



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 30 марта 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. [Сравнение результатов диагностики центробежных насосов методом опорных векторов с использованием временных, частотных и время-частотных свойств](#)
2. [Отделение сигналов активности ЧР от шума при помощи методов машинного обучения без учителя и с частичным привлечением учителя](#)
3. [Локализация источников ЧР в кабелях с транспозицией](#)
4. [Метод определения порядка авторегрессионной нейросетевой модели при прогнозировании развития концентраций растворённых газов в силовом трансформаторе](#)
5. [Опыт разработки и внедрения оптической системы мониторинга распределительных трансформаторов](#)
6. [Применение технологии оптической решётки Брэгга для контроля состояния ротора асинхронных двигателей](#)
7. [Мониторинг состояния обмоток трансформатора по изменению вибрационных характеристик](#)
8. [Вероятностная оценка ресурса силовых трансформаторов](#)
9. [Оценка состояния сухих трансформаторов по характеристикам матрицы измерений](#)
10. [Опыт локализации источника разрядной активности ЧР в сухих трансформаторах](#)
11. [Опыт разработки модели контроля состояния сухого трансформатора по распределению температуры](#)
12. [Вибродиагностика подшипников качения в условиях коротких выборок данных](#)

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

Сравнение результатов диагностики центробежных насосов методом опорных векторов с использованием временных, частотных и время-частотных свойств

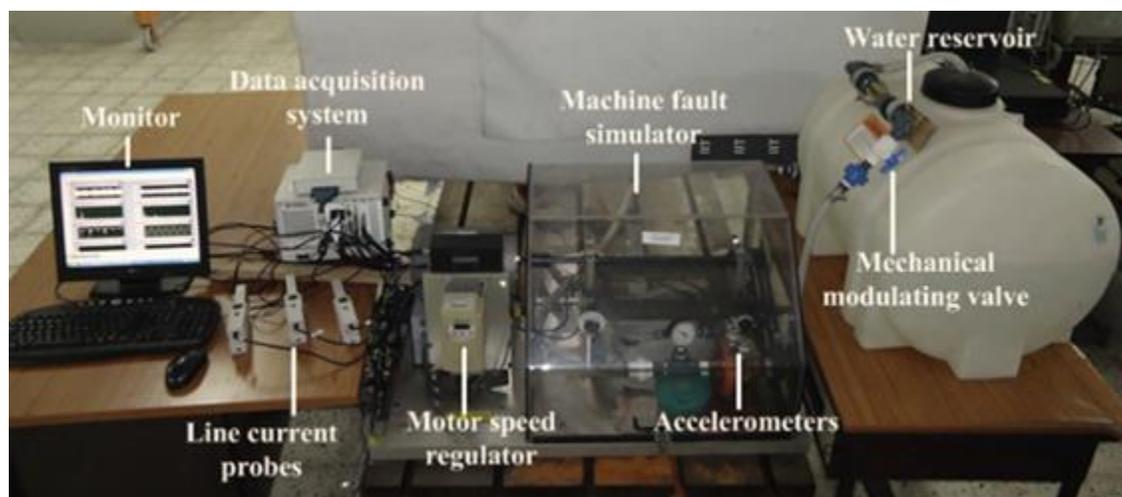
Источник: Rapur J.S., Tiwari R. (2019) Multi Fault Diagnosis of Centrifugal Pumps with Time, Frequency and Wavelet-Based Features Using Support Vector Machines. In: Cavalca K., Weber H. (eds) Proceedings of the 10th International Conference on Rotor Dynamics – IFToMM. IFToMM 2018. Mechanisms and Machine Science, vol 61. Springer, Cham

https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-99268-6_4

На прошедшей в сентябре 2018 года International Conference on Rotor Dynamics группа авторов из Технологического института Гувехати в Индии представила результаты собственного исследования, в котором сравнивались результаты диагностики центробежных насосов методом опорных векторов с применением временных, частотных и время-частотных свойств.

Методология исследования состояла в следующем. На испытательной установке, имитирующей работу центробежного насоса, искусственно создавались различные дефекты. Из записанных данных вибрации и потребляемого тока затем выделялись наборы временных, частотных и время-частотных свойств. Набор свойств включал в себя среднее значение, среднеквадратичное значение, действующее значение, энтропию. Временные свойства рассчитывались по осциллограммам сигналов, частотные по энергетическому спектру, время-частотные свойства рассчитывались при помощи вейвлет-преобразования сигналов. На основе набора записанных данных строилась модель классификации дефекта. В модели сначала рассчитывались свойства, наиболее полно описывающие набор рассматриваемых дефектов. Затем, на основании этих свойств, производилось обучение модели опорных векторов. Определение точности диагностики, выполняемой моделью, затем проводилось в два этапа. Сначала модель применялась к тестовому набору, включающему в себя параметры работы насоса на скоростях, входивших в обучающую выборку. Затем модель применялась к параметрам работы насоса на скоростях, не входивших в обучающую выборку.

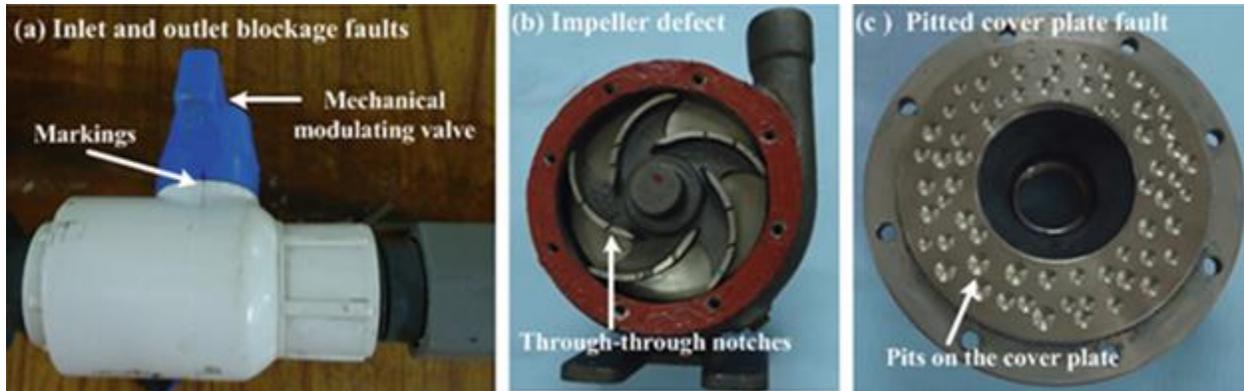
Изображение тестовой установки показано ниже.



Тестовая установка

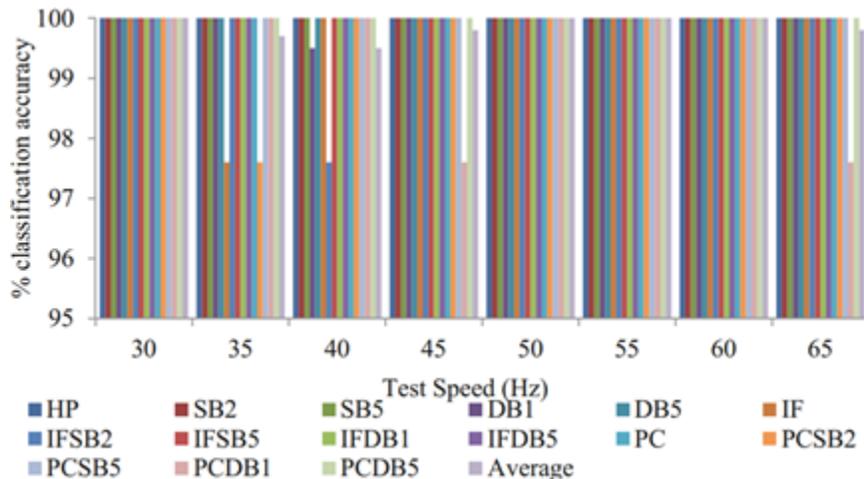
Установка состояла из центробежного насоса, резервуара с водой, вентиля на линии всаса насоса, регулятора скорости насоса, датчиков и системы сбора данных. Насос разгонялся от 30 до 65 Гц шагами по 5 Гц. Данные собирались двумя акселерометрами и тремя датчиками тока. Наборы записываемых данных представляли собой выборки из 5000 замеров на частоте дискретизации 5000 Гц.

Диапазон моделируемых дефектов включал в себя: блокировку всаса насоса, блокировку напора насоса, дефект крыльчатки, отверстия в крышке насоса, а также их комбинации. Изображения некоторых дефектов показаны ниже.



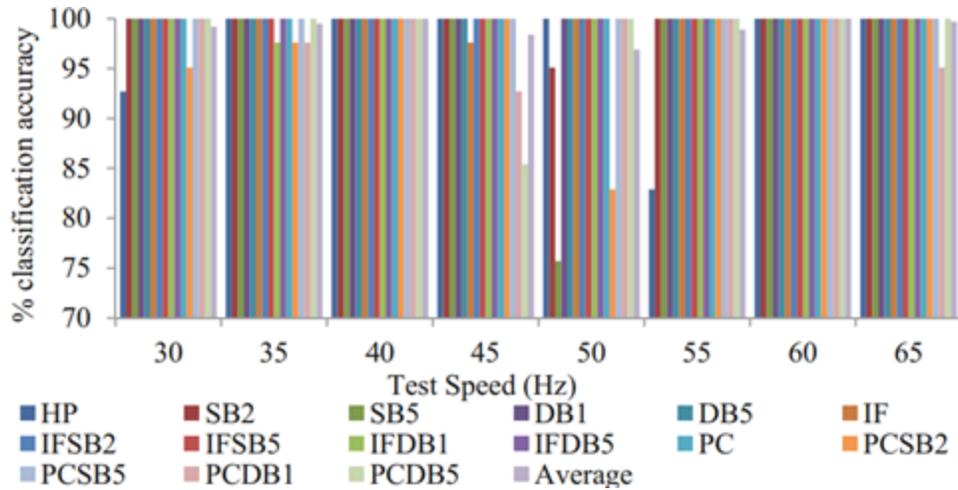
Дефекты: а) блокировка всаса и напора, б) дефект крыльчатки, с) отверстия в крышке

При исследовании работы модели с временными свойствами сигналов было определено, что среднее и среднеквадратичное значения сигнала наиболее значимы для классификации дефектов. Результаты диагностики разных на основе этих свойств при работе насоса с разными скоростями показаны ниже.



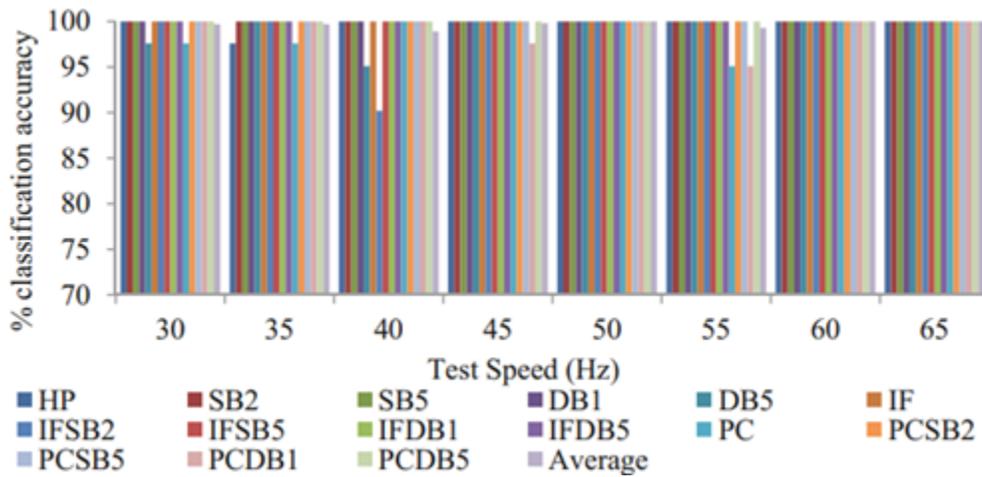
Гистограмма результатов классификации дефектов по временным характеристикам. Вертикальная ось – точность классификации, горизонтальная – скорость работы насоса, столбцы гистограммы соответствуют дефектам

Наиболее значимыми свойствами при диагностике по частотным свойствам являлись среднее и среднеквадратичное значения сигнала и величина, обратная среднеквадратичному значению. Результаты диагностики по этим свойствам показаны ниже.



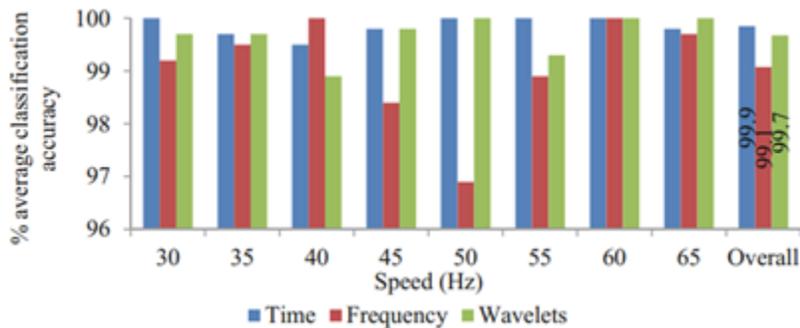
Гистограмма результатов классификации дефектов по частотным характеристикам

Наиболее значимыми свойствами при диагностике по время-частотным свойствам являлись среднее, среднеквадратичное и действующее значения сигнала, а также энтропия сигнала. Результаты диагностики по этим свойствам показаны ниже.



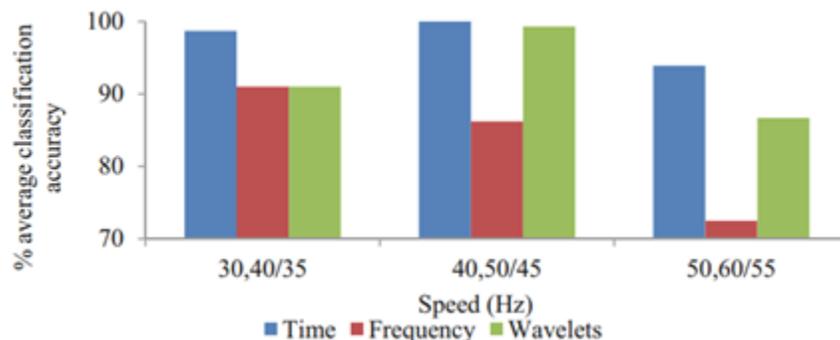
Гистограмма результатов классификации дефектов по время-частотным характеристикам

Сводная гистограмма точности модели, работающей с тремя типами признаков, показана ниже.



Гистограмма точности диагностики по временным, частотным и время-частотным свойствам сигнала

Аналогичная гистограмма, записанная при проверке точности модели на скоростях работы насоса, не включённых в обучающую выборку, показана ниже. Обозначение групп столбцов диаграммы показывает, какие скорости были включены в обучающую и в тестовую выборки: например, запись 30,40/35 означает, что модель обучалась на скоростях насоса 30 и 40 Гц, а точность диагностики проверялась на 35 Гц.



Гистограмма точности диагностики по временным, частотным и время-частотным свойствам сигнала на данных, не включённых в обучающую выборку

В заключении исследования указано, что модель опорных векторов признана применимой для решения задач диагностики центробежных насосов. Применение модели к временным свойствам сигналов вибрации и тока даёт более высокие результаты классификации, даже в условиях недостаточности обучающих данных. Перспективным направлением развития метода является исследование его применимости для диагностики других видов промышленных машин.

