



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 21 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. [Установка для моделирования сигналов вибрации подшипников качения с дефектами](#)
2. [Метод локализации источников разрядной активности в силовых кабелях](#)
3. [Способ и система неинвазивного мониторинга магнитного потока синхронного генератора](#)
4. [Контроль наличия короткозамкнутых витков статорной обмотки генератора по данным электромагнитного момента, тока возбуждения и блуждающих токов параллельных ветвей](#)
5. [Опыт разработки системы мониторинга и анализа активности ЧР](#)
6. [Исследование влияния искажений питающего напряжения на характеристики ЧР в пустотах в изоляции](#)
7. [Опыт разработки барьерного датчика ЧР на основе двухконтурной антенны](#)
8. [Диагностика асинхронных двигателей с частотным регулированием по краткосрочным данным при помощи комбинации машинного обучения и отраслевых знаний](#)
9. [Опыт диагностики асинхронных двигателей 6 кВ при помощи мониторинга магнитного потока и сигнатурного анализа тока](#)
10. [Метод мониторинга и предотвращения обледенения линий электропередач](#)
11. [Определение ЧР в воздушных кабелях при помощи методов машинного обучения](#)
12. [Диагностика оборудования по данным вибрации в условиях высокоэнергетических импульсных помех](#)

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

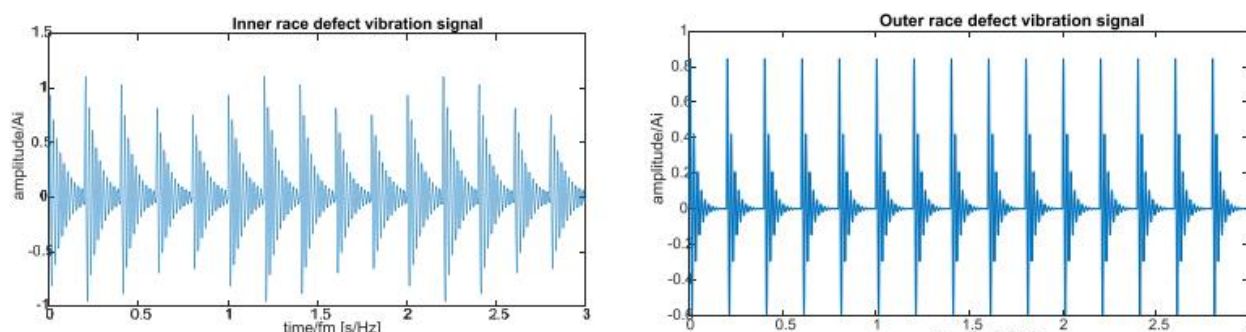
Установка для моделирования сигналов вибрации подшипников качения с дефектами

Источник: T. Addabbo et al., "A Characterization System for Bearing Condition Monitoring Sensors, a Case Study with a Low Power Wireless Triaxial MEMS Based Sensor," 2020 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 & IoT, Roma, Italy, 2020, pp. 11-15, doi: 10.1109/MetroInd4.0IoT48571.2020.9138309.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9138309>

Группа исследователей их Университета Сиены в Италии разработали способ и установку для физической имитации дефектов подшипников качения. Доклад авторов был представлен на Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT в июне 2020 года.

Авторы использовали формульное описание изменения сигнала вибрации при дефектах внутреннего и внешнего кольца подшипника. Формы описываемых таким образом сигналов показаны на изображении ниже.



Эталонные формы сигналов при дефекте внутреннего кольца (слева) и внешнего кольца (справа) подшипника качения

Далее авторы разработали установку, способную воспроизводить механические колебания, соответствующие формульному описанию сигналов. Схема установки показана ниже.

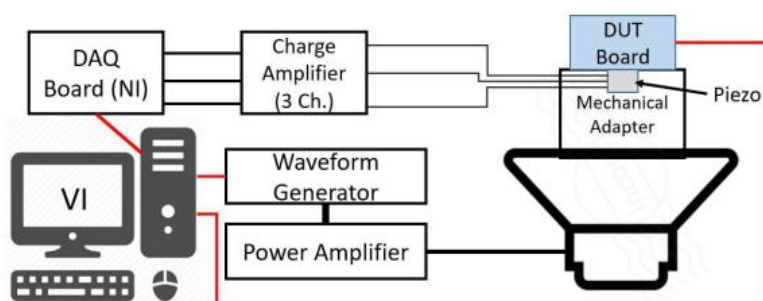


Схема установки

Установка состоит из громкоговорителя, сигнал которого модулируется при усилителе 1000 Вт. Громкоговоритель соединён с механическим адаптером, на который можно монтировать датчики вибрации и объекты виброиспытаний. Усилитель подключен к двум генераторам сигналов, для создания необходимых сигналов вибрации.

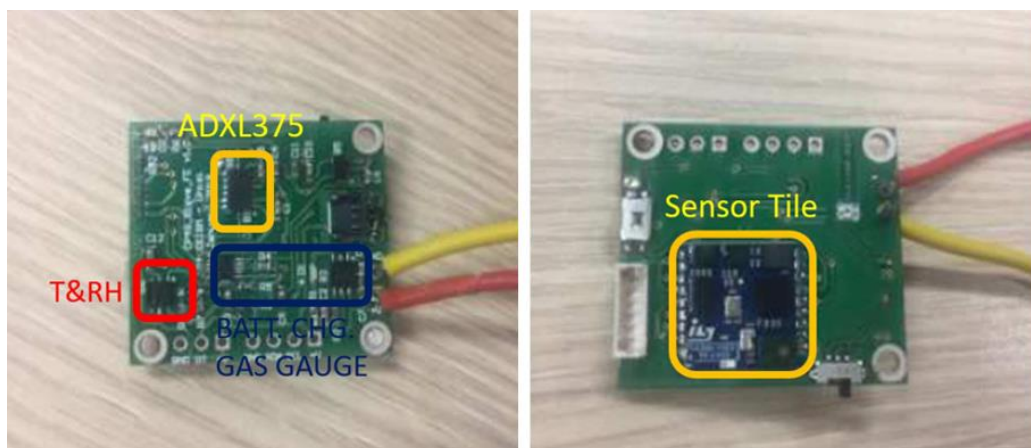
Для проверки работы установки авторы установили на механический адаптер громкоговорителя трёхосевой акселерометр V&K 4326A как показано ниже.



Установленный акселерометр

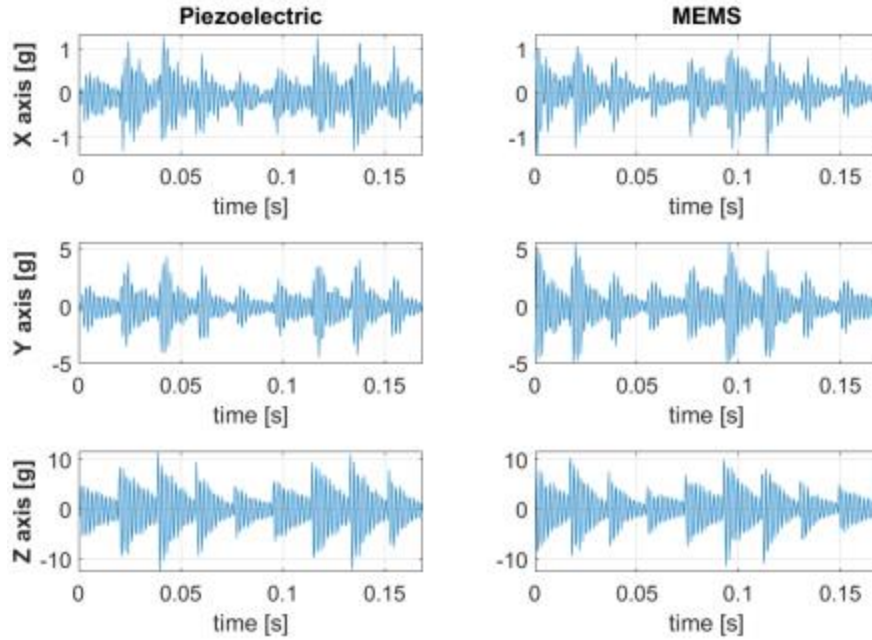
Сигнал акселерометра оцифровывался 16-битным АЦП и передавался на тестовый компьютер для обработки и анализа. В ходе анализа фактически записанный сигнал сравнивался с теоретическим заданием.

Дополнительно в исследования был испытан микроэлектронный цифровой акселерометр, разработанный авторам в ходе другой работы. В акселерометре используются два чувствительных элемента для повышения чувствительности измерения. Данные проходят первичную обработку во встроенном в датчик микроконтроллере, который затем передаёт их по технологии BLE (Bluetooth с низким энергопотреблением).

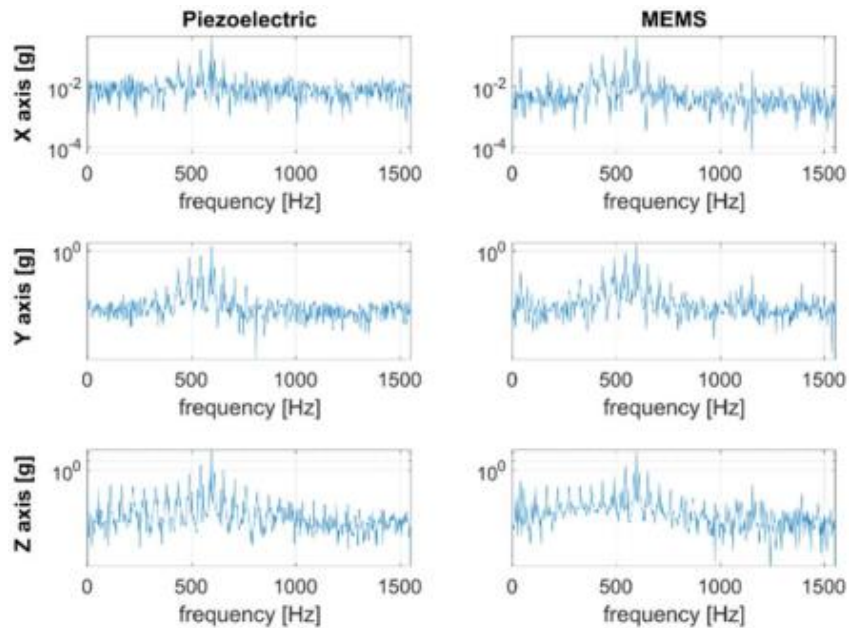


Акселерометр, виды сверху и снизу

Пример записанных при испытаниях сигналов показаны ниже. Для сравнения показаны осциллограммы виброускорения, получаемые акселерометром V&K и разработанным авторами акселерометром для одного и того же типа задаваемого дефекта (дефект внутреннего кольца).



Осциллограммы виброускорения акселерометра V&K и разработанного авторами акселерометра



Спектры виброускорения акселерометра V&K и разработанного авторами акселерометра

Анализ результатов показан хорошую сходимость между сигналами обоих акселерометров и заданием.

В заключении доклада указывается, что результат работы авторов призван сократить затраты на организацию испытательных стендов в исследованиях, касающихся характеристик вибрации оборудования.

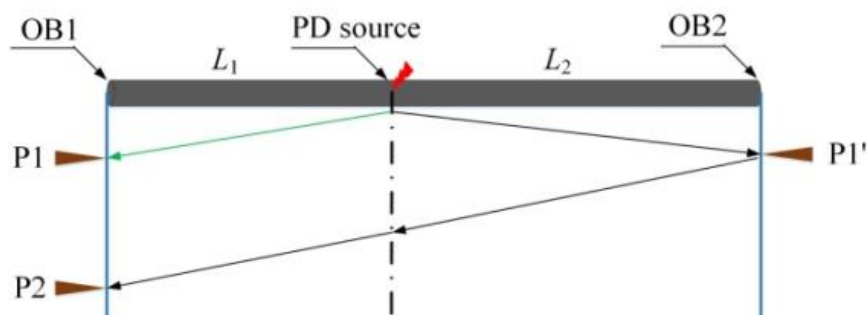
Метод локализации источников разрядной активности в силовых кабелях

Источник: J. Kong and K. Zhou, "A Novel Method for the Localization of Partial Discharge in Power Cables Based on Time Reversal Technique," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 1-5, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158585.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9158585>

Группа исследователей из Сычуаньского университета в Китае предложила новый метод определения источников разрядной активности в силовых кабелях по данным регистратора ЧР, устанавливаемого на одном из концов кабеля. Доклад исследователей был представлен на IEEE Electrical Insulation Conference в июле 2020 года.

В основе предложенного метода лежит модель линии, по которой в обе стороны распространяются импульсы от источника разрядной активности как показано на схеме ниже.

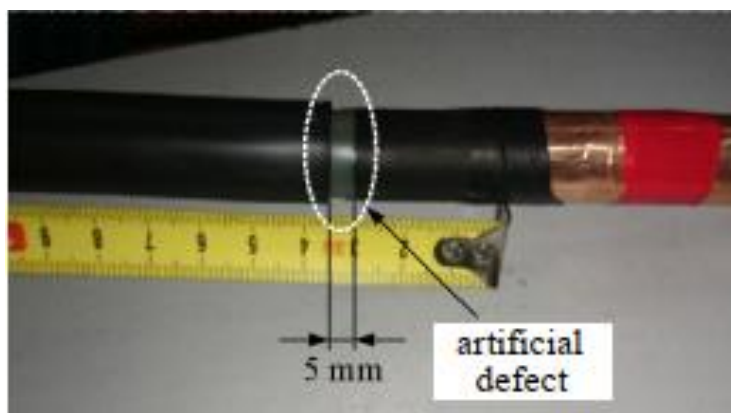


Модель кабеля с дефектом

Регистратор, фиксирующий импульсы на одном из концов кабеля (OB1), определить два момента прихода импульсов: прямого P1 и отражённого P2. Для локализации дефекта строится модель линии, в которой имитируется обратное распространение импульсов. Два импульса с амплитудами, равными зафиксированным регистратором, вводятся с конца кабеля OB1 с разницей во времени, равной разнице во времени между регистрацией импульсов P1 и P2. Место фокусировки обратных импульсов будет соответствовать месту возникновения разрядной активности.

Для проверки корректности предложенного подхода исследователи провели моделирование развития разрядов в линии. Место возникновения разрядов определялось при помощи разработанного метода, а также традиционных методов, основанных на определении пиков, по энергетическому критерию и кросс-корреляции. По данным исследователей, предложенный метод показал наилучшую точность даже в условиях присутствия шума.

Далее метод был проверен на испытательном кабеле 10 кВ длиной 498 метров. Дефект в кабеле создавался нарушением целостности внешней оболочки из сшитого полиэтилена как показано на изображении ниже.



Дефект в испытательном кабеле

Полученные исследователями результаты локализации дефекта, выполненные предложенным методом вместе с тремя традиционными методами показаны ниже.

