# Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 11 января 2021 года

---

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

1. Разработка системы мониторинга трансформатора на основе вибрации
2. Разработка системы визуального контроля воздушных линий при помощи беспилотных летательных аппаратов
3. Метод определения огибающей тока для идентификации наличия неисправных стержней двигателя
4. Новый способ определения мест повреждений по параметрам аварийного режима
5. Метод определения мест повреждений линий постоянного тока
6. Метод оценки остаточного ресурса при помощи интерполяции по принципу подобия
7. Определение дефектов роторов асинхронных двигателей в условиях анизотропии магнитных свойств
8. Новый метод анализа тока асинхронных двигателей для определения дефектов ротора
9. Определение загрязнения подшипников скольжения инородными частицами по сигналам акустической эмиссии и вибрации
10. Определение состояния ветрогенератора методами кластерного анализа
11. Способ разделения сигналов и локализации множественных источников разрядной активности в силовых кабелях

Подписывайтесь также на наш Телеграм или Твиттер или используйте электронную почту для связи.

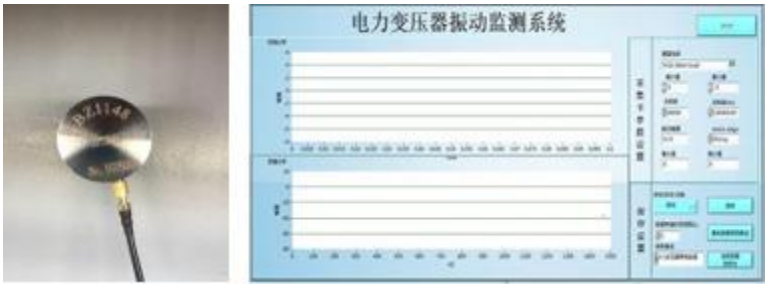
# Разработка системы мониторинга трансформатора на основе вибрации

*Источник: S. Yin et al., "Design of condition monitoring system for power transformer based on vibration signal," 2019 IEEE Sustainable Power and Energy Conference (iSPEC), Beijing, China, 2019, pp. 444-449, doi: 10.1109/iSPEC48194.2019.8975143.*
*https://ieeexplore.ieee.org/document/8975143*

На прошедшем в ноябре 2019 года IEEE Sustainable Power and Energy Conference группа исследователей из Китая продемонстрировала подход к мониторингу состояния силового трансформатора по данным вибрации.

Исследователи разработали прототип системы мониторинга, в которой данные собираются пьезоэлектрическими акселерометрами и обрабатываются в LabView. Обработка сигнала включала в себя Фурье- и вейвлет-преобразования. В ходе вейвлет-преобразования сигнал раскладывался на 512 компонентов, соответствующих участкам частотного диапазона, для каждого из которых рассчитывалась спектральная энергия.

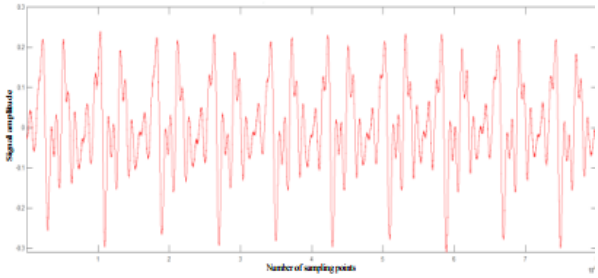
Вид пьезоэлектриечского акселерометра и основного окна программы показан ниже.



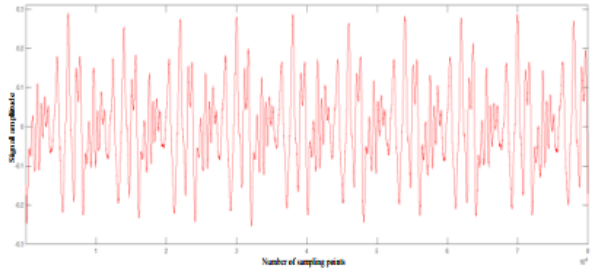

*Акселерометр (слева), основное окно программы (справа)*

Для проверки применимости метода исследователи в течение контролировали работу одного из трансформаторов 500 кВ на подстанции Хезе в китайской провинции Шаньдун. В трансформаторе был обнаружен дефект, вызванный расслоеним изоляции обмотки фазы В. Исследователи рассмотрели характеристики вибрации трансформатора на ранней и на поздней стадии развития дефекта.

Осциллограммы сигнала в обоих случаях показаны ниже.

