



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 26 января 2021 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. [Комплексный алгоритм оценки остаточного ресурса оборудования методами машинного обучения](#)
2. [Опыт комплексной диагностики вытяжного вентилятора ТЭЦ](#)
3. [Аналитическая платформа контроля обледенения линий](#)
4. [Метод определения ЧР по дисперсии сигнала](#)
5. [Исследование показателей состояния главного редуктора ветряного генератора](#)
6. [Разработка хроматографа с детектором на основе твёрдооксидного топливного элемента](#)
7. [Определение короткозамкнутых витков в синхронных двигателях с постоянными магнитами при помощи анализа питающего напряжения](#)
8. [Детектирование и локализация ЧР на электрических подстанциях при помощи алгоритма самоорганизующейся карты свойств](#)
9. [Метод мониторинга состояния стержней демпферной обмотки синхронных двигателей](#)
10. [Метод оценки состояния трансформатора по уровням и скоростям развития концентраций растворённых газов и типу развивающегося дефекта](#)
11. [Определение дефектов подшипников качения при помощи метода разложения по собственным формам и искусственной нейронной сети](#)
12. [Метод определения ключевых свойств для диагностики подшипников качения](#)
13. [Определение мест повреждений в сетях среднего напряжения постоянного тока при помощи спектрального анализа](#)

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

Комплексный алгоритм оценки остаточного ресурса оборудования методами машинного обучения

Источник: Paulo Roberto de Oliveira da Costa, Alp Akçay, Yingqian Zhang, Uzay Kaymak, Remaining useful lifetime prediction via deep domain adaptation, Reliability Engineering & System Safety, Volume 195, 2020, 106682, ISSN 0951-8320

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832019304946>

Группа исследователей из Технического университета Эйндховена разработала комплексный алгоритм для расчёта остаточного ресурса оборудования, основанный на использовании комбинации методов машинного обучения. Работа алгоритма была протестирована на наборах данных, описывающих развитие состояния авиадвигателей. Соответствующая статья была опубликована в издании Reliability Engineering and System Safety в марте 2020 года.

Исследователи рассмотрели задачу, когда для выборки оборудования доступны два набора данных, исходный и целевой. Исходный набор состоит из набора свойств оборудования до и после определённого, задаваемого момента времени. Данные до этого момента времени соответствуют истории развития состояния оборудования. Данные после этого момента времени соответствуют остаточному ресурсу. Набор целевых данных состоит только из истории развития состояния оборудования. При этом исходный и целевой наборы соответствуют разным единицам однотипного оборудования и определяются одним и тем же частным вероятностным распределением, присущим для рассматриваемого типа оборудования. Решаемой в исследовании задачей являлось отыскание такой функции, которая дополнит целевой набор данных набором свойств, соответствующих остаточному ресурсу по характеристикам распределения, определяемым исходным набором. Длина набора свойств, соответствующего остаточному ресурсу, в целевом наборе данных, соответствует оставшемуся времени жизни оборудования.

Для решения поставленной задачи исследователи использовали две нейросетевые модели: сеть долгой краткосрочной памяти (LSTM) и отраслевую состязательную сеть (DANN). Первая сеть работала с последовательностями свойств оборудования в течение небольших временных окон, из которых она выделяла характерные признаки для последующей обработки. Вторая сеть выполняла «смещение области»: на основании рассчитанных взаимосвязей между признаками состояния оборудования в исходном наборе рассчитывала набор признаков остаточного ресурса по истории развития состояния оборудования в целевом наборе.

Общая схема алгоритма показана ниже.

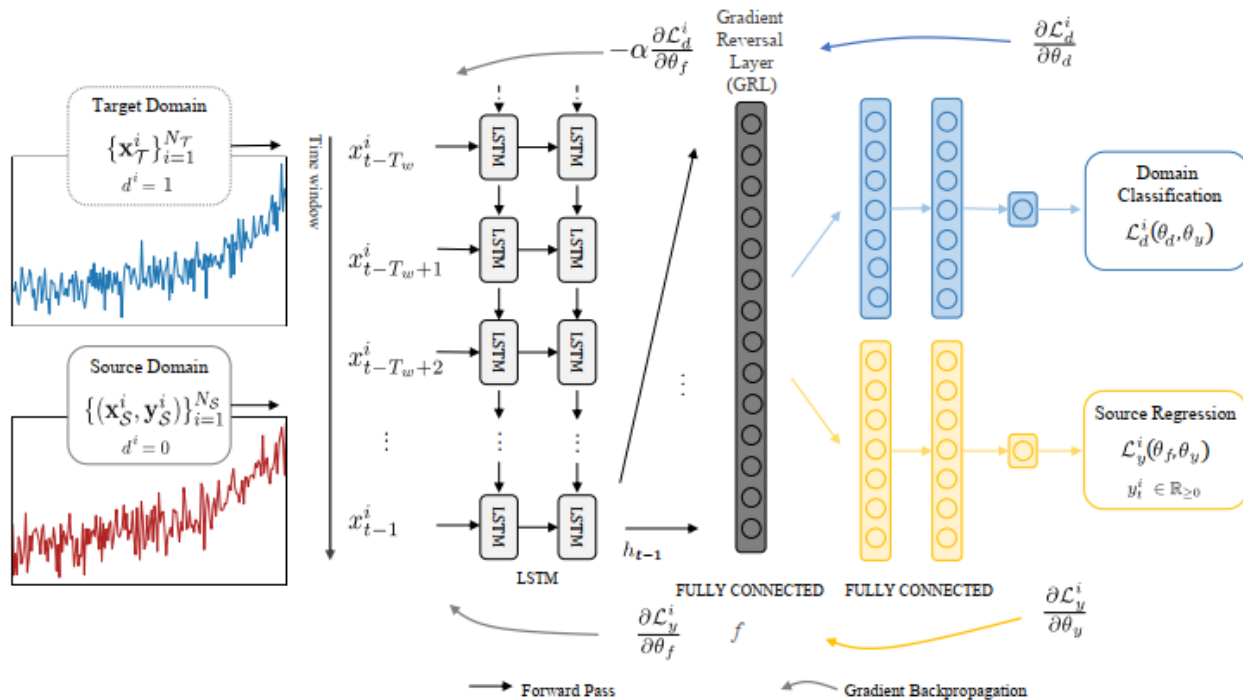
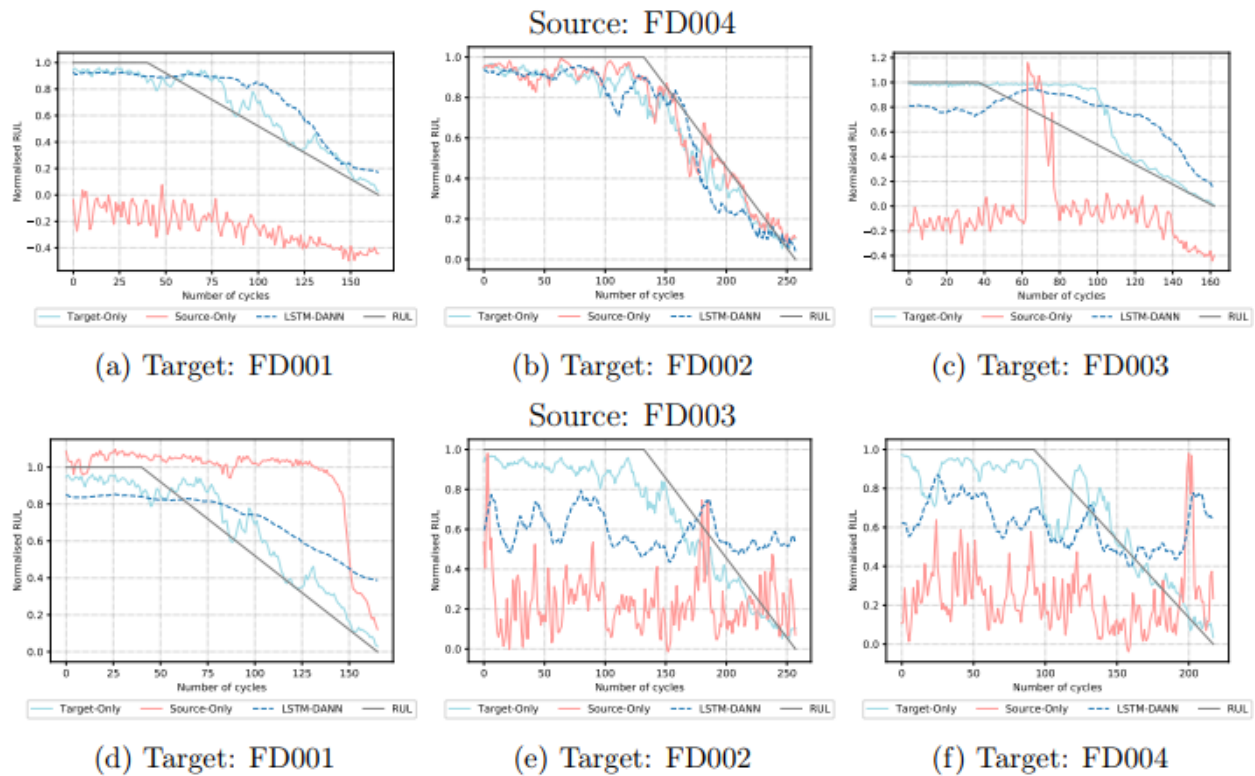


Схема алгоритма

В алгоритме данные исходного и целевого набора подаются в виде коротких временных последовательностей на входной слой LSTM-сети, где из них выделяются характерные признаки. Наборы признаков затем подаются на слой обращения градиента (GRL), после которого направляются на две DANN-сети. Первая (Domain classification) выполняет оценку принадлежности результатов предварительной обработки данных исходному отраслевому вероятностному распределению. Вторая (Source regression) выстраивает зависимости между данными об истории состояния оборудования и остаточным ресурсом, таким образом выявляя их отраслевую специфику. Использование GRL-слоя между LSTM- и DANN-сетями имеет целью изменить алгоритм обучения двух последующих DANN-сетей так, чтобы результат обучения в большей степени учитывал вероятностное распределение, присущее рассматриваемому типу оборудования.

Работа алгоритма была проверена на наборе данных, полученном моделированием работы турбореактивных двигателей летательных аппаратов. Набор состоял из четырёх выборок (FD001, FD002, FD003, FD004), каждая из которых включала в себя данные 21 измерения на ряде двигателей. Двигатели работали с разным уровнем начального износа до полной поломки. Работа алгоритма была проверена в условиях использования данных только исходного набора, только целевого набора и одновременно целевого и исходного набора. Пример результатов работы алгоритма показан ниже.



Пример результатов работы алгоритма. Верхний ряд: исходный набор FD004 и целевые наборы FD001, FD002, FD003; нижний ряд: исходный набор FD003 и целевые наборы FD001, FD002, FD004.

На каждом графике показаны аппроксимирующая прямая развития нормализованного остаточного ресурса (серая линия) и результаты использования только целевого набора (голубая), только исходного набора (розовая), исходного и целевого наборов (голубая пунктирная)

В заключении исследования указывается, что его результаты признаны удачными. Достоинствами разработанного алгоритма являются способность учитывать отраслевую специфику рассматриваемого оборудования и возможность работы с разнородными данными. Дальнейшая работа исследователей будет направлена на дополнение алгоритма инструментами работы с неполными наборами данных, снижении вычислительной сложности алгоритма и выработке подходов к оптимизации настроек алгоритма.

Опыт комплексной диагностики вытяжного вентилятора ТЭЦ

Источник: Hanumant P. Jagtap, Anand K. Bewoor, Ravinder Kumar, Failure analysis of induced draft fan used in a thermal power plant using coordinated condition monitoring approach: A case study, Engineering Failure Analysis, Volume 111, 2020, 104442, ISSN 1350-6307

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630719304984>

В статье, опубликованной в издании Engineering Failure Analysis в апреле 2020 года, группа исследователей из Индии поделилась собственным опытом диагностики и планирования ремонта вытяжного вентилятора ТЭЦ.

Работа была проведена на ТЭЦ 500 МВт Дахану в западной части Индии. Исследователи выполнили анализ критичности основного оборудования ТЭЦ, в ходе которого оценивались эффект от поломки, экологическая безопасность, частота отказов и стоимость обслуживания оборудования. К наиболее критичному оборудованию относились турбины, котлы и дутьевые вентиляторы котлов ТЭЦ.

Для проведения комплексной диагностики и планирования обслуживания дутьевых вентиляторов исследователи применили комплексный подход, схема которого показана ниже.

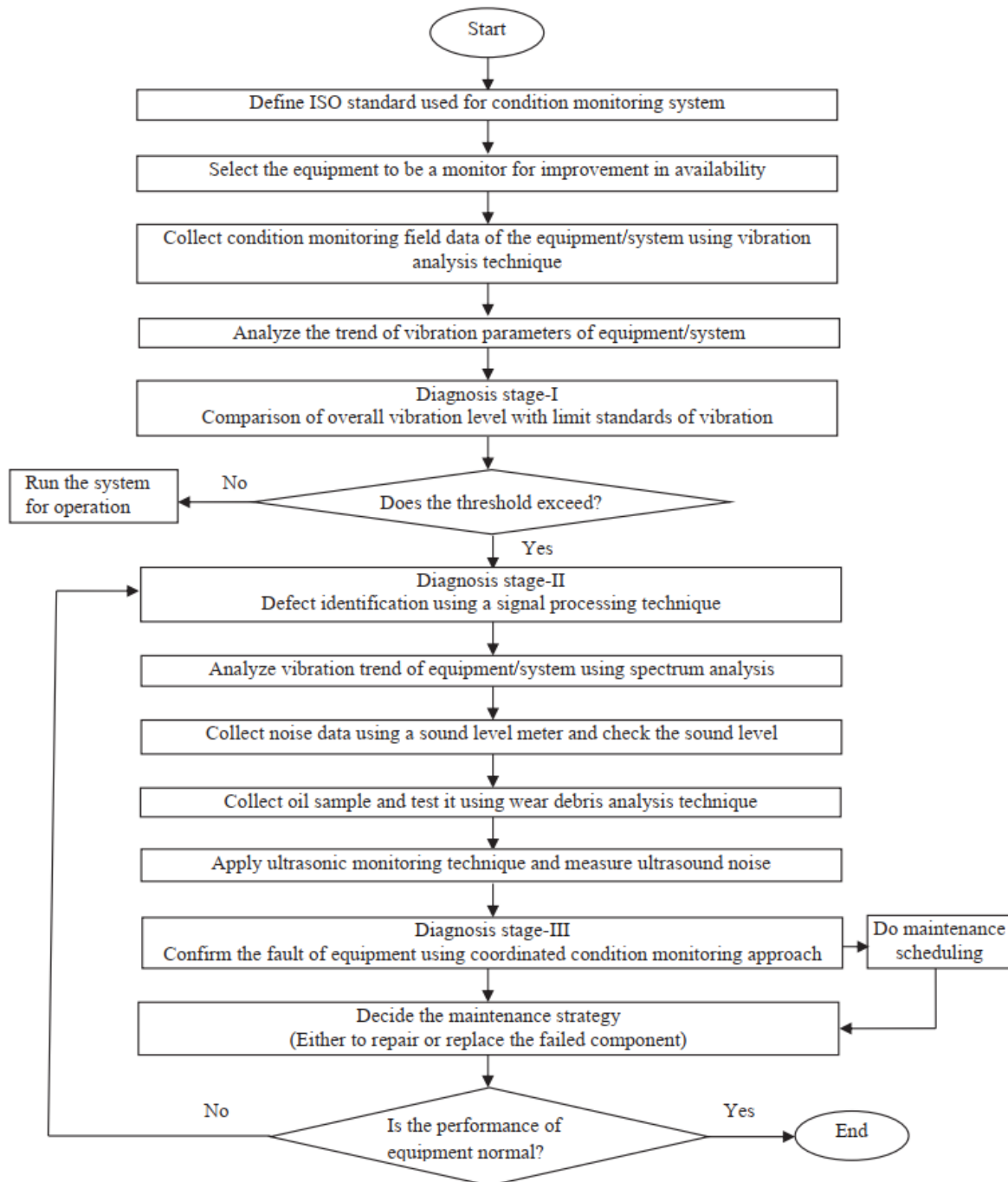
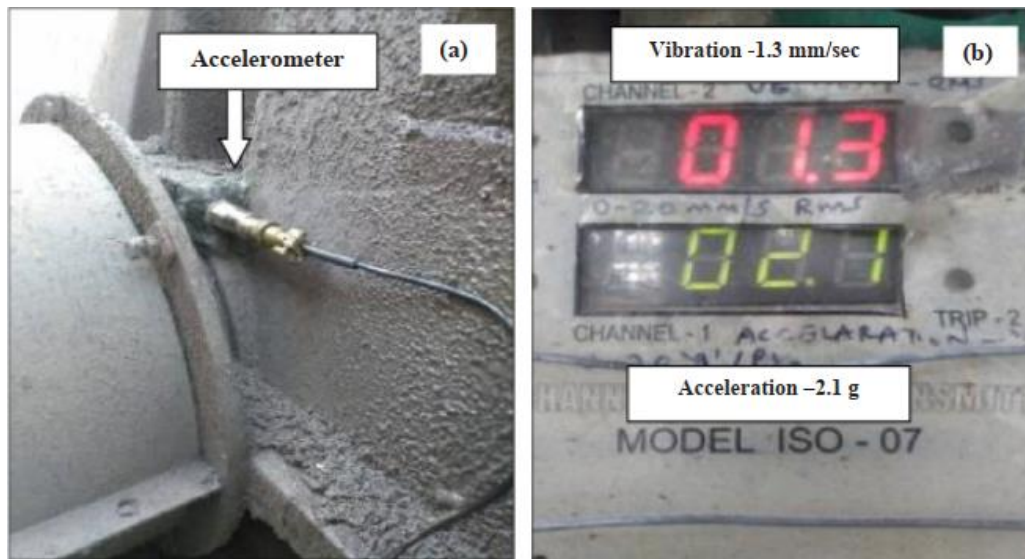


