



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 1 декабря 2020 года

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

1. [Разработка двухосевого оптического датчика вибрации](#)
2. [Определение биения вала и расцентровки приливных турбин при помощи контроля вибрации](#)
3. [Опыт разработки и испытаний антенного датчика ЧР](#)
4. [Разработка оптического датчика акустической эмиссии ЧР](#)
5. [Разработка и оптимизация характеристик акустического датчика ЧР](#)
6. [Опыт разработки антенного датчика поверхностного тока ЧР в КРУЭ](#)
7. [Исследование ЧР в печатных платах с конформным покрытием](#)
8. [Метод мониторинга оборудования комбинацией алгоритмов машинного обучения](#)
9. [Применение методов машинного обучения для контроля состояния подшипников асинхронного двигателя](#)
10. [Моделирование тока статора асинхронного двигателя для обнаружения дефектов подшипников](#)

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

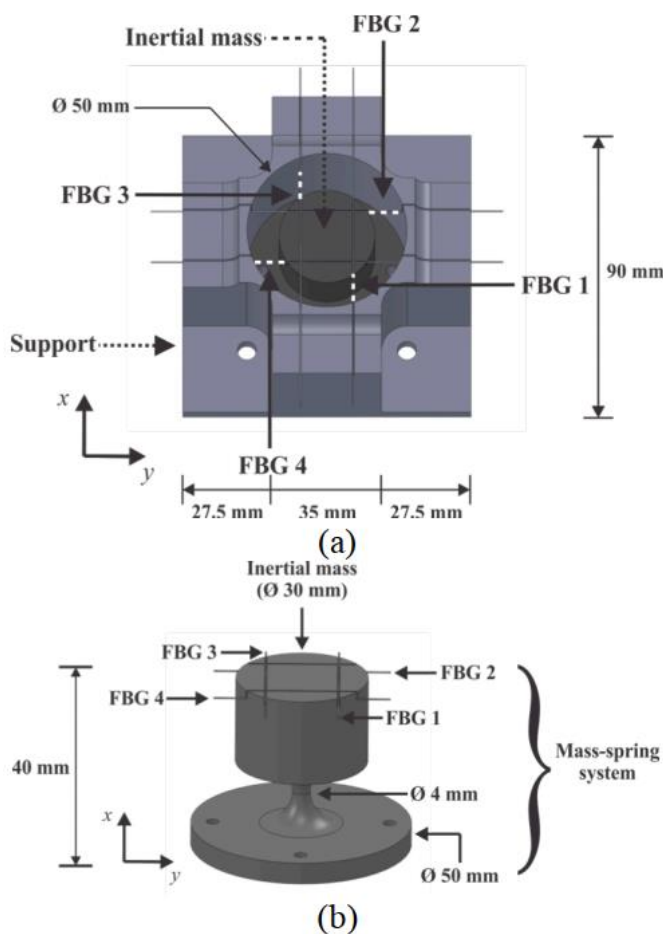
Разработка двухосевого оптического датчика вибрации

Источник: R. Pomorski Linessio, K. d. M. Sousa, T. da Silva, C. A. Bavastri, P. F. d. C. Antunes and J. C. Cardozo da Silva, "Induction Motors Vibration Monitoring Using a Biaxial Optical Fiber Accelerometer," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 22, pp. 8075-8082, Nov.15, 2016, doi: 10.1109/JSEN.2016.2604850.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7556974>

Группа исследователей из Бразилии разработала прототип двухосевого датчика вибрации, использующего оптические решётки Брэгга в качестве чувствительных элементов. Соответствующая статья была опубликована в августе 2016 года в издании *IEEE Sensors Journal*.

Конструкция датчика показана на изображении ниже.

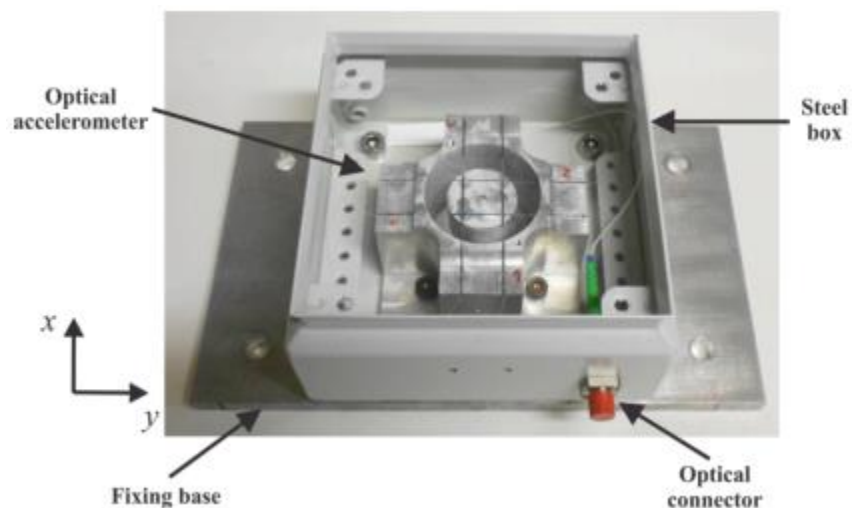


Конструкция датчика, вид сверху и сбоку

В датчике используется груз цилиндрической формы, к которому с четырёх сторон крепятся оптические решётки Брэгга (FBG). Принцип измерения основан на свойстве оптических решёток изменять свои оптические характеристики при приложении механического напряжения и изменении температуры. Колебания груза приводят к сжатию решёток и изменению их оптических свойств. Для измерения вибрации по одной оси используются решётки FBG1 и FBG3, по другой FBG2 и FBG4. Использование двух решёток на каждое направление позволяет добиться независимости результатов измерения от колебаний температуры.

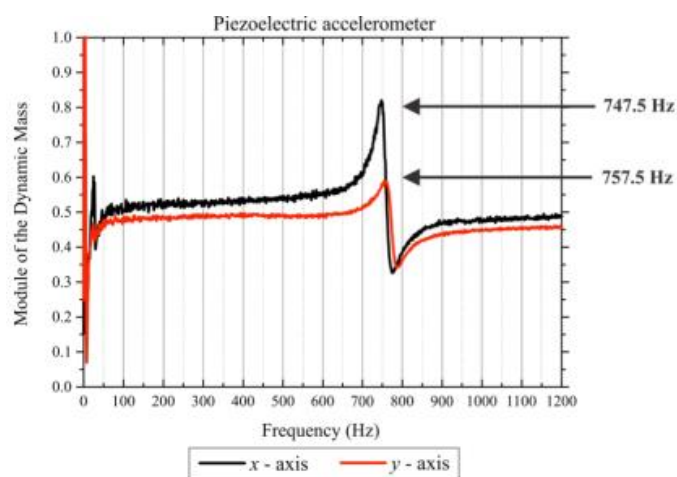
Подавая на датчик пучки света и измеряя изменение интенсивности прямого и отражённого света можно делать вывод об уровне вибрации, действующей на датчик.

Внешний вид изготовленного прототипа датчика показан на изображении ниже.



Прототип датчика

Для измерения собственных резонансных частот датчик был помещён на металлическую поверхность вместе с референсным пьезоэлектрическим датчиком вибрации. На поверхность воздействовали испытательным молотком модели PCB 086C04. График измеренного частотного отклика показан на изображении ниже, из которого видно, что датчик характеризуется резонансной частотой 747.5 Гц в x-направлении и 757.5 Гц в y-направлении.



Частотный отклик датчика

Для проверки работы датчика на электродвигателе были проведены два испытания.

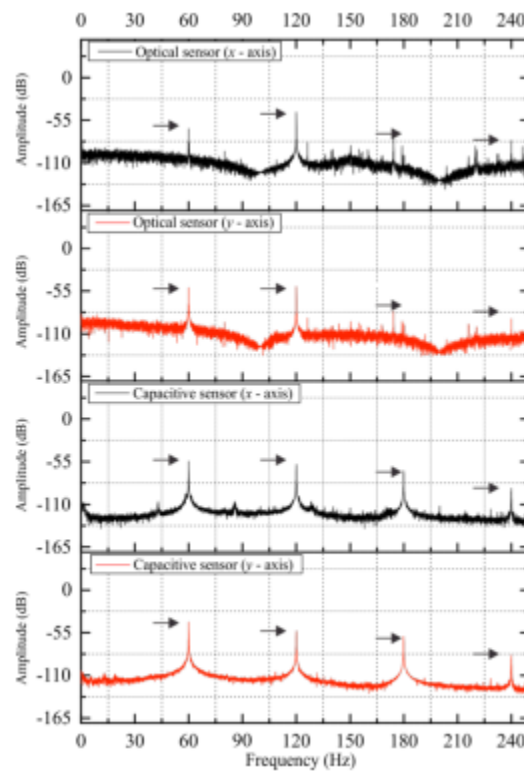
Изображение испытательной установки с двухполюсным двигателем мощность 5 л.с. показано на изображении ниже.



Испытательная установка

Двигатель был запитан от преобразователя частоты. При испытаниях частота питания двигателя изменялась в диапазоне от 10 Гц до 60 Гц. Для проверки результатов испытаний на двигателе был дополнительно установлен пьезоэлектрический датчик вибрации.

Спектры измеренного оптическим и пьезоэлектрическим датчиком виброускорения показаны на изображении ниже.



Спектры виброускорений: верхние – измеренные оптическим датчиком по осям x и y, нижние – измеренные пьезоэлектрическим датчиком по осям x и y

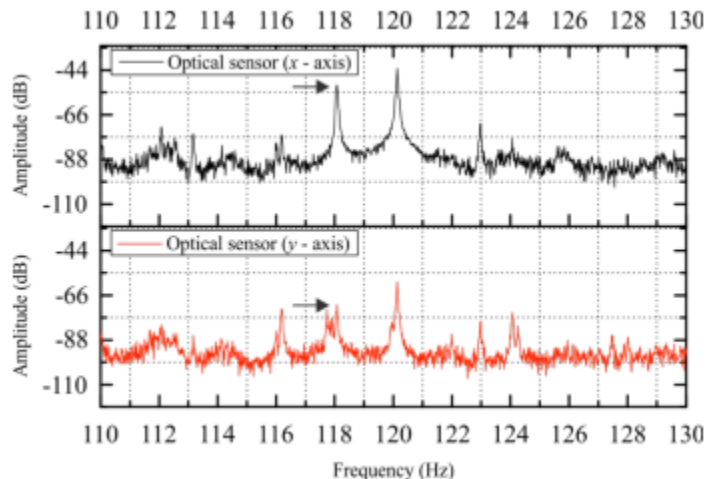
На графиках видна хорошая сходимость результатов. В спектрах сигнала оптического датчика видны дополнительные незначительные пики в частотах, не кратных частоте вращения, что, вероятно, вызвано отсутствием какой-либо математической обработки сигнала оптического датчика.

Второе испытание проводилось на четырёхполюсном двигателе мощностью 3 л.с. В одном из стержней двигателя было высверлено отверстие для имитации дефекта. Нагрузка на двигателе создавалась синхронным генератором 4 кВА. Изображение испытательной установки показано ниже. Измерения проводились только оптическим датчиком.



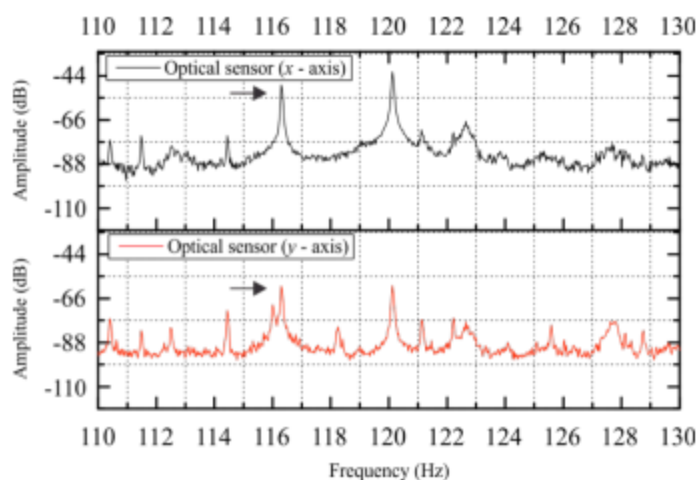
Испытательная установка

Спектры измеренной оптическим датчиком вибрации при нагрузке двигателя 75% номинальной показаны ниже.



Спектры вибрации при нагрузке 75%, выше – по оси x, ниже – по оси y

Спектры измеренной оптическим датчиком вибрации при нагрузке двигателя 100% номинальной показаны ниже.



Спектры вибрации при нагрузке 100%, выше – по оси x, ниже – по оси y

Полученные данные говорят о хорошем отношении сигнал-шум. Характерные гармоники в спектрах корректно указывают на наличие дефектного стержня.

Вместе с тем, в заключении исследования указывается, что размеры прототипа датчика велики, что осложняет его широкое применение на небольших машинах. Дальнейшая работа авторов будет направлена на уменьшение размеров датчика и исследование частотных свойств исполнений датчика новой конструкции.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



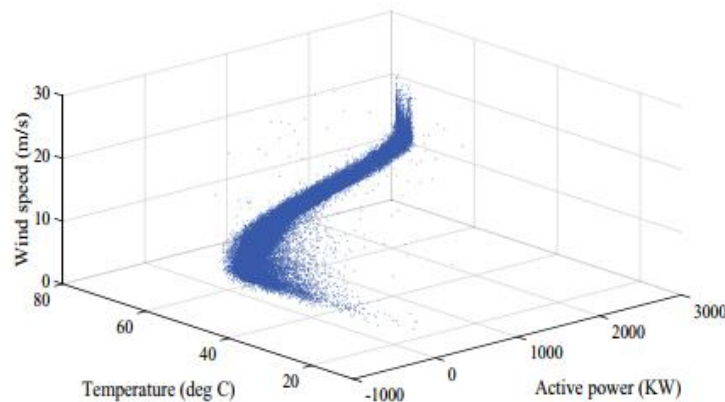
Система мониторинга ветрогенератора на основе облачных технологий

Источник: Peng Qian, Dahai Zhang, Xiang Tian, Yulin Si, Liangbi Li, A novel wind turbine condition monitoring method based on cloud computing, *Renewable Energy*, Volume 135, 2019, Pages 390-398, ISSN 0960-1481

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148118314769>

Группа исследователей из Великобритании и Китая предложила систему мониторинга состояния ветрогенераторов, использующую технологии машинного обучения и облачных вычислений. Соответствующая статья была опубликована в издании *Renewable Energy* в мае 2019 года.

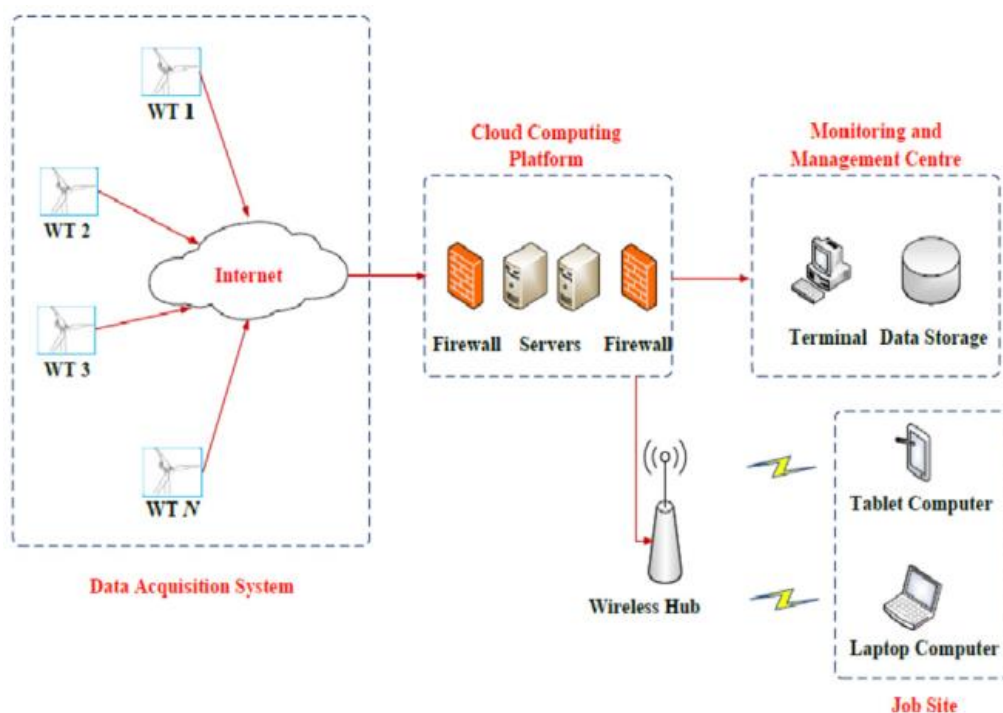
Работа системы основана на фундаментальной зависимости между параметрами генератора, например – температурой масла в редукторе, активной мощностью и скоростью ветра, которая известна из практики эксплуатации турбин такого класса. Пример зависимости показан на графике ниже.



Пример зависимости между температурой, активной мощностью и скоростью ветра

Исследователи использовали несколько алгоритмов машинного обучения для описания зависимости между параметрами ветрогенератора. Признаком неисправности генератора являлось слишком большое расхождение между значением одного из параметров, определённого при помощи машинного обучения, и его фактическим значением, определяемым датчиком.

Структурная схема системы показана на изображении ниже.



Структурная схема системы

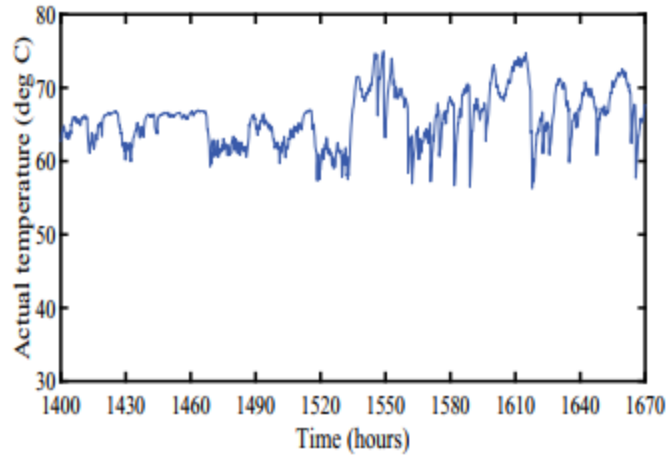
Основными компонентами системы являются: система сбора данных датчиков, установленных на ветрогенераторе, система облачных вычислений, центр мониторинга и рабочие места операторов.

