



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 21 октября 2020 года

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

1. [Определение дефектов обмотки трансформатора при помощи мониторинга вибрации](#)
2. [Опыт создания системы мониторинга частичных разрядов в силовом трансформаторе по данным, снимаемым с измерительного вывода](#)
3. [Практика анализа неисправностей силовых трансформаторов и перехода на обслуживание по состоянию](#)
4. [Метод локализации источника частичных разрядов с использованием данных радиочастотных антенн и методов машинного обучения](#)
5. [Мониторинг состояния центробежных насосов на основе измерения давления](#)
6. [Опыт разработки системы мониторинга частичных разрядов при помощи сети беспроводных датчиков](#)
7. [Применение распределённых оптических датчиков вибрации для контроля железнодорожных составов](#)
8. [Разработка монополюсной антенны для определения ЧР на основе структуры листьев растения](#)
9. [Исследование чувствительности метода анализа частотного отклика к разным типам дефектов](#)
10. [Опыт внедрения роботизированной системы мониторинга состояния кабельных линий](#)
11. [Применение метода сеточного поиска в сферических координатах для локализации источника ЧР на подстанциях](#)
12. [Реконструкция частотного отклика трансформатора по онлайн-данным, получаемым от измерительных выводов вводов трансформатора](#)
13. [IoT-система мониторинга состояния трансформатора](#)
14. [Система мониторинга асинхронных двигателей, использующая комбинированную технику](#)
15. [Опыт онлайн-мониторинга сети высоковольтных кабелей](#)
16. [Мониторинг состояния подшипников по расширенному набору гармоник с применением способа снижения размерности входных данных](#)
17. [Разработка цифрового двойника для мониторинга состояния электрических погружных насосов](#)
18. [Разработка системы мониторинга кабелей при помощи датчиков на основе катушек Роговского](#)
19. [Опыт разработки цифрового двойника гидрогенератора](#)
20. [Анализ разрядной активности ЧР в статорной обмотке 50-летнего гидрогенератора](#)
21. [Опыт разработки системы мониторинга гидрогенераторов по измерениям магнитного потока и вибрации](#)

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

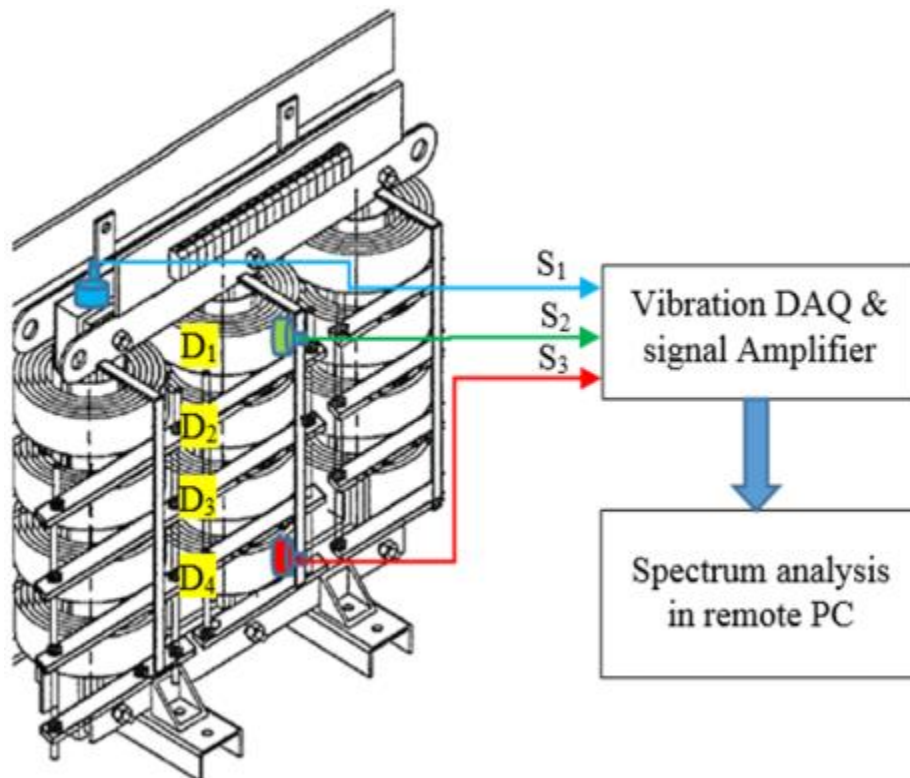
Определение дефектов обмотки трансформатора при помощи мониторинга вибрации

Источник: S. S. Manohar, A. Subramaniam, M. Bagheri, S. Nadarajan, A. k. Gupta and S. K. Panda, "Transformer Winding Fault Diagnosis by Vibration Monitoring," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CMD.2018.8535726.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535726>

В докладе, представленном на IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis в сентябре 2018 года, группа исследователей из Сингапура и Казахстана показала результаты исследования применимости мониторинга вибрации обмоток распределительного трансформатора для контроля дефектов обмоток.

Различные типы дефектов, электрические и механические, создавались на тестовом трансформаторе 415 В, 10 кВА, схематично показанном на изображении ниже.

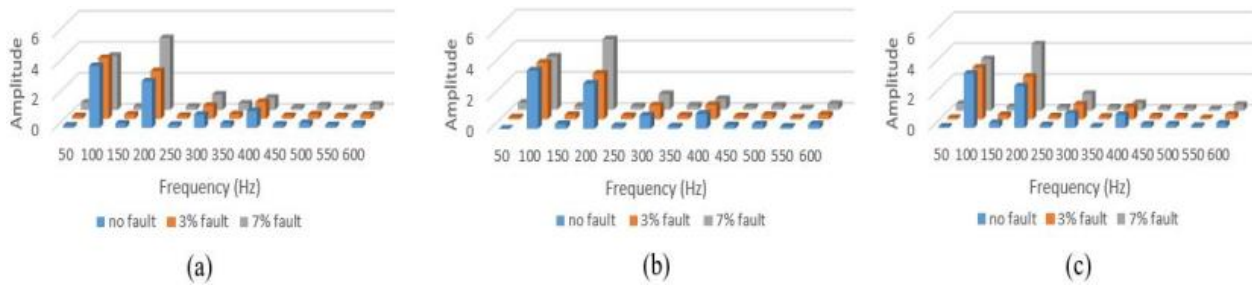


Схематичное изображение тестового трансформатора

Для создания электрических дефектов в обмотках были установлены съёмные перемычки на 1, 3, 7 и 15% обмотки. Для механических дефектов диски обмотки трансформатора можно было смещать в горизонтальном и вертикальном направлениях с точностью до 1 мм. Для контроля вибрации использовались три акселерометра, размещённые на магнитопроводе, бездефектном и дефектном диске обмотки. Сигналы вибрации записывались на частоте оцифровки 5 кГц. Трансформатор включался в работу в трёх режимах: без нагрузки, с 50 и 100% нагрузки.

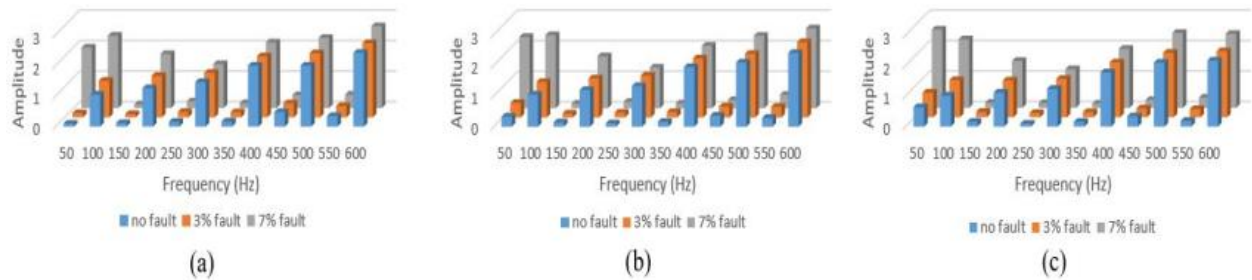
На изображении ниже показано распределение гармоник радиальных частотных компонент бездефектного диска для разного числа замкнутых витков обмотки. Из распределений видно, что

доминируют гармоники 100 и 200 Гц, амплитуда гармоники 200 Гц увеличивается с увеличением интенсивности дефекта.



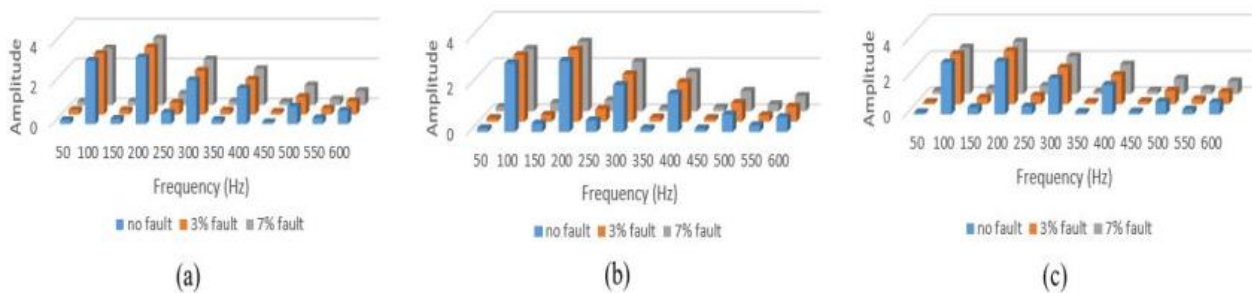
Вибрация бездефектного диска: а) без нагрузки, б) 50% нагрузки, с) 100% нагрузки

На изображении ниже показано распределение гармоник вибрации дефектного диска при аналогичных условиях работы. Видно появление кратных гармоник и общее увеличение уровня вибрации с увеличением интенсивности дефекта. Основным компонентом, растущим с интенсивностью дефекта, была гармоника 50 Гц.



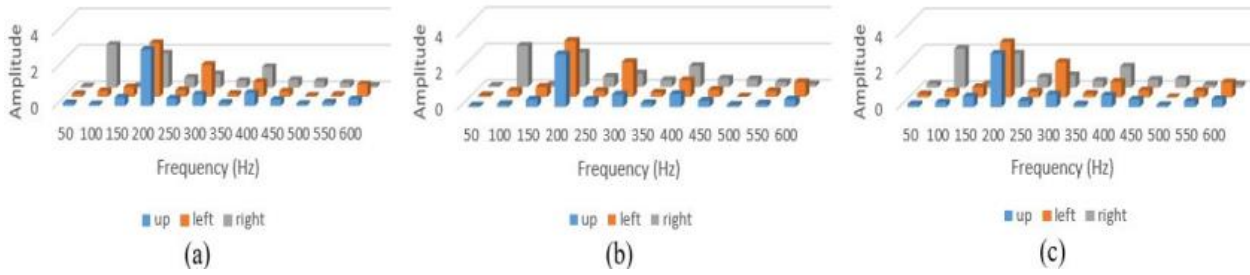
Вибрация дефектного диска: а) без нагрузки, б) 50% нагрузки, с) 100% нагрузки

На изображении ниже показано распределение гармоник вибрации магнитопровода. Из распределений видно, что доминируют гармоники, кратные удвоенной частоте сети. Но значимых изменений состава гармоник не происходит для разных уровней дефекта, что говорит о неприменимости мониторинга вибрации магнитопровода для контроля дефектов обмоток.

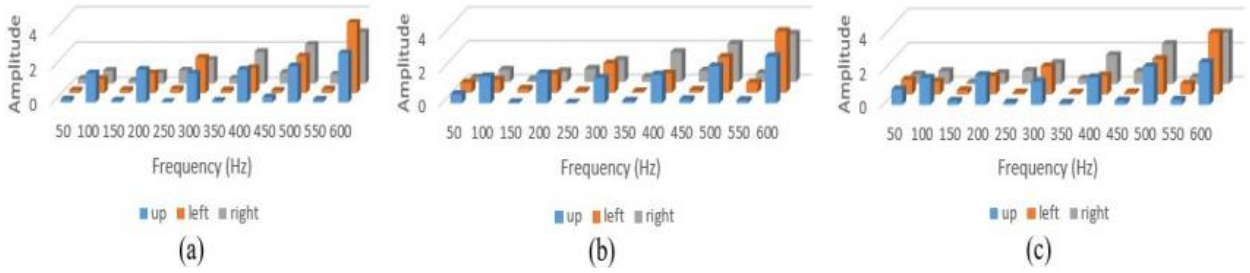


Вибрация магнитопровода: а) без нагрузки, б) 50% нагрузки, с) 100% нагрузки

На изображениях ниже показаны распределения гармоник вибрации бездефектного и дефектного диска для условий смещения дефектного диска на 1 см вверх, 1 см радиально вправо и 1 см радиально влево. Из распределений видно, что спектральный состав не зависит от нагрузки. При этом видно, что наличие дефекта оказывает влияния как на характеристики вибрации дефектного, так и бездефектного диска.



Вибрация бездефектного диска: а) без нагрузки, б) 50% нагрузки, в) 100% нагрузки



Вибрация дефектного диска: а) без нагрузки, б) 50% нагрузки, в) 100% нагрузки

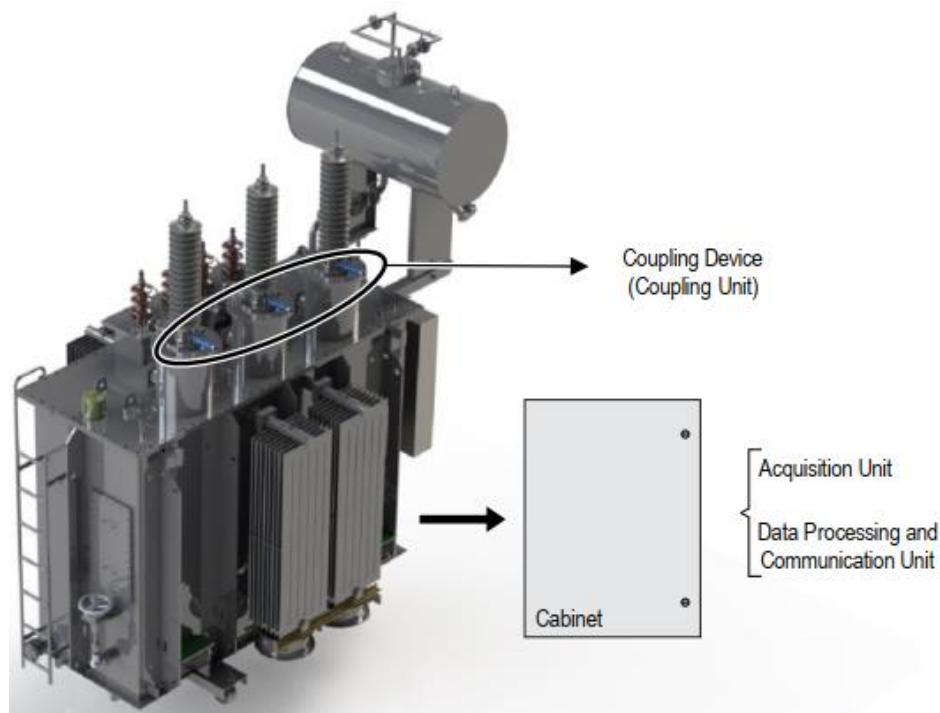
Опыт создания системы мониторинга частичных разрядов в силовом трансформаторе по данным, снимаемым с измерительного вывода

Источник: *Damião, L.; Guimarães, J.; Ferraz, G.; Bortoni, E.; Rossi, R.; Capelini, R.; Salustiano, R.; Tavares, E. Online Monitoring of Partial Discharges in Power Transformers Using Capacitive Coupling in the Tap of Condenser Bushings. Energies 2020, 13, 4351.*

<https://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4351>

Группа разработчиков из бразильской инженеринговой компании High Voltage Equipments и Федерального университета Итаюба, Бразилия, поделилась опытом разработки и запуска в эксплуатацию системы онлайн-мониторинга ЧР силового трансформатора при помощи датчика, устанавливаемого на измерительный вывод высоковольтного ввода. Соответствующая статья была опубликована в августе 2020 года в издании Energies.

Архитектура системы включала в себя три основных компонента: датчик ввода, модуль первичного сбора для приёма сигнала датчика, его оцифровки и передачи в модуль обработки для расчёта характеристик ЧР. Схематично структура системы показана на изображении ниже.



Структура системы

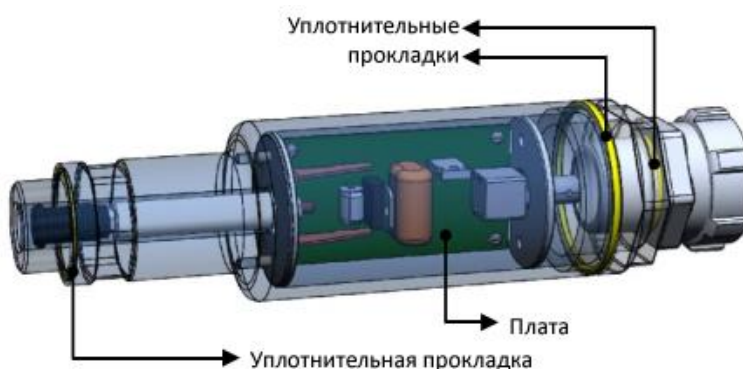
Специально разработанный в рамках проекта датчик вывода показан на изображении ниже.



Датчик вывода

Помимо требований к сбору сигнала с вывода, к датчику также предъявлялись требования по стойкости к вибрации, диапазону рабочих температур, которые в условиях работы в Бразилии могли достигать 50 градусов, а также защите от проникновения влаги через соединения датчика. Проникающая влага могла бы ухудшить изоляционные свойства ввода трансформатора и привести к дефекту.

Внутренняя структура датчика показана на изображении ниже. В датчике использовалась печатная плата с элементами преобразования сигнала и защиты от перенапряжений, а также уплотнительные резиновые прокладки, защищающие от влаги.



Внутренняя структура датчика

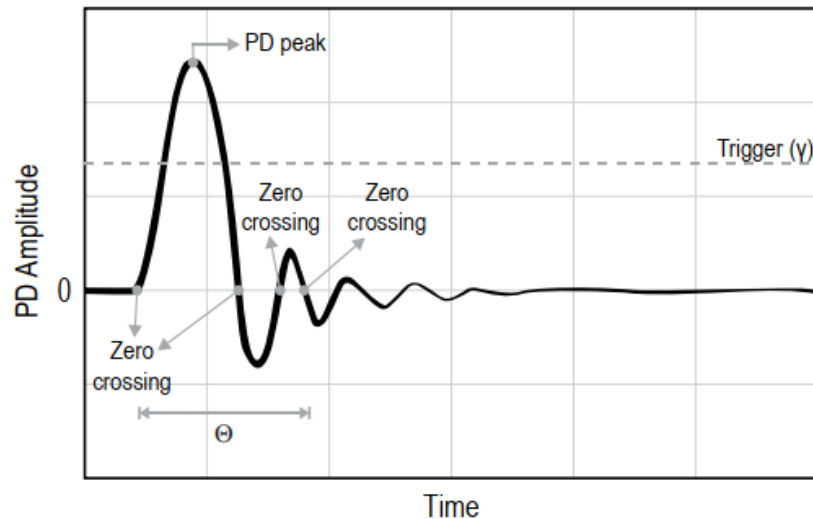
Применённая схема печатной платы позволяла проводить обработку сигналов частотами в диапазоне до 21,6 МГц, который включал в себя частоты ЧР, характерные для выбранного метода измерения.

Модуль первичного сбора работал по принципу трёхканального осциллографа для одновременной обработки сигналов с трёх вводов трансформатора. Частота оцифровки составляла 2.5 ГГц, ширина полосы обработки составляла 200 МГц, что делало возможным выполнять обработку сигнала датчика без потерь.

Модуль обработки состоял из промышленного компьютера и установленного на нём специально разработанного ПО. Модуль также обеспечивал связь и передачу данных по промышленной сети предприятия в диспетчерский пункт.

ПО было реализовано на языке Python и производило расчёт характеристик ЧР по значениям, полученным от датчика вывода и обработанным в модуле первичной обработки. Обработка заключалась в выделении частотного диапазона, характерного для ЧР, при помощи

фильтра Баттерворта. На этом этапе большинство помех, имеющих в сигнале, исключались благодаря тому, что частотный диапазон ЧР, как правило, отличается от диапазона помех. После фильтрации выполнялся анализ осциллограммы сигнала. Определялся уровень уставки (триггер), при превышении которого уровнем сигнала определялось событие ЧР. Уровень был адаптивным и зависел от среднего уровня сигнала датчика. Каждое событие ЧР определялось между двумя последовательными пересечениями сигналом нуля, что позволило исключить определение множественных импульсов ЧР по фактически одному записанному импульсу. Схема работы логики определения ЧР показана на рисунке ниже.



Определение импульсов ЧР

На основании записанных амплитуд импульсов ЧР рассчитывались соответствующим образом и кажущиеся заряды в пикокулонах в соответствии с МЭК 60270.

После сборки системы были проведены заводские испытания, основными этапами которых были:

- убедиться в правильности и точности определения характеристик ЧР;
- убедиться в том, что установка системы не будет приводить к ухудшению изоляционных свойств ввода трансформатора;
- проверить устойчивость системы к электромагнитным помехам, характерным для работающего силового трансформатора.

Общий вид испытательной установки и вид установленного датчика показаны на изображениях ниже.



(a)



(b)

Испытательная установка и датчика

Результаты испытаний показали соответствие разработанной системы предъявляемым к ней требованиям.

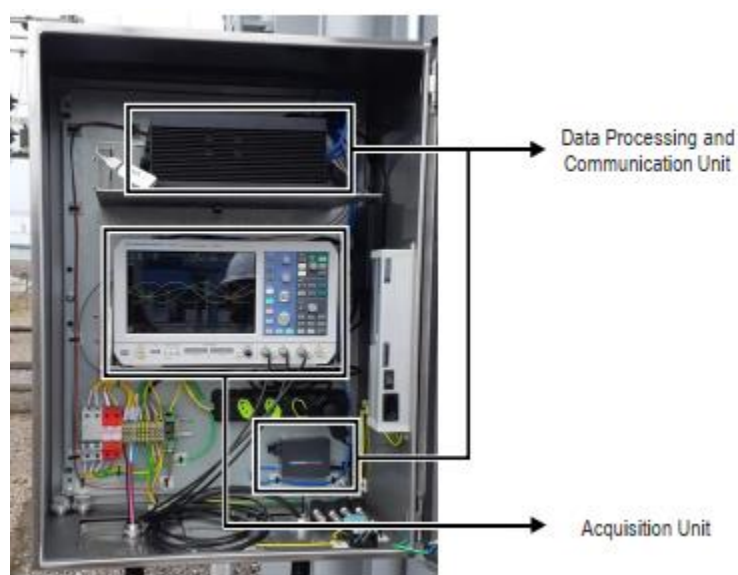
После этого системы была установлена на нескольких предприятиях, как показано на изображениях ниже.



Система, установленная на трансформаторе 30 MVA



Датчик, установленный на вводе

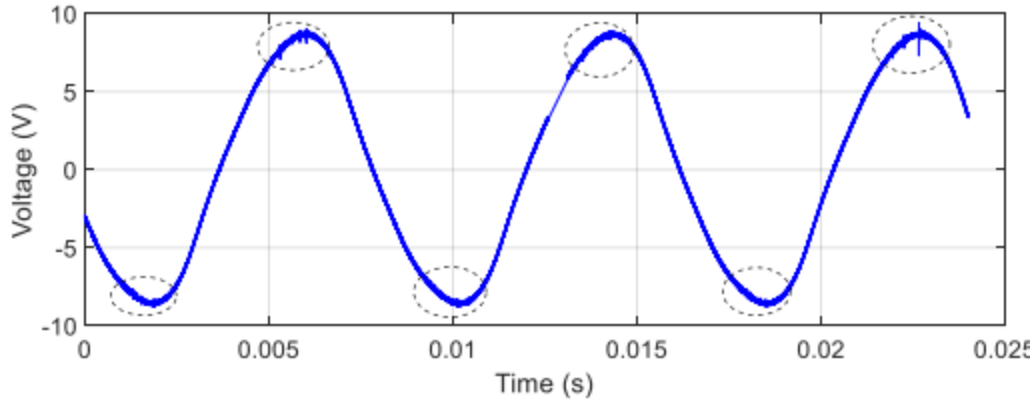


Модули первичного сбора и обработки сигнала

Несколько кейсов из работы системы описаны ниже.

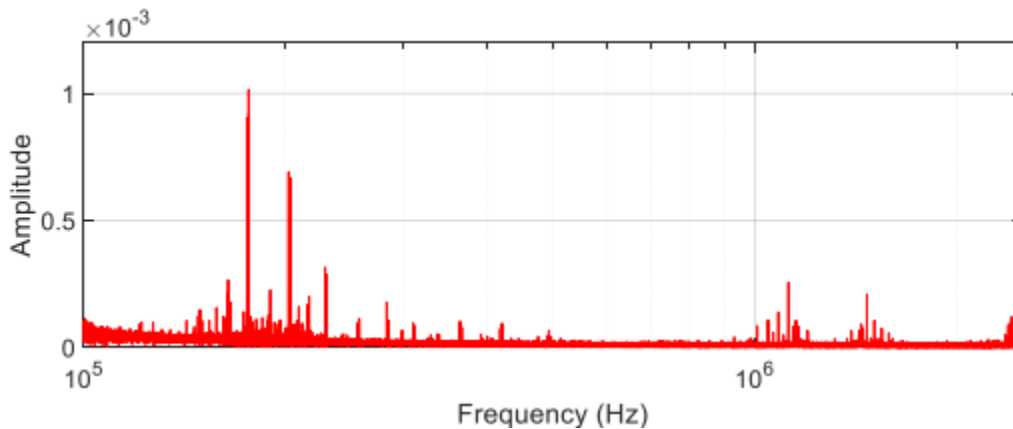
Кейс 1

На одном из трансформаторов система фиксировала повторяющиеся импульсы ЧР, которые происходили в моменты максимумов амплитуды синусоиды промышленной частоты 60 Гц (для Бразилии) как показано на изображении ниже.