Схема подхода к комплексной диагностике и обслуживанию

Подход состоит из трёх стадий. В первой сначала определяют допустимые уровни вибрации вентилятора по ISO-10816 и проводят непрерывный контроль уровня вибрации. Если уровень вибрации не в норме, выполняют первичную оценку дефекта по спектру вибрации и приступают ко второй стадии. Во второй стадии выполняется измерение трёх дополнительных диагностических критериев: уровня акустической эмиссии (шума), загрязнённости смазочного масла продуктами износа, уровня ультразвуковой эмиссии. Затем, на третьей стадии, выполняется корректировка

заклучения о дефекте на основе дополнительных диагностических индикаторов и принимается решение о проведении мероприятий по обслуживанию или ремонту вентилятора.

На ТЭЦ Дахану установлены два котла, на каждом из которых установлены два дутьевых вентилятора, обозначаемые 1А, 1В, 2А, 2В. Результаты вибромониторинга показали, что вибрации вентиляторов 1А, 1В, 2В находились в допустимых пределах. Вентилятор 2А имел повышенный уровень вибрации. Для повышения качества контроля состояния вентилятора на нём был установлен онлайн-датчик вибрации, показанный на изображении ниже. Эксплуатация вентилятора была продолжена.



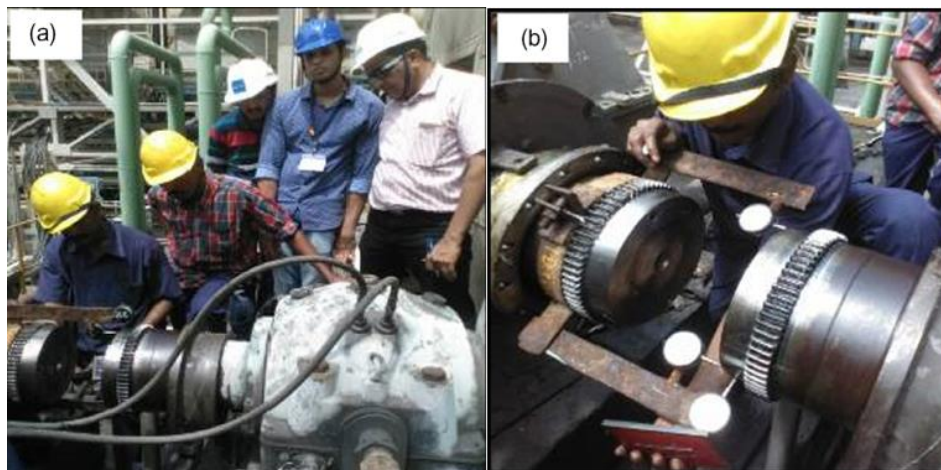
Установленный датчик вибрации: слева – общий вид, справа – показания датчика

Во время дальнейшей эксплуатации вентилятора уровень вибрации гидромуфты со стороны двигателя вентилятора увеличился до 4.2g. Проведённый после этого анализ спектра указал на наличие гармоник, характерных для дефекта подшипника.

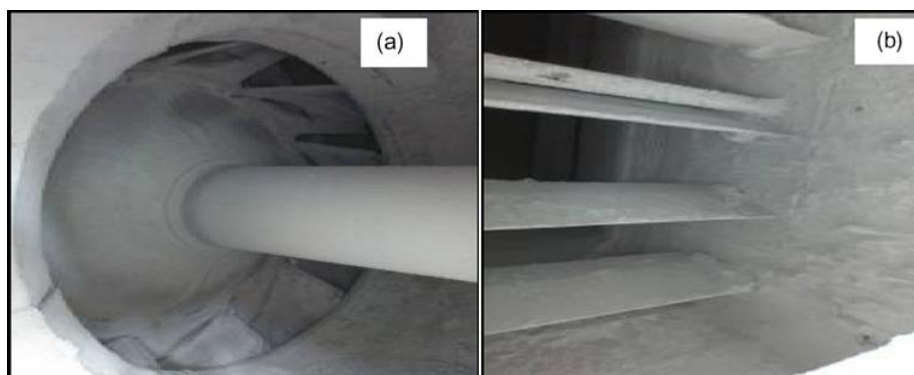
Проведённые во время второй стадии диагностики измерения акустической и ультразвуковой эмиссии и загрязнённости смазочного масла подтвердили аномальный режим работы вентилятора, вызванный плохим состоянием подшипника. Было принято решение вывести вентилятор из работы.

После вывода вентилятор был разобран и проинспектирован. В ходе обследования были обнаружены расцентровка гидромуфты и вентилятора, а также зазоры в подшипнике гидромуфты. Гидромуфта была заменена на новую, после чего вентилятор был подвергнут стендовым испытаниям, в результате которых отклонений от нормального режима работы обнаружено не было. Вентилятор после этого был возвращён в эксплуатацию.

Некоторые фотографии, сделанные во время ремонта вентилятора, показаны ниже.



Центровка гидромуфты и вентилятора



Обследование внутренней части вентилятора



Слева – стыковка валов гидромуфты и вентилятора, справа – заливка масла в гидромуфту

Аналитическая платформа контроля обледенения линий

Источник: Zhang, C., Gong, Qw. & Koyamada, K. Visual analytics and prediction system based on deep belief networks for icing monitoring data of overhead power transmission lines. J Vis 23, 1087–1100 (2020)

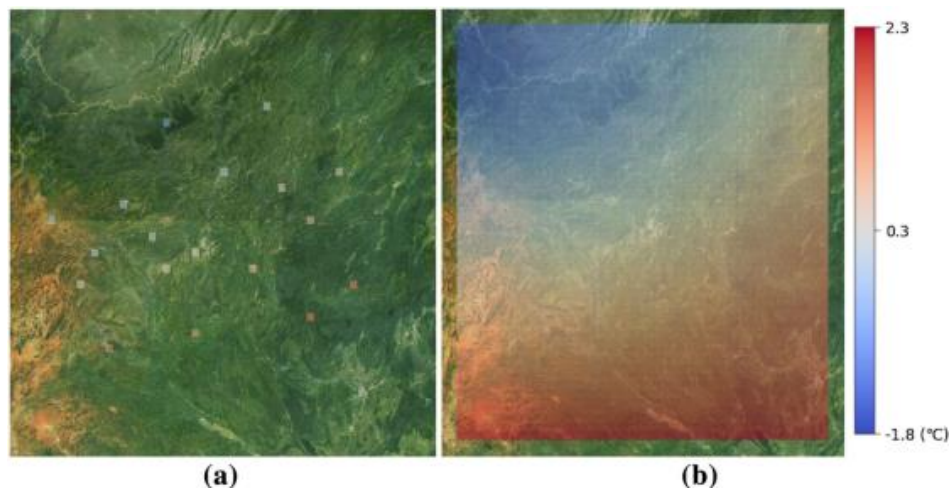
<https://link.springer.com/article/10.1007/s12650-020-00670-x>

Группа исследователей из Китая и Японии разработала проект аналитической платформы для контроля обледенения сети воздушных линий. Платформа включает в себя средства визуализации и прогнозирования состояния линий. Соответствующая статья была опубликована в издании Journal of Visualization в сентябре 2020 года.

Платформа включает в себя два основных модуля: визуализации и прогнозирования.

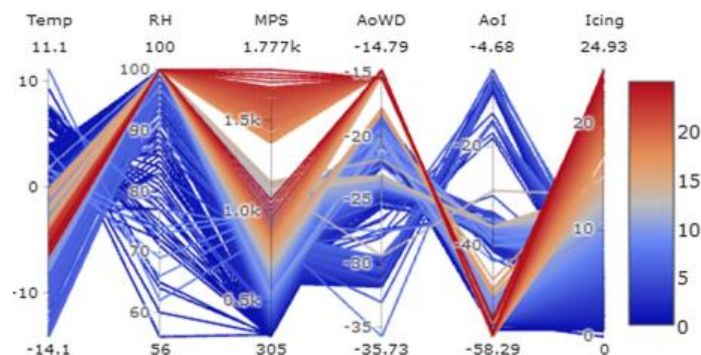
Модуль визуализации использует три основных компонента: представление данных мониторинга в виде графика с параллельными осями, двумерное представление данных мониторинга и компонент для обновления географических карт региона, используемых в качестве фонового изображения при двумерном представлении данных.

Пример двумерного представления данных температуры показан ниже.



Представление данных температуры: слева – данные датчиков, справа – представление распределения температур, полученное интерполяцией методом Криггинга

Представление данных в виде графика с параллельными осями показано ниже.



Представление данных в виде графика с параллельными осями

Основным элементом модуля прогнозирования является алгоритм, основанный на искусственной нейронной сети. Входными данными алгоритма являются исторические данные развития состояния линии, температура и влажность воздуха, механическое натяжение линии, угол наклона линии при максимальном натяжении, а также исторические данные развития состояния линии. На основании входных данных алгоритм производит расчёт толщины ледяных отложений на линии. Общая схема алгоритма показана ниже вместе.

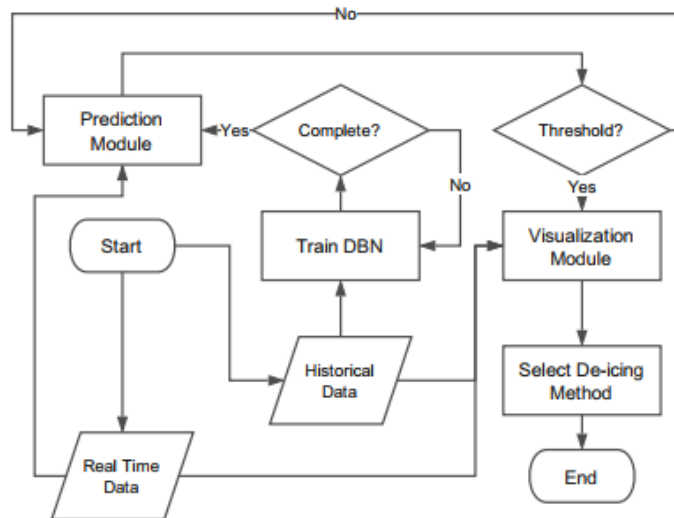
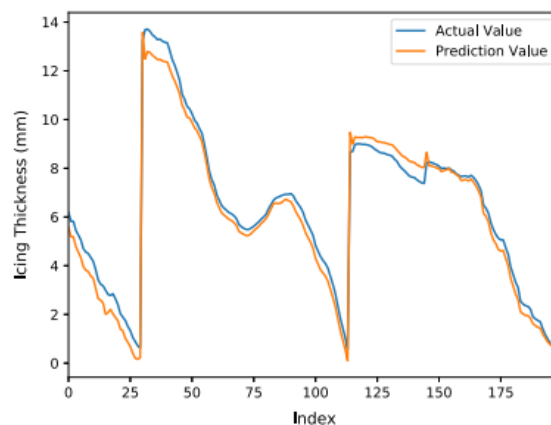


Схема алгоритма

При превышении прогнозируемой толщины ледяного отложения срабатывает сигнализация, которая отображается в модуле визуализации с указанием места планируемого возникновения отложения.

В результате проведённых испытаний и настройки алгоритма прогнозирования по историческим данным, собранным с 2013 по 2016 годы в китайской провинции Гуйчжоу, средняя точность по R^2 -критерию достигала 0,972, что соответствует примерно 0,5 мм. Пример прогнозирования толщины ледяного отложения показан ниже.



Пример прогнозирования толщины ледяного отложения. Синяя линия – действительная толщина, оранжевая – предсказанная. Горизонтальная ось соответствует индексу испытания

В то же время в заключении исследования отмечается, что точность предсказания толщины отложений более 15 мм оставалась низкой, поскольку такое количество данных с такой толщиной в общей выборке было низким. По мере накопления данных системой точность предсказания в таких случаях будет повышаться.