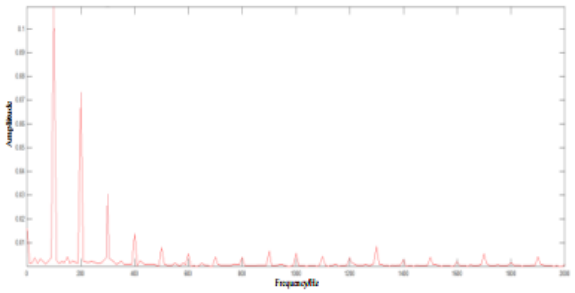


(a) normal condition

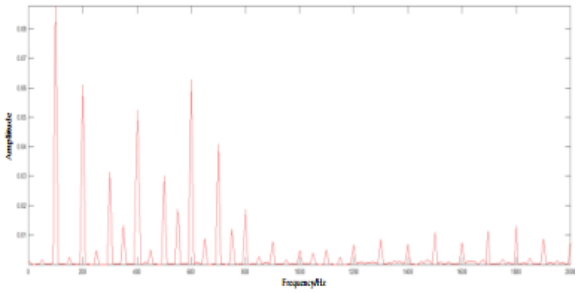


(b) fault condition

*Осциллограмма вибрации при ранней стадии (выше) и поздней стадии (ниже) дефекта*



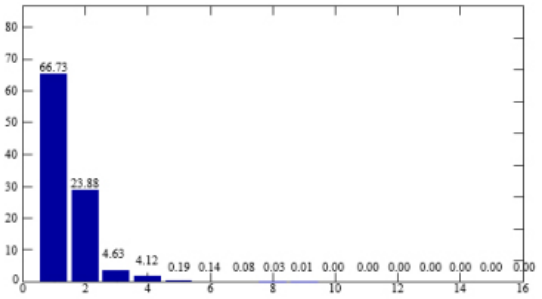
(a) normal condition



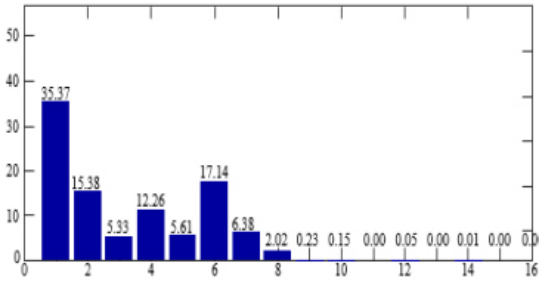
(b) fault condition

*Спектр вибрации при ранней стадии (выше) и поздней стадии (ниже) дефекта*

Сравнение спектров вибрации показывает наличие хаарктерных гармоник, указывающих на дефект. Для эффективного автоматического выделения характеристик таких гармоник исследовали использовали встроенную в LabView функцию для 9-слойного вейвлет-преобразования, при помощи которой рассчитывались спектральные энергии в 512 частотных диапазонах. Результаты расчёта для обеих стадий дефекта показаны ниже.




(a) normal condition




(b) fault condition

*Спектральные энергии при ранней стадии (выше) и поздней стадии (ниже) дефекта*

Разработанный таким образом метод мониторинга использует спектральные энергии в качестве основного диагностического параметра. Система мониторинга, реализующая метод, использует устанавливаемые на трансформаторе акселерометры, а основной алгоритм может исполняться на промышленном комьютере.

# Разработка системы визуального контроля воздушных линий при помощи беспилотных летательных аппаратов

*Источник: Nguyen, Van & Jenssen, Robert & Roverso, Davide. (2019). Intelligent Monitoring and Inspection of Power Line Components Powered by UAVs and Deep Learning. IEEE Power and Energy Technology Systems Journal. PP. 1-1. 10.1109/JPETS.2018.2881429.*
*https://www.researchgate.net/publication/330327990_Intelligent_Monitoring_and_Inspection_of_Power_Line_Components_Powered_by_UAVs_and_Deep_Learning*