Синусоида промышленной частоты с датчика, на которой отмечены моменты проявления активности ЧР

Частотный спектр записанных сигналов ЧР показан на рисунке ниже.



Спектр ЧР

В спектре видна повышенная активность в диапазонах 120-500 кГц, 0.9-1.5 МГц, 2.2-2.5 МГц. Зафиксированная картина ЧР соответствует развитию дефекта бумажной изоляции или образованию пузырьков в масле.

Кейс 2

Система была установлена на трансформаторе, на котором также был установлен прибор контроля газосодержания. Результаты измерения концентраций растворённых газов за три дня, в течение которых был зафиксирован их рост, показаны в таблице ниже.

| Gas | Concentration Dissolved in Oil (ppm) | | |
|--|--------------------------------------|--------|--------|
| | Day 1 | Day 2 | Day 3 |
| Hydrogen (H ₂) | 59 | 276 | 327 |
| Oxygen (O ₂) | 3980 | 9230 | 14,700 |
| Nitrogen (N ₂) | 15,650 | 60,140 | 52,620 |
| Methane (CH ₄) | 58 | 296 | 280 |
| Carbon monoxide (CO) | 100 | 258 | 256 |
| Carbon dioxide (CO ₂) | 972 | 2710 | 1756 |
| Ethylene (C ₂ H ₄) | 16 | 389 | 564 |
| Ethane (C ₂ H ₆) | 19 | 180 | 132 |
| Acetylene (C ₂ H ₂) | - | 4 | 6 |

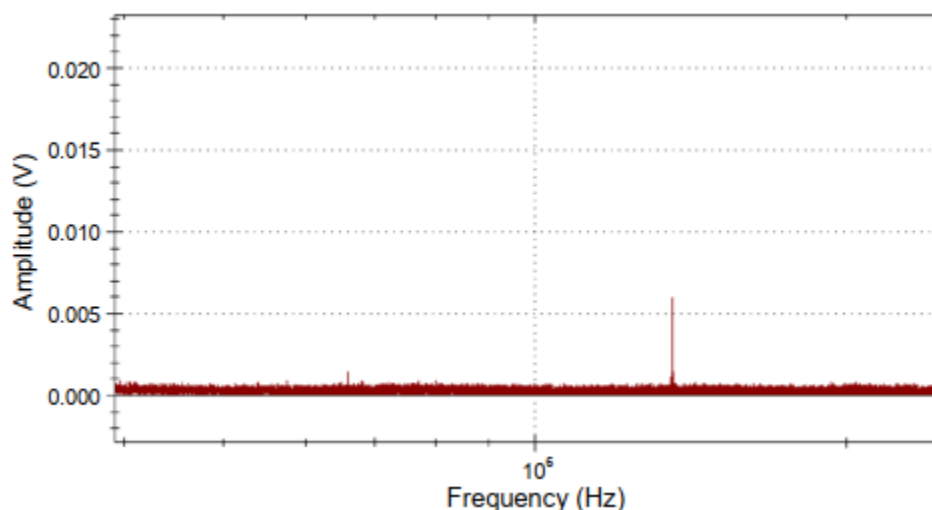
Изменение концентрация за три дня

Такое распределение концентрация соответствует развитию термического дефекта трансформатора. Результаты измерений активности ЧР в трёх вводах при помощи разработанной системы показаны в таблице ниже. Результаты даны по состоянию на третий день.

| HV Bushing | Maximum Positive PD (pC) | Maximum Negative PD (pC) | Number of PDs | Average Value of PDs (pC) |
|------------|--------------------------|--------------------------|---------------|---------------------------|
| Phase A | 2164.50 | -2811.39 | 1758 | 950.89 |
| Phase B | 74.25 | -82.20 | 594 | 39.83 |
| Phase C | 8664.31 | -8721.35 | 1606 | 4294.83 |

Результаты измерения характеристик ЧР: максимальный положительный и отрицательный кажущиеся заряды, количество ЧР, средняя величина кажущегося заряда

Видна существенная разница между уровнем активности на фазе В и фазах А и С, что указывает на наличие дефекта в трансформаторе. На изображении ниже показан фрагмент частотного спектра сигнала фазы С, на котором видна повышенная активность в районе частоты 1.5 МГц. Аналогичная активность была характерна для фазы В.



Фрагмент спектра ЧР фазы С

Таким образом, на наличие дефекта указывали как мониторинг растворённых газов, так и мониторинг ЧР. Было принято решение вывести трансформатор из работы и выполнить его обследование. Дефект был обнаружен в районе центральной точки звезды обмотки низкого напряжения как показано на изображении ниже.



Обнаруженный дефект обмотки НН

Практика анализа неисправностей силовых трансформаторов и перехода на обслуживание по состоянию

Источник: *Raji Murugan, Raju Ramasamy, Failure analysis of power transformer for effective maintenance planning in electric utilities, Engineering Failure Analysis, Volume 55, 2015, Pages 182-192, ISSN 1350-6307*

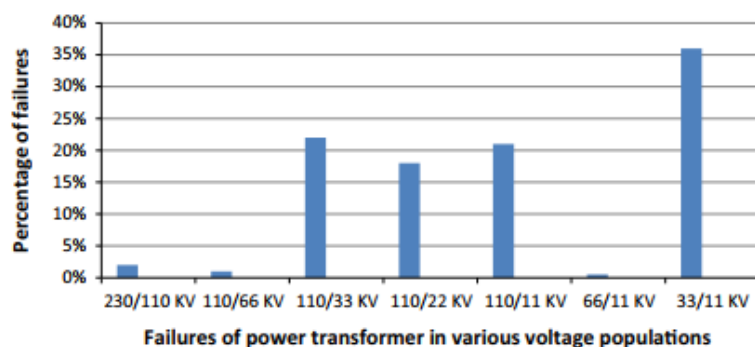
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630715001843>

Группа исследователей из Университета Анны в Индии провела исследование статистики неисправностей силовых трансформаторов двух электросетевых компаний штата Тамилнад в Индии. В ходе анализа также была рассмотрена действующая в компаниях практика обслуживания трансформаторов и была разработана методика более эффективного подхода к обслуживанию. Соответствующая статья была опубликована в июне 2015 года в издании *Engineering Failure Analysis*. Положения статьи актуальны и сейчас, поскольку подобные исследования создают прочный фундамент для принятия решения о выборе политики обслуживания электрических активов промышленного предприятия.

Данные для исследования включали в себя информацию о повреждениях трансформаторов электросетевых компаний TANTRANSCO и TANGEDCA, действующих в штате Тамилнад. Всего было исследовано 196 трансформаторов напряжением от 33 до 400 кВ и мощностью от 5 до 315 МВА. Собранные данные охватывали 5 лет, с 2009 по 2013.

Исследование включало в себя определение распределения количества повреждений по уровню напряжения, географической зоне установки и по неисправному компоненту.

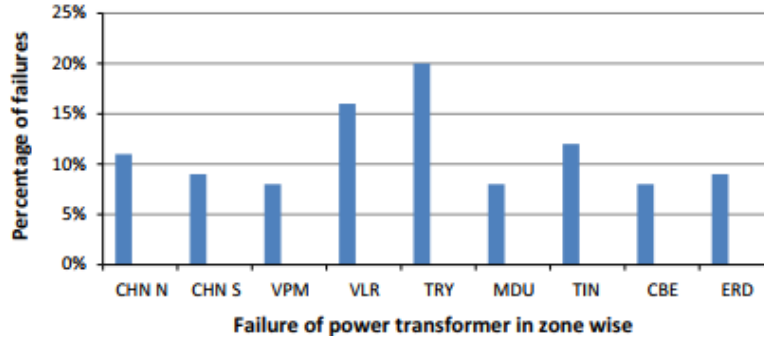
Распределение количества повреждений по уровню напряжения и годам показано ниже в виде гистограммы.



Распределение повреждений по уровню напряжения

Из распределения видно, что больше всего, 36% повреждений, происходило на трансформаторах 33/11 кВ, после чего 22% происходило на трансформаторах 110/33 кВ и 21% на трансформаторах 110/11 кВ. Информация о таком распределении способна помочь электросетевым компаниям при принятии решений о распределении запасных частей и ремонтного персонала.

Распределение повреждений по географическому региону штата Тамилнад показано ниже.



Распределение повреждений по географическому региону

Из распределения видно, что наибольшее число повреждений происходило в регионе города Тричинополи (TRY), на который приходилось 20% от общего числа. За ним следовали города Веллуру (VLR) и Тирунелвели (TIN), в которых происходило 16% и 12% повреждений соответственно.

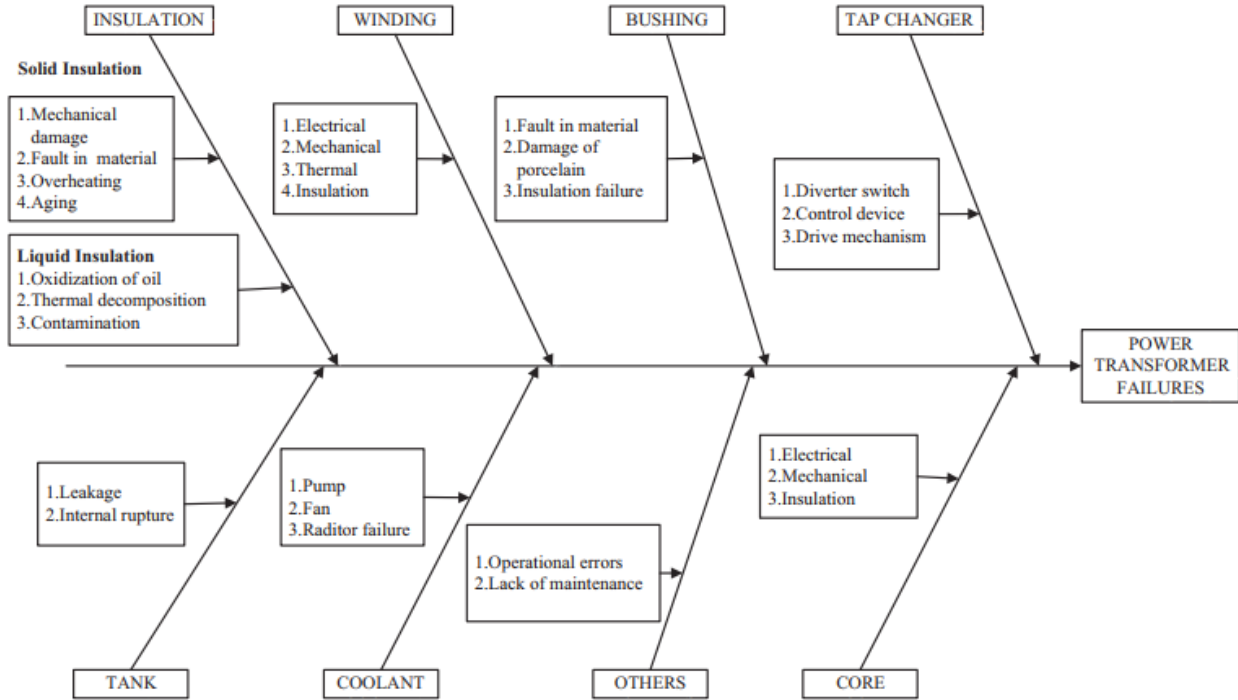
Распределение повреждений по дефектному компоненту трансформатора показано на изображении ниже.



Распределение повреждений по компонентам трансформатора

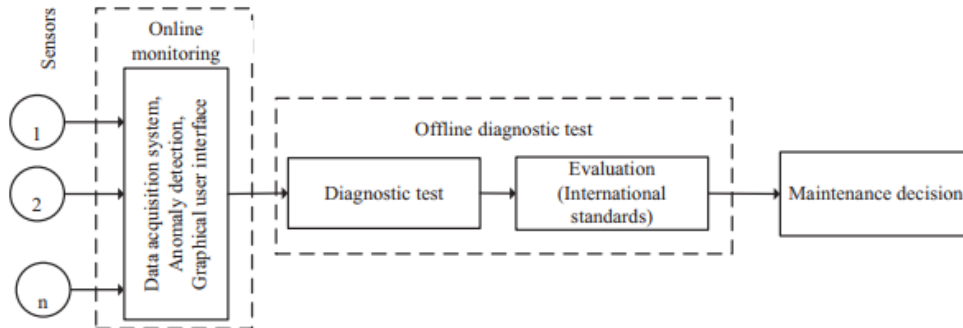
Видно, что чаще всего, в 41% случаев, неисправности трансформаторов были связаны с повреждением изоляции.

Обзор полной картины типов повреждений и их причин приведён на изображении ниже.



Типы повреждений трансформатора и их причины

После проведения статистического анализа был выполнен обзор текущей практики обслуживания активов в компаниях. Обслуживание выполнялось по времени каждую неделю. Для повышения качества управления и оптимизации ресурсов исследователями была предложена схема обслуживания оборудования по фактическому состоянию. Схема показана на изображении ниже.



Предложенная схема обслуживания активов по фактическому состоянию

В схеме в качестве первичных данных используются данные, получаемые системами онлайн-мониторинга состояния трансформаторов. Анализ онлайн-данных основывается на сравнении текущих значений параметров с их допустимыми значениями, рекомендуемыми отраслевыми стандартами, и на анализе трендов изменения параметров. При обнаружении отклонений от нормального режима работы на трансформаторе проводится оффлайн-тест для более глубокого понимания причины отклонения. На основании онлайн- и оффлайн-данных состояние трансформатора категоризируется по 4 типам, для каждого из которых существует свой сценарий проведения мероприятий по обслуживанию.

Метод локализации источника частичных разрядов с использованием данных радиочастотных антенн и методов машинного обучения

Источник: E. T. Iorkyase, C. Tachtatzis, P. Lazaridis, I. A. Glover and R. C. Atkinson, "Radio location of partial discharge sources: a support vector regression approach," in *IET Science, Measurement & Technology*, vol. 12, no. 2, pp. 230-236, 3 2018, doi: 10.1049/iet-smt.2017.0175.

<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-smt.2017.0175>

Исследователи из Университета Стратклайда и Университета Хаддерсфилда, Великобритания, предложили способ локализации источника частичных разрядов при помощи обработки данных радиочастотных антенн методами машинного обучения. Статья была опубликована в *IET Science, Measurement & Technology* в марте 2018 года.

Одной из главных задач предложенного способа локализации была простота установки и дешевизна.

В предложенной модели рассматривается двумерное пространство, в котором расположены источники ЧР в локациях с неизвестными координатами и набор радиочастотных антенн в локациях с известными координатами. Решаемая задача состояла в определении координат локаций источников ЧР по данным радиочастотных антенн. Для решения этой задачи исследователи использовали четыре алгоритма, основанных на машинном обучении:

- 1) Многослойный перцептрон (MLP);
- 2) Искусственная нейронная сеть радиально-базисных функций (RBFN);
- 3) Метод опорных векторов (SVR);
- 4) Линейная регрессия опорных векторов с использованием метода наименьших квадратов (LSSVR).

Схема использования каждого алгоритма состояла в предварительном его обучении на данных, активности ЧР, замеренных от источников ЧР, размещённых в известных локациях. Натренированные таким образом алгоритмы затем использовались для определения положения источников ЧР в неизвестных локациях по данным, записанным радиочастотными антеннами, которые использовались для сбора тренировочных данных.

Для проверки точности алгоритмов исследователи собрали тестовую установку, схема которой показана на рисунке ниже.

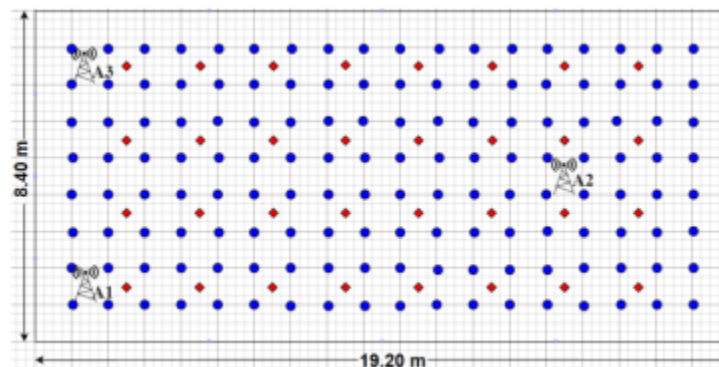
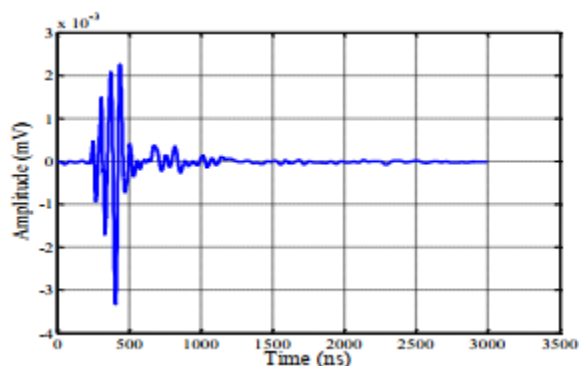


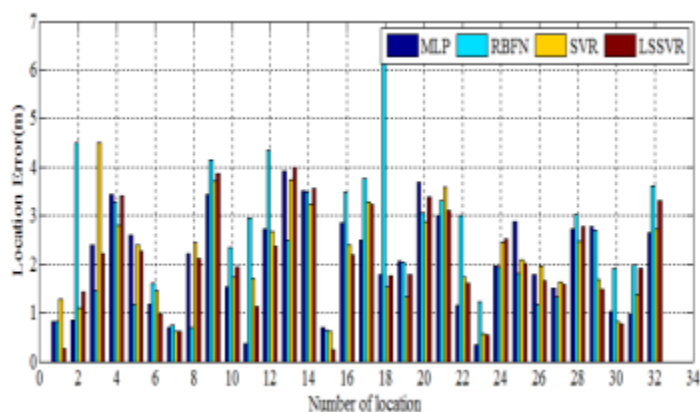
Схема тестовой установки

Установка представляла собой размеченные локации в испытательном помещении Университета Стратклайда. Размеры помещения составляли 8.4 x 19.2 м. В помещении были размечены 144 локации для сбора данных для обучения алгоритмов (синие точки) и 32 локации для испытания алгоритмов (красные точки). Расстояние между соседними точками для обучения было 1 м, между соседними точками для обучения и испытания 0.7 м. В каждой из точек обоих типов был размещён источник ЧР. Для каждого источника ЧР было выполнено 20 замеров характеристик ЧР при помощи трёх антенн. Таким образом, исследователи получили тренировочную выборку для алгоритмов из данных 2880 замеров и выборку для испытаний алгоритмов из 640 замеров. Данные с антенн снимались при помощи осциллографа с шириной диапазона 9 ГГц и частотой оцифровки 2 ГГц. Источник ЧР генерировал импульсы продолжительностью 20 пс и частотой следования 100 кГц. Пример осциллограммы единичного импульса ЧР, зарегистрированного антенной, показан на изображении ниже.



Осциллограмма записанного импульса

Результаты оценки точности локализации для каждой из 32 тестовых локаций, выполненной при помощи каждого алгоритма показаны на изображении ниже.



Оценка точности каждого алгоритма

В целом, лучшую точность показал метод LSSVR. Данный алгоритм давал ошибку локализации до 2.5 м в 72% случаев, что было лучше соответственно 69%, 54% и 60% для алгоритмов SVR, RBFN и MLP.

Мониторинг состояния центробежных насосов на основе измерения давления

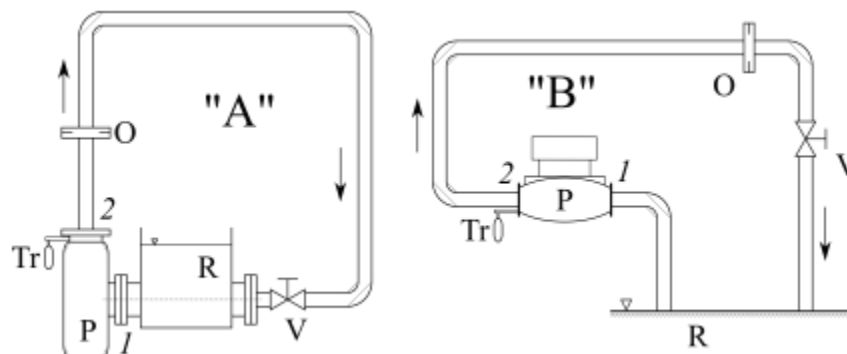
Источник: Kalmár, C., Hegedűs, F. "Condition Monitoring of Centrifugal Pumps Based on Pressure Measurements", *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering*, 63(2), pp. 80-90, 2019

<https://pp.bme.hu/me/article/view/12140>

В статье, опубликованной в издании *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* в 2019 году, группа исследователей из Будапештского университета технических и экономических наук рассмотрела подход к мониторингу состояния центробежных насосов по измерениям давления на напоре насоса.

Для мониторинга состояния насосов широко применяется контроль вибрации. Исследователи исходили из того, что вибрация, как процесс, воздействует через механические компоненты насоса на перекачиваемую жидкость и приводит к колебаниям давления с частотами, аналогичными характерным частотам вибрации. В соответствии с этим, подход к контролю давления насоса должен быть аналогичен подходу с контролем вибрации.

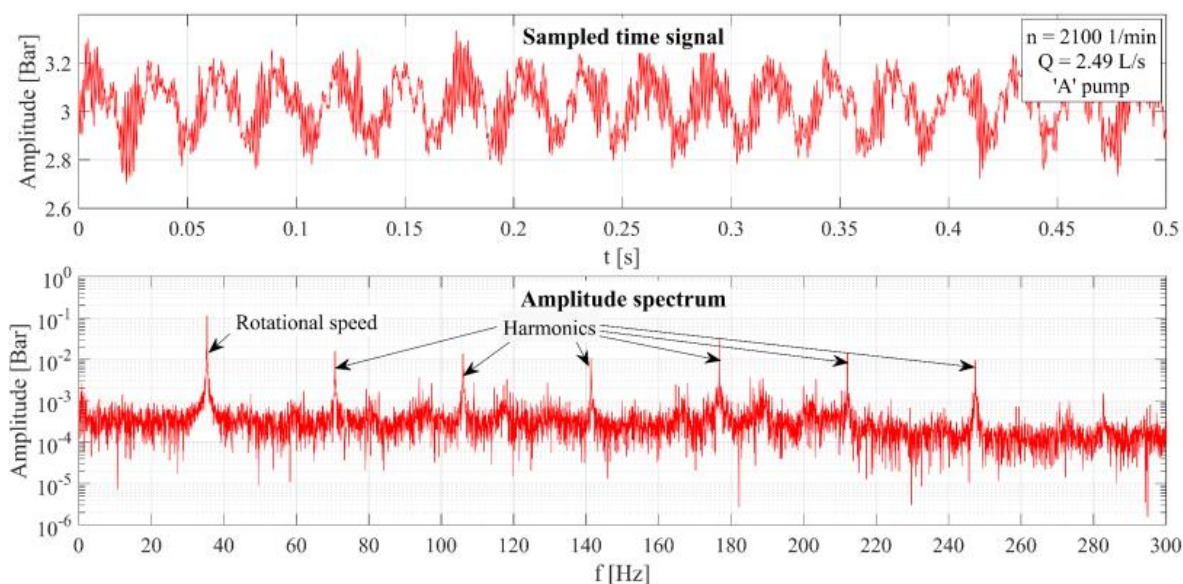
Для исследования использовались два насоса. Насос А типа BMS 24/48 являлся старым насосом ручной сборки с большим сроком службы и значительным износом. Насос В типа Grundfos TPE 65-340/2 был гораздо более новым, имел меньшие габариты и был произведён с более строгими требованиями к качеству. Насосы были включены в составе испытательных схем, показанных на изображении ниже.



Схемы испытаний насосов

Схема, помимо насосов P, состояла из сужающего отверстия O, дроссельного клапана V, резервуара с водой R и датчика давления на напоре насоса Tr.

Пример тренда давления, зарегистрированный датчиком насоса А, показан на изображении ниже. Также показан спектр сигнала давления, на котором видна гармоника частоты вращения насоса и распределение гармоник, характеризующих его состояние.



Сигнал давление и его спектр для насоса А

Результаты исследования изменения давления насосов представлялись в виде трёхмерных диаграмм, показывающих изменение частотного спектра сигнала давления в зависимости от изменения расхода жидкости через насос. Гармоники спектра показаны в виде величин, кратных частоте вращения насоса. Некоторые из выводов исследования приведены ниже.

Диаграмма изменения спектра давления насоса А при частоте его вращения 630 об/мин показана на изображении ниже.