Метод определения ЧР по дисперсии сигнала

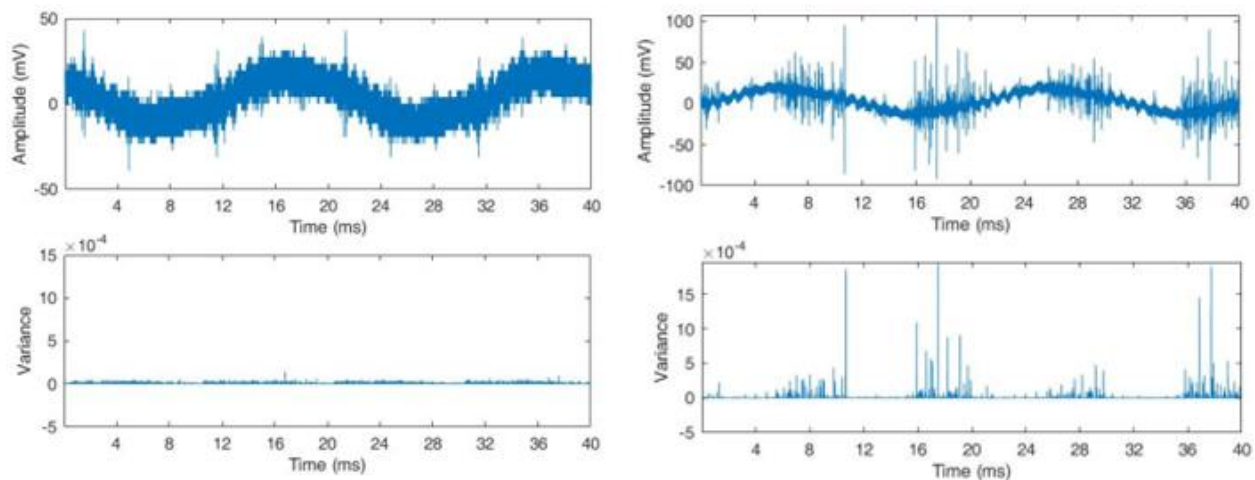
Источник: Herath, Thathsara; Kumara, Sarath; Bandara, Kapila; Wijayakulasooriya, Janaka; Fernando, Manjula; Jayanatha, Gawasinghe A.: 'Field verification of a novel and simple partial discharge detection method for generator applications', *IET Science, Measurement & Technology*, 2020, 14, (7), p. 835-843, DOI: 10.1049/iet-smt.2018.5631

<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2018.5631>

Группа исследователей из Шри-Ланки предложила метод определения ЧР, основанный на контроле математической дисперсии сигнала ёмкостного датчика. Работа авторов была опубликована в издании IET Science, Measurement and Technology в июне 2020 года.

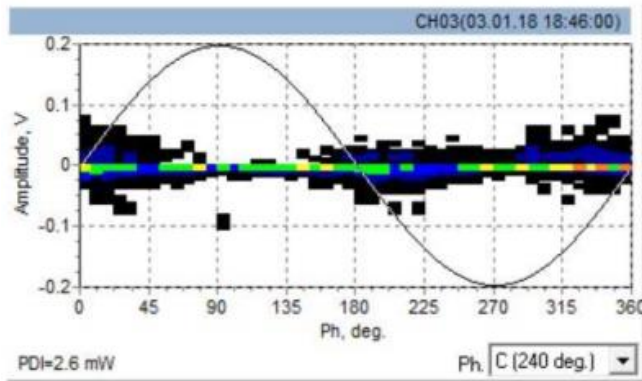
Суть предложенного метода состоит в разбиении сигнала на временные окна продолжительностью 100 нс. В каждом временном окне выполняется расчёт дисперсии как среднего значения квадратов отклонений сигнала от математического ожидания сигнала в окне. При наличии в окне импульса ЧР осциллограмма сигнала будет иметь явно выраженные пики, что будет характеризоваться высокой дисперсией. Такие временные окна помечаются как содержащие ЧР. Характеристики импульса ЧР определяются по характеристикам наибольшего пика, записанного в рамках такого временного окна.

Для проверки точности предложенного метода исследователи использовали системы мониторинга ЧР, установленные на двух ГЭС на Шри-Ланке. На обеих ГЭС были установлены однотипные генераторы 12.5 кВ, 37.5 МВт с разными сроками эксплуатации, от 3 месяцев до 36 лет. Примеры результатов, полученных при обработке сигналов датчиков ЧР на новом (без ЧР) и старом (с ЧР) генераторах показаны ниже.

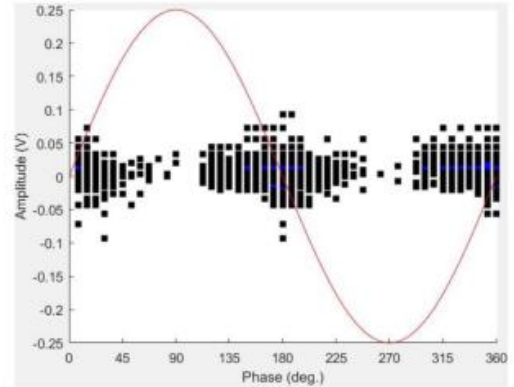


Пример применения метода: слева – сигнал без ЧР, справа – сигнал с ЧР, сверху показаны осциллограммы необработанного сигнала, снизу показаны соответствующие им осциллограммы дисперсии

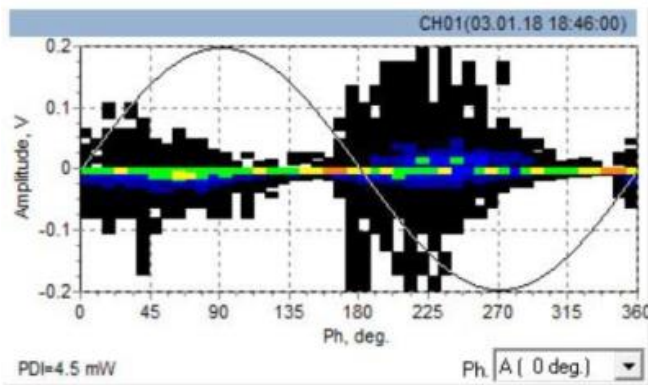
Результаты сравнения PRPD-распределений, построенных при помощи результатов метода, и при помощи установленной на ГЭС коммерческой системы контроля ЧР показаны ниже.



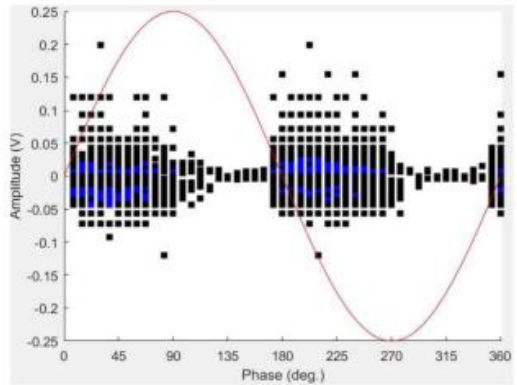
a



b



c



d

PRPD-распределения, выполненные: a-коммерческой системой на генераторе с низкими ЧР, b-предложенным методом на генераторе с низкими ЧР, c-коммерческой системой на генераторе с высокими ЧР, d-предложенным методом на генераторе с высокими ЧР

По заявлению авторов исследования, предложенный метод обладает меньшей вычислительной сложностью, чем существующие методы, основанные на анализе спектра или вейвлет-анализе. Вместе с тем, авторы признают, что одной из проблем метода является отделение ЧР от шума. В качестве одного из вариантов, для решения этой проблемы в исследовании было предложено использовать сигнал датчика ЧР, установленного на новом генераторе в качестве отсечки сигналов шума на старом генераторе. Дальнейшая работа авторов будет направлена на доработку математического аппарата метода для его применения в условиях высокого шума и множественных источников ЧР.

Исследование показателей состояния главного редуктора ветряного генератора

Источник: López de Calle K, Ferreiro S, Roldán-Paraponiaris C, Ulazia A. A Context-Aware Oil Debris-Based Health Indicator for Wind Turbine Gearbox Condition Monitoring. Energies. 2019; 12(17):3373.

<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3373>

Группа исследователей из Испании рассмотрела вопрос определения общего состояния главного редуктора ветрогенератора по совокупности рабочих параметров и показателя загрязнённости смазочного масла с учётом разных режимов работы генератора. Статья авторов была опубликована в издании *Energies* в сентябре 2019 года.

В исследовании использовались данные трёх ветрогенераторов, установленных в испанской провинции Сарагоса. Благодаря географической близости мест установки, условия окружающей среды были одинаковыми для всех трёх генераторов. Генераторы имели номинальную мощность 850 кВт, диаметр ротора 58 метров, диапазон рабочих скоростей ветра 3-20 м/с. Генераторы имели разную степень изношенности: состояние двух из них (WT1 и WT2) оценивалось как среднее с подтверждённым наличием микротрещин в механических передачах редуктора. Генератор WT3 имел высокую степень износа с дополнительным видимым износом центральной шестерни. Генераторы не подвергались мероприятиям по обслуживанию.

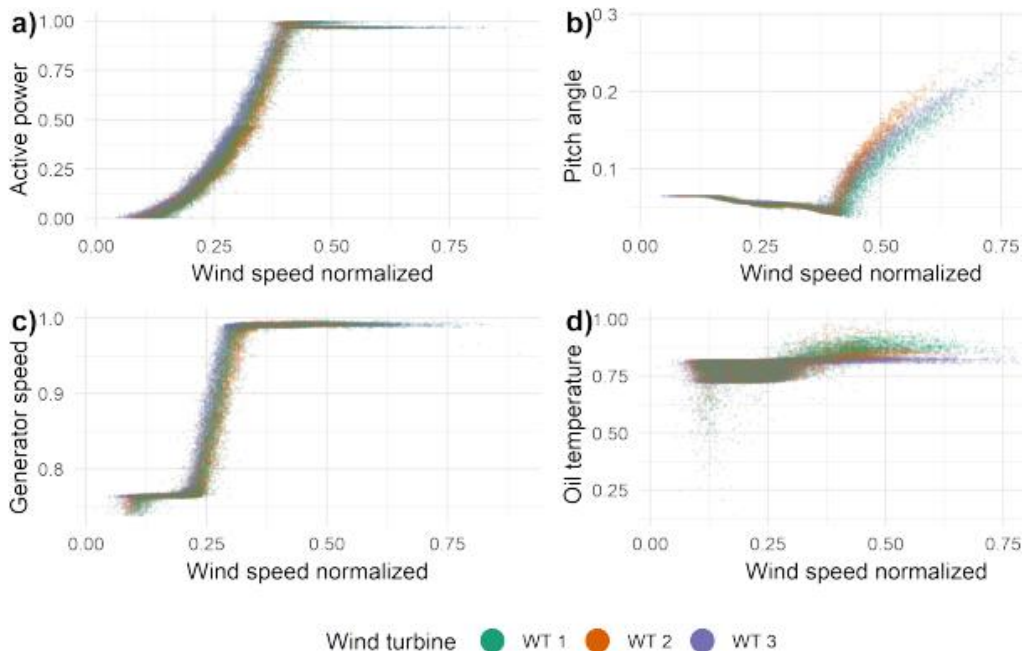
Для исследования состояния генераторов использовались следующие параметры:

- угол подъёма;
- температура редуктора;
- скорость ветра;
- скорость вращения генератора;
- активная мощность;
- чистота масла.

Чистота масла контролировалась тремя оптическими датчиками, которые периодически фотографировали массу масла и выполняли распознавание наличия на фотографии посторонних включений. Каждый из датчиков контролировал наличие загрязнений разного размера, 4, 6 и 14 мкм. Архивы данных содержали значения всех параметров за 6 месяцев.

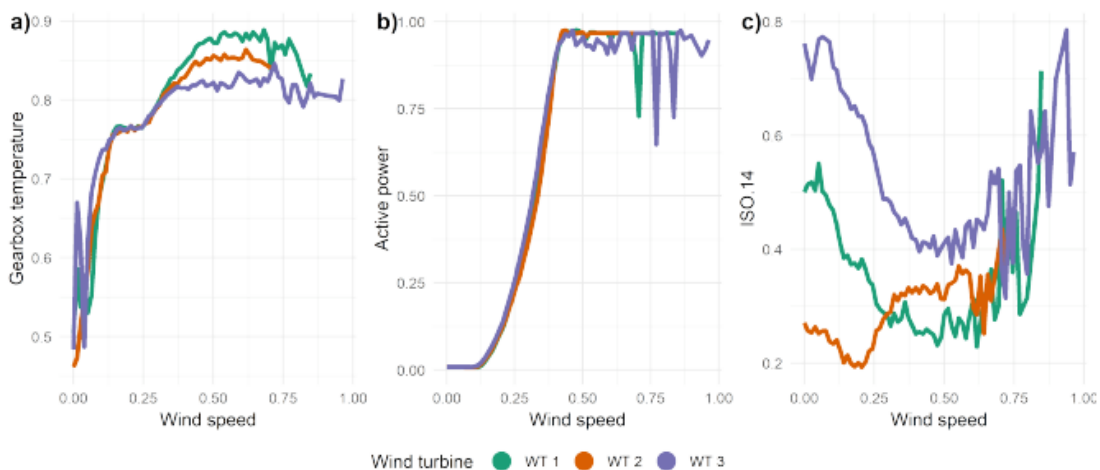
Методология исследования включала в себя 2 общих этапа: исследование взаимосвязей между параметрами работы генераторов и исследование показателей состояния генераторов в разных режимах работы.

Исследование взаимосвязей между параметрами подтвердило известные из техники взаимосвязи между основными параметрами генератора. Примеры таких взаимосвязей показаны ниже. Виды взаимосвязей для разных генераторов мало отличались друг от друга.



Подтверждённые взаимосвязи: а) между активной мощностью и скоростью ветра; б) между углом подъёма и скоростью ветра; в) между скоростью генератора и скоростью ветра; д) между температурой масла и скоростью ветра

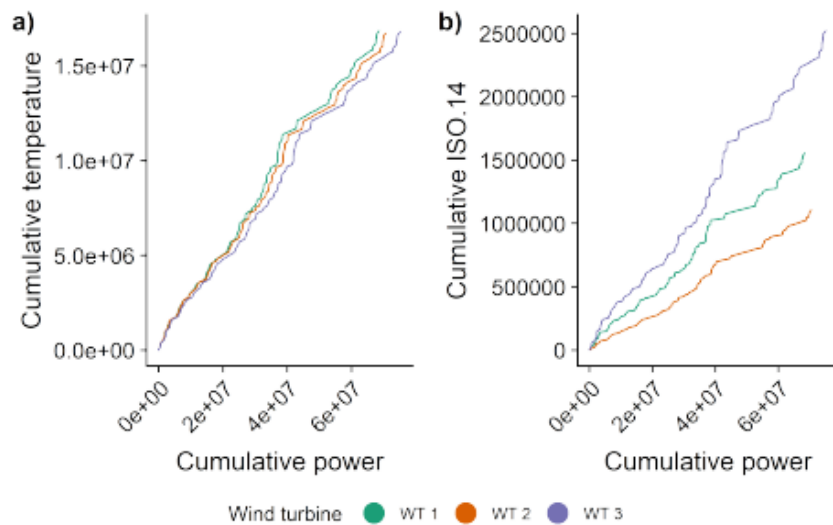
Интерес представляли показатели качества масла, которые были различны у разных генераторов как показано на рисунке ниже в сравнении с другими показателями. Качество масла представлено в виде нормализованного значения сигнала оптического датчика, настроенного на загрязнение размером 14 мкм.



Зависимость от скорости ветра: а) температуры редуктора; б) активной мощности; в) качества масла

Показатели качества масла генераторов WT1 и WT3 обладали близкой динамикой с высокой степенью образования загрязнений (в основном, продуктов износа металла) при низких и высоких скоростях ветра. Для генератора WT2 было характерно пропорциональное увеличение степени образования загрязнений при повышении скорости ветра.