Отделение сигналов активности ЧР от шума при помощи методов машинного обучения без учителя и с частичным привлечением учителя

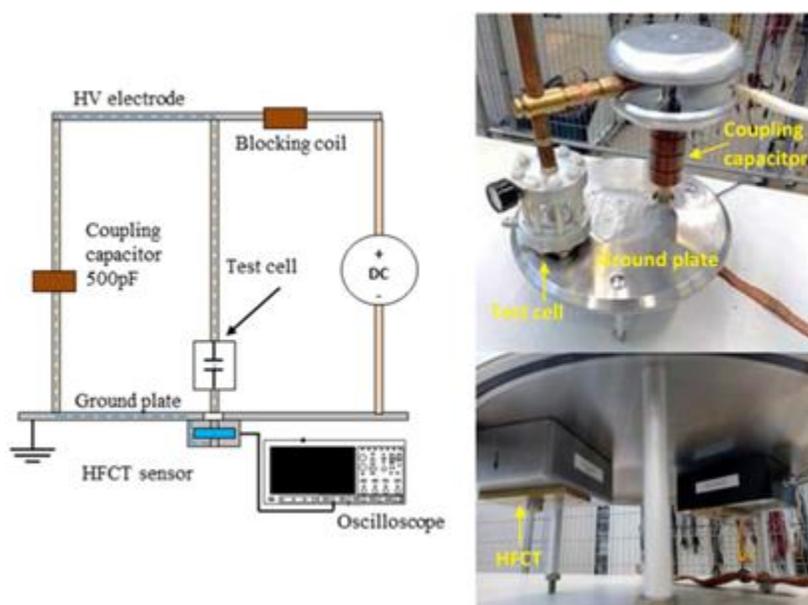
Источник: N. Morette, L.C. Castro Heredia, Thierry Ditchi, A. Rodrigo Mor, Y. Oussar, *Partial discharges and noise classification under HVDC using unsupervised and semi-supervised learning*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 121, 2020, 106129, ISSN 0142-0615

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519335306>

Группа исследователей из Университета Сорбонна во Франции и Делфтского технического университета в Нидерландах опубликовала результаты собственного исследования, в котором оценивалась точность отделения сигналов ЧР от электромагнитного шума при помощи методов машинного обучения без учителя и с частичным привлечением учителя. Статья авторов была опубликована в издании *Electrical Power and Energy Systems* в октябре 2020 года.

Методология исследования состояла в следующем. При помощи испытательной установки генерировались наборы данных электромагнитной активности, в которых содержались импульсы ЧР и электромагнитного шума. Далее, при помощи вейвлет-преобразования, из записанных данных выделялись наборы свойств. Наборы свойств затем обрабатывались алгоритмом k-средних, относящимся к категории алгоритмов машинного обучения без учителя. Результаты классификации оценивались по коэффициенту Данна, который позволяет оценить качество описания кластера выбранной комбинацией свойств. Для проверки верности результатов с точки зрения отраслевых знаний о природе ЧР затем применялся метод преобразующих опорных векторов, относящийся к категории алгоритмов машинного обучения с частичным привлечением учителя. Для применения метода исследователи вручную промаркировали небольшое количество тестовых выборок сигнала как ЧР или шум.

Изображение тестовой установки показано ниже.



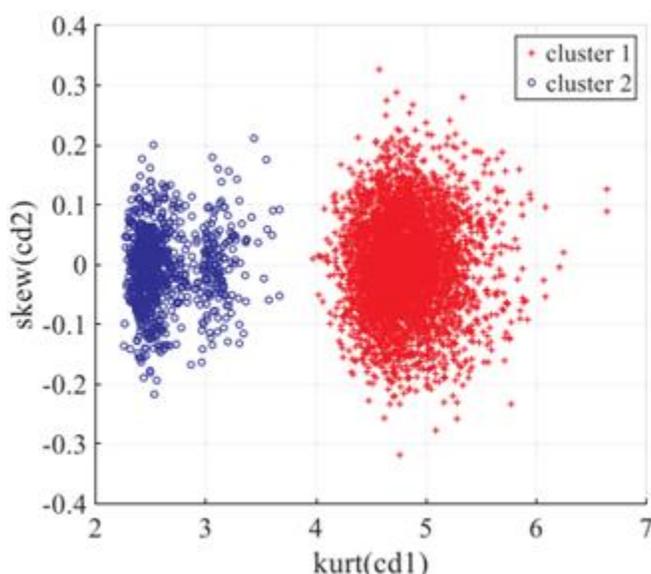
Испытательная установка

Установка представляла собой камеру, заполненную элегазом под давлением 3 бар. Испытательное напряжение составляло 40 кВ постоянного тока, генерируемые в ней ЧР относились к категории поверхностных. Данные снимались при помощи развязывающего конденсатора 500 пФ, к одной из обкладок которого был подключен высокочастотный трансформатор тока. Полоса пропускания такого измерительного канала составляла 62 кГц – 136 МГц. Данные оцифровывались осциллографом Tektronix MSO Series 5 на частоте 6,25 ГГц. Набор записанных данных состоял из 4993 выборок сигнала.

Для расчёта характерных свойств сигнала исследователи применили вейвлет Добеши db10. По получившимся в результате распределениям коэффициентов вейвлет-преобразования были рассчитаны средние значения, среднеквадратичные значения, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Полученные величины были использованы как характерные свойства для разделения импульсов ЧР и шума.

Для определения наиболее значимых комбинаций свойств был рассчитан коэффициент Данна для всех возможных комбинаций свойств. Наибольшее значения коэффициента указывало на наибольшую значимость выбранной комбинации свойств с точки зрения точности классификации.

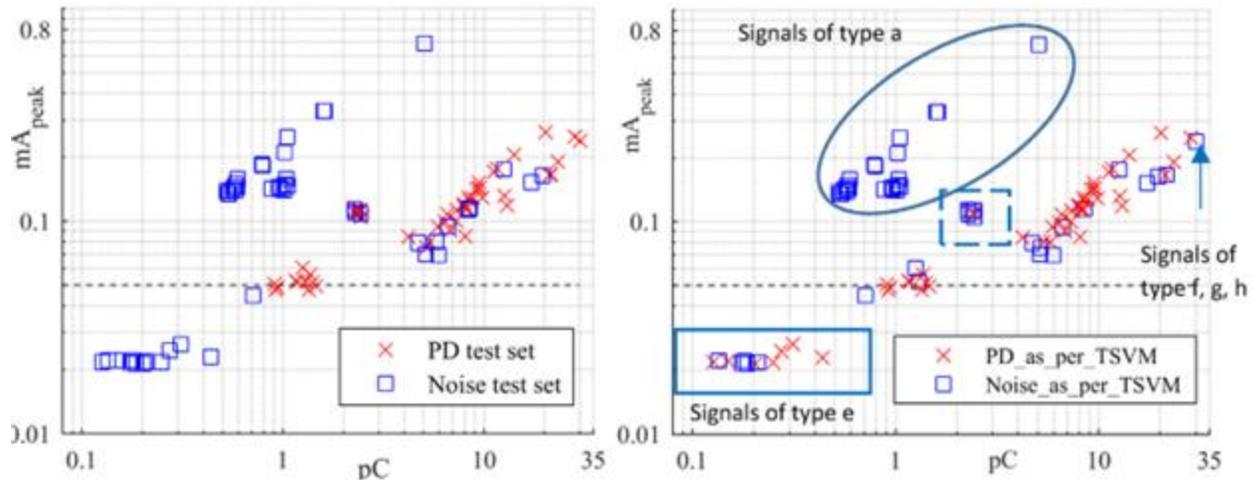
Пример результата разделения с наиболее высоким коэффициентом Данна показан ниже.



Разделение с высоким коэффициентом Данна

В данном случае используются два свойства: коэффициент эксцесса (kurt) распределения первых вейвлет-коэффициентов (cd1) и коэффициент асимметрии (skew) распределения вторых вейвлет-коэффициентов (cd2).

Далее, вручную обследовав осциллограммы сигналов, исследователи вручную промаркировали 200 тестовых выборок как ЧР или шум. Пример результата классификации, выполненной затем при помощи метода преобразующих опорных векторов по наборам свойств, определённых при помощи коэффициента Данна, показан ниже.



Пример результата разделения ЧР-шум алгоритмом с частичным привлечением учителя. Слева – оригинальное достоверное разделение, справа – разделение, выполненное при помощи алгоритма. Буквами a, e, f, g, h отмечены сигналы шума с разными типами осциллограмм

В заключении исследования указывается, что оба метода машинного обучения применимы для решаемой задачи. Точность классификации в исследовании составила 80%, что связано с тем, что часть сигналов была сознательно промаркирована как шум, но при этом осциллограммы этих сигналов не являлись характерными для шума и могли стать предметом экспертной дискуссии. Если маркировать подобные сигналы как ЧР, то точность применённых исследователями методов достигает 100%.

Локализация источников ЧР в кабелях с транспозицией

Источник: Mahdi Mahdipour, Asghar Akbari, Peter Werle, Hossein Borsi, *Partial Discharge localization on cross-bonded cable systems*, *Electric Power Systems Research*, Volume 178, 2020, 106034, ISSN 0378-7796

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619303530>

В вышедшем в январе 2020 года номере издания *Electric Power System Research* группа исследователей из Ирана и Германии поделилась опытом исследования распространения ЧР в кабелях с транспозицией и предложила алгоритм для локализации источника ЧР и определения дефектной фазы в таких кабелях.

Исследование проводилось на тестовом участке трёхфазного кабеля с транспозициями. Схема кабеля показана на изображении ниже.

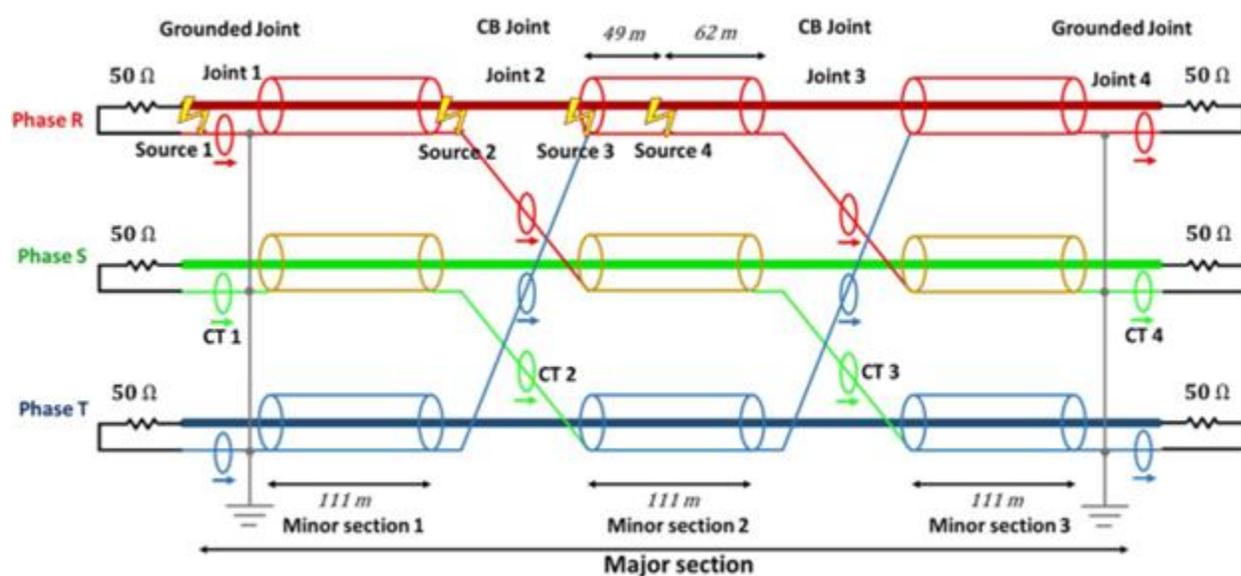
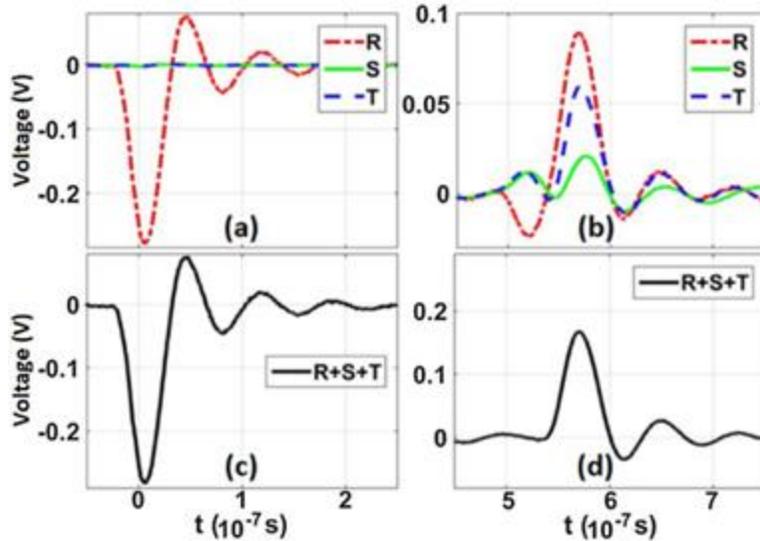


Схема испытательного кабеля с местами транспозиции и точками установки ВЧТТ

Длина кабеля составляла 1 км, изоляция кабеля была выполнена из сшитого полиэтилена. По длине кабеля были расставлены 2 точки транспозиции с высокочастотными трансформаторами тока (ВЧТТ) рядом с ними. На схеме также показаны точки ввода ЧР в кабель. Для ввода использовался калибратор, генерирующий эквивалентный заряд 3 нКл между экраном и жилой кабеля.

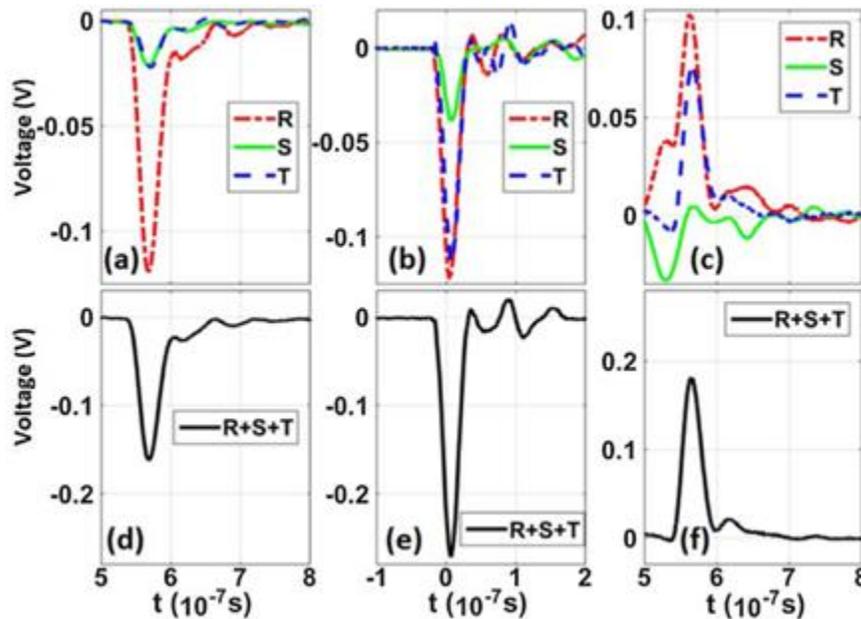
Пример осциллограмм, записанных при помощи ВЧТТ в районе муфт 1 и 2, показан ниже. В данном случае заряд вводился в первой испытательной точке (Source 1 на рисунке выше).



Зарегистрированные осциллограммы: а) в районе муфты 1, три фазы, б) в районе муфты 2, три фазы, с) сумма сигналов в районе муфты 1, д) сумма сигналов в районе муфты 2

В данном случае суммирование значений сигналов по трём фазам даёт хорошую индикацию наличия ЧР вблизи места измерения. К сумме сигналов можно применить метод определения места повреждения по разности времён прихода импульсов. Дефектную фазу можно определить по наибольшей амплитуде среди осциллограмм трёх фаз.

