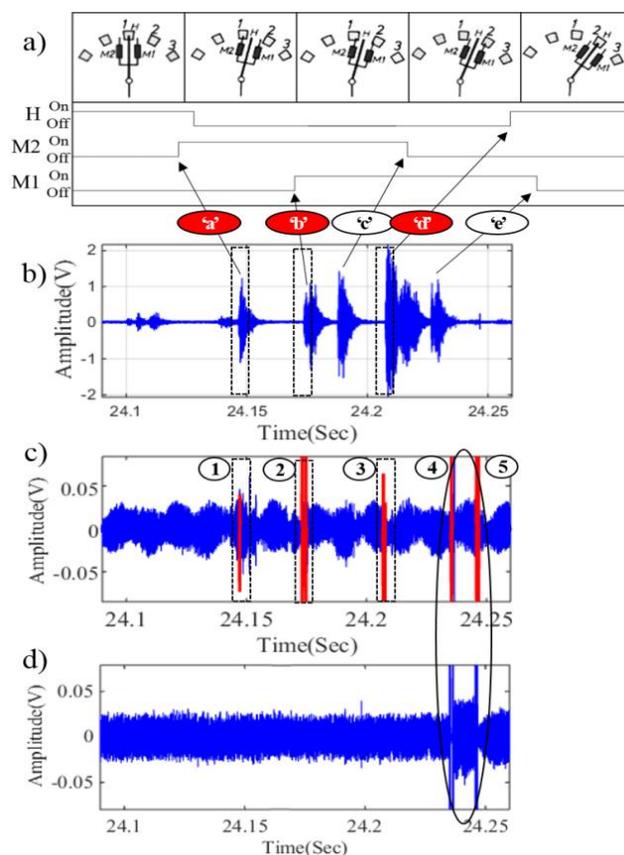
Пример разложения сигнала а) оригинальный сигнал ВЧТТ, б) выделенные из сигнала отдельные события с вероятностью их принадлежности к категории «Переключение» с наложением на оригинальный сигнал, в) то же, но без наложения на оригинальный сигнал, г) события, определённые как переключения среди выделенных событий

Изображение смонтированной системы показано ниже.



Смонтированная система

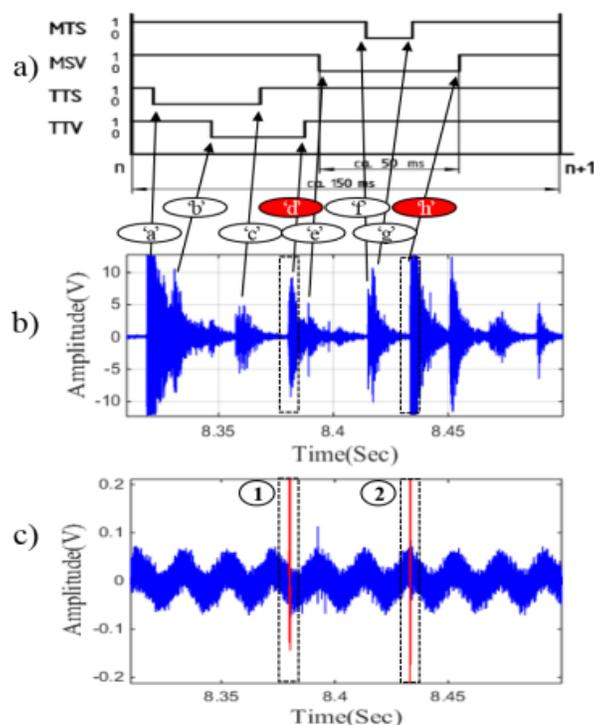
Испытания проводились на двух трансформаторах с РПН разных типов. Диаграммы переключения РПН и записанные сигналы на первом трансформаторе показаны на изображении ниже.



Данные первого трансформатора: а) диаграмма переключений РПН, б) измеренная вибрация, в) вибрация с выделенными моментами переключений, д) ток привода РПН

По полученным данным видно, что сигнал ВЧТТ был зашумлён и задача выделения моментов переключения прямым анализом осциллограммы представляла сложность. При помощи вейвлет-преобразования такие моменты были успешно идентифицированы. На осциллограмме с также видны импульсы 4 и 5, вызванные силовой электроникой при остановке привода РПН. Те же импульсы видны и на осциллограмме тока привода РПН.

Данные, записанные на втором трансформаторе, показаны на изображении ниже.



Данные второго трансформатора: а) диаграмма переключений РПН, б) измеренная вибрация, в) сигнал ВЧТТ с моментами переключений

Как указывается в заключении исследования, одновременная интерпретация разрядной активности и вибрации позволит улучшить качество мониторинга и диагностики РПН, поскольку при таком подходе будет возможно анализировать вибрацию, присущую режиму работы РПН без искажений, вызванных дополнительными вибрациями от переключений.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Модель диагностики и оценки остаточного ресурса оборудования с несколькими дефектами

Источник: Ruihua Jiao, Kaixiang Peng, Jie Dong, Chuanfang Zhang, *Fault monitoring and remaining useful life prediction framework for multiple fault modes in prognostics, Reliability Engineering & System Safety, Volume 203, 2020, 107028, ISSN 0951-8320*

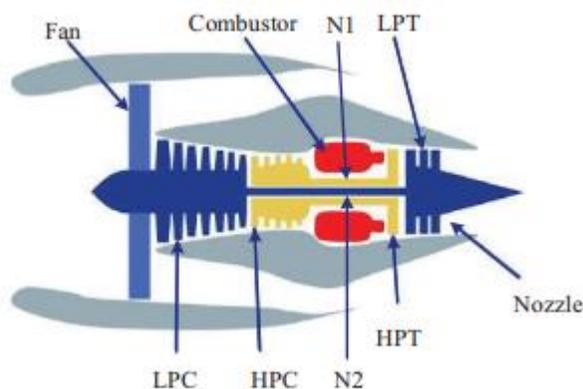
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832020305299>

Группа исследователей из Пекинского университета науки и технологий предложила модель диагностики и оценки остаточного ресурса оборудования, имеющего несколько развивающихся дефектов. Соответствующая статья вышла в ноябрьском номере издания Reliability Engineering & System Safety.

В модели применяется несколько методов машинного обучения:

1. Выделение набора диагностических признаков из массива измеренных датчиками характеристик оборудования выполняется при помощи нейронной сети, минимизирующей отклонения измеренных характеристик от среднего значения всех характеристик в Римановском пространстве, размерность которого совпадает с количеством характеристик.
2. Определение дефекта выполняется в пространстве выделенных диагностических признаков при помощи метода опорных векторов, который разделяет кластеры признаков, характеризующих каждый вид дефекта.
3. Для определения прогноза развития ресурса применяется Байесовское обучение: оценивается вероятность развития текущего состояния в пространстве признаков в состояние на следующем шаге. Каждый шаг алгоритма соответствует фиксированному отрезку времени, длительность которого определяется дискретностью данных.
4. Для определения момента наступления дефекта используется адаптивный алгоритм, в котором используется набор расстояния от свойств текущего состояния до набора свойств, характеризующих каждый тип дефекта. Используя настраиваемую величину порога и контролируя, какое количество свойств каждого типа дефекта находятся близко (ниже порога) к текущему состоянию, можно делать вывод о наступлении дефекта.

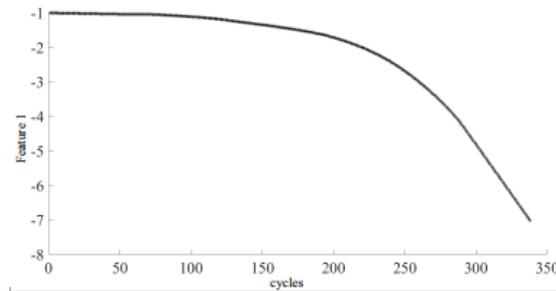
Для проверки метода использовалась разработанная NASA модель турбореактивного двигателя, схематично показанного на изображении ниже.



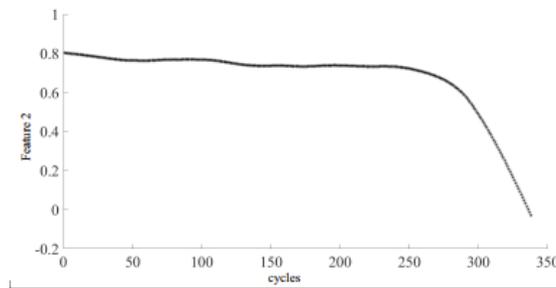
Модель турбореактивного двигателя

Моделирование работы двигателя выполнялось с начальными уровнями механического износа и вибрации. Были сгенерированы несколько наборов данных, в которых состояние двигателя характеризовалось набором из 14 измерений. Все наборы данных заканчивались до наступления поломки. Время до поломки фиксировалось для проверки точности метода.

Примеры полученных при помощи нейронной сети диагностических свойств показаны на изображении ниже. Величины обоих свойств резко падают к концу набора данных, когда состояние двигателя приблизилось к дефектному.



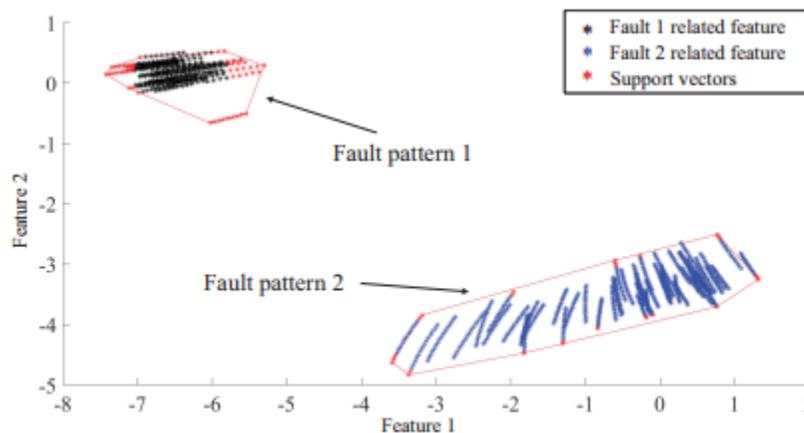
(a) The extracted feature 1.



(b) The extracted feature 2.