Данные с датчиков, установленных на ветрогенераторе, после обработки передавались через Интернет в систему облачных вычислений, в которой выполнялось построение модели диагностики. Диагностические данные поступали в центр мониторинга для планирования мероприятий по обслуживанию и на рабочие места операторов.

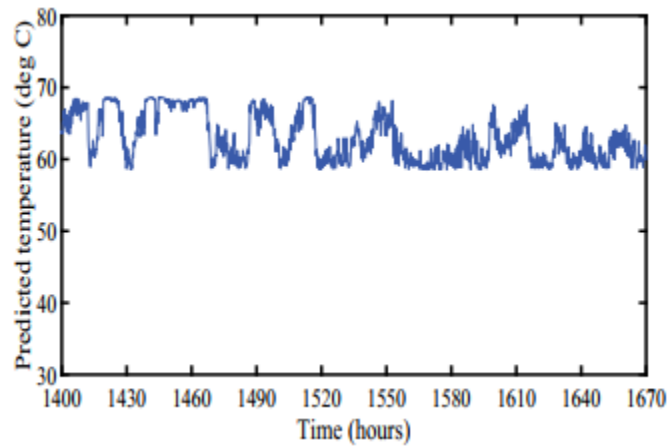
Модели диагностики основывались на алгоритмах машин экстремального обучения, расширении алгоритмов искусственных нейронных сетей, в которых возможно более быстрое выполнение модели за счёт небольшой потери в точности.

Поскольку для передачи данных в системе использовался Интернет, исследователи отдельно подошли к вопросу защиты передаваемых данных. Для этого первый нейросетевой слой модели диагностики рассчитывался на уровне системы передачи данных. Данные затем сжимались и передавались в систему облачных вычислений, где выполнялось их развёртывание и дальнейшее построение модели диагностики.

Система была испытана на ветроустановке, на которой измерялись скорость ветра, вырабатываемая мощность, температура воздуха и температура масла в редукторе. Первые три параметра использовались в качестве входных в модели, последний – в качестве контрольного. Графики измеренной и предсказанной температур масла в редукторе показаны ниже

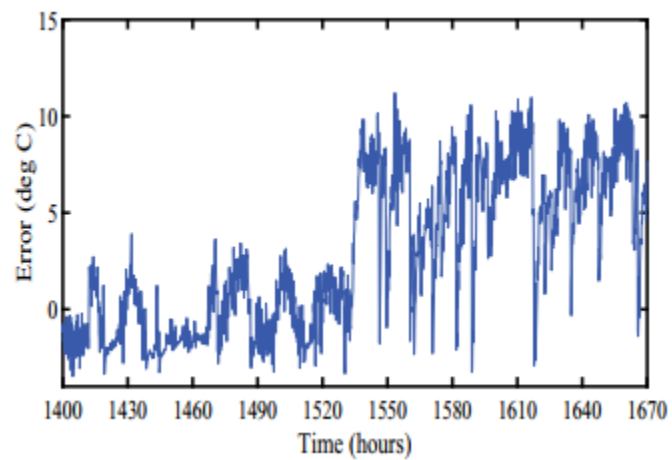


Измеренная температура



Предсказанная температура

Разность между измеренной и предсказанной температурой показана ниже.



Разность между измеренной и предсказанной температурой

Из разности температур виден скачок примерно на 1530 часу работы, который соответствует появлению дефекта.

В заключении исследования указывается, что работа будет продолжаться, дальнейшие разработки будут направлены на создание единого устройства, реализующего описанный метод.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



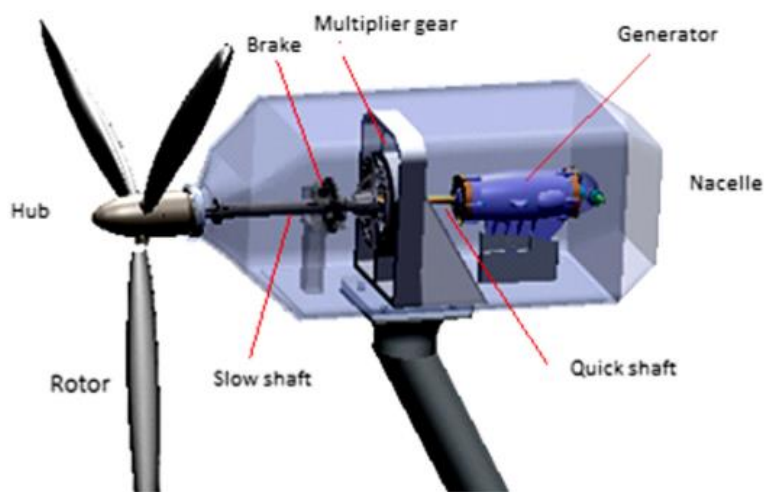
Определение биения вала и расцентровки приливных турбин при помощи контроля вибрации

Источник: De Cal, B.F. Application of vibration monitoring to the detection of early misalignment and rub failures in a tidal turbine. Technol Econ Smart Grids Sustain Energy 4, 9 (2019).

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs40866-019-0065-1>

В статье, опубликованной в издании Technology and Economics of Smart Grids and Sustainable Energy в мае 2019 года, исследователи из Университета Ла-Корунья в Испании рассмотрели вопрос диагностики состояния приливных турбин по данным вибрации.

В качестве модели для исследования рассматривался тип турбин, устанавливаемых Европейским центром морской энергетики в Шотландии. Схематичное изображение такой турбины показано ниже.



Приливно́я турбина

Схема расцентровки опор вала турбины схематично показана на изображении ниже.

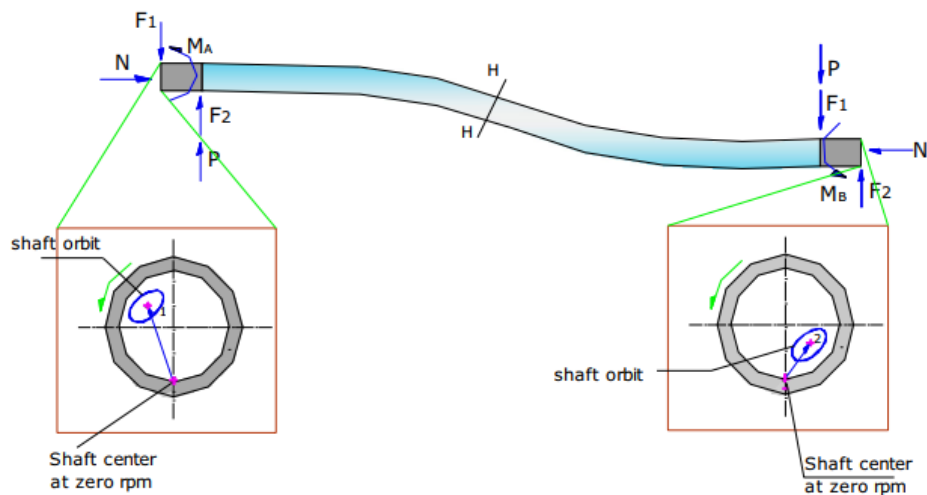


Схема расцентровки

В этом случае для работы турбины характерны дополнительные усилия:

- F_1 и F_2 в местах креплений подшипников вала, приводящие к появлению изгибающего момента вала;
- N , действующая по оси вала и передающаяся подшипникам;
- P , вызванная радиальными силами в местах креплений подшипников.

Для исследования работы турбины в таких условиях авторы статьи использовали макет турбины, показанный на изображении ниже.



Макет приливной турбины

Схема установки показана ниже.

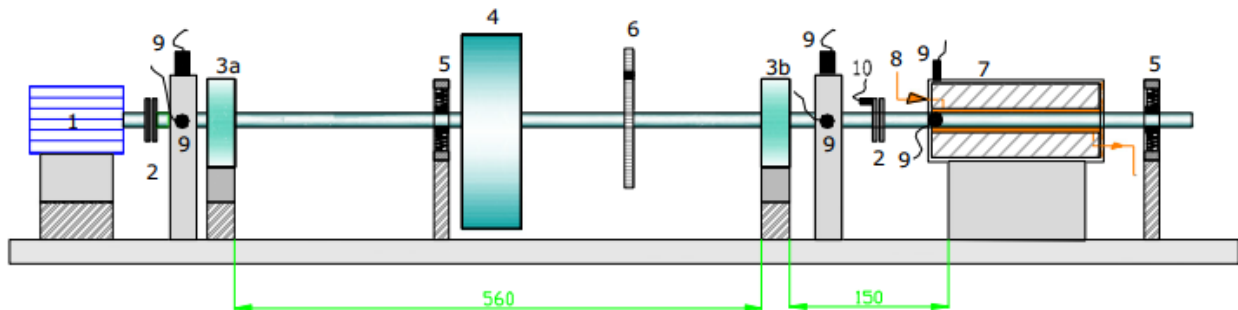


Схема установки

Схема состояла из:

1. Двигателя 75 Вт;
2. Гибкой муфты;
3. Подшипников;
4. Ротора с нагрузочным диском 1.63 кг;
5. Пружинной опоры вала;
6. Алюминиевого диска для управления небалансом ротора;
7. Масляного уплотнения длиной 50 мм и радиальным зазором 220 мкм, заполненным маслом под давлением 10.342 Па;

8. Ввода масла;
9. Датчиков горизонтальной и вертикальной вибрации и фазового угла;
10. Индуктивного датчика осевой вибрации.

Схема размещения датчиков показана ниже.

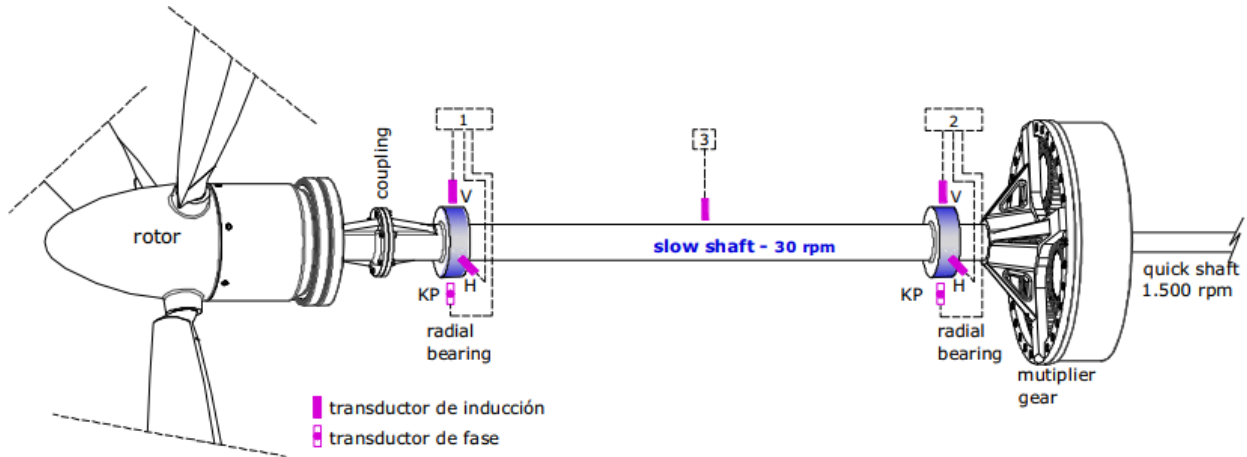
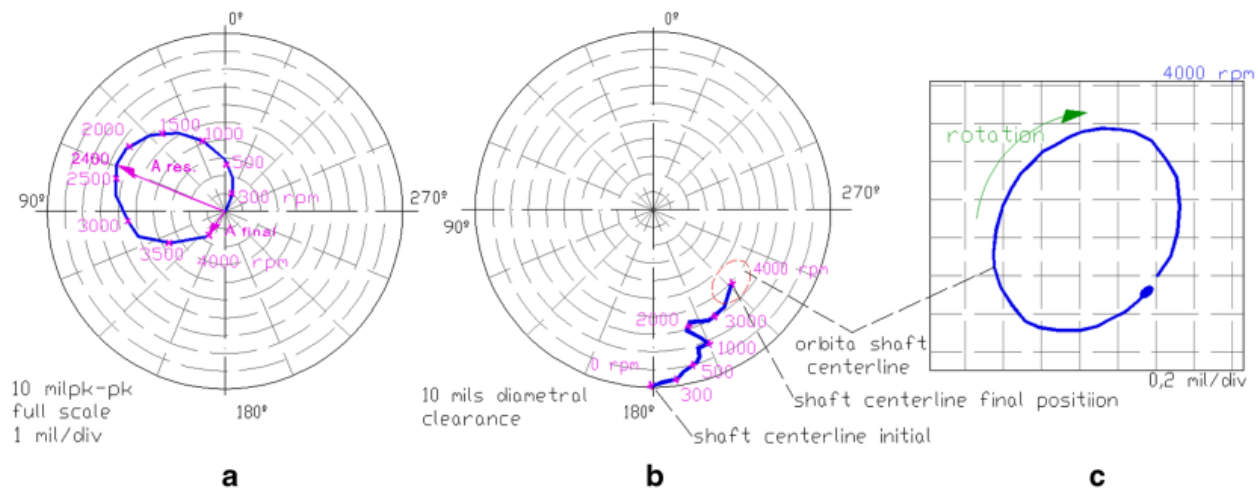


Схема размещения датчиков

Данные, полученные при запуске установки без дефектов, показаны на изображении ниже.



Запуск установки без дефектов: а) диаграмма Найквиста при пуске, виден резонанс на 2400 об/мин с амплитудой 6.6 мил; б) диаграмма Найквиста, показывающая положение центра вала при пуске, в) форма орбиты ротора

Для создания расцентровки опора подшипника 3b была опущена на 50 мкм относительно опоры подшипника 3a. Получившиеся в результате диаграмма Найквиста и форма орбиты вала показаны на изображении ниже.

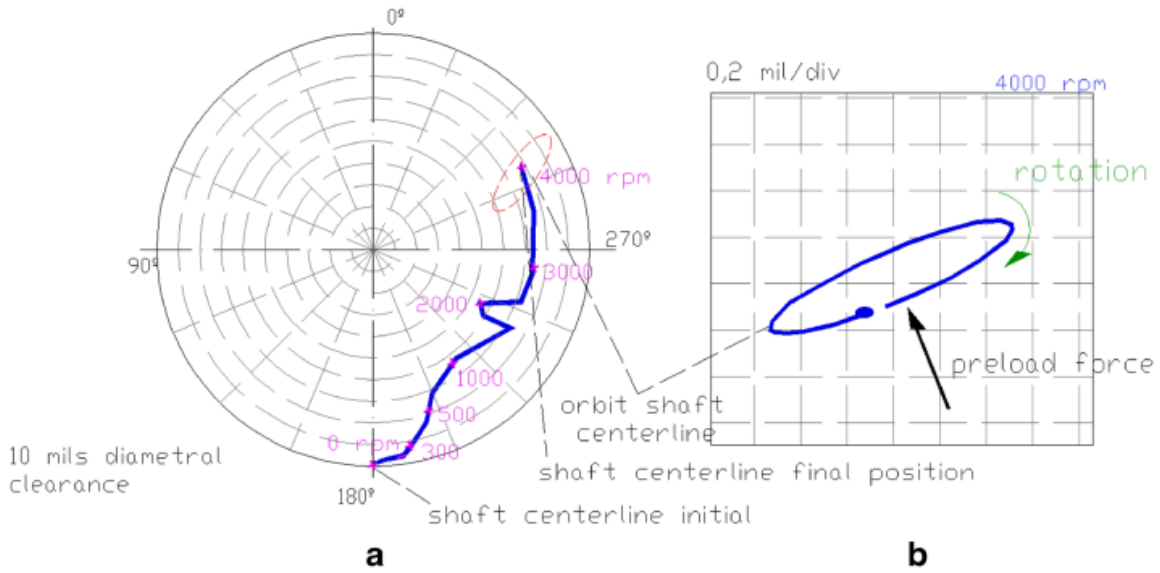


Диаграмма Найквиста и форма орбиты вала после смещения на 50 мкм

Данные после опуска опоры 3b на 75 мкм показаны ниже.