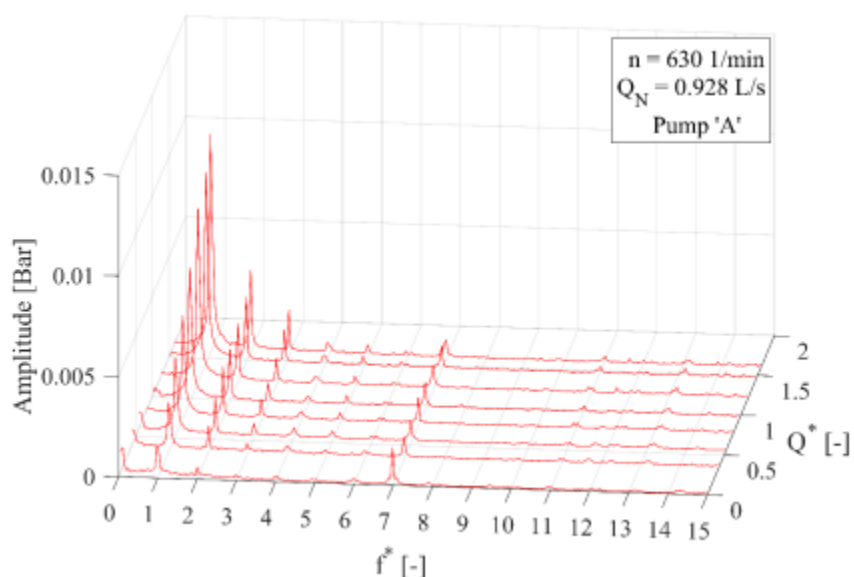


Диаграмма насоса А при частоте вращения 630 об/мин

Виден значительный пик на частоте вращения и нелинейно уменьшающиеся амплитуды кратных гармоник. Локальный пик на частоте 7 соответствует оборотной частоте лопастей насоса, число которых равно 7. Такая картина распределения гармоник соответствует высокой вероятности наличия механического дефекта и расцентровки вала.

Диаграмма изменения спектра насоса В при частоте его вращения 1300 об/мин показана на изображении ниже.

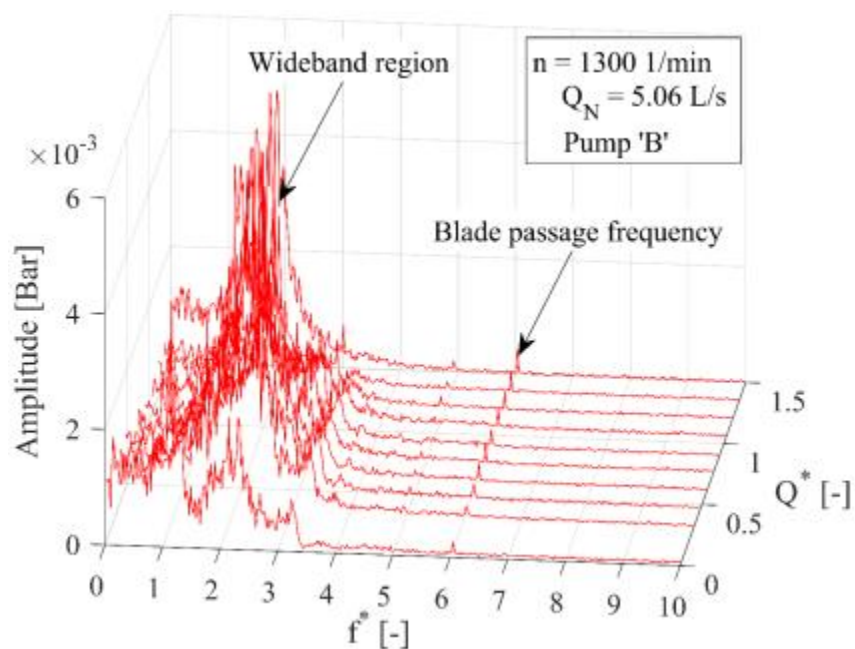


Диаграмма насоса В при частоте вращения 1300 об/мин

В данном случае развитие спектра сильно отличается от аналогичного у насоса А. Наличие значительного пика на частоте 1 или кратных частотах не наблюдается, что говорит об отсутствии серьёзных механических дефектов. Виден набор гармоник высокой амплитуды в широком диапазоне в районе частоты 4. Единственный относительно высокий пик наблюдается на частоте 6, соответствующей оборотной частоте лопастей насоса, число которых равно 6. Это говорит о возможном преобладании гидродинамических эффектов в насосе В. Также отмечается, что амплитуды в районе частоты вращения у насоса В примерно на порядок меньше, чем у насоса А.

В заключении исследования отмечается, что использование сигнала давления вместо вибрации для диагностики центробежных насосов возможно. Однако такой метод не является общепринятым и требует более тщательной проработки.

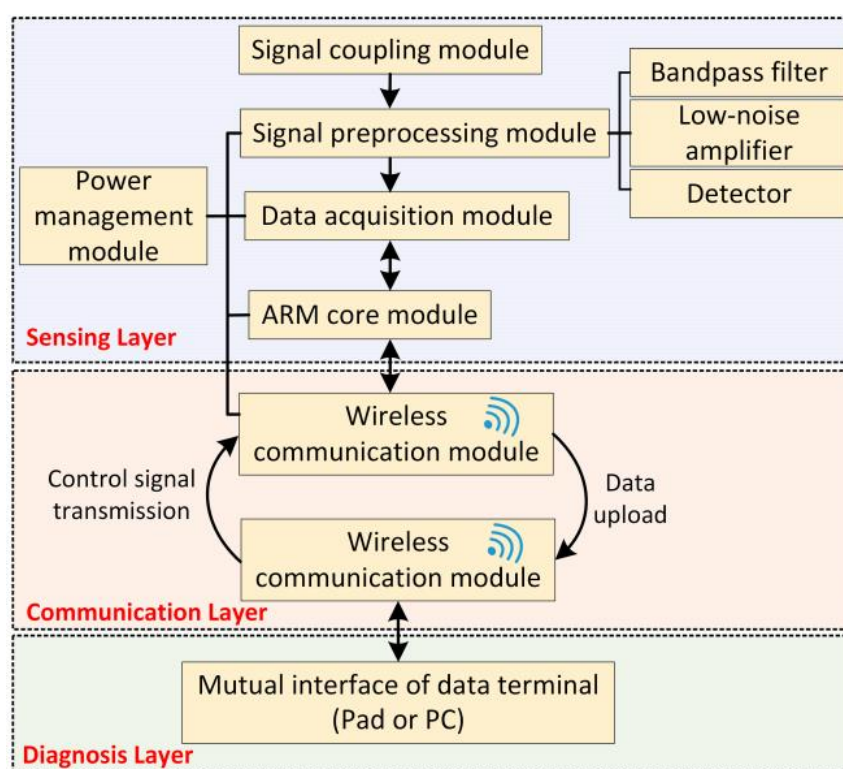
Опыт разработки системы мониторинга частичных разрядов при помощи сети беспроводных датчиков

Источник: Zhang, C.; Dong, M.; Ren, M.; Huang, W.; Zhou, J.; Gao, X.; Albarracín, R. *Partial Discharge Monitoring on Metal-Enclosed Switchgear with Distributed Non-Contact Sensors*. *Sensors* 2018, 18, 551.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/18/2/551>

Объединённая группа исследователей из Университета Сиань Цзяотонг, Китай, и Мадридского политехнического университета, Испания, разработала прототип системы мониторинга ЧР в распределительных устройствах (КРУ), работа которой основана на использовании данных сети беспроводных датчиков. Соответствующая статья была опубликована в издании MDPI *Sensors* в феврале 2018 года.

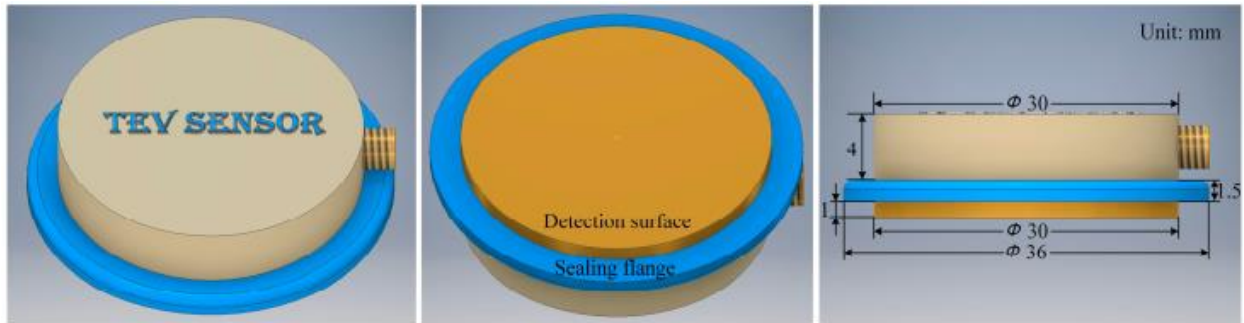
Общая структура системы мониторинга показана на изображении ниже.



Структура системы

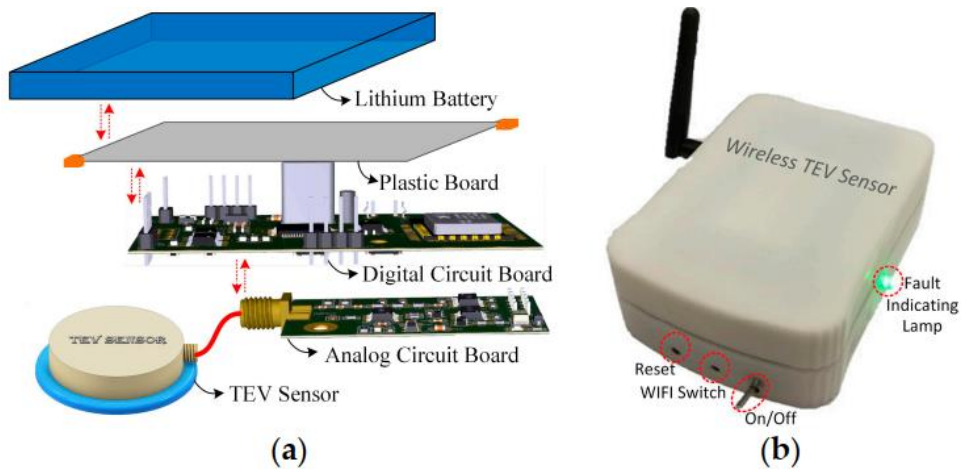
Уровень датчиков (Sensing Layer) представлен в виде сети специально разработанных беспроводных датчиков, реализующих TEV-принцип измерения сигналов ЧР. ЧР в этом детектируются по импульсам токов утечки на внешней металлической поверхности КРУ, к которой крепятся датчики. На уровне датчиков выполняется предобработка сигнала, включающая в себя применение полосового фильтра, усиление сигнала, смещение частотного диапазона в область низких частот и детектирование импульсов ЧР по высокой амплитуде. На уровне связи (Communication Layer) поддерживается беспроводная связь между уровнем датчиков и уровнем диагностики (Diagnosis Layer). На уровне диагностики выполняется хранение, дополнительная обработка и визуализация данных.

Схематично изображение датчика показано ниже.



TEV-датчик

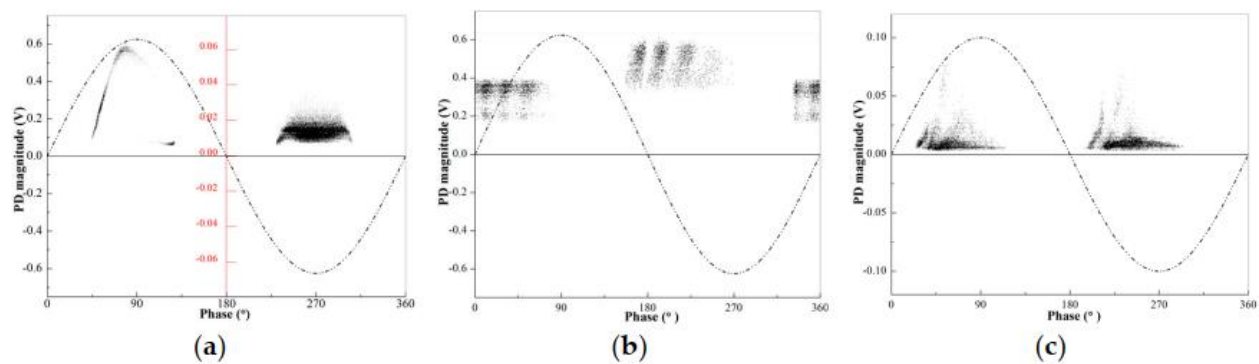
Датчик представляет собой цилиндр, крепящийся при помощи магнита к поверхности КРУ. Каждый датчик снабжается модулем обработки данных для расчёта характеристик ЧР, модулем связи и литиевой батареей. Изображение датчика с модулями показано ниже.



Датчик с батареей и модулями обработки и связи: а) разнесённо, б) в сборе

Работа датчиков была организована таким образом, что при нормальной работе КРУ модуль связи инициировал передачу данных относительно редко, например 2 раза в сутки, для экономии батареи. Частота передачи данных увеличивалась при обнаружении активности ЧР.

Передаваемые датчиками характеристики ЧР собирались на промышленном компьютере, на котором выполнялся их анализ для принятия решения о мероприятии по обслуживанию КРУ. Анализ данных включал в себя анализ уровня разрядов, анализ тренда разрядов, при наличии – сравнение данных нескольких КРУ, а также распознавание образов дефектов по PRPD-распределениям ЧР. Для последнего PRPD-распределения преобразовывались в полутоновые изображения. Пример таких изображений для разных типов дефектов показан ниже.



Полутоновые изображения: а) разряд типа «игла-пластина», б) плавающий электрод, в) поверхностный разряд

Распознавание образа дефекта выполнялось при помощи метода опорных векторов. На основании распознанного типа дефекта принималось решение о мероприятиях по обслуживанию.

Применение распределённых оптических датчиков вибрации для контроля железнодорожных составов

Источник: Meng He, Liu Feng, Dongdong Zhao, *Application of distributed acoustic sensor technology in train running condition monitoring of the heavy-haul railway*, *Optik*, Volume 181, 2019, Pages 343-350, ISSN 0030-4026

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0030402618319983>

Помимо энергетики, большим потребителем технологий мониторинга является транспортная отрасль. Исследователи из Пекинского университета Цзяотон разработали систему мониторинга проходящих железнодорожных составов при помощи распределённых оптических датчиков вибрации. Соответствующая статья была опубликована в издании *Optik* в марте 2019 года.

Исследователи использовали технологию динамической оптической рефлектометрии, в которой колебания оптоволоконного кабеля приводят к изменению его характеристик. Если в кабель вводить световые импульсы и измерять время их возврата, можно делать вывод о распределении уровня вибрации по кабелю. Преимуществом технологии является её чувствительность к слабым сигналам вибрации. Разместив оптоволоконно рядом с железнодорожным путём, по которому проходят составы, можно делать вывод о наличии проходящего состава, его длине, скорости, положении и направлении движения.

Схема размещения системы показана на изображении ниже.

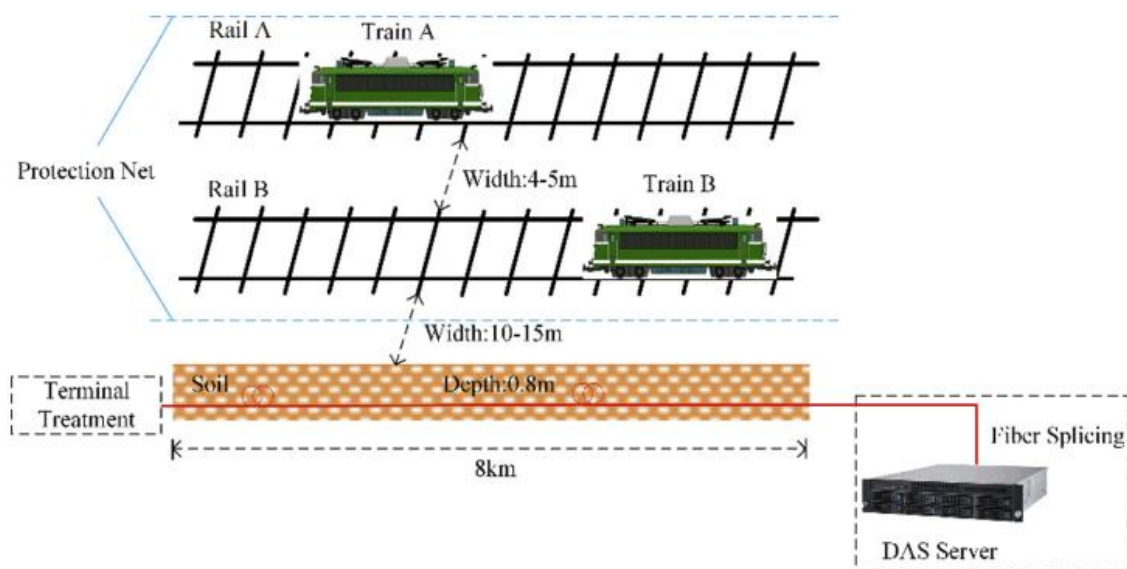
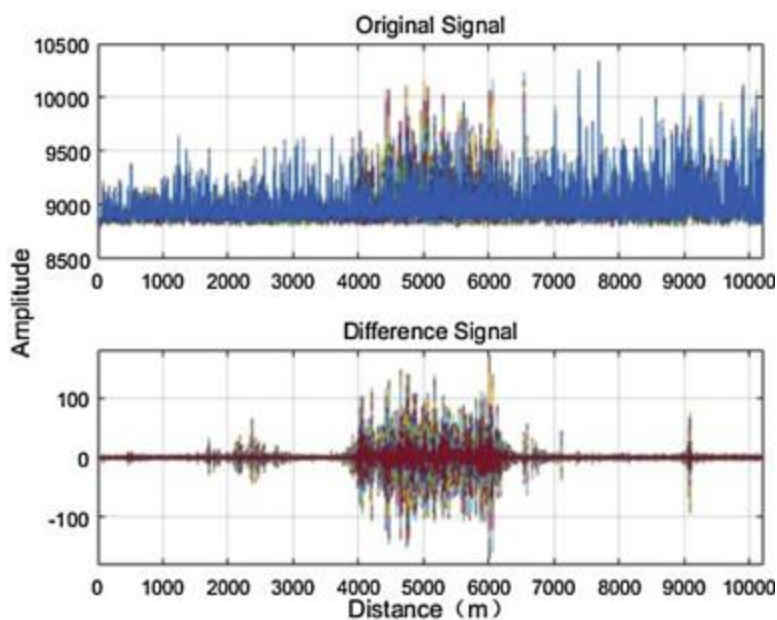


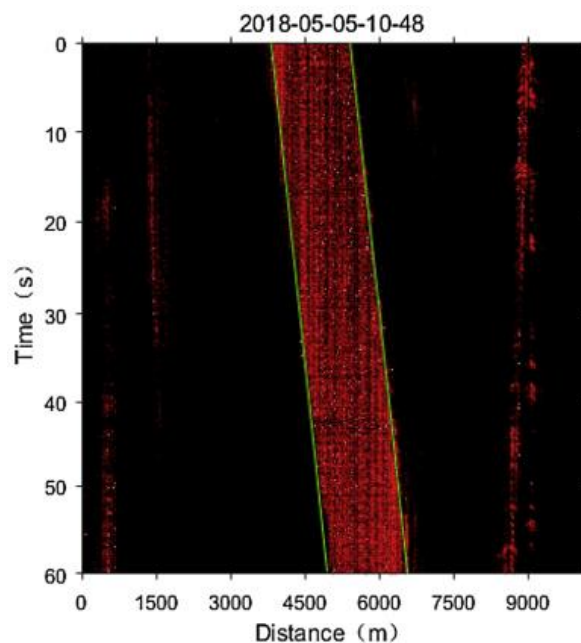
Схема размещения системы

Помимо оптоволоконна, в системе использовался сервер, на котором выполнялся анализ характеристик сигнала. Анализ включал в себя вейвлет- и Фурье-преобразование сигнала для удаления фонового шума, а также применение последовательных разностей к осциллограмме сигнала. Благодаря применению разностей различия между сигналами системы в отсутствие и при наличии проходящего состава становилось более явным. На изображении ниже показан пример записанной пространственной осциллограммы сигнала, а также результат применения разности сигнала при прохождении состава.

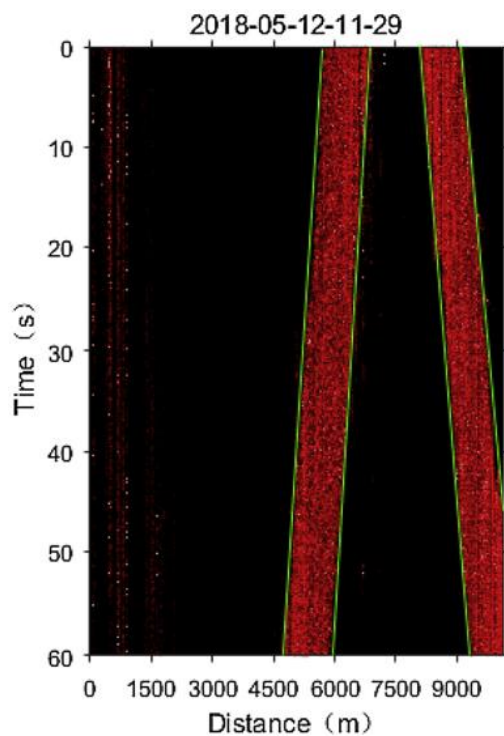


Пространственная осциллограмма сигнала при прохождении состава: а) оригинальный, б) разностный

К записанным данным применялся алгоритм маркировки, широко применяемый при контроле производства и автоматизированной логистике. Из набора формировалось изображение, на котором координаты проходящего состава в разные моменты времени помечались точками. Примеры такого изображения показаны ниже.



Изображение при прохождении одного состава



Изображение при прохождении двух составов

На изображениях горизонтальная ось соответствует координате по протяжённости железнодорожного пути, вертикальная – времени. Горизонтальные срезы изображения соответствуют осциллограммам, записанным в разные моменты времени.

Характеристики (угол наклона, ширина, интенсивность) полос, изображающих составы на изображении, дают информацию о различных параметрах составов.

В заключении исследования указывается, что разработанный метод прошёл успешные испытания и имеет значительный потенциал в повышении безопасности железных дорог.

Разработка монополярной антенны для определения ЧР на основе структуры листьев растения

Источник: Cruz, J.N.; Serres, A.J.R.; de Oliveira, A.C.; Xavier, G.V.R.; de Albuquerque, C.C.R.; da Costa, E.G.; Freire, R.C.S. *Bio-inspired Printed Monopole Antenna Applied to Partial Discharge Detection. Sensors* 2019, 19, 628.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/19/3/628>

Группа сотрудников Федерального университета Кампина-Гранди, Бразилия, разработала прототип печатной монополярной антенны для детектирования ЧР. Конструкция антенны на структуре и расположении листьев растения семейства бобовых *Inga Marginata*, произрастающего в атлантических лесах Боливии, Бразилии и Аргентины. Статья авторов была опубликована в издании MDPI Sensors в феврале 2019 года.

Печатные монополярные антенны просты в изготовлении и, как правило, имеют простую конструкцию. Определяющими факторами для характеристик антенны являются её размеры и конструкция.

Листья *Inga Marginata*, которыми вдохновлялись разработчики, показаны на изображении ниже.



Листья Inga Marginata

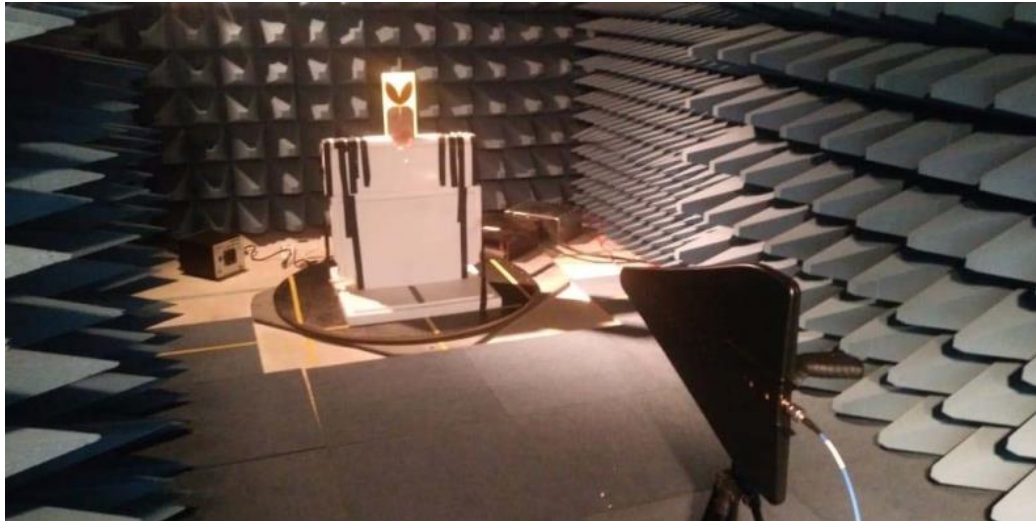
Выполненная по их подобию антенна показана на изображении ниже.