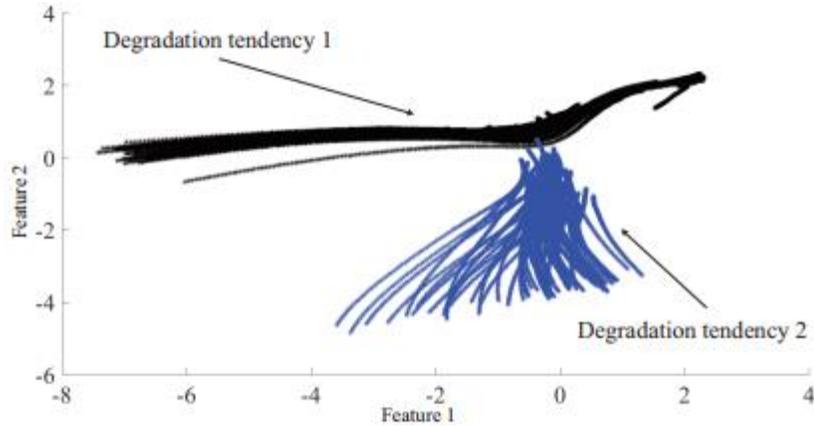
Примеры выделенных диагностических свойств

Пример пространства диагностических свойств показан на изображении ниже. Дополнительно показаны границы дефектов, найденные при помощи метода опорных векторов.



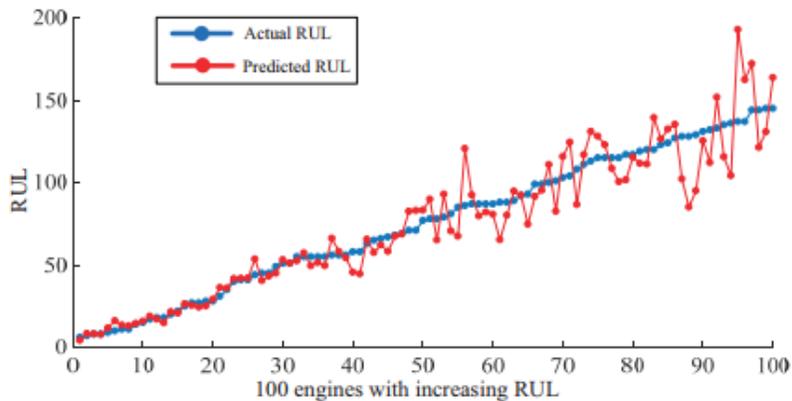
Пространство диагностических свойств

Пример отображения развития двух дефектов в пространстве свойств показан на изображении ниже. Видно развитие состояний двигателя к двум кластерам, соответствующим дефектам.



Пример развития двух дефектов

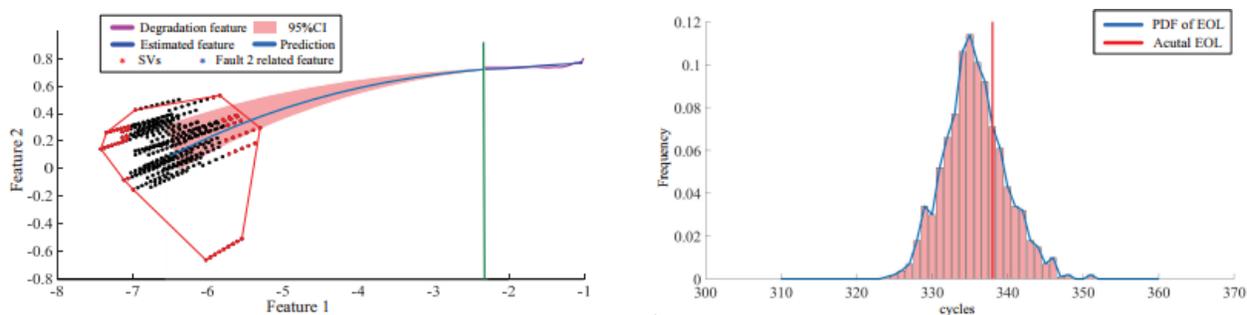
График, показывающий оценку точности определения остаточного ресурса двигателя, показан ниже. Синий график соответствует фактически измеренному времени до поломки, красный – рассчитанному. По горизонтальной оси отложены индексы двигателей, по вертикальной – время. Индексы двигателей отсортированы в порядке возрастания ресурса.



Оценка точности алгоритма

По графику видно увеличение погрешности определения остаточного ресурса при большом значении фактически оставшегося ресурса, что может объясняться недостаточностью данных для достоверного прогнозирования в начале жизни двигателя.

Пример рассчитанной траектории развития состояния двигателя в пространстве признаков показан на изображении ниже. Дополнительно показано сравнение плотности распределения вероятности наступления поломки оборудования через заданное количество времени и фактического времени до поломки.



Пример рассчитанной траектории развития состояния двигателя и плотность вероятности наступления дефекта

Как указано в заключении, метод показал хорошие результаты в определении остаточного ресурса. Для описания развития состояния оборудования использовалось Байесовское обучение, но вместо него можно использовать любой другой набор математических уравнений, что делает метод применимым к широкому диапазону типов промышленного оборудования.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



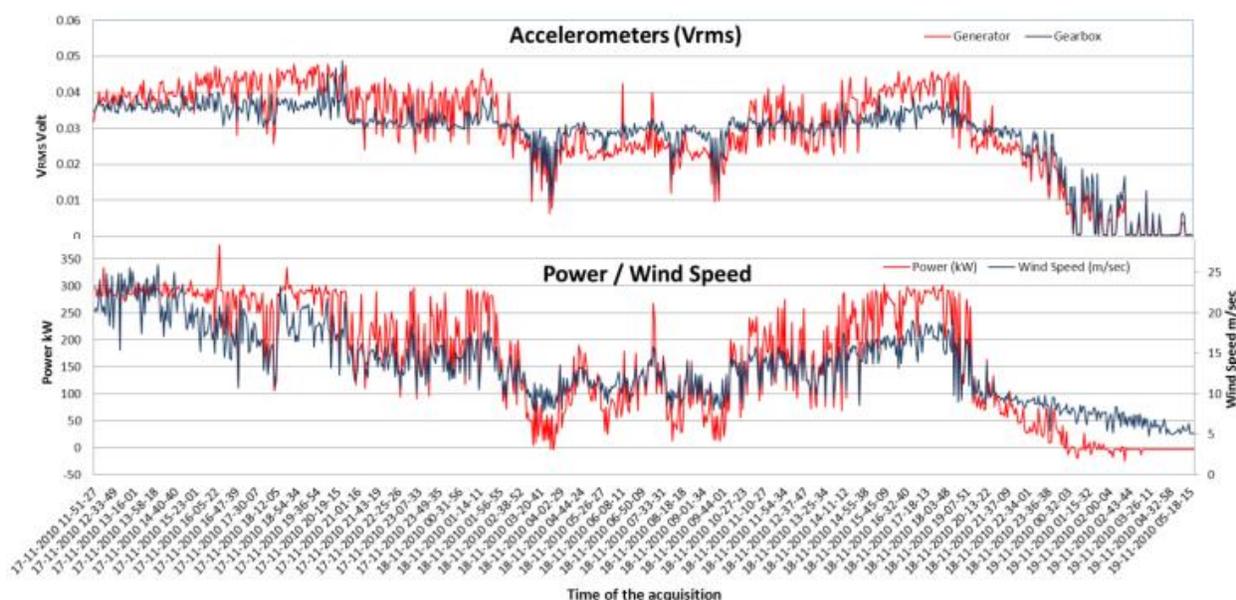
Мониторинг состояния ветряной турбины по данным вибрации и вырабатываемой мощности

Источник: Antonio Romero, Slim Soua, Tat-Hean Gan, Bin Wang, Condition monitoring of a wind turbine drive train based on its power dependant vibrations, Renewable Energy, Volume 123, 2018, Pages 817-827, ISSN 0960-1481

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148117307139>

Группа исследователей из Кембриджского университета и Лондонского университета Брунеля предложила способ контроля состояния ветряной турбины на основании данных вибрации и вырабатываемой мощности. Соответствующая статья была опубликована в издании Renewable Energy в августе 2018 года.

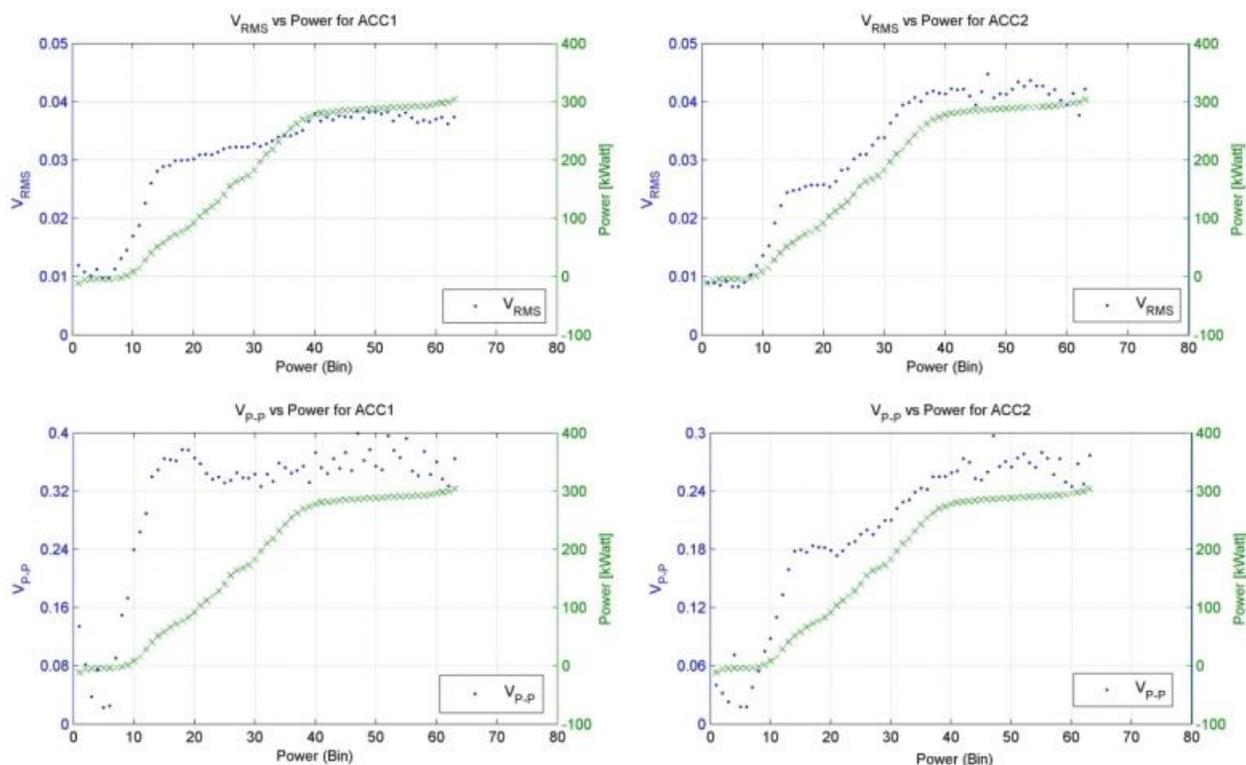
Авторы исследования исходили из фундаментальной зависимости между уровнем вибрации турбины и вырабатываемой ею мощности, которая, в свою очередь, зависит от скорости ветра. В статье рассматривались параметры турбины типа Windmaster300, показанные ниже.