Localization technique	PD source position/m	Absolute error/m	Relative error/%
Peak detection	247.03	1.97	0.79
Cross correlation	248.26	0.74	0.30
Energy criterion	249.48	0.48	0.19
TR	249.12	0.12	0.05

Сравнение результатов определения места дефекта (разработанный исследователями метод обозначен TR)

Способ и система неинвазивного мониторинга магнитного потока синхронного генератора

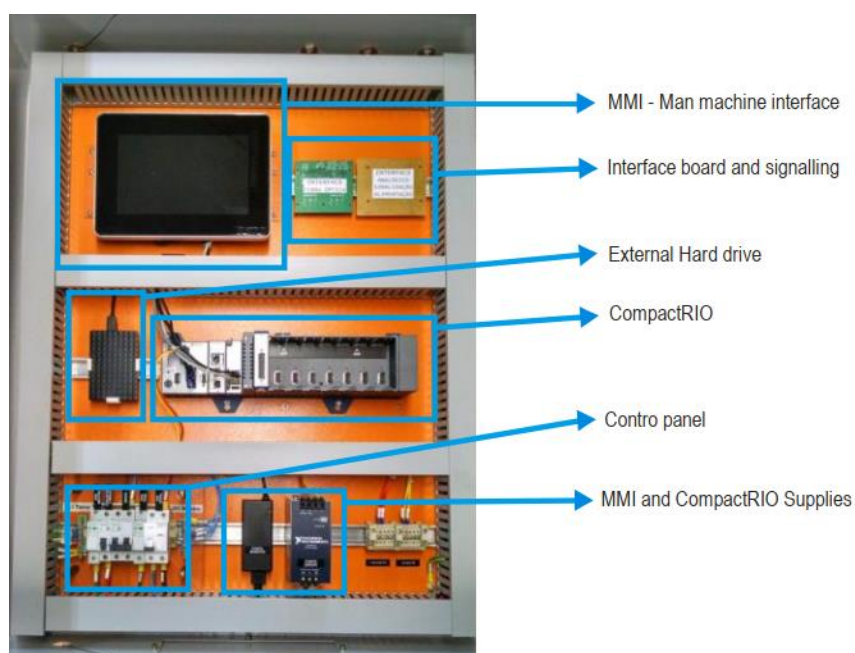
Источник: Santos, H. F. dos, Rigoni, M., Elias, R. de A., Feler, L. A., Wengerkievicz, C. A. C., Batistela, N. J., Sadowski, N., Kuo-Peng, P., Bastos, J. P. A., & Freitas, L. M. de. (2017). Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field. *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, 16(1), 70-89

http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2179-10742017000100070&lng=en&tlng=en

В статье, опубликованной в издании *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications* в марте 2017 года, группа исследователей из Федерального университета Санта Катарина в Бразилии и бразильской энергетической компании Engie описала собственный опыт по разработке и внедрению системы мониторинга больших синхронных генераторов. Работа системы основана на неинвазивном измерении магнитного потока, создаваемого ротором генератора, датчиками, устанавливаемыми вне корпуса генератора.

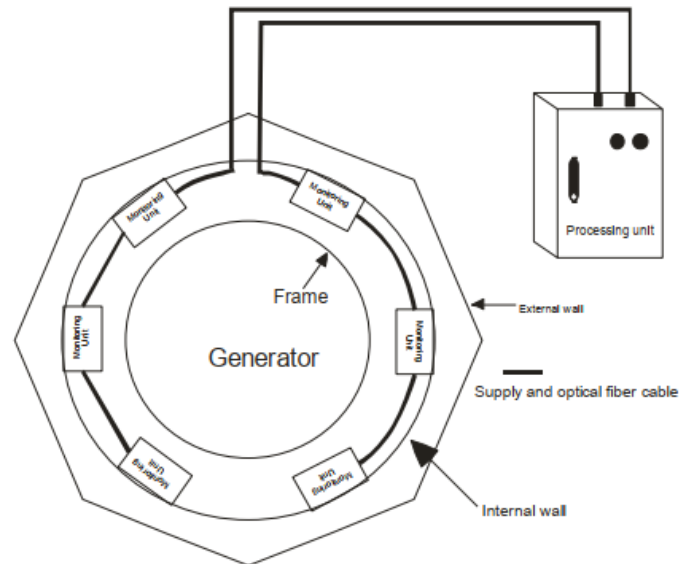
Разработку системы предваряло моделирование характеристик магнитного потока снаружи корпуса при работе генератора в разных режимах. Результаты моделирования подтвердило применимость выбранного исследователями метода мониторинга.

Собранный шкаф управления системы показан на изображении ниже.



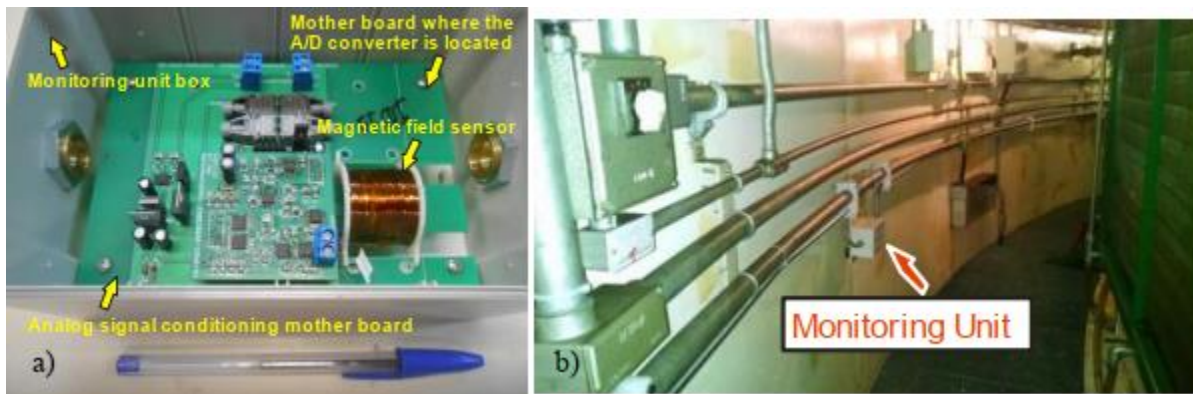
Шкаф управления системы

Основная обработка выполнялась в контроллере CompactRIO производства National Instruments. Шкаф дополнялся панелью для визуализации результатов. Шкаф подключался к нескольким модулям мониторинга как показано на схеме ниже.



Подключение шкафа к модулям мониторинга

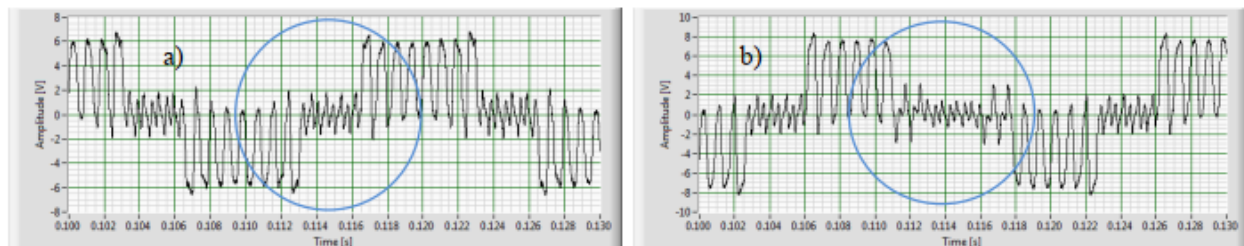
Каждый модуль мониторинга представлял собой коробку с размещёнными в ней датчиком магнитного потока и платами предварительной обработки сигнала. Вид модуля мониторинга показан ниже.



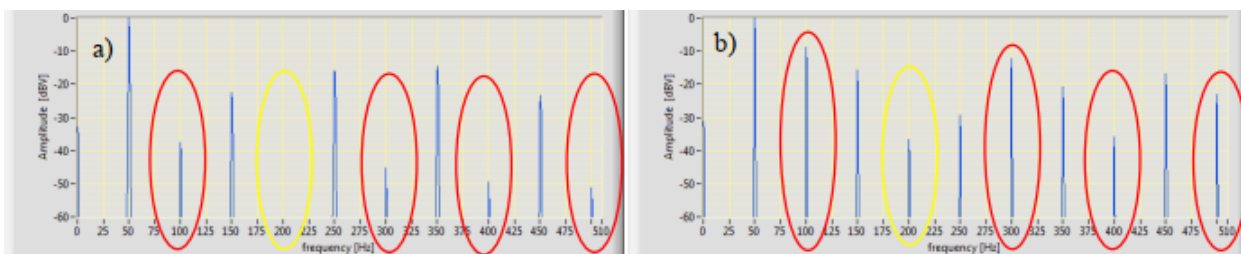
Модуль мониторинга: а) с открытой крышкой, б) установленный рядом с корпусом генератора

Система была испытана на тестовом генераторе в лаборатории и на одном из гидрогенераторов ГЭС Ита в Бразилии.

Пример результатов лабораторного испытания, где сравнивались результаты измерений на двухполюсном генераторе при отсутствии дефектов и при 50% активных витков в одном из полюсов.



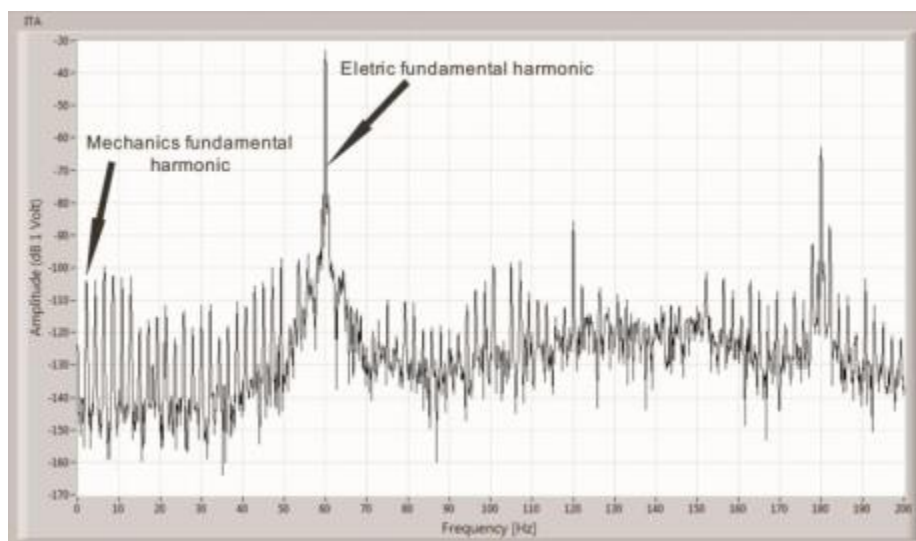
Осциллограммы зарегистрированного магнитного потока на бездефектном (слева) и дефектном (справа) генераторе



Спектр зарегистрированного магнитного потока на бездефектном (слева) и дефектном (справа) генераторе

Испытания подтвердили применимость такого метода мониторинга. Для спектра магнитного потока дефектного генератора характерно наличие дополнительных гармоник, амплитуды которых указывают на степень развития дефекта.

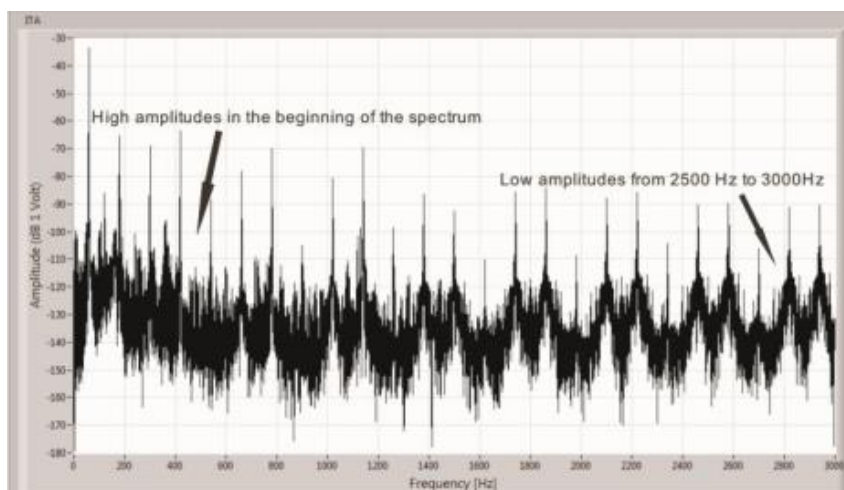
Далее работа системы была опробована на одном из гидрогенераторов ГЭС Ита. При опробовании никаких дефектов на генераторе не создавалось, данные системы исследовались для бездефектного режима работы генератора. Мощность генератора составляла 295 МВА, число полюсов 56, частота сети 60 Гц. Для таких характеристик фундаментальная механическая частота генератора составляет 2.14 Гц. На изображении ниже показан спектр зарегистрированного магнитного потока генератора до 200 Гц, из которого видно, что гармоника механической частоты примерно на 50 дБ ниже гармоник электрической частоты.



Спектр магнитного потока гидрогенератора до 200 Гц

Расчётным путём было установлено, что соответствующие напряжённости магнитного поля для электрической и механической гармоник составляют 60 А/м и 0.19 А/м.

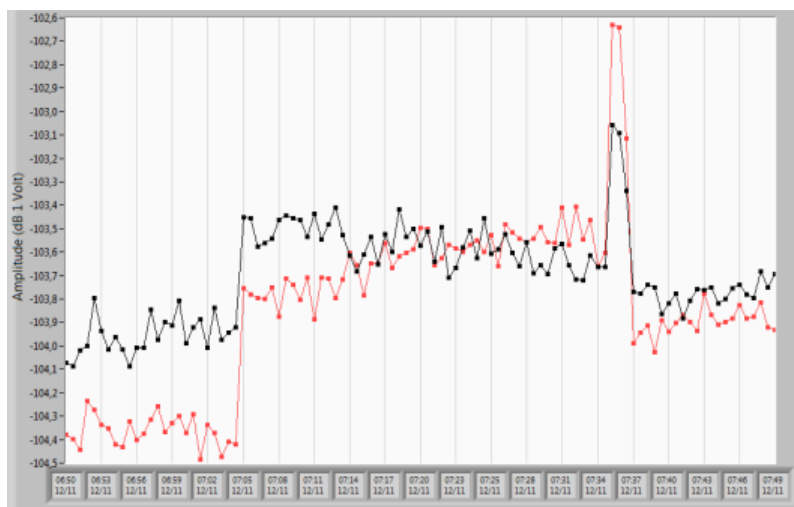
Более широкий диапазон спектра показан ниже.



Спектр магнитного потока до 3 кГц

Из спектра видно, что амплитуды более высоких гармоник (выше 1 кГц) ниже -130 дБ. Эти гармоники также чувствительны к вариациям скорости ротора. Например, увеличение скорости на 1 об/мин приведёт к увеличению амплитуды 500-й кратной гармоники механической частоты с 1071.43 Гц до 1079.77 Гц.

Дополнительно, для исследования чувствительности системы было проанализировано изменение характеристик магнитного потока при изменении режима работы генератора. На графике ниже показано изменение амплитуды гармоники фундаментальной механической частоты и её второй кратной гармоники (4.28 Гц) при изменении возбуждения генератора.



Изменение амплитуды гармоники механической частоты вращения и её второй кратной гармоники при изменении возбуждения генератора

В заключении статьи указывается, что результаты испытаний и опытного опробования системы признаны успешными. Дальнейшая работа авторов будет направлена на более глубокое изучение характеристик внешнего магнитного потока при разных дефектах и режимах работы генераторов.