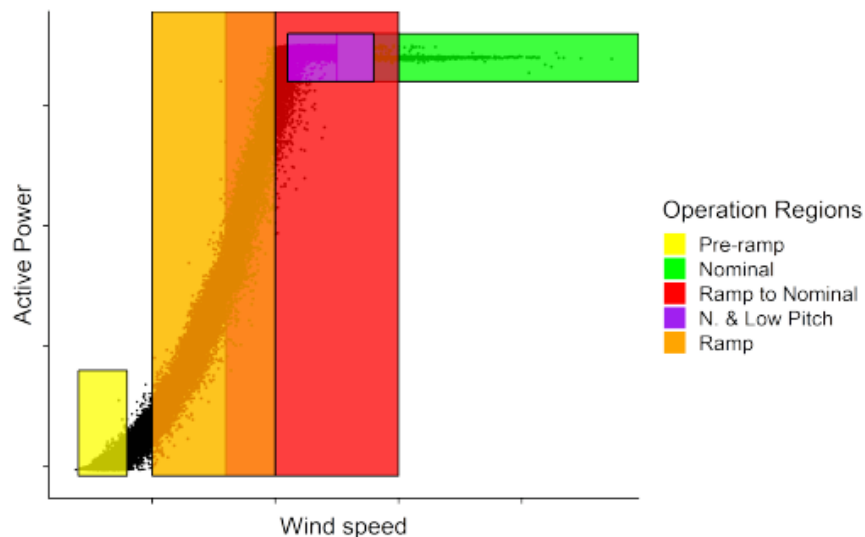
Различия в показателях качества масла были более явны при использовании кумулятивных показателей (получаемых интегрированием кривой развития показателя). Пример такой зависимости показан ниже.



Зависимость от кумулятивной мощности: а) кумулятивной температуры; б) кумулятивного показателя качества масла

Дальнейшие исследования взаимосвязей показателей работы генератора подтвердили применимость показателя качества масла для контроля состояния генератора, однако описание точной зависимости представляет сложность.

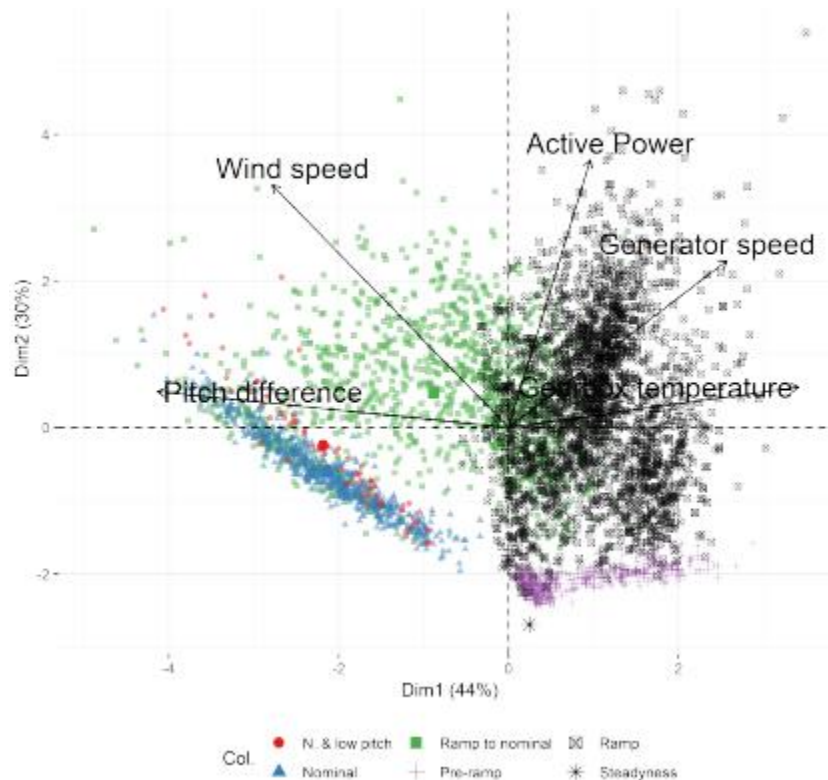
Для исследования режимов работы генератора использовалось известное из техники разделение режимов работы генератора, показанное на кривой зависимости мощности от скорости ветра ниже.



Разные режимы работы генератора

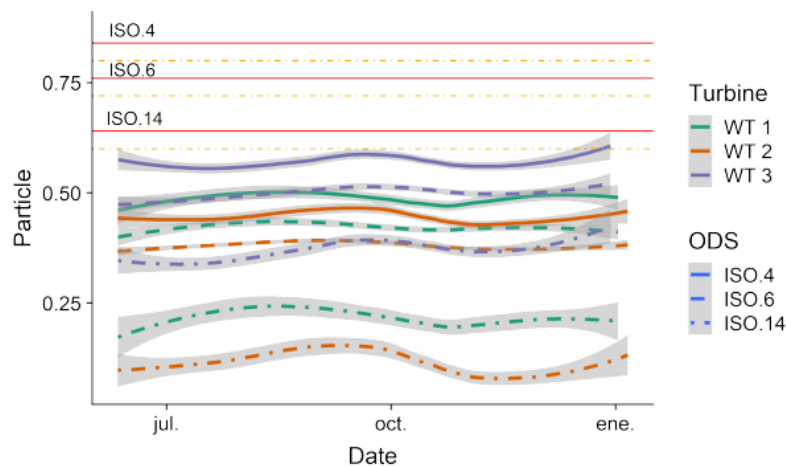
Используя взаимосвязи между рабочими параметрами при разных режимах работы, исследователи выполнили визуализацию и кластерное разделение режимов в двумерном пространстве, полученном уменьшением размерности методом принципиальных компонент из

пространства всех контролируемых признаков. Кластеры режимов работы генератора WT1 показаны ниже.



Режимы работы генератора WT1

Исследование изменения качества масла в разных режимах работы подтвердило применимость этого критерия для оценки состояния главного редуктора. Пример ниже показывает разные уровни трёх показателей качества масла (4 мкм, 6 мкм и 14 мкм) для одного и того же режима работы разных генераторов.



Изменение показателей качества масла генераторов WT1, WT2, WT3 в режиме предварительного разгона (pre-атр)

В заключении исследования указывается, что полученные результаты будут использоваться при дальнейшей разработке методов оценки состояния ветрогенераторов. Использование большего диапазона данных также может повысить общую точность метода. Включение данных вибрации в состав диагностических характеристик может повысить точность диагностики до конкретного дефектного компонента. Авторы также высказывают убежденность, что использование оптических датчиков загрязнённости масла найдёт более широкое применение для диагностики ветрогенераторов.

Разработка хроматографа с детектором на основе твёрдооксидного топливного элемента

Источник: Jingmin Fan, Chenyang Fu, Hao Yin, Yu Wang, Qinji Jiang, *Power transformer condition assessment based on online monitor with SOFC chromatographic detector*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 118, 2020, 105805, ISSN 0142-0615

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061519331047>

Группа исследователей из Технического университета Гуанчжоу и подразделения государственной электросетевой корпорации Китая в провинции Хунань разработали газовый хроматограф для онлайн-измерения концентраций растворённых в трансформаторном масле газов, использующий детектор на основе твёрдооксидного топливного элемента (SOFC). Работа авторов была опубликована в издании *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* в июне 2020 года.

Схема разработанного хроматографа показана ниже.

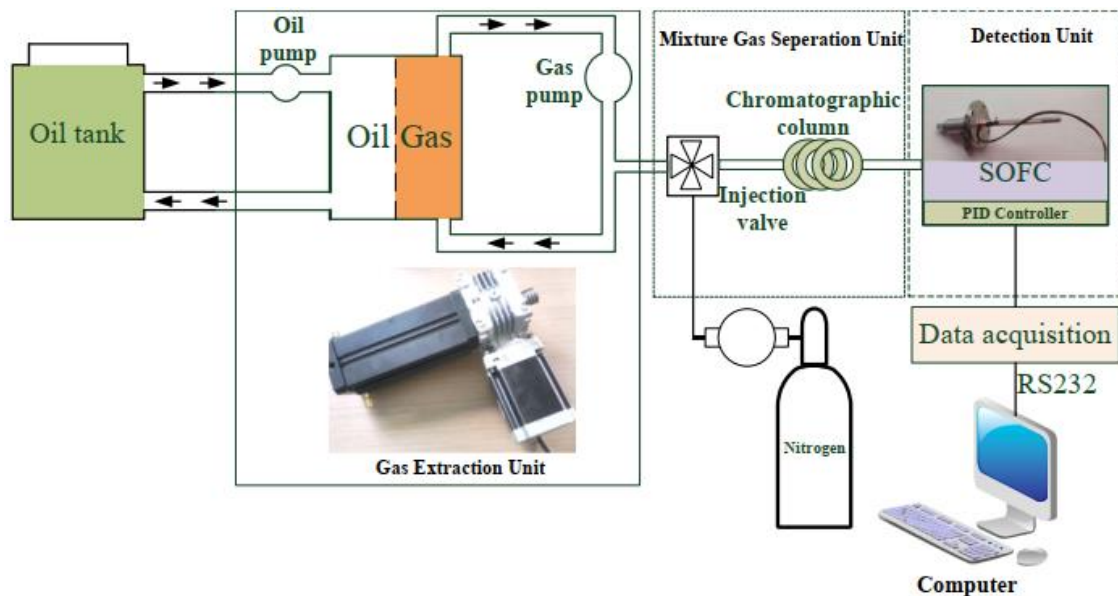


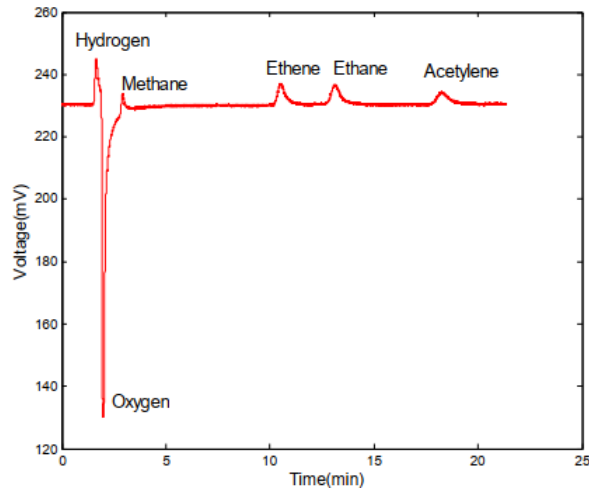
Схема хроматографа

В хроматографе используется вакуумная экстракция газов из трансформаторного масла, постоянный ток которого через хроматограф поддерживается масляным насосом. После экстракции газы вместе с газом-носителем, в качестве которого используется азот, подаются в хроматографическую колонку. Разным газам, входящим в состав газовой смеси, требуется разное время для прохождения колонки. Выходящие в разное время из колонки газы подаются в SOFC-детектор. Для поддержания постоянства температуры колонки и детектора используется высокоточный ПИД-регулятор. По оцифрованному сигналу детектора, содержащего отклик на все вышедшие газы (хроматограмме), установленное на компьютере программное обеспечение рассчитывает значения концентраций растворённых газов.

Применённый SOFC-детектор обычно используется для определения концентрации кислорода. Выбор исследователей в пользу использования такого типа детектора был продиктован наличием у детектора чувствительности к другим газам, включая водород, оксиды углерода и углеводороды, а также дешёвизной детектора.

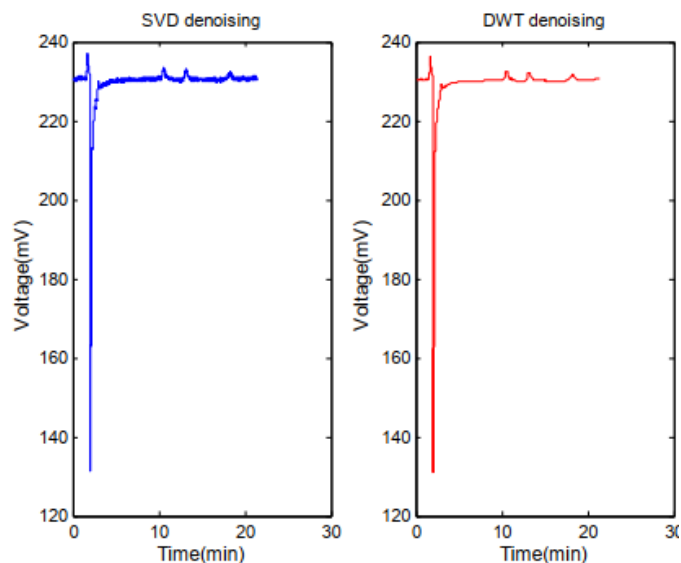
Согласно разработанной исследователями математической модели детектора, расчёт концентраций растворённых газов выполняется напрямую по параметрам хроматограммы, в первую очередь по времени начала и окончания пика каждого газа. Такой подход отличается от стандартного подхода с определением высоты или площади пика на хроматограмме, что, в свою очередь, уменьшает эффект влияния дрейфа базовой линии и позволяет не проводить периодическую калибровку хроматографа.

Исследователи также отдельно рассмотрели вопрос снижения шума в записанной хроматограмме. Пример полученной исследователями необработанной хроматограммы, содержащей шум, показан ниже.



Пример необработанной хроматограммы

Для удаления лишних шумов использовались несколько методов. Примеры очере результатов очистки хроматограмм показаны ниже.



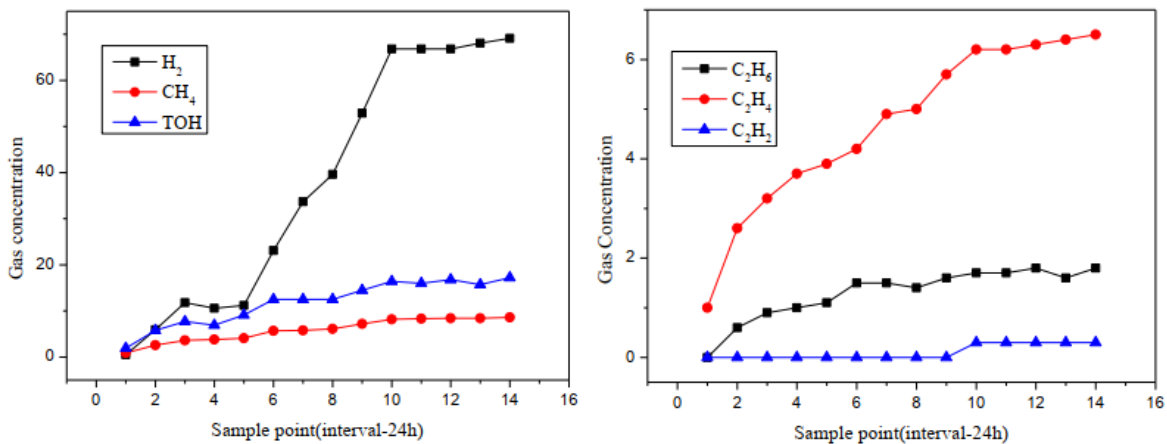
Очищенные двумя разными методами от шума хроматограммы

Опытный образец хроматографа был запущен в опытную эксплуатацию на одном из энергопредприятий Китая. Вид установленного хроматографа показан на изображении ниже.



Опытный образец хроматографа

Тренды развития концентраций растворённых газов, определённые хроматографом, показаны ниже.



Тренды развития концентраций

В заключении исследования указывается, что результаты опытной эксплуатации были признаны успешными.