Рабочие параметры турбины Windmaster300: сверху – виброускорения генератора и редуктора, снизу – мощность и скорость ветра

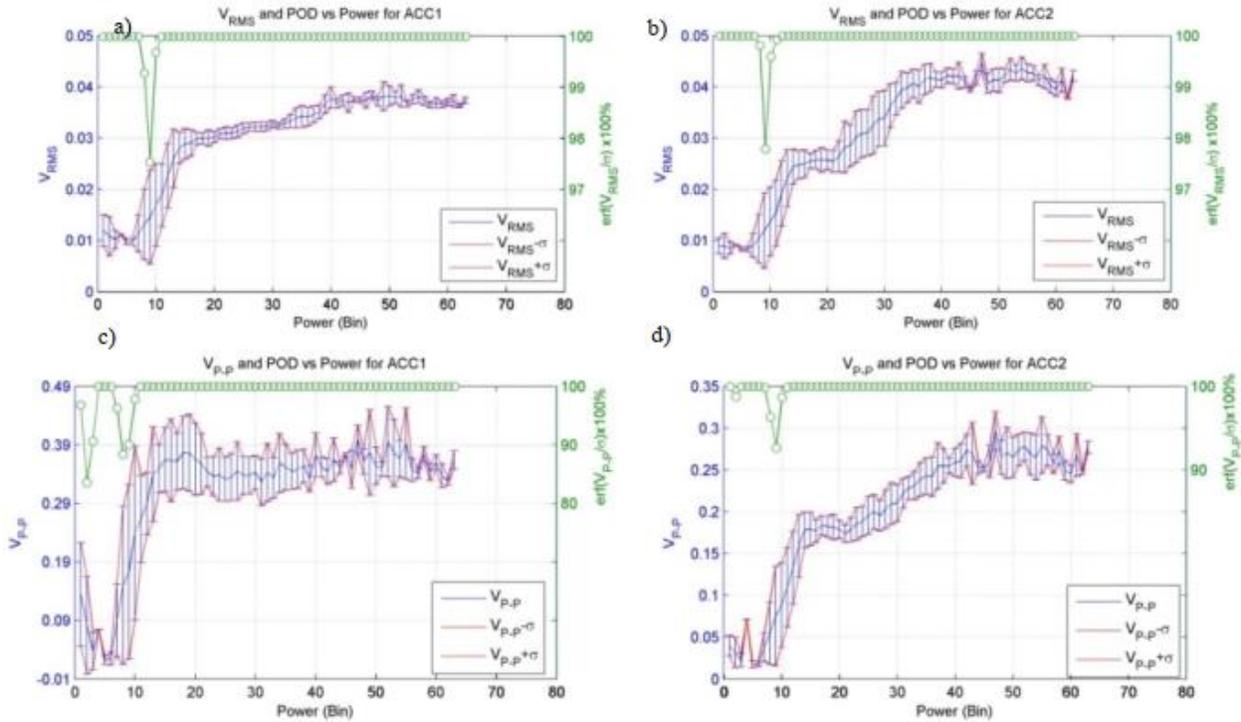
Графики развития параметров показывают наличие корреляции между ними.

Для контроля состояния турбины авторы использовали зависимости между параметрами, показанные ниже.



Зависимости между параметрами: сверху – среднеквадратичные значения виброускорения от мощности, снизу – размахи виброускорения от мощности

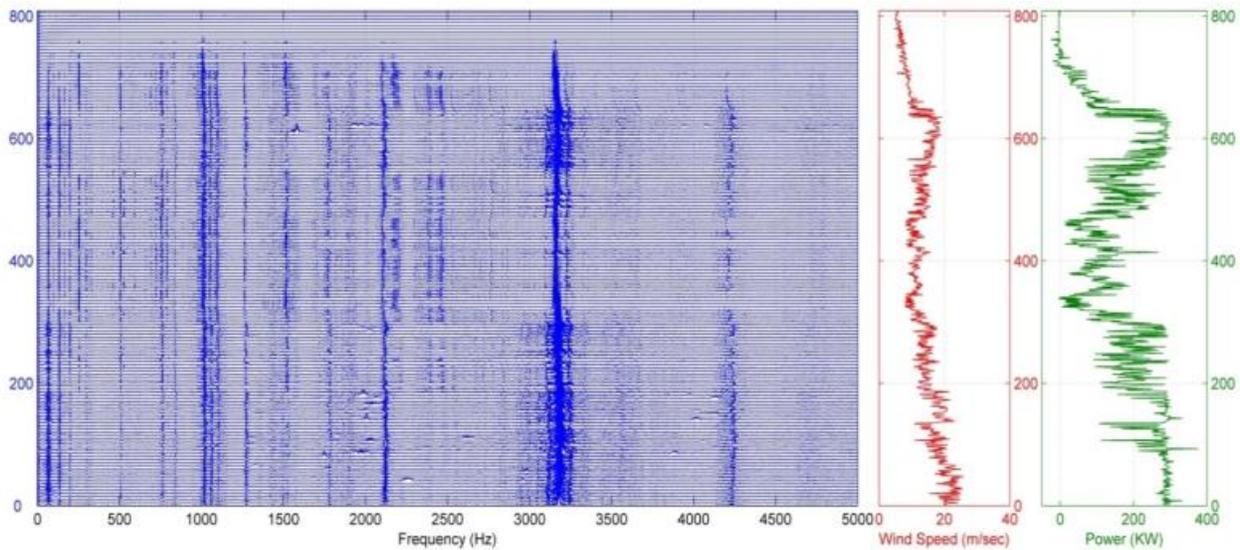
Для контроля общего состояния ветряной турбины авторы предложили контролировать отклонение фактических параметров от найденных зависимостей. Уровень отклонения, при котором определялось ненормальное состояние работы, был адаптивным и определялся условиями работы турбины. Примеры границ максимальных отклонений уровней вибрации показаны на графиках ниже.



Максимальные отклонения уровня вибрации при бездефектном режиме работы

Тип развивающегося дефекта определялся по собственными характеристиками сигнала вибрации. Турбина, имеющая три лопасти, будет иметь характерные гармоники на частотах, кратным шести частотам вращения, поскольку пики создаваемой лопастями вибрации будут происходить в верхней и нижней точках траектории лопастей. Помимо этого, в спектре будут также наблюдаться собственные частоты редуктора турбины.

Пример записанного спектра вибрации Windmaster300 и тренды мощности и скорости ветра показаны на изображении ниже.



Пример записанных параметров. Вертикальная ось отображает время, каждый горизонтальный срез графиков показывает значения мощности и скорости ветра и вид спектра в заданный момент времени

Для диагностики состояния турбины авторы выполнили идентификацию и интерпретацию доминирующих гармоник в спектре виброускорения при разных уровнях мощности: 5 кВ, 150 кВ и 300 кВ. В результате были интерпретации были получены потенциально дефектные элементы турбины, характерные для каждого режима работы. Пример полученной таблицы дефектов показан на изображении ниже.

Power (Kv)	Peaks in frequency spectrum (0 - 400Hz)	Relative amplitude	% amplitude	Possible cause	Peaks in frequency spectrum (400 - 10000Hz)	Relative amplitude	% amplitude	Possible cause
High power operating point								
300	50	137.6	100%	50.5Hz: second harmonic of the high speed shaft rotation	1618	124.4	100.00%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	388	75.85	53%	388Hz: second harmonic of the intermediate speed gear engagement	2328	117.1	94.13%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	103	72.68	53%	101Hz: fourth harmonic of the high speed shaft rotation	2141	111.6	89.71%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	54	60.61	44%	51.5Hz: fifth harmonic of the intermediate speed shaft rotation	809	81.82	65.77%	808Hz: frequency of the high speed gear engagement
	196	36.61	27%	194Hz: frequency of the intermediate speed gear engagement	776	79.08	63.57%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	60	21.6	16%	60Hz: frequency of the high speed gear engagement	1940	71.55	57.52%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	44	19.27	14%	41.2Hz: fourth harmonic of the intermediate speed shaft rotation	968	71.54	57.51%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	121	14.96	11%	120Hz: second harmonic of the high speed gear engagement	3231	60.84	48.91%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	10	11.41	8%	10.3Hz: frequency of the intermediate speed shaft rotation	1355	36.15	29.06%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	75	11.06	8%	75.75Hz: third harmonic of the high speed shaft rotation	583	27.97	22.48%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	28	10.7	8%	25.25Hz: frequency of the high speed shaft rotation				
	32	6.63	5%	30.9Hz: third harmonic of the intermediate speed shaft rotation				
	23	5.71	4%	20.6Hz: second harmonic of the intermediate speed shaft rotation				
	Medium power operating point							
150	49	92.03	100%	50.5Hz: second harmonic of the high speed shaft rotation	2416	206.7	100.00%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	51	61.11	66%	51.5Hz: fifth harmonic of the intermediate speed shaft rotation	2314	194.1	93.90%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	103	43.01	47%	101Hz: fourth harmonic of the high speed shaft rotation	2147	153.1	74.07%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	61	39.32	43%	60Hz: frequency of the high speed gear engagement	1933	101.1	48.91%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	42	38.96	42%	41.2Hz: fourth harmonic of the intermediate speed shaft rotation	1612	77.64	37.56%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	196	25.45	28%	194Hz: frequency of the intermediate speed gear engagement	840	64.56	31.23%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	386	23.31	25%	388Hz: second harmonic of the intermediate speed gear engagement	775	60.32	29.18%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
	121	16.86	18%	120Hz: second harmonic of the high speed gear engagement	807	51.73	18.77%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	28	10.73	12%	25.25Hz: frequency of the high speed shaft rotation	3231	38.8	25.03%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
	78	10.41	11%	75.75Hz: third harmonic of the high speed shaft rotation				
	9	7.23	8%	10.3Hz: frequency of the intermediate speed shaft rotation				
Low power operating point								
5	11	3.3	100%	10.3Hz: frequency of the intermediate speed shaft rotation	6504	1.847	100.00%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
					963	1.757	95.13%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
					771	0.7285	39.44%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
					722	0.7069	38.27%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
					3697	0.4797	25.97%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement
					4849	0.4575	24.77%	808Hz: harmonic of the high speed gear engagement
				1927	0.4479	24.25%	194Hz: harmonic of the intermediate speed gear engagement	

Полученная таблица дефектов

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Способ оптимизации затрат на обслуживание оборудование при помощи кластерного анализа записей журнала обслуживания

Источник: Zhe Yang, Piero Baraldi, Enrico Zio, A novel method for maintenance record clustering and its application to a case study of maintenance optimization, Reliability Engineering & System Safety, Volume 203, 2020, 107103, ISSN 0951-8320

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832020306049>

Группа исследователей из Китая и Италии предложила способ оптимизации расходов на обслуживание оборудования по данным, получаемым из записей в журнале обслуживания. Способ основан на определении состояния оборудования в каждой записи при помощи методов машинного обучения и построению модели развития состояния оборудования во времени. Соответствующая статья опубликована в ноябрьском выпуске издания Reliability Engineering & System Safety.