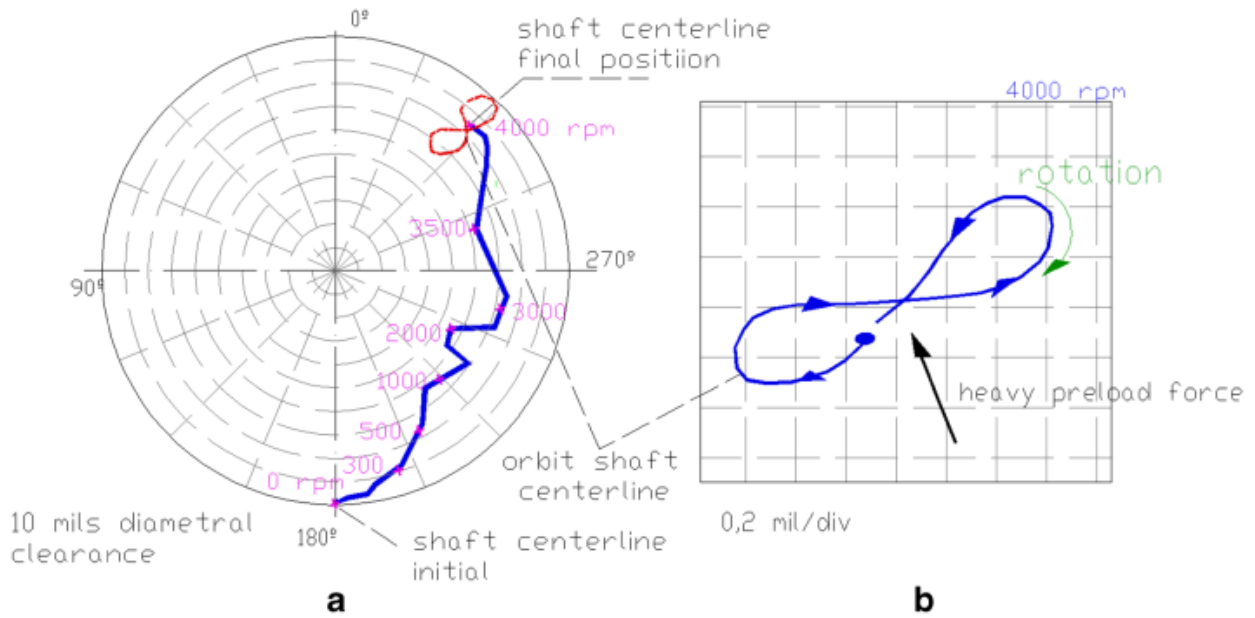
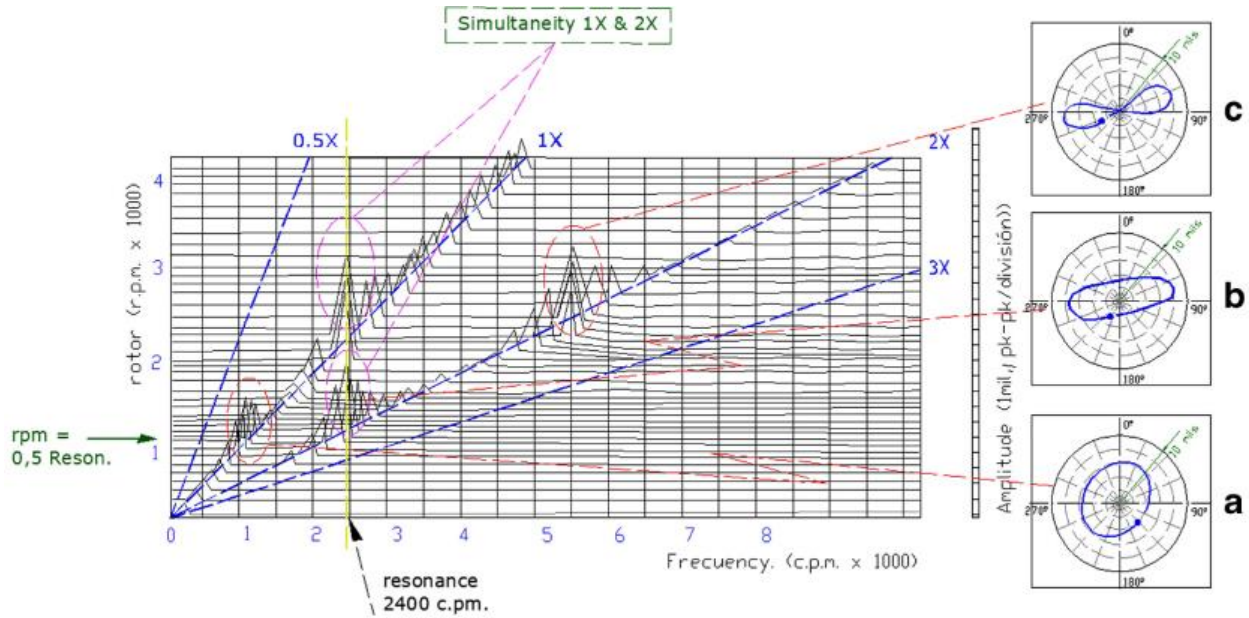


Диаграмма Найквиста и форма орбиты вала после смещения на 75 мкм

Каскадный спектр зарегистрированных при смещениях данных вибрации показан на изображении ниже.

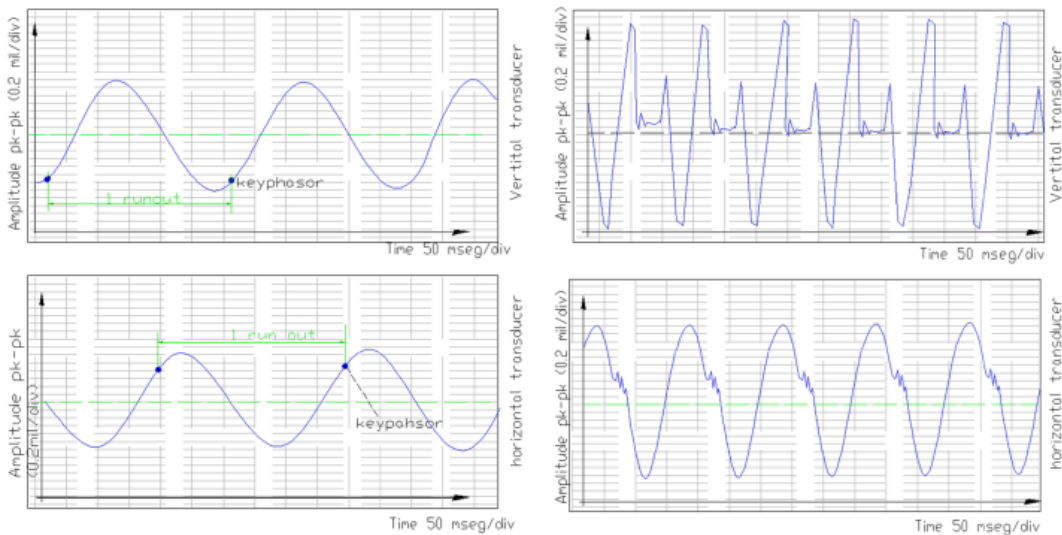


Каскадный спектр данных вибрации

Характерными признаками расцентровки, обнаруживаемыми из спектра, являются:

- Пики на одинарной и двойной частоте вращения вала;
- Общее возрастание амплитуд на однократной частоте вращения;
- Эллиптические орбиты или орбиты в форме восьмёрки;
- Повышение амплитуд во спектрах при частоте вращения ротора, равной половине резонансной частоты.

Осциллограммы сигналов вертикальной и горизонтальной вибрации до и после смещения показаны на изображении ниже.



Осциллограммы вибрации: до (слева) и после (справа) смещения по горизонтали (ниже) и вертикали (выше)

Из осциллограмм видно, что вертикальное смещение привело к увеличению амплитуды и появлению дополнительных гармоник только в вертикальной компоненте вибрации.

Авторы статьи также выполнили расчёт динамической жёсткости вала в условиях расцентровки и биений. Для работы вала без биений, но с расцентровкой, жёсткость вала не меняется по сравнению с бездефектным валом. В условиях наличия расцентровки и биений динамическая жёсткость меняется.

В заключении исследования указывается, что полученные результаты помогут в дальнейших исследованиях состояния приливных турбин.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



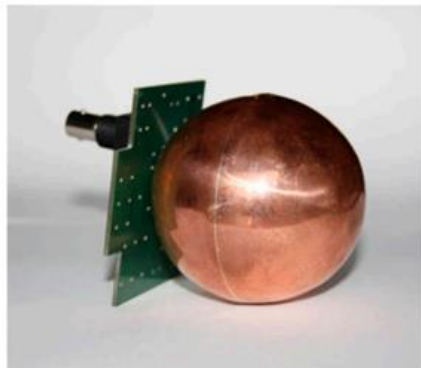
Опыт разработки и испытаний антенного датчика ЧР

Источник: Romano, P.; Imburgia, A.; Ala, G. *Partial Discharge Detection Using a Spherical Electromagnetic Sensor*. *Sensors* 2019, 19, 1014.

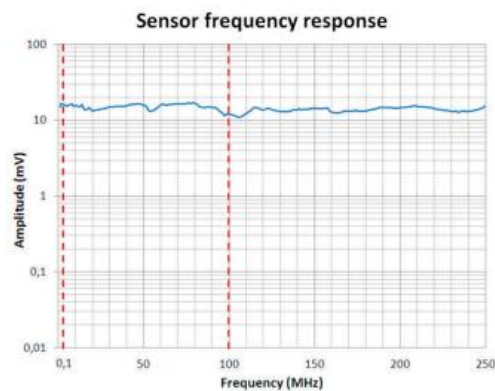
<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/5/1014>

В статье, опубликованной в феврале 2019 года в издании *Sensors*, группа исследователей из Италии поделилась опытом разработки и испытаний неинтрузивного датчика ЧР.

В качестве антенны в датчике используется проводящая сфера, размещённая над проводящей референсной пластиной, как показано на изображении а) ниже. На изображении б) ниже показана частотная характеристика датчика. Частотный диапазон составляет 0.1 – 100 МГц, в рамках которого усиление практически не меняется.



(a)



(b)

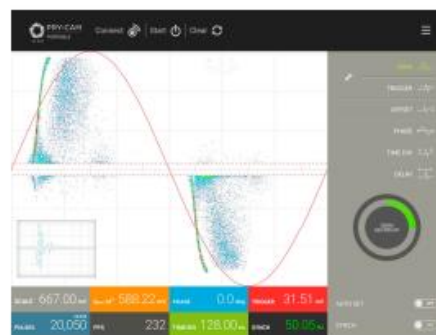
а) внутренняя конструкция датчика, б) частотная характеристика датчика

Данные с антенны поступают в систему обработки построенную на FPGA-матрице. При помощи Wi-Fi соединения обработанные данные можно передавать на удалённый компьютер для отображения в специально разработанной программе.

Внешний вид датчика и интерфейса программы для отображения показан на изображении ниже.



(a)



(b)

Датчик и интерфейс программы отображения данных

На изображении ниже показана схема размещения антенны под крышкой датчика.

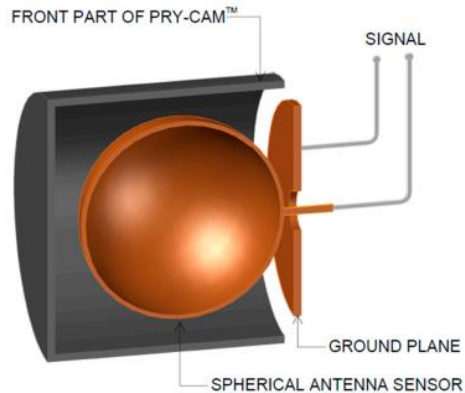


Схема размещения антенны под крышкой датчика

Для формирования PRPD-распределений датчик способен получать сигнал референсного напряжения непосредственно из принимаемого антенной сигнала используя низкочастотный фильтр. Для случаев, когда по каким-то причинам сигнал синхронизации будет недоступен, исследователи разработали отдельный модуль внешней синхронизации, показанный на изображении ниже.



Модуль внешней синхронизации

Модуль даёт возможность использовать разные типы внешней синхронизации: напрямую по питанию, по напряжённости электрического или магнитного поля, по световой пульсации. Сигнал синхронизации может передаваться прямым кабельным подключением или по Wi-Fi.

Для исследования работы датчика был проведён ряд испытаний.

Для построения диаграммы направленности исследователи моделировали коронный разряд поднесением металлической иглы под напряжением к пластине на расстояния 5-10 мм. Датчик ЧР располагался на расстоянии 15 см от источника ЧР. Полученная вращением датчика диаграмма направленности показана на изображении ниже (b). На изображении а) также показана схема испытания.

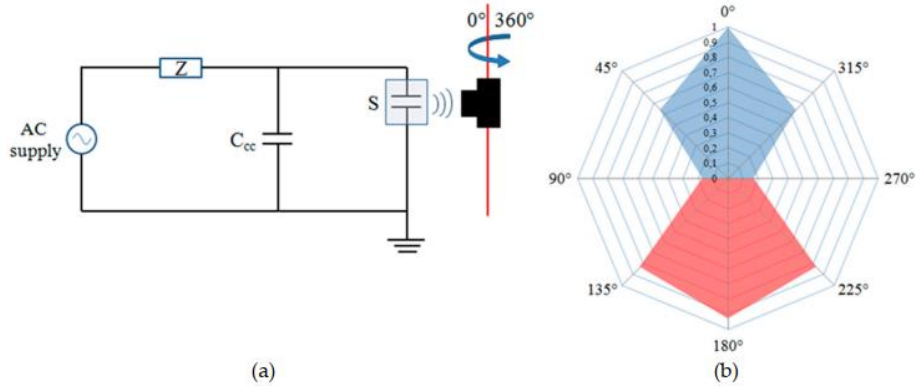


Схема испытания и диаграмма направленности

Красная область диаграммы соответствует инвертированной полярности фиксируемых импульсов.

Для исследования затухания сигнала использовалась аналогичная схема, в которой использовались два ипа разрядов: коронный и эталонный, задаваемый калибратором зарядов 50 пКл. Схема измерения и получившаяся зависимость амплитуды сигнала от расстояния между источником ЧР и датчиком показана на изображении ниже.

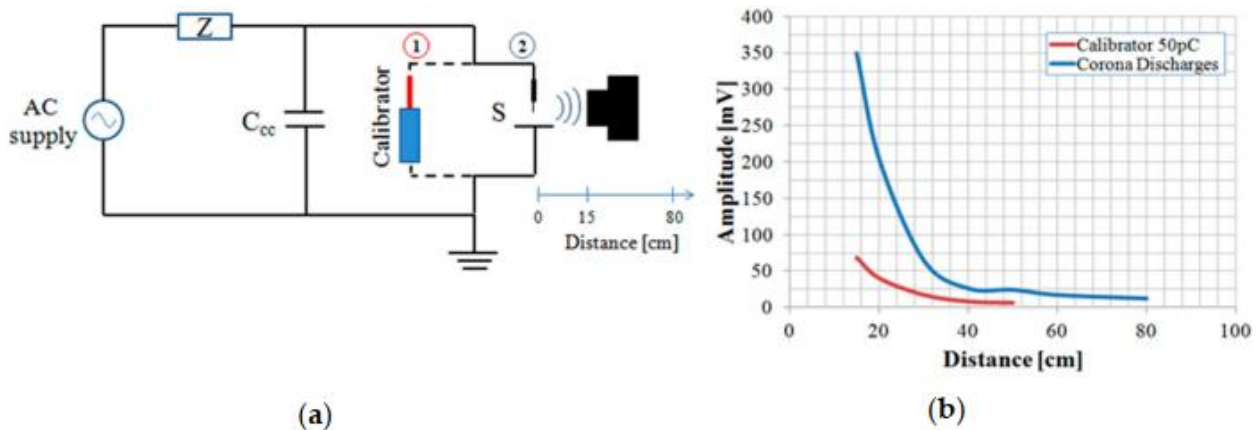


Схема испытания и график затухания сигнала датчика для двух типов ЧР

Для определения чувствительности датчика использовалась схема, аналогичная схеме измерения ЧР по МЭК 60270. Задавались ЧР с разным уровнем кажущегося заряда, для каждого значения которого фиксировалось выходное значение датчика ЧР. Схема измерения и полученная зависимость показаны на изображении ниже.

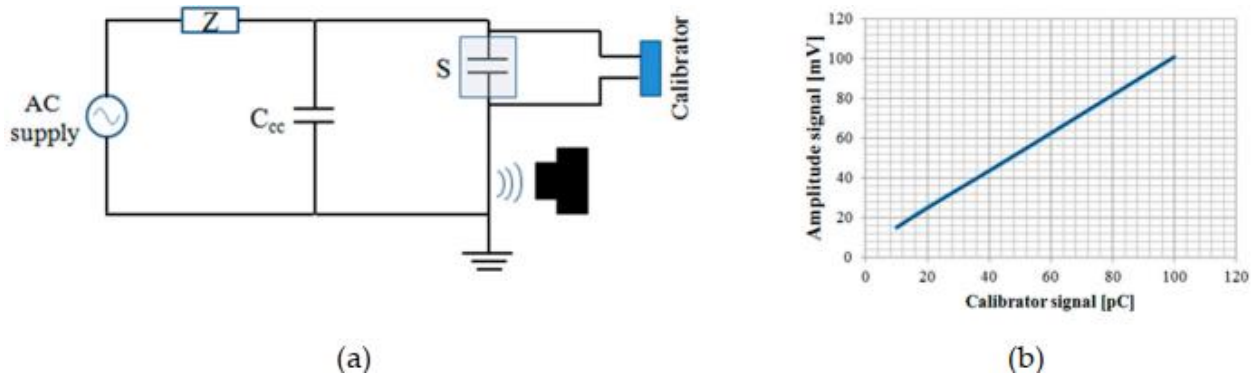


Схема испытания и полученная кривая чувствительности датчика

Определённая в результате испытаний чувствительность датчика составляет примерно 1 мВ/пКл.

Проверка качества определения разных типов дефектов была проведена имитацией внутреннего разряда, поверхностного разряда и коронного разряда. Внутренний разряд имитировался сжиманием трёх слоёв из каптона толщиной 127 мм с отверстием, сделанным в среднем слое. Поверхностный разряд имитировался размещением фрагмента сшитого полиэтилена между двумя электродами разного диаметра. Коронный разряд имитировался металлической иглой и пластиной. Схемы дефектов показаны на изображении ниже.