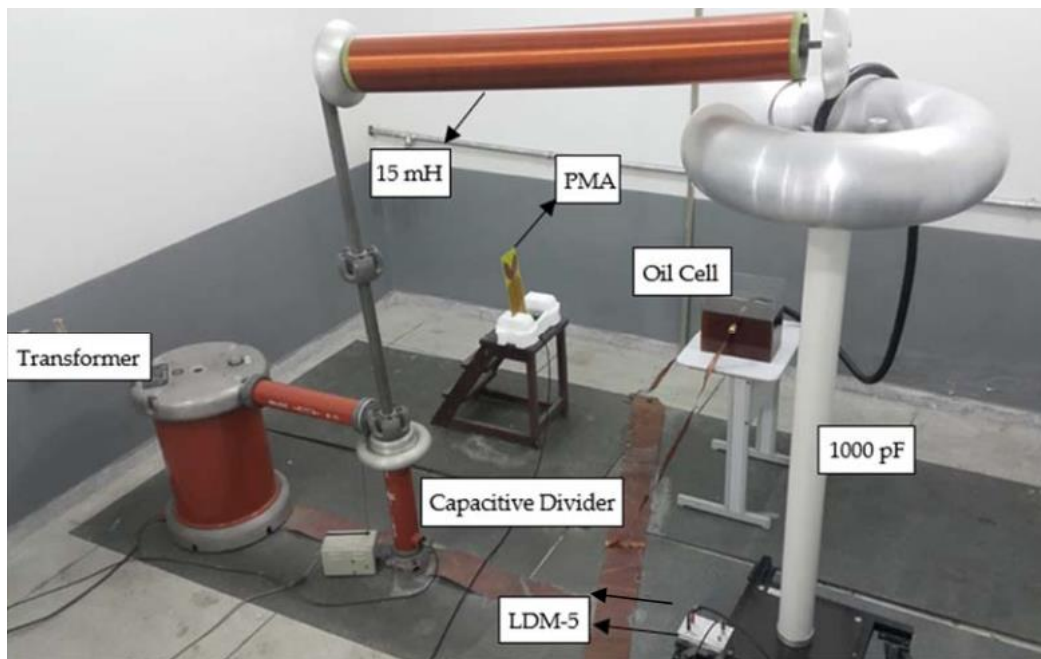
Изготовленная антенна

Конструкция антенны была выполнена таким образом, чтобы обеспечить определение ЧР в диапазоне 300-3000 МГц.

После изготовления антенна была подвержена испытаниям на волновые характеристики и чувствительность к ЧР. Вид испытательных установок для обоих испытаний показан ниже.



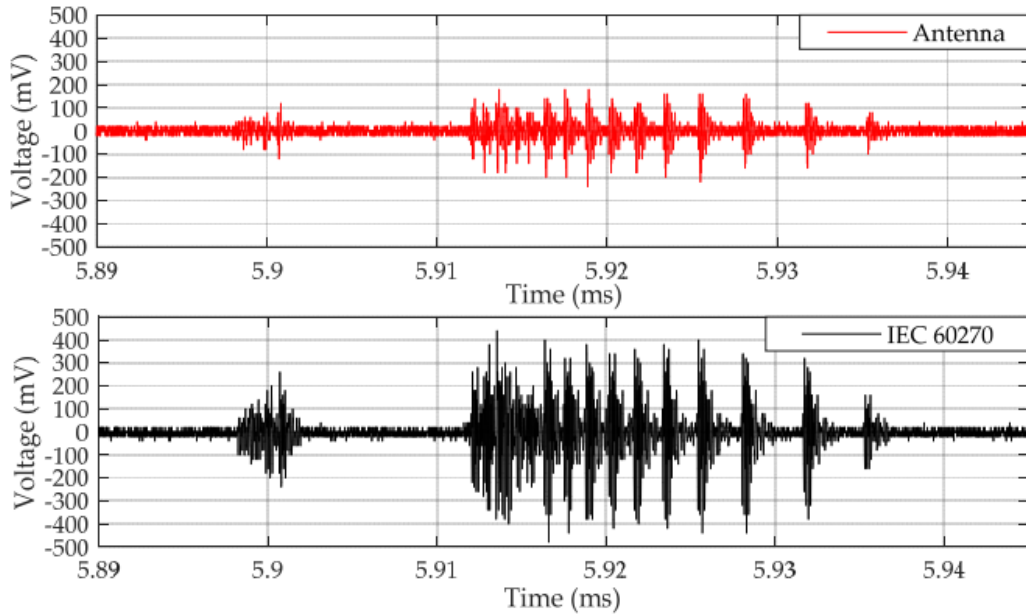
Проверка волновых характеристик антенны



Проверка чувствительности к ЧР

Результаты испытаний были также сравнены с результатами симуляции характеристик антенны. В результате было установлено, что антенна обладает хорошей чувствительностью к ЧР.

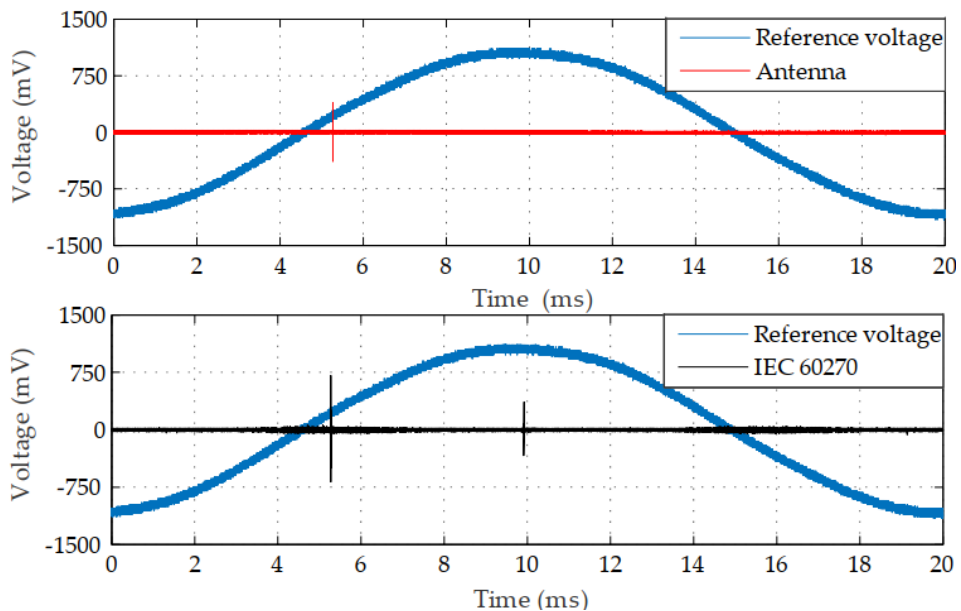
Далее была собрана испытательная установка в соответствии с МЭК 60270. Характеристики ЧР записывались одновременно разработанной антенной и стандартным ёмкостным датчиком. Осциллограммы записанных сигналов показаны на изображении ниже.



Осциллограммы ЧР, записанные: верхняя - антенной, нижняя - ёмкостным датчиком

Несмотря на более низкую чувствительность к ЧР по сравнению к методу МЭК 60270, антенна корректно детектировала приходящие импульсы ЧР. Пониженная чувствительность в данном случае является характеристикой метода измерения.

Исследователи также провели проверку чувствительности антенны к коронным разрядам. Осциллограммы импульсов коронных разрядов, записанные при помощи антенны и метода МЭК 60270, показаны ниже.



Осциллограммы коронных разрядов, записанные: верхняя - антенной, нижняя - ёмкостным датчиком

Из осциллограмм видно, что при использовании стандартного метода были зафиксированы два импульса короны в то время, как антенна зафиксировала только один. Это говорит о меньшей подверженности измерений при помощи антенны коронным разрядам по сравнению с измерениями по МЭК 60270.

В заключении исследования указывается, что разработанная антенна может применяться в качестве недорогого и надёжного датчика в системах мониторинга ЧР.

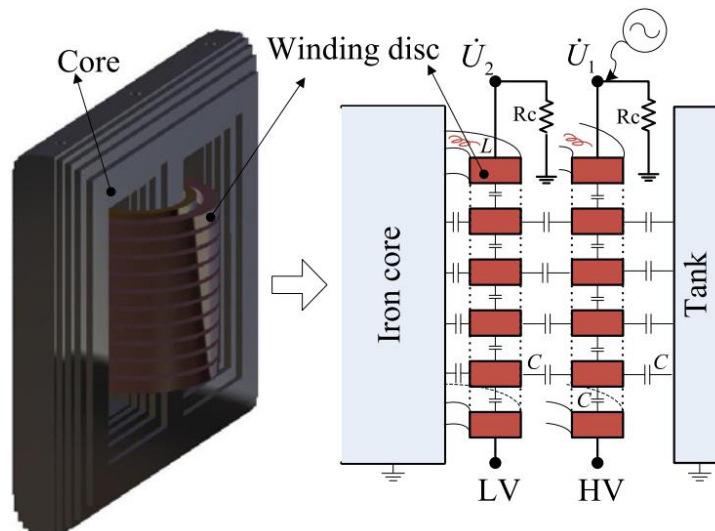
Исследование чувствительности метода анализа частотного отклика к разным типам дефектов

Источник: Zhang, Haijun et al. 'Frequency Response Signature Analysis for Winding Mechanical Fault Detection of Power Transformer Using Sensitivity Method'. 1 Jan. 2019 : 593 – 603.

<https://content.iospress.com/articles/international-journal-of-applied-electromagnetics-and-mechanics/jae190038>

Группа исследователей из Китая в декабре 2019 года опубликовала в издании International Journal of Applied Electromagnetics and Electromechanics исследование, рассматривающее чувствительность метода анализа частотного отклика в разных диапазонах частот и к разным типам дефектов трансформатора.

В исследовании использовалась модель двухобмоточного трансформатора с подключенной к его обмоткам системой анализа частотного отклика. Пример трёхмерной модели обмоток трансформатора и эквивалентная электрическая схема показан на изображении ниже.

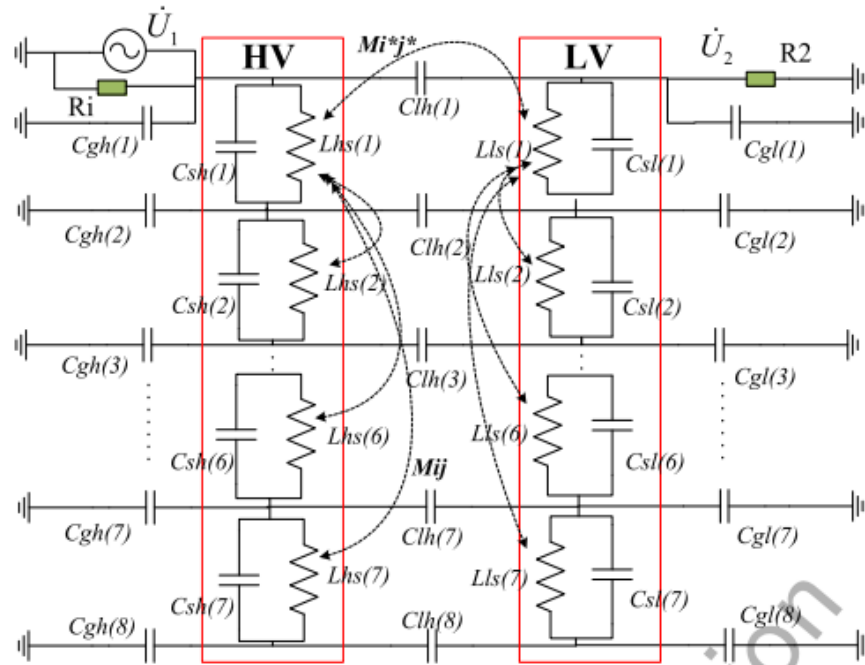


Трёхмерная модель обмоток и эквивалентная электрическая схема исследуемого трансформатора

В эквивалентной схеме учитываются индивидуальные характеристики (ёмкости, сопротивления) каждого диска обмотки, а также ёмкости между парами дисков и между дисками и баком или сердечником трансформатора.

Исследование чувствительности метода проводилось изменением различных элементов схемы и контролем изменения частотного отклика.

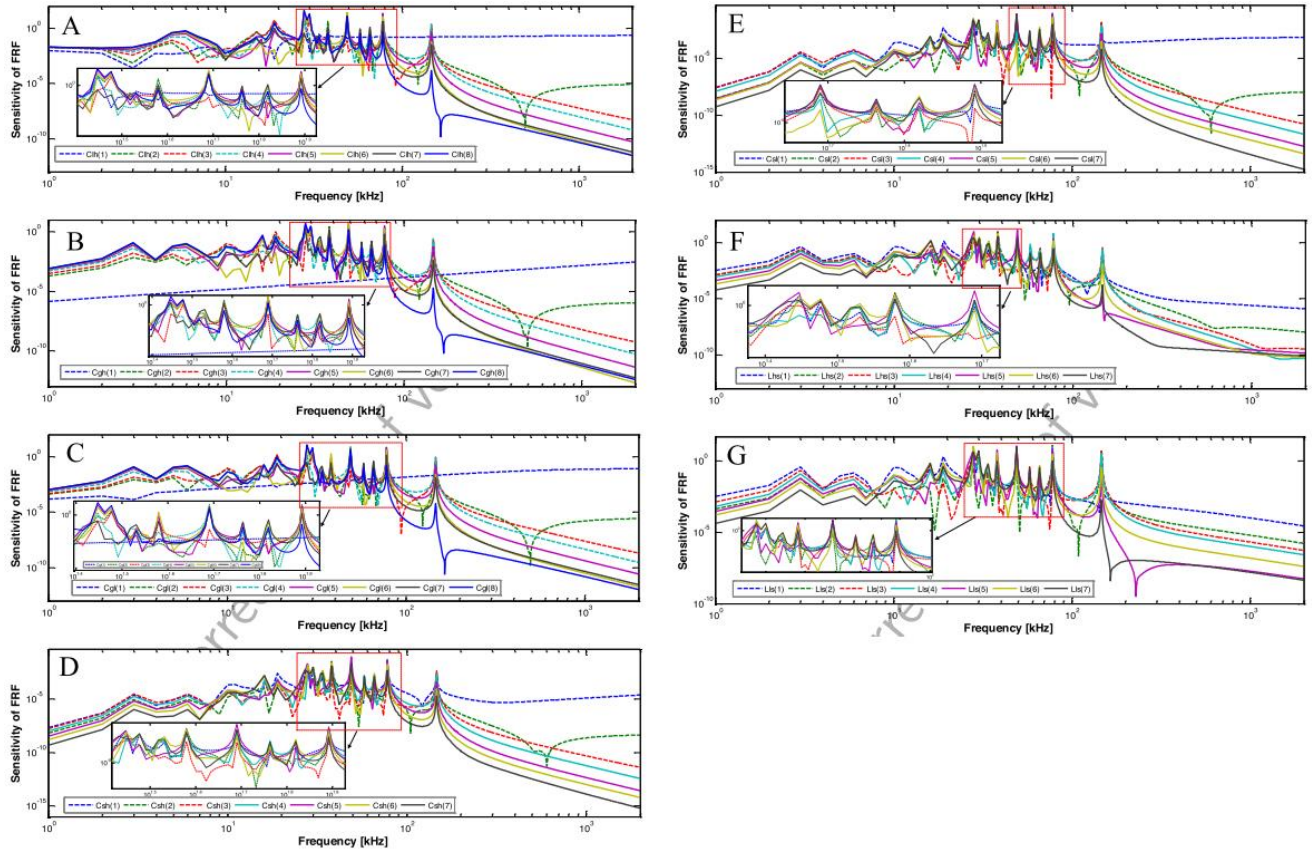
Полная эквивалентная схема исследуемого трансформатора показана на изображении ниже.



Полная эквивалентная схема трансформатора

Модель описывала трансформатор с 7 дисками в обмотках. В модели каждый диск включает в себя ёмкости Csh и Csl, ёмкости на землю от обмоток к баку Cgh и Cgl, ёмкости между обмоток Clh, собственные и взаимные индуктивности Lhs, Lls, Mij. Измерения частотного отклика проводились в 800 точках в диапазоне 10 Гц- 2 МГц.

Набор полученных частотных откликов для разных элементов эквивалентной схемы показан на графиках ниже.

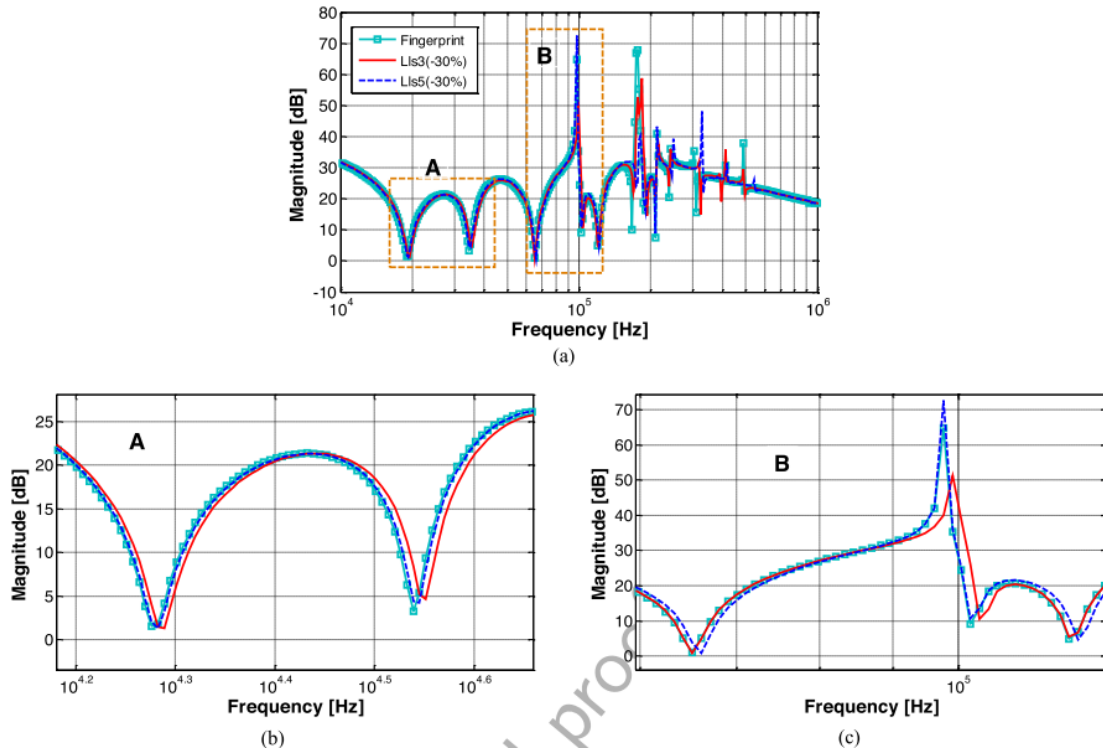


Частотных отклики для разных элементов, в порядке следования A-G: Clh, Cgh, Cgl, Csh, Csl, Lhs, Lls

Из графиков видно, что уровень отклика различается для разных элементов. Разброс амплитуд в высокочастотной части спектра значительно ниже, чем на более низких частотах.

Для оценки чувствительности метода к дефектам трансформатора использовалось моделирование дефекта и сравнение полученного отклика с откликом бездефектного трансформатора.

Для имитации короткозамкнутных витков обмотки в модели трансформатора значения индуктивности L13 и L15 дисков обмотки были снижены на 30%. Результаты сравнения откликов для бездефектного трансформатора и трансформатора со сниженными на 30% значениями L13 и L15 показаны на изображении ниже.

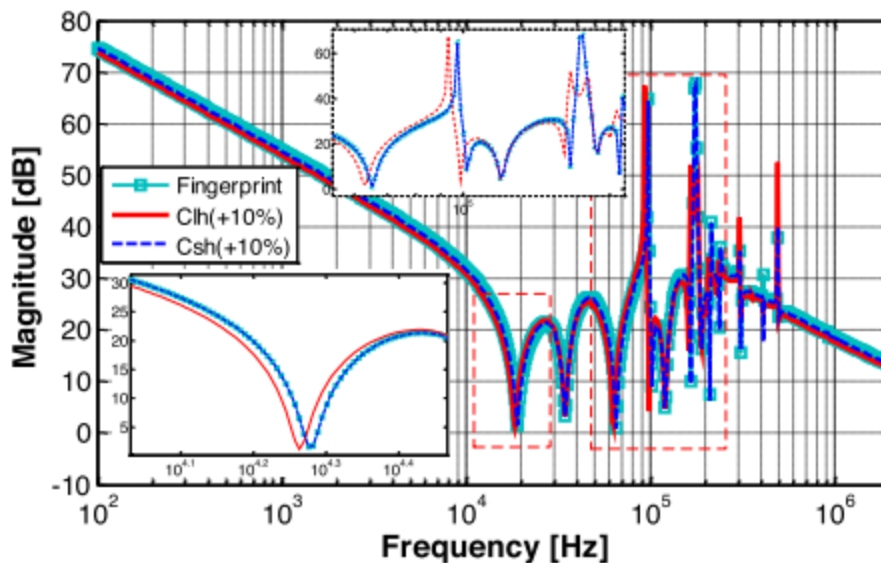


Частотный отклик бездефектного (Fingerprint) трансформатора и трансформатора со сниженными на 30% Lls3 и Lls5. Отдельные части спектра показаны на отдельных графиках

Из графиков видно, что значительного изменения отклика на частотах выше 600 кГц.

Аксиальное смещение дисков моделировалось изменением ёмкости дисков C_{sh} и C_{sl} и взаимной индуктивности M_{ij} между дисками. Искривление обмотки моделировалось изменением ёмкости C_{lh} между обмотками НН и ВН.

Результаты анализа частотного отклика для бездефектного трансформатора, трансформатора со смещёнными дисками обмотки и трансформатора с деформацией обмотки показаны на графике ниже.



Частотный отклик бездефектного трансформатора, трансформатора со смещёнными дисками обмотки и трансформатора с деформацией обмотки

Из графиков видно, что изменение Csh оказывает небольшое влияние на отклонение кривой частотного отклика.

В заключении исследования указывается, что изменение большинства электрических параметров приводит изменению частотного отклика в области средних частот. Различные дефекты трансформатора оказывают разное влияние на отклик. Степень влияния можно оценить численно по обработке результатов замеров аналогичных описанным авторами. Понимание чувствительности отклика к различным параметрам поможет в идентификации положения дефекта и оценке степени его развития.

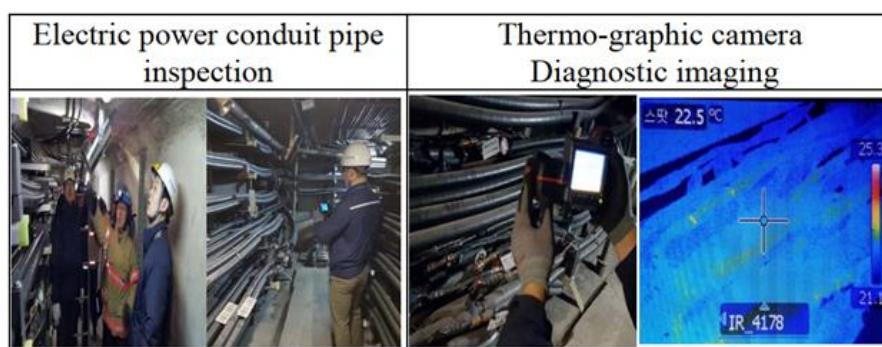
Опыт внедрения роботизированной системы мониторинга состояния кабельных линий

Источник: K. Kang, J. Lee, E. Lee and M. Kim, "Intelligent Autonomous driving Condition Monitoring and Diagnosis Robot-system of Underground electric power conduit pipe," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CMD.2018.8535664.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535664>

Опыт внедрения роботизированной системы мониторинга состояния кабельных линий, прокладываемых в кабелепроводах, представили специалисты Корейской электроэнергетической компании (KEPCO) в своём докладе на IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2018.

По состоянию на 2017 год в эксплуатации KEPCO находились 711 кабелепроводов общей протяжённостью 354 км, что делало проблему мониторинга состояния кабельных линий особенно актуальной. Применяемый подход к мониторингу основывался на периодических осмотрах персоналом кабельных линий с использованием термографических камер и на использовании стационарно устанавливаемых камер. Пример процедуры осмотра кабелей показан на изображениях ниже.



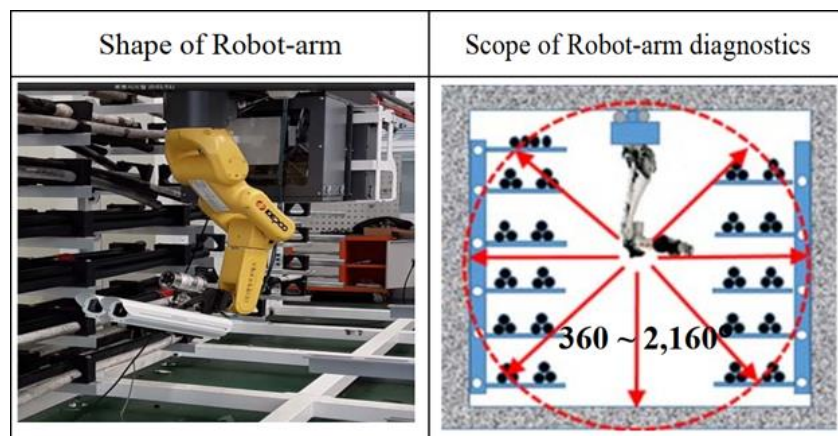
Процедура осмотра кабелей

Однако силы персонала ограничены, а применяемые камеры обеспечивали только статические точки контроля и не могли охватить всю протяжённость кабельных линий. Помимо этого, стационарные камеры также имели слепые пятна и не могли обеспечить всенаправленный контроль.