В качестве исходных данных в исследовании рассматривался набор записей о проведённых мероприятиях по обслуживанию единицы промышленного оборудования. Каждая запись состоит из метки времени и текстовой информации. В предложенном методе из текстовой информации выделяется набор лексем (слов как единиц анализа текста без использования предлогов, падежных окончаний и т.п.), характеризующих выполненное действие. Из наборов лексем формируются кластеры, характеризующие состояния оборудования. Общая схема применяемых для анализа записей методов машинного обучения показана ниже.

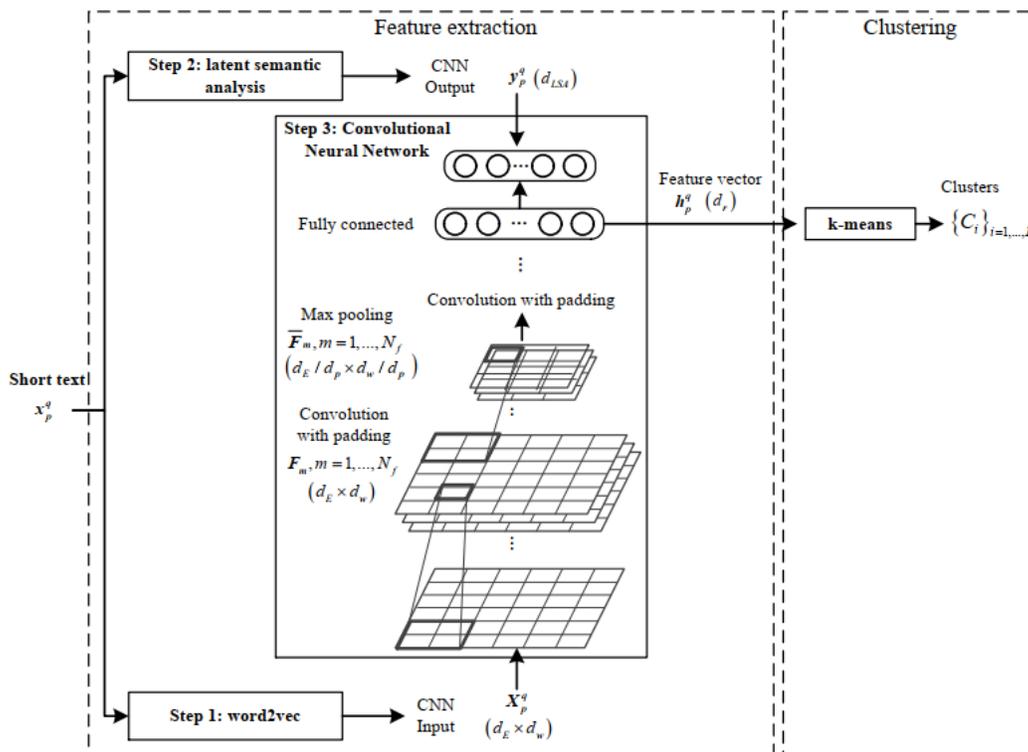


Схема обработки записей об обслуживании

На основе переходов между состояниями строится модель развития общего состояния оборудования. Метод был применён к [базе](#) из 628 записей об обслуживании ковшей 26 карьерных

экскаваторов, эксплуатируемых на 6 объектах. Пример записей об обслуживании показан на изображении ниже.

Excavator reference number	Date (t_p^q)	Short text (x_p^q)
3	29/9/2009	Fabricate new bucket links
4	05/04/2007	Replace bucket
7	23/12/2008	Replace pos 1& 2 teeth & adaptors
14	30/07/2008	RHS bucket pin plate bolt missing
11	13/10/2009	GET Refit Pos 4 adapter
22	14/06/2006	bucket is cracked. Change out
24	21/2/2008	Repair cracks in bucket

Записи об обслуживании

Наборы лексем, характеризующих 4 основных кластера, полученных в результате обработки, показаны на изображении ниже.

Cluster 1 (421 records)		Cluster 2 (82 records)		Cluster 3 (39 records)		Cluster 4 (86 records)	
Word	Count	Word	Count	Word	Count	Word	Count
bucket	425	bucket	81	replace	40	adaptor	53
repairs	90	replace	80	adaptor	24	pos	23
pin	66	pin	20	broken	10	tooth	15
cracks	48	shroud	13	tooth	10	broken	12
change	37	wear	9	adapter	8	off	11

Наборы лексем 4 кластеров

Кластер 1 характеризуется частым употреблением лексем 'ковш' (bucket) и 'ремонт' (repair), кластер 2 – 'ковш' и 'замена' (replace), кластер 3 - 'замена' и 'адаптер', кластер 4 - 'адаптер'. Из набора лексем видно, что кластер 1 соответствует ремонту ковша, кластер 2 – замене ковша, кластеры 3 и 4 – отдельным действиям, выполняемым над компонентами экскаватора (адаптер ковша).

Наличие подобных кластеров позволяет построить модель развития состояния оборудования, заключающейся в череде переходов между текущими состояниями. Схема модели показана на изображении ниже.

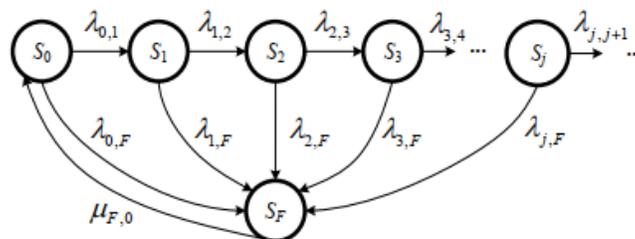
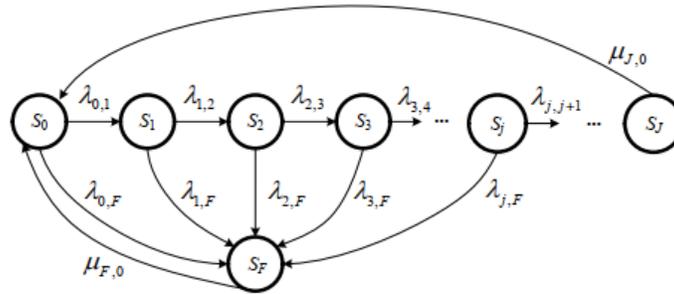


Схема развития состояния оборудования, S – текущие состояния оборудования, λ – интенсивность переходов

В схеме состояние S_0 соответствует началу жизненного цикла, S_F – дефектному состоянию. Из текущего состояния S_i оборудование может перейти либо в следующее состояние в жизненном цикле S_{i+1} в результате какого-либо мероприятия по обслуживанию, либо в дефектное состояние S_F . Описанные выше кластеры, полученные из журнала обслуживания, соответствуют мероприятиям по обслуживанию.

При помощи этой схемы можно описать подход к обслуживанию оборудования как показано ниже.

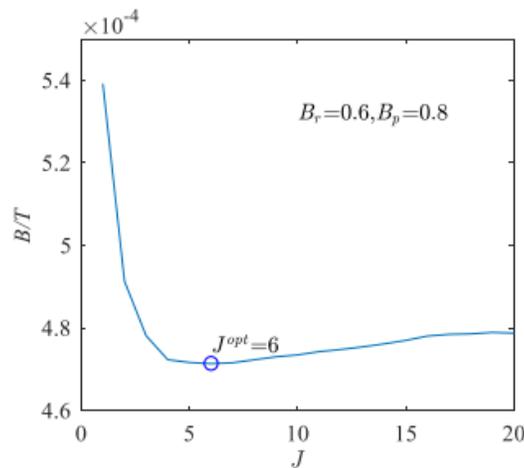


Изображение политики обслуживания оборудования

На схеме жизненный цикл оборудования заканчивается состоянием S_j , после которого выполняется замена оборудования и переход к начальному состоянию S_0 . Число J показывает количество мероприятий по обслуживанию (ремонтов например), после которых необходимо выполнить замену.

В исследовании рассматривалась задача оптимизации удельных затрат на обслуживание оборудования В/Т (затраты на обслуживание оборудования в единицу времени) по количеству ремонтов J при заданной политике обслуживания и известных стоимостях плановой и unplanned замены и ремонта.

Пример результатов оптимизации при стоимости unplanned замены 1 усл.ед., плановой 0.8 усл.ед., ремонта 0.6 усл.ед. показаны на изображении ниже. Для заданных параметров оптимальное количество ремонтов составило 6.



Зависимость удельной стоимости обслуживания в относительных единицах от числа ремонтов

Ещё больше информации в наших социальных сетях



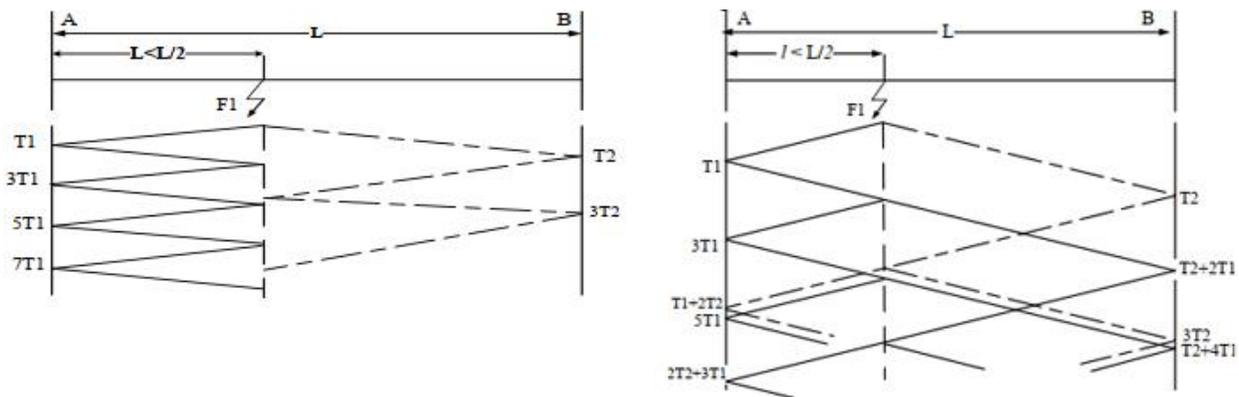
Способ определения происходящих одновременно коротких замыканий в магистральных сетях при помощи системы волнового ОМП

Источник: H. A. Abd el-Ghany, A. M. Azmy and A. M. Abeid, "A General Travelling-Wave-Based Scheme for Locating Simultaneous Faults in Transmission Lines," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 35, no. 1, pp. 130-139, Feb. 2020, doi: 10.1109/TPWRD.2019.2931178.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8778712>

В статье, опубликованной в *IEEE Transactions on Power Delivery* в июле 2019 года, группа исследователей из Университета Танта в Египте рассмотрела вопрос использования систем волнового ОМП (определения мест повреждений) для идентификации и определения мест коротких замыканий, происходящих в течение небольшого промежутка времени в разных участках линии. В таких случаях осциллограммы, записываемые приборами ОМП, будут содержать наложенные друг на друг моменты прихода бегущих волн от разных источников, что будет осложнять расчёт, выполняемые стандартными способами.