В отличие от источника 1, источники 2 и 3 находились вблизи мест транспозиции, поэтому задача определения дефектной фазы в этом случае усложняется. Пример осциллограмм, записанных на ВЧТТ в районе муфт 1, 2 и 3 от источника ЧР в точке 3, показаны ниже.



Зарегистрированные осциллограммы: а) в районе муфты 1, три фазы, б) в районе муфты 2, три фазы, с) в районе муфты 3, три фазы, д)-ф) сумма сигналов

В данном случае положение источника ЧР можно определить по смене полярности в сумме сигналов. Сумма осциллограмм до и после источника разрядов будет иметь разную полярность.

Но задача определения дефектной фазы в этом случае сложнее. Для её решения исследователи предложили алгоритм, схема которого показана ниже.

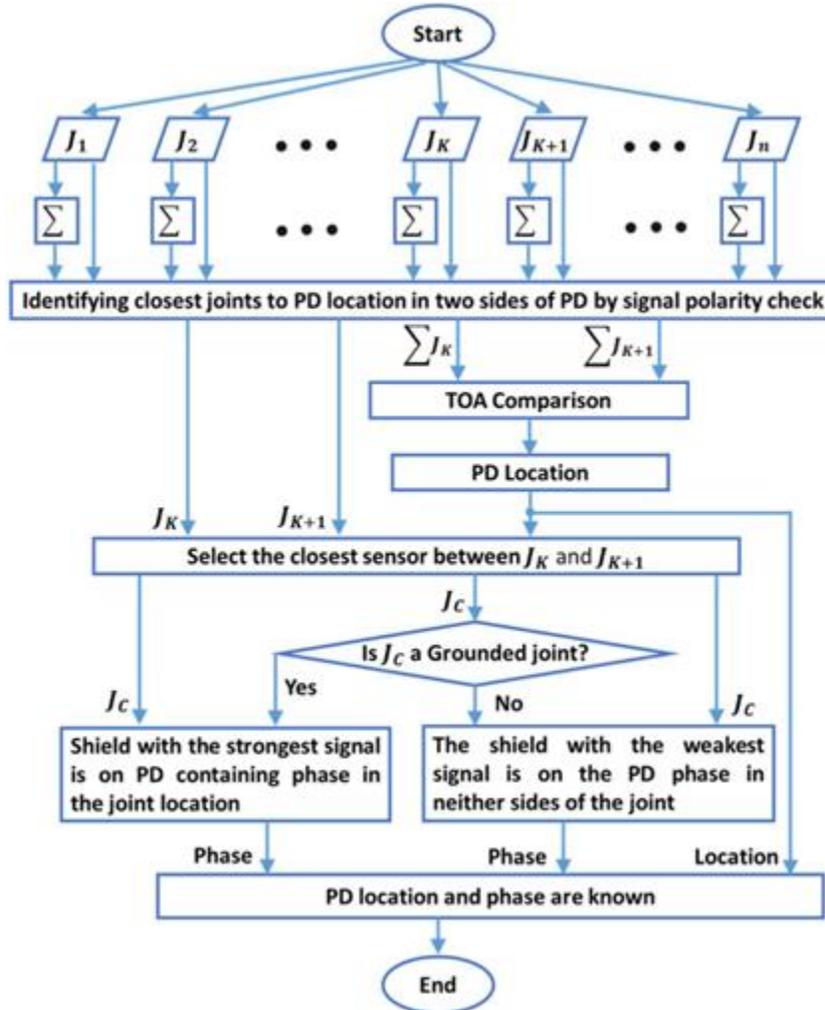


Схема предложенного алгоритма

Алгоритм использует измерения во всех точках, где установлены ВЧТТ на кабеле. Далее сигналы трёх фаз в каждой точке измерения суммируются. Далее, на основании амплитуд и изменения полярности сигнала, определяется пара ВЧТТ, между которыми находится источник разрядов. Локализация источника ЧР выполняется по разнице времён прихода импульсов. Для этого, используя осциллограммы и местоположение источника, определяется ближайшая муфта к источнику ЧР. Если эта муфта является муфтой с заземлением и без транспозиции, то дефектная фаза определяется по наибольшей амплитуде среди сигналов трёх фаз в ближайшей точке измерения. Если муфта имеет транспозицию, дефектной является фаза с наименьшей амплитудой сигнала.

Метод определения порядка авторегрессионной нейросетевой модели при прогнозировании развития концентраций растворённых газов в силовом трансформаторе

Источник: Elânio Bezerra, F.; Zemuner Garcia, F.A.; Ikuyo Nabeta, S.; Martha de Souza, G.F.; Chabu, I.E.; Santos, J.C.; Junior, S.N.; Pereira, F.H. Wavelet-Like Transform to Optimize the Order of an Autoregressive Neural Network Model to Predict the Dissolved Gas Concentration in Power Transformer Oil from Sensor Data. *Sensors* **2020**, 20, 2730

<https://www.mdpi.com/1424-8220/20/9/2730>

Группа исследователей из Бразилии предложила метод определения порядка авторегрессионной нейросетевой модели, используемой при прогнозировании концентраций растворённых газов в трансформаторном масле. Порядок модели определяет число предыдущих точек прогнозируемой концентрации, которые будут участвовать в модели для определения прогнозных концентраций. Статья была опубликована в издании *Sensors* в мае 2020 года.

Метод состоит из нескольких этапов, показанных на изображении ниже.

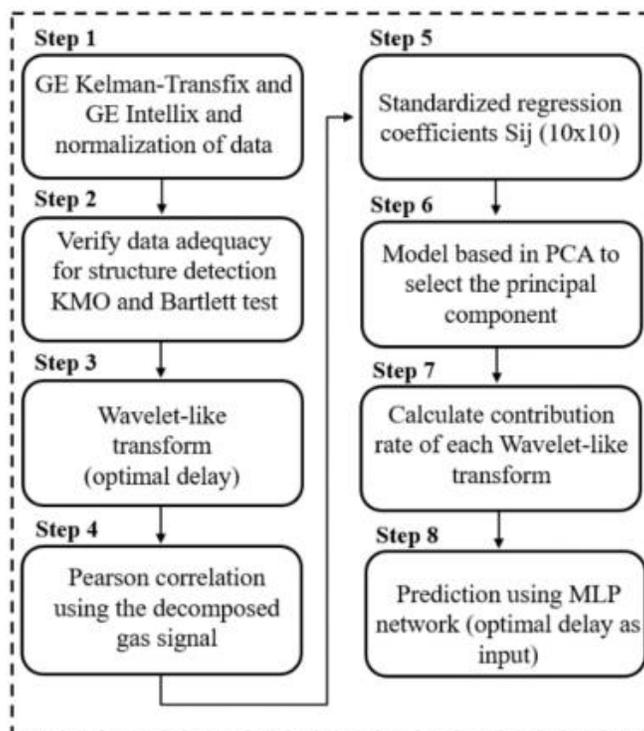


Схема метода

На первом шаге выполняется сбор данных при помощи газоанализатора. Набор собираемых данных состоит из концентраций ключевых диагностических газов, суммы растворённых газов и влажосодержания. Данные затем нормализуются приведением к диапазону 0..1.

На втором шаге массив зарегистрированных данных исследуется при помощи тестов Кайзера-Мейера-Олкина и Барлетта. Результаты этих тестов показывают, насколько данные независимы друг от друга и, следовательно, применимы в качестве входных данных для общей модели прогнозирования. Наличие сильных взаимных корреляций между данными приведёт к ситуации,

когда на вход модели прогнозирования будет подаваться избыточный объём данных, что приведёт к дополнительным, избыточным вычислениям.

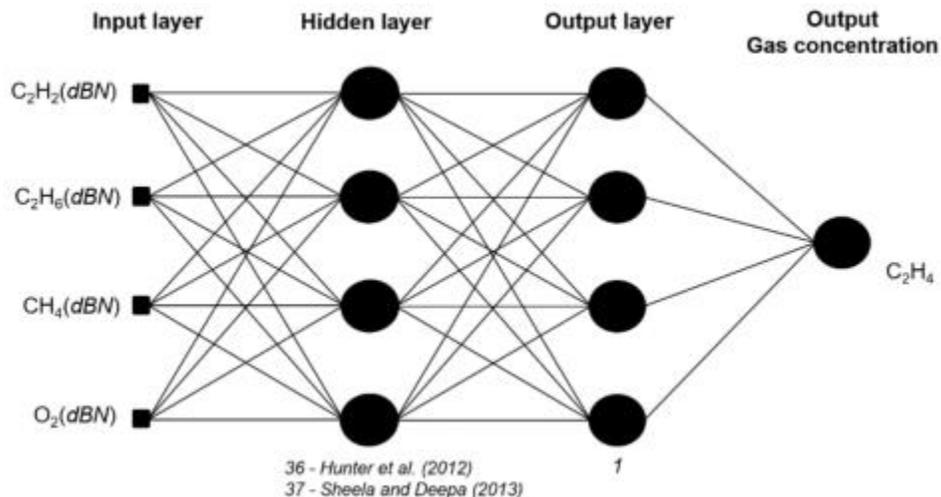
На третьем шаге к данным применяются вейвлет-преобразования 1 уровня с 10 разными вейвлет-функциями, работающими как фильтры низких частот и операторы смещения данных во времени (лаговый оператор). Это приводит к расчёту 10 сглаженных и смещённых представлений каждой концентрации, которые объединяются в одну матрицу данных.

На четвёртом шаге к сглаженным представлениям каждой концентрации применяется расчёт коэффициента корреляции Пирсона, показывающий корреляцию между разными наборами концентраций. После этого матрица данных дополняется значениями рассчитанных коэффициентов корреляции.

На пятом и шестом шагах к преобразованным данным применяется метод принципиальных компонентов, который часто применяется в машинном обучении для уменьшения размерности входных данных моделей за счёт исключения или объединения свойств, содержащих мало значимую или дублирующуюся информацию. Результатом применения метода является квадратная матрица, содержащая коэффициенты линейной регрессии между концентрациями каждого отдельного газа и множеством смещённых концентраций остальных газов.

На седьмом шаге по матрицам, рассчитанным на шестом шаге, рассчитывается удельный вес («важность») каждого смещения при прогнозировании концентрации каждого газа.

На восьмом шаге строится модель искусственной нейронной сети, пример которой показан ниже.



Предложенная модель искусственной нейронной сети

Исследователи предложили использовать для сети один входной, один скрытый и один выходной слой и оптимизацию алгоритмом Левенберга-Марквардта. Для прогнозирования концентрации каждого отдельного газа использовалась отдельная нейросетевая модель. В каждой модели набор концентраций газов, по которым прогнозировалась концентрация каждого отдельного газа, определялась низким значениями коэффициента Пирсона, рассчитанными на четвёртом шаге. Задержка, или число точек ряда концентрации каждого газа, используемого для прогнозирования, определялось по высоким значениям в матрице принципиальных компонентов, рассчитываемой на седьмом шаге.

Работа метода была опробована на данных двух трансформаторов, эксплуатируемых на энергопредприятиях в Бразилии. Примеры некоторых результатов расчётов показаны ниже.

В таблице ниже показаны результаты применения вейвлет-преобразования и расчёта удельного веса каждого смещения для прогнозирования концентрации каждого газа. Из таблицы видно, что, например, при прогнозировании концентрации этана наибольшую важность (по значению в столбце Importance Rate) имеет вейвлет-функция db20, соответствующая смещению на 20 точек, а при прогнозировании концентрации метана функция db8, соответствующая смещению на 8 точек.

Importance Order	Wavelet-Like Order	Gas	Importance Rate	Importance Order	Wavelet Order	Gas	Importance Rate
1	db20	C ₂ H ₆	1.000	11	db4	GC	0.636
2	db8	CH ₄	0.858	12	db20	H ₂	0.581
3	db18	O ₂	0.848	13	db8	C ₂ H ₆	0.575
4	db20	CH ₄	0.803	14	db8	H ₂	0.572
5	db16	O ₂	0.793	15	db20	C ₂ H ₄	0.568
6	db12	CO ₂	0.791	16	db20	H ₂ O	0.539
7	db10	CO ₂	0.779	17	db16	GC	0.53
8	db6	CH ₄	0.776	18	db18	GC	0.529
9	db14	O ₂	0.692	19	db14	H ₂	0.507
10	db2	GC	0.644	20	db20	CO	0.495

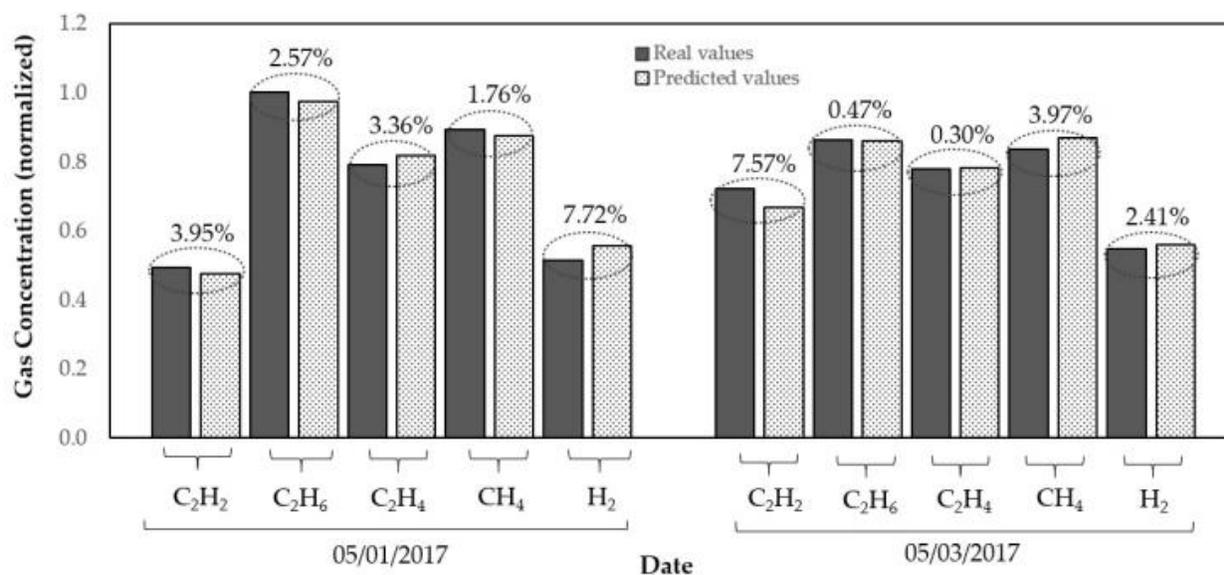
Таблица результатов расчёта удельного веса результатов применения вейвлет-функций

Пример результатов расчёта применимости (по коэффициентам Пирсона) разных концентраций газов с разными смещения (строки таблицы) для прогнозирования заданных концентраций (столбцы таблицы) показан ниже.