Контроль наличия короткозамкнутых витков статорной обмотки генератора по данным электромагнитного момента, тока возбуждения и блуждающих токов параллельных ветвей

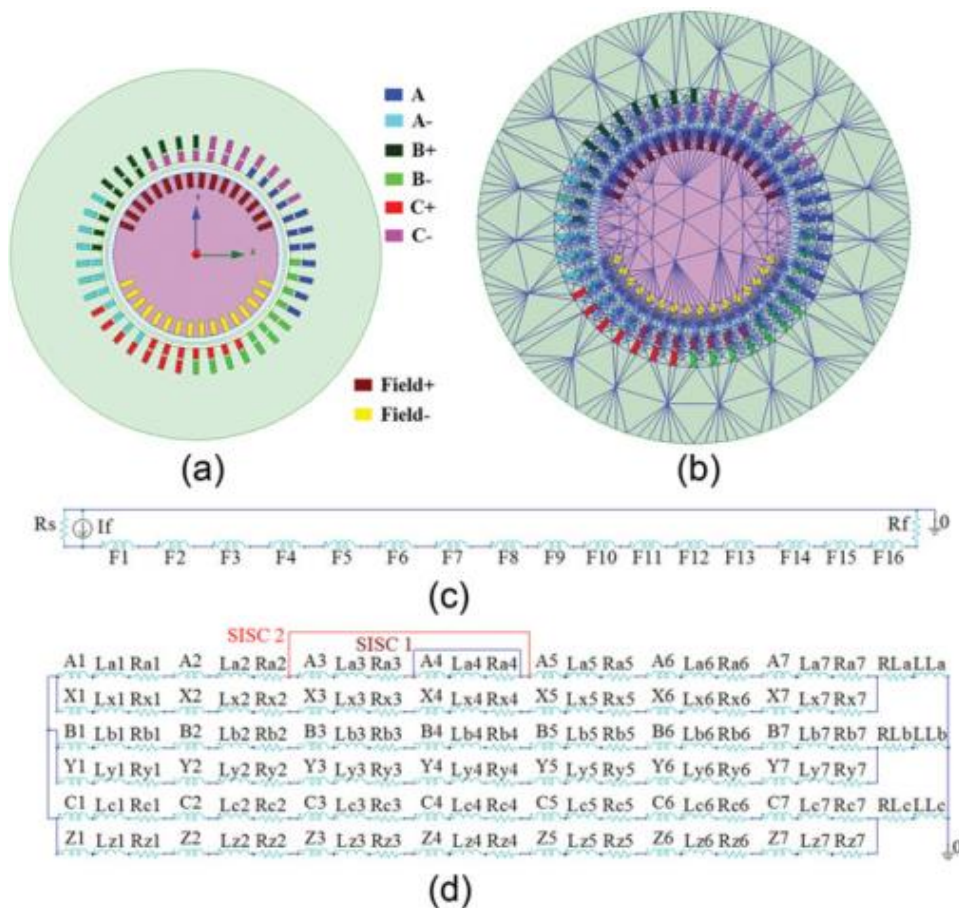
Источник: Yu-Ling He, Fa-Lin Wang, Gui-Ji Tang & Meng-Qiang Ke (2017) Analysis on Steady-State Electromagnetic Characteristics and Online Monitoring Method of Stator Inter-Turn Short Circuit of Turbo-Generator, *Electric Power Components and Systems*, 45:2, 198-210

<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/15325008.2016.1247387>

Группа исследователей из Северо-китайского энергетического университета разработала способ контроля наличия короткозамкнутых витков статорной обмотки генератора по данным электромагнитного момента, тока возбуждения и блуждающих токов параллельных ветвей. Статья авторов была опубликована в издании *Electric Power Components and Systems* в 2017 году.

Для исследования такого подхода к диагностике генераторов в работе использовалась компьютерная модель распространённого в Китае турбогенератора типа QFSN-600-2YHG и испытательный генератор типа MJF-30-6, на котором создавались дефекты.

Модель генератора показана на изображении ниже.

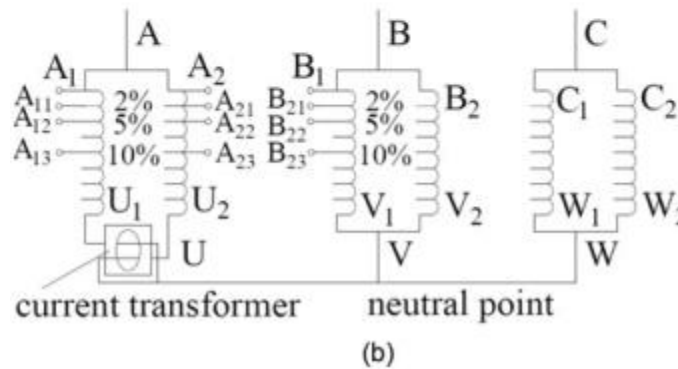


Модель генератора QFSN-600-2YHG: а) общий вид, б) сетка для метода конечных элементов, в) соединение обмотки возбуждения, д) схема соединения обмоток

Испытательный генератор показан на изображении ниже.



(a)



(b)

Испытательный генератор MJF-30-6: а) общий вид, б) схема соединения обмоток с промежуточными выводами для создания короткозамкнутых витков

Исследование характеристик проводилось при бездефектном режиме работы, с одним и двумя замкнутыми витками. Исследователи получили следующие данные:

- осциллограммы при симуляции бездефектного режима;
- спектры при симуляции бездефектного режима;
- осциллограммы при испытаниях на генераторе в бездефектном режиме;
- спектры при испытаниях на генераторе в бездефектном режиме;
- осциллограммы при испытаниях на генераторе с 1 и 2 замкнутыми витками;
- спектры при испытаниях на генераторе с 1 и 2 замкнутыми витками.

Исследуемыми характеристиками работы генератора являлись ток возбуждения, блуждающие токи параллельных ветвей и электромагнитный момент.

После обработки результатов исследователи сформулировали набор диагностических критериев, по которым можно проводить диагностику генератора. Диагностические критерии показаны в таблицах ниже.

Признак	Заключение
---------	------------

Отсутствует повышение второй гармоники тока возбуждения и момента, отсутствует повышение первой и третьей гармоник блуждающего тока	Замкнутые витки обмотки статора отсутствуют
Присутствует повышение второй гармоники тока возбуждения и момента, присутствует повышение первой и третьей гармоник блуждающего тока	Замкнутые витки обмотки статора присутствуют
Присутствует повышение второй гармоники тока возбуждения и момента, присутствует повышение первой и третьей гармоник блуждающего тока. При этом среднее значение тока возбуждения и момента снижается.	Небольшое число замкнутых витков обмотки статора (развитие дефекта)

Состояние	Ток возбуждения	Блуждающие токи	Момент
Статический эксцентриситет воздушного зазора	Без изменений	Увеличенная первая гармоника	Небольшое увеличение постоянной составляющей и второй гармоники
Замкнутые витки обмотки статора	Снижение постоянной составляющей и второй гармоники	Увеличение первой и третьей гармоник	Снижение постоянной составляющей, увеличение второй и четвёртой гармоник
Одновременное развитие обоих типов дефектов	Снижение постоянной составляющей, увеличение второй гармоники	Увеличение первой и третьей гармоник (выражено сильнее, чем при наличии только замкнутых витков)	Снижение постоянной составляющей, увеличение второй и четвёртой гармоник (выражено сильнее, чем при наличии только замкнутых витков)

Опыт разработки системы мониторинга и анализа активности ЧР

Источник: D. Manu and P. Basappa, "Design and Development of an Integrated Software and Hardware System for the Measurement and Analysis of Partial Discharges," 2020 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Knoxville, TN, USA, 2020, pp. 207-211, doi: 10.1109/EIC47619.2020.9158722.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9158722>

На прошедшей в июне 2020 года IEEE Electrical Insulation Conference группа исследователей из Норфолкского университета в США поделилась собственным опытом по разработке системы контроля и анализа активности ЧР в электрооборудовании. Исследователи разработали аппаратную и программную части системы.

Основным элементом системы является высокочастотный осциллограф NI 5154, который проводит одновременную оцифровку сигнала ЧР и референсного напряжения. Программное обеспечение системы преобразовывает записанные данные в трёхмерный PRPD-распределения. При обработке данные ЧР система определяет требуемую частоту оцифровки, минимально необходимое число выборок для одного замера, диапазон измерения и выполняет синхронизацию сигналов ЧР с референсным напряжением.

Схема работы системы показана ниже.

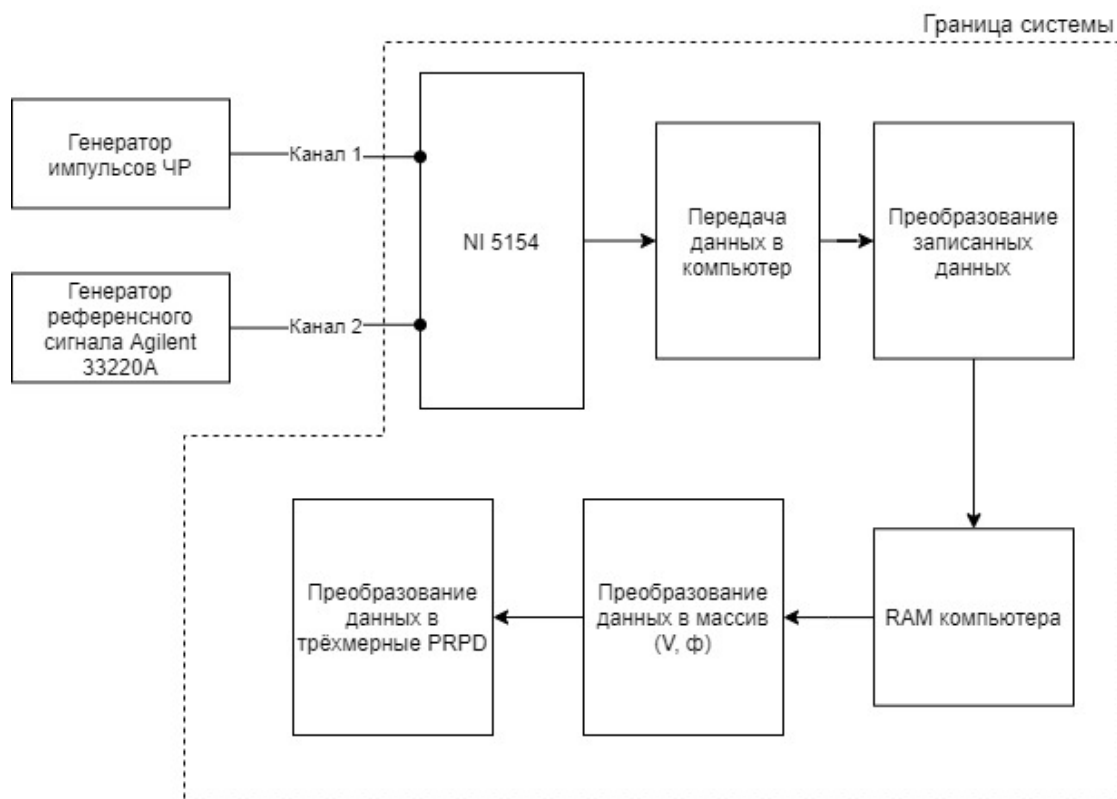


Схема работы системы

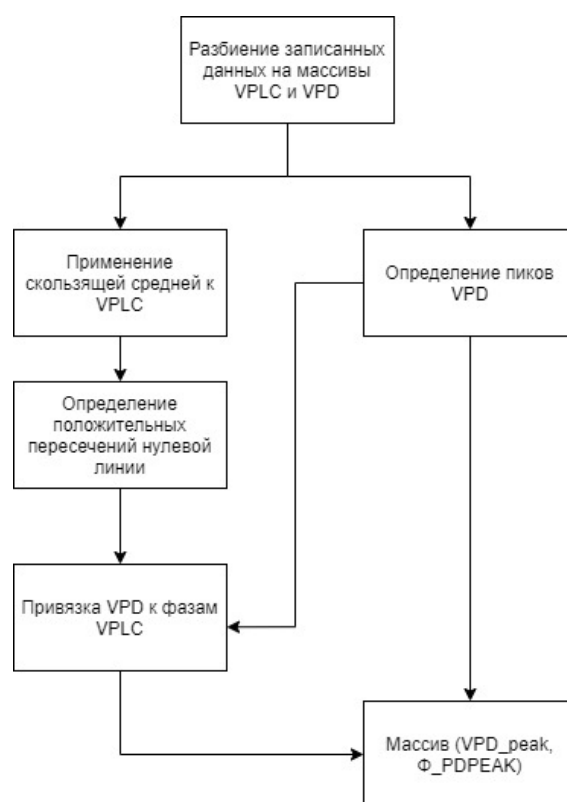
Схема последовательности обработки данных в ПО показана ниже.



Схема последовательности обработки данных в ПО

Система была протестирована в лаборатории. Для задания референсного напряжения использовался генератор синусоидального сигнала частотой 60 Гц и размахом напряжения 2 В. Настройки генератора импульсов ЧР позволяли генерировать импульсы с задаваемой амплитудой и привязкой к фазе референсного напряжения.

Основной алгоритм системы показан ниже.



Основной алгоритм системы

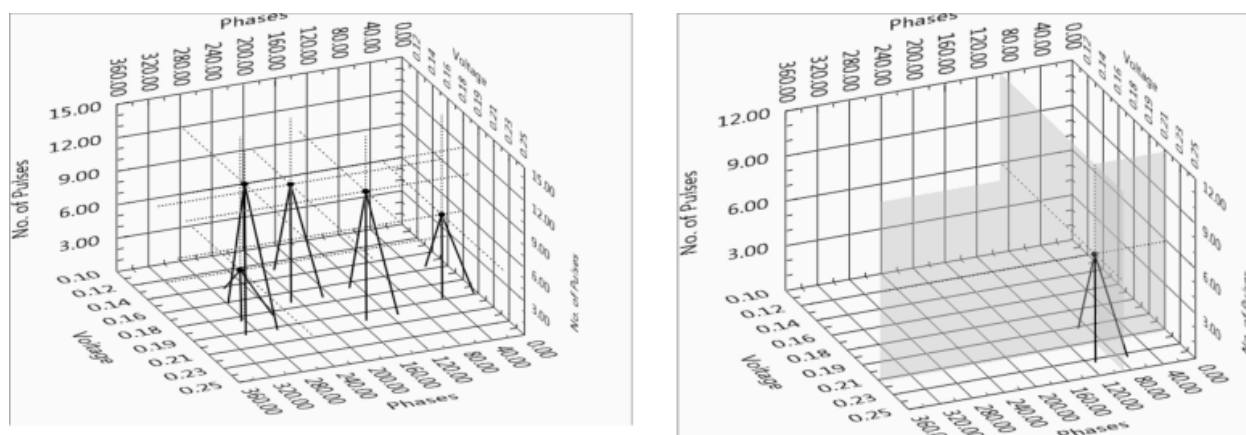
Суть основного алгоритма состоит в разделении всего массива записанных данных на VPLC (референсное напряжение) и VPD (импульсы ЧР). К напряжению VPLC затем применялся метод скользящей средней для удаления шумов. Затем определялись моменты времени перехода снизу вверх очищенным от шумов референсным напряжением нулевой линии для расчёта фаз референсного напряжения. Принадлежность записанных импульсов к массиву ЧР (VPD) определялась по длительности переднего и заднего фронтов, пиковой амплитуде и длительности импульса. Моменты времени регистрации импульсов ЧР синхронизировались с фазой референсного напряжения при помощи анализа временной разности между временем регистрации ЧР и временем последнего пересечения нулевой линии референсным напряжением.