Предложенный исследователями способ основывается на выделении из общего распределения бегущих волн распределений, характерных для единичных дефектов. Например, для межфазного КЗ и однофазного КЗ на землю распределение пришедших к приборам ОМП импульсов будет разным как показано на изображении ниже.

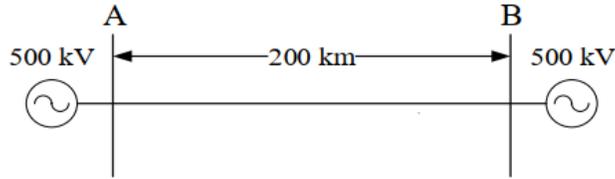


Примеры распределений событий прихода бегущих волн для межфазного КЗ (слева) и однофазного КЗ на землю (справа)

В предложенном методе осциллограммы, записанные приборами ОМП, обрабатываются при помощи матрицы Кларка и дискретного вейвлет-преобразования для выделения событий прихода бегущих волн. Затем выполняется сравнение записанных распределений с распределениями, характерными для одиночного дефекта на линии (межфазное КЗ или однофазное КЗ на землю). Если записанные распределения совпадают с одним из распределений одиночного дефекта, то делается вывод о наличии одного дефекта. Расстояние до дефекта рассчитывается по методике двустороннего волнового ОМП. Если же записанные распределения не совпадают с распределениями для одиночного дефекта, делается вывод о наличии нескольких дефектов на линии. В этом случае возможны несколько вариантов происхождения первых пиков записанных распределений бегущих волн (первичный дефекта 1 - первый отражённый дефекта 1 – первичный дефекта 2; первичный дефекта 1 – первичный дефекта 2 – первый отражённый дефекта 1; первичный дефекта 1 – первый отражённый дефекта 1 – второй отражённый дефекта 1 и т.п.).

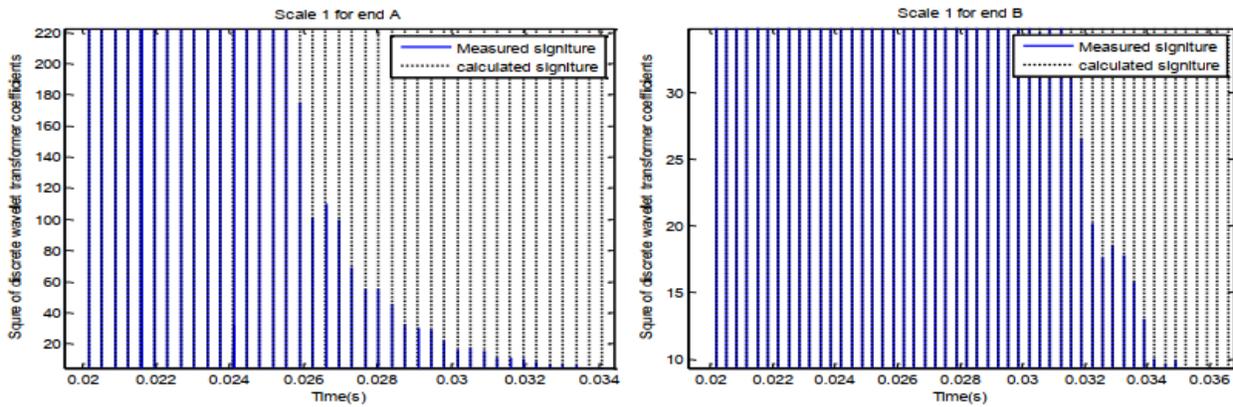
Перебором различных сценариев выполняется разделение записанных распределений на распределения, характерные для каждого отдельного дефекта, после чего выполняется расчёт расстояния до каждого дефекта.

Для проверки метода исследователи выполнили симуляцию КЗ на линии, структура которой показана ниже.



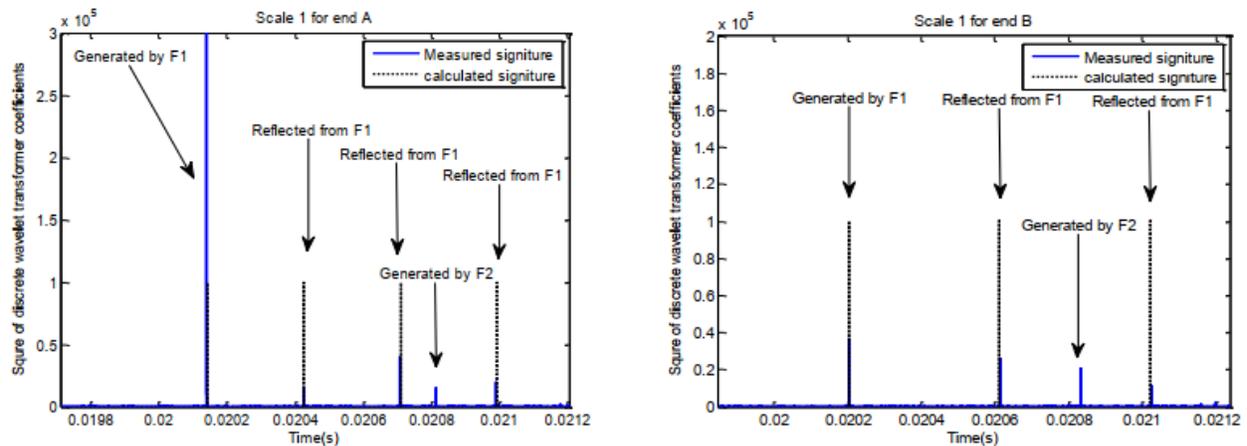
Структура линии для проверки метода

Полученные для одиночного межфазного КЗ на расстоянии 103 км от конца А распределения событий прихода бегущих волн показаны на изображении ниже.

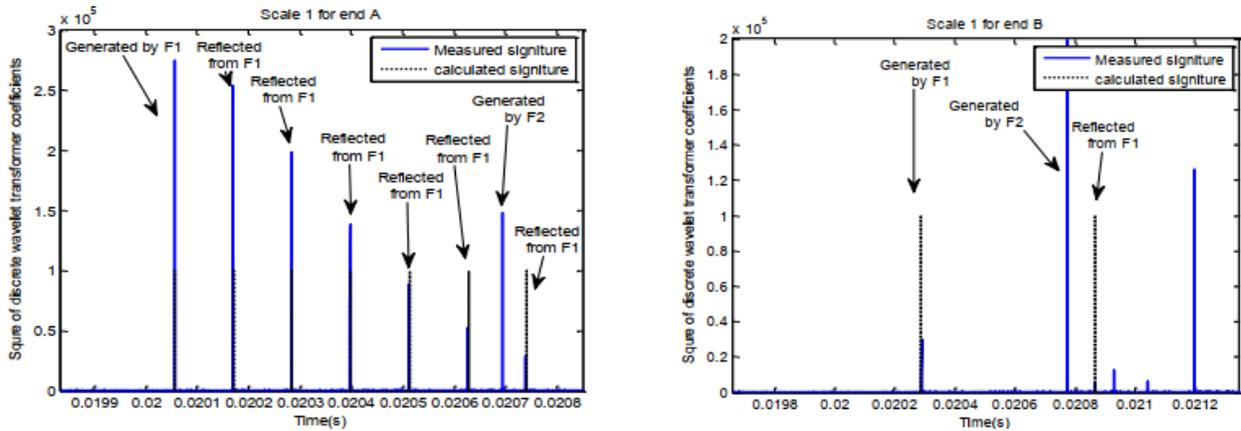


События прихода бегущих волн, слева – на конце А, справа – на конце В. Синим показаны фактически зарегистрированные распределения, пунктиром показаны теоретически рассчитанные распределения

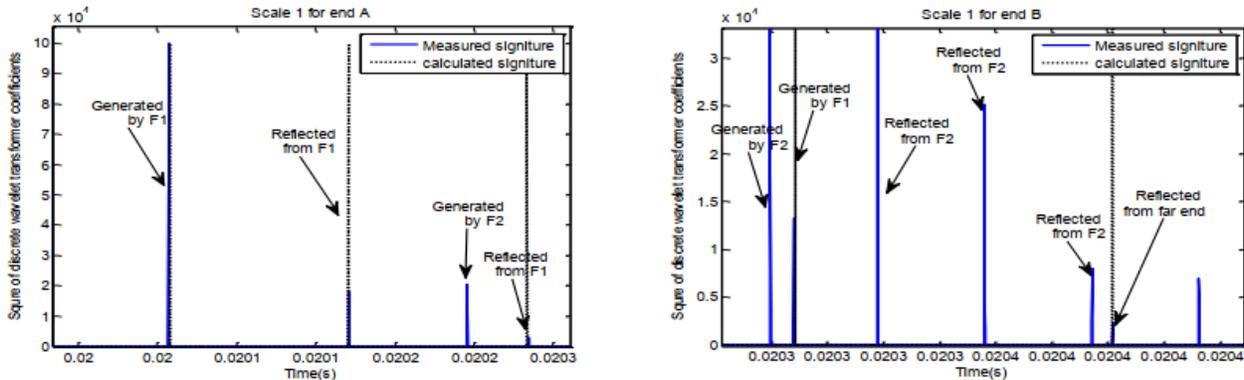
Результаты применения метода для нескольких дефектов на линии показаны на изображениях ниже.