Gas Concentration (Delayed)	C ₂ H ₂	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	H ₂	CH ₄
C ₂ H ₂ (db2)	0.01254	0.00116	0.01904	0.00029	0.00608
C ₂ H ₂ (db4)	0.00449	0.00116	0.01796	0.00109	0.00689
C ₂ H ₂ (db6)	0.00000	0.00032	0.01232	0.00548	0.00490
C ₂ H ₂ (db20)	0.01769	0.00563	0.00000	0.00137	0.00029
C ₂ H ₆ (db4)	0.01103	0.01440	0.03349	0.01061	0.00314
C ₂ H ₆ (db6)	0.02190	0.02045	0.04203	0.01232	0.00281
C ₂ H ₄ (db8)	0.00922	0.00017	0.00073	0.00292	0.00026
C ₂ H ₄ (db10)	0.00865	0.00003	0.00130	0.00044	0.00044
C ₂ H ₄ (db12)	0.01082	0.00010	0.00240	0.00000	0.00185
C ₂ H ₄ (db20)	0.00706	0.00144	0.00130	0.00036	0.00010
H ₂ (db2)	0.00410	0.00130	0.00410	0.00504	0.00102
H ₂ (db6)	0.00068	0.00348	0.00384	0.00026	0.00109
H ₂ (db8)	0.00130	0.00250	0.00240	0.00048	0.00017
H ₂ (db20)	0.01300	0.00130	0.00608	0.00176	0.00270
CH ₄ (db4)	0.00005	0.00281	0.00036	0.00336	0.00044
CH ₄ (db10)	0.00922	0.00058	0.00032	0.00023	0.00144
CH ₄ (db14)	0.00044	0.00000	0.00006	0.00012	0.00281
CH ₄ (db20)	0.00336	0.00336	0.00212	0.00160	0.00020

Матрица результатов расчёта коэффициентов Пирсона

Представленные авторами результаты прогнозирования концентраций для двух дней показаны ниже.



Результаты прогнозирования концентраций для двух дней. На гистограмме показаны нормализованные фактические значения концентраций и их предсказанные значения

В заключении исследования указано, что ошибка прогнозирования составила несколько процентов при использовании предложенного метода. В качестве достоинства метода авторы отмечают его невысокую вычислительную сложность. Дальнейшая работа авторов будет направлена на исследование применимости более широкого набора свойств при расчёте корреляций методом Пирсона и значимости для прогнозирования методом принципиальных компонентов.

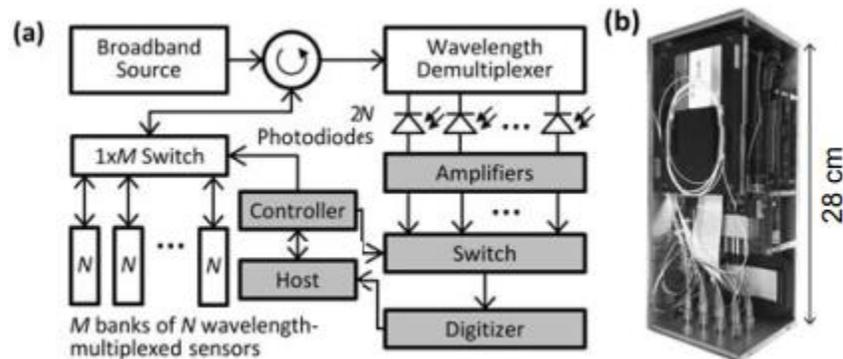
Опыт разработки и внедрения оптической системы мониторинга распределительных трансформаторов

Источник: A. Raghavan et al., "Low-cost embedded optical sensing systems for distribution transformer monitoring," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, doi: 10.1109/TPWRD.2020.2999822.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9108194>

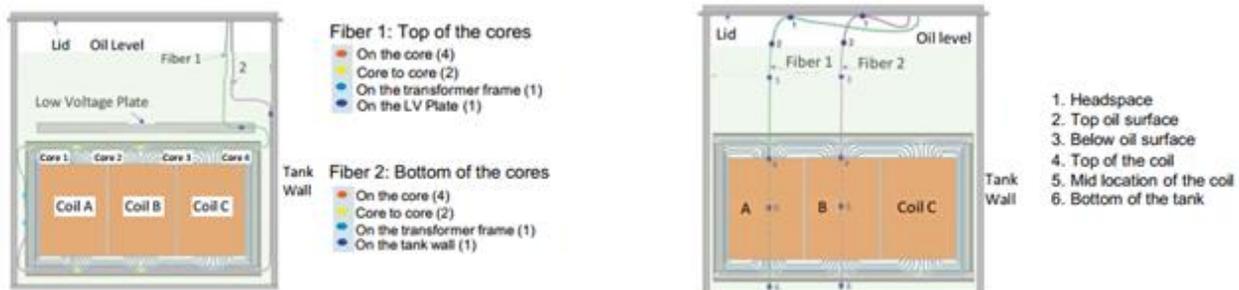
Группа сотрудников компаний GE и Xerox и электросетевой компании Con Edison из США поделилась собственным опытом разработки и внедрения системы мониторинга вибрации и температуры распределительных трансформаторов, в которой используется модифицированная технология оптической решётки Брэгга. Работа авторов была опубликована в *IEEE Transactions on Power Delivery* в июне 2020 года.

В датчиках на основе оптической решётки Брэгга используется периодическое изменение показателя преломления светонесущей сердцевины чувствительного элемента, длина которого обычно составляет несколько миллиметров. Внешние воздействия, такие как вибрация или температура, изменяют структуру оптической решётки, что приводит к изменению характеристик света, отражённого от неё. Чувствительность таких датчиков в единицах длины волны света составляет обычно 1 пикометр. При помощи комбинирования оптических решёток, фотодетекторов и оптических переключателей авторы исследования смогли разработать датчик, чувствительность которого достигает 50 фемтометров, что в 20 раз лучше чувствительности стандартных датчиков. Общая схема измерения и вид детектора, использующего такую технологию, показаны ниже.

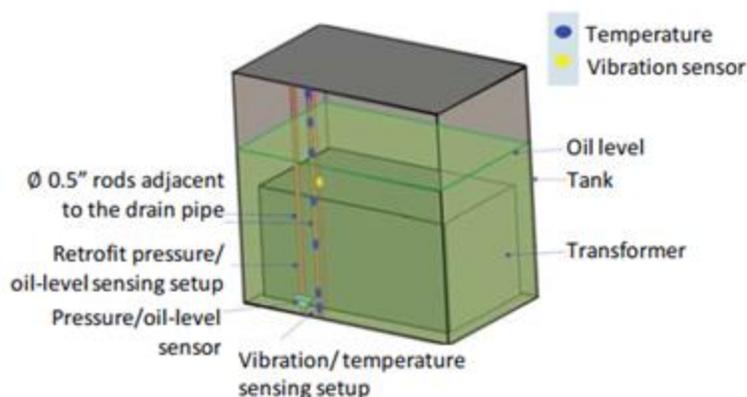


Слева – схема измерения, справа – детектор

Разработанные типовые схемы установки датчиков для новых и модернизируемых трансформаторов показаны ниже.



Типовые схемы установки датчиков в новых трансформаторах



Типовая схема установки датчиков на модернизируемых трансформаторах. Датчик вводится в масляный объём трансформатора через существующий вентиль

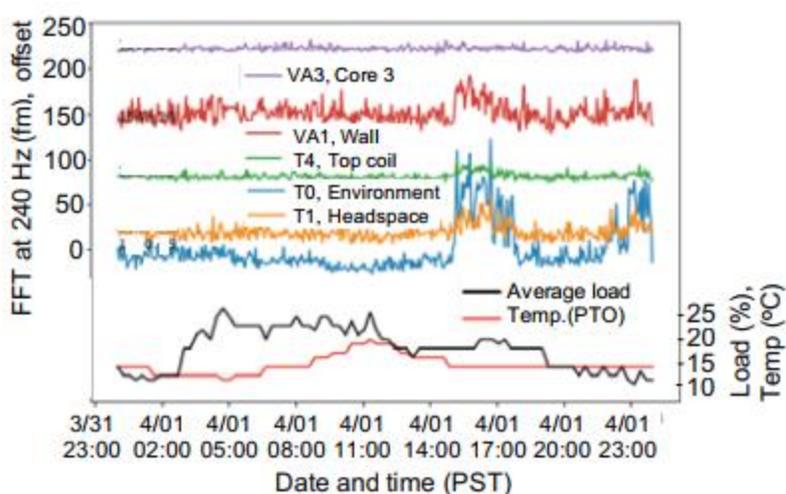
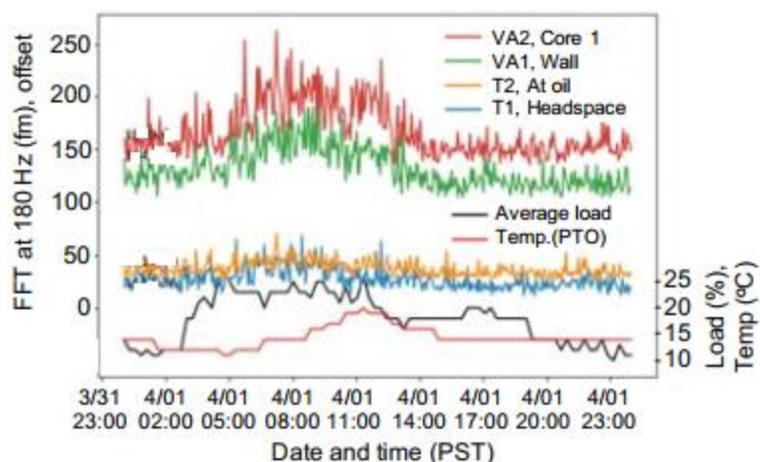
Изображение оптического проходника для вывода кабеля датчика через стенку нового трансформатора показано ниже.



Оптический проходник для вывода кабеля датчика

Полевые испытания измерительной системы, использующей разработанные датчики, были проведены на объектах Con Edison на двух новых трансформаторах 500 кВА и действующем трансформаторе 500 кВА. Испытания проводились в течение 6 месяцев.

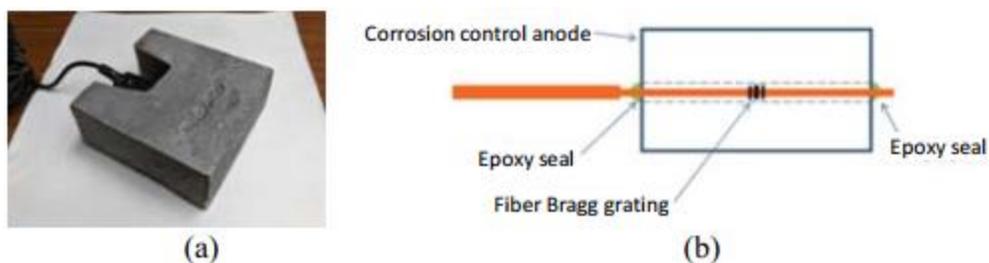
Испытания системы на новых трансформаторах показали появление широкого набора гармоник в сигнале вибрации после подключения трансформатора к сети, что было вызвано магнитострикционными и Лоренцовыми силами, пропорциональными квадрату тока или напряжения. Доминирующей являлась гармоника 120 Гц удвоенной частоты сети. При изменениях нагрузки было выявлено наличие корреляции между более высокими гармониками и нагрузкой. В частности, такое поведение показывала амплитуда гармоники 240 Гц в ночное время. Примеры корреляций показаны ниже.



Значения нагрузки, температуры и амплитуд гармоник 180 Гц (выше) и 240 Гц (ниже) вибрации в разных точках трансформатора в разное время в течение дня

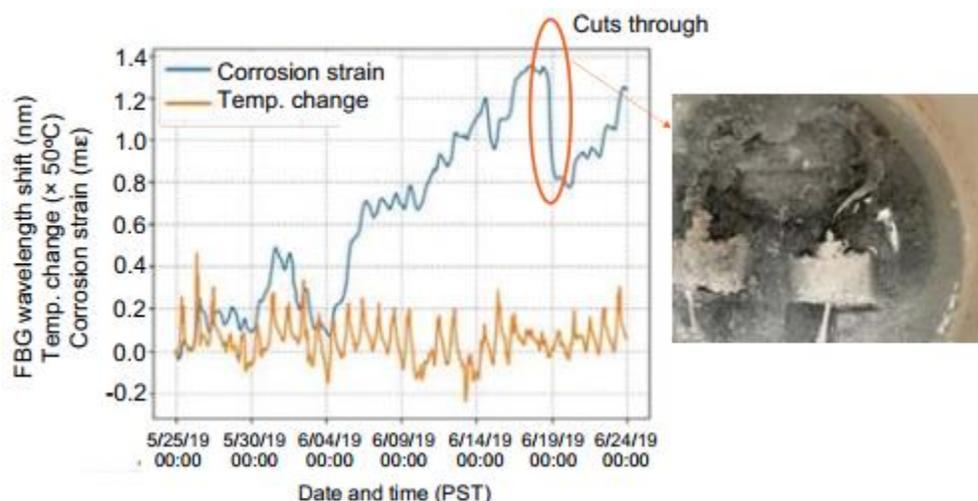
При испытаниях на модернизированном трансформаторе было выявлено аналогичное появление широкого диапазона гармоник после включения трансформатора в сеть с преобладанием гармоники удвоенной частоты сети. Характерным для трансформатора являлось наличие гармоник на частотах около 18,4 и 20 Гц, что, наиболее вероятно, было вызвано неустойчивостью основного бака.

Помимо измерения температуры и вибрации, исследователи также применили разработанную измерительную технологию для контроля коррозии. Для этого датчик был помещён внутрь электрода и помещён в солёную ванну. Изображение электрода с датчиком и схема установки показаны ниже.



Электрод с датчиком и схема установки датчика

В данном случае напрямую измеряется механическое напряжение в электроде, по которому определяется степень его коррозии. График изменения напряжения и температуры и изображение корродированного электрода в конце испытания показаны ниже.



Изменение напряжения и температуры электрода (слева) и изображение электрода в конце испытания (справа)

В данном случае график изменения напряжения показывает стадию стабильного роста напряжения при развитии коррозии, после которой следует резкое падение, соответствующее моменту развития корродированной области на всю толщину металла.

В заключении исследования указывается, что технология признана перспективной для более широкого внедрения для мониторинга распределительных трансформаторов, чему способствует низкая стоимость изготовления датчиков. Дополнительные испытания показали, что, помимо традиционного мониторинга температуры и вибрации, технология может применяться также и для контроля коррозии элементов трансформатора.

Применение технологии оптической решётки Брэгга для контроля состояния ротора асинхронных двигателей

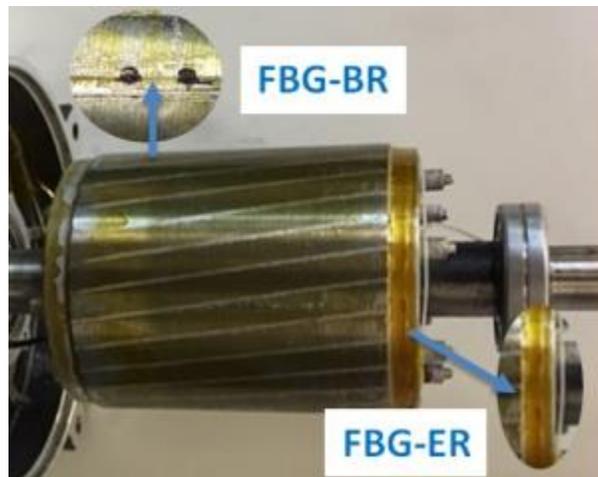
Источник: Mohammed, Anees & Djurovic, Sinisa. (2021). Rotor Condition Monitoring Using Fibre Optic Sensing Technology. IET PEMD 2020

https://www.researchgate.net/publication/348265458_Rotor_Condition_Monitoring_Using_Fibre_Optic_Sensing_Technology

Группа сотрудников Манчестерского университета в Англии рассмотрела вопрос применимости технологии оптической решётки Брэгга для контроля состояния ротора асинхронных двигателей. Результаты исследования были представлены на прошедшей в декабре 2020 года IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives.