Для выхода из сложившейся ситуации на предприятии была внедрена роботизированная система мониторинга кабельных линий. Система представляла собой робот-манипулятор, перемещаемый по направляющему рельсу, закрепляемому в верхней части кабелепровода. Для навигации робота использовались RFID-метки, встраиваемые в рельс. На роботе устанавливались:

- Термографическая камера и камера видимого спектра;
- Датчики температуры, влажности и углекислого газа;
- Система пожаротушения аэрозолем твёрдых частиц для тушения небольших возгораний;
- Источник бесперебойного питания.

Благодаря подвижности робота обеспечивался всенаправленный контроль состояния кабелей. Общий вид робота показан на рисунке ниже.



Вид робота

Робот также был снабжён встроенным компьютером для хранения накопленных данных и поддержания связи с диспетчерским пунктом. Процедуры обхода оборудования были автоматизированы и выполнялись круглосуточно, при необходимости оператор мог взять управление на себя.

В заключении доклада указывается, что, несмотря на положительный опыт внедрения системы, дальнейшая её разработка будет продолжаться. В частности, авторы доклада планируют повысить точность автоматического распознавания ухудшающего состояния кабелей.

Применение метода сеточного поиска в сферических координатах для локализации источника ЧР на подстанциях

Источник: F. Xue, D. Wei, Z. Wang, T. Li, Y. Hu and H. Huang, "Grid searching method in spherical coordinate for PD location in a substation," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CMD.2018.8535972.

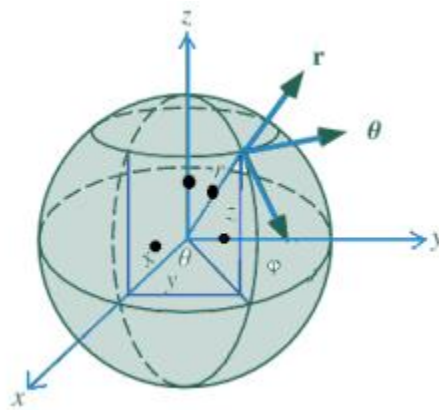
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535972>

Группа исследователей из Сетевой компании провинции Гуандун и Шанхайского университета транспорта, Китай, предложила улучшенный алгоритм локализации источника ЧР, который призван устранить недостатки существующих методов. Соответствующая статья была представлена на IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis в сентябре 2018 года.

Традиционно для локализации источника ЧР используется метод "Time of arrival", в котором положение источника определяется по меткам времени обнаружения импульсов ЧР разными датчиками, и методом сеточного поиска, в котором область поиска источника разбивается на элементарные объёмы, в которых оцениваются характеристики ЧР.

Каждый метод имеет свои недостатки, к которым добавляется неточность, связанная с погрешностью определения времён прихода и положения датчиков ЧР в пространстве.

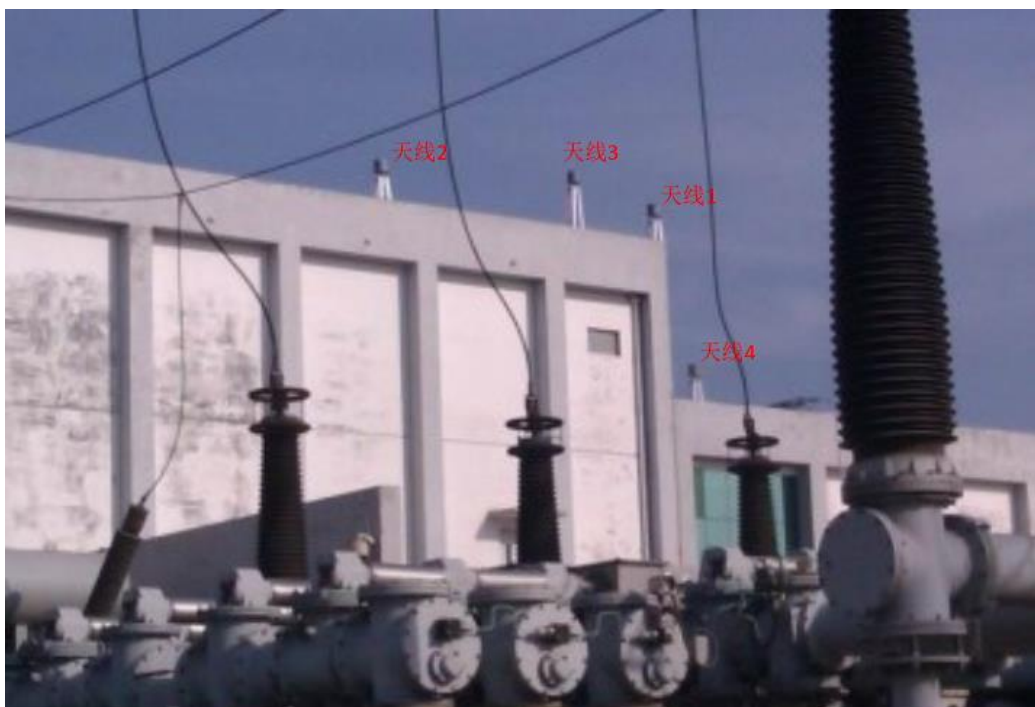
Авторы статьи применили алгоритм сеточного поиска в полярных координатах. В этой системе положение каждого датчика ЧР задаётся длиной радиус-вектора r и двумя углами, θ и ϕ как показано на рисунке ниже.



Полярная система координат

Исследователи рассматривали различные конфигурации датчиков и сравнивали точность определения источника ЧР методом сеточного поиска в прямоугольных и сферических координатах. По результатам исследования было установлено, что при равных настройках эксперимента точность определения в сферических координатах выше, чем в прямоугольных, а объём требуемых вычислений меньше.

Результаты расчётов позже были подтверждены результатами эксперимента с определением источника ЧР в условиях открытой подстанции. Пример расположения датчиков ЧР на подстанции, в условиях которой может применяться метод, показан на рисунке ниже.



Пример размещения датчиков для локализации источника ЧР на подстанции

Реконструкция частотного отклика трансформатора по онлайн-данным, получаемым от измерительных выводов вводов трансформатора

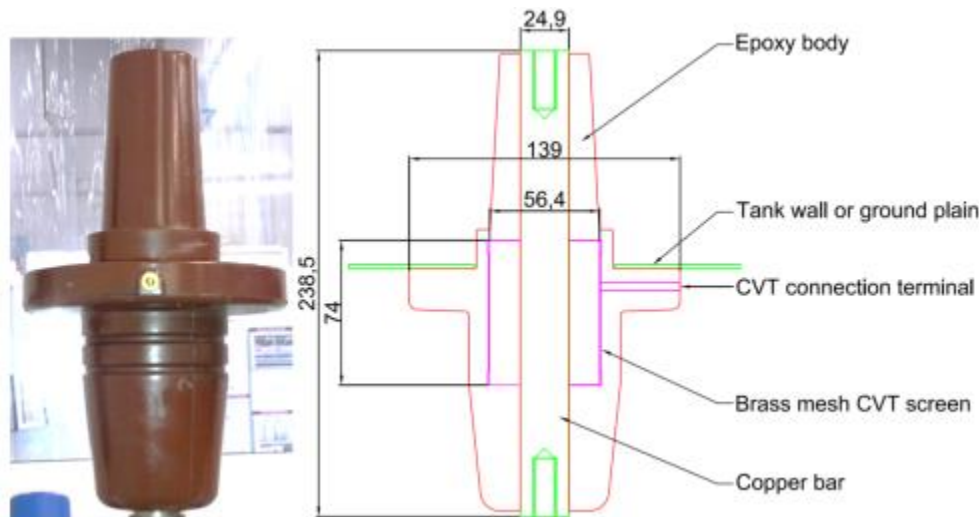
Источник: S. D. Nielsen, "Reconstruction of the Transformer Response from on-Line FRA Measurements Performed via Bushing Taps," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-6, doi: 10.1109/CMD.2018.8535717.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535717>

В своём докладе, представленном на IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis в сентябре 2018 года, исследователи из Технологического университета Квинсленда, Австралия, представили способ онлайн-мониторинга состояния обмоток силового трансформатора по данным анализа частотного отклика (АЧО), собираемым в онлайн-режиме с измерительных выводов высоковольтных вводов трансформатора.

Традиционно метод АЧО используется при оффлайн-измерениях, во время которых испытательные импульсы вводятся непосредственно в обмотки через выводы трансформатора. В силу очевидных причин такой способ контроля недоступен во время работы трансформатора. В предложенном исследователями подходе для ввода испытательного сигнала используются измерительные выводы вводов трансформатора, а полученный при этом спектр пересчитывается в спектр сигнала обмоток, характерный для оффлайн-испытаний.

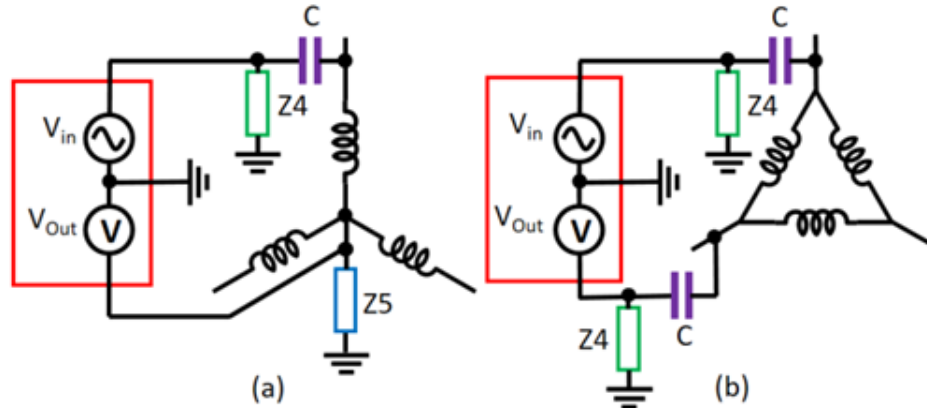
В докладе рассматривался литой циклоалифатический ввод 38 кВ, 800 А со встроенным медным экраном, показанный на рисунке ниже.



Исследуемый ввод

Исследователи разработали математическую модель, описывающую электрические передаточные свойства ввода. Модель строилась на комплексных сопротивлениях, частотные характеристики которых были известны.

Два варианта измерительной схемы для онлайн-анализа частотного отклика показаны на рисунке ниже. В первом варианте напряжение контролируется между измерительным выводом одного из вводов и нейтралью, во втором – между двумя выводами.

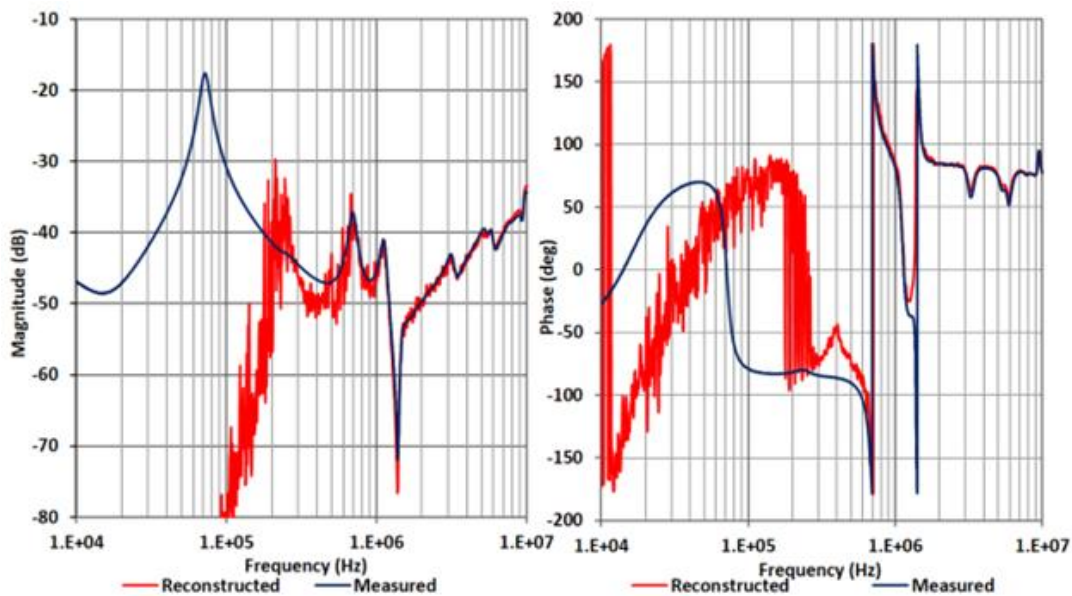


Измерительные схемы для онлайн-анализа частотного отклика

Таким образом, при онлайн-измерениях частотный отклик обмоток будет искажён характеристиками измерительного ввода. Для математического восстановления частотного отклика обмоток трансформатора по данным онлайн-измерений с измерительных выводов использовались данные разработанной исследователями модели.

Схемы онлайн-контроля частотного отклика были проверены средствами компьютерной симуляции, а также были проведены замеры на образце ввода, установленном на испытательном трансформаторе. Полученные при симуляции частотные отклики соответствовали результатам измерений. Наблюдаемое при испытаниях небольшое расхождение было вызвано небольшим различием в характеристиках вводов.

Также была выполнена проверка точности предложенного исследователями метода восстановления частотного отклика непосредственно обмоток трансформатора без учёта влияния характеристик ввода. Результаты проверки показаны на рисунке ниже.



Частотный отклик обмоток трансформатора: синий – измеренный, красный – восстановленный по данным онлайн-измерений

Результаты показывают хорошую сходимость на высоких частотах. На частотах ниже 600 кГц наблюдается высокая зашумлённость как спектра амплитуды, так и фазы, что вызвано работой измерительной цепи при онлайн-измерении в качестве фильтра высоких частот.

Однако в целом, указывается в заключении исследования, возможно получать данные о частотном отклике обмоток трансформатора по данным онлайн-мониторинга.

IoT-система мониторинга состояния трансформатора

Источник: *Chaolong Zhang, Yigang He, Bolun Du, Lifan Yuan, Bing Li, Shanhe Jiang, Transformer fault diagnosis method using IoT based monitoring system and ensemble machine learning, Future Generation Computer Systems, Volume 108, 2020, Pages 533-545, ISSN 0167-739X*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167739X19334727>

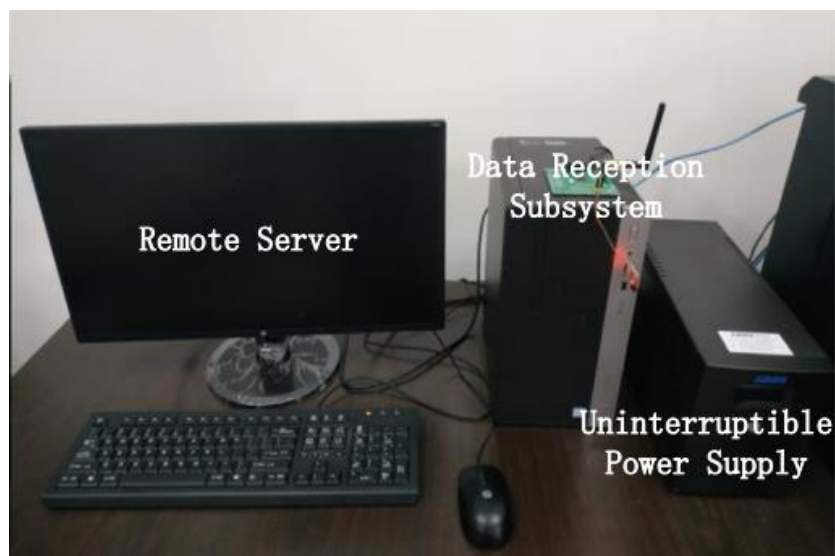
Исследователи из Китая разработали прототип IoT-системы мониторинга состояния трансформатора, на основе данных вибрации. Данные снимаются беспроводным датчиком виброускорения, а для их анализа используется набор методов машинного обучения. Соответствующая статья была опубликована в издании *Future Generation Computer Systems* в июле 2020 года.

Система состоит из нескольких компонентов: модуля сбора данных, модуля приёма данных и сервера системы. Модуль сбора данных состоит из микроконтроллера, трёхосевого акселерометра, источника питания и коммуникационного чипа для беспроводной передачи данных по радиоканалу на частоте 2.4-2.5 ГГц. Модуль может работать в двух режимах: спящем режиме и режиме передачи данных. Общий вид модуля сбора показан на изображении ниже.



Модуль сбора данных

Модуль приёма данных состоит из микроконтроллера, коммуникационного чипа и источника питания. Сервер системы представлял собой компьютер с программным обеспечением для обработки данных. Общий вид модуля приёма и сервера показан на изображении ниже.



Модуль приёма данных с компьютером

Дополнительно проведённые испытания качества выбранного способа связи показали его применимости для передачи данных на расстоянии до нескольких сотен метров.

Для обработки результатов замеров исследователи использовали набор методов машинного обучения. Выделение диагностических свойств, характеризующих состояние трансформатора, выполнялось при помощи комбинации глубоких сетей доверия (один из видов нейронных сетей) и многоступенчатых шумоподавляющих автоэнкодеров. Определение состояния трансформатора на основании полученных диагностических свойств выполнялось при помощи метода релевантных векторов.

Для проверки точности метода использовался испытательный трёхфазный трансформатор 10 кВ, на котором имитировались семь различных механических дефектов. Схема испытательной установки показана на изображении ниже.

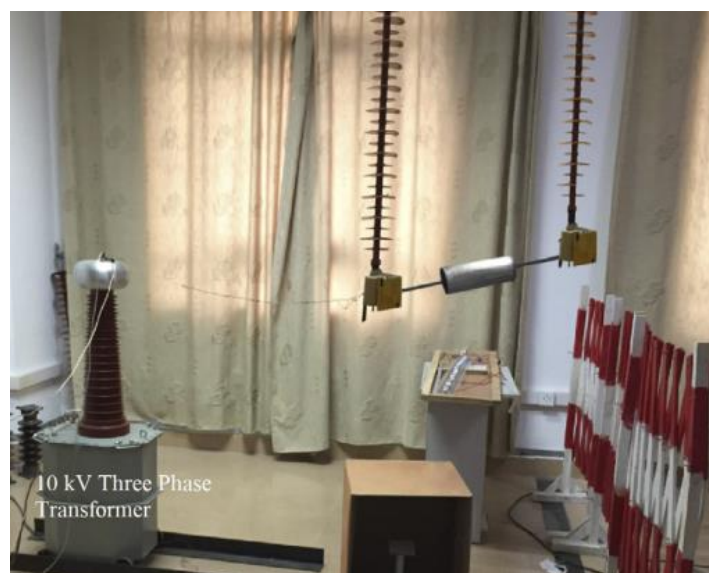
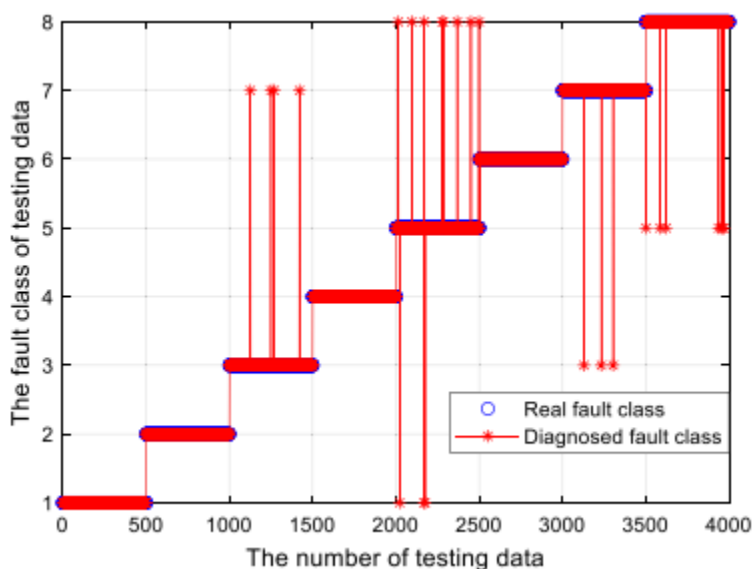


Схема испытательной установки

Результаты классификации разных типов дефектов показаны на графике ниже.



Результаты испытаний. Горизонтальная ось – номер испытания, вертикальная ось – номер типа дефекта. Синие маркеры – тип имитируемого дефекта (Real fault class), красные – тип дефекта, определённого системой (Diagnosed fault class)

В заключении исследования указывается, что полученные результаты показывают хорошую точность предложенного метода. Метод также является универсальным и может использоваться для диагностики других типов оборудования.

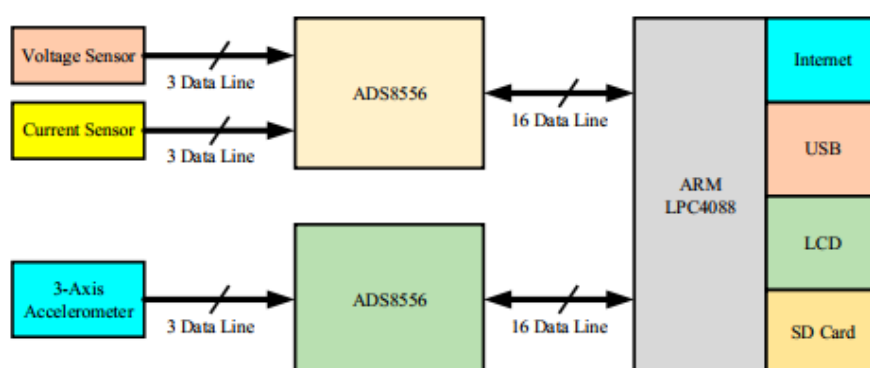
Система мониторинга асинхронных двигателей, использующая комбинированную технику

Источник: Chang, H.-C.; Jheng, Y.-M.; Kuo, C.-C.; Hsueh, Y.-M. *Induction Motors Condition Monitoring System with Fault Diagnosis Using a Hybrid Approach*. *Energies* **2019**, *12*, 1471

<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/8/1471>

Исследователи из Национального университета науки и технологий Тайваня предложили систему мониторинга состояния асинхронных двигателей, в которой используется комбинированная техника на основе мониторинга вибрации и электрических параметров. Соответствующая статья была опубликована в издании *Energies* в апреле 2019 года.

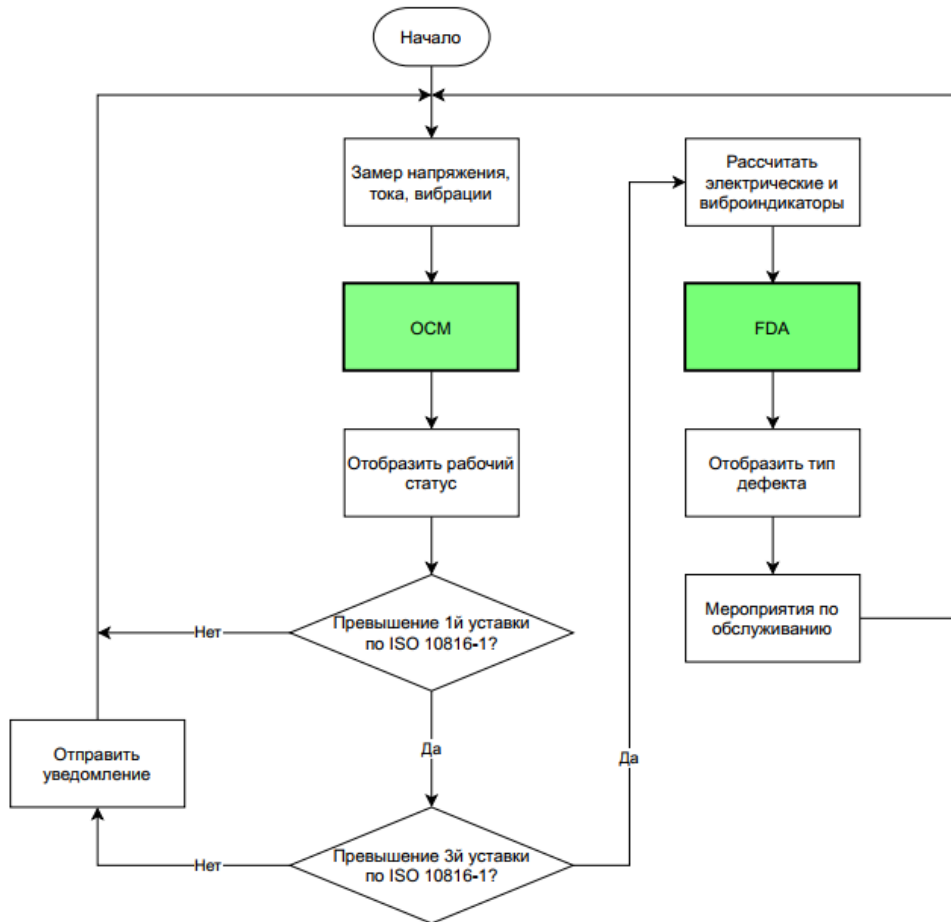
Общая структурная схема системы показана на изображении ниже.



Структурная схема системы

В системе используются бесконтактные датчики Холла для контроля напряжения и тока и трёхосевой пьезоэлектрический акселерометр для контроля виброускорения. Сигнала тока, напряжения и виброускорения, после оцифровки, передаются на микроконтроллер, на котором реализуются модели диагностики.

Последовательность реализации операций в системе показана на схеме ниже.