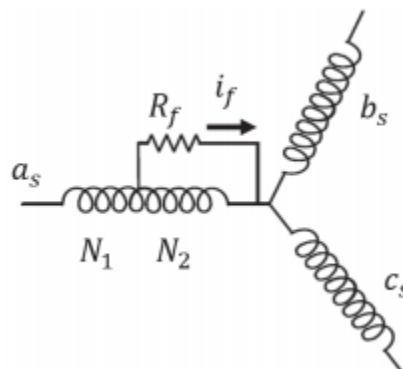
Определение короткозамкнутых витков в синхронных двигателях с постоянными магнитами при помощи анализа питающего напряжения

Источник: G. Ahn, J. Lee, C. H. Park, M. Youn and B. D. Youn, "Inter-turn Short Circuit Fault Detection in Permanent Magnet Synchronous Motors Based on Reference Voltage," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 245-250, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864924.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864924>

На прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives группа исследователей из Сеульского университета в Южной Корее опубликовала статью, посвящённую методу определения короткозамкнутых витков в синхронных двигателях с постоянными магнитами. Суть метода состоит в преобразовании питающего напряжения DQZ-тензором, являющимся модифицированной формой вектора Парка, и последующем выделении характеристик, указывающих на степень развития дефекта в двигателе.

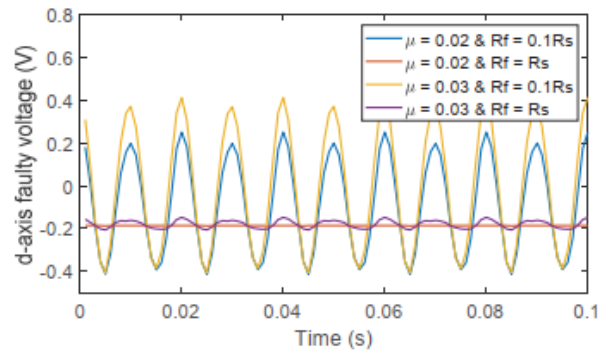
При разработке метода исследователи использовали показанную на рисунке ниже модель двигателя с замкнутыми витками в одной из обмоток.



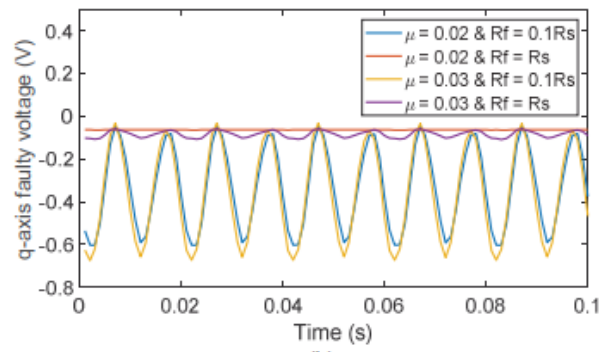
Модель двигателя с короткозамкнутыми витками

Исследователи получили аналитическое выражение фазного напряжения двигателя, учитывающее относительное число и сопротивление замкнутых витков. Применяв к напряжению DQZ-преобразование, исследователи получили аналитическое выражение для преобразованного dqf-напряжения, состоящего из d- и q-компонент. Dqf-напряжение является периодическим и характеризуется постоянным (DC) компонентом и набором гармоник. Для описания степени развития дефекта исследователи использовали значения постоянного компонента и второй гармоники dqf-напряжения.

Для проверки предложенного метода исследователи использовали собранную в Matlab Simulink модель двигателя. Ниже показаны примеры расчётов d- и q-компонент dqf-напряжения с разным относительным числом замкнутых витков (μ , отношение числа замкнутых витков к общему числу витков), сопротивлением статорной обмотки R_s , сопротивлением замкнутых витков R_f .

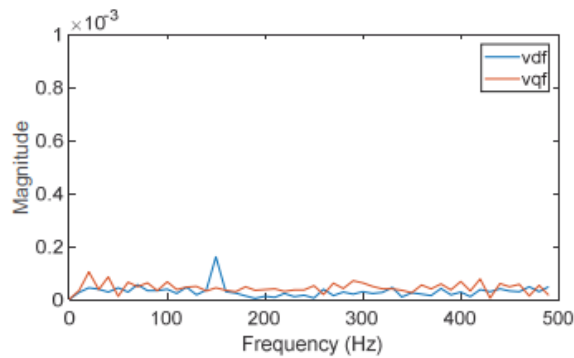


(a)

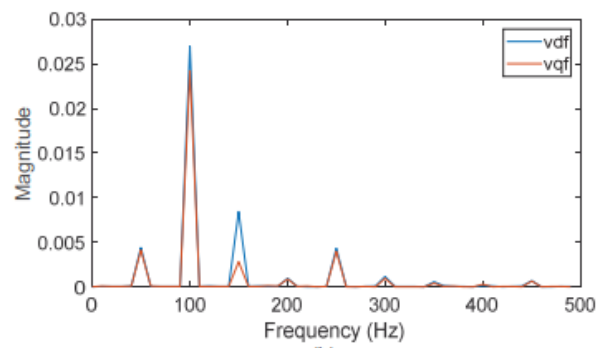


(b)

Осциллограммы рассчитанных d (выше) и q (ниже) компонентов при разных настройках дефектов



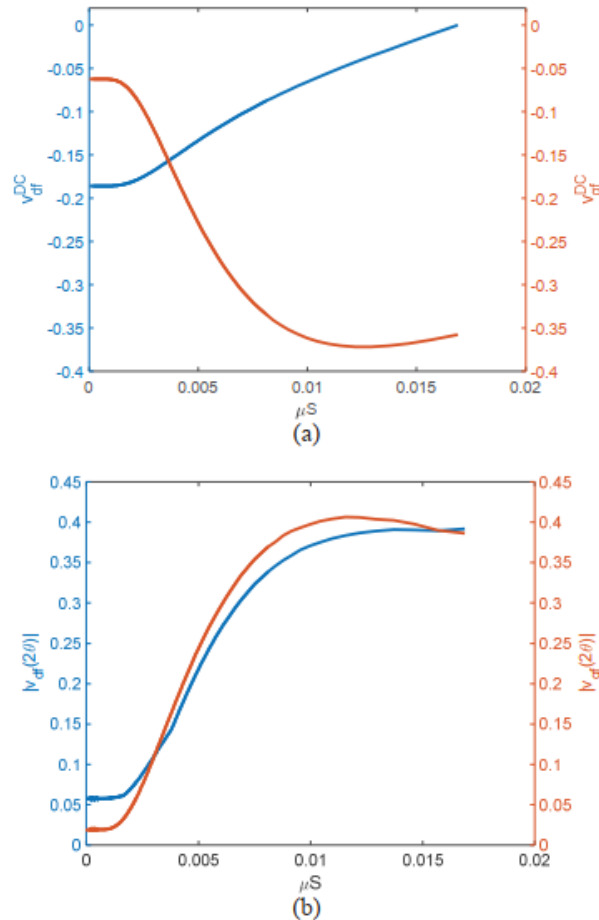
(a)



(b)

Спектры рассчитанных d - и q -компонентов при разных настройках дефектов: выше - $\mu=0,01$, $R_f=R_s$; ниже - $\mu=0,01$, $R_f=0,1 \cdot R_s$

Для выработки диагностических критериев определения состояния двигателя исследователи построили зависимости постоянных компонентов и амплитуд вторых гармоник d- и q-компонентов от критичности дефекта μS , которая определялась как произведение относительного числа короткозамкнутых витков и отношения сопротивления короткозамкнутых витков к сопротивлению обмотки. Построенные зависимости показаны ниже.



Зависимость постоянных компонентов (выше) и амплитуд вторых гармоник (ниже) d- и q-компонентов от критичности дефекта

Анализ зависимостей показал, что по уровню характеристик d-компонента можно напрямую судить о критичности дефекта. Характеристики q-компонента также, как и характеристики d-компонента, пропорционально зависят от критичности дефекта за исключением поздних стадий развития дефекта. Это позволяет использовать такие характеристики для диагностики синхронных двигателей в онлайн-режиме.

Детектирование и локализация ЧР на электрических подстанциях при помощи алгоритма самоорганизующейся карты свойств

Источник: Dipak Kumar Mishra, Sourav Dhara, Chiranjib Koley, Nirmal Kumar Roy, Sivaji Chakravorti, Self-organizing feature map based unsupervised technique for detection of partial discharge sources inside electrical substations, Measurement, Volume 147, 2019, 106818, ISSN 0263-2241

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S026322411930675X>

Группа исследователей из Индии предложила способ определения и локализации ЧР на электрических подстанциях, в основе которого лежит алгоритм самоорганизующейся карты свойств, являющийся разновидностью нейронной сети с обучением без учителя. Статья авторов была опубликована в издании Measurement в декабре 2019 года.

Общая схема предложенного метода показана на изображении ниже.

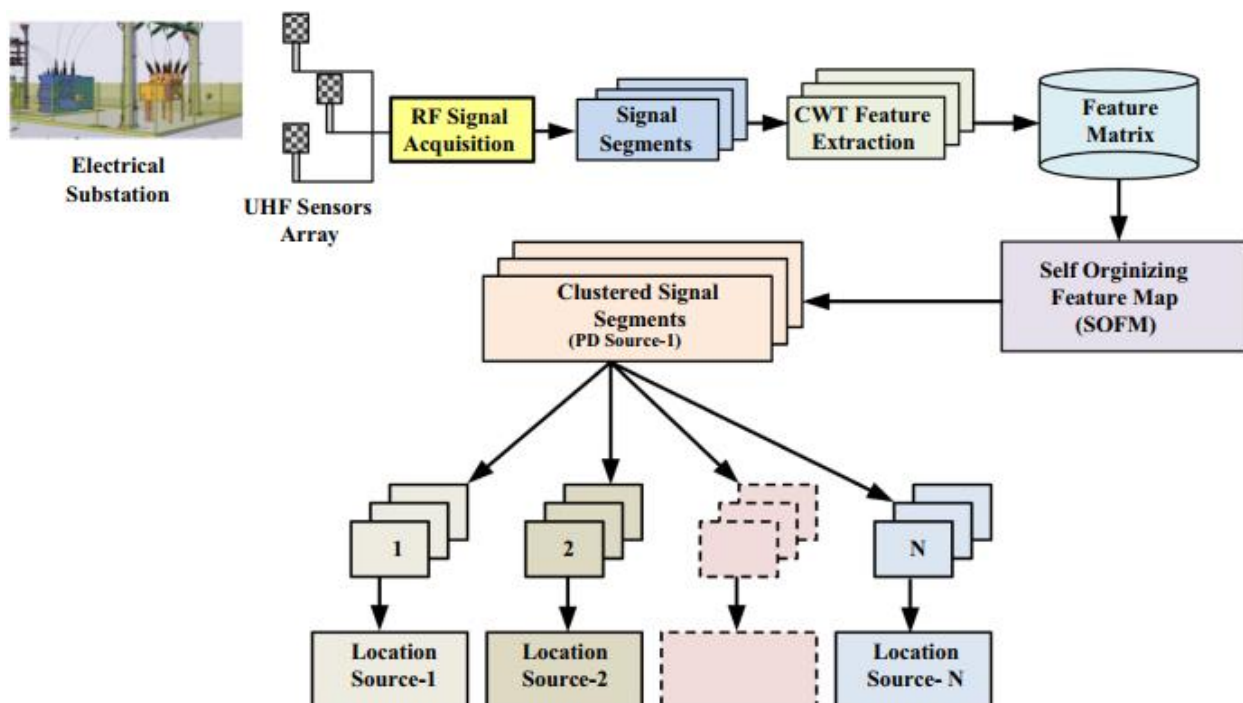


Схема метода

Входными данными являются данные, получаемые набором антенных датчиков, установленных в разных точках на подстанции. При помощи последующего вейвлет-преобразования из сигналов выделяется матрица свойств. Диапазон выделяемых свойств включает в себя: пиковые значения вейвлет-коэффициентов, временная разница между пиками, спектральная энергия и энтропия сигнала в отдельных диапазонах частот. Сформированная матрица свойств подаётся на вход модели самоорганизующейся карты свойств, которая выполняет классификацию компонентов сигнала по типам источников. После классификации выполняется восстановление осциллограмм сигнала от каждого отдельного источника на каждом из датчиков и локализация методом разницы во времени (time of arrival).

Схема реализации метода показана ниже.

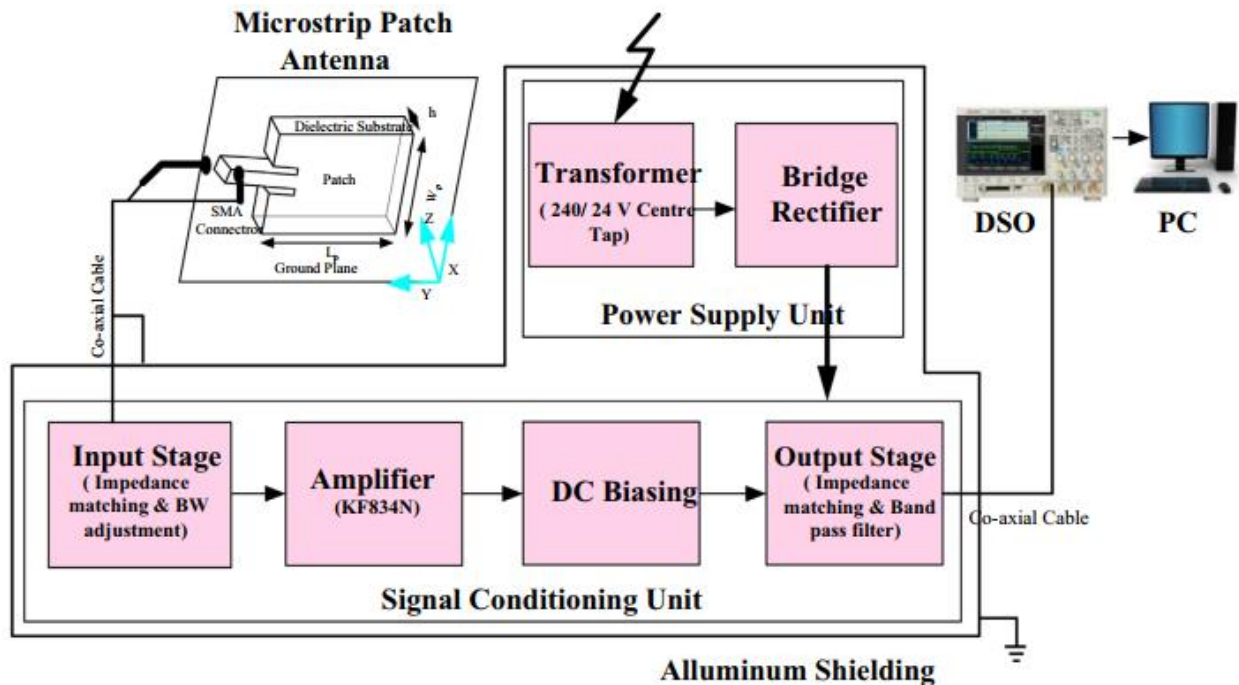
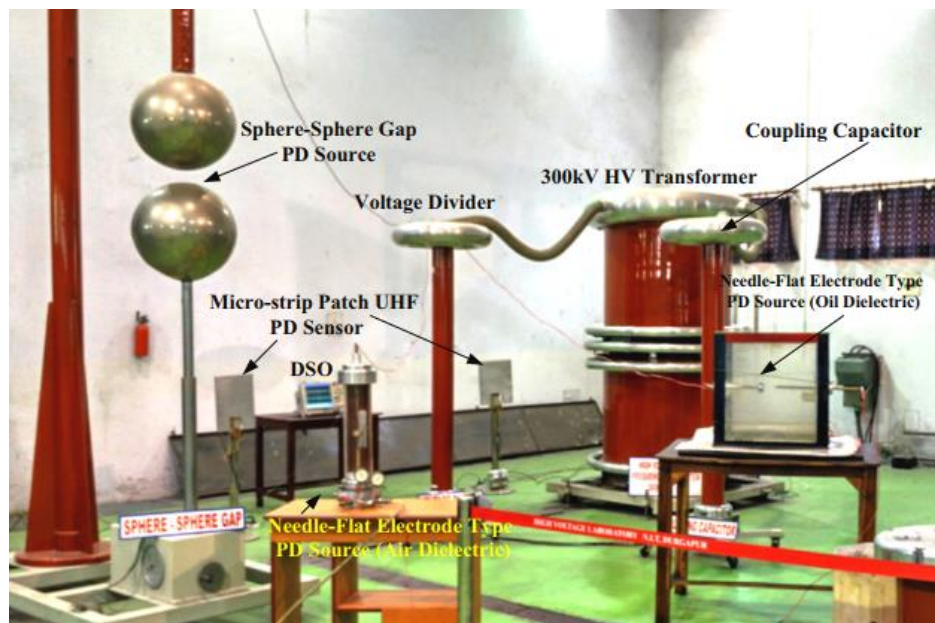


Схема реализации метода

Для сбора данных исследователи отдельно разработали датчик на основе микроленточной антенны с диапазоном частот от 200 до 800 МГц. Сигнал антенны поступал в модуль обработки (Signal conditioning unit), где выполнялось удаление шума и усиление. Обработанный сигнал записывался цифровым осциллографом (DSO) и обрабатывался в компьютере (PC).