Полученный в итоге массив представлял собой пиковых амплитуд и фазных углов импульсов ЧР, по которому можно было строить PRPD-распределения.

При испытаниях системы исследователи несколько сценариев:

- различные амплитуда и фаза ЧР;
- постоянная амплитуда и фаза ЧР.

Пример PRPD-распределения, записанного в обоих случаях, показан на изображении ниже.



PRPD-распределения для сценариев с различными амплитудой и фазой ЧР (слева) и постоянной амплитудой и фазой ЧР (справа)

В заключении исследования указывается, что предложенный способ реализации системы мониторинга ЧР является относительно простым и не требующим существенных затрат. Результаты испытаний были признаны удовлетворяющими цели исследования.

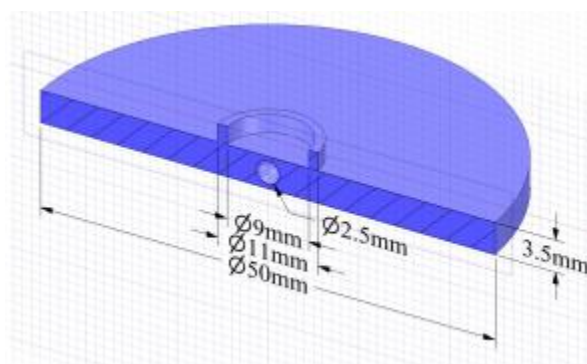
Исследование влияния искажений питающего напряжения на характеристики ЧР в пустотах в изоляции

Источник: R. Prochazka and O. Sefl, "Influence of Voltage Distortion Shape on Partial Discharge Activity in Internal Voids," 2020 International Conference on Diagnostics in Electrical Engineering (Diagnostics), Pilsen, Czech Republic, 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/Diagnostics49114.2020.9214640.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9214640>

Группа исследователей из Пражского технического университета рассмотрела влияние, которое оказывают искажения питающего напряжения на характеристики ЧР, возникающих в пустотах в изоляции. Соответствующая статья была представлена на прошедшей в сентябре 2020 года Conference on Diagnostics in Electrical Engineering.

Для исследования методом 3D-печати была выполнена серия образцов изоляции. Каждый образец представлял собой диск из пластика типа PET-G с пробивным напряжением 35 кВ/мм. Поперечное сечение образца показано на изображении ниже.



Образец

Образцы испытывались на установке, схема которой показана ниже.

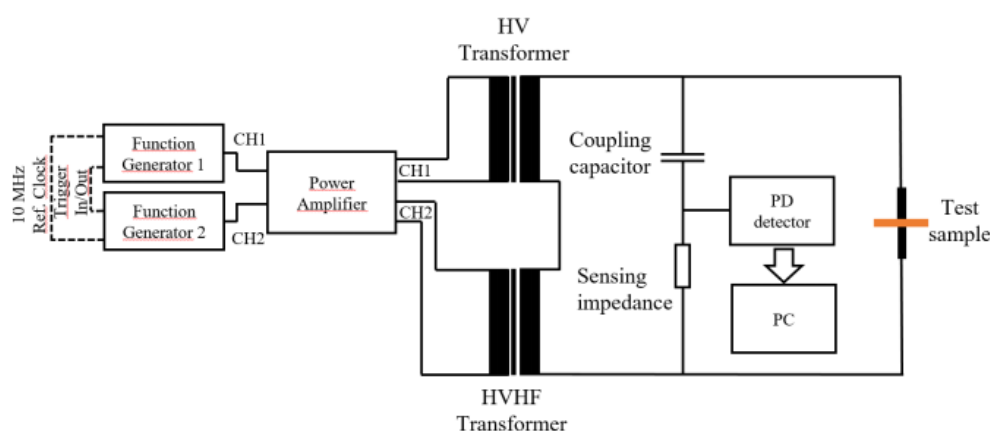


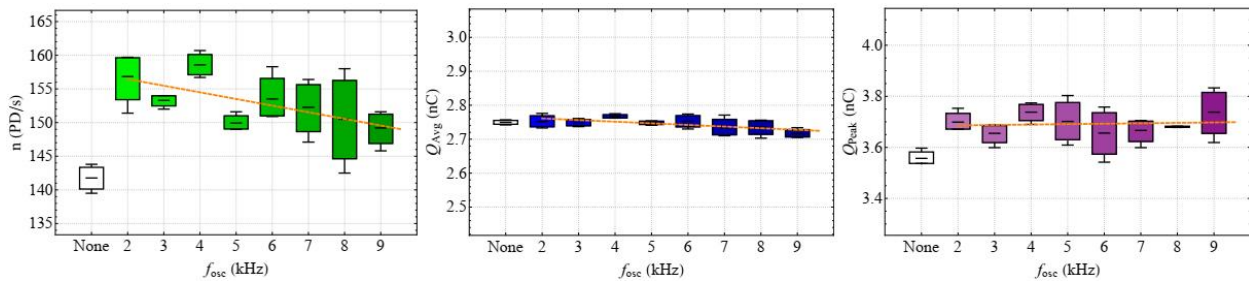
Схема испытательной установки

Основными элементами установки являлись два трансформатора, напряжение на которые подавалось от двухканального усилителя мощности. Напряжение первого канала усилителя представляло собой чистую, неискажённую синусоиду. Напряжение второго канала представляло

собой синусоиду с наложенными поверх высокочастотными искажениями. Напряжение на испытательный образец подавалось поочерёдно с обоих трансформаторов, характеристики ЧР фиксировались одним из коммерческих приборов.

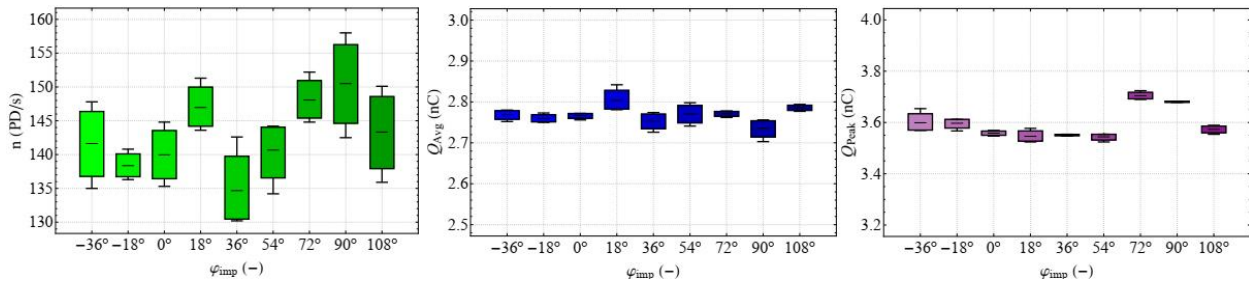
Испытания выполнялись в два этапа: с изменением частоты искажения и с изменением фазового сдвига между синусоидой искажения и основным напряжением.

Результаты анализа влияния частоты искажения (f_{osc}) на частоту появления ЧР, среднюю и пиковую амплитуду ЧР показаны ниже.



Влияние частоты искажения на частоту появления ЧР (слева), среднюю (в центре) и пиковую амплитуду ЧР (справа)

Результаты анализа влияния фазового сдвига (φ_{imp}) на частоту появления ЧР, среднюю и пиковую амплитуду ЧР показаны ниже.



Влияние фазового сдвига на частоту появления ЧР (слева), среднюю (в центре) и пиковую амплитуду ЧР (справа)

Из результатов видно, что увеличение частоты искажения приводило к небольшому росту частоты появления ЧР. Наибольший рост при этом наблюдался на небольших частотах искажений. С появлением искажения также возрастала пиковая амплитуда ЧР, но её величина практически не менялась с изменением частоты искажения. Однако средняя амплитуда ЧР практически не менялась. Возрастание активности ЧР наблюдалось при сдвиге, соответствующем максимуму основного напряжения (72° - 108°).

В заключении исследования указывается, что дальнейшая работа будет продолжена и будет сфокусирована на исследовании большего числа характеристик.

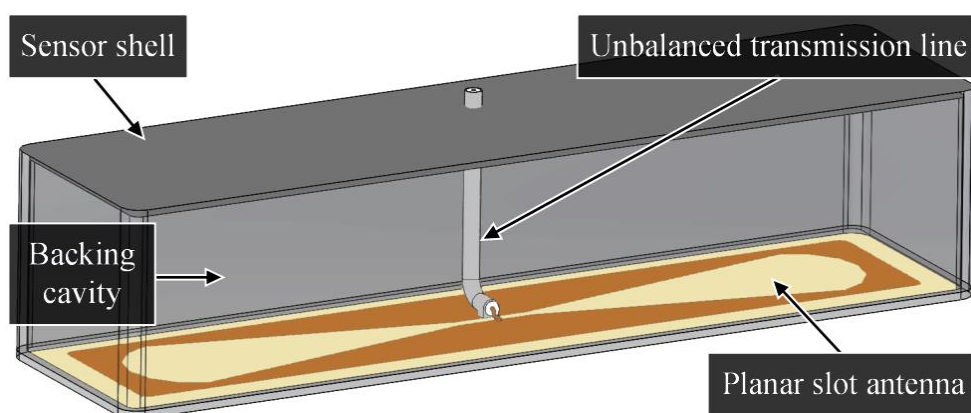
Опыт разработки барьерного датчика ЧР на основе двухконтурной антенны

Источник: C. Zachariades, R. Shuttleworth and R. Giussani, "A Dual-Slot Barrier Sensor for Partial Discharge Detection in Gas-Insulated Equipment," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 2, pp. 860-867, 15 Jan.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2019.2943625.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8848798>

Группа исследователей из Англии разработала барьерный датчик для измерения ЧР в КРУЭ, в основе которого лежит двухконтурная антенна. Статья исследователей была опубликована в издании *IEEE Sensors Journal* в январе 2020 года.

Схематичное изображение датчика показано ниже.



Датчик

В основе датчика – камера из проводящего материала и одноконтурная антенна на печатной плате. Плата вставлена в камеру таким образом, чтобы проводящий слой платы не касался стенок камеры. Зазор между проводящим слоем платы и камерой формирует второй антенный контур датчика.

Использование двух контуров в антенне приводит к наличию двух резонансных частот, что повышает общую чувствительность датчика.

В ходе разработки размеры датчика были оптимизированы при помощи программного пакета Comsol Multiphysics таким образом, чтобы добиться значения коэффициента отражения ниже -6 дБ в диапазоне частот 1-2 ГГц. Полученная после оптимизации конструкция датчика показана на изображении ниже.

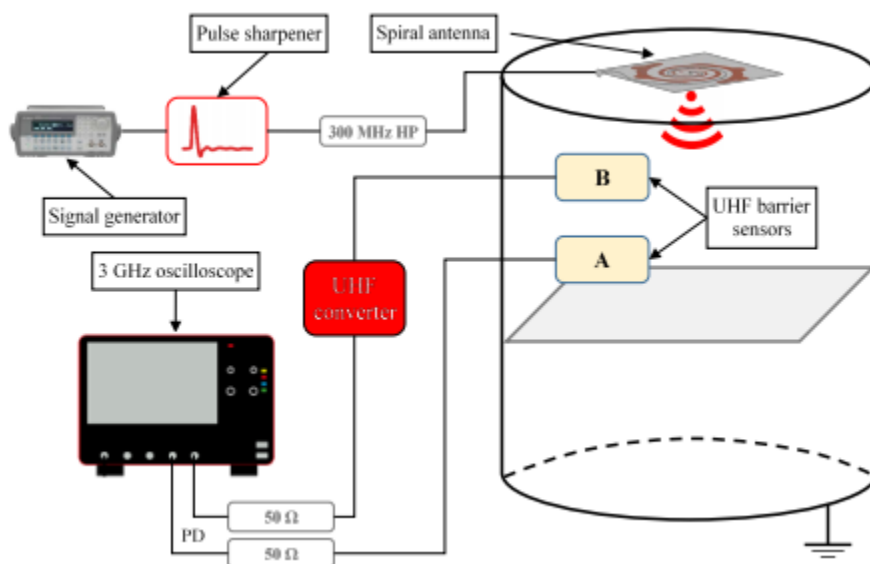


Конструкция датчика

Нижняя часть датчика, примыкающая к печатной плате, выполнена съёмной так, чтобы её размеры можно было подобрать под радиус закругления элемента КРУЭ, на который будет установлен датчик.

Измеренные после изготовления характеристики датчика соответствовали характеристикам, полученным при оптимизации.

Далее исследователи собрали тестовую установку, схема которой показана ниже.

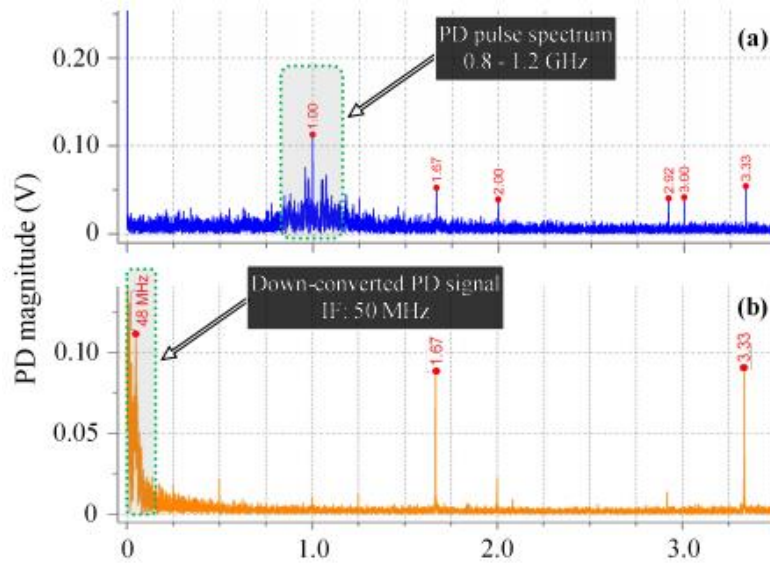


Тестовая установка

Установка имитировала участок КРУЭ с источником ЧР, которые создавались генератором сигналов. Генератор подавал на установку импульсы с амплитудами 5-20 В, величиной переднего фронта <5 нс и частотой следования 10 кГц.