Последовательность операций, выполняемых системой

Основой работы системы являются два модуля: мониторинг режима работы (ОСМ) и определения дефекта (FDA). После получения данных об электрических параметрах и вибрации, ОСМ определяет текущий режим работы двигателя на основе международных стандартов. Когда модуль определяет отклонения от нормального режима работы, измеренные параметры отправляются в модуль FDA для определения развивающегося дефекта, по типу которого затем принимается решение о мероприятии по обслуживанию двигателя.

В модуле ОСМ используются стандарты ISO 10816-1 и NEMA MG-1. Первый выполняет классификацию состояния двигателя по четырём категориям на основе виброскорости, второй выполняет классификацию по двум категориям на основе виброперемещения. Для определения аномальных режимов используются результаты оценки состояния по обоим стандартам как показано в таблице ниже.

| | | ISO 10816-1 | | | |
|-----------|--------|-------------|------------|----------------|--------------|
| | | Good | Acceptable | Unsatisfactory | Unacceptable |
| NEMA MG-1 | Normal | Normal | Caution | Warning | Danger |
| | Danger | Danger | Danger | Danger | Danger |

Оценка состояния двигателя по ISO 10816-1 и NEMA MG-1. Столбцы таблицы – категории состояния двигателя по ISO 10816-1, строки – категории по NEMA MG-1. Ячейки таблицы – сводная оценка состояния двигателя

Работа модуля FDA основана на расчёте набора индикаторов:

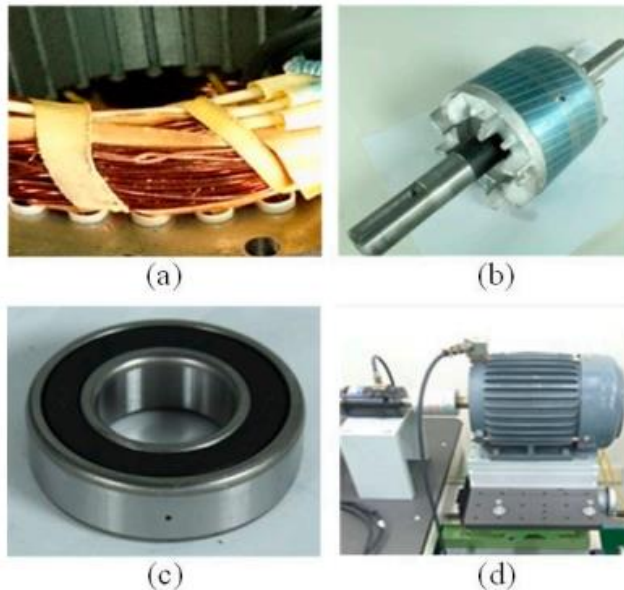
- Коэффициент несимметрии токов по IEC 60034-1 и IEEE 141;
- Искажение гармоник напряжения по IEEE 519;
- Искажение гармоник тока по IEEE 519.

Соотношения индикаторов, чьи значения превысили уставки, указывает на природу дефекта: дефект ротора или статора и его тип.

Для проверки методики использовался испытательный двигатель 220 В, 7 А, 2 л.с., на котором имитировались:

- неисправность изоляции статора замыканием соседних витков обмотки,
- механический дефект ротора высверливанием отверстия в роторе,
- дефект подшипника высверливанием отверстия во внешнем ободе подшипника,
- несоосность валов двигателя и нагрузки.

Выполненные дефекты показаны на изображении ниже.



Дефекты двигателя: а) неисправность изоляции статора, б) механический дефект ротора, с) дефект подшипника, д) несоосность

В заключении исследования указывается, что результаты испытаний показали хорошую точность определения аномальных состояний и дефектов двигателя, превышающую точность диагностики двигателя по данным только вибрации и мониторинга электрических параметров.

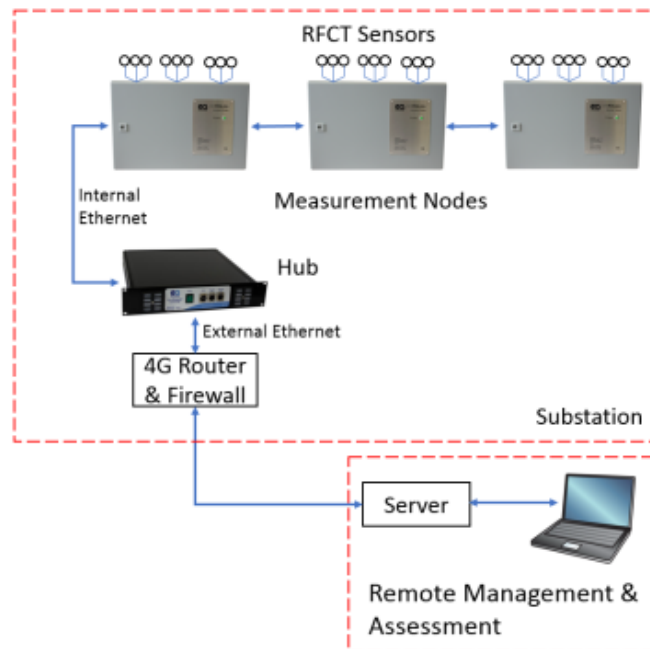
Опыт онлайн-мониторинга сети высоковольтных кабелей

Источник: G. Earp, J. Burns Asset Management of HV Cables on an Electricity Distribution Network Using On-line Condition Monitoring. CIREN 2019 Conference Proceedings

<https://www.cired-repository.org/handle/20.500.12455/50>

В своём докладе, представленном на конференции CIREN 2019, работники Североирландской электросетевой компании (NIE Networks) поделились опытом онлайн-мониторинга ЧР в подземных кабелях 33 кВ.

Системы онлайн-мониторинга кабелей установлены на ряде подстанций NIE Networks. Типовая структура одной системы мониторинга показана на изображении ниже.



Типовая структура системы онлайн-мониторинга кабелей

Данные об активности ЧР снимаются при помощи высокочастотных трансформаторов тока, устанавливаемых на выводы экранов кабелей. Данные с трансформаторов тока оцифровываются измерительными модулями, которые, в свою очередь, соединены с хабом, в котором выполняется обработка и хранение данных. К каждому хабу подключен 4G-модем для передачи данных и удалённого контроля. Примеры установленного оборудования системы показаны на изображениях ниже.



Высокочастотные трансформаторы тока, установленные на вывод заземления кабеля



Модули сбора



Хаб

Данные от хабов передаются на центральный сервер NIE Networks по выделенным каналам передачи данных, не связанным с производственной или офисными сетями компании.

Для анализа данных используются несколько критериев активности ЧР:

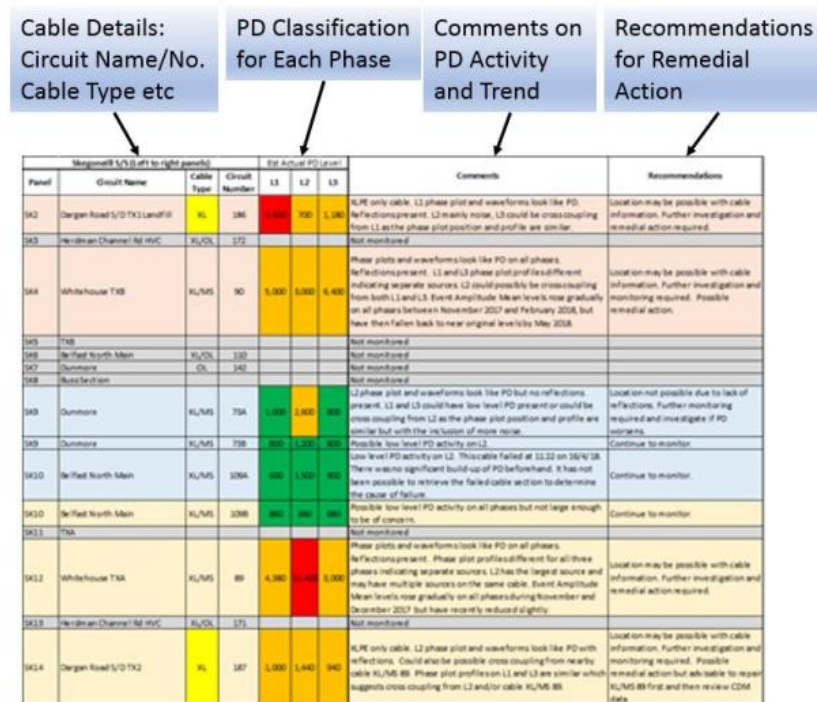
- средняя амплитуда ЧР за каждые 2 минуты измерений;
- PRPD-распределения;
- осциллограмма импульсов ЧР.

Для идентификации ЧР в кабеле используются граничные значения, показанные в таблице ниже.

| PD Level | XLPE | | PILC | |
|---------------------------------|------------------------|-------------|---------------|----------------|
| | Cable | Accessories | Cable | Accessories |
| Acceptable - no action required | PD Free | 0-500pC | 0-2,500pC | 0-4000pC |
| Some concern - monitor | <500pC Ideally PD free | 500-2,500pC | 2,500-7,000pC | 4,000-10,000pC |
| Major concern - investigate | >500pC | >2,500pC | >7,000pC | >10,000pC |

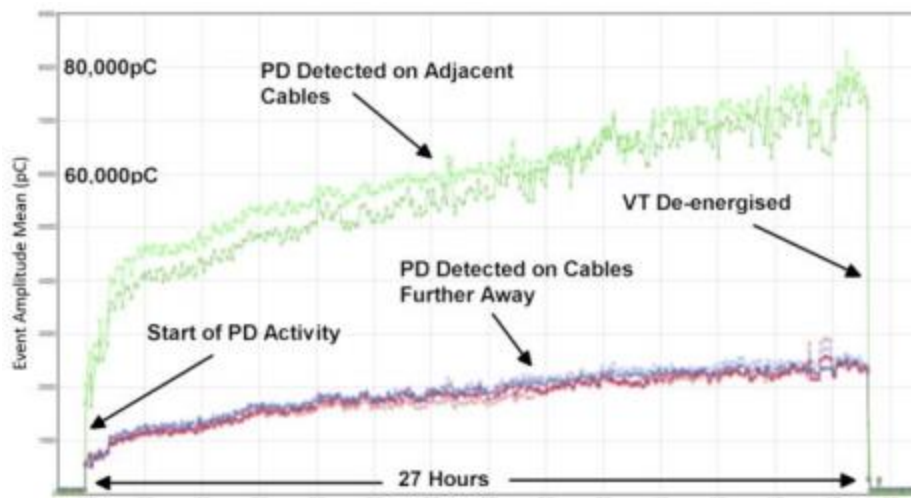
Граничные значения активности ЧР для двух типов кабелей

Пример отображения данных оператору показан ниже. Для указания на критичность развивающегося дефекта используются цветовая маркировка.



Отображение данных оператору

Один из кейсов работы системы показан на графике ниже.



Изменение средней амплитуды импульсов за 27 часов

На графике виден момент резкого роста амплитуды ЧР на нескольких соседних кабелях. При анализе PRPD-распределений было выяснено, что распределения имеют форму, не характерную для дефектов в кабелях, что могло означать, что источник ЧР находился в распредустройстве.

После выезда инженера на объект было выполнено исследование активности ЧР при помощи портативного прибора, который определил высокий уровень ЧР на одном из трансформаторов напряжений. Трансформатор был выведен из работы, после чего уровень ЧР на кабелях резко упал, что показано на графике выше. Это подтвердило наличие источника ЧР в трансформаторе напряжения.

Мониторинг состояния подшипников по расширенному набору гармоник с применением способа снижения размерности входных данных

Источник: Duque-Perez, O.; Del Pozo-Gallego, C.; Morinigo-Sotelo, D.; Fontes Godoy, W. *Condition Monitoring of Bearing Faults Using the Stator Current and Shrinkage Methods. Energies* 2019, 12, 3392

<https://www.mdpi.com/1996-1073/12/17/3392>

В опубликованной в издании MDPI Energies в сентябре 2019 года статье группа исследователей из Испании и Бразилии предложила доработать традиционный метод диагностики подшипников качения двигателей при помощи анализа спектра тока статора.

Традиционно в таком методе диагностике используется набор характерных гармоник с частотами качения по наружному кольцу подшипника, внутреннему кольцу, фундаментальной групповой частоте, частоте перекачивания тел качения (BPFO, BPFI, FTF, BSF). В анализе также используется ограниченное количество гармоник с частотами, кратными BPFO, BPFI, FTF, BSF. Исследователи предложили расширить набор кратных гармоник до 11 от каждой из характерных частот и включить в анализ также 11 боковых полос каждой гармоники. Таким образом, число диагностических признаков составляло 968.

Такое большое количество признаков, в теории, с одной стороны, способно повысить качество определения развивающегося дефекта при помощи алгоритмов машинного обучения, но также и способно привести к излишнему повышению вычислительной сложности алгоритма и оверфиттингу: ситуации, когда алгоритм машинного обучения показывает крайне высокую точность на обучающей выборке, но плохо работает на любых данных, не включённых в обучающую выборку. С прикладной точки зрения такой подход позволит диагностировать двигатели с питанием не только напрямую от сети, но также и от инверторов напряжения и преобразователей частоты.

Для решения проблемы с оверфиттингом и большой размерностью входных данных исследователи применили используемые в машинном обучении методы снижения размерности входных данных: метод LASSO (оператор наименьшего абсолютного сжатия и выбора), метод регуляризации Тихонова и метод гибких сетей. В этих методах разными способами выполняется исключение ряда входных данных, имеющих малую ценность для выбранной задачи машинного обучения.

Для проверки предложенного способа использовался асинхронный двигатель характеристиками 0,75 кВт, 400 В, 1395 об/мин. Испытания проводились в двух режимах нагрузки двигателя: с почти нулевой нагрузкой и с высокой нагрузкой, и в четырёх режимах питания двигателя:

- S1 – питание от сети 50 Гц;
- S2 – питание от преобразователя частоты при номинальной рабочей частоте 50 Гц и частоте переключений 4 кГц;
- S3 – питание от преобразователя частоты при номинальной рабочей частоте 25 Гц и частоте переключений 4 кГц;
- S4 – питание от преобразователя частоты при номинальной рабочей частоте 50 Гц и частоте переключений 5 кГц.

При испытаниях также менялось состояние подшипника двигателя:

- C1 – здоровое состояние;
- C2 – начальная стадия дефекта;

- С3 – средняя стадия дефекта;
- С4 – стадия развившегося дефекта;
- С5 – поломка.

Разные стадии развития дефекта подшипника достигались различным уровнем загрязнения смазки подшипника и включением двигателя на 12 часов для достижения устойчивого уровня дефекта. Изображения подшипника с дефектами различных стадий показано ниже.



Различные стадии дефекта подшипника

Обработка результатов проводилась с помощью пакета машинного обучения в составе Matlab 2019a.

Собранные данные сначала были обработаны различными алгоритмами классификации без уменьшения размерности, т.е. для анализа использовались все 968 диагностических признаков каждого замера. Результаты классификации дефекта были сравнены с результатами классификации на основе традиционного подхода, где использовалось 8 диагностических признаков (4 характерные частоты с 1 боковой частотой). Результаты классификации дефекта и сравнения методов показаны в таблице ниже.

| Supply Identification | Load | Best Accuracy 968 Fault Signatures | Best Algorithm 968 Fault Signatures | Best Accuracy 8 Fault Signatures | Best Algorithm 8 Fault Signatures |
|-----------------------|------|------------------------------------|-------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| S1 | Low | 95.7% | KNN ¹ | 40% | SVM ² |
| | High | 92.9% | SVM ² | 40% | SVM ² |
| S2 | Low | 88.6% | SVM ² | 32.9% | BT ⁵ |
| | High | 98.6% | SVM ² | 44.3% | BT ⁵ |
| S3 | Low | 81.4% | BT ⁵ | 41.4% | SVM ² |
| | High | 97.1% | LD ⁴ | 60% | KNN ¹ |
| S4 | Low | 85.7% | LD ⁴ | 41.4% | SVM ² |
| | High | 98.6% | BT ⁵ | 42.9% | SVM ² |

Результаты классификации типа дефекта для разных типов питания (S1, S2, S3, S4), разной нагрузки (High, Low). Показаны точность классификации и алгоритм машинного обучения, с помощью которого она была достигнута (KNN – k-ближайших соседей, SVM – метод опорных векторов, LD – линейный дискриминант, BT – деревья решений с бэггингом)

Из результатов видно, что общее качество определения дефекта выше при использовании расширенного набора диагностических признаков. Наиболее применимый алгоритм классификации выявить не удалось, поскольку для разных условий разные алгоритмы показывали наилучшие результаты, что является недостатком подхода без уменьшения размерности.

Аналогичные результаты с использованием методов снижения размерности показаны ниже.

| Supply Identification | Load | Lasso | Elastic Nets | Ridge Regression |
|-----------------------|------|-------|--------------|------------------|
| S1 | Low | 100 | 100 | 100 |
| | High | 90.48 | 90.48 | 85.71 |
| S2 | Low | 95.24 | 90.48 | 80.95 |
| | High | 95.24 | 100 | 100 |
| S3 | Low | 80.95 | 76.19 | 76.19 |
| | High | 90.48 | 95.24 | 95.24 |
| S4 | Low | 90.48 | 80.95 | 85.71 |
| | High | 100 | 95.24 | 85.71 |

Результаты классификации с уменьшением размерности методам LASSO, гибких сетей (elastic nets) и регуляризации Тихонова (ridge regression).

Каждый из методов уменьшения размерности дал приемлемые результаты. Как указано в исследовании, наибольший интерес представляет метод LASSO, поскольку с помощью него получается построить более простые и интерпретируемые модели машинного обучения.

Разработка цифрового двойника для мониторинга состояния электрических погружных насосов

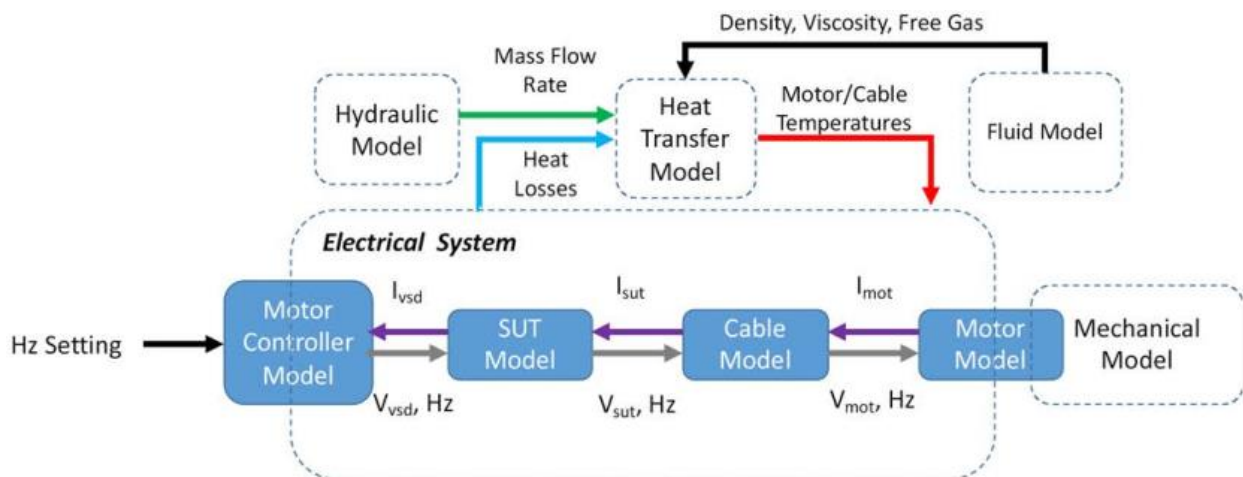
Источник: Lastra, R. (2019, November 11). *Electrical Submersible Pump Digital Twin, the Missing Link for Successful Condition Monitoring and Failure Prediction*. Society of Petroleum Engineers. doi:10.2118/197156-MS

<https://www.onepetro.org/conference-paper/SPE-197156-MS>

В докладе, представленном в ноябре 2019 года на Abu Dhabi International Petroleum Exhibition & Conference, сотрудники национальной нефтяной компании Саудовской Аравии Saudi Aramco поделились опытом разработки цифрового двойника электрического погружного насоса, используемого в нефтяной индустрии.

Модель состоит из нескольких систем, моделируемых по отдельности и обменивающимися данными.

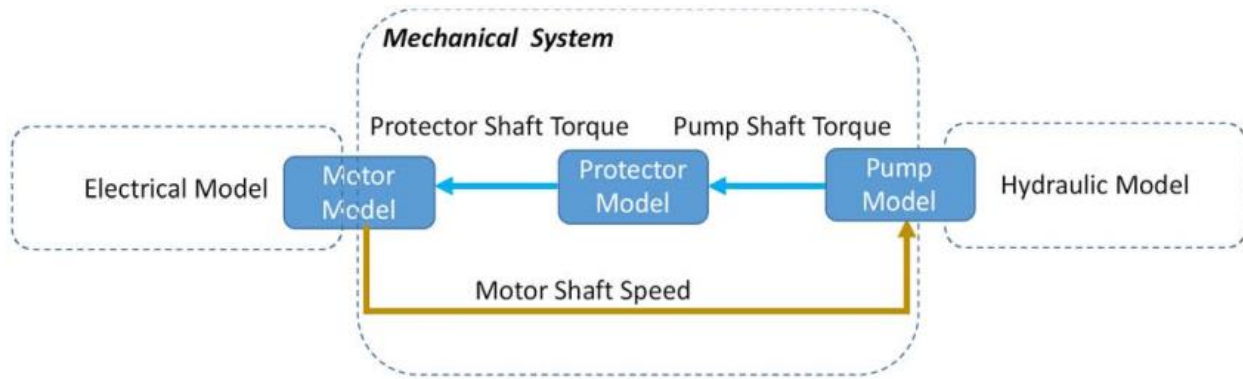
Электрическая система объединяет модели регулятора скорости вращения насоса, повышающего трансформатора, кабеля и двигателя. На изображении ниже показана общая структура электрической системы.



Структура электрической системы цифрового двойника

В качестве входных сигналов в системе используются задание частоты и механического момента для двигателя. На схеме серым показаны связи по напряжению и фиолетовым – связи по токам между компонентами системы. Система напрямую связана с системой теплопередачи и механической системой для обмена данными о температуре насоса и механической нагрузке на валу двигателя.

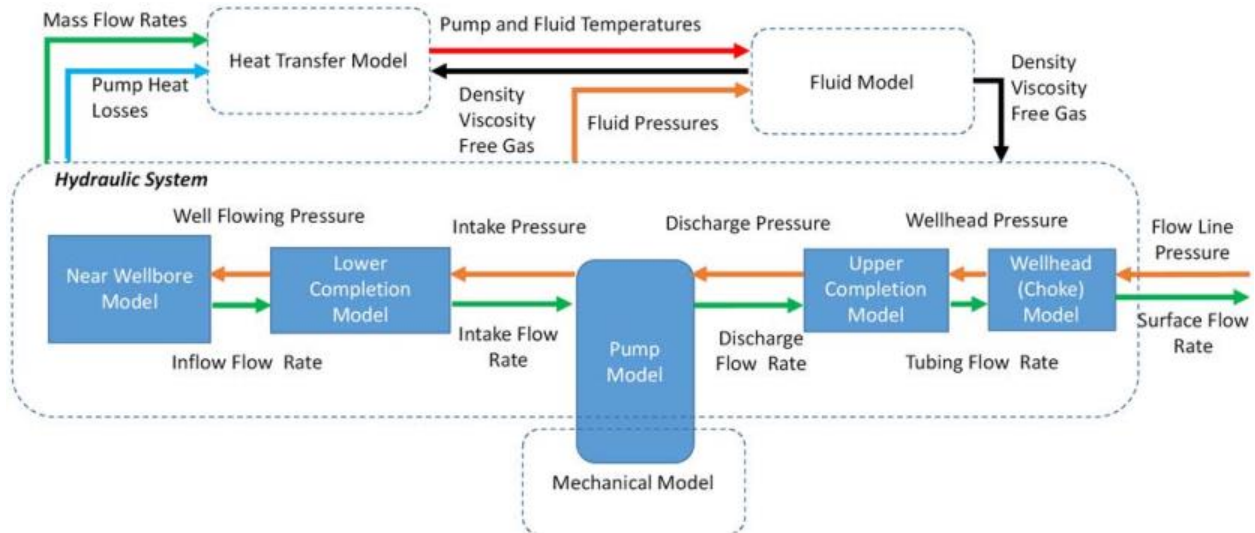
Структура механической системы показана ниже.



Структура механической системы

Основными элементами механической системы являются двигатель, муфта и центробежный насос. Синими стрелками показаны перетоки механической мощности. Сигнал скорости двигателя передаётся к модели насоса, который формирует сигнал механической нагрузки, которая через муфту передаётся модели двигателя, после чего скорость вращения двигателя корректируется. Процесс повторяется по замкнутому циклу до тех пор, пока параметры не выравняются. Механическая система служит источником входных данных для электрической, а также обменивается сигналами скорости насоса и гидравлической нагрузки с гидравлической системой.