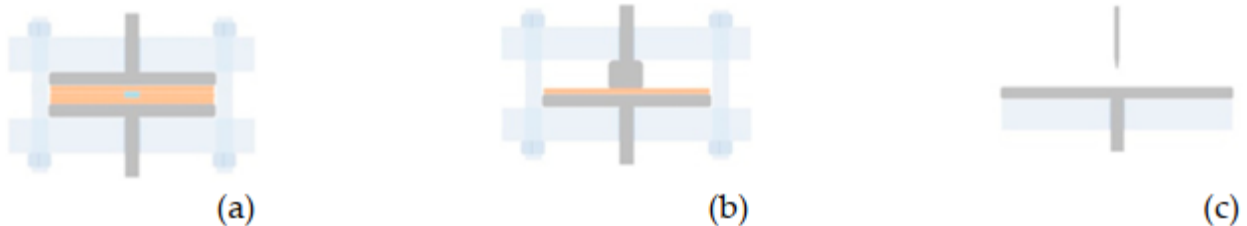
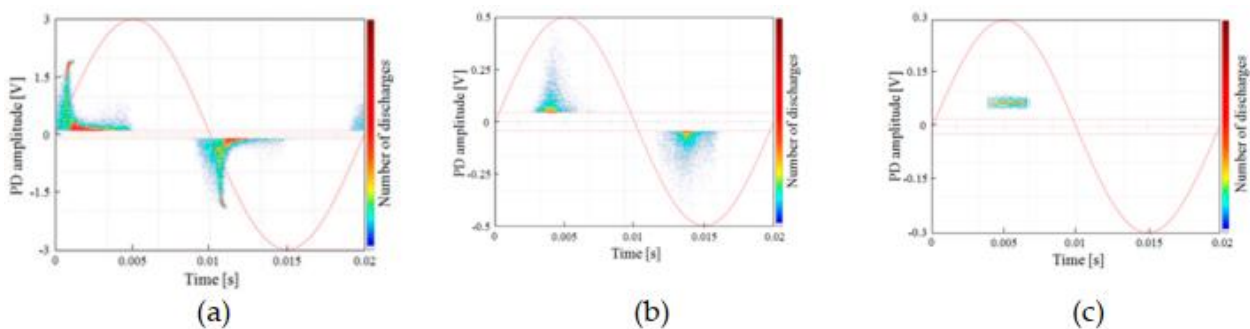


Схема дефектов: а) внутренний разряд, б) поверхностный разряд, с) коронный разряд

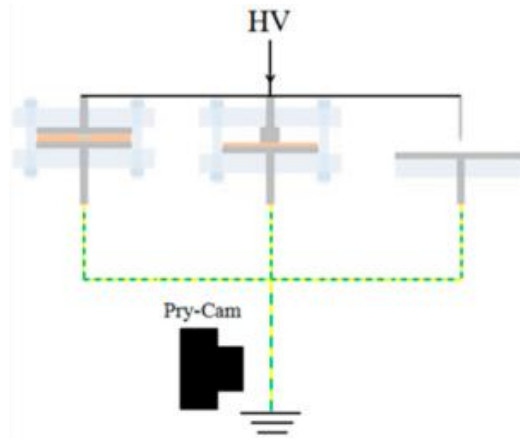
Полученные в результате PRPD-распределения показаны на изображении ниже.



Измеренные PRPD-распределения

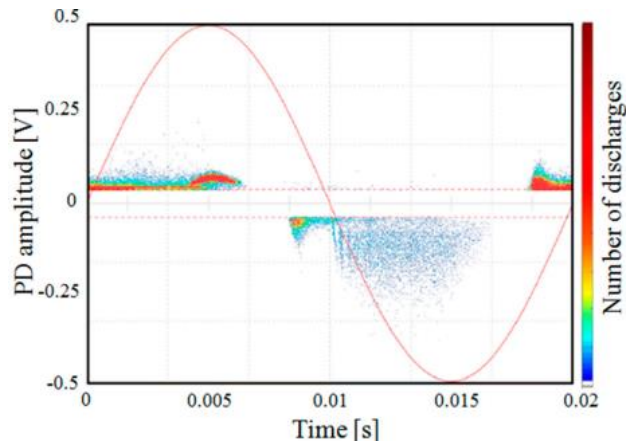
Формы распределений соответствуют типам дефектов.

Для исследования работы датчика в условиях одновременного развития нескольких дефектов исследователи выполнили одновременную симуляцию трёх дефектов включением их параллельно друг другу как показано на изображении ниже.



Симуляция одновременного развития дефектов

Полученное в результате PRPD-распределение показано на изображении ниже.

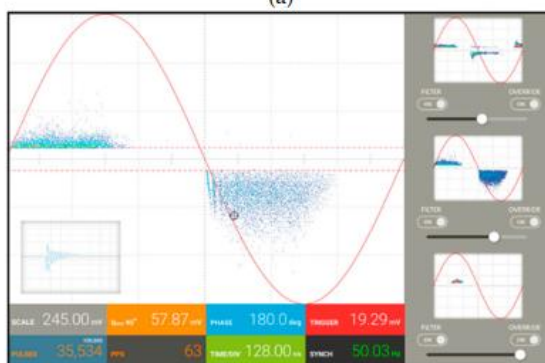


PRPD-распределение трёх параллельных дефектов

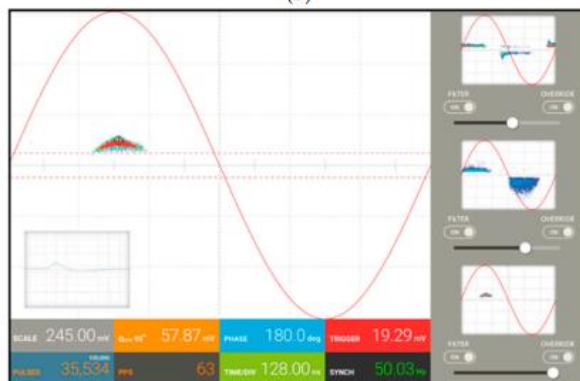
Для разделения распределений каждого дефекта использовалось встроенная в программное обеспечение фильтрация на основе быстрого преобразования Фурье и кросс-корреляционного анализа во временной зоне. Распределения каждого дефекта, выделенные из общего распределения, показаны на изображении ниже.



(a)



(b)

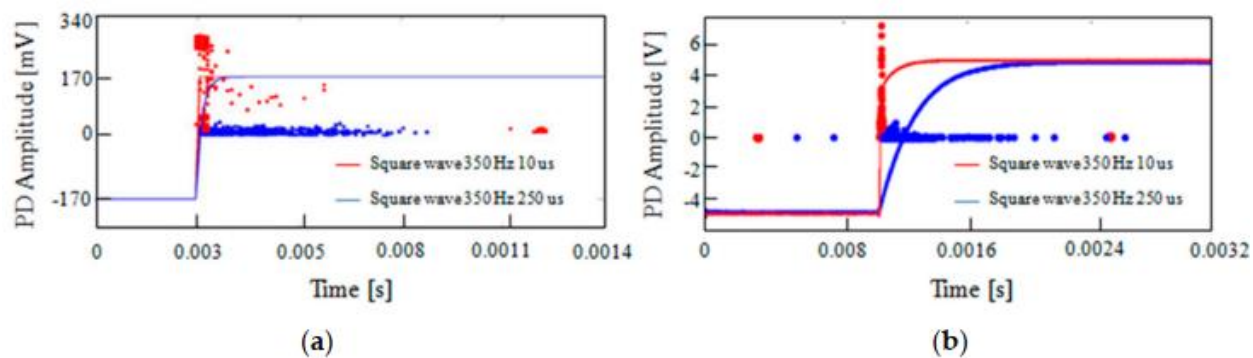


(c)

Выделенные распределения каждого типа дефекта: а) внутренний разряд, б) поверхностный разряд, с) коронный разряд

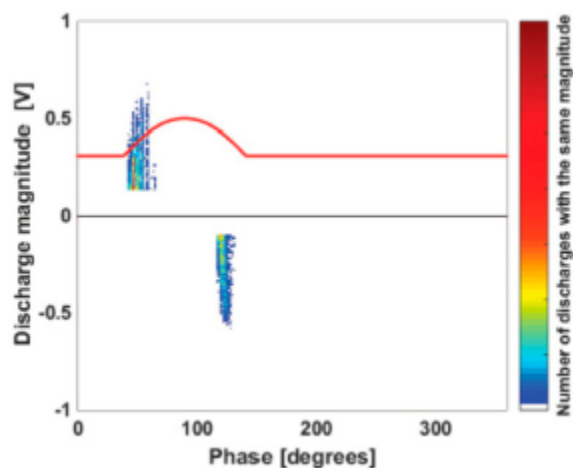
Работа датчика также была проверена в применениях, где основное напряжение имело прямоугольную и пульсирующую формы.

В первом случае полученные данные были сравнены с коммерческой системой мониторинга ЧР. Данные показали хорошую сходимость. Результаты сравнения показаны на изображении ниже.



Сравнение результатов замеров для прямоугольной формы основного напряжения: а) разработанный датчик ЧР, б) коммерческая система мониторинга, синий график – импульс напряжения с фронтом 10 мкс, красный – с фронтом 250 мкс, частота следования в обоих случаях 350 Гц

Полученное распределение для пульсирующего напряжения постоянного тока показано на изображении ниже.



Распределение для пульсирующего напряжения постоянного тока

В заключении исследования указывается, что результаты испытаний показали применимость разработанного датчика для поставленной задачи. Неинвазивная природа датчика открывает хорошие перспективы для внедрения его в составе переносной системы мониторинга ЧР.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Разработка оптического датчика акустической эмиссии ЧР

Источник: Xuefeng Li, Hexin Cao, Zhiming Chang, Xinyu Zhang, Weishi Zhao, and Runjie Shen, *A Fiber Optic Ultrasonic Sensor Using Polarization-maintaining Fiber for Partial Discharge Monitoring*, *Sens. Mater.*, Vol. 31, No. 5, 2019, p. 1407-1417.

<https://myukk.org/SM2017/article.php?ss=2260>

Группа исследователей из Китая разработала и испытала датчик акустической эмиссии ЧР, в основе которого лежит оптический принцип измерения. Соответствующая статья была опубликована в издании *Sensors and Materials* в марте 2019 года.

Принцип измерения датчика состоит в изменении оптических свойств сохраняющего поляризацию оптоволоконна под действием колебаний давления. Схема измерения датчика показана на изображении ниже.

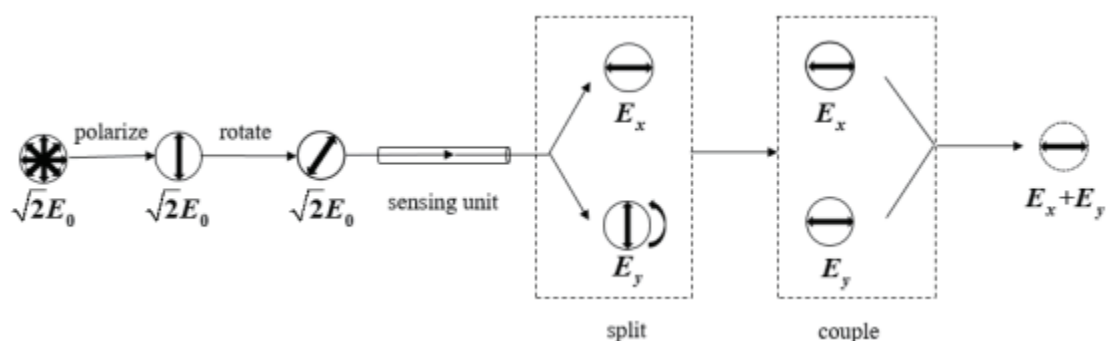
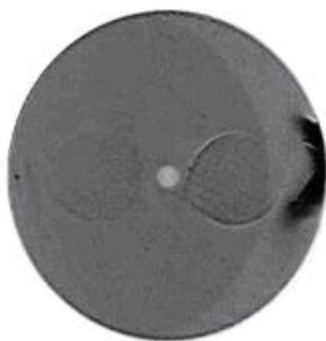


Схема измерения датчика

Свет от лазера проходит поляризатор, где поляризуется с одинаковыми интенсивностями по осям x и y . После этого свет проходит через чувствительный элемент, выполненный из сохраняющего поляризацию оптоволоконна. В оптоволоконне происходит разложение света на два перпендикулярных линейно поляризованных луча. Оптический сплиттер затем разделяет лучи и направляет их в оптическую муфту, которая выполняет разворот одного из лучей на 90° и объединяет оба луча. Оптический детектор принимает объединённый луч и направляет его в схему обработки для анализа и определения характеристик ЧР. Величиной, напрямую зависящей от приложенного к чувствительному элементу усилия, является двупреломление, определяемое как модуль разности между показателями преломления в двух взаимно перпендикулярных плоскостях.

Для исследования характеристик датчика исследователи использовали два разных типа сохраняющего поляризацию оптоволоконна: PM-PCF (сохраняющее поляризацию фотонное кристаллическое оптоволоконно) и PANDA (оптоволоконно с сохранением поляризации и пониженным поглощением). Топографические снимки обоих волокон показаны на изображении ниже.



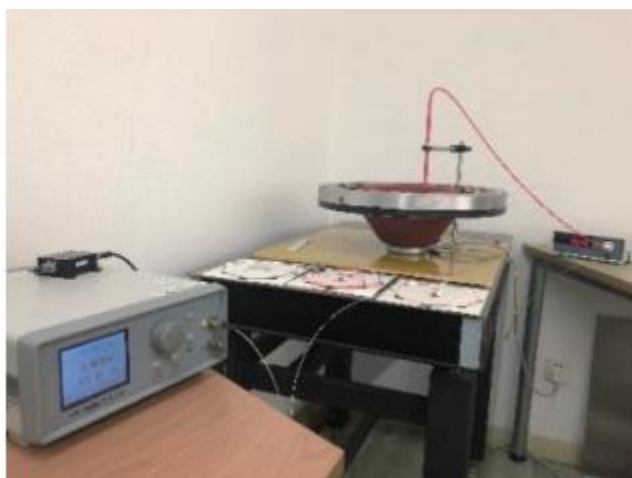
(a)



(b)

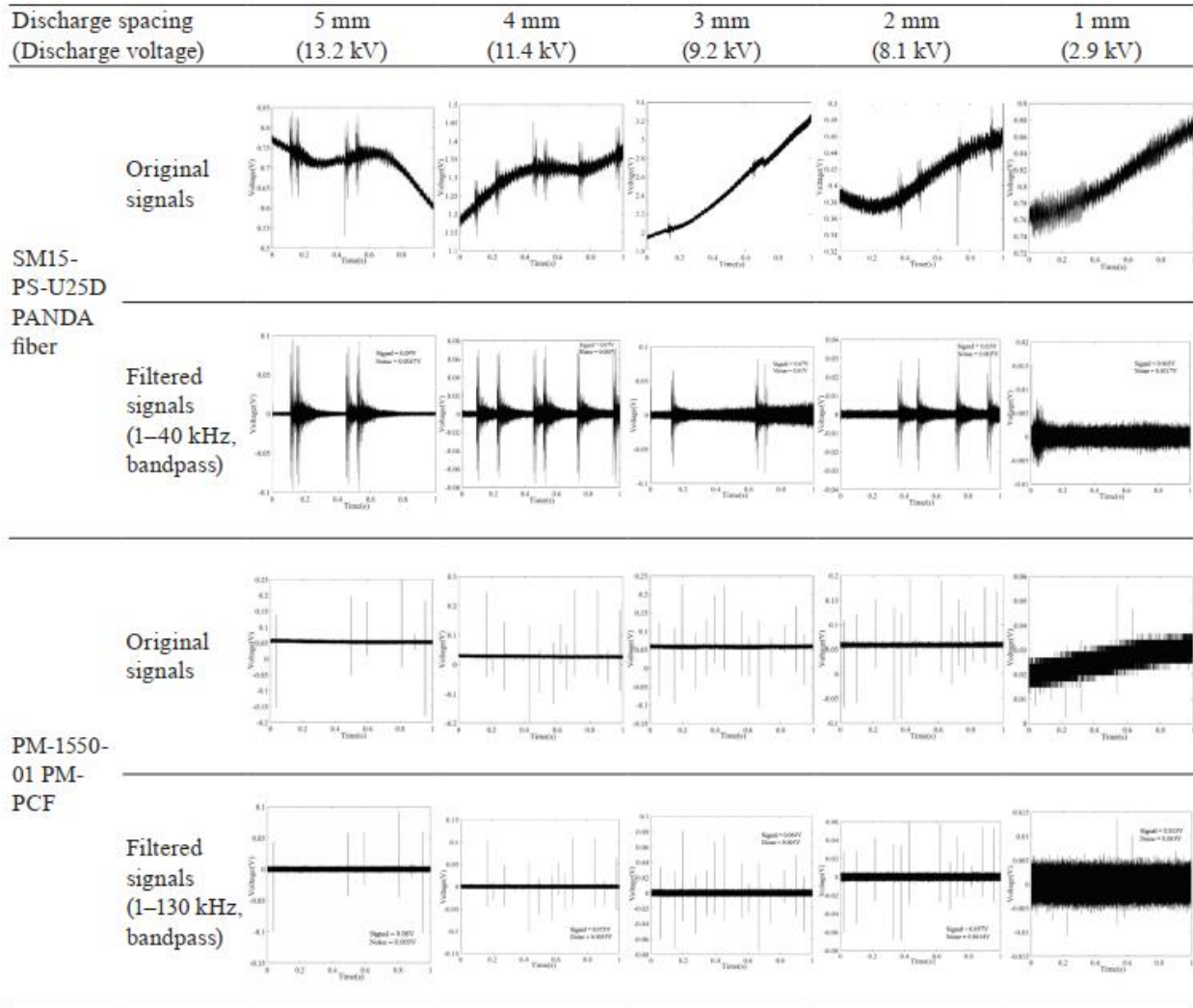
Используемые оптоволокна: а) PM-PCF b) PANDA

Испытательная установка показана на изображении ниже.



Испытательная установка

ЧР имитировались поднесением металлической иглы под высоким напряжением к изоляционному диску. Расстояние между иглой и диском менялось от 1 до 5 мм, что соответствовало напряжениям разряда от 2.9 до 13.2 кВ. Полученные в результате формы сигналов, необработанные и после полосового фильтра, показаны в таблице ниже.



Результаты испытаний

Из двух типов оптоволоконна лучшую чувствительность показало PM-PCF. Полученные результаты говорят о применимости разработанного оптоволоконного датчика для определения акустической эмисии ЧР. Дальнейшая работа авторов статьи будет направлена на дальнейшее повышение чувствительности такого метода измерения.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Разработка и оптимизация характеристик акустического датчика ЧР

Источник: Sikorski, W. *Development of Acoustic Emission Sensor Optimized for Partial Discharge Monitoring in Power Transformers. Sensors* **2019**, *19*, 1865.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/8/1865>

Группа исследователей из Познанского технического университета в Польше разработала акустический датчик ЧР трансформатора. В ходе разработки характеристики датчика были оптимизированы таким образом, чтобы обеспечить максимальную чувствительность к наиболее характерным типам ЧР трансформатора. Соответствующая статья была опубликована в издании *Sensors* в апреле 2019 года.

Для исследования поставленной задачи авторы провели моделирование трёх типов ЧР: поверхностного разряда, межвиткового разряда и разряда в масле. Схема тестовой установки показана на изображении ниже.