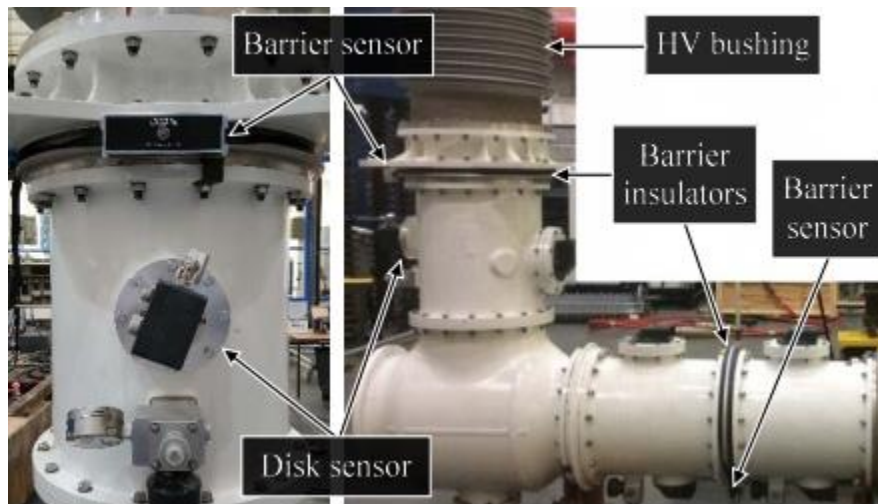
Разработанный антенный датчик был подключен к цифровому осциллографу с шириной диапазона 3 ГГц. Зафиксированный при измерениях спектр в диапазоне 0.8-1.2 ГГц показан ниже. На фоне спектра чётко различимы сигналы с амплитудой около 0.1 В. Дополнительно было проведено

измерение, в котором сигнал датчика подавался на осциллограф через понижающий преобразователь частоты в диапазоне 0-100 МГц, после чего с сигналом смогло бы работать большинство коммерческих систем контроля ЧР. Вид спектра после понижения частоты с центральной 1 ГГц до 50 МГц также показан ниже.



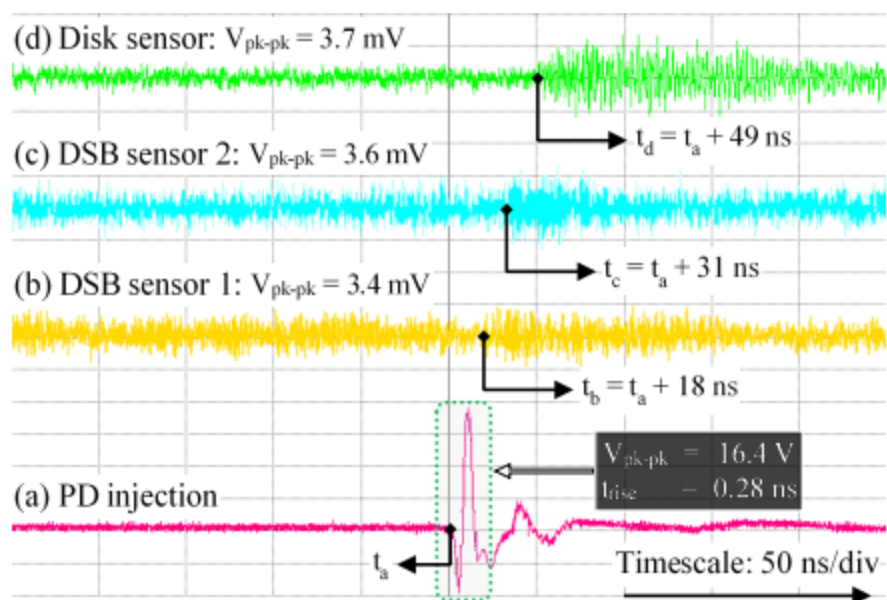
Спектр зафиксированного сигнала: а) напрямую с датчика, б) после снижения частоты

Дополнительно работа датчиков была проверена на КРУЭ 420 кВ. Схема размещения датчиков показана ниже.



Размещённый датчики на КРУЭ 420 кВ

Два разработанных датчика были размещены на газовых барьерах. Помимо этого, использовался один оконный датчик. При испытаниях в КРУЭ вводились импульсы, соответствующие ЧР. Данные с датчиков снимались осциллографом с частотой оцифровки 3 ГГц. Записанные осциллограммы сигналов генератора и трёх датчиков показаны ниже.



Записанные осциллограммы сигналов: а) от генератора; б) барьерный датчик 1, с) барьерный датчик 2, d) оконный датчик

Из записанных данных видно, что амплитуды сигналов были примерно одинаковы у всех датчиков. Более низкий уровень шума у оконного датчика объясняется размещением его антенны внутри оболочки КРУЭ в отличие от барьерных датчиков. Сигналы всех датчиков различимы на фоне шума, что делает датчики пригодными для локализации источника ЧР методом “time-of-arrival”.

Диагностика асинхронных двигателей с частотным регулированием по краткосрочным данным при помощи комбинации машинного обучения и отраслевых знаний

Источник: S. T. Kandukuri, H. van Khang and K. G. Robbersmyr, "Diagnosis of inverter-fed induction motors in short time windows using physics-assisted deep learning framework," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 264-270, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864889.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864889>

Группа исследователей из Университета Агдера в Норвегии разработала способ диагностики асинхронных двигателей с частотным регулированием по краткосрочным данным. Способ основан на одновременном использовании отраслевых знаний о частотных характеристиках тока двигателя при различных дефектах и на применении методов машинного обучения. Доклад группы был представлен в августе 2019 года на IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

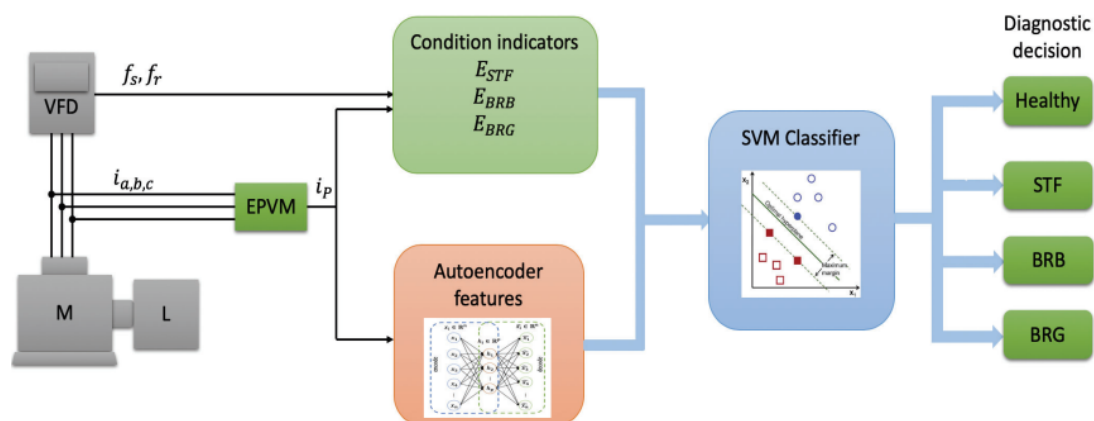
Исследователи рассматривали дефекты, связанные с межвитковыми замыканиями статорной обмотки, неисправностями стержней ротора и повреждениями внешнего кольца подшипников. Каждый из этих характеризуется набором определённых характерных частот в спектре питающего тока. Однако частотный анализ может представлять трудность при частотном регулировании двигателя, поскольку в спектре также будут присутствовать гармоники, вызванные переключениями регулятора.

В качестве диагностического критерия, основанного на отраслевых знаниях, исследователи использовали спектральную энергию модуля расширенного вектора Парка питающего тока в узком диапазоне (1.5 Гц) вокруг характерных частот дефектов. Под расширенным вектором парка понимается вектор, действительная и мнимая часть которого задаются токами i_d и i_q , которые определяются линейными комбинациями токов фаз двигателя.

Использование вектора Парка позволяет получить три диагностических критерия, ESTF, EBRB, EBRG, соответствующих оценке наличия каждого типа дефекта.

Для повышения точности диагностики исследователи дополнительно использовали алгоритм глубокого автоэнкодера, типа нейронной сети, способной генерировать характерные признаки из наборов данных. Полученные таким образом наборы признаков, обусловленных отраслевыми знаниями и машинным обучением, обрабатывались методом опорных векторов, одним из алгоритмов машинного обучения для классификации данных.

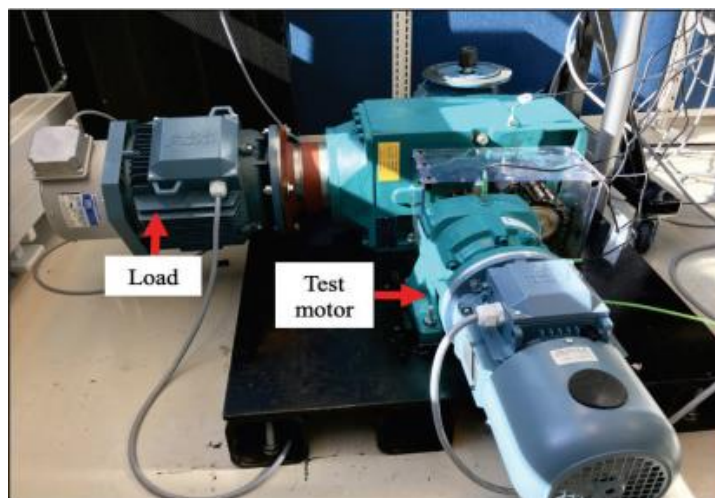
Общая структура метода показана ниже.



Структура метода

В методе данные токов ($i_{a,b,c}$) двигателя по фазам поступают в систему, где выполняется расчёт расширенного вектора Парка (EPVM). Далее, на основании EPVM, рассчитываются характеристики дефектов ESTF, EBRB, EBRG и генерируются характерные признаки глубоким автоэнкодером. При расчёте ESTF, EBRB, EBRG также используется задание частоты регулятором, по которому определяются ключевые частоты дефектов. Метод опорных векторов (SVM) затем выполняет классификацию состояния двигателя по одной из четырёх категорий: бездефектное состояние и один из трёх дефектов.

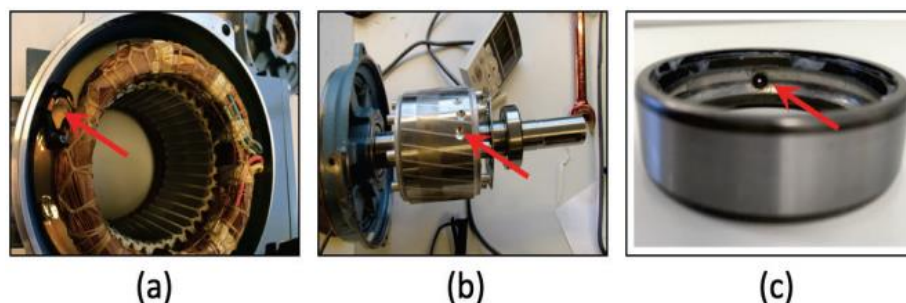
Работа метода была проверена на тестовой установке, показанной ниже.



Тестовая установка

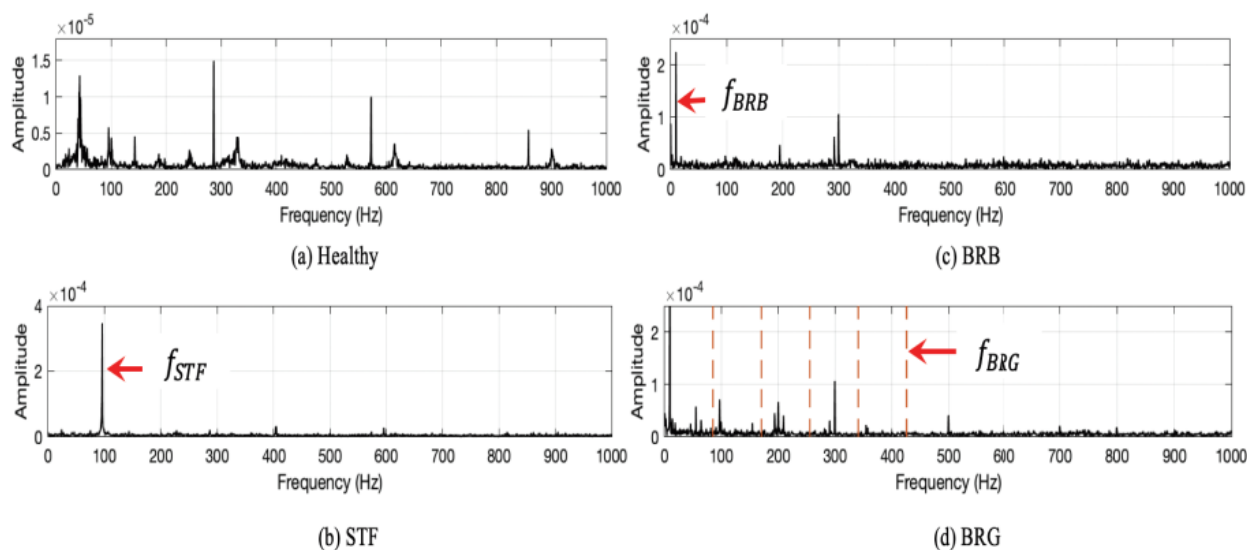
В испытаниях использовался трёхфазный четырёхполюсный двигатель 1.1 кВт с номинальной частотой вращения 1420 об/мин. При испытаниях частота вращения двигателя варьировалась от 500 до 1400 об/мин, нагрузка от 0 до 90%. Данные записывались интервалами по 3 секунды.

При испытаниях на двигателе создавались дефекты как показано ниже.



Создаваемые при испытаниях дефекты: а) короткозамкнутые витки, замыкание 10% обмотки одной из фаз, б) повреждение стержней, высверливание отверстий в роторе, с) дефект внешнего кольца подшипника, высверливание отверстий во внешнем кольце подшипника

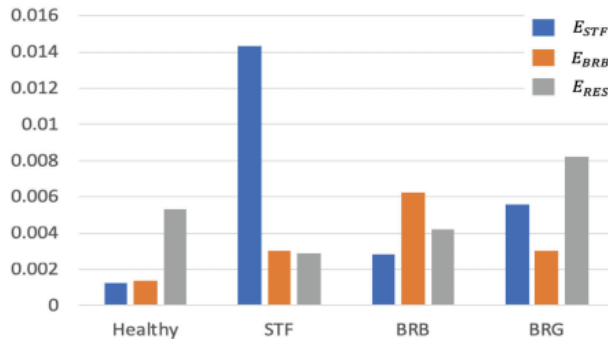
Спектры расширенного вектора Парка, полученные при бездефектной работе и каждом из трёх дефектов, показаны ниже. Дополнительно отмечены характерные гармоники дефектов.



Спектры расширенного вектора Парка: а) бездефектный режим, б) короткозамкнуты витки, с) дефект стержней, д) дефект подшипника

Вид спектра при бездефектном режиме, при замкнутых витках и повреждении стержней, соответствует ключевым характеристикам. При обоих типах дефектов частоты увеличенных гармоник совпадали с ожидаемыми. При дефекте подшипников возрастание ключевых гармоник не наблюдалось, но на наличие дефекта указывал общий высокий уровень спектральной энергии. Из-за этого исследователи приняли решение использовать остаточную спектральную энергию ERES (общая спектральная энергия за вычетом энергий, соответствующих наличию замкнутых витков и повреждению стержней) в качестве индикатора повреждения подшипников EBRG.

Уровни полученных таким образом индикаторов, основанных на отраслевых знаниях, при разных режимах работы двигателя, показаны ниже.



Уровни диагностических индикаторов при разных режима, слева направо: бездефектный, замкнутые витки, повреждение стержней, дефект подшипника

Диагностику первых двух дефектов с хорошей точностью можно проводить по соответствующим им индикаторам, которые показывают устойчивый рост при развитии дефектов. Однако в случае с дефектом подшипника развитие индикаторов происходит сложнее, что затрудняет диагностику. Для генерирования дополнительных диагностических индикаторов, которые смогли бы поднять точность диагностики, использовался автоэнкодер.