Рассчитанные и фактически зарегистрированные события прихода бегущих волн для межфазного КЗ в 82 км от А и однофазного КЗ на землю в 95 км от А с разницей во времени между КЗ 1.3 мс

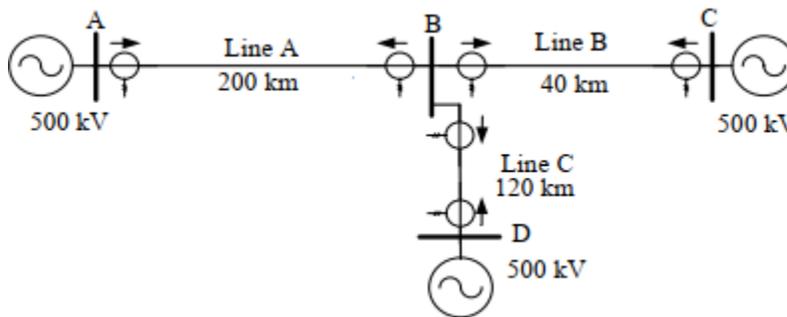


Рассчитанные и фактически зарегистрированные события прихода бегущих волн для межфазного КЗ в 33 км от А и двухфазного КЗ на землю в 78 км от А с разницей во времени между КЗ 1.1222312 мс



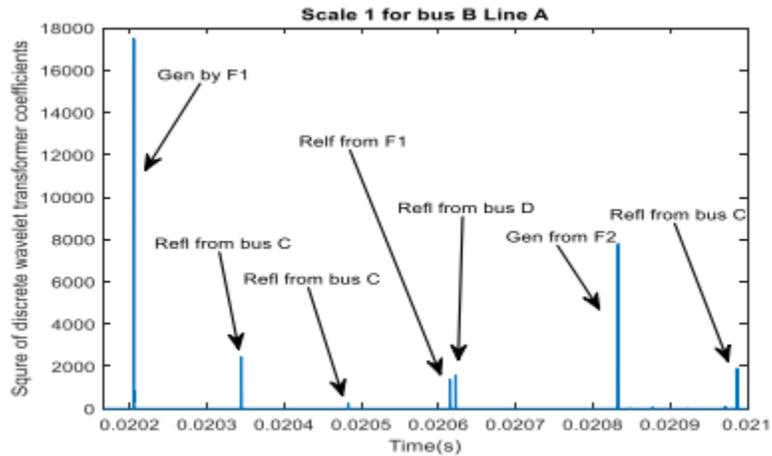
Рассчитанные и фактически зарегистрированные события прихода бегущих волн для однофазного КЗ на землю в 33 км от А и межфазного КЗ в 189 км от А с разницей во времени между КЗ 0.52116 мс

Метод также был применён к линии с отпайкой, структура которой показана на изображении ниже.



Структура линии для проверки метода

На линии имитировались межфазное КЗ в 82 км от А и однофазное КЗ на землю в 95 км от А с разницей во времени между КЗ 1.3 мс. Как показано на изображении ниже, из записанного распределения были успешно выделены события, характеризующие оба дефекта вместе с событиями, соответствующими отражениям бегущих волн от распределительных устройств на подстанциях.



Полученное распределение

В заключении исследования указывается, что точность метода была выше 99.9%, что делает его применимым для исследуемой задачи.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



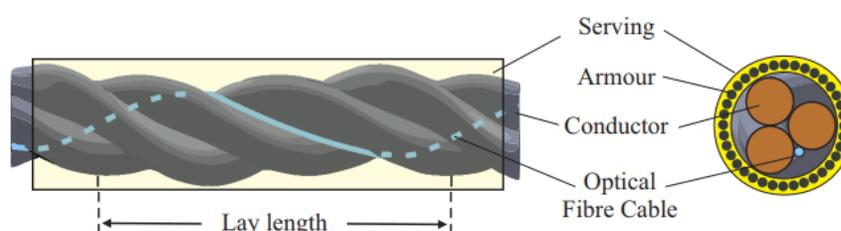
Применение распределённого оптического датчика для контроля состояния подводных кабелей

Источник: A. Masoudi, J. A. Pilgrim, T. P. Newson and G. Brambilla, "Subsea Cable Condition Monitoring With Distributed Optical Fiber Vibration Sensor," in *Journal of Lightwave Technology*, vol. 37, no. 4, pp. 1352-1358, 15 Feb.15, 2019, doi: 10.1109/JLT.2019.2893038.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8611347>

В статье, опубликованной в *Journal of Lightwave Technology* в январе 2019 года группа исследователей из Университета Саутгемптона предложила систему контроля состояния подводных кабелей при помощи распределённого оптического датчика.

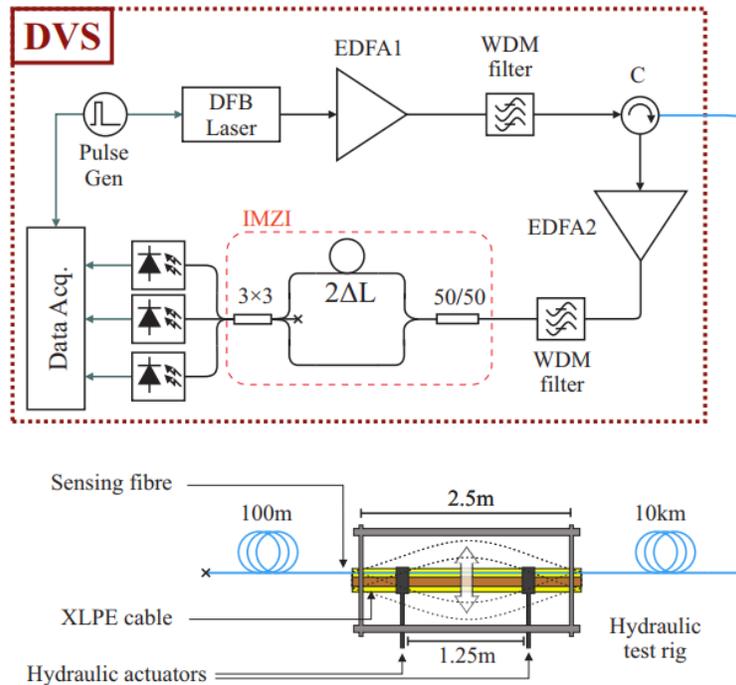
Датчик выполнялся в виде протяжённого оптоволоконного кабеля, которое укладывается в кабель вместе с силовыми жилами как показано на изображении ниже.



Кабель с оптоволоконном

Работа системы строилась на изменении оптических свойств оптоволоконного кабеля под действием натяжений или изгибов кабеля. Для контроля изменения оптических свойств использовалась фазовая оптическая временная рефлектометрия, в которой в оптоволоконно периодически вводится короткий импульс. Изменения свойств кабеля контролируется по разнице фаз введённого и отражённого света.

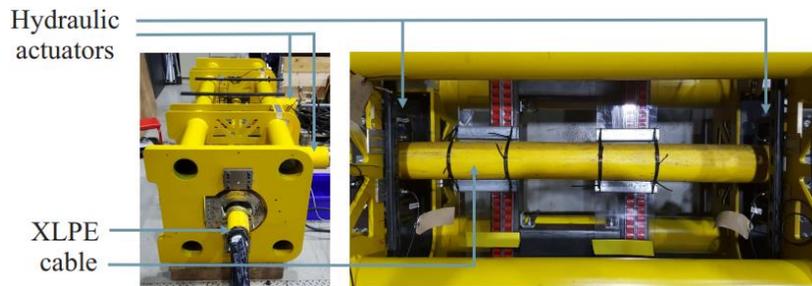
Структура системы показана на изображении ниже.



Структура системы

Лазер с распределённой обратной связью (DFB) генерирует импульсы света с длиной волны 1550 нм продолжительность 8 нс и пиковой мощностью 20 мВт. Оптический усилитель с добавкой эрбия (EDFA1) усиливает импульс до пиковой мощности 1 Вт. Усиленный импульс проходит через фильтр высокоплотного мультиплексирования с разделением по длинам волн (DWDM) для удаления спонтанной эмиссии. Направление импульса в оптоволоконный датчик осуществляется через циркулятор С. Через циркулятор также осуществляется приём отражённого света и направление его на второй оптический усилитель EDFA2 с усилением 25 дБ. Усиленный отражённый свет проходит через второй WDM-фильтр для удаления спонтанной эмиссии и подаётся в несбалансированный интерферометр Маха-Зендера (IMZI), после которого подаётся на три фотодетектора, при помощи которых формируются данные о фазах отражённого света. Настройки интерферометра позволяют контролировать состояние оптоволоконного датчика с пространственным разрешением 1 м.

Изображение испытательного стенда показано ниже.

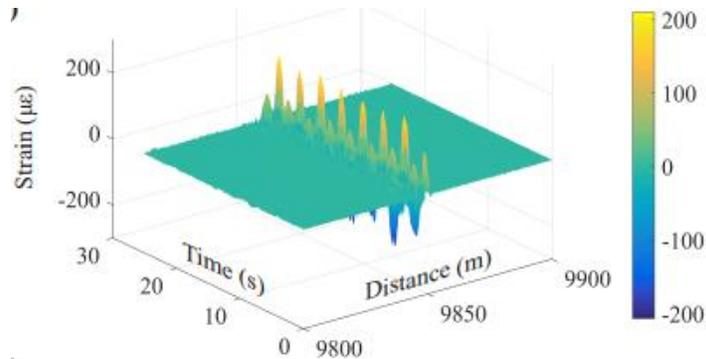


Испытательный стенд

Стенд представляет собой стальную раму длиной 2.5 м с двумя гидроприводами для создания нагрузки на кабель. В стенде находились две точки крепления кабеля на расстоянии 2.5 м друг от друга. Испытания проводились на трёхфазном кабеле 33 кВ длиной 3.5 м. Длина оптоволоконна от

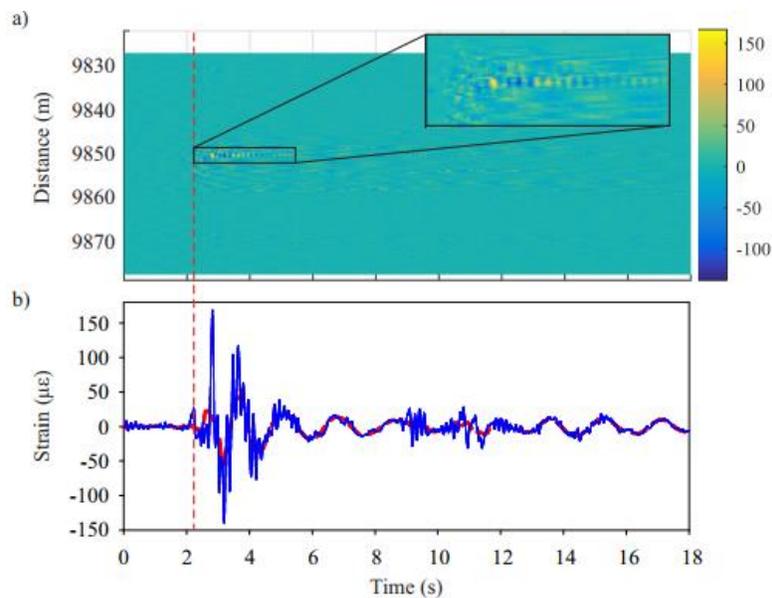
установки до системы составляла 10 км. В первом испытании гидроприводы периодически изгибали кабель. Во втором испытании на кабель падал стальной брус массой 4 кг с высоты 114 см.