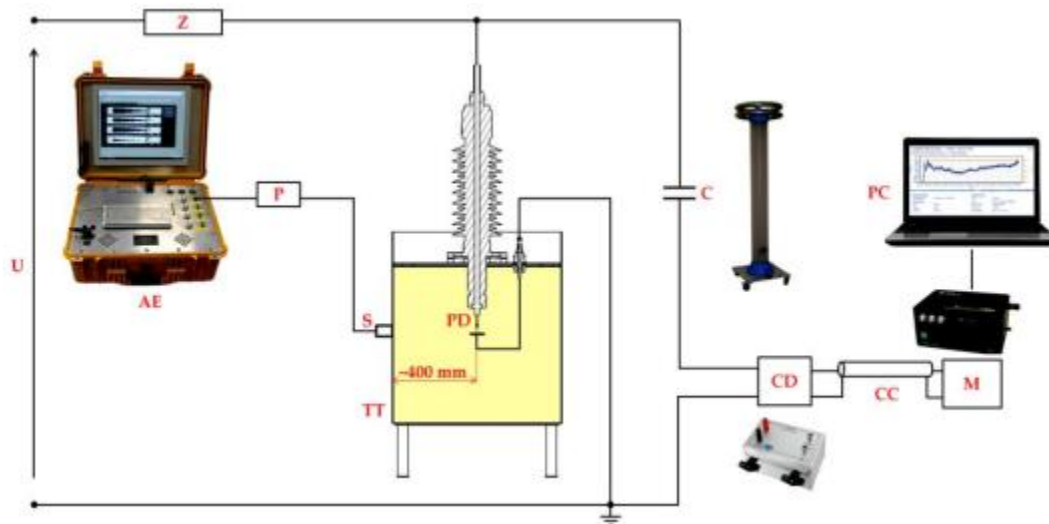


Схема тестовой установки для исследования ЧР трансформатора

Основным элементом установки был заполненный маслом бак размерами 1200x800x750 мм. Данные снимались четырьмя коммерческими акустическими датчиками ЧР. В результате теста были зафиксированы уровни электрических и акустических данных, характерных для каждого типа ЧР. Таблицы зафиксированных данных показаны на изображениях ниже.

| PD Type | PD Inception Voltage U_i (kV) | PD Testing Voltage U_i (kV) ¹ | Parameter | | |
|---|------------------------------------|---|----------------------|-------------------------|-----------------------------|
| | | | Mean Value q_{avg} | Maximum Value q_{max} | Standard Deviation $std(q)$ |
| Surface discharge (electrode system A) | 19.6 | 20.3 | 410 | 597 | 112 |
| Surface discharge (electrode system B) | 12.9 | 14.1 | 1115 | 5430 | 155 |
| Interturn discharge | 18.5 | 19.9 | 792 | 3814 | 173 |
| Partial discharge in oil | 21.1 | 21.8 | 126 | 495 | 62 |

¹ values of test voltage, at which the PD activity was stable (nonextinguishing) and AE pulses were registered.

Характерные электрические параметры: напряжение возникновения ЧР, напряжения стабилизации разрядной активности, характеристики кажущегося разряда

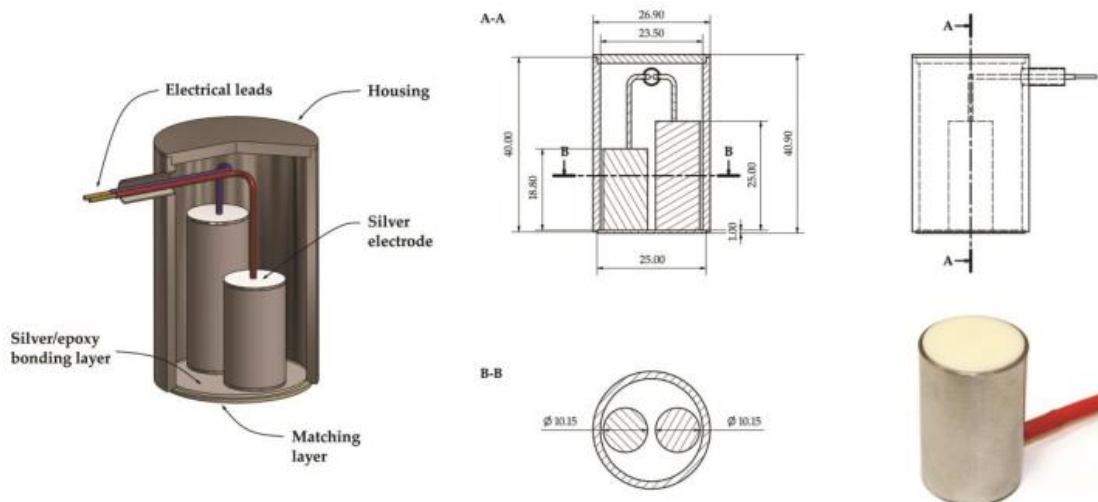
| PD Type | AE Sensor | Frequency Domain Parameter | | |
|--|-----------------|----------------------------|--------------------------|-------------------------------|
| | | Peak Frequency (kHz) | Frequency Centroid (kHz) | Weighted Peak Frequency (kHz) |
| Surface discharge (electrode system A) | Olympus V101-RB | 68.3 | 78.6 | 73.3 |
| | PAC WD | 96.3 | 117.2 | 106.2 |
| | PAC R15D | 153.3 | 142.3 | 147.7 |
| | PAC D9241A | 60.1 | 60.9 | 60.5 |
| Surface discharge (electrode system B) | Olympus V101-RB | 37.6 | 44.5 | 40.9 |
| | PAC WD | 28.4 | 48.2 | 37.0 |
| | PAC R15D | 46.4 | 83.2 | 62.1 |
| | PAC D9241A | 30.0 | 53.8 | 40.2 |
| Interturn discharge | Olympus V101-RB | 40.3 | 48.9 | 44.4 |
| | PAC WD | 30.9 | 72.3 | 47.3 |
| | PAC R15D | 46.6 | 100.2 | 68.4 |
| | PAC D9241A | 40.0 | 53.5 | 46.3 |
| Partial discharge in oil | Olympus V101-RB | 98.1 | 100.9 | 99.5 |
| | PAC WD | 105.8 | 167.7 | 133.2 |
| | PAC R15D | 115.2 | 127.5 | 121.2 |
| | PAC D9241A | 59.7 | 59.0 | 59.3 |

Характерные акустические параметры: пиковая частота, центроид частоты, взвешенная пиковая частота (среднее геометрическое пиковой частоты и частоты центроида)

Результаты замеров показали, что для каждого типа ЧР характерны определённые диапазоны частот и пиковые частоты в спектре акустического сигнала. Для поверхностного разряда характерен диапазон 20-45 кГц и пиковая частота 40 кГц, для межвиткового разряда – 50-70 кГц и 68 кГц, для разряда в масле – 85-115 кГц и 90 кГц.

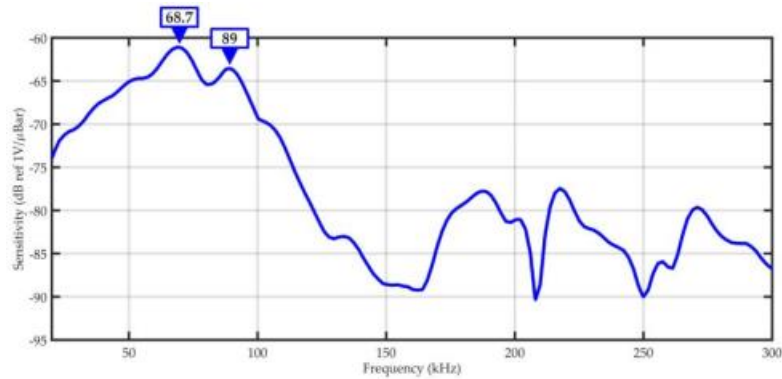
Далее исследователи разработали модель акустического датчика, в котором чувствительные элементы выполнены в виде двух пьезоэлектрических дисков с разнонаправленной поляризацией. При помощи метода Кримгольца-Лидома-Маттеи модель была оптимизирована таким образом, чтобы обеспечивать наилучшую чувствительность для ЧР с найденными частотными характеристиками.

Чертежи разработанного таким образом датчика показаны ниже.



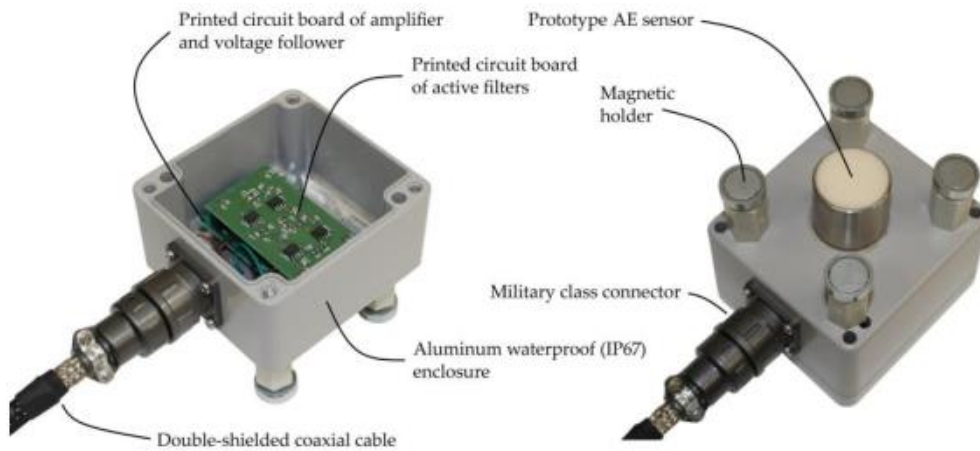
Чертежи разработанного датчика

Полученная частотная характеристика датчика показана на изображении ниже. Для датчика характерна высокая чувствительность в области обнаружения ЧР.



Частотная характеристика датчика

Макет разработанного датчика показан на изображении ниже.



Макет датчика

В дальнейшем датчик был испытан на модели трансформатора вместе с тремя коммерческими датчиками. Схема и изображение испытательной установки показаны ниже.

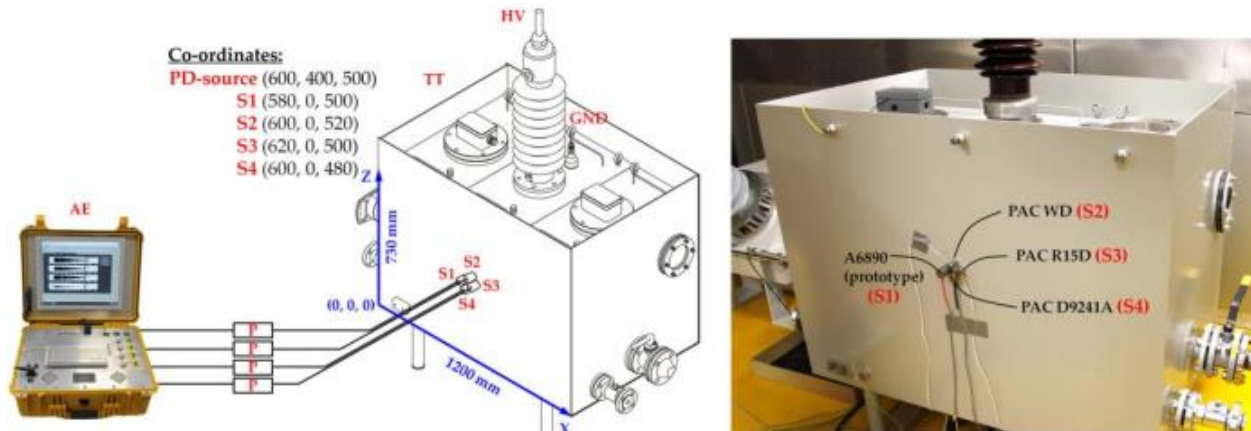


Схема и изображение испытательной установки

Испытания показали, что производительность разработанного датчика превышает производительность коммерческих. Для разных типов дефектов амплитуда регистрируемых разработанным датчиком сигналов ЧР превосходила коммерческие аналоги на величины от 5.2 до 19.8 дБ.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



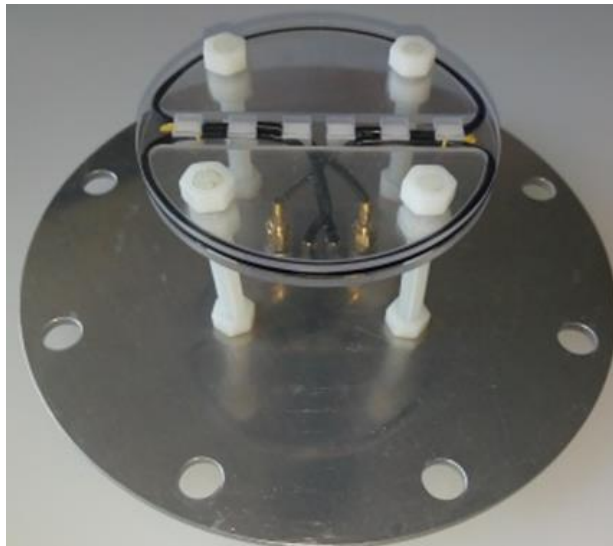
Опыт разработки антенного датчика поверхностного тока ЧР в КРУЭ

Источник: A. Rodrigo Mor, L.C. Castro Heredia, F.A. Muñoz, *A magnetic loop antenna for partial discharge measurements on GIS*, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Volume 115, 2020, 105514, ISSN 0142-0615

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0142061519321866>

В статье, опубликованной в издании *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* в феврале 2020 года, группа авторов из Делфтского университета в Нидерландах описала опыт разработки и испытаний датчика ЧР, работа которого основана на измерении поверхностных токов КРУЭ.

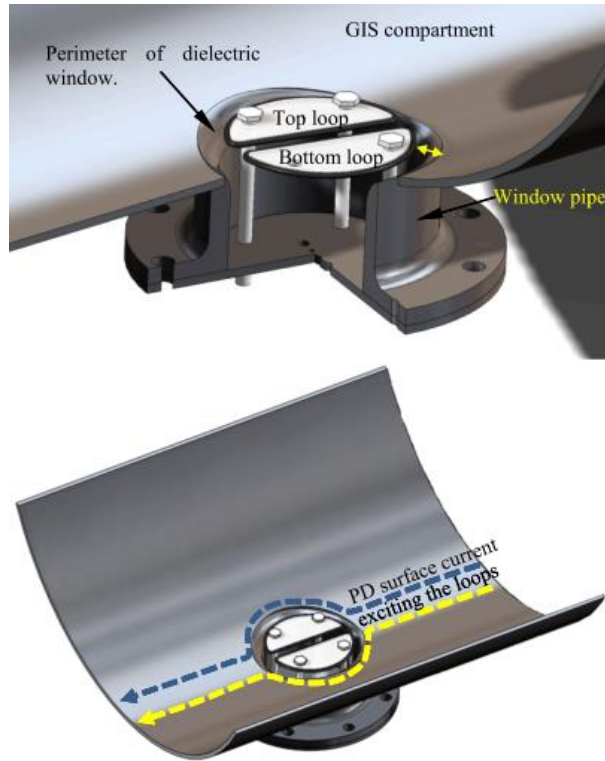
Изображение разработанного датчика показано ниже.



Датчик ЧР

Основным элементом датчика являются два экранированных проводящих контура (верхний и нижний), выполненных экранированным коаксиальным кабелем RG179. Получившиеся ёмкость и индуктивность контуров составляют 32 пФ и 218 нГн. Диаметр датчика 103 мм, расстояния от контуров до монтажной пластины 53 мм.

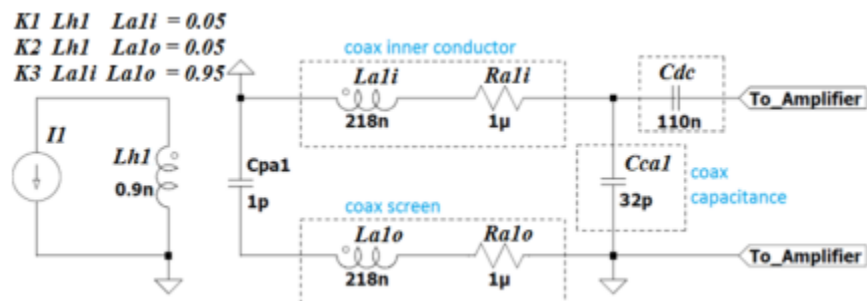
Схематичное изображение установленного датчика показано ниже.



Установленный датчик

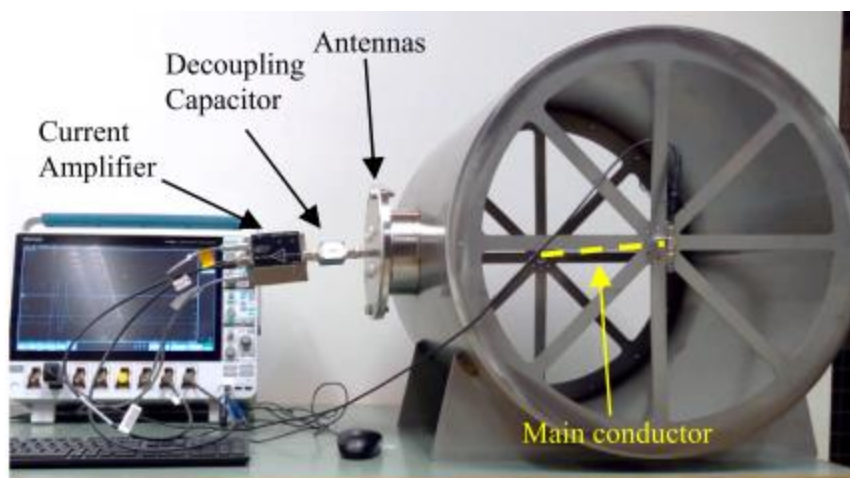
Принцип измерения основан на детектировании магнитного поля, созданного поверхностными токами, протекающими по оболочке КРУЭ. Каждый контур подключен к усилителю Femto HCA-40M-100K-C для обработки сигнала.

Эквивалентная электрическая схема измерения показана на изображении ниже.