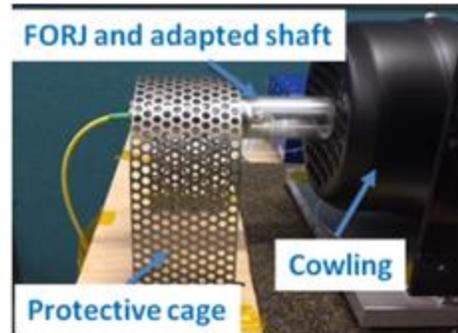
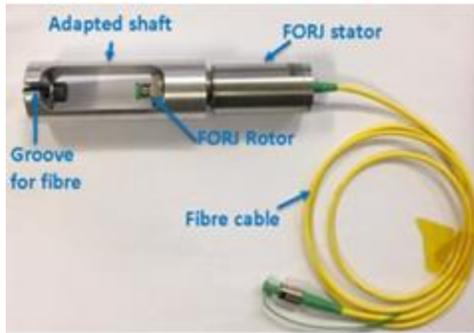
Суть технологии состоит в использовании решётчатой конструкции, которая встраивается в одномодовое оптоволокно. Коэффициент отражения элементов конструкции зависит от приложенного к оптоволокну воздействия: температуры или механического напряжения. Вводя в оптоволокно УФ-свет и измеряя характеристики отражённого света, можно делать вывод об уровне приложенного воздействия.

Для исследования применимости технологии исследователи использовали тестовый асинхронный двигатель 0,55 кВт с короткозамкнутым ротором. На ротор двигателя устанавливались два датчика на основе оптической решётки Брэгга. Один датчик крепился к поверхности стержней, другой к поверхности замыкающего кольца. Изображение датчиков, закреплённых на роторе, показано ниже.



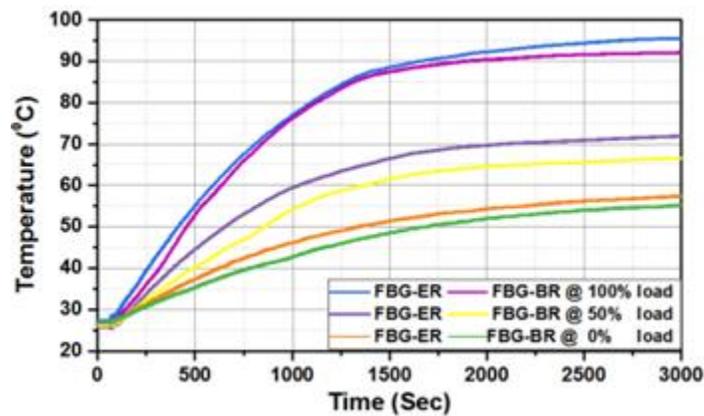
Закреплённые на роторе датчики

Для вывода кабеля датчиков использовалась специальная муфта производства компании Forj. Изображение муфты, соединённой с датчиком, и установленной на крышке двигателя показано ниже.



Муфта для вывода кабеля датчика

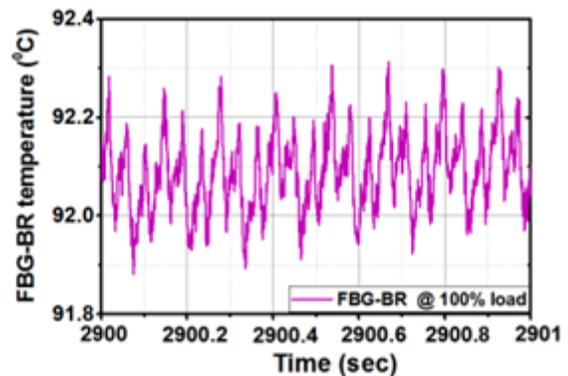
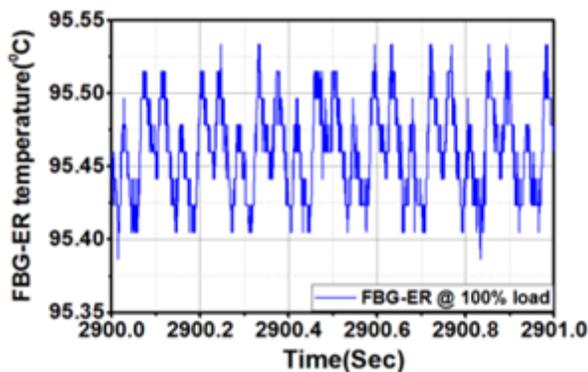
Во время испытаний двигатель запускался с разными уровнями нагрузки: 0%, 50% и 100%. Записанные графики температуры ротора, измеряемой датчиками, показаны ниже.



Изменение температуры ротора после пуска двигателя с разными уровнями нагрузки

Анализ графиков показал, что температура кольца ротора всегда была выше температуры стержней примерно на 5 градусов, что, однако, могло быть вызвано разными условиями установки датчиков. Датчик стержней не был укрыт дополнительными материалами и находился непосредственно в воздушном зазоре. Датчик кольца был укрыт каптоновой плёнкой.

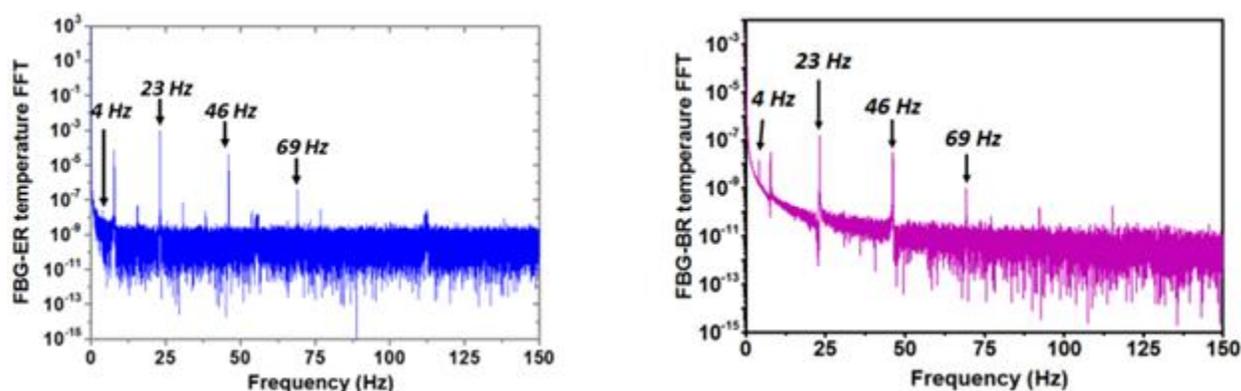
Более детальные осциллограммы температуры при устоявшемся режиме 100% нагрузки ротора показаны ниже.



Осциллограммы температуры: слева – кольца, справа – стержней

В обоих случаях в осциллограммах присутствуют флуктуации амплитудой около 0,3 градуса, что говорит о хорошей повторяемости измерений.

Спектры осциллограмм показаны ниже.



Спектры осциллограмм температуры: слева – кольца, справа – стержней

Анализ осциллограмм показал, что они содержат кратные частоты фундаментальной частоты вращения (23 Гц) и компонент 4 Гц, соответствующий частоте скольжения.

В заключении исследования указывается, что его результаты говорят о применимости рассматриваемой технологии для контроля состояния ротора. Последнее может выполняться как по данным температуры, так и по данным механического напряжения, которое определяется по спектральным характеристикам осциллограмм температуры.

Мониторинг состояния обмоток трансформатора по изменению вибрационных характеристик

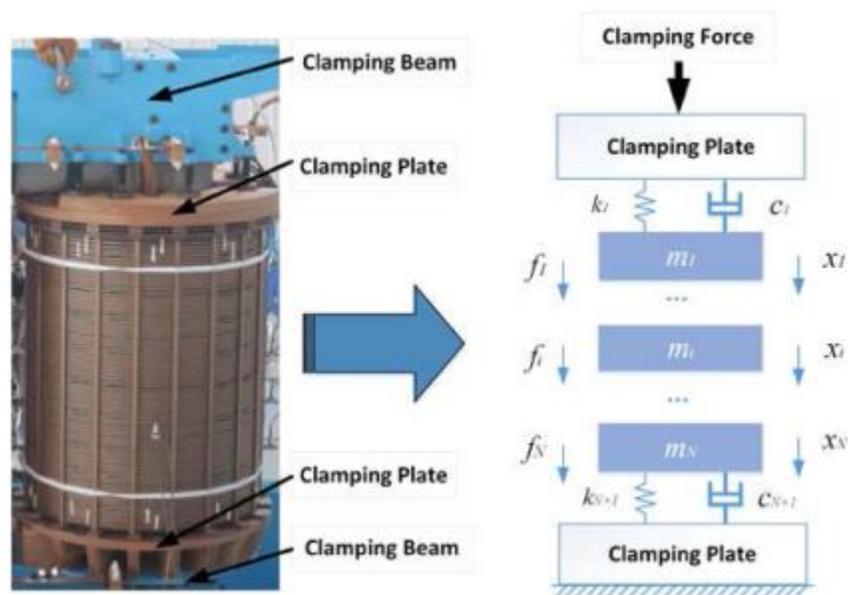
Источник: K. Hong, J. Pan and M. Jin, "Transformer Condition Monitoring Based on Load-Varied Vibration Response and GRU Neural Networks," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 178685-178694, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3027834.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9209962>

Группа исследователей из Китая и Австралии рассмотрела вопрос зависимости частотных характеристик обмоток трансформатора от нагрузки и предложила метод мониторинга состояния обмоток, базирующийся на измерении вибрации трансформатора. Работа авторов была опубликована в издании IEEE Access в сентябре 2020 года.

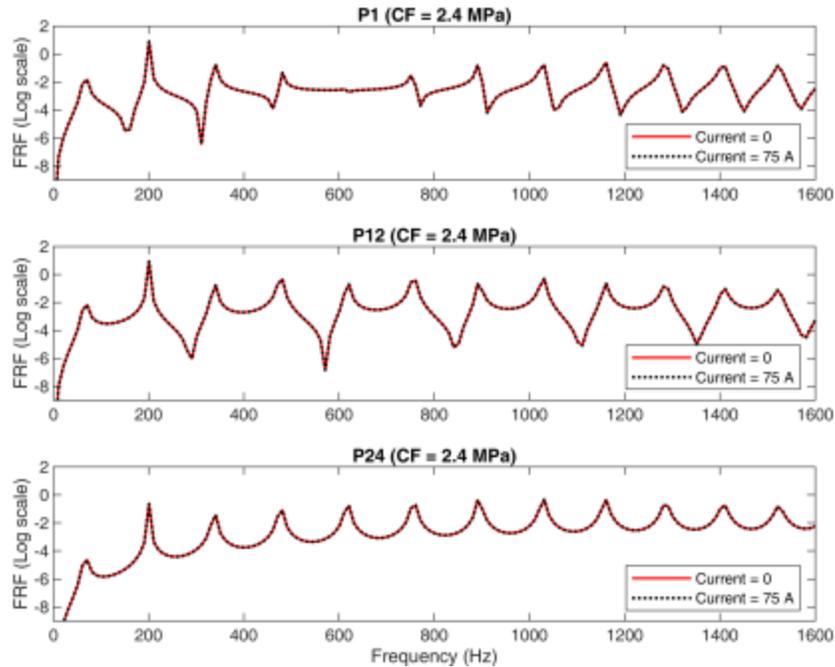
Исследование выполнялось в несколько этапов: разработка симуляционной модели обмотки и исследование её характеристик, проверка результатов симуляции на тестовом трансформаторе и разработка математической модели определения частотных характеристик.

В симуляционной модели обмотка представляла собой последовательность дисков с приложенным сверху сжимающим усилием и жёстко закреплённым основанием. Схематичное изображение принципа построения модели обмотки показано ниже.

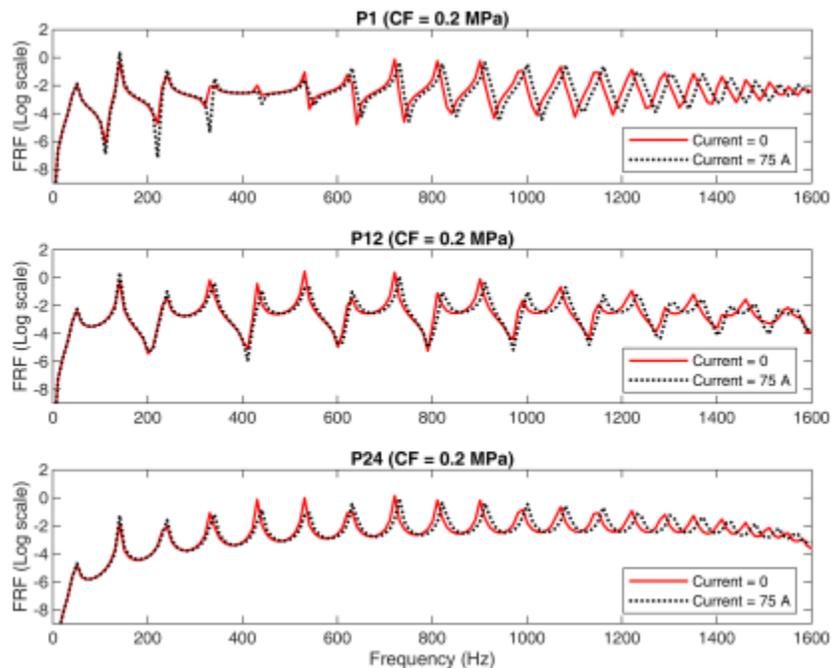


Выполнение модели обмотки

Измерения проводились при работе модели в условиях разных значений нагрузки и сжимающего усилия. При моделировании рассчитывались значения функции частотного отклика, которая показывает отношение между приложенной силой и уровнем вибрации. Изображения полученной FRF при сжимающем усилии 2.4 МПа (закреплённая обмотка) и 0.2 МПа (ослабленная обмотка) показаны ниже.