Набор записанных данных был разделён на обучающую и тестовую выборки. Результат проверки точности метода в виде матрицы ошибок показан ниже.

Healthy	350	0	0	0	100%	0%
STF	0	300	0	0	100%	0%
BRB	0	0	392	8	98%	2%
BRG	0	0	13	557	97.7%	3.3%
					98.9%	
	Healthy	STF	BRB	BRG	TPR (%)	FNR (%)

Матрица ошибок метода. Значения в диагонали соответствуют количеству правильно классифицированных дефектов

В заключении исследования указывается, что, несмотря на высокую точность классификации, метод был протестирован в лаборатории только на 4 двигателях одного типа. Дальнейшая работа авторов будет направлена на испытаниях метода на большей выборке двигателей. Дополнительным недостатком реализации является выбор структуры автоэнкодера, который был сделан методом проб и ошибок. В ходе дальнейшей работы также будут исследованы методы более обоснованного подхода к выбору архитектуры автоэнкодера.

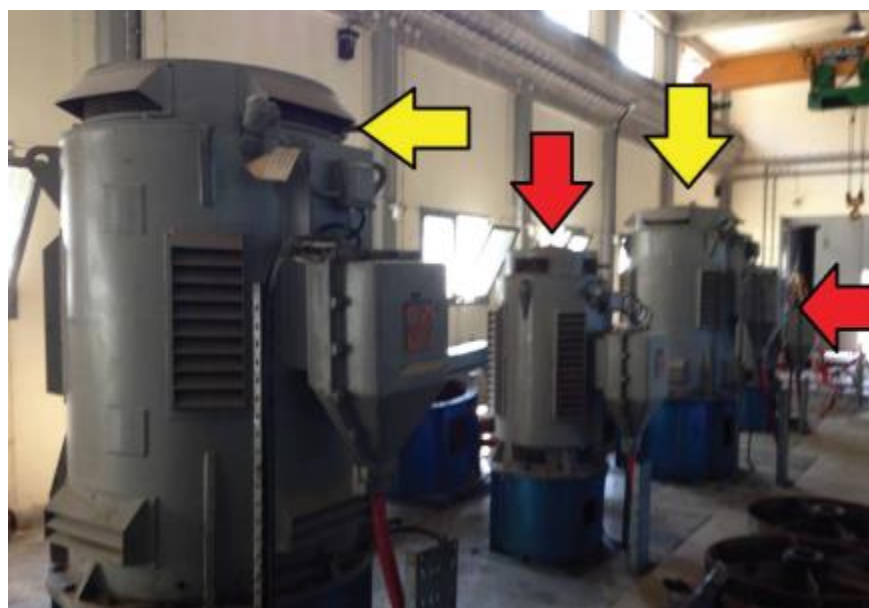
Опыт диагностики асинхронных двигателей 6 кВ при помощи мониторинга магнитного потока и сигнатурного анализа тока

Источник: K. N. Gyftakis, P. A. Panagiotou and D. Spyarakis, "Recent Experiences with MCSA and Flux Condition Monitoring of Mechanical Faults in 6kV Induction Motors for Water Pumping Applications," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 214-219, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864923.

https://www.researchgate.net/publication/336562249_Recent_Experiences_with_MCSA_and_Flux_Condition_Monitoring_of_Mechanical_Faults_in_6kV_Induction_Motors_for_Water_Pumping_Applications

На прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives группа исследователей из Греции поделилась собственным опытом анализа состояния асинхронных двигателей 6 кВ при помощи мониторинга магнитного потока и сигнатурного анализа тока.

Двигатели установлены на ГЭС Пигаи Аоос и приводят в движение насосы, поднимающие воду в основной бассейн ГЭС. На станции эксплуатируются несколько видов двигателей мощностью 240 кВт и 750 кВт. Двигатели показаны на изображении ниже.



Двигатели насосов ГЭС Пигаи Аоос, красным помечены двигатели 240 кВт, жёлтым – 750 кВт

Исследование проводилось на двух двигателях 750 кВт. На кабели питания двигателей были установлены датчики тока с разъёмным сердечником, на корпуса двигателей были установлены накладные датчики магнитного потока. На каждом двигателе размещались два датчика: в верхней и нижней части.

Вид установленных датчиков показан ниже.

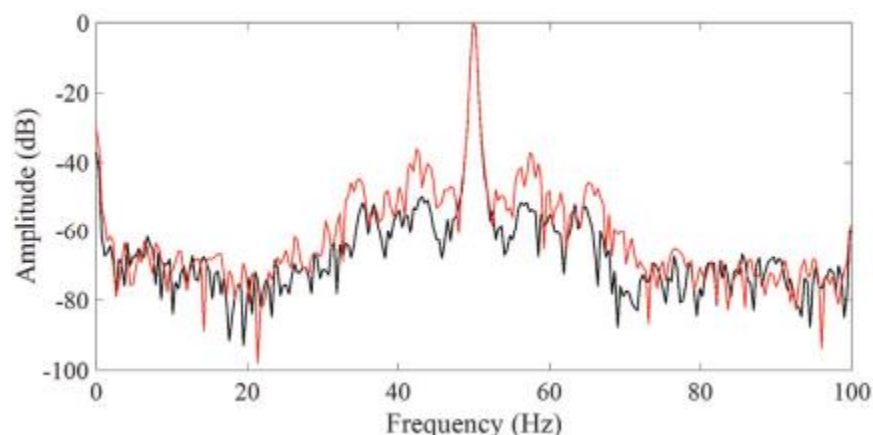


Установленные датчик: слева – датчики тока, справа – датчики магнитного потока

Сигналы датчиков обрабатывались при помощи 8-канального осциллографа PicoScope 4824 с частотным диапазоном 20 МГц.

В методологии исследования сначала проводилась оценка состояния по току двигателей, затем по магнитному потоку. Для подтверждения результатов оценки состояния двумя методами затем была проведена оценка состояния одного из двигателей по уровню вибрации.

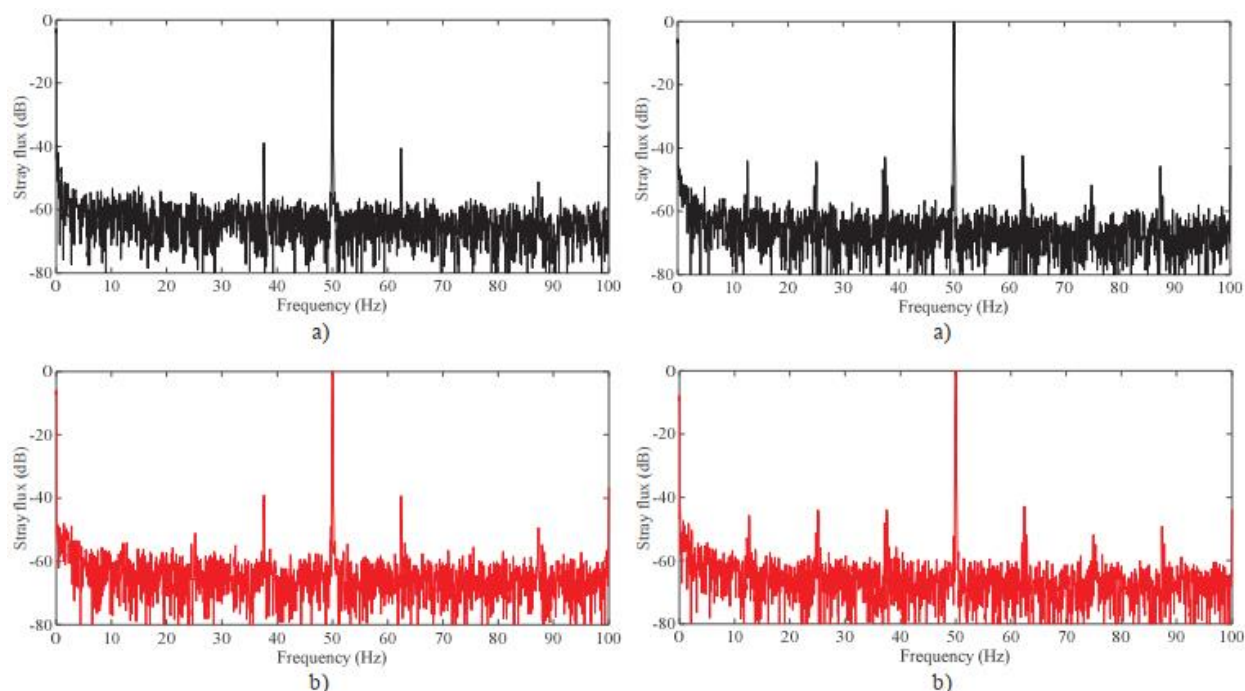
Зарегистрированные спектры токов двух двигателей показаны ниже.



Спектры токов двух двигателей

Для одного из двигателей было характерно наличие сильных боковых гармоник с шагом примерно 7,5 ГГц от фундаментальной частоты вращения. Учитывая вертикальную установку двигателя, такая картина характерна для дефектов механической природы, например неисправности тел вращения подшипников или асимметрии механической нагрузки насоса.

Спектры магнитного потока двигателей показаны ниже.



Магнитный поток двигателей: слева и справа – разные двигатели, сверху и снизу – нижний и верхний датчики

Для двигателя с боковыми гармониками в спектре тока (справа на изображении выше) характерен набор повышенных гармоник, соответствующих асимметрии ротора. Вместе с этим, доминирующие гармоники спектра магнитного потока не совпадают с доминирующими гармониками спектра тока.

Исследование вибрации двигателя с повышенными гармониками в спектрах тока и магнитного потока было проведено при помощи датчика Bently Nevada 9200 и осциллографа ТК81. В результате вибродиагностики было определено повреждение рабочего колеса насоса и наличие расцентровки осей двигателя и насоса, которое, в свою очередь, вызвало повреждение двигателей насоса.

В заключении доклада авторы указывают, что и сигнатурный анализ тока, и анализ магнитного потока, являются действующими и действенными методами диагностики вращающихся машин. Оба метода могут говорить о развитии разных видов дефектов, для повышения точности диагностики их результаты должны дополнять друг друга.

Метод мониторинга и предотвращения обледенения линий электропередач

Источник: W. Troppauer, V. Lovrenčić, N. Gubelj, B. Nemeth, M. Kovač, G. Gocsei "Advanced monitoring of icing and prevention against icing on overhead power lines", *Proceedings of International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, Reykjavík, June 23 – 28, 2019*

https://iwais2019.is/images/Papers/006_Advanced_monitoring_of_icing_TROPPAUER_et_al_IWAIS_template_30-4-19.pdf

Группа исследователей из Словении и Венгрии разработала метод мониторинга и предотвращения обледенения линий электропередач. Доклад группы был представлен на International Workshop on Atmospheric Icing of Structures в июне 2019 года.

Система мониторинга параметров линий электропередач типа [OTLM SMART](#) уже была разработана и эксплуатировалась в ряде европейских стран. Однако масштабные отключения в энергосистеме Словении в 2014 году в результате ледяного дождя показали потребность в доработке функционала системы. Некоторые фотографии последствий ледяного дождя в Словении показаны ниже.



Последствия ледяного дождя в Словении

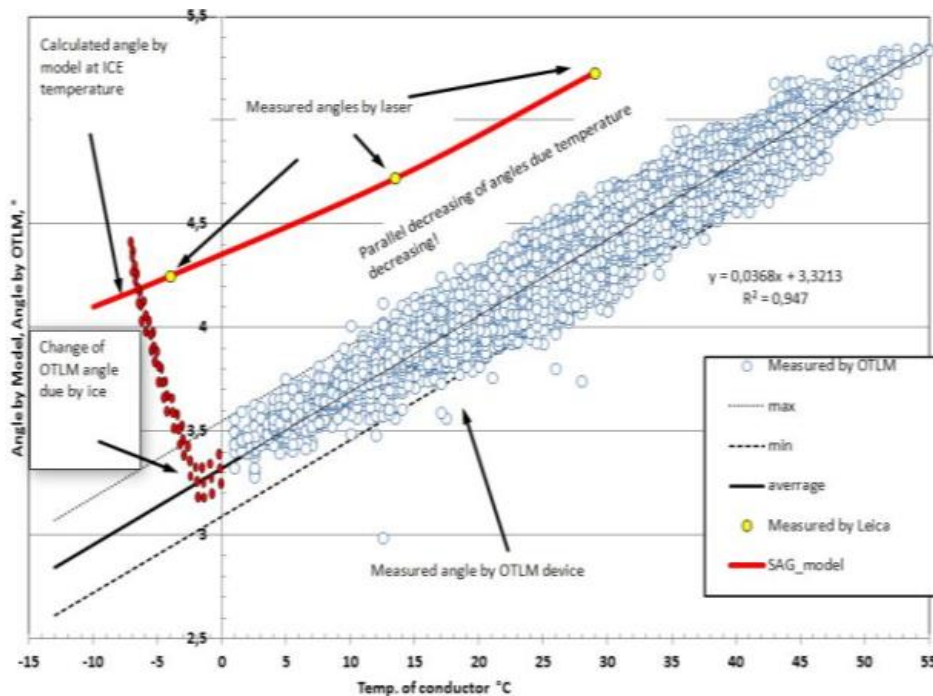
Одной из внедрённых в систему доработок стало использование камер, встроенных в датчики линии, показанные ниже.



Датчик линии

Ещё одним дополнением к системе стал разработанный в Будапештском университете технологии и экономики алгоритм, определяющий тип отложений, образующихся на линии при заданных температуре воздуха, типе и интенсивности осадков, относительной влажности и температуре кабеля. Отложения могут быть четырёх типов: мокрый снег, смесь мокрого снега и ледяного налёта, ледяной налёт, твёрдая корка льда. Данные о типе отложений затем использовались для расчёта диаметра отложения и дополнительной механической нагрузки на линию.