Эквивалентная электрическая схема измерения. $Ra1i$ и $Ra1o$ – сопротивление проводника и экрана коаксиального кабеля, $La1i$ и $La1o$ – индуктивность проводника и экрана коаксиального кабеля, $Cca1$ – ёмкость контура, $Cpa1$ – паразитная ёмкость неподключенного конца экрана, $Lh1$ – индуктивность окна КРУЭ, Cdc – ёмкость конденсатора для блокирования постоянной составляющей сигнала напряжения

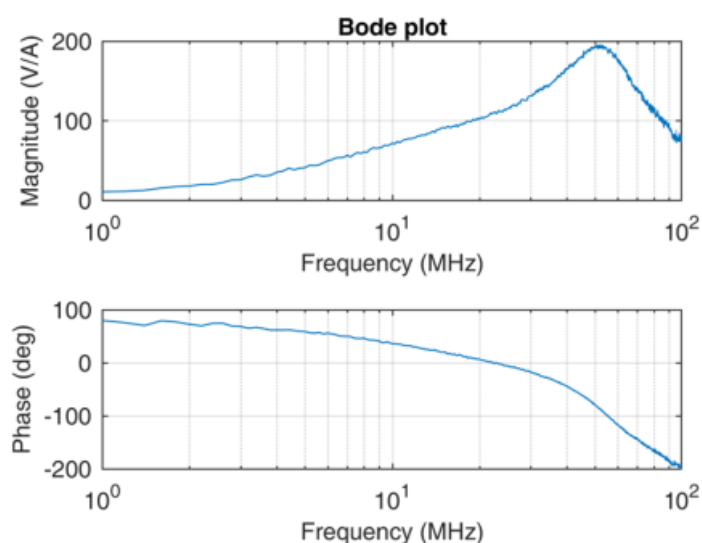
Калибровочный стенд датчика показана на изображении ниже.



Калибровочный стенд

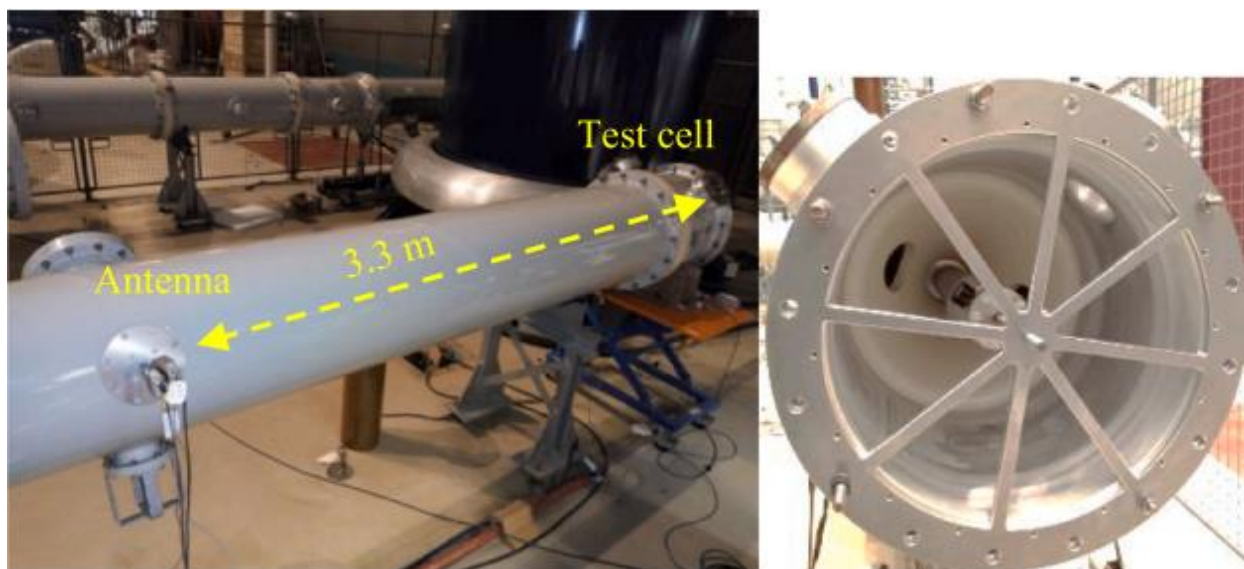
Стенд состоит из немагнитной стальной трубы длиной 1 м и толщиной стенки 3 мм с диэлектрическим окном посередине. На обоих концах трубы установлены кронштейны с BNC-разъёмами. По оси трубы проходит проводящая жила диаметром 1 мм, на вывод которой установлен высокочастотный трансформатор тока (ВЧТТ) с шириной частотного диапазона 3.92 кГц – 1.11 ГГц. Калибровочный сигнал вводит через один из BNC-разъёмов. Второй BNC-разъём подключен к нагрузке 50 Ом. Начало записи сигнала ВЧТТ синхронно запускает начало записи сигнала разработанным датчиком.

Полученные в результате замеров частотные характеристики датчика показаны на изображении ниже.



Частотные характеристики датчика

Проверка чувствительности датчика была выполнена на стенде большего размера, показанном на изображении ниже.



Стенд для проверки чувствительности датчика

Проверка выполнялась имитацией ЧР разных типов (плавающий электрод, корона, поверхностный разряд). Испытания показали, что при помощи разработанного датчика можно определять небольшие разряды амплитудой около 1 пКл на расстоянии до 3.3 м от источника. Также было возможно оценить величину кажущегося разряда в пКл для плавающего электрода. При измерениях короны и поверхностного разряда оценку величины кажущегося разряда выполнить не удалось поскольку низкая амплитуда сигнала датчика осложнила применение расчётного метода. Дальнейшая работа исследователей будет сосредоточена на разработке методов постобработки сигнала и повышения чувствительности датчика.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



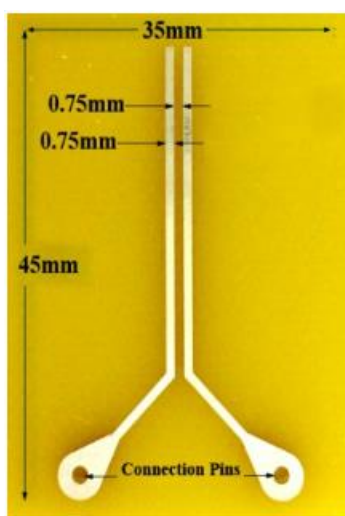
Исследование ЧР в печатных платах с конформным покрытием

Источник: E. Zeynali, R. Bridges and B. Kordi, "Investigation of Partial Discharge in Aircraft Conformally-Coated Printed Circuit Boards," 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 30-33, doi: 10.1109/EIC43217.2019.9046586.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9046586>

Исследователи из Манитобского университета в Канаде рассмотрели проблему возникновения ЧР в печатных платах силовой электроники летательных аппаратов. Такие платы работают в условиях низкого давления и подвержены большому числу видов загрязнений поверхности. ЧР разряды в платах могут происходить между коннекторами или проводящими дорожками и приводить к повреждению платы. Соответствующий доклад был представлен на IEEE Electrical Insulation Conference в июне 2019 года.

Для исследования явления авторы выполнили несколько образцов плат. Пример одного образца показан ниже.



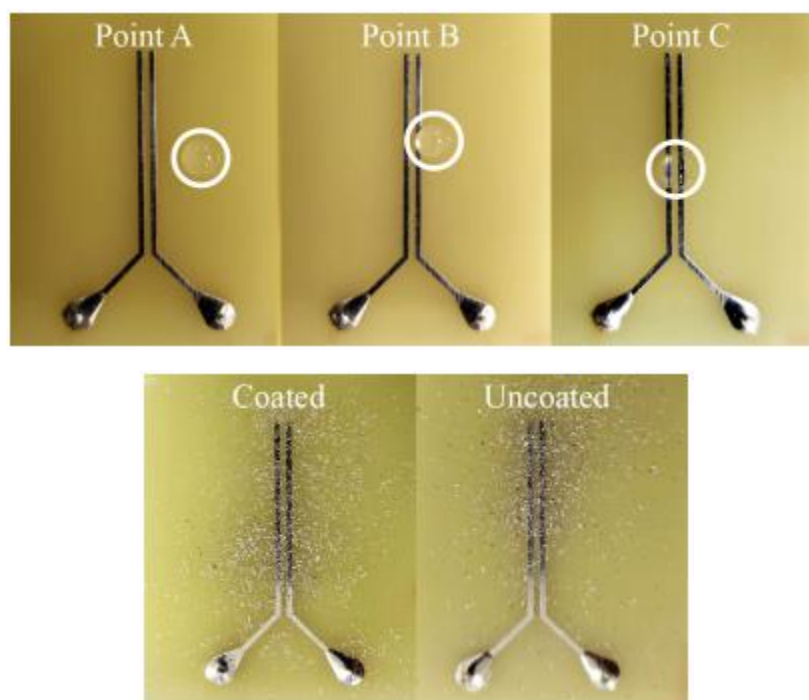
Образец платы

Согласно расчётным характеристикам, образцы выдерживали прикладывание напряжения 1.5 кВ, 50/60 Гц в течение 1 минуты. Подложка плат была выполнена из эпоксидного ламината толщиной 1.6 мм, усиленного стеклом. Поверхность плат была выравнена при помощи воздушного ножа. После производства платы были очищены ультразвуком в аммиачном растворе и изопропиловом спирте. После этого на часть плат был дважды нанесён защитный слой из силикона марки MG-Chemical 422B.

Далее на платы были нанесены пять видов загрязнений:

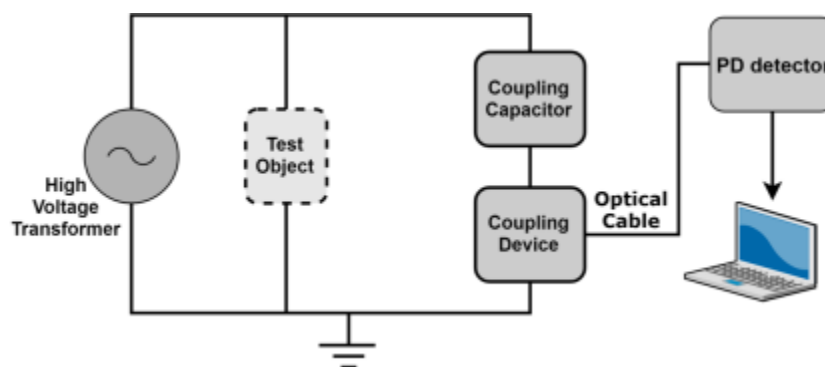
- капля 5% раствора поваренной соды на удалении от обеих дорожек;
- капля 5% раствора поваренной соды, перекрывающая одну из дорожек;
- капля 5% раствора поваренной соды, перекрывающая обе дорожки;
- смесь микрочастиц алюминия диаметрами 130-290 мкм, покрывающая плату с защитным покрытием;
- смесь микрочастиц алюминия диаметрами 130-290 мкм, покрывающая плату без защитного покрытия.

Изображения плат с разными видами дефектов показаны ниже.



Платы с разными видами дефектов

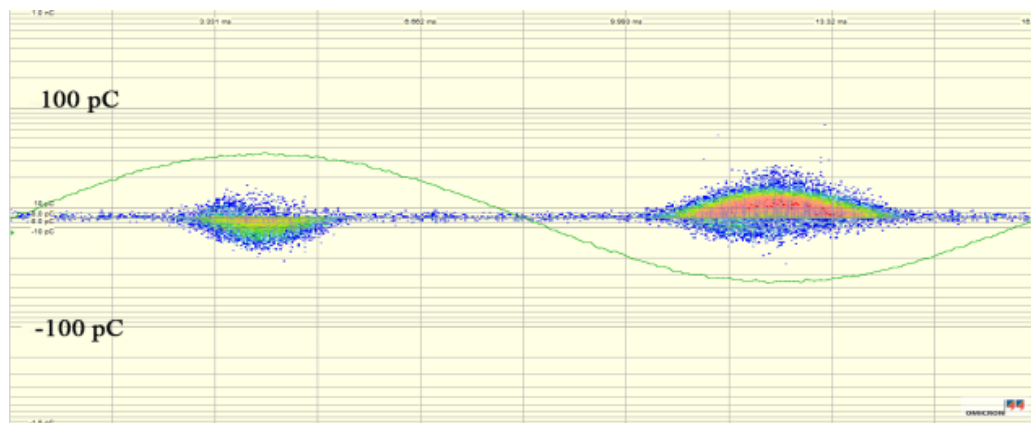
Для испытаний платы включались в испытательную схему по МЭК 60270, показанную на изображении ниже.



Испытательная схема

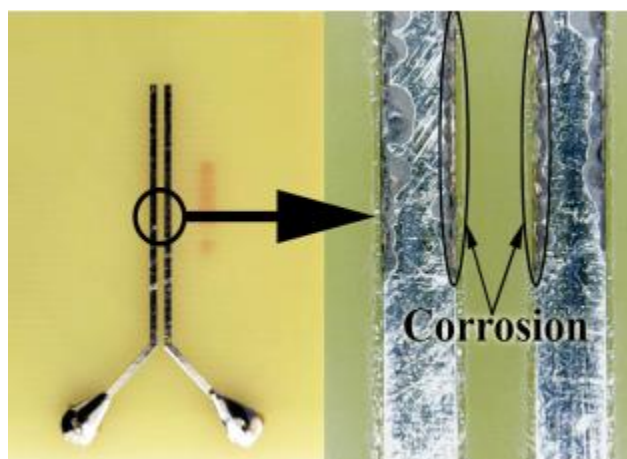
Образцы с обоими типами повреждений испытывались при нормальной температуре и атмосферном давлении.

При испытаниях образцов с каплей раствора на удалении от дорожек ЧР не возникало до напряжения 1.9 кВ, что на 25% превосходит рабочее напряжение платы. В образцах с покрытием каплей одной дорожки ЧР происходили при напряжении 870 В, их амплитуда составляла 20 пКл. Записанная PRPD-диаграмма показана на изображении ниже.



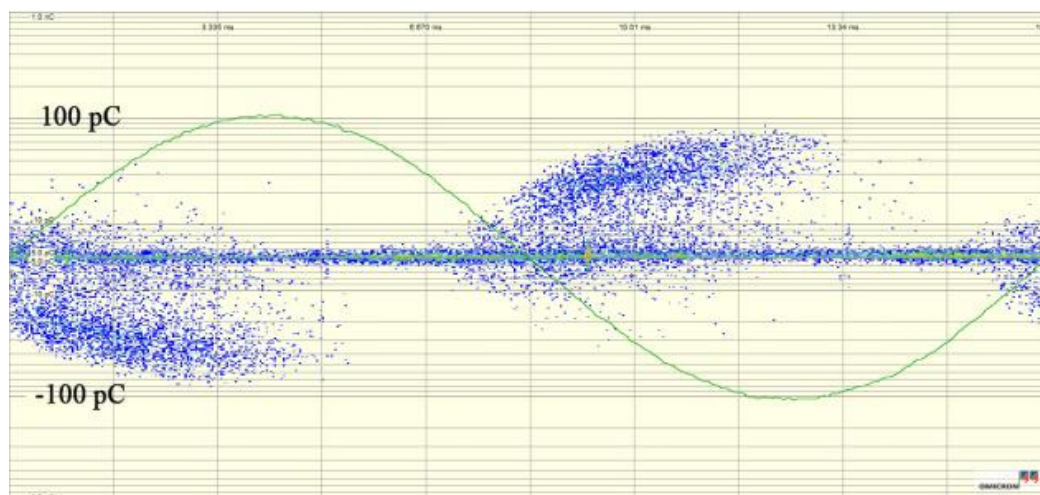
PRPD-диаграмма образца с покрытием каплей одной дорожки при напряжении 870 В

Дальнейшее повышение испытательного напряжения приводило к смещению капли к центру и перекрытию обеих дорожек. После это ЧР прекращались. Аналогичным образом, при испытаниях образца с перекрытием обеих дорожек ЧР не возникали. При этом на обоих образцах после проведения испытания образовалась коррозия дорожек как показано на изображении ниже.



Следы коррозии на дорожках

При испытаниях образца с защитным покрытием и загрязнением алюминиевыми частицами ЧР возникали при напряжении 1.63 кВ. Амплитуда ЧР была около 50 пКл. На изображении ниже показано записанное при этом PRPD-распределение.



PRPD-распределение образца с защитным покрытием

Помимо ЧР, при испытаниях образца также наблюдались отдельные разряды, вызванные подсакиванием частиц алюминия под действием электрического поля.

При испытаниях образца без защитного покрытия ЧР не наблюдались. Присутствовали отдельные разряды, вызванные частицами алюминия при испытательных напряжениях от 1.3 кВ. Это было вызвано отсутствием диэлектрического защитного слоя между частицами алюминия и проводящими дорожками.

В заключении исследования указывается, что результаты лучше помогут понять механизмы возникновения ЧР в печатных платах силовой электроники.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Метод мониторинга оборудования комбинацией алгоритмов машинного обучения

Источник: Binsen Peng, Hong Xia, Xintong Ma, Shaomin Zhu, Zhichao Wang, Jiyu Zhang, *A mixed intelligent condition monitoring method for nuclear power plant, Annals of Nuclear Energy, Volume 140, 2020, 107307, ISSN 0306-4549*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454920300050>

Группа исследователей из Харбинского инженерного университета в Китае предложила метод контроля состояния оборудования, основанный на определении аномальных состояний в условиях большого объёма данных о работе оборудования. Соответствующая статья была опубликована в издании *Annals of Nuclear Energy* в июне 2020 года.

В основе метода, предложенного исследователями, лежит уменьшение размерности массива оперативных данных о состоянии оборудования алгоритмом распределённого автоэнкодера (SAE) и определение аномальных состояний алгоритмом изолированного леса (iForest). Оба алгоритма являются алгоритмами машинного обучения.

Метод SAE основан на «кодировании» и «декодировании» массива входных данных. Схематично работа метода показана на изображении ниже.