Испытания метода проводились как в лаборатории, так и на действующей подстанции. Виды обеих испытательных установок показаны ниже.

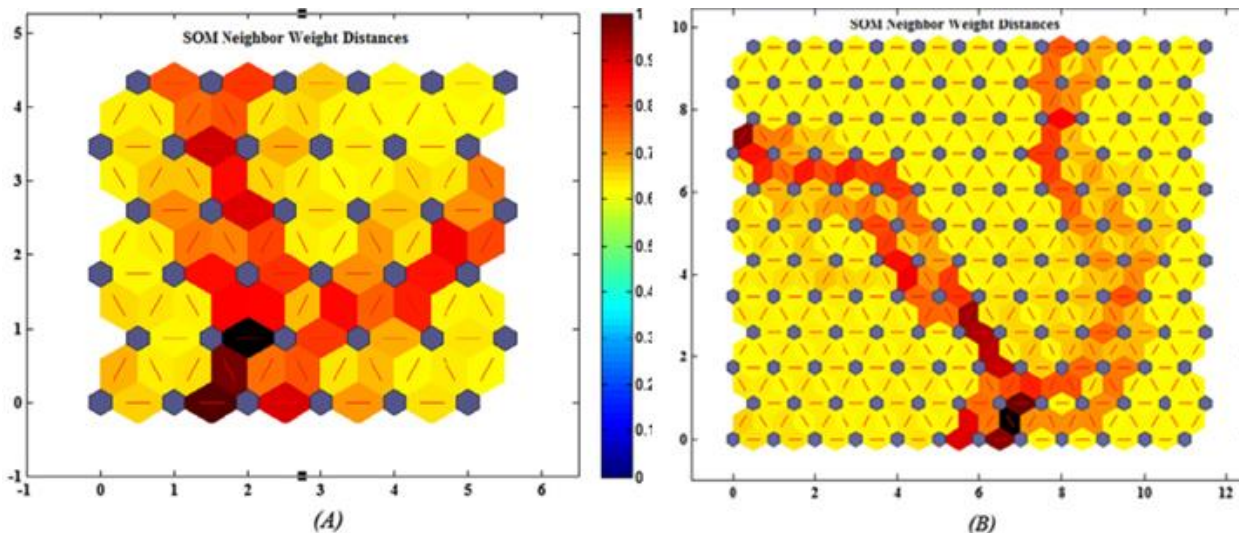


Лабораторная тестовая установка



Тестовая установка на подстанции

Пример результатов классификации источников ЧР показан ниже.



Результаты классификации источников ЧР, а) при использовании выходной матрицы 6x6; б) при использовании выходной матрицы 12x12

На результатах классификации серыми шестиугольниками показаны выходные нейроны модели самоорганизующейся карты. Связи между нейронами отмечены разными цветами. Чем темнее цвет, тем больше рассчитанное моделью расстояние между выходными нейронами. Сгруппированные кластеры выходных нейронов модели соответствуют разным источникам ЧР. На изображении выше использовались данные трёх источников, а результаты обрабатывались двумя моделями с разным количеством выходных нейронов.

Точность рассчитанных по результатам классификации положений источников ЧР не опускалась ниже 85% в лабораторных условиях и 83% в условиях подстанции.

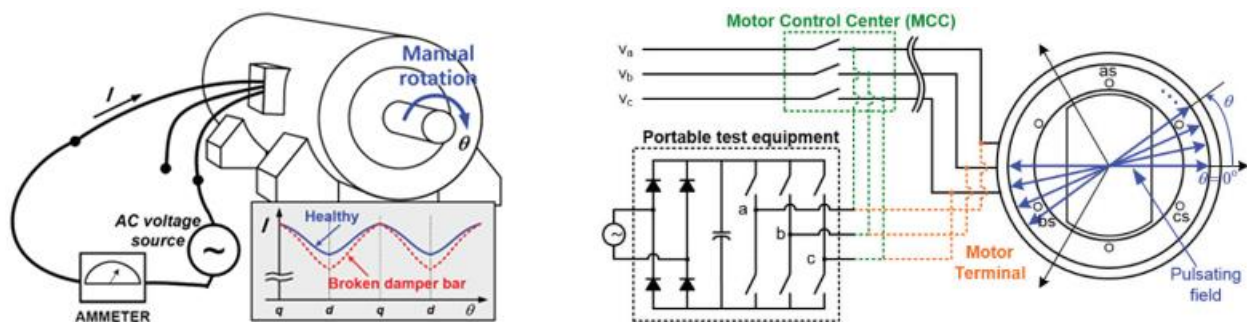
Метод мониторинга состояния стержней демпферной обмотки синхронных двигателей

Источник: J. Antonino-Daviu et al., "Electrical Monitoring of Damper Bar Condition in Salient Pole Synchronous Motors without Motor Disassembly," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 62-68, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864860.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864860>

Группа исследователей из Южной Кореи и Испании предложила способ онлайн-мониторинга дефектов стержней демпферной обмотки синхронных двигателей. Соответствующая статья была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Авторы отмечают, что дефекты стержней демпферной обмотки происходят достаточно редко по сравнению с другими типами дефектов двигателей, поэтому методам онлайн-мониторинга стержней уделяет мало внимания. Возможным подходом к диагностике могут быть методы оффлайн-мониторинга. Исследователи выделили два таких метода: в одном к двигателю прикладывают неполное рабочее напряжение, и одновременно начинают вручную вращать вал двигателя. В другом методе к двигателю прикладывается создаваемое инвертором пульсирующее напряжение с переменными характеристиками. Состояние демпферной обмотки в первом методе определяется уровнем флуктуации тока двигателя, во втором – изменением импеданса. Схемы обоих методов показаны ниже.



Схемы методов оффлайн-мониторинга: слева – с использованием неполного рабочего напряжения и ручным вращением вала, справа – с использованием пульсирующего напряжения

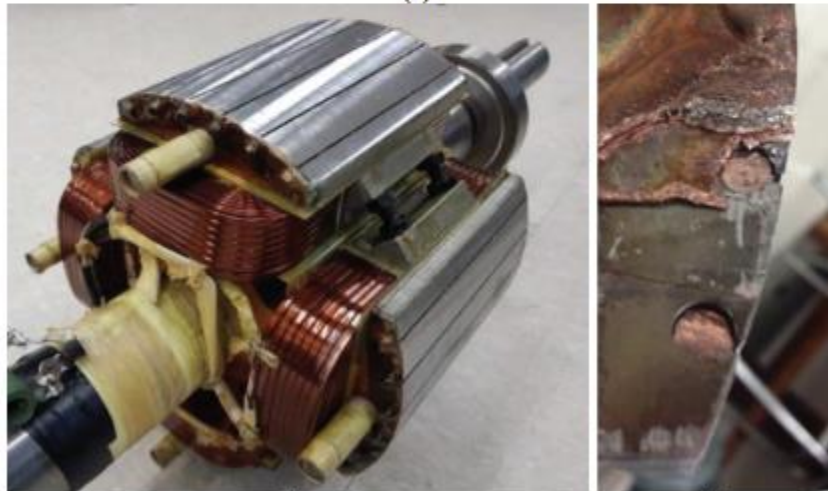
Однако применение методов оффлайн-мониторинга может представлять сложность, особенно для крупных двигателей или двигателей, работающих в агрессивных средах.

Для решения этой проблемы исследователи предложили метод онлайн-мониторинга, суть которого состоит в выделении амплитуды характерной гармоники дефекта при разгоне двигателя. Для работы двигателя с дефектами стержней демпферной обмотки будет характерно повышенное значение амплитуд по сравнению с бездефектным режимом. Такой подход позволяет обойти ограничение, связанное с нулевым значением скольжения синхронного двигателя в нормальном режиме работы. Работа двигателя с нулевым скольжением приводит к тому, что частоты характерных гармоник дефектов становятся равными частоте вращения, что делает прямой анализ спектра тока неприменимым. При разгоне двигателя скольжение не равно нулю, и гармоники дефектов можно отделить от частоты вращения.

Работа предложенного метода была проверена на лабораторном четырёхполюсном двигателе 380 В, 30 кВт, питающемся от инвертора. Дефекты стержней демпферной обмотки создавались физическим отделением стержней от ламинации ротора. Тестирование проводилось в трёх режимах: без дефектных стержней, с одним и с двумя дефектными стержнями. Изображения двигателя показаны ниже.



(a)

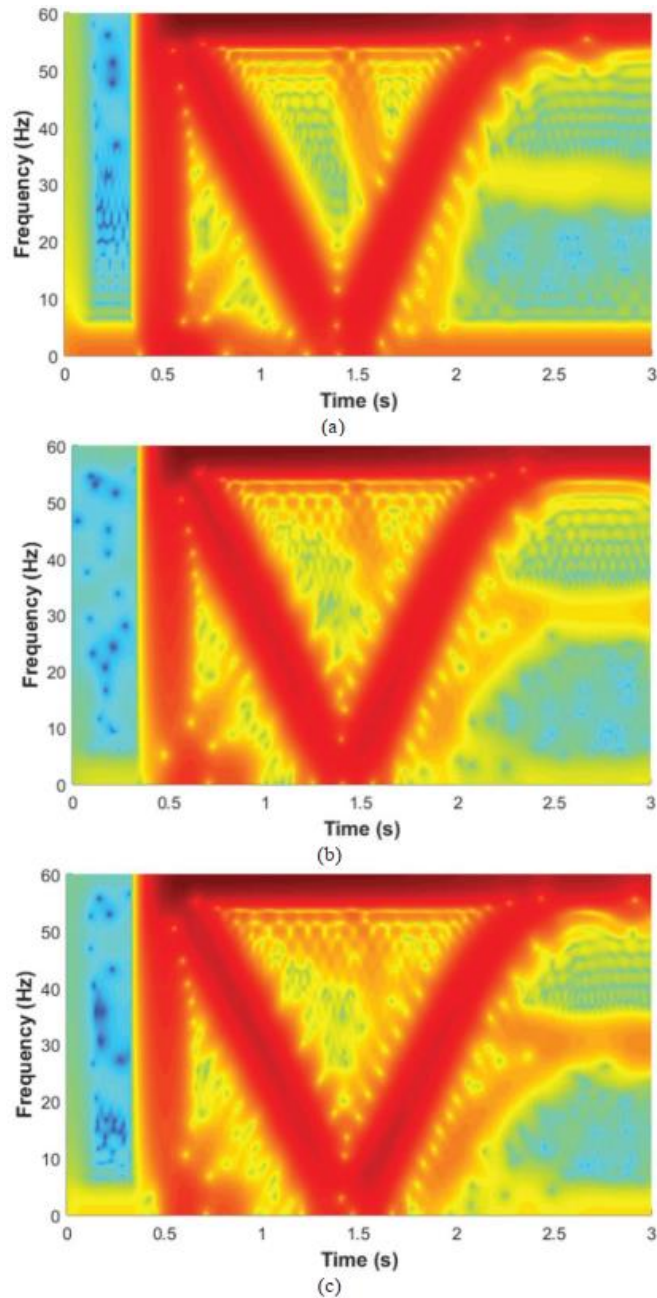


(b)

(c)

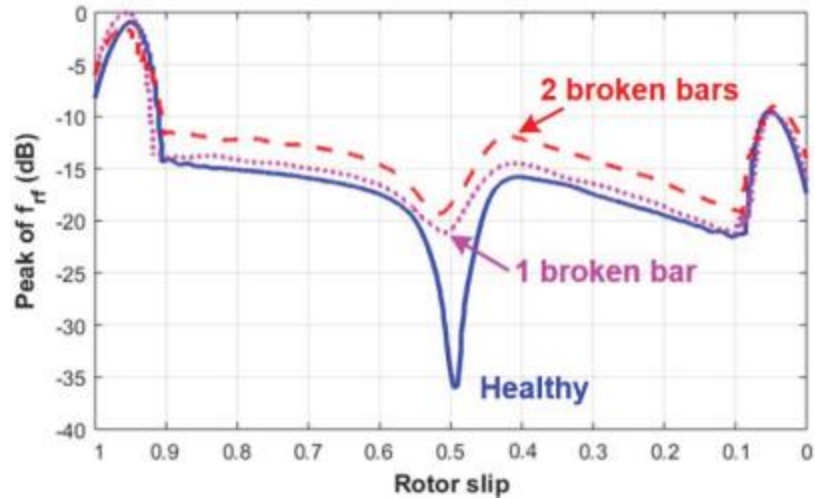
a) лабораторный двигатель; b) ротор двигателя; c) созданные дефекты стержней

Записанные при пуске двигателя время-частотные диаграммы тока показаны ниже. На диаграммах горизонтальная ось соответствует времени, вертикальная – частоте гармоник, цветом показаны амплитуды гармоник.



Время-частотные диаграммы тока двигателя при пуске, сверху вниз: с 0, 1 и 2 дефектными стержнями

Для всех режимов характерно V-образное развитие гармоника дефекта, что соответствует изменению скольжения двигателя от 0 до 1. Исследование диаграмм показало, что общий уровень амплитуды характерной гармоника повышается с увеличением количества дефектных стержней, что видно на графике развития амплитуды характерной гармоника при изменении скольжения двигателя. График показан на изображении ниже.



Зависимость амплитуды характерной гармоники от скольжения двигателя

Численное выражение предложенного диагностического критерия можно реализовать разными способами. Авторы исследования сослались на более раннюю работу, где предлагалось использовать среднее значение амплитуд в диапазоне значений скольжения от 0.1 до 0.9. При таком подходе значение критерия для исследованного двигателя составляет -18.2, -16.6 и -14.4 дБ соответственно для 0, 1 и 2 дефектных стержней.