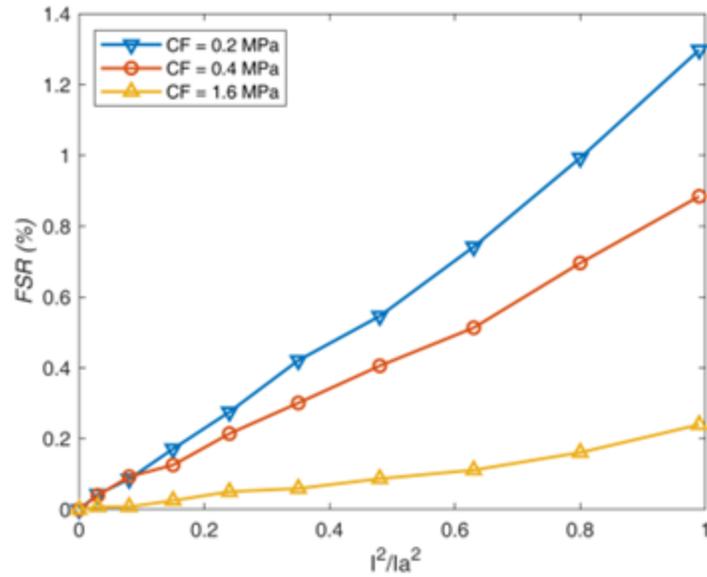


*FRF закреплённой обмотки в верхней, средней и нижней частях по результатам симуляции.
Красная линия – при FRF отключенного трансформатора, синяя – при нагрузке 75 А*



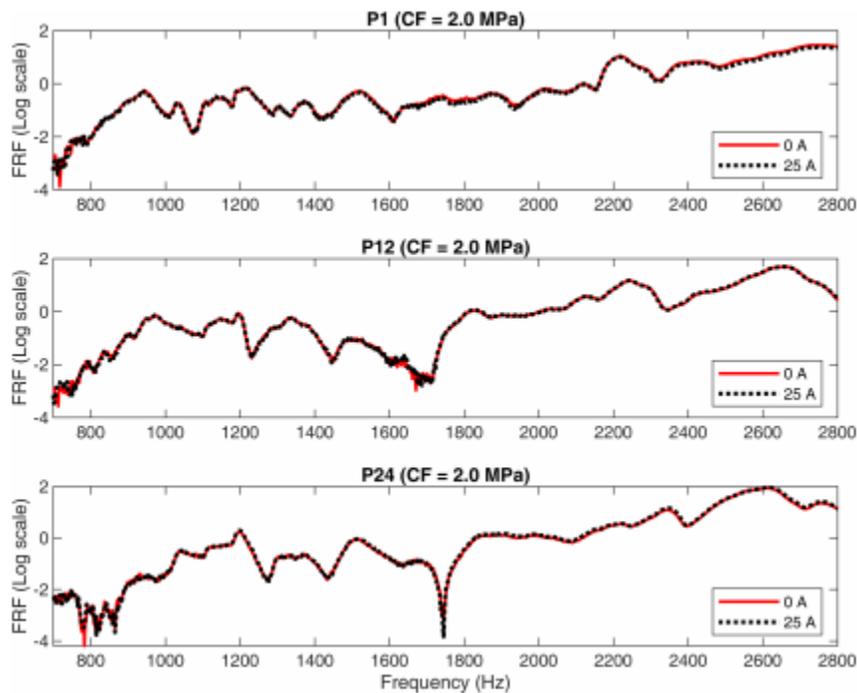
*FRF ослабленной обмотки в верхней, средней и нижней частях по результатам симуляции.
Красная линия – при FRF отключенного трансформатора, синяя – при нагрузке 75 А*

Симуляция показала, что с ослаблением затяжки обмотки её частотные характеристики сильнее зависят от нагрузки. Для отражения этой зависимости исследователи использовали критерий FSR, который показывает относительное смещение основных пиков частотного отклика в зависимости от нагрузки. График FSR для разного уровня затяжки обмотки показан ниже.

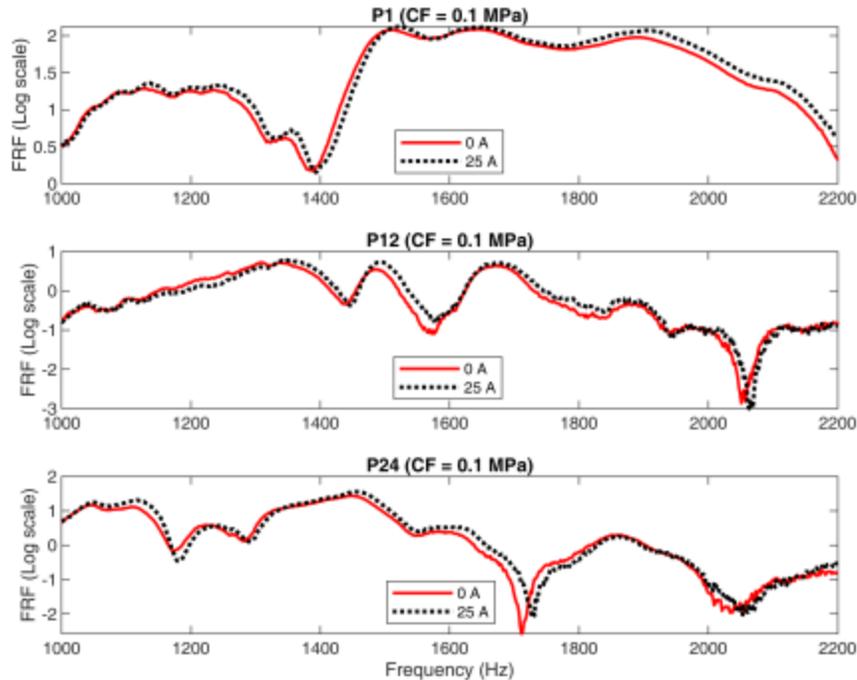


FSR при разной затяжке обмотки

Аналогичные зависимости FRF были получены при замере вибрации на тестовом трансформаторе. Графики FRF показаны ниже.



FRF закреплённой обмотки в верхней, средней и нижней частях. Красная линия – при FRF отключенного трансформатора, синяя – при нагрузке 25 А



FRF ослабленной обмотки в верхней, средней и нижней частях. Красная линия – при FRF отключенного трансформатора, синяя – при нагрузке 25 А

Для описания зависимости частотных характеристик обмотки от нагрузки исследователи применили модель нейронной сети с управляемыми рекуррентными блоками. Схема модели показана ниже.

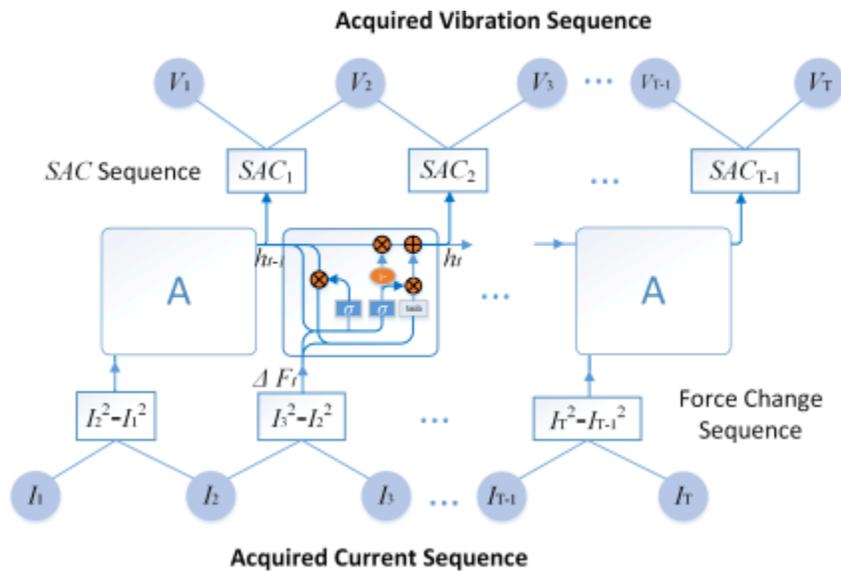
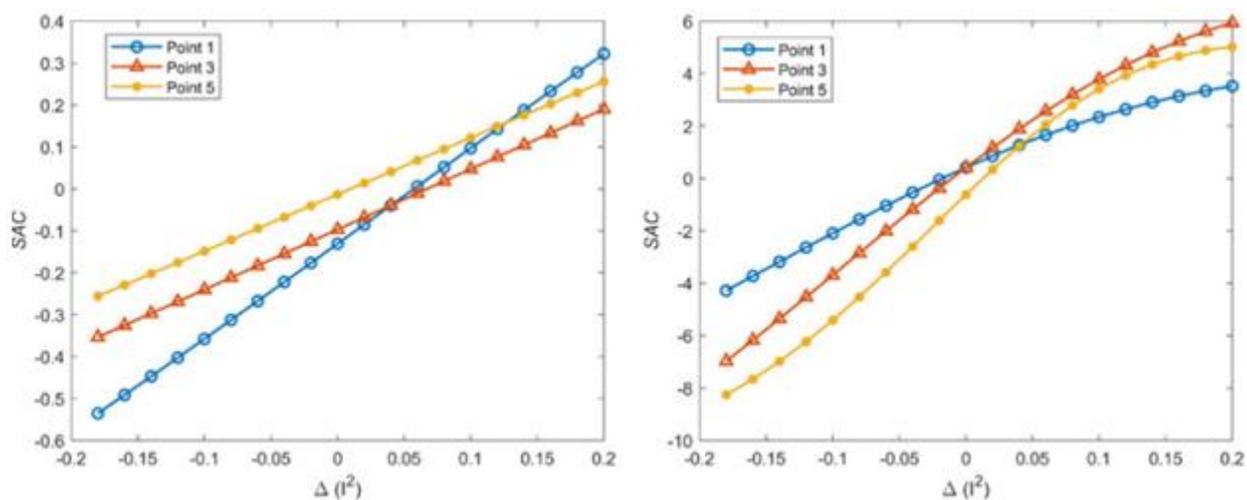


Схема модели

В качестве входных данных модель использует значения нагрузки, в качестве выходных – значения критерия SAC, который показывает общее смещение частотных характеристик целой обмотки. Примеры рассчитанных SAC-критериев закреплённой и ослабленной обмоток в разных точках показаны ниже.



SAC закреплённой (слева) и ослабленной (справа) обмоток в разных точках

Для описания состояния обмотки исследователи предложили использовать отношение SAC к квадрату тока нагрузки. Для ослабленных обмоток этот критерий будет существенно больше, чем для закреплённых.

Вероятностная оценка ресурса силовых трансформаторов

Источник: S. Li, G. Wu, H. Dong, L. Yang and X. Zhen, "Probabilistic Health Index-Based Apparent Age Estimation for Power Transformers," in IEEE Access, vol. 8, pp. 9692-9701, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2963963.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8949535>

Журнал IEEE Access опубликовал статью исследователей из Китая, в которой рассматривался вопрос определения ресурса и построения эффективной модели обслуживания парка силовых трансформаторов. Статья была опубликована в январе 2020 года.

Предложенный подход основывался на вероятностном расчёте индекса технического состояния трансформатора. Схема расчёта показана ниже.

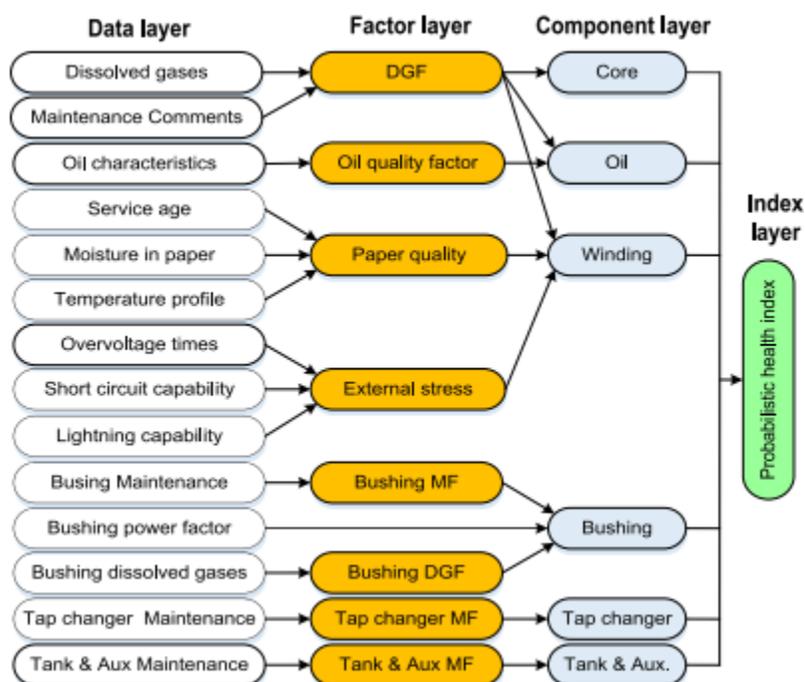
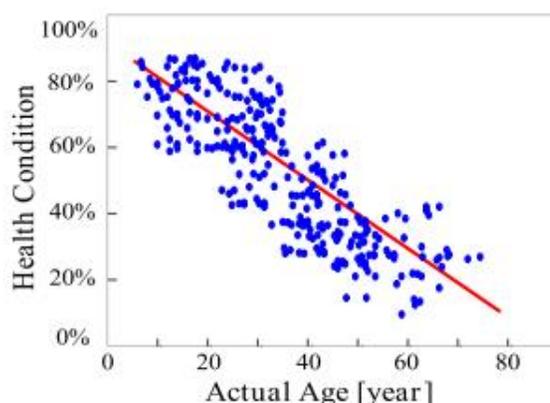


Схема расчёт индекса технического состояния трансформатора

Модель расчёта имела древовидную структуру и состояла из нескольких слоёв: слой данных, факторный слой, слой компонента и слой определения индекса технического состояния. На слое данных вводились результаты множества диагностических измерений на трансформаторе, например – концентрации растворённых газов, температуры, влажности. На факторном слое определялась оценка серьёзности развивающегося дефекта трансформатора на основании диагностических моделей. Далее, на слое компонентов, определялось состояние отдельных компонентов трансформатора на основе результатов диагностических моделей. На слое расчёта индекса определялся индекс технического состояния по оценкам состояния компонентов трансформатора. Значения элементов каждого слоя являлись результатами взвешенной суммы значений элементов предыдущего слоя, подобно тому, как это выполняется в нейронных сетях. Значения весовых коэффициентов определяются предварительно экспертами и могут корректироваться во время использования метода.

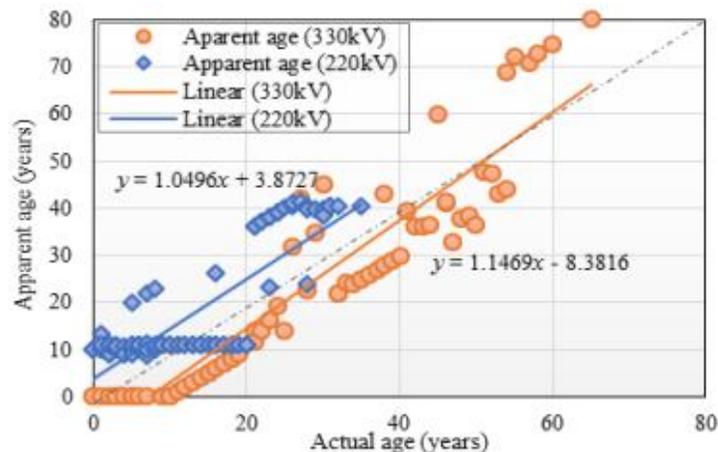
Метод был применён на имеющейся в распоряжении исследователей выборке данных о состоянии 192 трансформаторов для расчёта индекса состояния. Для трансформаторов в выборке были известны годы установки. Получившаяся зависимость между рассчитанным индексом и возрастом трансформаторов показана ниже.



Зависимость возраста трансформаторов от рассчитанного индекса

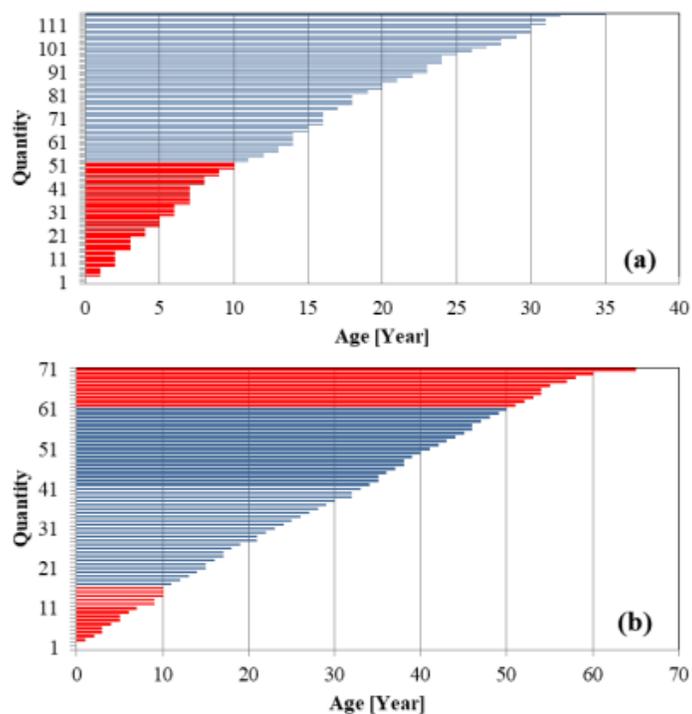
Полученное распределение было аппроксимировано линейной зависимостью, которая в дальнейшем использовалась для определения возраста трансформаторов, для которых известны результаты диагностических измерений, но неизвестны годы установки.