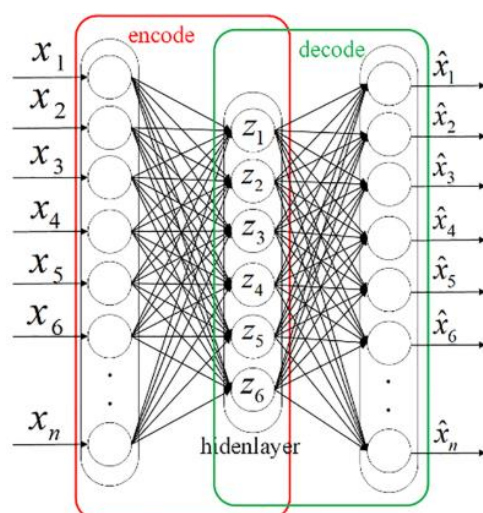
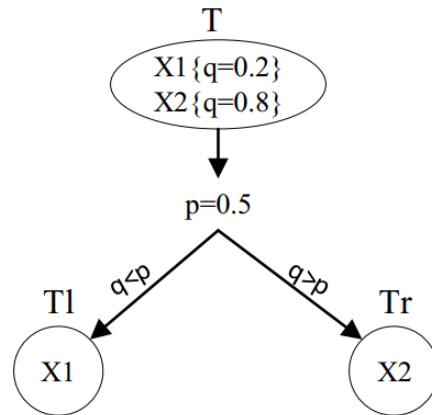


Схема работы SAE

При «кодировании» данных массив входных данных обрабатывается первым слоем нейронов и передаётся в скрытые слои в виде преобразованных свойств. При «декодировании» данных набор свойств можно преобразовать обратно в массив входных данных. Регулируя настроечный параметр алгоритма, определяющий степень «распределённости» SAE можно добиваться уменьшения размерности массива входных данных, что будет упрощать последующие вычисления.

Работа iForest основана на построении изолированных деревьев. Это древовидные структуры, описывающие череду переходов между состояниями оборудования. Упрощённый пример такой структуры показан на изображении ниже.



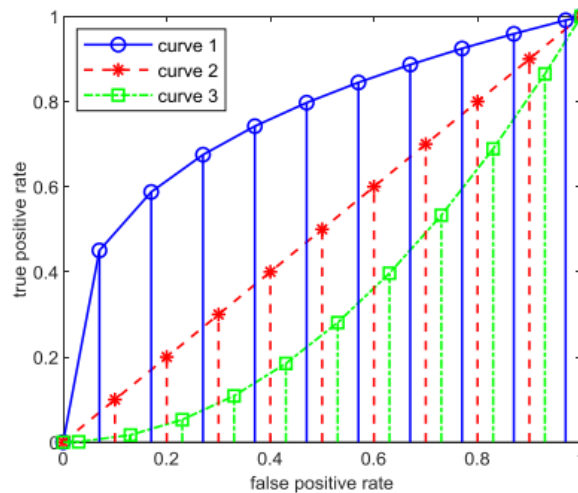
Упрощённая структура изолированного дерева

В этой структуре начальное состояние Т системы характеризуется двумя точками данных, X1 и X2. Состояния Tr и Tl являются возможными состояниями развития системы. Переход к ним из начального состояния выполняется по значению характерной переменной q, в зависимости от выполнения условия превышения уставки p.

Для каждого набора входных данных берутся случайные выборки определённой длины, для которых строятся изолированные деревья. Аномальные состояния оборудования будут характеризоваться большей длиной деревьев, т.е. большим количеством переходов между узлами дерева.

Далее для каждого набора входных данных рассчитывается индекс аномальности, общее число требуемых переходов между узлами для обхода деревьев во всех случайных выборках. Наборы с большими индексами аномальности с большей вероятностью будут соответствовать аномальным режимам работы оборудования.

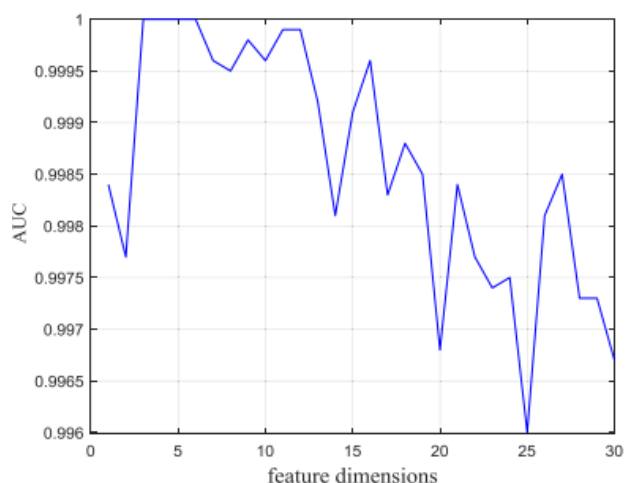
Для проверки точности метода исследователи использовали симулятор работы АЭС. При помощи симулятора были сгенерированы 1100 наборов данных, из которых 900 были нормальными, 200 нет. Для контроля точности алгоритма исследователи использовали кривую соотношения правильного и ложного обнаружения, показанную ниже.



Пример кривой соотношений правильного и ложного обнаружения

Кривая показывает соотношения между истинноположительными и ложноположительными результатами метода. При одинаковом их соотношении кривая будет являться прямой линией из точки (0;0) в точку (1;1). При преобладании истинноположительных результатов кривая будет выпукла вверх, при преобладании ложноположительных – вниз. В качестве критерия точности метода использовалась площадь под кривой. Если площадь равна 1, все результаты являются истинноположительными, если площадь равна 0, все результаты являются ложноположительными. Чем ближе площадь к 1, тем точнее метод.

Результаты проверки метода на сгенерированном наборе данных показан ниже в виде зависимости точности под кривой и размерности входных данных, которое регулировалось алгоритмом SAE. Данные являлись входными для алгоритма iForest, который определял аномальные состояния.



Зависимость площади под кривой соотношений правильного и ложного обнаружения от размерности входных данных

Из результатов видно, что при правильных настройках алгоритма точность определения аномальных состояний достигала 100%.

Исследователи дополнительно протестировали алгоритмы одноклассовых опорных векторов и локального уровня выброса, но их точность была ниже, чем у предложенного метода.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Применение методов машинного обучения для контроля состояния подшипников асинхронного двигателя

Источник: Cipollini, F., Oneto, L., Coraddu, A. et al. *Unsupervised Deep Learning for Induction Motor Bearings Monitoring. Data-Enabled Discov. Appl.* 3, 1 (2019)

<https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs41688-018-0025-2>

В статье, опубликованной в январе 2019 года в издании Data-Enabled Discovery and Applications, группа авторов из Шотландии и Италии предложила метод контроля состояния подшипников качения асинхронного двигателя, основанный на алгоритмах машинного обучения.

Авторы ссылаются на возможные трудности с применением традиционного метода, в котором используется сигнатурный анализ тока статора двигателя. В отдельных случаях сигнал может быть зашумлён, особенно на двигателях, питаемых через инверторы.

Предложенный авторами метод состоит из следующих шагов:

1. Сбор необработанного сигнала тока статора с частотой дискретизации 20 кГц.
2. Применяя скользящее окно длительностью 24 секунды, разбить сигнал на отдельные фрагменты.
3. Из каждого фрагмента выделить набор характерных свойств.
4. Одним из методов, используемых в машинном обучении, снизить размерность массива характерных данных.
5. Выполнить классификацию состояния подшипники по преобразованному массиву свойств.

В качестве набора характерных свойств сигнала авторы использовали различные свойства частотного и временного представления сигнала: амплитуду, коэффициент корреляции между токами разных фаз, среднеквадратичное отклонение, энтропию сигнала, коэффициенты авторегрессии, энергии отдельных гармоник, коэффициент эксцесса и т.п.

Для проверки работы метода авторы использовали тестовый стенд, показанный на изображении ниже.



Тестовый стенд

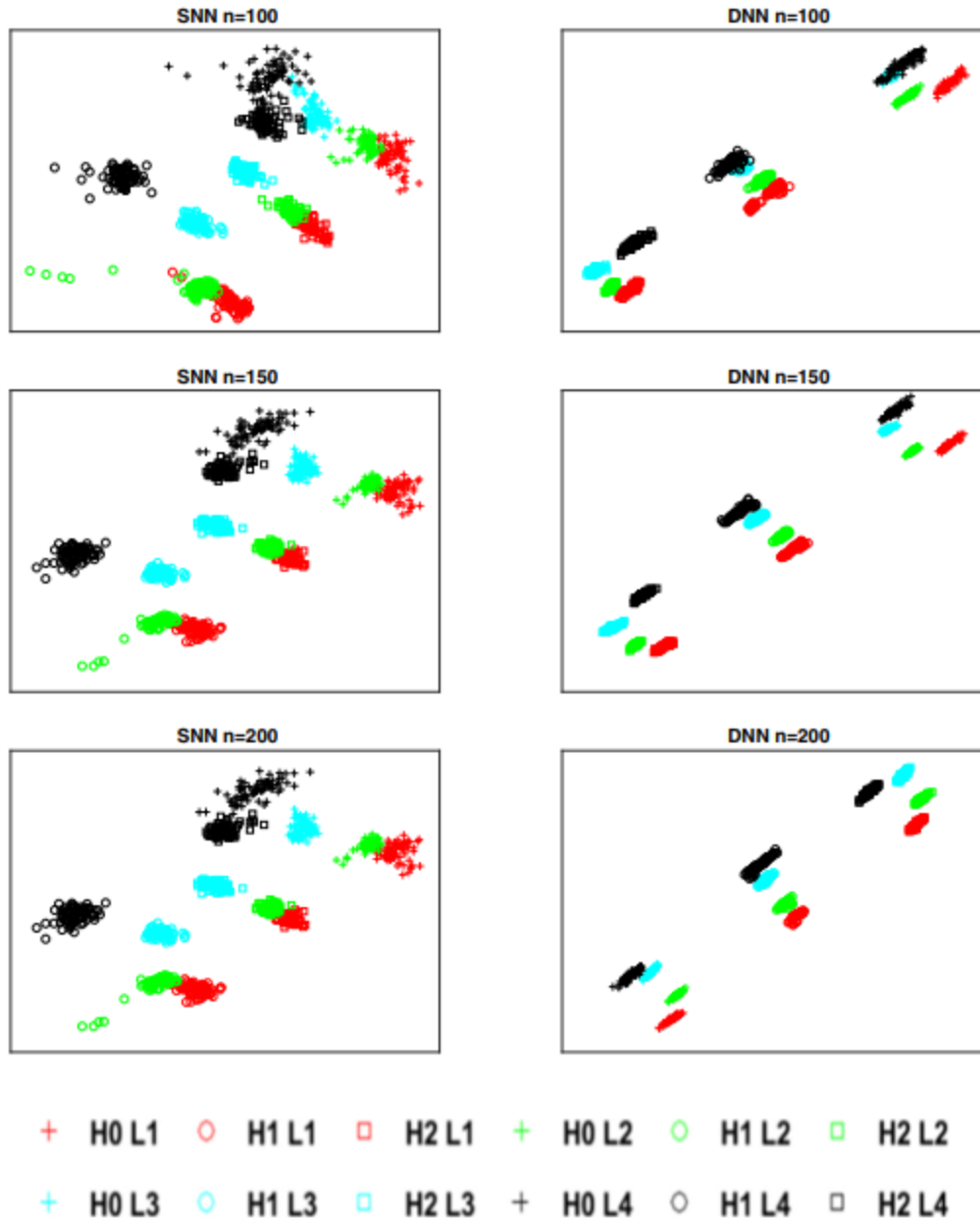
В одном из подшипников двигателя имитировались дефекты разной стадии просверливанием отверстия во внешнем кольце как показано на изображении ниже.



Развитие дефекта подшипника

Двигатель включался в работу в 4 режимах: 25%, 50%, 75% и 100% номинального тока. Таким образом, авторы решали задачу классификации состояния подшипника по 12 состояниям, которые соответствовали комбинациям 3 стадий дефекта и 4 режимов работы.

Наилучшую производительность показали методы глубокой уменьшения размерности данных при помощи нейронных сетей. Результаты применения двух типов нейронных сетей (deep neural network, DNN и shallow neural network, SNN) для выборок данных разных объемов показаны на изображениях ниже. В данном случае размерность данных снижалась до 2. На изображении отчётливо видны кластеры, соответствующие разным режимам работы и стадиям дефекта.



Результаты снижения размерности данных при помощи SNN и DNN

В заключении исследования указано, что дальнейшая работа авторов будет сфокусирована на развитии метода, в частности – на его применение для контроля одновременно развивающихся дефектов разных компонентов двигателя.

Ещё больше информации в наших социальных сетях



Моделирование тока статора асинхронного двигателя для обнаружения дефектов подшипников

Источник: Qinkai Han, Zhuang Ding, Xueping Xu, Tianyang Wang, Fulei Chu, *Stator current model for detecting rolling bearing faults in induction motors using magnetic equivalent circuits*, *Mechanical Systems and Signal Processing*, Volume 131, 2019, Pages 554-575, ISSN 0888-3270

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0888327019303930>

В статье, опубликованной в сентябре 2019 года в издании *Mechanical Systems and Signal Processing*, группа исследователей из Университета Цинхуа в Китае рассмотрела использование гармонического анализа тока статора асинхронного двигателя для обнаружения дефектов подшипников качения.

Работа исследователей основывалась на комплексной модели асинхронного двигателя, которая объединяла в себе две модели: динамическую модель ротора с подшипниками и магнитную модель двигателя.

В динамической модели ротора с подшипниками рассматривались характеристики вращения ротора в бездефектных и дефектных подшипниках. Модель использовала такие данные, как размеры ротора и подшипников, угловую скорость тел качения, угловое направление на начало и окончание дефекта подшипника, и позволяла определять нелинейное развитие величины воздушного зазора между ротором и статором. Представление ротора с подшипниками в модели схематично показано на изображении ниже.

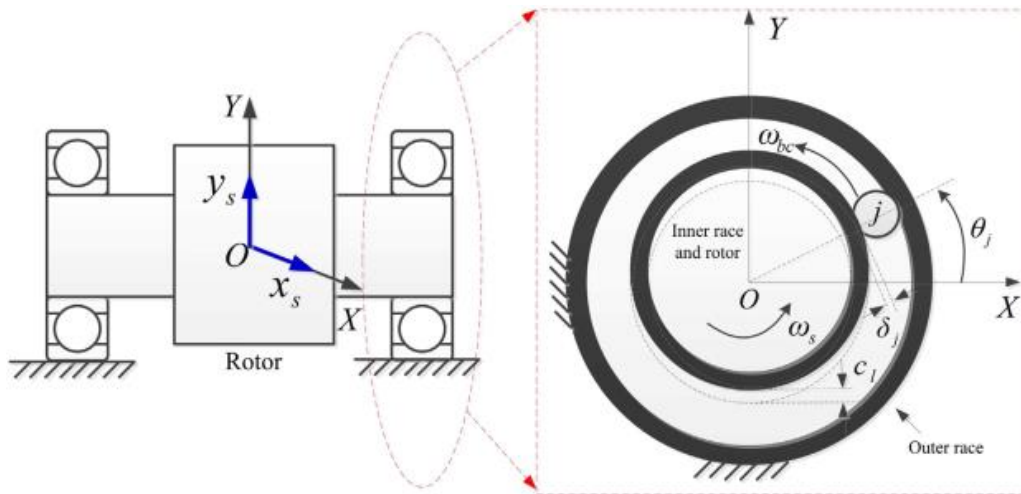
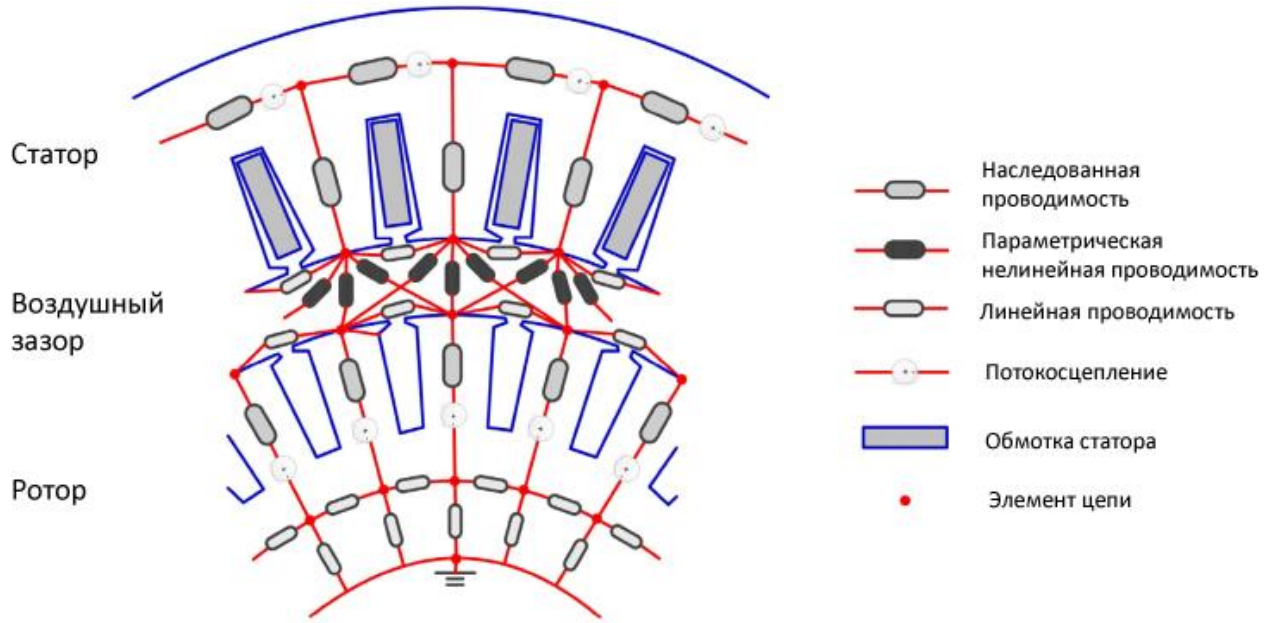


Схема динамической модели ротора

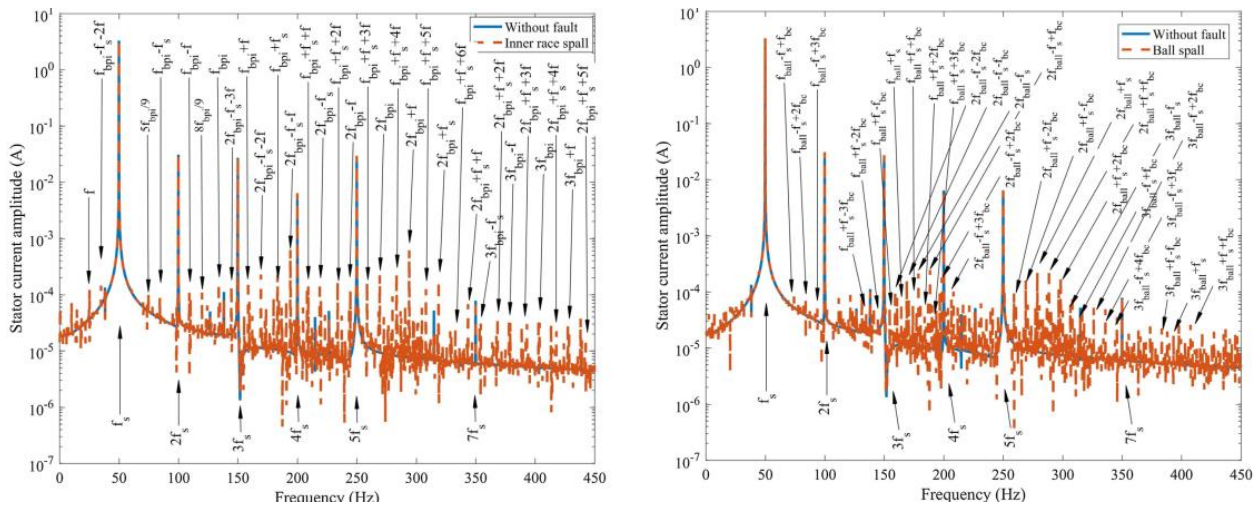
В магнитной модели элементы двигателя заменялись эквивалентными трубками магнитного потока. Для двигателя составлялась эквивалентная магнитная схема, учитывающая потокосцепление ротора и статора и разные виды магнитной проводимости между элементами. Фрагмент эквивалентной магнитной схемы двигателя показан ниже.