Метод оценки состояния трансформатора по уровням и скоростям развития концентраций растворённых газов и типу развивающегося дефекта

Источник: Prasojo RA, Gumilang H, Suwarno, Maulidevi NU, Soedjarno BA. A Fuzzy Logic Model for Power Transformer Faults' Severity Determination Based on Gas Level, Gas Rate, and Dissolved Gas Analysis Interpretation. *Energies*. 2020; 13(4):1009.

<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/4/1009>

В статье, опубликованной в феврале 2020 года в издании *Energies*, группа исследователей из Индонезии рассмотрела вопрос оценки состояния трансформатора по данным концентраций растворённых в трансформаторном масле газов. Исследователи предложили метод, использующий текущие уровни скорости развития концентраций и оценку типа развивающегося дефекта.

Общая схема предложенного метода показана ниже.

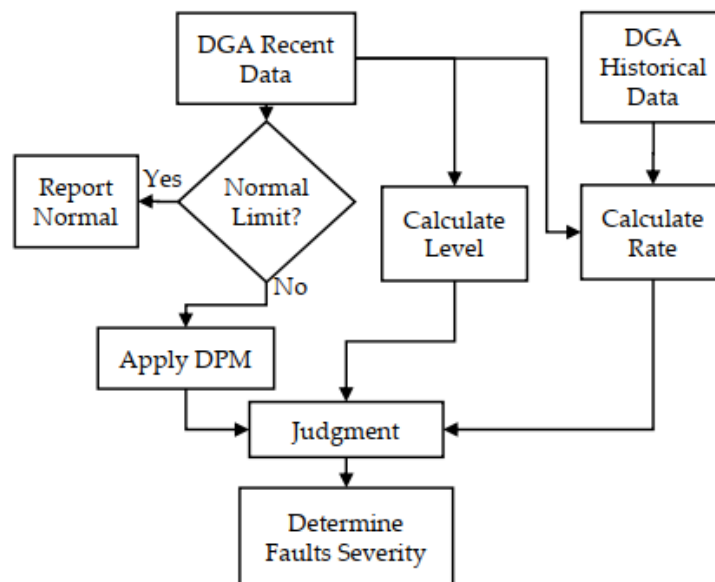


Схема предложенного метода

Результатом применения метода является комплексная оценка состояния трансформатора по одной из пяти категорий, от нормального (A, Normal) до критического (E, Very Poor). В методе сначала проверяется достижение допустимых значений текущими уровнями концентраций растворённых газов. Допустимые значения выбираются по IEC 60599-2015, IEEE C57.104-2019 или по результатам проведённого специалистами энергопредприятия расчёта. Если концентрации всех газов ниже допустимых значений, трансформатору присваивается категория A, соответствующая нормальному состоянию. Если концентрация хотя бы одного из газов превышает допустимый уровень, то затем выполняется оценка типа развивающегося дефекта по методу пятиугольника Дюваля (DPM). По типу дефекта вместе с текущим уровнем и скоростями изменения концентраций затем выполняется оценка (Judgement) состояния трансформатора. При оценке используются две модели: первая, использующая уровни и скорости изменения концентраций и вторая, использующая заключение о типе дефекта по методу пятиугольника Дюваля.

В первой модели сначала производится оценка уровней и скоростей развития концентратов по четырёхбалльной шкале, где 1 – самый низкий, 4 – самый высокий уровень. Результатом применения модели является отнесение трансформатора к одной из четырёх категорий по соотношению категорий уровня и скорости развития концентратов. Таблица соответствия категорий уровня и скорости категории трансформатора показана ниже.

Gas Level (Max)	Gas Rate (Max)	Assigned Condition
1	any	Cond.1
2	1	Cond.1
2	2-3	Cond.2
2	4	Cond.3
3	1	Cond.2
3	2-3	Cond.3
3	4	Cond.4
4	1	Cond.3
4	3-4	Cond.4

Таблица соответствия категорий уровня и скорости категории трансформатора

Схема второй модели, использующей результаты применения метода пятиугольника Дюваля, показана ниже.

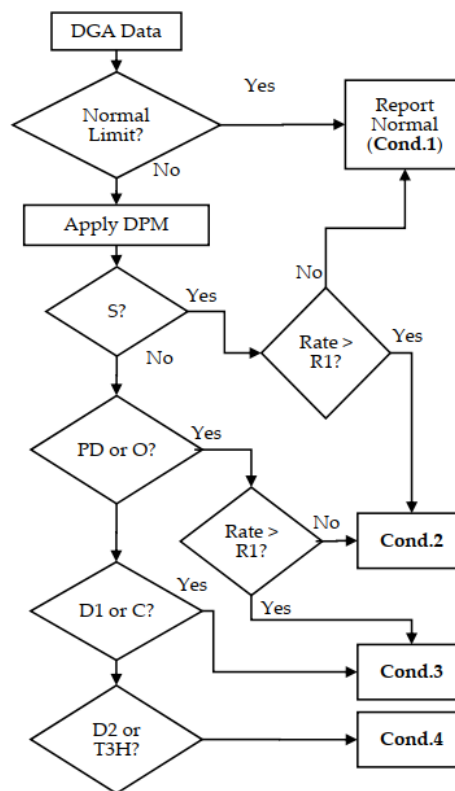


Схема второй модели

В модели используются данные о типе дефекта (S, PD, O, D1, D2, T3H или C) и допустимых значениях годовой скорости изменения концентраций растворённых газов (R1). Результатом применения модели является отнесение трансформатора к одной из четырёх категории по степени опасности развивающегося дефекта.

Оценка (Judgement) состояния трансформатора выполняется по таблице ниже. В таблице выполняется оценка состояния трансформатора по результатам первой (Gas Level and Gas Rate) и второй (DPM) моделей.

		Gas Level and Gas Rate			
		C.1	C.2	C.3	C.4
DPM	C.1	A	ND	ND	ND
	C.2	ND*	B	B	C
	C.3	ND	C	C	D
	C.4	ND	D	D	E

* ND = Not Defined.

Таблица оценки состояния трансформатора

Для каждой категории состояния трансформатора устанавливались свои рекомендации об обслуживании. Таблица рекомендаций показана ниже.

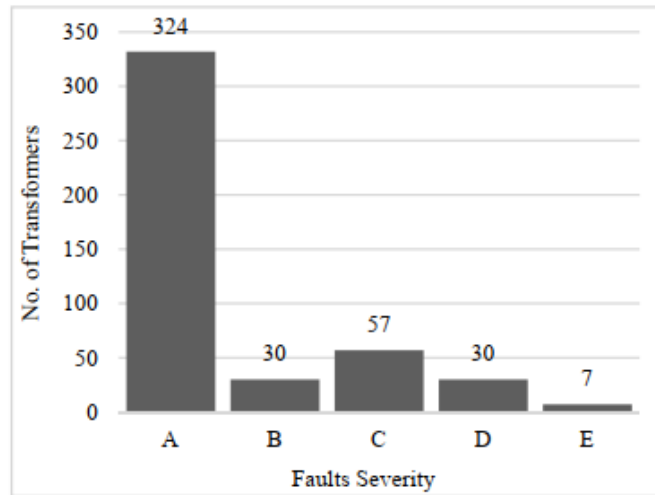
Condition	Interpretation	Recommended Action
A	Normal	- Normal operation - Yearly DGA Measurement
B	Acceptable	- Normal operation - Yearly DGA Measurement - Check generation rate
C	Need Caution	- Caution operation - Half-yearly DGA measurement - Check generation rate
D	Poor	- Extreme caution - Monthly DGA measurement - Check generation rate - Discuss with manufacturer - Check electrical tests to confirm
E	Very Poor	- Weekly DGA measurement - Check generation rate - Consider take out of service and do further investigation

Таблица рекомендаций для каждого типа трансформатора

Помимо указанного подхода, исследователи дополнительно разработали реализацию метода пятиугольника Дюваля алгоритмом опорных векторов и применили правила нечёткой логики при присвоении критериев, участвующих в оценке состояния трансформатора.

Работа метода была проверена на данных 448 трансформаторов напряжением от 70 до 500 кВ. Данные были предоставлены индонезийской электросетевой компанией PLN Transmisi Jawa Bagian

Tengah. Результаты применения метода в виде гистограммы распределения количества трансформаторов по разным категориям оценки состояния показаны ниже.



Результат применения метода

В заключении исследования указано, что полученные результаты с высокой степенью соответствуют результатам применения других методик оценки состояния.

Определение дефектов подшипников качения при помощи метода разложения по собственным формам и искусственной нейронной сети

Источник: A. Guedidi, A. Guettaf, A. J. M. Cardoso, W. Laala and A. Arif, "Bearing Faults Classification Based on Variational Mode Decomposition and Artificial Neural Network," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 391-397, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864830.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864830>

Группа исследователей из Алжира и Португалии разработала метод определения дефектов подшипников качения, в котором используются метод разложения сигнала вибрации по собственным формам и искусственная нейронная сеть. Соответствующая статья была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Общая схема предложенного метода показана на изображении ниже.

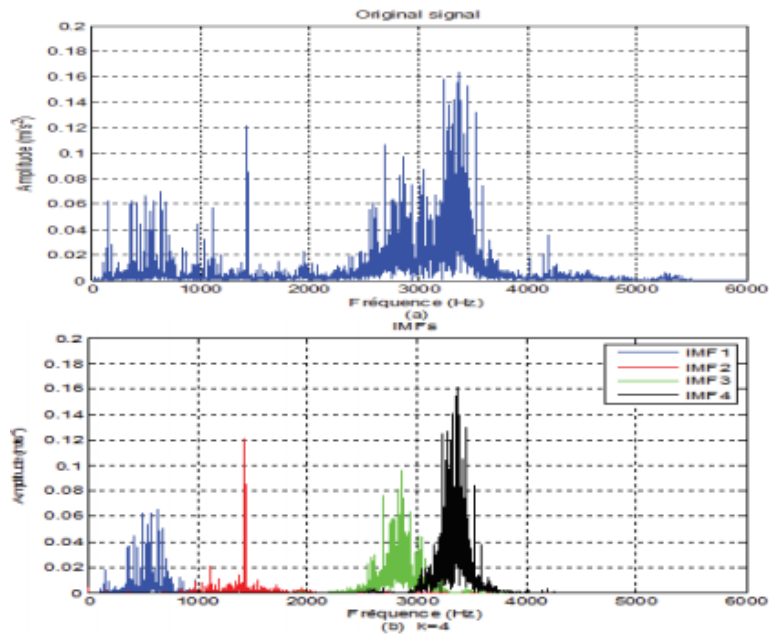


Схема предложенного метода

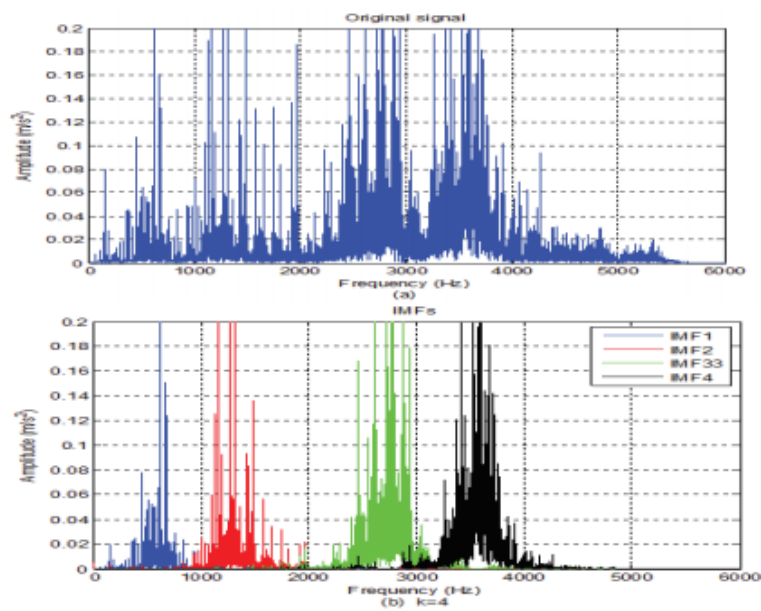
Сигнал вибрации обрабатывается методом вариативного разложения по собственным формам. Метод раскладывает сигнал на отдельные сигналы, которые называются собственными формами. Каждая собственная форма представляет собой модулированный по амплитуде и частоте сигнал в ограниченном диапазоне частот. Разложение заключается в решении задачи минимизации особой функции, определяемой собственными формами. После разложения сигнала из набора собственных форм выделяются те, которые содержат значимую информацию о дефекте. Из этих форм затем выделяется набор свойств, определяемый энергией форм. Набор свойств подаётся на вход нейронной сети, выходами которой являются оценки принадлежности состояния подшипника к одной из четырёх категорий: бездефектное, дефект тела качения, дефект внутреннего кольца и дефект внешнего кольца.

Работа метода была проверена на лабораторной установке, в которой данные вибрации двигателя собирались акселерометрами. Двигатель запускался с различными дефектами подшипников.

Примеры рассчитанных спектров собственных форм сигнала для двух типов дефектов показаны ниже. Из спектров видно, что характеристики форм различны для разных дефектов, что делает их применимыми для определения дефекта подшипника.

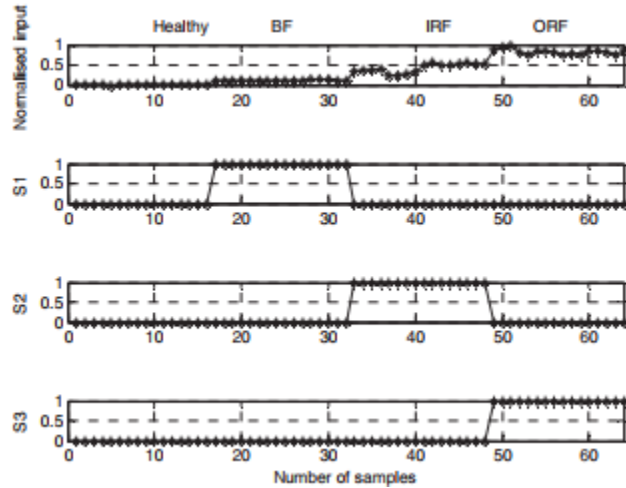


Пример спектра необработанного сигнала вибрации и спектров четырёх собственных форм сигнала вибрации при дефекте тела качения



Пример спектра необработанного сигнала вибрации и спектров четырёх собственных форм сигнала вибрации при дефекте внутреннего кольца

Для визуализации результатов применения метода и сводной оценки состояния двигателя исследователи дополнительно ввели нормализованный критерий FI, определяемый по характеристикам собственных форм, участвующих в оценке дефекта. Результаты оценки дефекта подшипника нейронной сетью в зависимости от значения нормализованного критерия показаны ниже.



Зависимость типа дефекта от значения нормализованного критерия, сверху вниз: значение сводного критерия при различных дефектах, результат определения принадлежности состояния подшипника к категории «Дефект тела качения» (S1), «Дефект внешнего кольца» (S2), «Дефект внутреннего кольца» (S3)

В заключении исследования указано, что результаты проведённых испытаний были признаны успешными и разработанный метод показал свою применимость к поставленной задаче.