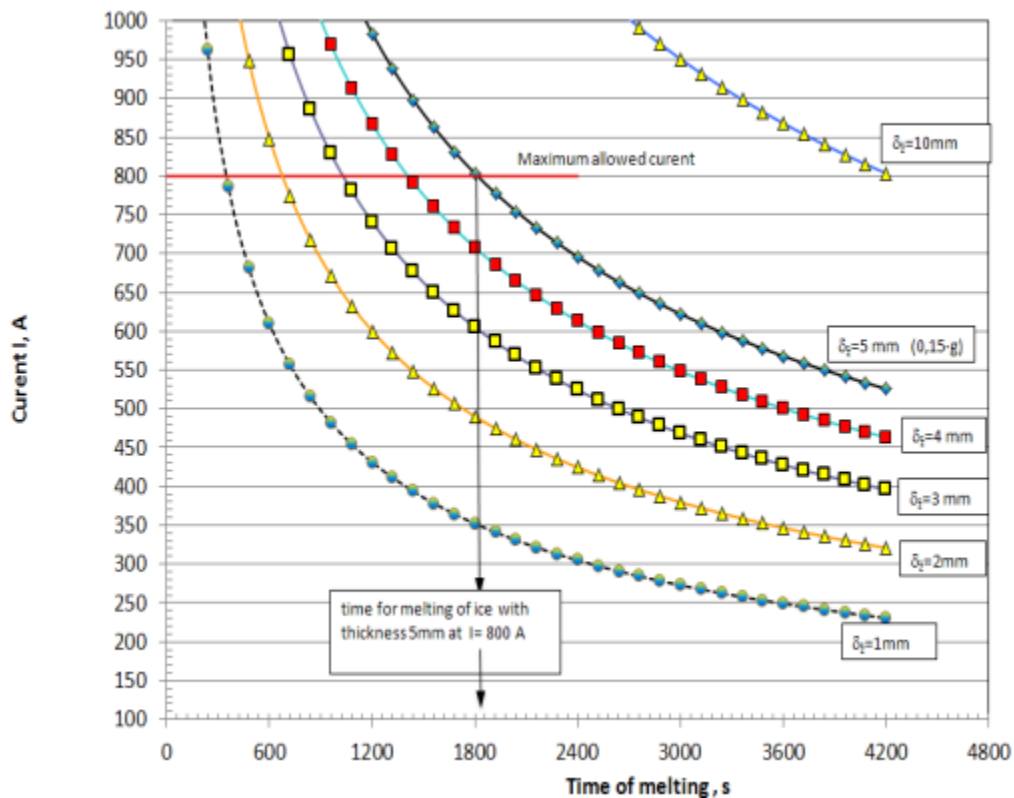
Помимо этого, были разработаны математические модели определения провиса линии по температуре, свойствам проводника и условиям установки. Пример результата выполнения модели показан ниже.



Результат выполнения модели

В графике выше белыми точками показаны фактически зарегистрированные углы наклона датчика в зависимости от температуры, красными – ожидаемое предсказанное изменение угла наклона при обледенении.

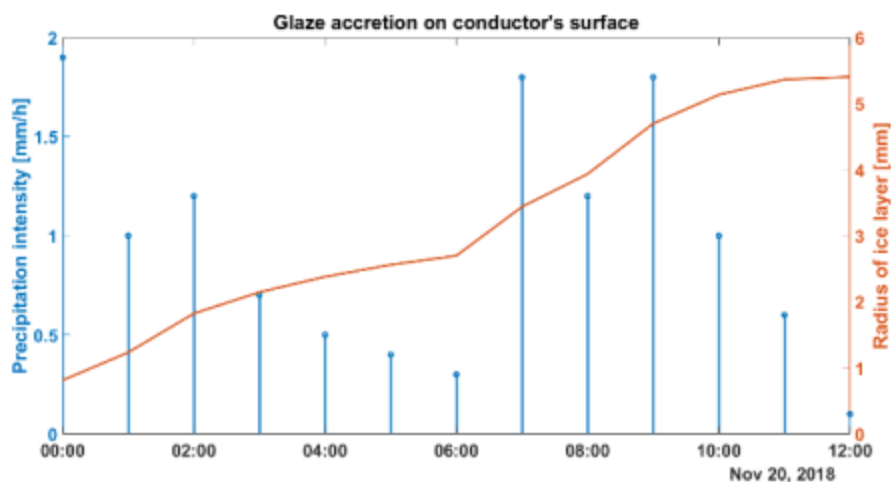
При обнаружении обледенения алгоритм сигнализирует оператору о проблеме и определяет рекомендуемый уровень тока, до которого нужно увеличить ток линии чтобы вызвать плавку ледяного отложения на линии. Используемые в алгоритме зависимости тока линии, времени расплавления и толщины отложения показаны на изображении ниже.



Зависимость тока линии, времени плавки и толщины отложения

Разработанные модели были внедрены в составе системы OTLM SMART. Система прогнозировала развитие обледенения линий и рассчитывала радиус ледяного отложения и механическое напряжение в линии. При превышении уставок по этим параметрам срабатывала сигнализация и оператор мог поднять ток линии чтобы вызвать плавление. Камеры, встроенные в датчики линии, наглядно показывали её состояние.

Результат работы системы на линии 110 кВ с кабелем ACSR 240/40 мм² показаны ниже. В течение дня 20 ноября 2018 года выпало большое количество осадков, которые привели к обледенению. График интенсивности осадкообразования и радиус ледяного отложения в течение дня показан ниже.



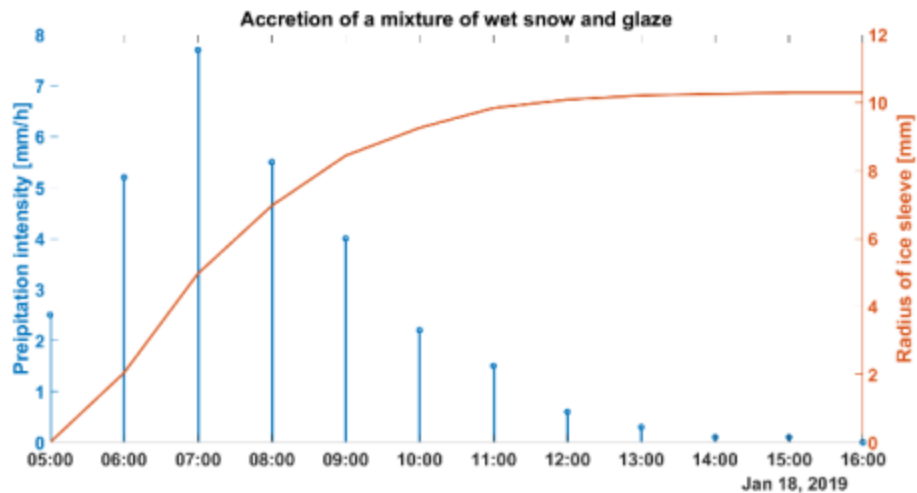
Интенсивность осадков и радиус обледенения

Модель предсказала образование влажного снега толщиной от 5 до 6 мм и ледяного налёта толщиной от 10 до 14 мм. Данные подтвердились изображением с камер, на котором определяется небольшой слой льда в нижней части кабеля как показано ниже.



Изображение с камеры

Другой случай был зарегистрирован 18 января 2019 года. График интенсивности осадков и радиуса ледяного отложения показан ниже.



Интенсивность осадков и радиус обледенения

Система предсказала образование смеси влажного снега и ледяного налёта толщиной от 9 до 12 мм. Снимок с камеры показан ниже. Несмотря на то, что большую часть обзора камеры закрыл пласт снега, наличие обледенения линии идентифицируется.

В заключении статьи указывается, что результаты эксплуатации системы признаны успешными. Внедрение системы повысит надёжность эксплуатируемых магистральных сетей в Европе.

Определение ЧР в воздушных кабелях при помощи методов машинного обучения

Источник: Ming Dong, Jessie Sun, *Partial discharge detection on aerial covered conductors using time-series decomposition and long short-term memory network*, *Electric Power Systems Research*, Volume 184, 2020, 106318, ISSN 0378-7796

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779620301243>

Одной из разработок исследовательского центра ENET при Техническом университете Остравы в Чехии является устройство для измерения наведённого напряжения от электрического поля воздушного кабеля. По наведённому напряжению потенциально можно определять происходящие в линии ЧР, например, при касании линии ветками деревьев. Однако сигнал содержит большое количество помех и методы математической обработки сигнала для определения ЧР представляют сложность. В 2018 году ENET опубликовал большой набор маркированных данных, собранных при помощи устройства, чтобы все желающие могли попробовать разработать алгоритм для эффективного разделения шума от ЧР.

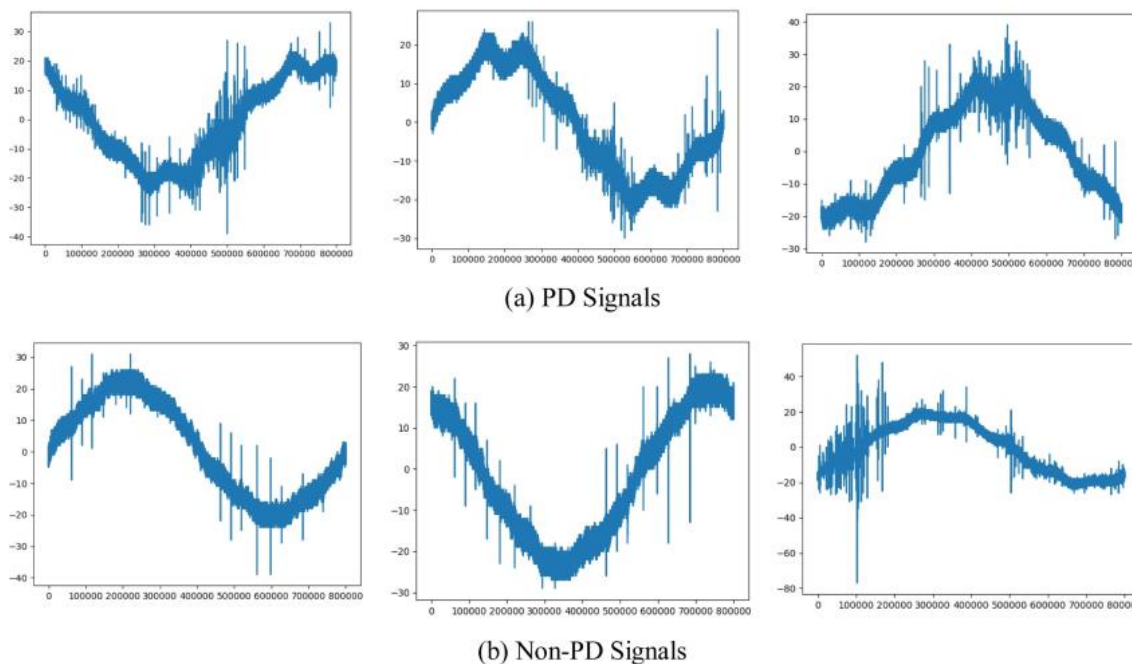
Специалисты канадских компаний ENMAX Power Corporation и Auroki Analytics решили эту задачу при помощи алгоритма, основанного на машинном обучении. Статья авторов была опубликована в издании *Electric Power Systems Research* в июле 2020 года.

Устройство, разработанное ENET, представляет собой проволочную катушку, наматываемую на кабель. Сигнал катушки затем проходит обработку в отдельном шкафу. Изображения катушки и шкафа показаны ниже.



Устройство, разработанное ENET

Набор данных, собранных ENET, представлял собой 8 711 записей. Каждая запись состояла из 800 000 точек одного периода напряжения 50 Гц. 8 186 записей были промаркированы как не относящиеся к ЧР, 525 относились к ЧР. Набор данных [был опубликован](#) на платформе Kaggle. Примеры нескольких записей из набора показаны ниже.



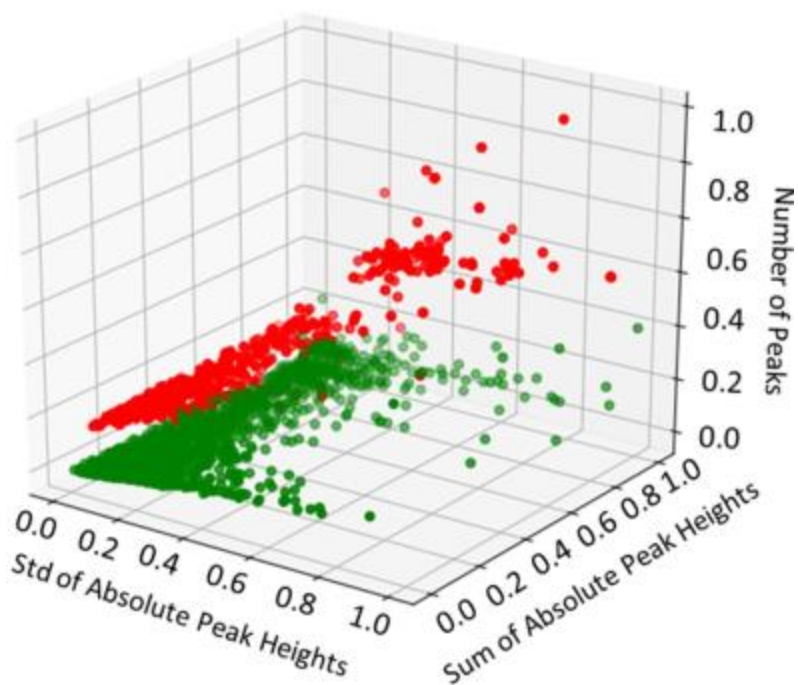
Примеры записей: сверху – ЧР, снизу – не ЧР

Разработанный авторами статьи алгоритм выполнялся в несколько этапов:

1. Разложение сигнала на компоненты тренда, сезонности и остаток. Компонент тренда отображает фундаментальные изменения сигнала, компонент сезонности – периодические изменения. Остаточный компонент отображает шумы и иррегулярности, содержащиеся в сигнале. Именно остаточный компонент содержит информацию о присутствии в сигнале импульсов ЧР.
2. Выделение характерных свойств остаточного компонента. В качестве свойств использовались общее число пиков осциллограммы, сумма модулей амплитуд пиков осциллограммы и среднеквадратичное отклонение сигнала.
3. Классификация записей по двум категориям (ЧР – не ЧР) при помощи нейронной сети.

Поскольку количество записей, не соответствующих ЧР, значительно превосходило количество записей, соответствующих ЧР, исследователи применили технику оверсэмплинга. Число записей, соответствующих ЧР, было многократно продублировано так, чтобы в общей выборке данных число записей ЧР было равно числу записей не ЧР и нейросетевой алгоритм не был подвержен предвзятости из-за перекаса в данных.

Пример результата работы алгоритма, построенный на 1000 случайно взятых записях, показан ниже. Все случаи классифицированы в трёхмерном пространстве признаков, выбранных исследователями. Случаи ЧР показаны красными точками, не ЧР – зелеными. Из распределения видно, что оба случая образуют отдельные кластеры данных, доступные для автоматической классификации.



Пример результатов алгоритма

Полученная в результате точность классификации составляла около 80%. Однако вместе с тем исследователи отмечают, что задача выделения ЧР из сигнала остаётся сложной для автоматического решения.

Диагностика оборудования по данным вибрации в условиях высокоэнергетических импульсных помех

Источник: Jacek Wodecki, Anna Michalak, Radosław Zimroz, Local damage detection based on vibration data analysis in the presence of Gaussian and heavy-tailed impulsive noise, Measurement, Volume 169, 2021, 108400, ISSN 0263-2241

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263224120309349>

Исследователи из Вроцлавского технологического университета разработали метода диагностики состояния оборудования по данным вибрации в условиях сильных ударных помех. Такие режимы работы характерны для горного дробильного оборудования, когда вибрации, вызванные ударами крупных кусков породы, сильно затрудняют традиционные методы вибродиагностики с определением характерных гармоник вибрации. Соответствующая статья запланирована к выпуску в издании Measurement в феврале 2021 года.

Метод, предложенный исследователями, состоит из следующих этапов:

- Преобразование данных. Построение спектра сигнала вибрации и формирование характерных свойств при помощи алгоритма β -HALS NMF (факторизация неотрицательной генерализованной иерархической матрицы чередующихся наименьших квадратов). Свойства представляются в виде двух матриц, базовой и кодирующей.
- Обработка свойств. Автоматическая классификация состояний оборудования по матрицам свойств при помощи алгоритма DBSCAN (пространственная кластеризация по плотности с учётом шума). После определения кластеров состояний, наборы свойств, принадлежащих каждому кластеру, выделяются в отдельные матрицы.
- Реконструкция сигнала из набора свойств. При помощи модели факторизации неотрицательной матрицы выполняется классификация спектра каждого состояния (дефектное, бездефектное, импульсный шум). Затем при помощи алгоритма Гриффина-Лима выполняется восстановление осциллограммы сигнала из спектра состояния.