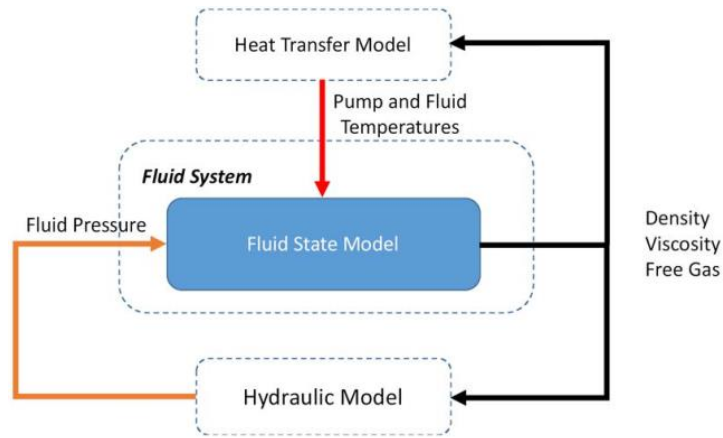
Структура гидравлической системы показана на изображении ниже.



Структура гидравлической системы

Гидравлическая система содержит модели ствола, устья, нижнего и верхнего заканчивания скважины, в которой работает насоса, а также самого насоса. Связи между моделями по давлению показаны оранжевым, по потоку – зелёным. Система служит источником входных данных для механической системы и взаимодействует с системой теплопередачи и жидкостной системой.

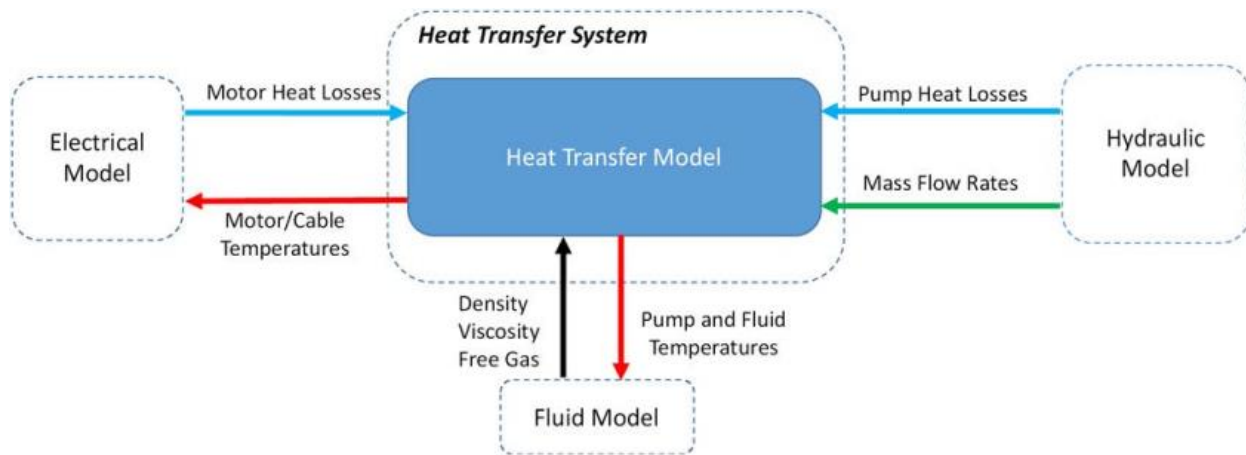
Структура жидкостной системы показана на изображении ниже.



Структура жидкостной системы

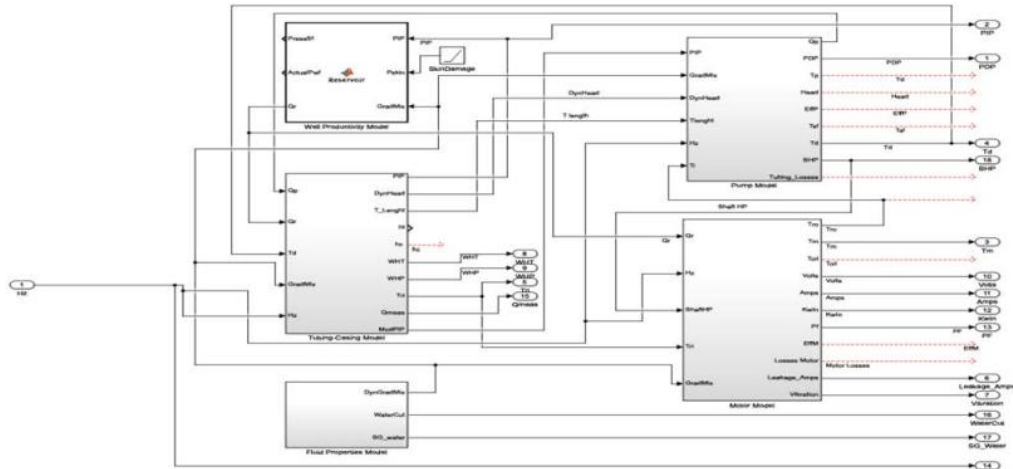
Система использует сигналы давления и температуры в качестве входных и возвращает свойства жидкости при заданных условиях. Жидкостная система служит источником входных данных для механической системы и системы теплопередачи.

Структура системы теплопередачи показана на изображении ниже.



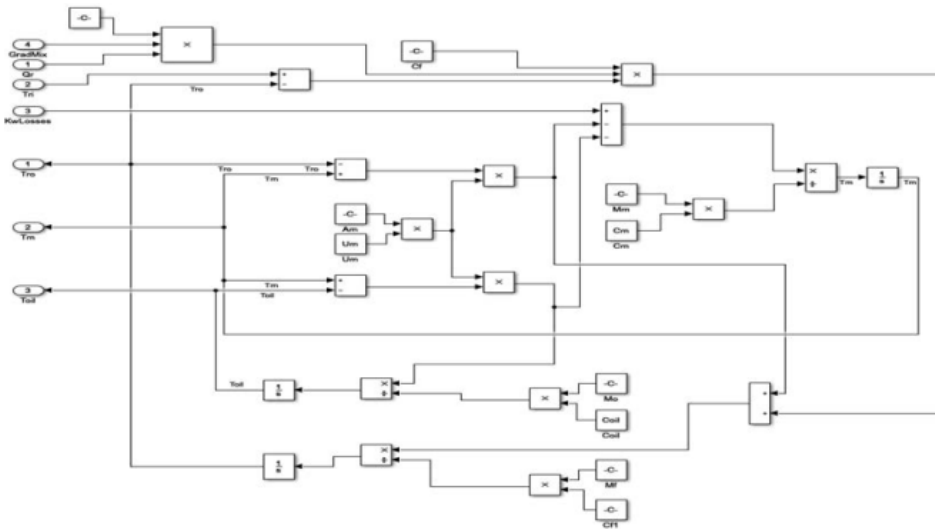
Структура системы теплопередачи

Моделирование систем, входящих в цифровой двойник, выполняется в среде Simulink. На изображении ниже показана общая верхнеуровневая структура двойника. Каждый блок на схеме соответствует отдельной системе. Стрелками показаны связи между системами.



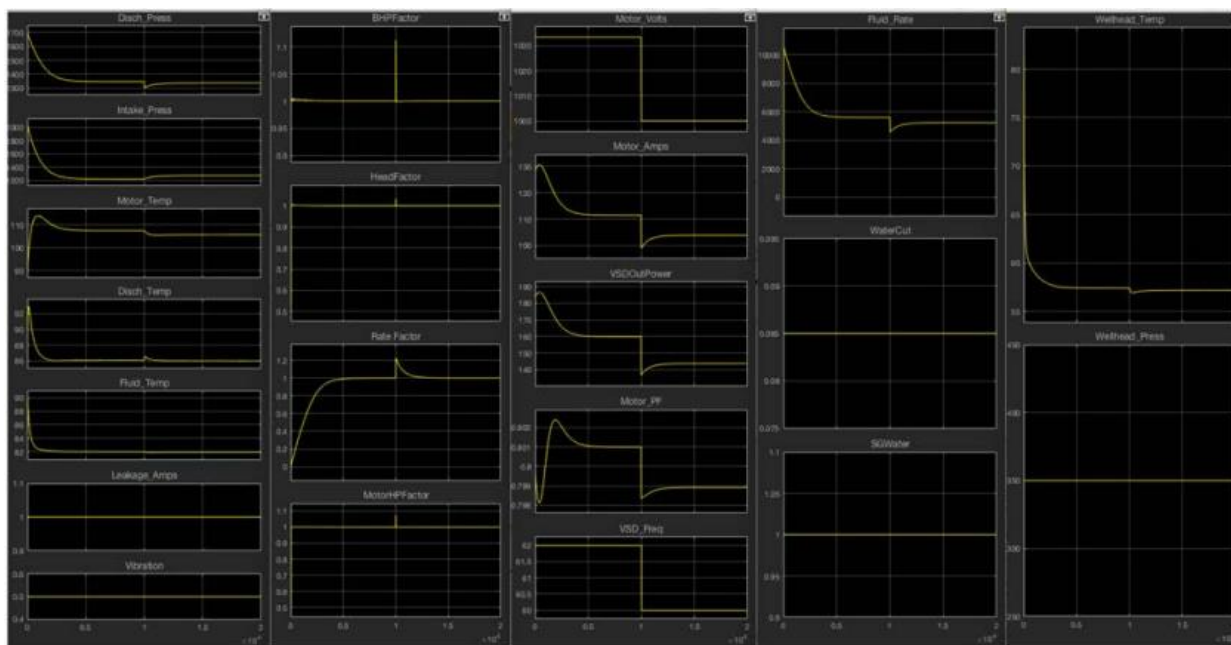
Верхнеуровневая структура двойника

Пример реализации симуляции одного блока показан на изображении ниже на примере блока, соответствующего системе теплопередачи. Блоки в симуляции решают отдельные дифференциальные уравнения, описывающие процесс теплопередачи, а связи между ними показывают направления обмена данными.



Пример реализации блока системы теплопередачи

Пример интерфейса, на котором отображаются различные параметра насоса, показан на изображении ниже.



Пример интерфейса

Помимо указанных выше систем, в состав цифрового двойника также входят:

- модуль калибровки параметров двойника,
- модуль масштабирования для подстройки параметров двойника для заданных параметров насоса или скважины,
- модуль генерации скважины для генерации параметров виртуальной скважины,
- модуль генерации отклонений от нормального режима работы для исследования режимов неисправности насоса.

Основной ценностью разработанного цифрового двойника является возможность исследования режимов работы насосов различных конфигураций. Двойник существенно упрощает разработку модулей искусственного интеллекта для управления насосами, поскольку для обучения можно использовать данные, сгенерированные двойником.

В заключении исследования также указывается, что разработка двойника продолжается. В частности, планируется увеличить степень проработки симуляции физических процессов в насосе и разработать прототип насоса для испытаний совместно с цифровым двойником.

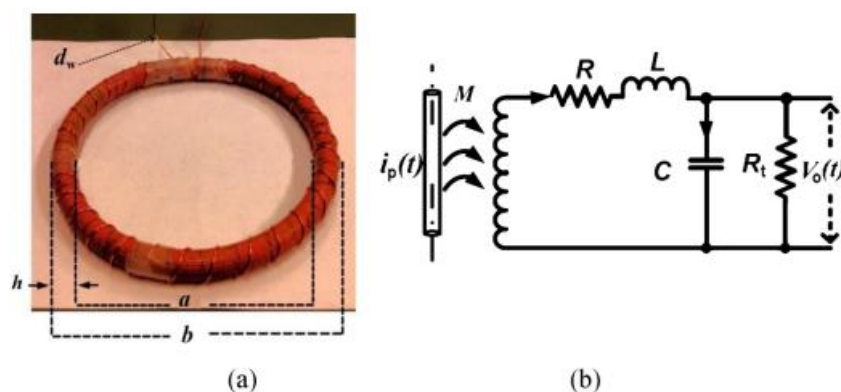
Разработка системы мониторинга кабелей при помощи датчиков на основе катушек Роговского

Источник: M. Shafiq, K. Kauhaniemi, G. Robles, M. Isa, L. Kumpulainen, *Online condition monitoring of MV cable feeders using Rogowski coil sensors for PD measurements*, *Electric Power Systems Research*, Volume 167, 2019, Pages 150-162, ISSN 0378-7796

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378779618303614>

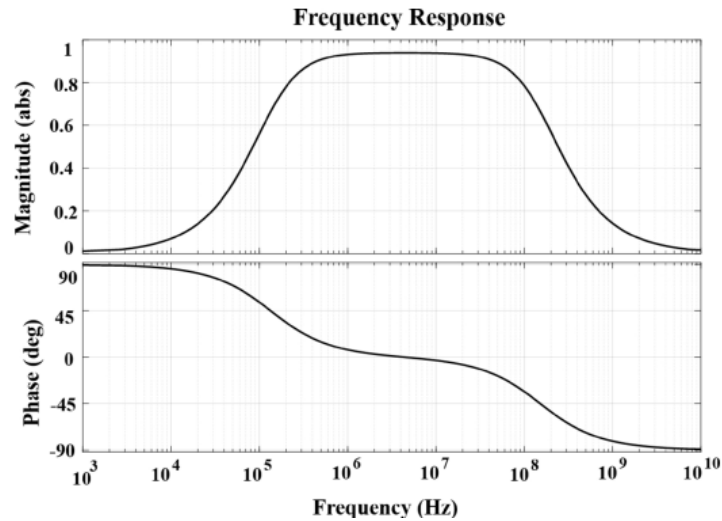
Объединённая группа исследователей из Испании, Финляндии и Малайзии разработала прототип системы мониторинга кабелей среднего напряжения по активности ЧР, где данные собираются при помощи специально разработанных датчиков на основе катушек Роговского. Соответствующая статья была опубликована в издании *Electric Power Systems Research* в феврале 2019 года.

Для исследования характеристик такого датчика исследователи использовали модель катушки Роговского, показанную на изображении ниже.



Модель катушки Роговского

В частности, применимость датчика определяется коэффициентом усиления и шириной частотного диапазона регистрируемых импульсов. В исследовании решалась задача оптимизации величины произведения коэффициента усиления и ширины частотного диапазона в зависимости от параметров датчика, указанных на изображении выше: внутреннего и внешнего диаметров (a и b), толщины h и других. Задача была решена алгоритмами роевого интеллекта, в результате чего были определены параметры катушки Роговского, наиболее подходящими для решаемой задачи. Частотные характеристики разработанного датчика показаны на изображении ниже.



Частотные характеристики датчика

Для мониторинга распределённой сети кабелей среднего напряжения исследователи предложили использовать свойство катушек Роговского, заключающееся в способности определять место происхождения ЧР – до или после места установки датчика – по полярности детектируемых импульсов. Это позволяет расставить датчики в разных точках кабельной сети и определять повреждённый участок сравнивая амплитуды сигналов, определённый каждой парой датчиков. После идентификации дефектного участка выполняется определение и локализации типа дефекта при помощи время-частотной рефлектометрии и анализа времён прихода импульсов. Общий подход к мониторингу при помощи датчиков, предложенных исследователями, показан на изображении ниже.



Схема мониторинга кабельной сети

В исследовании также отмечается, что предложенный подход можно комбинировать с другими методами определения и локализации ЧР в кабелях и трансформаторах.

Опыт разработки цифрового двойника гидрогенератора

Источник: C. Moussa, K. Ai-Haddad, B. Kedjar and A. Merkhoul, "Insights into Digital Twin Based on Finite Element Simulation of a Large Hydro Generator," *IECON 2018 - 44th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Washington, DC, 2018*, pp. 553-558, doi: 10.1109/IECON.2018.8591653.

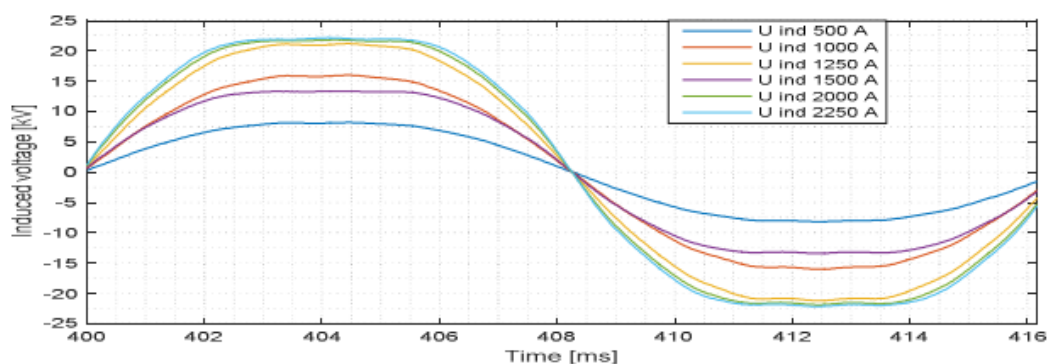
<https://ieeexplore.ieee.org/document/8591653>

В докладе, представленном на ежегодной конференции IEEE Industrial Electronics Society в 2018 году группа исследователей из Канады представила опыт разработки и анализа результатов цифрового двойника крупного гидрогенератора мощностью 310 МВА.

Модель генератора была описана уравнениями Максвелла, описывающими характеристики связанных электрического и магнитного полей. Система уравнений Максвелла, описывающая генератор, решалась при помощи метода конечных элементов. Отдельно моделировалась внешняя цепь генератора для описания его работы в режимах недовозбуждения и перевозбуждения.

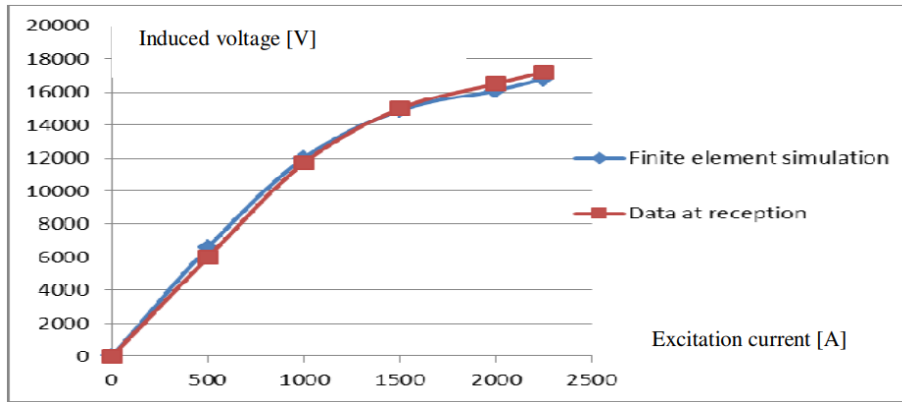
Для проверки точности моделирования генератора исследователи использовали данные испытаний аналогичного генератора при его испытаниях без нагрузки и в режиме короткого замыкания.

В режиме без нагрузки ток возбуждения менялся от 0 до 2 250 А в шесть шагов. Результаты моделирования напряжения генератора при разных токах возбуждения показаны на изображении ниже.



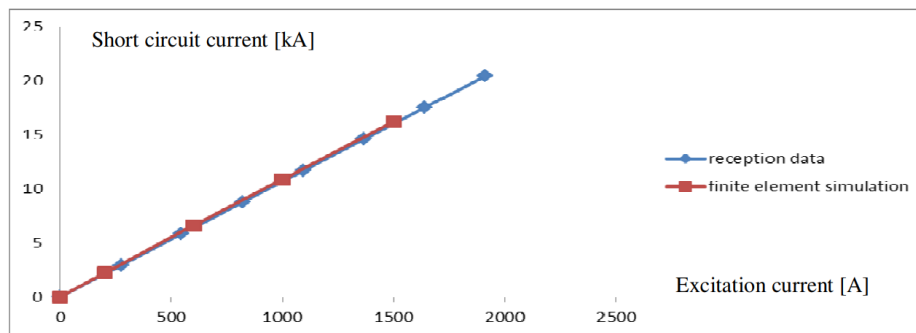
Сравнение смоделированного и измеренного напряжения генератора при разных токах возбуждения в режиме без нагрузки

Результаты сравнения зависимости напряжения генератора от тока возбуждения при моделировании и фактическом измерении показаны на изображении ниже. Максимальное расхождение составило 5%.



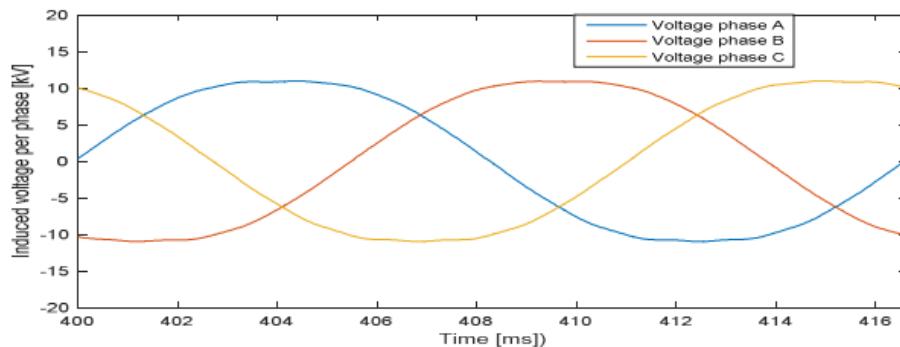
Зависимость напряжения генератора от тока возбуждения при моделировании и фактическом измерении в режиме без нагрузки

Ещё большая точность моделирования была получена для режима короткого замыкания. Зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения при моделировании и фактическом измерении показана на изображении ниже.



Зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения при моделировании и фактическом измерении

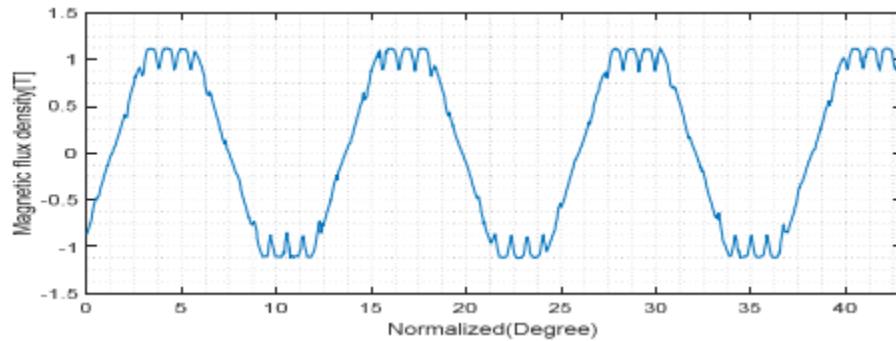
При моделировании установившегося режима работы генератора его напряжение отличалось всего на 3.62% от номинального. Смоделированные фазные напряжения генератора показаны на изображении ниже.



Смоделированные фазные напряжения генератора

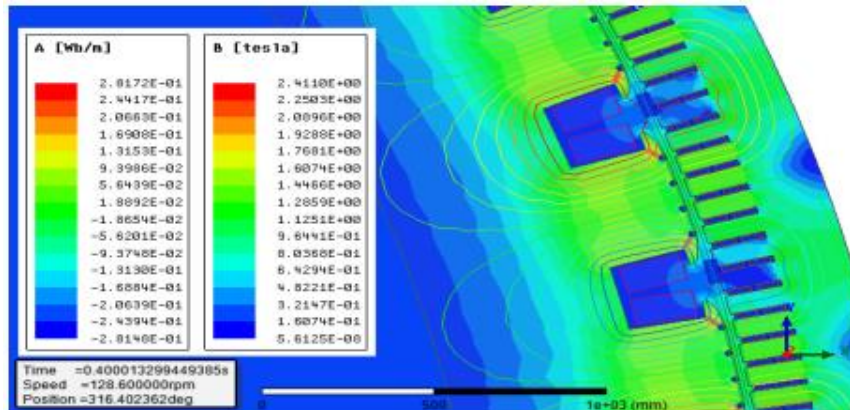
На изображении ниже показаны результаты моделирования плотности магнитного потока в воздушном зазоре в зависимости от геометрического угла между направлением на вал генератора

и вертикалью при работе генератора без нагрузки. Распределение магнитного потока повторяет геометрию статора.



Результаты моделирования магнитного потока

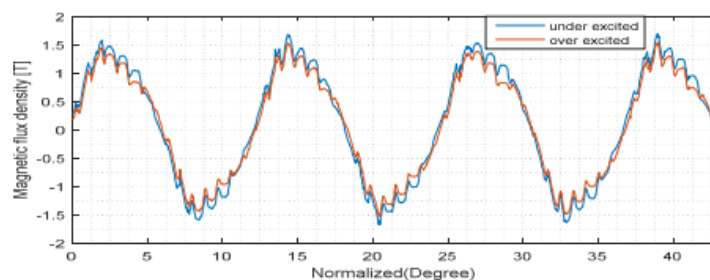
На изображении ниже показаны результаты моделирования поля плотности магнитного потока. Максимального значения, 1.3168 Т, плотность магнитного потока достигает на полюсах.



Результаты моделирования поля плотности магнитного потока

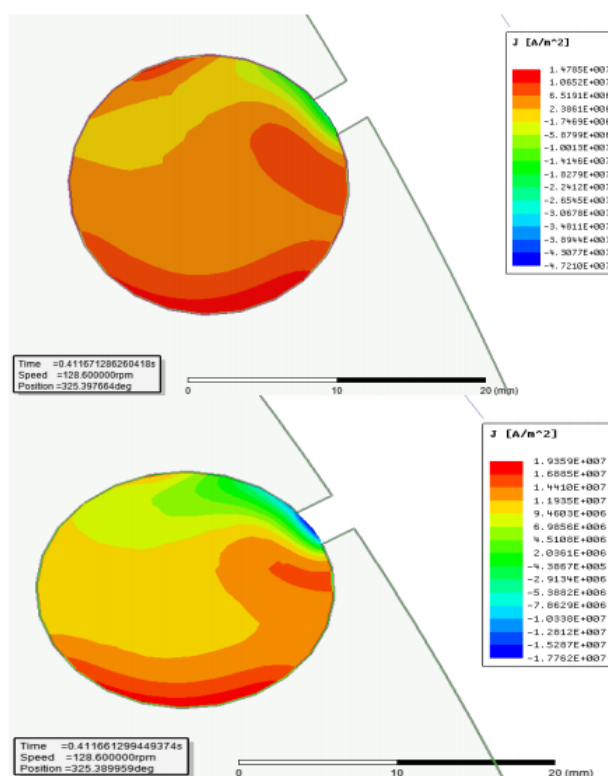
На изображении ниже показаны результаты моделирования момента на валу генератора в номинальном режиме работы. Момент достигает максимального отрицательного значения -21.64 МН·м. Данный момент, вызванный взаимодействием тока якоря и тока возбуждения генератора, препятствует вращению генератора и поэтому имеет отрицательное значение. Теоретическое значение момента для такого типа генератора составляет 21.87 МН·м, что говорит о точности моделирования.