Метод определения ключевых свойств для диагностики подшипников качения

Источник: A. Khlaief et al., "Feature Engineering for Ball Bearing Combined-Fault Detection and Diagnostic," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 384-390, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864899.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864899>

Группа исследователей из Франции предложила метод определения ключевых диагностических свойств для определения состояния подшипников качения. Работа была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Суть предложенного метода показана на изображении ниже.

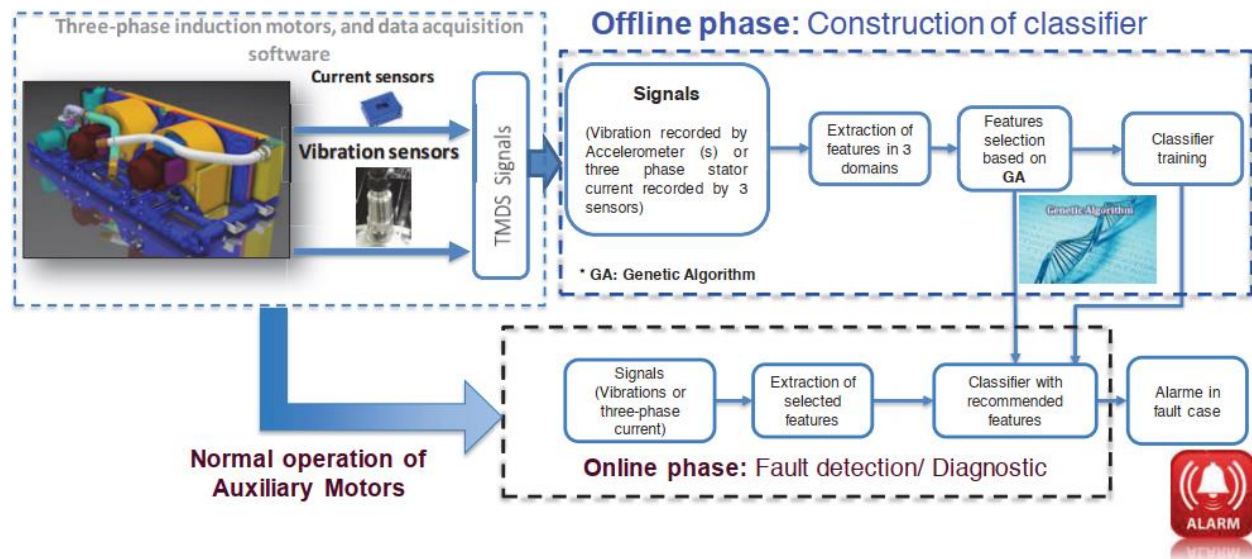


Схема метода

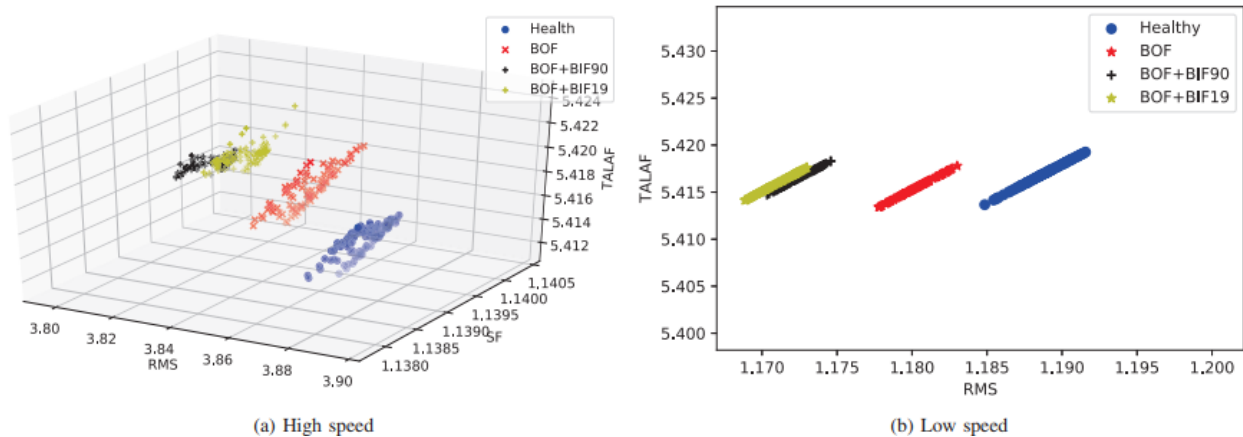
Входными данными метода являются ток и вибрация двигателя. Метод состоит из двух стадий, оффлайн и онлайн. В оффлайн-части контролируемый двигатель запускают в разных режимах работы, включая работу с разной нагрузкой, скоростью, с наличием и отсутствием дефектов. По значениям записанных при испытаниях сигналов рассчитывается большое количество свойств временного, частотного и время-частотного представления. Примерами рассчитываемых свойств являются: размах, коэффициент формы, среднеквадратичное значение, абсолютная и относительная амплитуда гармоника дефекта внешнего и внутреннего кольца, амплитуда огибающей, амплитуды коэффициентов вейвлет-преобразования. Далее к набору признаков применяют генетический алгоритм, который определяет набор признаков, наиболее полно характеризующий текущий режим работы. Набор этих признаков сохраняют и используют в онлайн-режиме для классификации состояния двигателя.

Работа метода была протестирована на испытательной установке, имитирующей работу тягового электродвигателя. Изображение установки показано ниже.



Испытательная установка

Примеры результатов испытаний показаны на графиках ниже.



Примеры результатов испытаний

В примерах показаны результаты классификации состояния двигателя при работе на высокой (слева) и низкой (справа) скорости. При работе с низкой скоростью набор характерных свойств состоял из действующего значения тока (RMS), коэффициента формы тока (SF) и синтетического индикатора TALAF, рассчитываемого по значениям среднеквадратичного отклонения, коэффициента эксцесса (куртосис) и коэффициента пика нагрузки тока. При работе на низкой скорости характерными индикаторами были TALAF и RMS. Двигатель работал без дефекта (Healthy), с дефектом внешнего кольца подшипника (BOF) со стороны привода, с одновременным дефектом внутреннего кольца подшипника со свободной стороны и внешнего кольца со стороны привода. В последнем режиме работы дефект внутреннего кольца создавался двумя способами: высверливанием отверстия под прямым углом (BOF+BIF90) и под углом 19° (BOF+BIF19) к поверхности кольца. Во всех случаях разные режимы работы двигателя соответствовали разным кластерам характеристик и легко поддавались автоматической классификации.

В заключении исследования указано, что предложенный метод признан применимым для решаемой задачи. Дальнейшая работа авторов будет сосредоточена на расширении диапазона диагностируемых дефектов. Авторы также отмечают, что метод можно использовать для построения моделей прогнозирования развития состояния двигателей.

Определение мест повреждений в сетях среднего напряжения постоянного тока при помощи спектрального анализа

Источник: Saleh, K., Hooshyar, A. and El-Saadany, E.F. (2020), *Fault detection and location in medium-voltage DC microgrids using travelling-wave reflections*. *IET Renewable Power Generation*, 14: 571-579.

<https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1049/iet-rpg.2019.0370>

Группа исследователей из Канады и ОАЭ предложила метод определения мест повреждений в сетях среднего напряжения постоянного тока, основанный на спектральном анализе сигналов бегущих волн. Статья авторов была опубликована в издании IET Renewable Power Generation в марте 2020 года.

Исследователи использовали свойство многократного отражения бегущих волн от концов линии при возникновении повреждения. Это приводит к появлению в осциллограмме токов или напряжений, регистрируемых на концах линии, периодических всплесков. Аналогичные всплески также характерны и для спектров осциллограмм. Схема предложенного метода показана ниже.

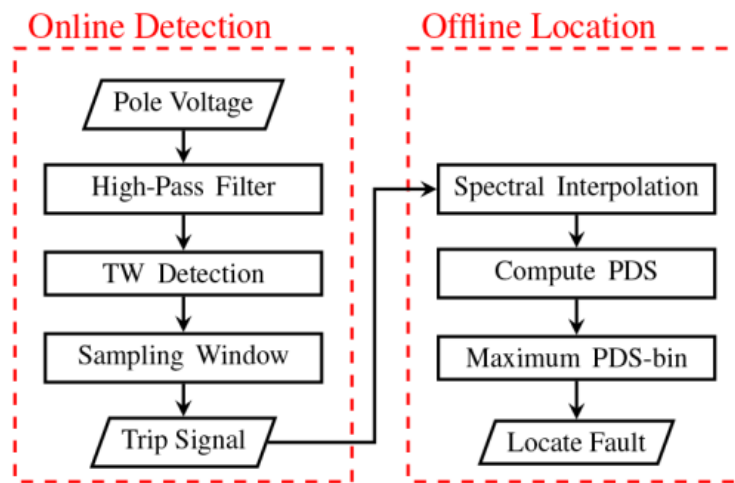
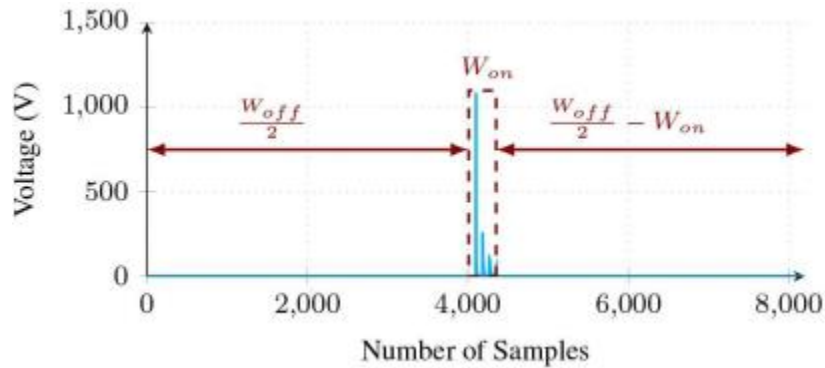


Схема метода

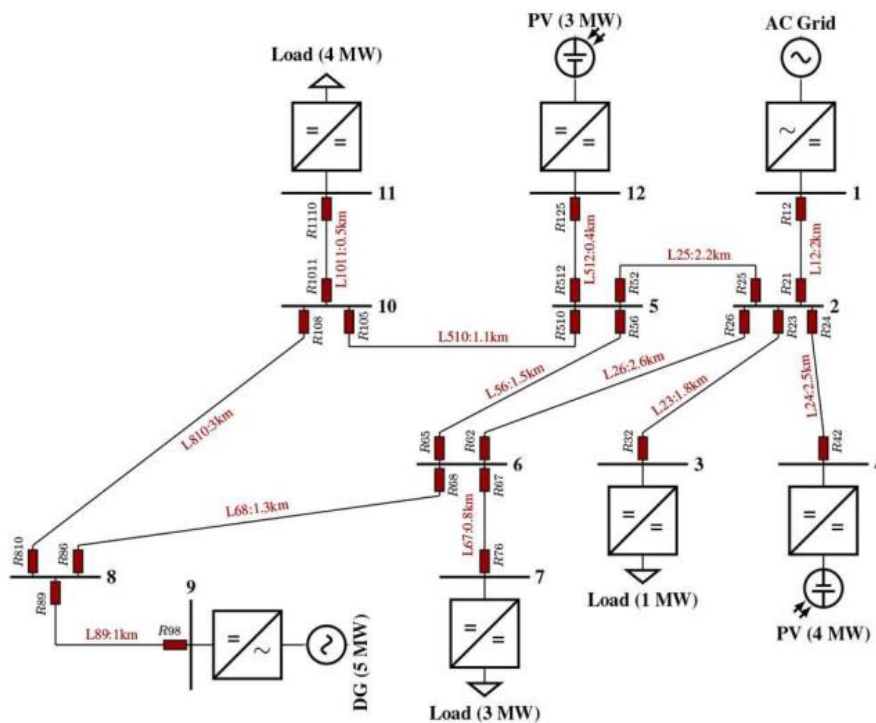
В методе выделяются стадии записи онлайн-данных (Online Detection) и их постобработки (Offline Location). При записи данных используется частотный фильтр, исключающий из записываемого сигнала напряжения низкочастотные компоненты. При обнаружения всплеска напряжения происходит запись осциллограммы в течение заранее определённого окна времени, достаточного для регистрации нескольких следующих отражённых импульсов. После этого формируется сигнал аварийного отключения линии. При постобработке данных записанную осциллограмму дополняют нулями для увеличения разрешения спектра. Пример дополнения нулями показан ниже.



Пример дополнения нулями осциллограммы. W_{on} – фактически записанная осциллограмма, промежутки до и после W_{on} содержат только нули

После этого рассчитывают энергетический спектр осциллограммы. Амплитуды гармоник энергетического спектра являются квадратами амплитуд гармоник, полученных применением быстрого преобразования Фурье к осциллограмме. Далее определяют частоту максимальной гармоники энергетического спектра. Величина, обратная частоте, является периодом максимальной гармоники. Этот период будет соответствовать разнице во времени между регистрацией последовательно идущих бегущих волн, отражённых от конца линии. По его величине проводится расчёт расстояния до места повреждения по формуле одностороннего волнового ОМП.

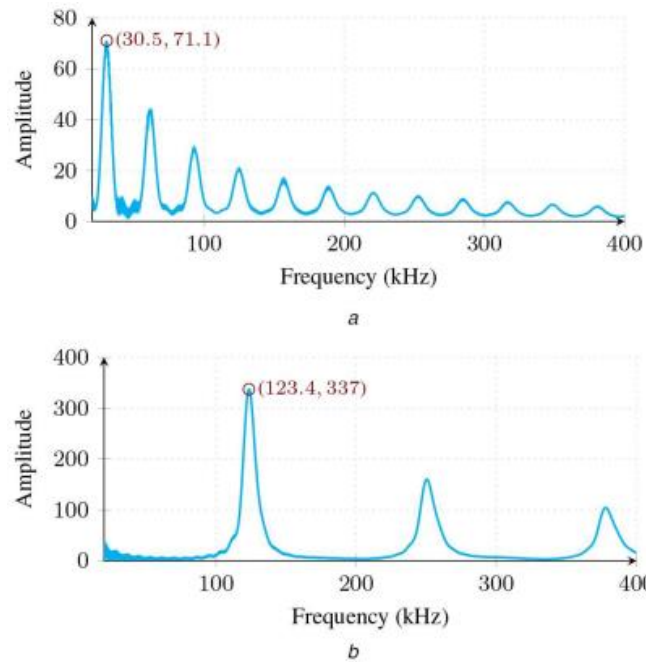
Работа метода была проверена в модели распределительной сети постоянного тока 2,5 кВ, показанной на рисунке ниже.



Модель сети для проверки метода

В одном из испытаний имитировалось повреждение на расстоянии 2397 м от секции шин 8 на участке сети L810. На графиках ниже показаны обработанные энергетические спектры,

зафиксированные на концах участка L810. На спектрах также показаны характеристики максимальных гармоник.



Энергетические спектры на концах участка L810: выше – R810, ниже – R108

Расстояние до места повреждения, рассчитанное по частотам максимальных гармоник, составило 2396 от R810 и 603.2 м от R108.

Остальные проведённые в ходе испытаний тесты подтвердили хорошую точность результатов, которая не превышала 9 метров. Исследователи также проверили результаты традиционного метода, использующего время прихода бегущих волн. В этом случае ошибка достигала 44 метров.