Фрагмент эквивалентной магнитной схемы двигателя

Совместное использование динамической модели ротора и магнитной модели двигателя позволило моделироваться развитие токов статора при разных дефектах подшипников качения.

Пример спектров смоделированных токов статора для разных дефектов показан на изображении ниже.



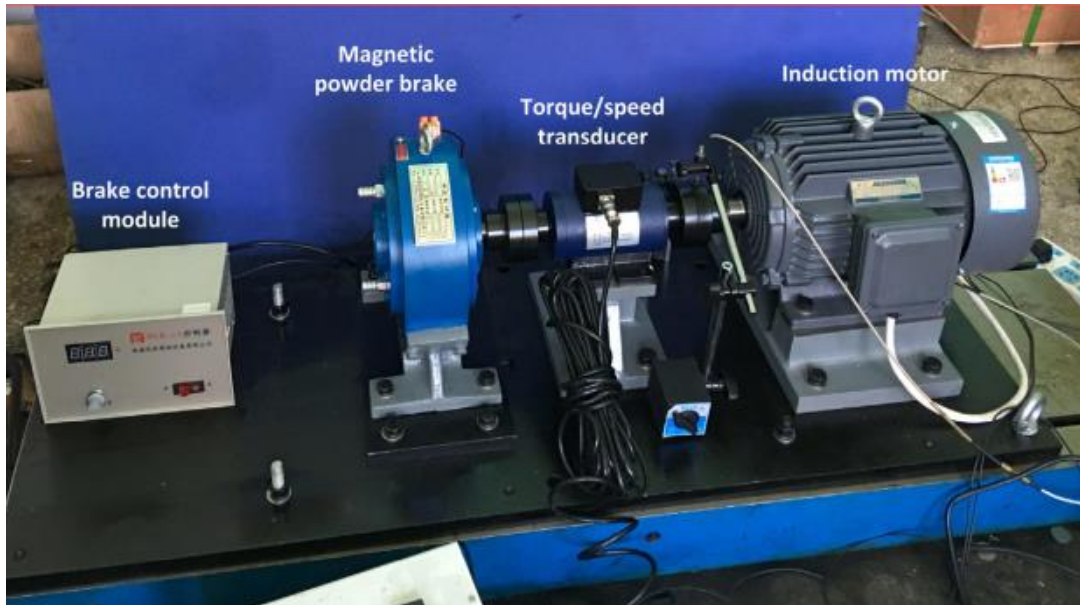
Пример спектров токов статора для разных дефектов: слева – дефект внутреннего кольца, справа – дефект тела качения

Анализ спектров показал, что они содержат основные характерные частоты, включая частоту питания, частоту прохода тел качения по внутреннему и внешнему кольцу, орбитальную частоту тел качения и т.п.

Сравнение результатов моделирования с ранними работами разных авторов по диагностике подшипников качения показало, что для дефектов внешнего кольца набор характерных частот совпадают. Для дефектов внутреннего кольца и дефектов тел качения моделирование дало

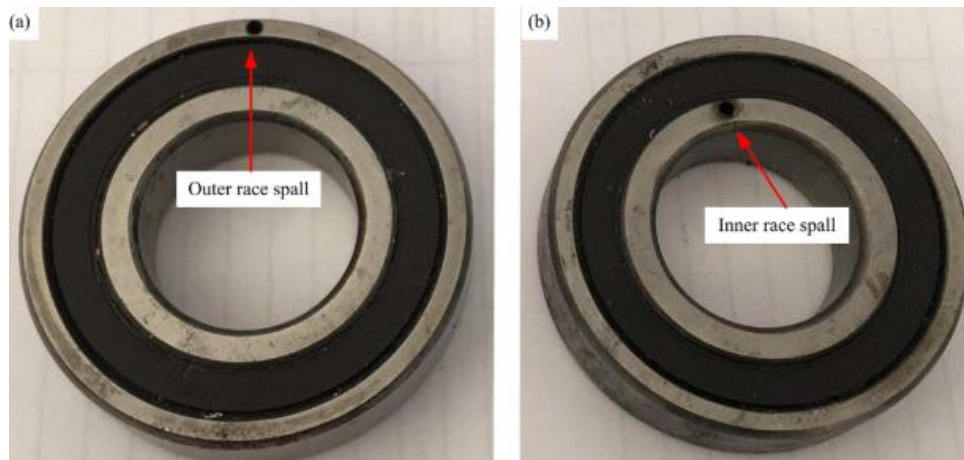
немного отличающиеся результаты, главным образом в количестве возникающих кратных гармоник.

Для проверки работы метода авторы собрали испытательный стенд, состоящий из трёхфазного двигателя, порошкового тормоза для создания нагрузки, датчиков скорости вращения, момента и тока. Вид испытательного стенда показан ниже.



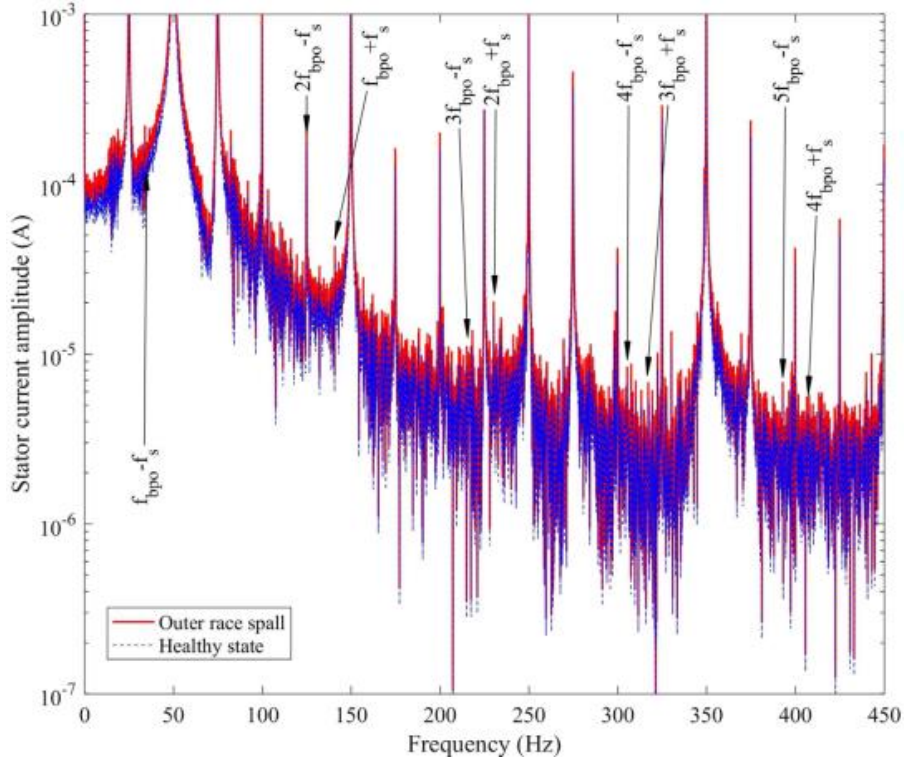
Испытательный стенд

Дефекты подшипника создавались высверливанием отверстия как показано ниже.

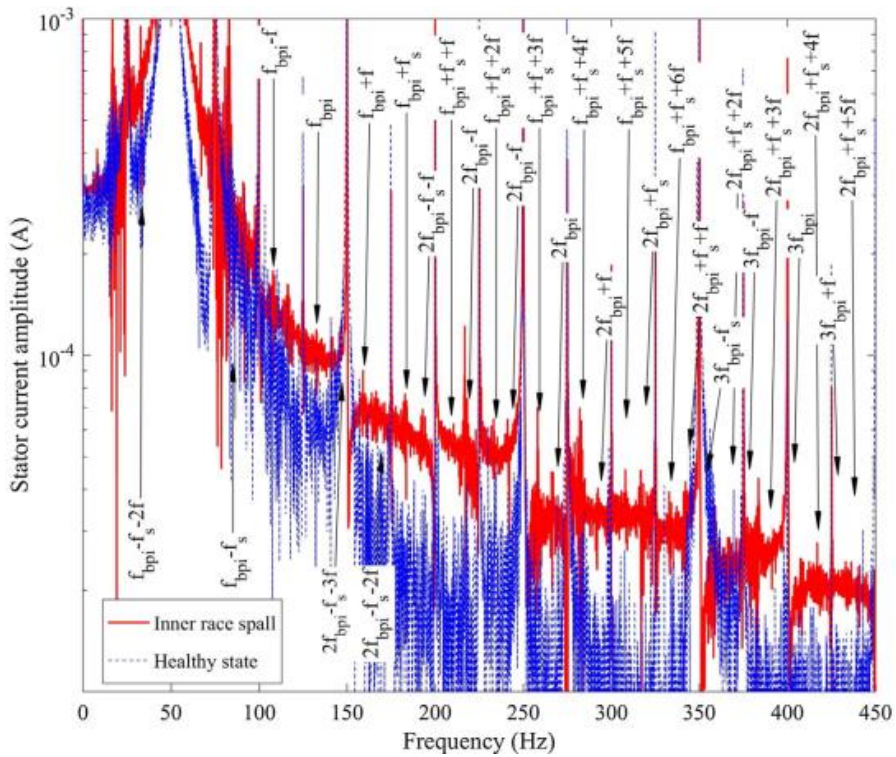


Дефекты подшипника

Сравнение спектров записанного токового сигнала для бездефектного подшипника и подшипника с дефектом внешнего кольца и дефектом внутреннего кольца показано ниже.



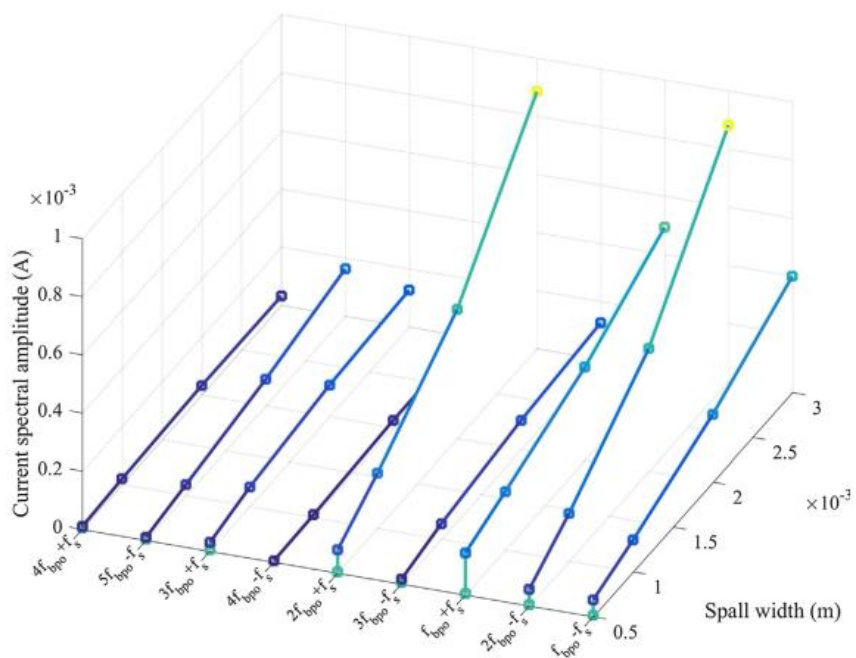
Сравнение спектров записанного токового сигнала для бездефектного подшипника и подшипника с дефектом внешнего кольца



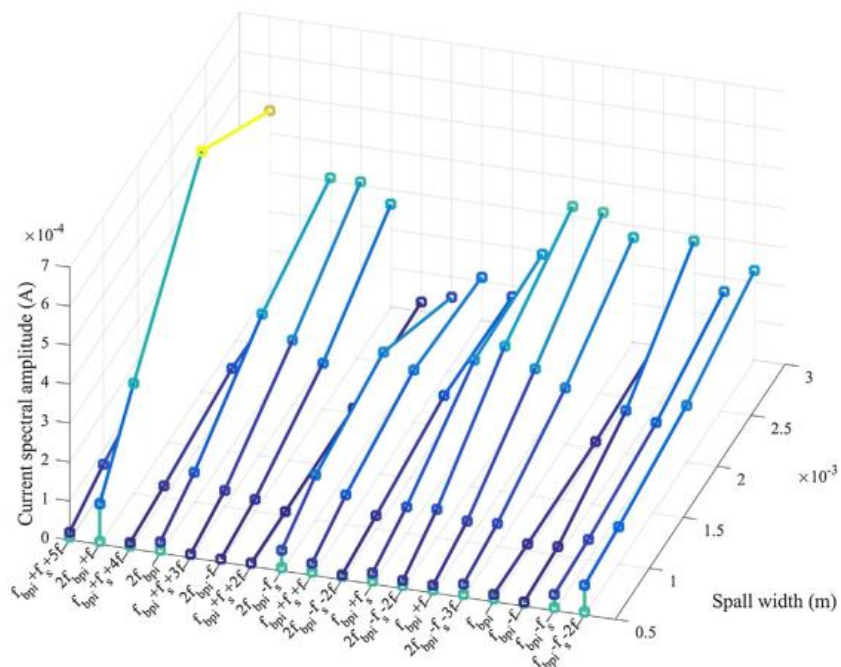
Сравнение спектров записанного токового сигнала для бездефектного подшипника и подшипника с дефектом внутреннего кольца

Сравнение результатов испытания и моделирования показало, что результаты в большой степени соответствуют друг другу.

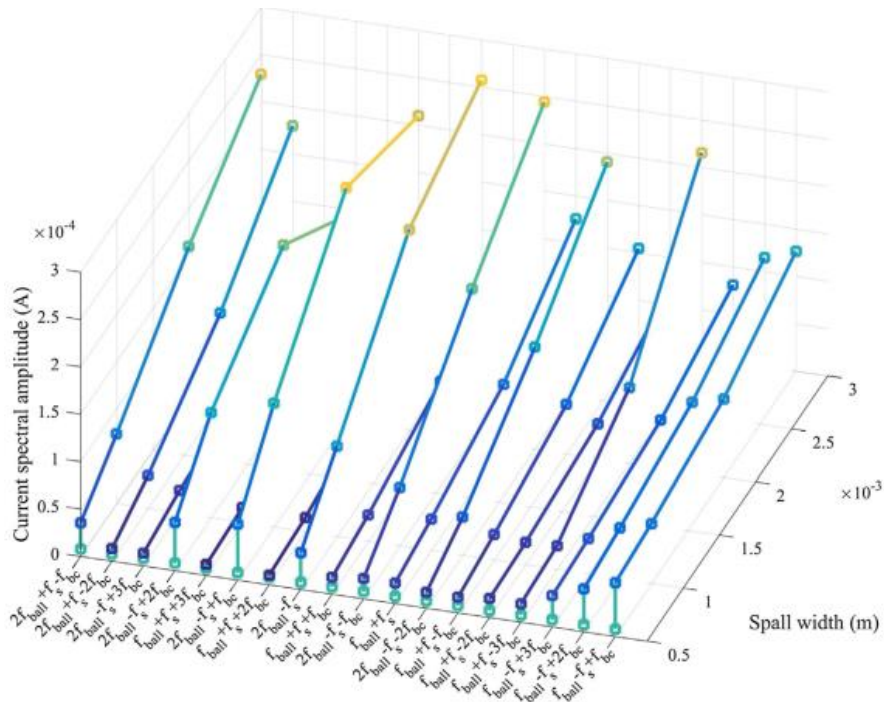
Исследователи также провели моделирования развития спектра тока при увеличении размера дефекта внутреннего и внешнего кольца и тела качения. Результаты моделирования показаны ниже в виде трёхмерных диаграмм развития амплитуд характерных гармоник с увеличением размера дефекта.



Развитие спектра при дефекте внешнего кольца



Развитие спектра при дефекте внутреннего кольца



Развитие спектра при дефекте тела качения

Анализ развития спектров показал, что развитие определённых гармоник может указать на степень развития разных типов дефектов. Вместе с этим, амплитуда некоторых гармоник может падать с развитием дефекта, что может приводить к неверным диагностическим выводам. Примерами таких гармоник являются $2f_{\text{впр}} \pm f$ для дефекта внутреннего кольца.

В результате анализа авторы предложили набор характерных гармоник, чьё развитие будет указывать на развитие дефектов разных типов.

Ещё больше информации в наших социальных сетях