Результаты моделирования плотности магнитного потока при работе генератора в режимах недовозбуждения и перевозбуждения показаны на изображении ниже. Искажение кривой вызвано реакцией якоря генератора.



Результаты моделирования плотности магнитного потока при работе генератора в режимах недовозбуждения и перевозбуждения

Также интерес представляло распределение плотности тока в стержнях демпферной обмотки. Результаты моделирования в режимах недовозбуждения и перевозбуждения показаны на изображении ниже.



Результаты моделирования распределения плотности тока в стержнях демпферной обмотки в режимах недовозбуждения (выше) и перевозбуждения (ниже)

Результаты моделирования показывают, что ток имеет несинусоидальный характер. Анализ спектра тока показывал наличие фундаментальной гармоники на частоте 1080 Гц. Величина тока в стержне при недовозбуждении более чем на 11% превышает его значение в номинальном режиме, при перевозбуждении – более чем на 20%.

В заключении исследования указывается, что авторы планируют расширить разработанную модель и сделать её применимой для более широкого диапазона генераторов.

Анализ разрядной активности ЧР в статорной обмотке 50-летнего гидрогенератора

Источник: G. Berg, E. Eberg and S. Hvidsten, "Partial Discharge Characterisation of Stator Windings Taken from a 50-year-old Norwegian Hydrogenerator," 2019 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC), Calgary, AB, Canada, 2019, pp. 168-171, doi: 10.1109/EIC43217.2019.9046527.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9046527>

В статье, представленной на 2019 Electrical Insulation Conference, специалисты консалтинговой компании Sintef Energy Research представили результаты исследования характеристик ЧР в гидрогенераторе мощностью 95 МВА и напряжением 13 кВ, который находился в эксплуатации в течение 52 лет на одной из электростанций в Норвегии и был демонтирован во время проекта модернизации электростанции. Генератор имел 14 полюсов с 192 пазами и двумя слоями стержней обмотки. Схема статорной обмотки генератора показана на изображении ниже.

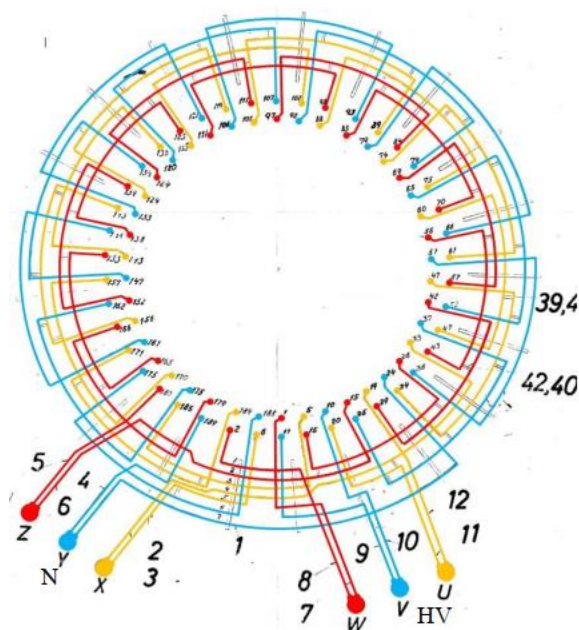
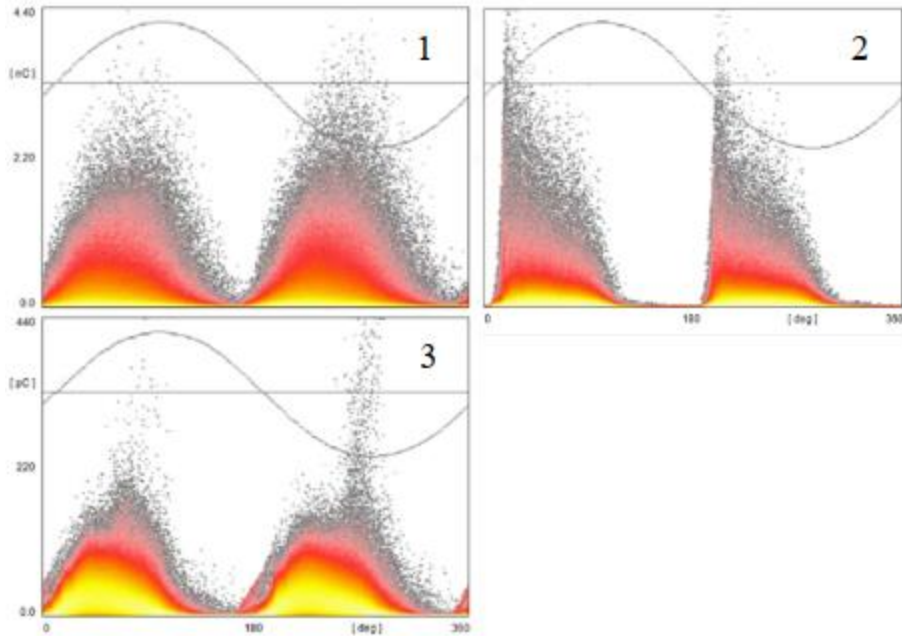


Схема статорной обмотки генератора

Во время жизни генератора признаки дефекта не проявлялись, но после визуального осмотра после демонтажа были обнаружены следы поверхностных разрядов в лобовой части статорной обмотки.

Далее клинья статора были демонтированы и часть стержней обмотки была вытащена из статора для испытаний на активность ЧР. Всего испытания проводились на 163 стержнях. Во время испытаний на них подавалось напряжение 9 кВ, 50 Гц. Данные снимались в измерительной схеме по МЭК 60270 с использованием конденсаторов ёмкостью 800 пФ. Стержни были дополнительно закреплены в направляющих, имитирующих корпусную изоляцию статора.

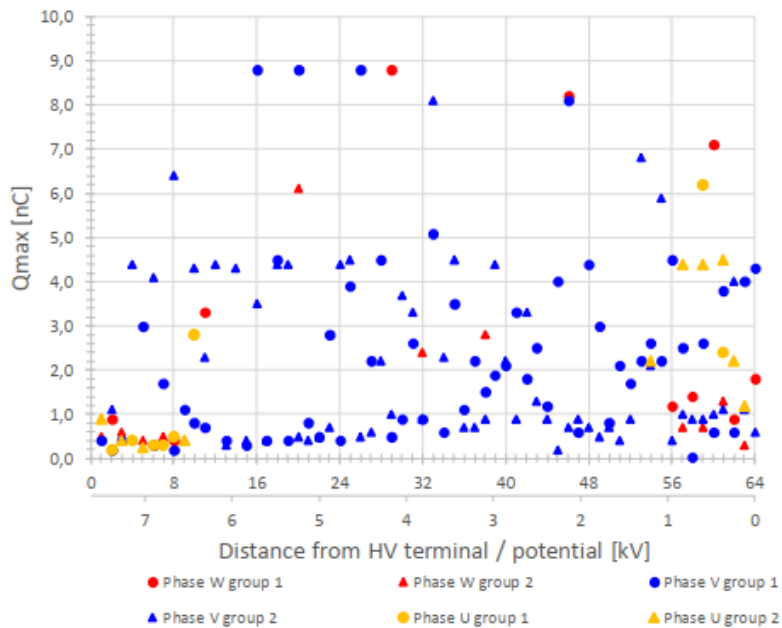
Результаты испытаний показали, что для большинства стержней напряжение появления ЧР было от 5 до 6 кВ. Записанные PRPD-распределения можно было разделить на три категории, показанные на изображении ниже.



Типы PRPD-распределений, записанных при испытаниях

Первая категория соответствует разрядам в пустотах в корпусной изоляции, вторая пазовым разрядам, вероятной причиной распределения третьего типа были разряды между стержнями.

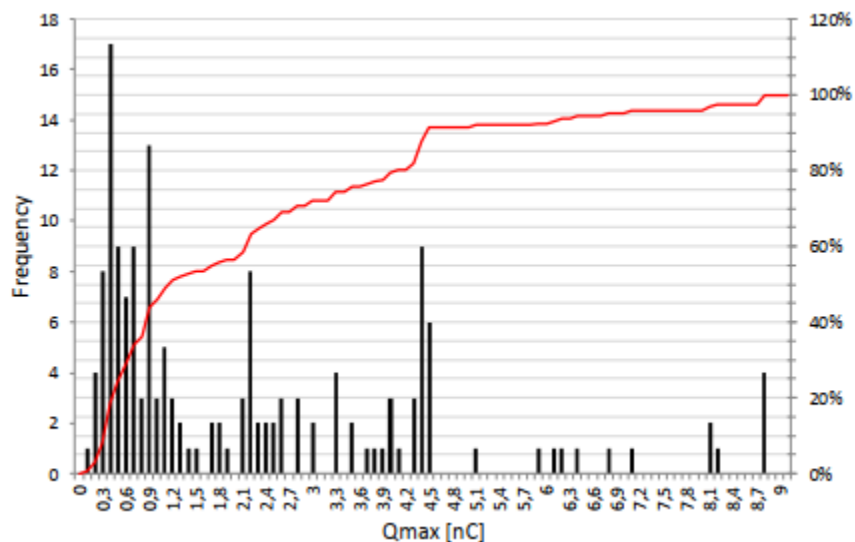
Результаты испытаний всех стержней показаны на изображении ниже, где представлен график зависимости величина Q_{max} от расстояния места размещения стержня от фазных выводов или напряжения стержня.



Результаты измерений

Из распределения видно отсутствие корреляции между амплитудой разряда и местоположением стержня при нормальной работе генератора. Это говорит о том, что активность ЧР не является мерой электрического старения стержней.

Распределение уровня Q_{max} по числу стержней показано на изображении ниже.



Распределение Q_{max} по числу стержней (красная линия) и частота появления заданного уровня Q_{max}

При дальнейшем исследовании активности ЧР, включая анализ данных, записанных при жизни генератора, было определено, что на одной из фаз присутствовали признаки поверхностного разряда в лобовой части. Это говорит о том, что к результатам сравнения данных лабораторных испытаний и испытаний при работе генератора нужно относиться с осторожностью.

Как указано в заключении исследования, существенной разницы в активности ЧР между стержнями, подверженными высокому и низкому фазному напряжению, обнаружено не было. Испытания на активность ЧР отдельных стержней обмотки может не выявить отдельные типы дефектов генератора.

Опыт разработки системы мониторинга гидрогенераторов по измерениям магнитного потока и вибрации

Источник: Babić, Blagoje M.; Milić, Saša D.; Rakić, Aleksandar Ž.: 'Fault detection algorithm used in a magnetic monitoring system of the hydrogenerator', IET Electric Power Applications, 2017, 11, (1), p. 63-71, DOI: 10.1049/iet-epa.2016.0232

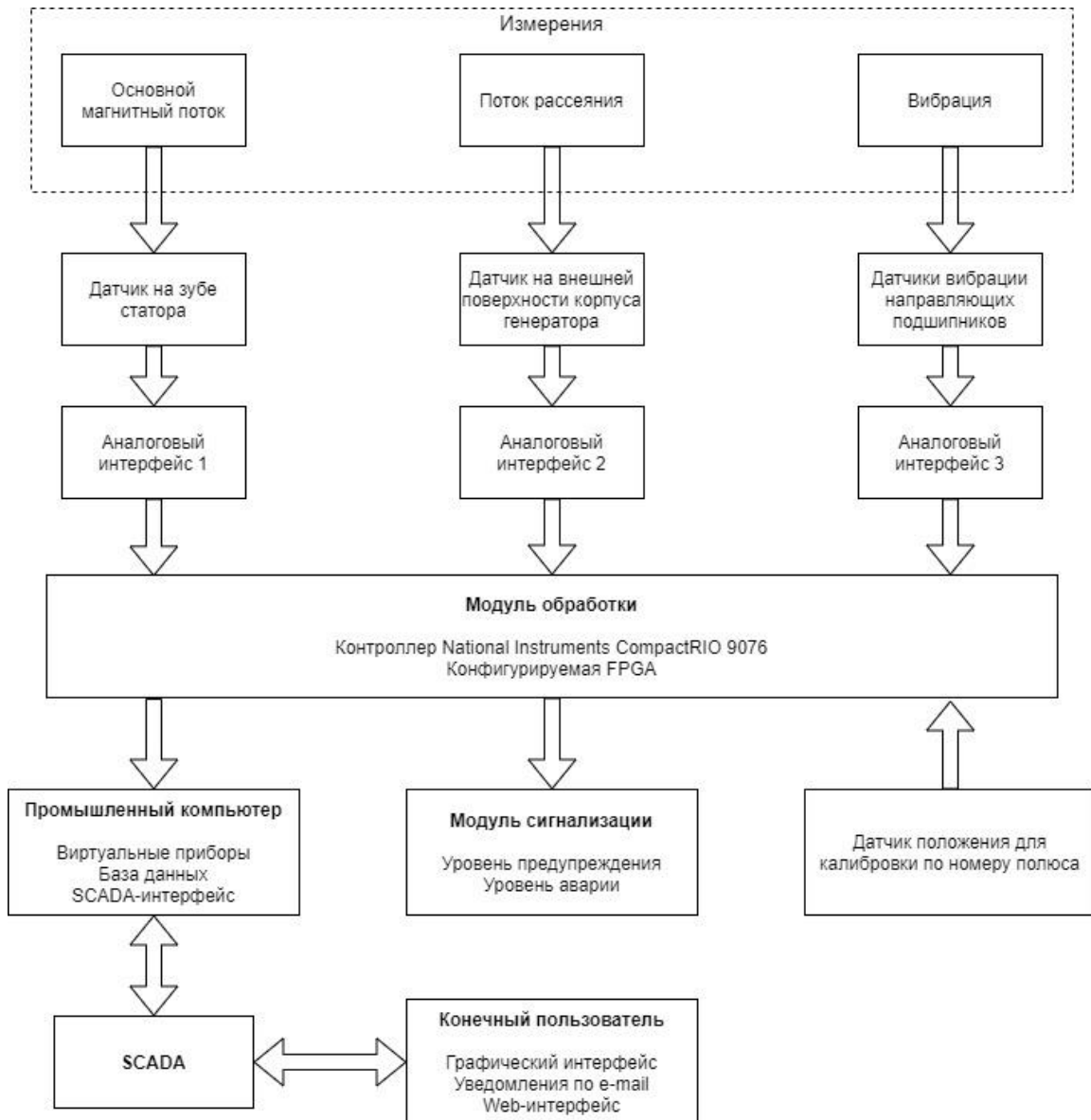
<https://digital-library.theiet.org/content/journals/10.1049/iet-epa.2016.0232>

В статье, опубликованной в январе 2017 года в издании IET Electric Power Applications, группа исследователей из Белградского университета в Сербии опубликовала опыт разработки и анализа результатов системы мониторинга гидрогенераторов, в которой использовались данные измерений магнитного потока и вибрации. При этом изменение магнитного потока производилось не только в воздушном зазоре генератора, а ещё и снаружи генератора.

Для мониторинга в системе используются:

- датчик основного магнитного потока в воздушном зазоре, устанавливаемый на зуб статора;
- датчик магнитного потока рассеяния, устанавливаемый на внешнюю поверхность корпуса статора;
- датчики вибрации направляющих подшипников генератора;
- датчик положения ротора, используемый для привязки измерений системы к номеру полюса ротора.

Структурная схема системы показана на изображении ниже.



Структурная схема системы

Принцип работы системы основан на одновременном анализе основного магнитного потока и потока рассеяния и дополнения результатов анализа обоих магнитных потоков результатами контроля уровня вибрации.

Анализ основного магнитного потока выполняется стандартным способом, применяемым в системах онлайн-контроля магнитного потока. Напряжение, наводимое в катушке датчика полюсами обмотки ротора при их прохождении над датчиком, на основе закона Фарадея пересчитывает в магнитный поток, создаваемый каждым полюсом. Наличие замкнутых витков в полюсе обмотки ротора будет приводить к снижению магнитного потока и наводимого в датчике напряжения. Отклонения величины магнитного потока каждого полюса от среднего магнитного потока ротора или от магнитного потока от соседних полюсов будет указывать на наличие магнитного небаланса ротора.

Анализ магнитного потока рассеяния выполняется при помощи Фурье-анализа и контроля коэффициента гармонических искажений. На наличие замкнутых витков обмотки ротора будет указывать повышение амплитуды высших гармоник в спектре сигнала датчика потока рассеяния.

Контроль вибрации направляющих подшипников выполняется для подтверждения результатов анализа магнитного потока. Развитие магнитного небаланса генератора, помимо изменений в магнитном потоке, также будет приводить и к повышению вибрации генератора.

Схема алгоритмов системы показана на изображении ниже.

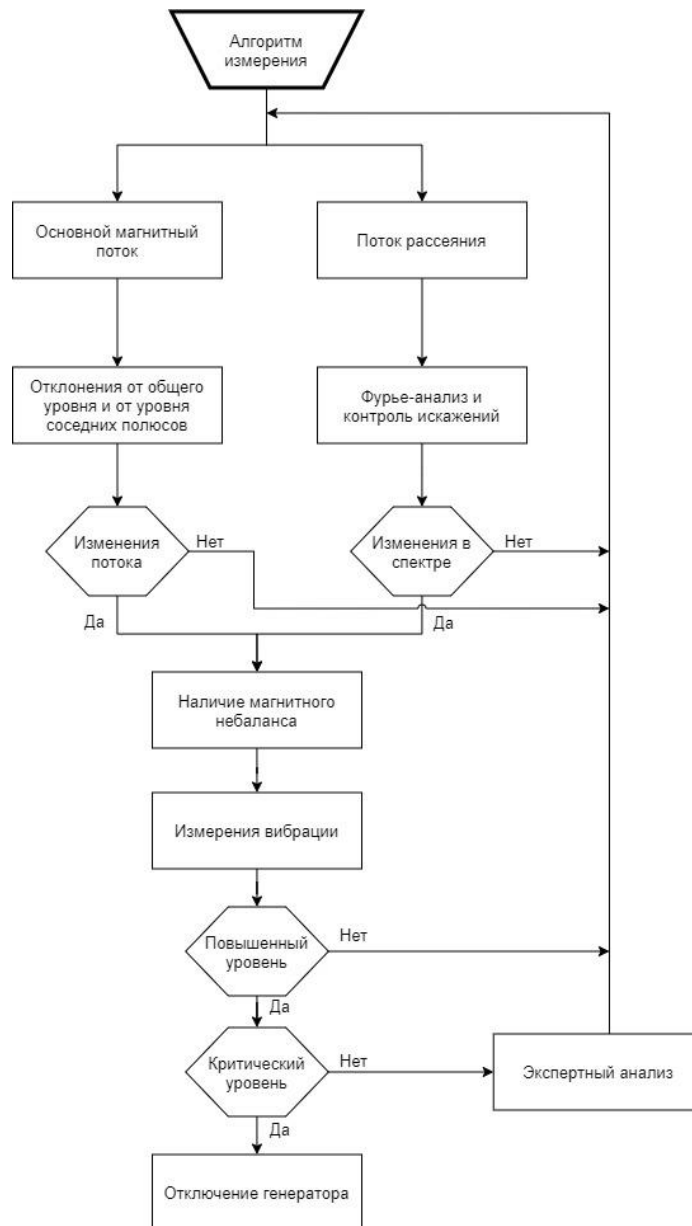


Схема алгоритмов системы

Система была опробована в эксплуатации на четырёх гидрогенераторах. Ниже приводятся результаты измерений на одном из них.

Генератор имел 12 полюсов, номинальную мощность 44.5 МВА и напряжение 10.5 кВ. Частота вращения ротора составляла 8.33 Гц. Результаты измерения основного магнитного потока показали явное наличие магнитного небаланса. Круговая диаграмма распределения магнитного потока по полюсам показана на изображении ниже.

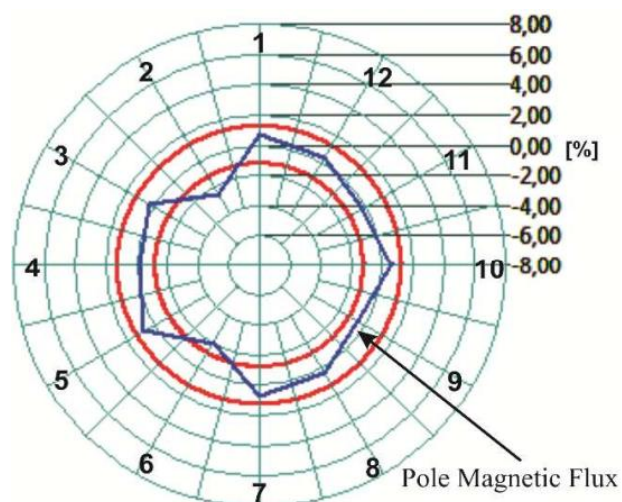


Диаграмма распределения магнитного потока. Синяя линия – уровень магнитного потока, красная – допустимые границы изменения магнитного потока при работе генератора

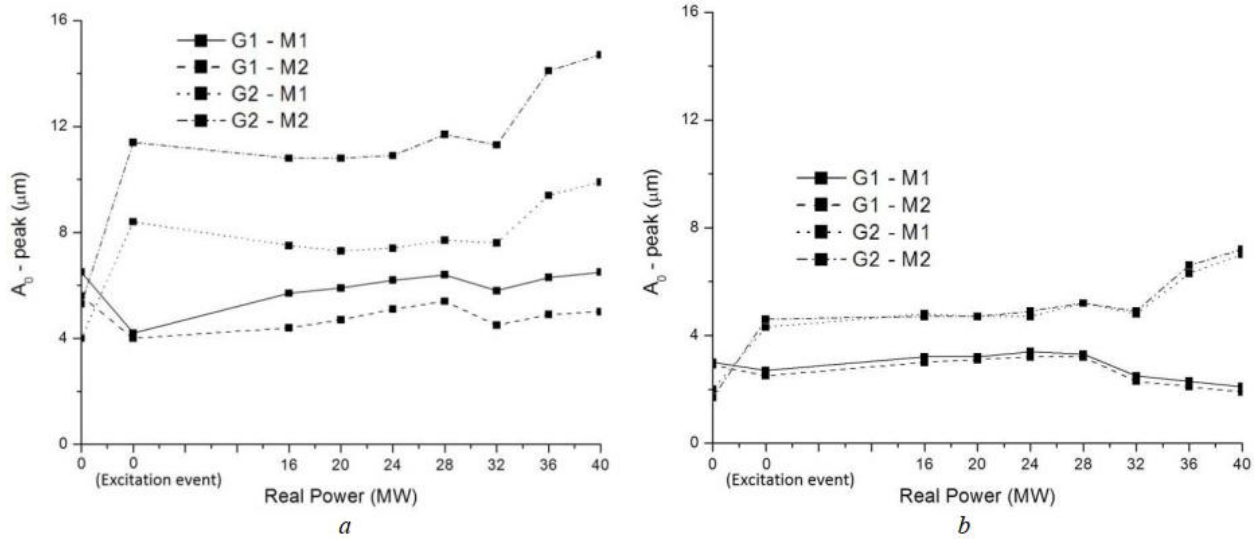
Результаты измерения амплитуд гармоник потока рассеяния, кратных частоте вращения ротора, показаны ниже. Данные приведены для двух генераторов, G1 и G2, рассматриваемым генератором является G2.

| Leakage flux | Normalized amplitude (db) | |
|--------------|---------------------------|--------|
| kf_r (Hz) | G1 | G2 |
| 8.33 | -66.37 | -60.53 |
| 16.66 | -67.8 | -46.39 |
| 25 | -57.28 | -37.43 |
| 33.33 | -51.53 | -40.41 |
| 41.66 | -50.89 | -40.07 |
| 50 | 7.34 | 8.47 |

Амплитуды гармоник потока рассеяния, кратных частоте вращения. Рассматриваемый генератор G2

Из распределений виден повышенный уровень кратных гармоник генератора G2 по сравнению с аналогичным генератором G1, что подтверждает вывод о наличии замкнутых витков обмотки ротора.

Сравнение уровня вибрации на генераторе G2 с уровнем на генераторе G1 во время пуска также подтвердило наличие проблемы. Графики изменения вибрации по двум взаимно перпендикулярным направлениям M1 и M2 показаны на изображении ниже.



Размах виброрассмещения двух генераторов G1 и G2 по двум взаимно перпендикулярным направлениям M1 и M2: а) верхнего подшипника, б) нижнего подшипника

В заключении статьи указано, что ценность мониторинга, проводимого системой, можно повысить установкой экземпляров системы на несколько гидрогенераторов одной электростанции и объединения систем в рамках одной информационной системы.