Подробная схема алгоритма показана ниже.

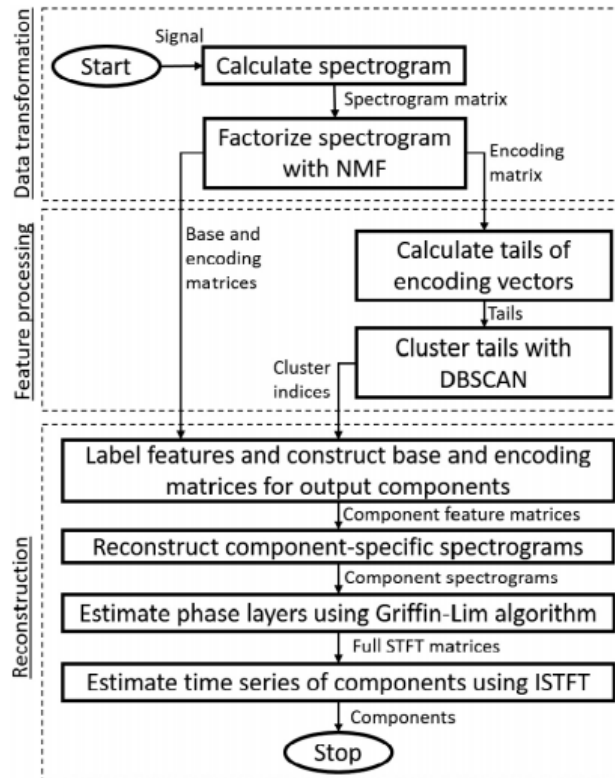
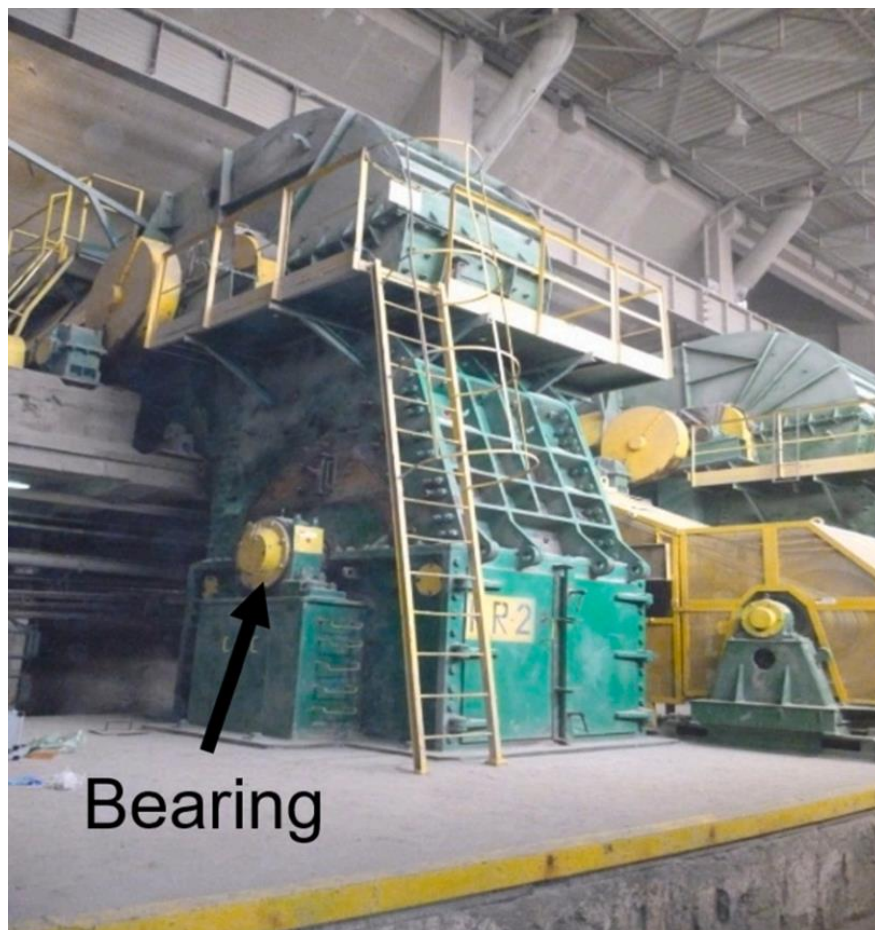


Схема алгоритма

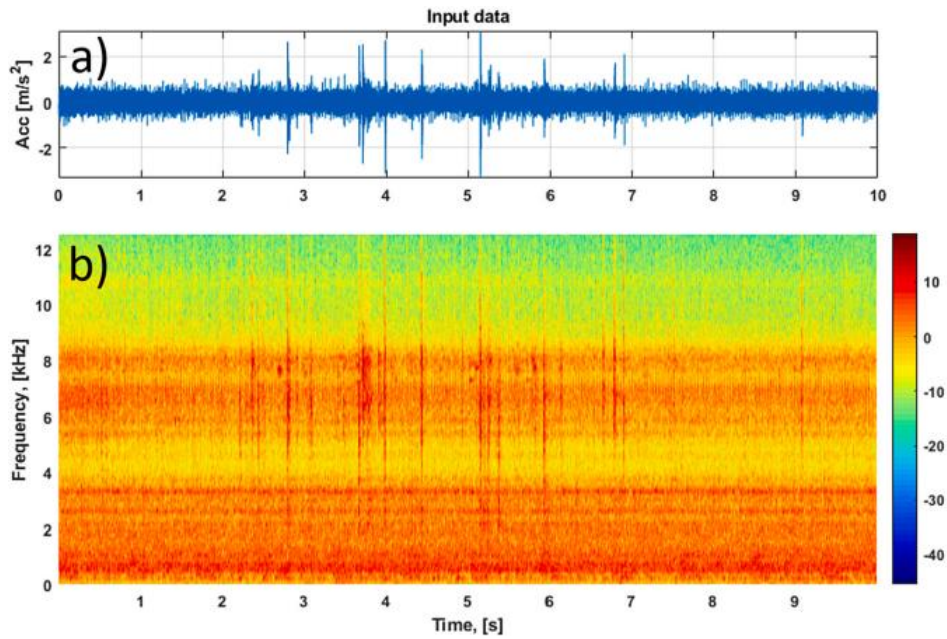
Работа алгоритма была проверена на действующей промышленной дробилке. Датчик был установлен на корпус подшипника вала дробилки. Вид дробилки показан ниже.



Дробилка

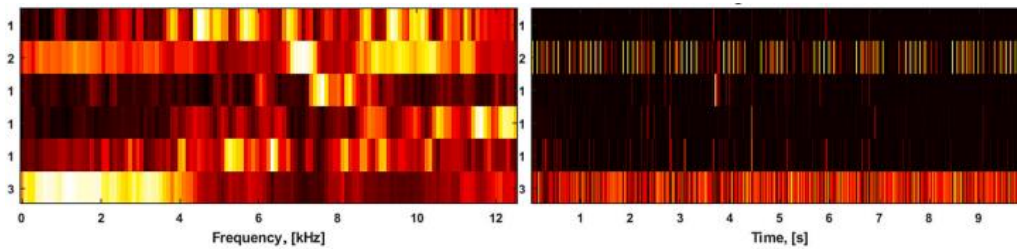
Испытания были проведены в двух режимах: в первом случае на осциллограмму вибрации искусственно накладывалась компонента вибрации, вызванная повреждением внутреннего кольца подшипника и имеющая известные характеристики для машин такого типа. Во втором случае модификация осциллограммы не производилась и алгоритм применялся к бездефектному режиму работы. В обоих случаях в осциллограмме присутствовали вибрации, вызванные ударами породы.

Осциллограмма и время-частотная развёртка сигнала вибрации для первого случая показана ниже.



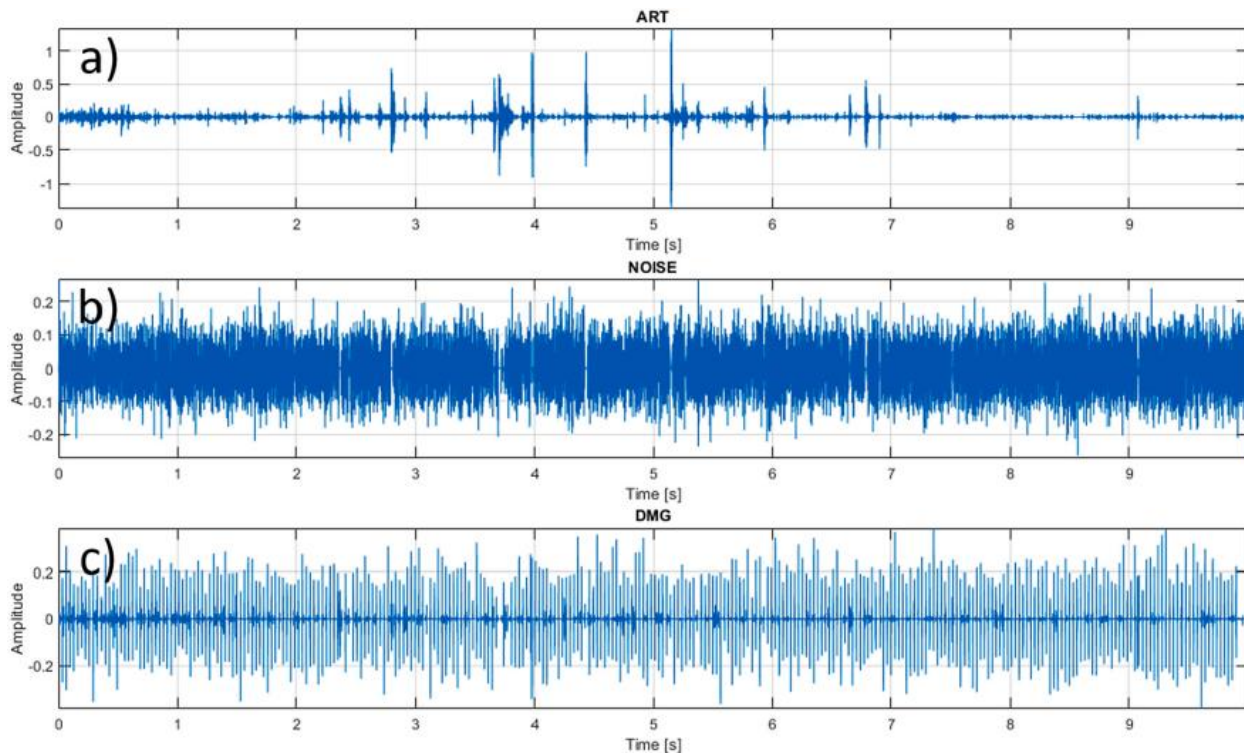
Осциллограмма и время-частотная развёртка сигнала вибрации

Цветовое представление базовой и кодирующей матриц свойств, полученных алгоритмом β -HALS NMF показано ниже.



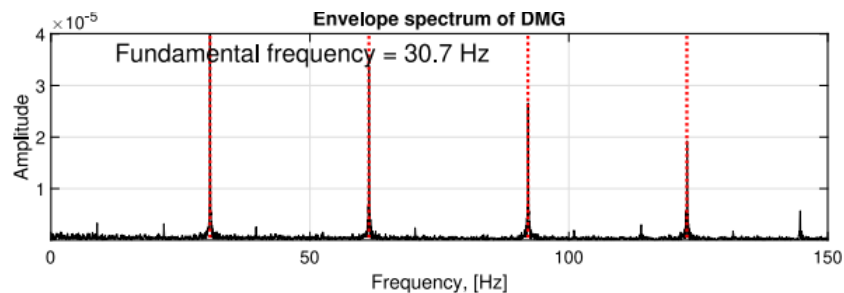
Базовая (слева) и кодирующая (справа) матрицы. Разные классы состояний машины показаны числами по вертикальной оси

После это было выполнено объединение элементов матриц свойств, принадлежащих одному классу состояния и восстановление осциллограммы каждого класса. Полученные осциллограммы трёх классов показаны ниже.



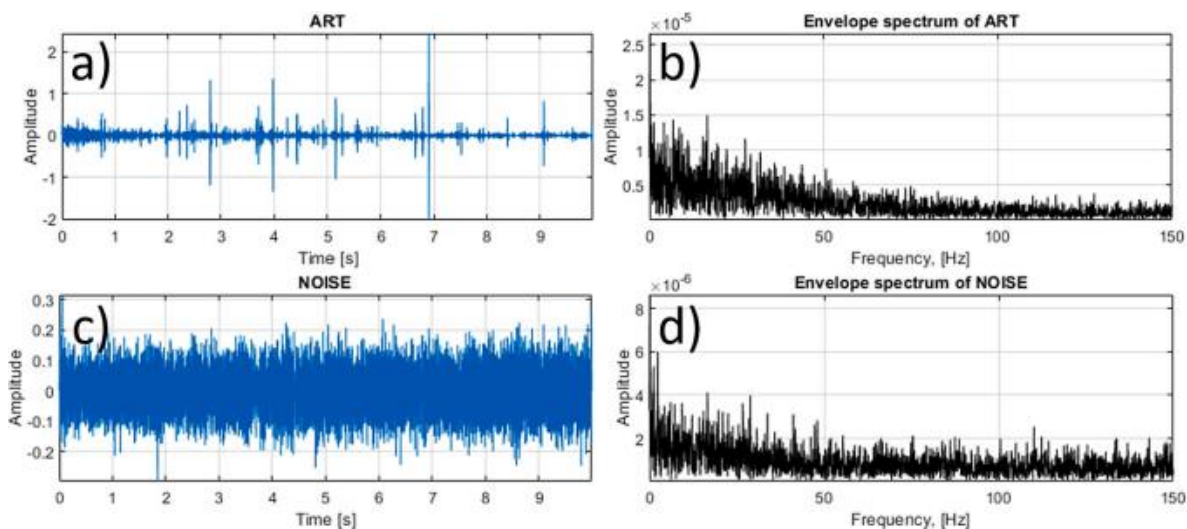
Осциллограммы классов состояний. Сверху вниз: ART – вызванные ударами породы, NOISE – шум сигнала, DMG – дефект

Спектр огибающей осциллограммы дефекта показан ниже. В спектре видна фундаментальная частота 30.7 Гц, соответствующая частоте ударов повреждённого тела качения по внутреннему кольцу подшипника.



Спектр огибающей осциллограммы дефекта

Во втором случае, при обработке данных вибрации без дефекта, полученные спектры огибающих сигналов вибрации от ударов породы и шума показаны ниже.



Спектры огибающих для бездефектного режима работы

В заключении статьи указано, что предложенный способ успешно решает рассмотренную задачу. Отдельное внимание в будущих работах стоит уделить вопросу выбора количества состояний машины, по которым выполняется классификация. В работе авторов выбор числа классов оставался единственным элементом, выполняемым вручную на основе собственного опыта авторов.