Результаты первого испытания в виде трёхмерной диаграммы зависимости натяжения кабеля от времени и расстояния до точки измерения показаны ниже.



Зависимость натяжения от расстояния и времени

Результаты второго испытания в виде тепловой карты зависимости натяжения от времени и расстояния и в виде осциллограммы изменения натяжения в месте удара показаны ниже.



Результаты второго опыта: выше – тепловая карта, ниже – осциллограмма

В заключении статьи указано, что система показала свою применимость для контроля состояния кабелей. В дальнейших разработках особое внимание будет уделено использованию встроенного в кабель усилителя оптического сигнала и качеству соединения оптоволокна с модулем ввода импульсов. Эти меры в перспективе помогут существенно повысить чувствительность системы.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



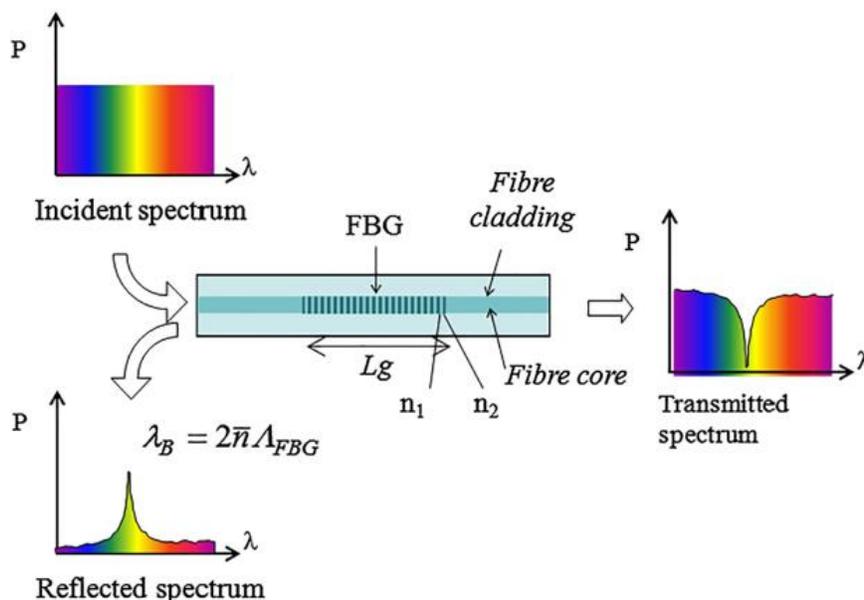
Контроль состояния подшипников качения при помощи оптоволоконного датчика

Источник: Hasib Alian, Shlomi Konforty, Uri Ben-Simon, Renata Klein, Moshe Tur, Jacob Bortman, Bearing fault detection and fault size estimation using fiber-optic sensors, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 120, 2019, Pages 392-407

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327018307052>

Группа исследователей из Израиля предложила новый тип датчика для контроля состояния подшипников качения, по данным которого можно определять наличие и размер дефекта внутреннего и внешнего колец подшипника качения. Соответствующая статья была опубликована в издании Mechanical Systems and Signal Processing в апреле 2019 года.

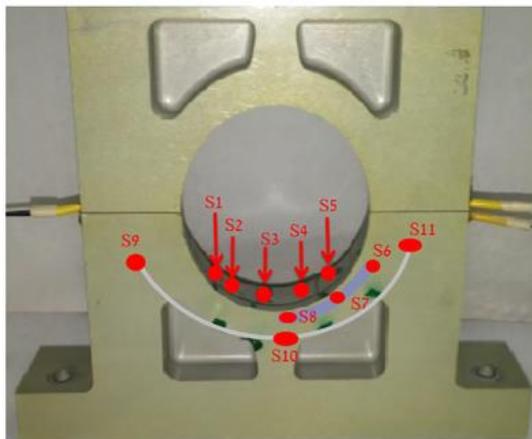
Работа датчика основана на оптической решётке Брэгга, конструкции одномодового оптоволокна, в котором коэффициент преломления меняется периодически по длине оптоволокна. Такая решётка селективно отражает свет в узком диапазоне длин волн, определяемом параметрами решётки. Схематичное изображение решётки Брэгга показано ниже.



Оптическая решётка Брэгга

Под воздействием температуры и механического напряжения оптоволокна пик в отражённом спектре смещается. Этот эффект используется в предложенном датчике для контроля состояния подшипников в условиях постоянной температуры.

Работа датчиков была проверена в двух режимах на испытательных стендах. В первом датчики устанавливались в просверленные в крепления подшипника отверстия как показано на изображении ниже.



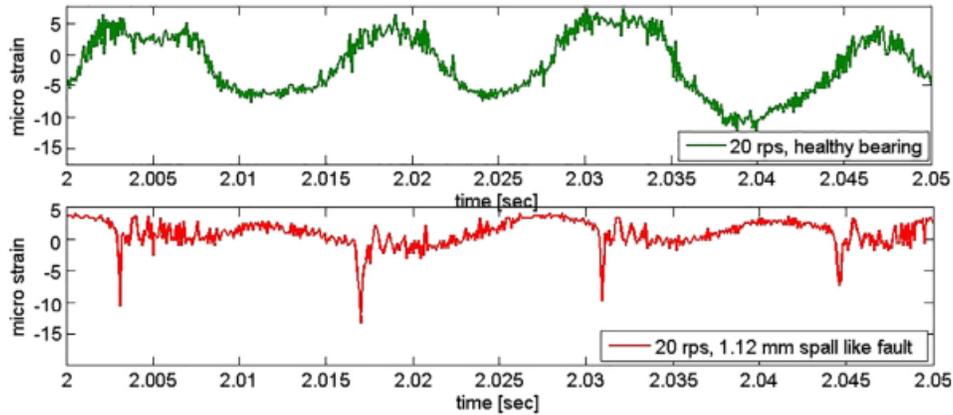
Крепление подшипника с местами установки датчиков

Во втором режиме датчики устанавливались на корпус подшипника или на крышку двигателя как показано на изображении ниже.



Крепление датчиков второго типа

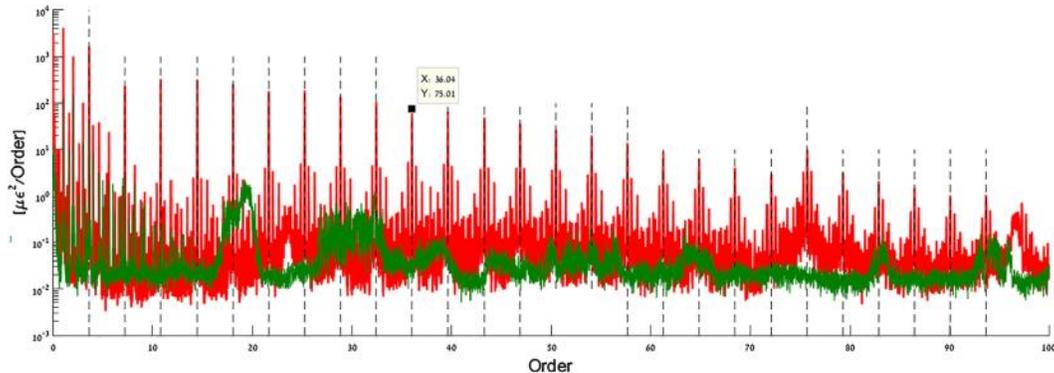
Для контроля результатов было выполнено сравнение сигналов датчиков при работе с бездефектным подшипником и подшипником с трещиной в одном из колец. Сигналы датчиков в обоих режимах показаны на графиках ниже.



Сигналы датчика бездефектного и дефектного подшипника

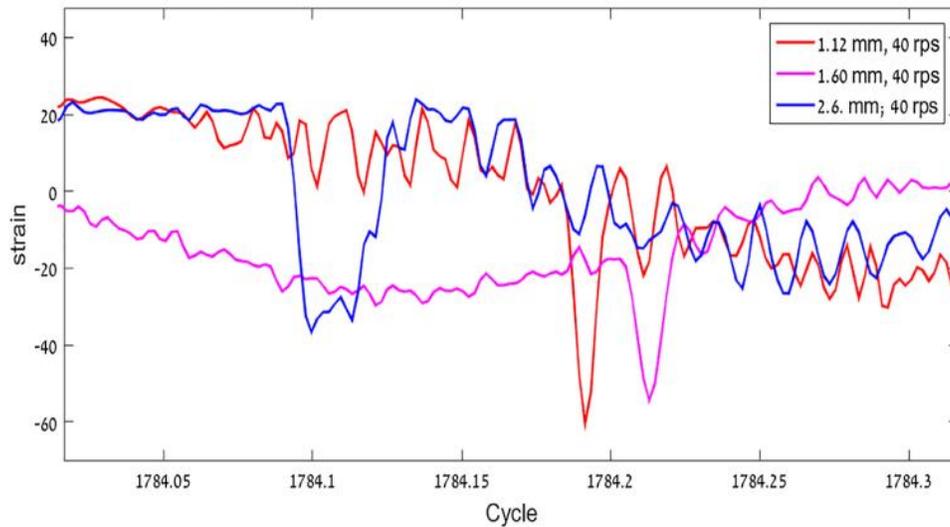
Из графиков видно, что сигнал бездефектного подшипника состоит из периодических отклонений, обусловленных проходом тел качения подшипника рядом с датчиком. У дефектного подшипника обнаруживаются биения, возникающие при взаимодействии тел качения с дефектом.

Аналогичные наблюдения были также подтверждены анализом спектров сигналов. Спектр сигнала дефектного подшипника имел чётко отличимые гармоники кратные частоте биений.



Спектры для бездефектного (зелёный) и дефектного (красный) подшипников

На размер дефекта указывает величина ширины провала сигнала датчика. Чем больше ширина дефекта, тем большее время требуется телу качения чтобы его преодолеть. В течение этого времени тело качения не оказывается существенного давления на кольца подшипника, что приводит к падению сигнала датчика. Этот принцип был подтверждён замерами на подшипниках с разными размерами дефектов как показано на изображении ниже.