Результаты расчётов были в дальнейшем проверены на выборке трансформаторов одного из энергопредприятий Китая. Пример результатов сравнения показан ниже.



Зависимость фактического (горизонтальная ось) от расчётного (вертикальная ось) ресурса трансформаторов 220 и 330 кВ

На основании результатов оценки ресурса парка трансформаторов исследователи составили гистограммы, показывающие распределения количества трансформаторов по значению ресурса. Пример гистограмм показан ниже.



Диаграммы распределения трансформаторов 220 (выше) и 330 кВ (ниже) по годам службы

В заключении исследования указывается, что разработанные гистограммы предназначены для построения эффективной стратегии обслуживания парка трансформаторов. Разработанные авторами модели были признаны применимыми для использования при планировании обслуживания парка трансформаторов.

Оценка состояния сухих трансформаторов по характеристикам матрицы измерений

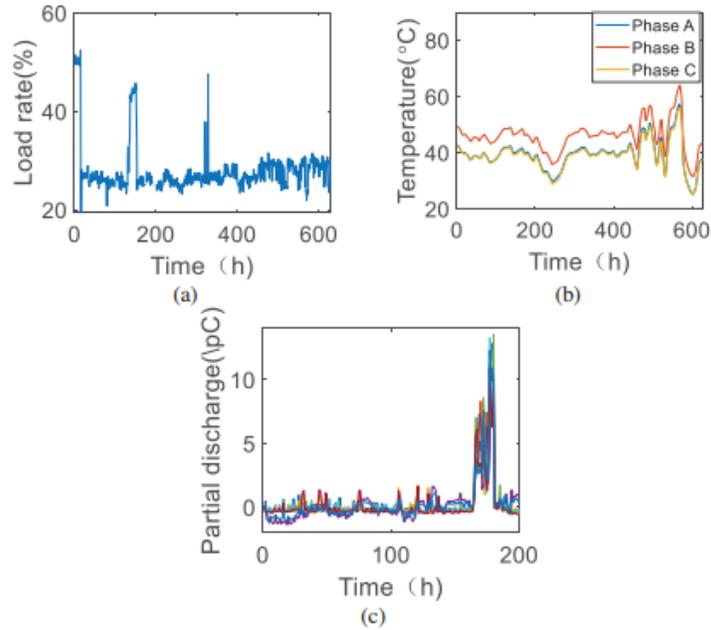
Источник: Y. Hua et al., "Condition Evaluation of Dry-type Transformer Based on High-dimensional Random Matrix Theory," 2020 4th International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA), Singapore, 2020, pp. 51-55, doi: 10.1109/ICGEA49367.2020.239692.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9077545>

Группа авторов из Китая предложила способ контроля состояния сухих трансформаторов по измерениям нагрузки, температуры и активности ЧР, в котором используются положения теории случайных матриц. Соответствующий доклад был представлен на прошедшей в апреле 2020 года International Conference on Green Energy and Applications.

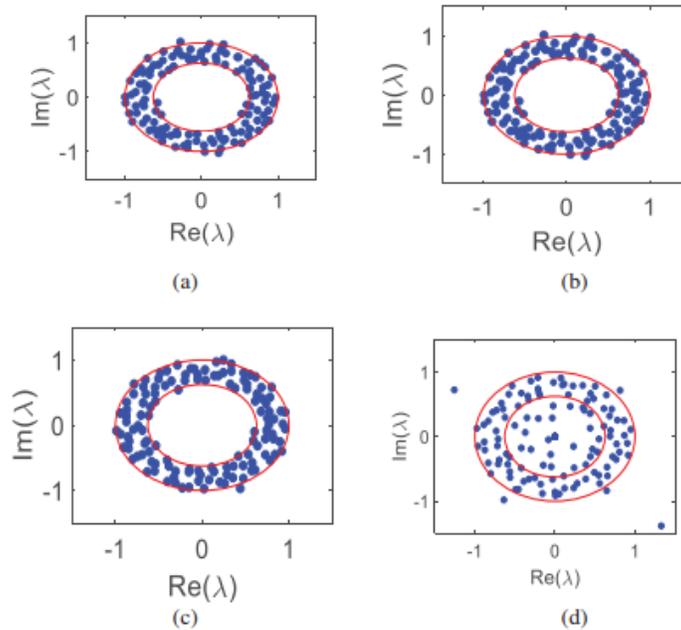
В основе метода лежит составление матрицы оценки состояния трансформатора, которая представляет собой результаты измерений набора параметров трансформатора в течение выбранного промежутка времени. Набор параметров может быть разным, но в качестве основных исследователи предложили использовать измерения нагрузки, температуры и активности ЧР. Матрица затем приводится к нормализованному виду с заданным соотношением числа строк и столбцов. При нормальном режиме работы параметры трансформатора будут изменяться в соответствии с ARMA-моделями, которые описывают линейные взаимосвязи между значением параметра, его предыдущими значениями и ошибкой измерений. При работе трансформатора в аномальном режиме характер изменения параметров будет отклоняться от ARMA-модели. Это будет проявляться в изменении характеристик нормализованной матрицы измерений. Изменение этих характеристик определяется по изменению собственных значений последовательного набора матриц измерений. Каждое собственное значение матрицы является комплексным числом, а распределение собственных значений соответствует распределению их действительных и мнимых частей.

Для проверки метода исследователи использовали данные, собранные на 35 кВ сухом трансформаторе, находящемся в эксплуатации на одном из энергопредприятий Китая. Записанные измерения нагрузки, температуры и активности ЧР показаны ниже.



Параметры трансформатора

Рассчитанные распределения собственных значений нормализованных матриц измерений показаны ниже.



Распределения собственных значений за 4 недели

На распределениях показаны красные границы нормальных режимов работы. Согласно методу, предложенному исследователями, распределения собственных значений, будут лежать внутри двух границ, верхней и нижней. Увеличение дисперсии распределения приведёт к его «расползанию» за границы, что будет являться индикацией аварийного режима работы. В данном

случае в контролируемом трансформаторе начали появляться признаки развивающегося дефекта на четвёртой недели наблюдения.

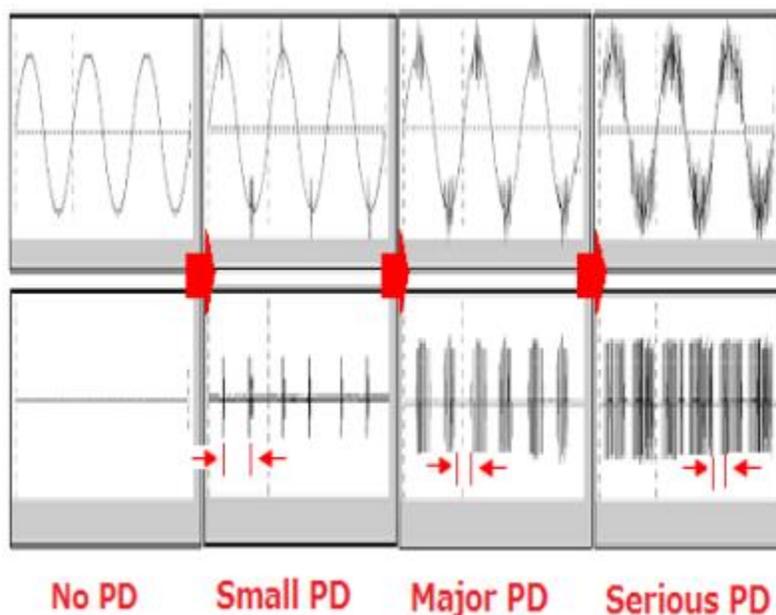
Опыт локализации источника разрядной активности ЧР в сухих трансформаторах

Источник: K. Tikakosol, T. tanitteerapan, N. Mungkung. *Application of the integrated AE and HFCT sensors for online Dry-type Transformer Partial Discharge Monitoring. Case study. Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 97 Nr 2/2021*

Источник: <http://pe.org.pl/articles/2021/2/24.pdf>

Группа исследователей из Технического университета короля Монгкута в Таиланде опубликовала результаты реализации разработанного ими метода для определения мест разрядной активности ЧР в сухих трансформаторах по измерениям, выполняемым акустическими датчиками и высокочастотными трансформаторами тока (ВЧТТ). Соответствующая статья была опубликована в издании *Przegląd Elektrotechniczny* в феврале 2021 года.

Метод ориентирован, в первую очередь, на трансформаторы с изоляцией из литевой смолы. В методе используется ВЧТТ с разъёмным сердечником и несколько акустических датчиков ЧР. ВЧТТ устанавливается на заземляющий проводник трансформатора, акустические датчики размещаются в разных местах на корпусе трансформатора. Локализация источника разрядной активности реализуется сравнением амплитуд сигналов, записанных акустическими датчиками при разном их размещении. В случае, если формы сигналов, регистрируемых акустическими датчиками и ВЧТТ похожи, источником активности является ЧР. В качестве показателя уровня развития дефекта, приводящего к ЧР, исследователи использовали величину *gap time*, равную разности во времени между двумя последовательными всплесками разрядной активности. Чем ниже *gap time*, тем серьезнее дефект. Принцип соотношения *gap time* и уровня дефекта показан ниже.



Соответствие уровня дефекта критерию gap time

Работа метода была продемонстрирована на трансформаторе 24 кВ 800 кВА, который не обслуживался, как минимум, 3 года до испытаний. Для регистрации разрядной активности использовались 4 акустических датчика (AE1-4) и 1 ВЧТТ. Данные датчиков регистрировались прибором PD-TP500A компании PowerPD.

Акустические датчики были установлены на разной высоте на 4 сторонах трансформатора как показано ниже.



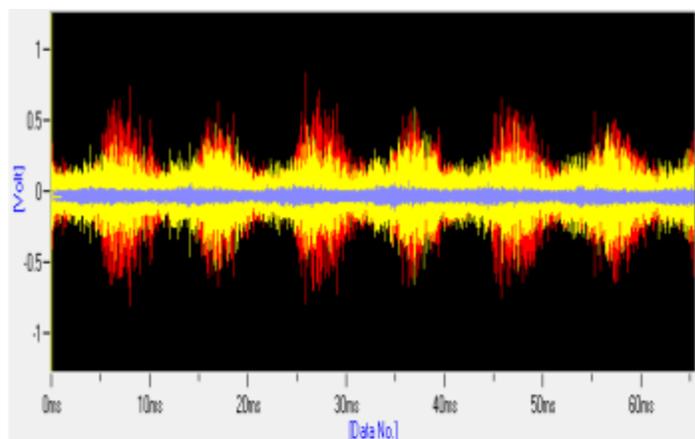
Места установки датчиков

Место установки ВЧТТ показано ниже.



Место установки ВЧТТ

Зарегистрированные осциллограммы акустических сигналов показаны ниже.



Оциллограммы акустических сигналов (наложены друг на друга)

Сравнение оциллограмм показало, что наибольший уровень регистрировал датчик АЕ2. Затем остальные 3 датчика были перемещены и расположены рядом с датчиком АЕ2 по горизонтали как показано ниже.



Размещение датчиков по горизонтали рядом с АЕ2

После перемещения наибольшую амплитуду разрядной активности регистрировал датчик АЕ3. После этого остальные 3 датчика были размещены по вертикали относительно АЕ3. Размещение датчиков показано ниже.



Размещение датчиков по вертикали рядом с АЕЗ

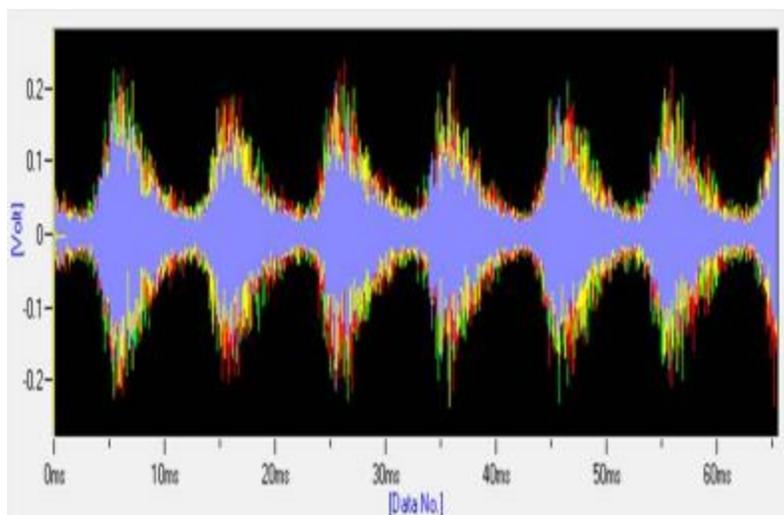
После этого перемещения наибольшую амплитуду разрядной активности регистрировал датчик АЕ2. Расположение этого датчика соответствовало месту дефекта в трансформаторе.

Для дальнейшего анализа расположение датчиков АЕ1 и АЕ4 было изменено, датчики были установлены рядом с АЕ3 и АЕ4 как показано ниже.



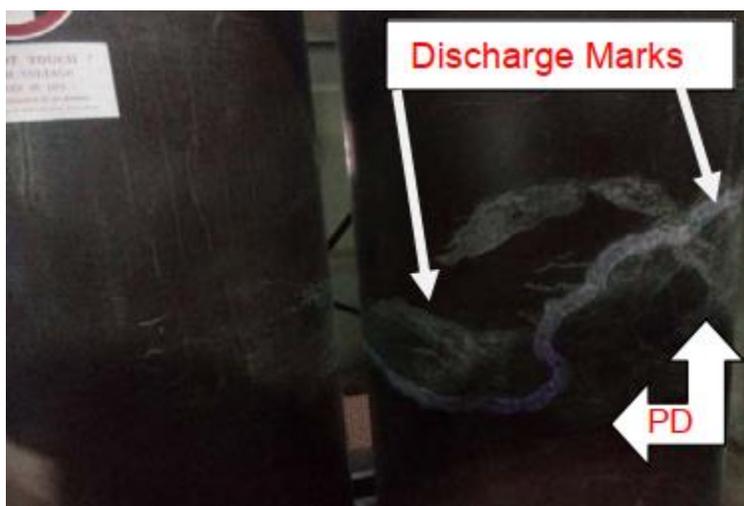
Размещение АЕ1 и АЕ4 рядом с АЕ2 и АЕ3

Записанные после этого осциллограммы всех датчиков примерно совпадали друг с другом и с осциллограммой, записанной ВЧТТ. Осциллограммы показаны ниже.



Осциллограммы сигналов после последнего перемещения

Измеренное значение параметра gap time в этом случае составило 3,2 мс, что, согласно данным производителя регистратора ЧР, соответствует уровню развившегося дефекта. Трансформатора затем был остановлен и состояние его изоляции было исследовано вручную. Диагностические выводы подтвердились. В месте, определённом при помощи акустических датчиков, были обнаружены отметки развития разрядов, показанные на рисунке ниже.



Следы развития ЧР

Опыт разработки модели контроля состояния сухого трансформатора по распределению температуры

Источник: Yuanyuan Sun, Yue Hua, Erdong Wang, Na Li, Shuo Ma, Lina Zhang, Yiru Hu, A temperature-based fault pre-warning method for the dry-type transformer in the offshore oil platform, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 123, 2020, 106218, ISSN 0142-0615

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0142061520312011>

Группа исследователей из Китая разработала метод контроля распределения температуры сухого трансформатора на основе граничных критериев, определяемых моделью, в которой использует рассеянное Байесовское обучение. Работа авторов была опубликована в издании Electric Power and Energy System в декабре 2020 года.