Сигнал датчика для подшипников с разными размерами дефектов

В заключении исследования указывается, что применение оптоволоконного датчика для контроля состояния подшипников качения обоснованно, а возможность при этом определять размер дефекта указывает на хорошие перспективы предложенного решения.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



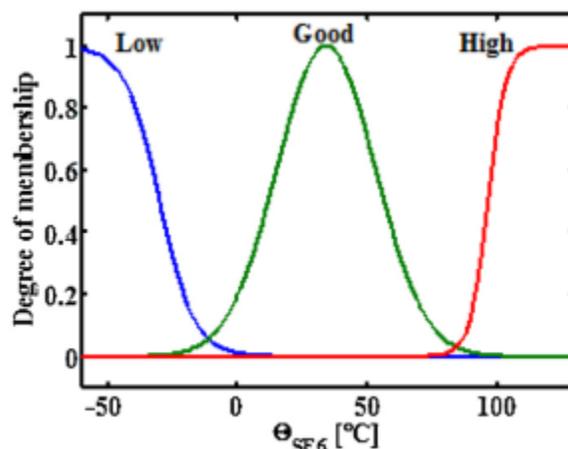
Оценка состояния элегазового выключателя методами машинного обучения

Источник: Mileta Žarković, Zlatan Stojković, *Artificial intelligence SF6 circuit breaker health assessment, Electric Power Systems Research, Volume 175, 2019, 105912, ISSN 0378-7796*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619302317>

Группа исследователей из Сербии рассмотрела вопрос комплексной оценки состояния высоковольтного элегазового выключателя и предложила методику расчёта индекса технического состояния, вероятности отказа и продолжительности безаварийной работы при помощи методов машинного обучения. Соответствующая статья была опубликована в издании Electric Power Systems Research в октябре 2019 года.

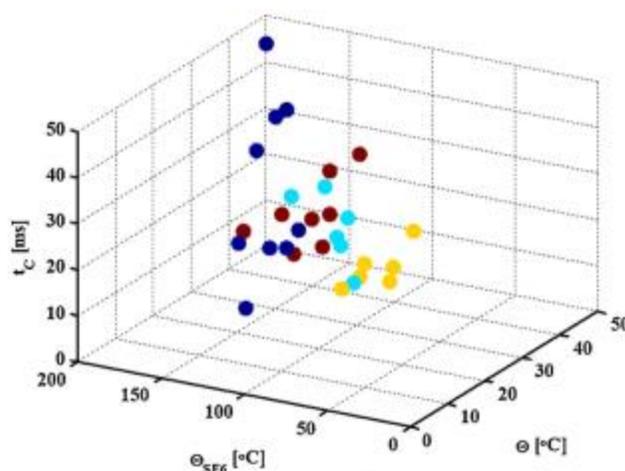
В статье индекс состояния выключателя определяется по совокупности параметров, характеризующих его работу: влажности, температуре и плотности элегаза, осциллограмме тока и времени работы привода, и т.п. Параметры были разделены на три группы: характеризующие состояние контактов, элегаза и привода. К каждому параметру применялась фазсификация на основе специально составленных функций принадлежности. Пример такой функции показан ниже, где определяется принадлежность параметра «Температура элегаза» к одному из трёх состояний, «Низкая», «Нормальная» или «Высокая».



Пример функции принадлежности для параметра «Температура элегаза»

Состояние каждой из трёх подсистем определялось как взвешенная сумма соответствующих параметров. Общее состояние выключателя определялось как взвешенная сумма состояний трёх подсистем.

Вероятность отказа выключателя определялась при помощи алгоритмов кластеризации, относящихся к машинному обучению без учителя. В предлагаемом подходе все параметры нормализовывались к диапазону от 0 до 1. Затем в пространстве параметров выполнялось определение границ четырёх кластеров, соответствующих четырём уровням вероятности отказа выключателя: от 0% до 25%, от 25% до 50%, от 50% до 75% и от 75% до 100%. Пример выделенных кластеров в пространстве из трёх параметров выключателя показан на изображении ниже. Разные кластеры показаны разными цветами, используются параметры «Время срабатывания», «Температура элегаза» и «Температура выключателя».



Кластеры вероятностей отказа выключателя

Продолжительность безаварийной работы выключателя определялась при помощи алгоритмов искусственных нейронных сетей, относящихся к машинному обучению с учителем. Исследователи подавали на вход нейронной сети такие же наборы данных, как при определении индекса технического состояния и вероятности отказа. Выходом нейронной сети был год завершения жизни выключателя. Для тренировки сети использовались наборы данных 30 выключателей. Получившаяся в итоге погрешность предсказания составила 2.4%.

Разработанная методика была проверена на шести выключателях, после чего выключатели были ранжированы по срочности требуемого ремонта.

Авторы исследования указывают, что методику можно применять и к другим типам выключателей, но перечень входных параметров будет отличаться от параметров элегазовых выключателей. Повышения точности методики можно добиться применяя дополнительную статистическую обработку входных данных, на чём и будут сосредоточена дальнейшая работа авторов.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Перспективы перехода к полностью автоматическому определению наличия ЧР в электрооборудовании

Источник: R. Ghosh, P. Seri and G. C. Montanari, "A Track Towards Unsupervised Partial Discharge Inference in Electrical Insulation Systems," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 190-193, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158742.

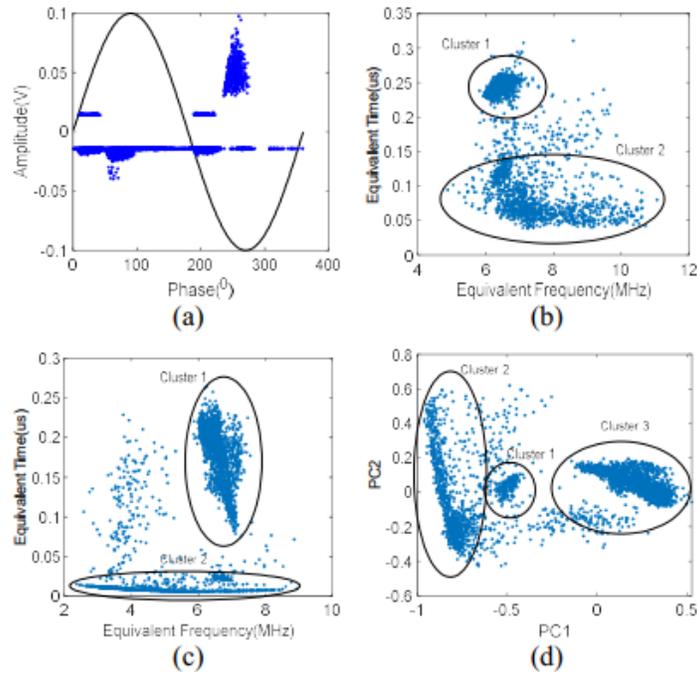
<https://ieeexplore.ieee.org/document/9158742>

На прошедшей в июле 2020 года IEEE Electrical Insulation Conference была представлена статья группы исследователей из Италии и США, в которой авторы провели обзор применяемых в настоящее время методов кластерного анализа для определения наличия ЧР и рассмотрели перспективные способы определения ЧР в электрооборудовании без привлечения экспертов.

В качестве основного метода кластерного анализа, используемого для определения ЧР, исследователи выделили метод T-F карт, применяемый на протяжении почти 20 лет. Метод доказал применимость как в испытаниях на промышленных объектах, так и в лабораториях. Однако недостатком метода является необходимость привлечения экспертов для достоверного определения границ кластеров.

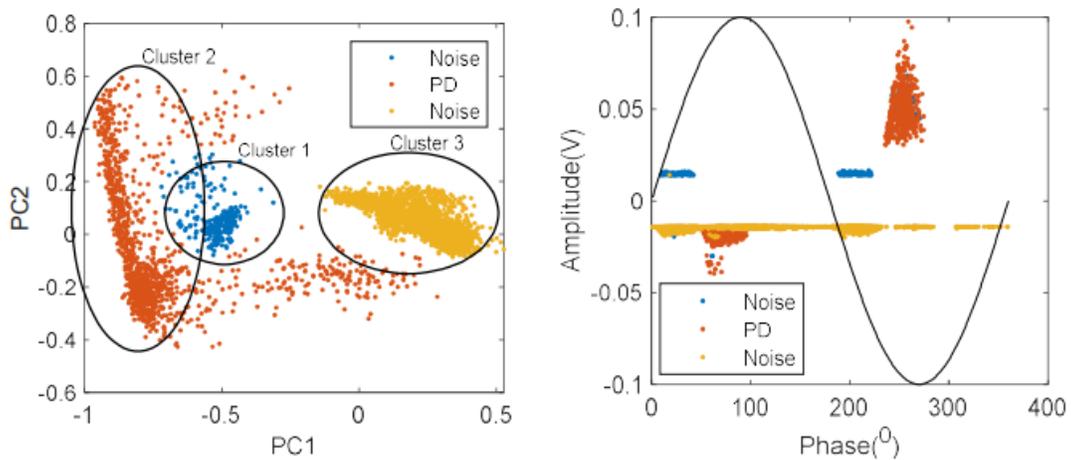
В T-F методе рассматриваются кластеры в пространстве двух параметров, характерного времени и частоты, которые получаются в результате разложения осциллограммы сигнала во временной и частотной областях. Использование большего количества признаков способно повысить точность отделения ЧР от шума. В качестве таких признаков могут использоваться коэффициент эксцесса (куртозис), коэффициент асимметрии и энтропия сигнала по Шеннону. Для разделения кластеров ЧР и шума в многомерном пространстве признаков существуют методы иерархической и разделяющей кластеризации. Для отображения результатов разделения кластеров на плоскости может использоваться снижение размерности пространства при помощи метода главных компонент.

В качестве примера, подкрепляющего тезисы статьи, приводятся результаты измерения активности ЧР на высоковольтном кабеле из опыта авторов. PRPD-диаграмма замера показана на изображении ниже (a). Из диаграммы можно предположить, что в замере содержатся импульсы ЧР и двух типов шума: коррелирующегося и не коррелирующегося с напряжением. Однако выполнить разделение кластеров сложно даже с привлечением эксперта. На изображениях (b) и (c) показаны T-F карты замера до и после очистки от шума. Однако три кластера хорошо видны после повышения размерности пространства признаков. На изображении (d) показана проекция выбранного пространства признаков на плоскость двух главных компонент, PC1 и PC2. Для краткости статьи методика выбора признаков не раскрывается.



Результаты замера активности ЧР в кабеле из опыта авторов статьи

Выделенные при помощи повышения размерности пространства признаков кластеры и соответствующие им области PRPD-диаграммы показаны разными цветами на изображении ниже.



Выделенные кластеры

В заключении статьи указывается, что предлагаемый подход имеет перспективы не только для отделения ЧР от шума в двигателях и генераторах переменного тока, подключенных к электрической сети напрямую, но также и для двигателей, работающих от частотных преобразователей и машин постоянного тока.

Ещё больше информации в наших социальных сетях