Разработку модели предваряло проведённое авторами изучение физических процессов, происходящих в трансформаторе при его работе и влияющих на распределение температуры. В результате для построения модели были определены следующие значащие параметры: нагрузка, температура окружающего воздуха, режим работы системы охлаждения, три ретроспективных значения температуры в рассматриваемой точке трансформатора. Матрицы этих значений являлись входными данными для модели температуры.

При разработке модели температуры решалась задача регрессионного анализа для установления соответствия между текущей температурой и набором входных данных. Из-за необходимости учёта неопределённости метода, текущая температура задавалась в виде функции плотности вероятности, распределение которой определяется методом Байеса как апостериорная гипотеза на основе априорной гипотезы, определяемой входными данными. Распределение рассчитываемой температуры являлось нормальным, поэтому в апостериорной гипотезе определялись математическое ожидание и среднеквадратичное отклонение распределения рассчитываемой температуры. Это также сделало применимым правило трёх сигм, по которому 99.7% измерений, следующих нормальному распределению, будут находиться на расстоянии не более трёх среднеквадратичных отклонений (сигма) от математического ожидания измеряемой величины. Величины, отклоняющиеся на величину больше трёх сигм, будут являться аномальными. Схематичное изображение метода показано ниже.

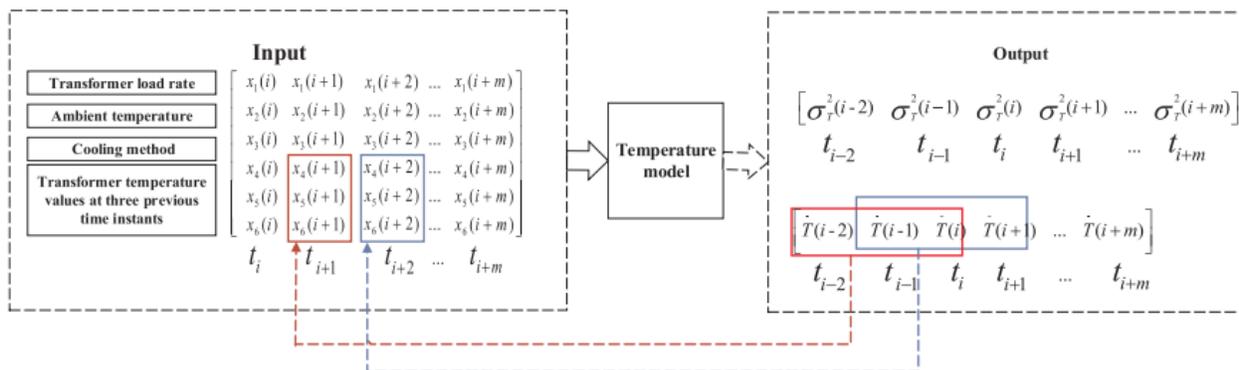
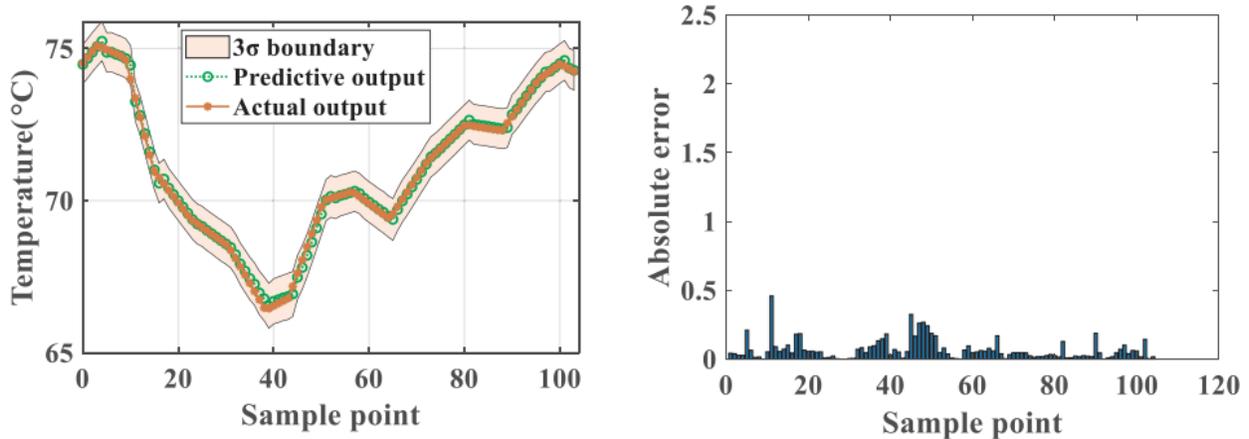


Схема метода

Для дополнительной отстройки от аномальных значений температуры, вызванных поломкой датчиков, а не объективным развитием дефекта в трансформаторе, исследователи дополнительно контролировали распределение разниц между измеряемой температурой и её значением,

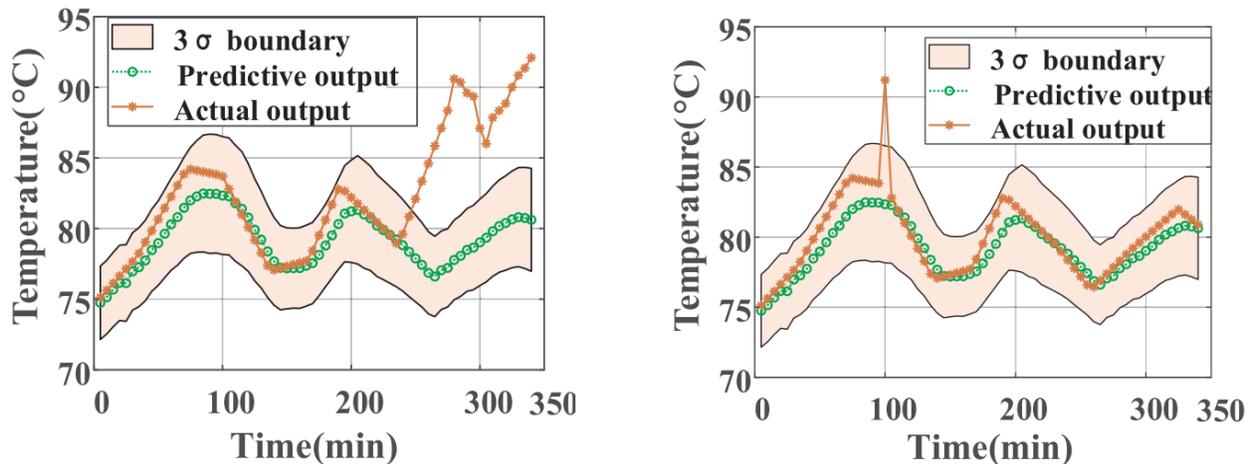
предсказанным моделью. Неисправности датчиков характеризовались резким ростом или падением температуры, в отличие от эффекта развивающегося дефекта, когда изменение температуры было более плавным. Аномальные данные, вызванные неисправностью датчиков, исключались из анализа.

Работа метода была опробована на сухом трансформаторе 6,3/35 кВ, 8000 кВА на нефтяной платформе в Китае. Графики фактической и предсказанной моделью температур показаны ниже.



Слева: графики фактической и предсказанной температур. Дополнительно показаны границы интервала 3σ. Справа: ошибки предсказания

Работа модели в условиях аномальных значений, связанных с неисправностью датчика и с дефектом трансформатора, показана ниже.



Слева: работа модели в условиях развивающегося дефекта, справа: в условиях неисправности датчика

В заключении исследования указано, что результаты исследования признаны успешными, а метод применимым для решаемой задачи.

Вибродиагностика подшипников качения в условиях коротких выборок данных

Источник: I. Attoui, "Novel Fast and Automatic Condition Monitoring Strategy Based on Small Amount of Labeled Data," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems*, doi: 10.1109/TSMC.2020.3018102.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9194082>

Сотрудники исследовательского центра промышленных технологий в Алжире разработали и опробовали метод классификации состояний подшипников качения по данным вибрации в условиях коротких выборок данных, когда применение традиционных методов может представлять сложность. Работа была опубликована в *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* в сентябре 2020 года.

Суть метода состоит в том, что для каждой единицы исследуемого оборудования заранее создаются наборы референсных сигналов, соответствующих разным классам работы этого оборудования, включая дефектные. Для этого оборудование предварительно испытывается с разными условиями работы: с дефектами и без, с разной скоростью, с разной нагрузкой. К каждому набору записанных данных затем применяется быстрое преобразование Фурье. Затем по спектрам всех наборов данных, присущих одному состоянию оборудования, рассчитывается среднее арифметическое. Условное графическое изображение этого принципа показано ниже.

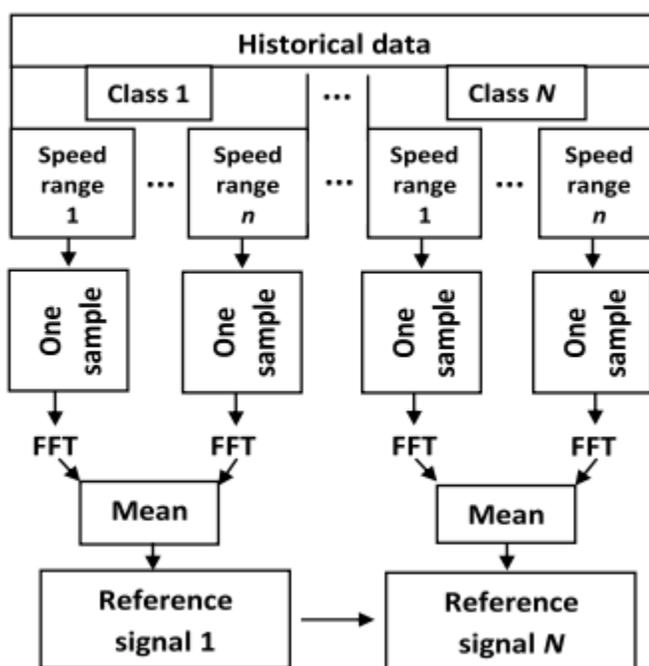


Схема генерации референсных спектров

Получившийся спектр используется в качестве референсного, с которым затем сравниваются спектры сигналов, регистрируемых при эксплуатации оборудования. Для расчёта близости рабочего спектра с референсному используется непрерывная временная свёртка рабочего и референсного спектров. Чем выше значение свёртки, тем более похожи спектры.

Далее, среди всех референсных спектров выбирается наиболее близкий к рабочему спектру по максимальному значению свёртки. Класс состояния оборудования, соответствующий референсному спектру, будет соответствовать состоянию оборудования.

Общая схема предложенного метода показана ниже.

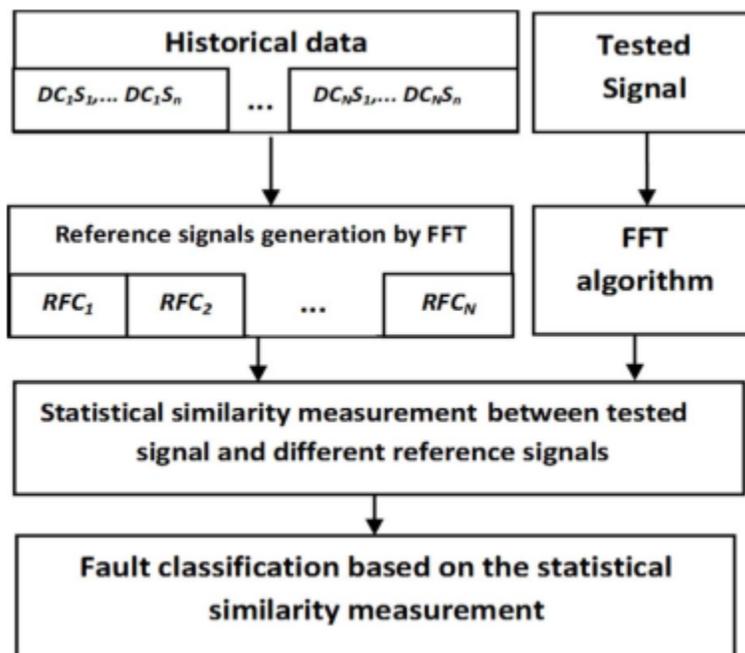
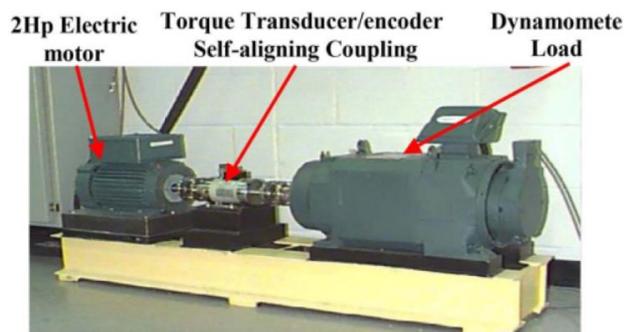


Схема предложенного метода

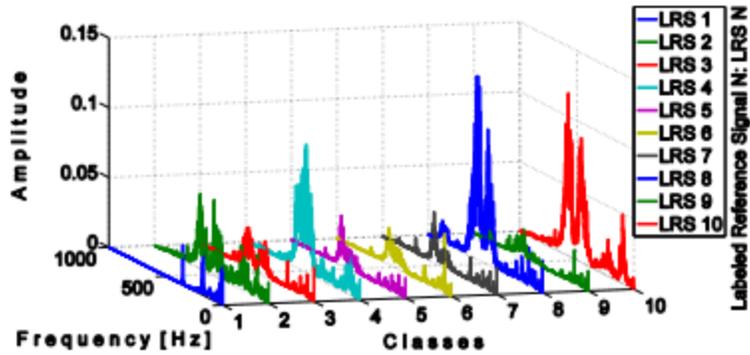
Работа метода была проверена на двух установках, показанных ниже.



Тестовые установки

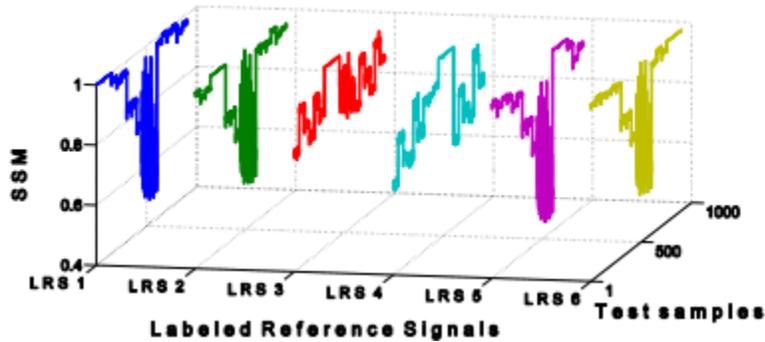
Установки представляли собой двигатели 1,5 кВт и 0,37 кВт с контролируемой скоростью вращения и усилием на валу. Двигатели запускались с разной скоростью и нагрузкой и разным состоянием подшипников качения. Для имитации условий работы на реальном производственном объекте в данные был искусственно добавлен белый шум.

Примеры референсных спектров, рассчитанных по данным вибрации, показаны ниже. На изображении каждый класс соответствует одному типу дефекта подшипника.



Референсные спектры

Пример результатов расчёта близости записанных при испытаниях спектров вибрации референсным спектрам показаны ниже.



Результаты расчётов. Оси: Test samples – номер испытания, Labeled reference signals – индексы референсных спектров, SSM – степень близости спектра вибрации в данном испытании данному референсному спектру

Авторы указывают в заключении, что предложенный метод может найти применение при диагностике оборудования в условиях недостаточности или обрывочности данных. В таких ситуациях точность диагностики превышает точность, достигаемую традиционными методами.