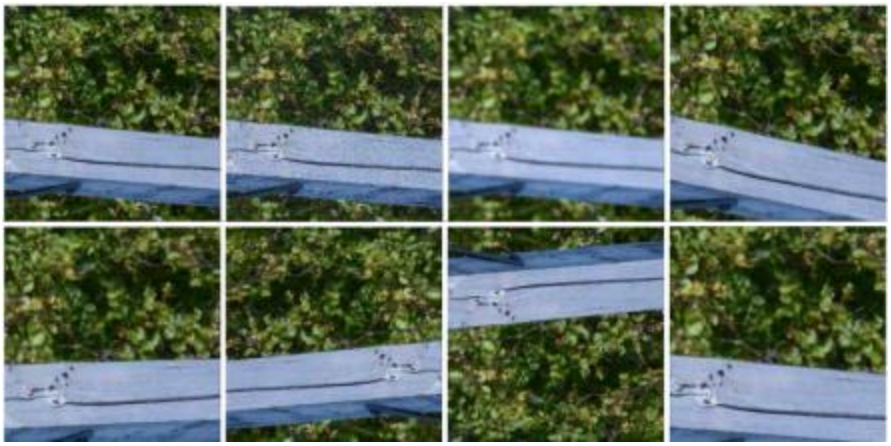
Группа исследователей из Норвегии разработала систему визуального контроля воздушных линий при помощи беспилотных летательных аппаратов, в которой состояние элементов линии выполняется автоматически при помощи методов машинного обучения. Соответствующая статья была опубликована в издании IEEE Power and Energy Technology Systems Journal в январе 2019 года.

В ходе работы исследователи предметно рассмотрели три основные сложности, возникающие при разработке методов такого типа контроля: недостаток данных для обучения, дисбаланс данных, сложность определения небольших компонентов. Недостаток данных для обучения связан с отсутствием в открытом доступе наборов данных, содержащих изображения элементов линий. Дисбаланс данных связан с тем, что большинство линий эксплуатируются в нормальном, бездефектном состоянии и наборы изображений элементов линий всегда будут содержать преобладающее количество изображений без дефектов. Сложность определения небольших компонентов заключается в том, что изображения линий и опор линий будут содержать большое количество мелких изображений отдельных элементов (изоляторы, столбы, перекладины, крышки), что будет осложнять их идентификацию и классификацию.

Для решения проблем недостатка данных исследователи собрали самостоятельно собрали большое количество изображений опор линий при помощи цифровых зеркальных камер, установленных на различные летательные аппараты. Данные были дополнены изображениями, предоставленными компаниями Hafslund Nett, крупнейшего электросетевого оператора Норвегии, и Troms Kraft, оператора двенадцати ГЭС и электросети в муниципалитете Тромс в Норвегии.

Для решения проблемы несбалансированных наборов данных исследователи использовали дополнительную обработку данных, заключающуюся в выделении отдельно стоящих опор линий и их элементов из общих изображений. Выделенные изображения затем слегка модифицировались: выполнялось смещение опоры относительно центра изображения, часть изображений затем отражались по горизонтали. К изображениям применялось также обычное или Гауссово размытие, изменение масштаба, вращение и угловое искажение. Такой подход позволял генерировать большое количество выборок данных из одиночных изображений. Обрабатывая таким образом изображения с дефектами, исследователи получили сбалансированный набор данных.

Пример нескольких изоражений перекладины опоры, сгененрированных из общего источника, показаны ниже.



*Примеры нескольких сгененрированных изображений, слева направо сверху вниз: оригинальное изображение, изображение с обычным размытием, изображение с Гауссовым размытием, повёрнутое влево изображение, повёрнутое вправо изображение, отражнное по горизонтали изображение, отражённое по вертикали изображение, масштабированное изображение*

Сложность с определением небольших элементов была решена использованием многоступенчатой классификации. В ней сначала выполнялось определения наличия и положения на изображении опоры линии. Затем на установленном изображении опоры выполнялась идентификация элементов опоры. Затем выполнялась классификация состояния каждого элемента.

Общая схема многоступенчатой классификации показана ниже.

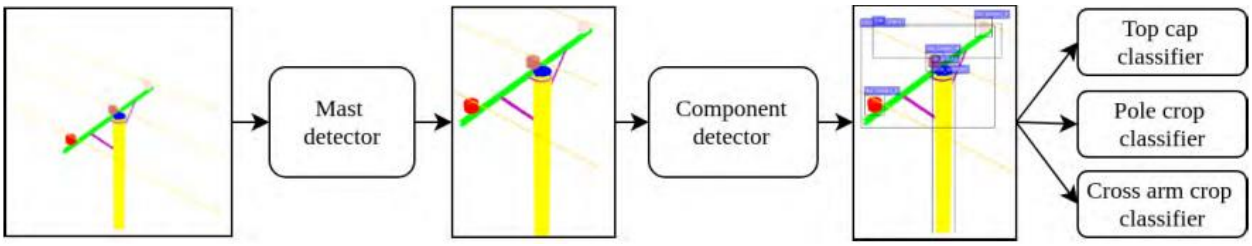
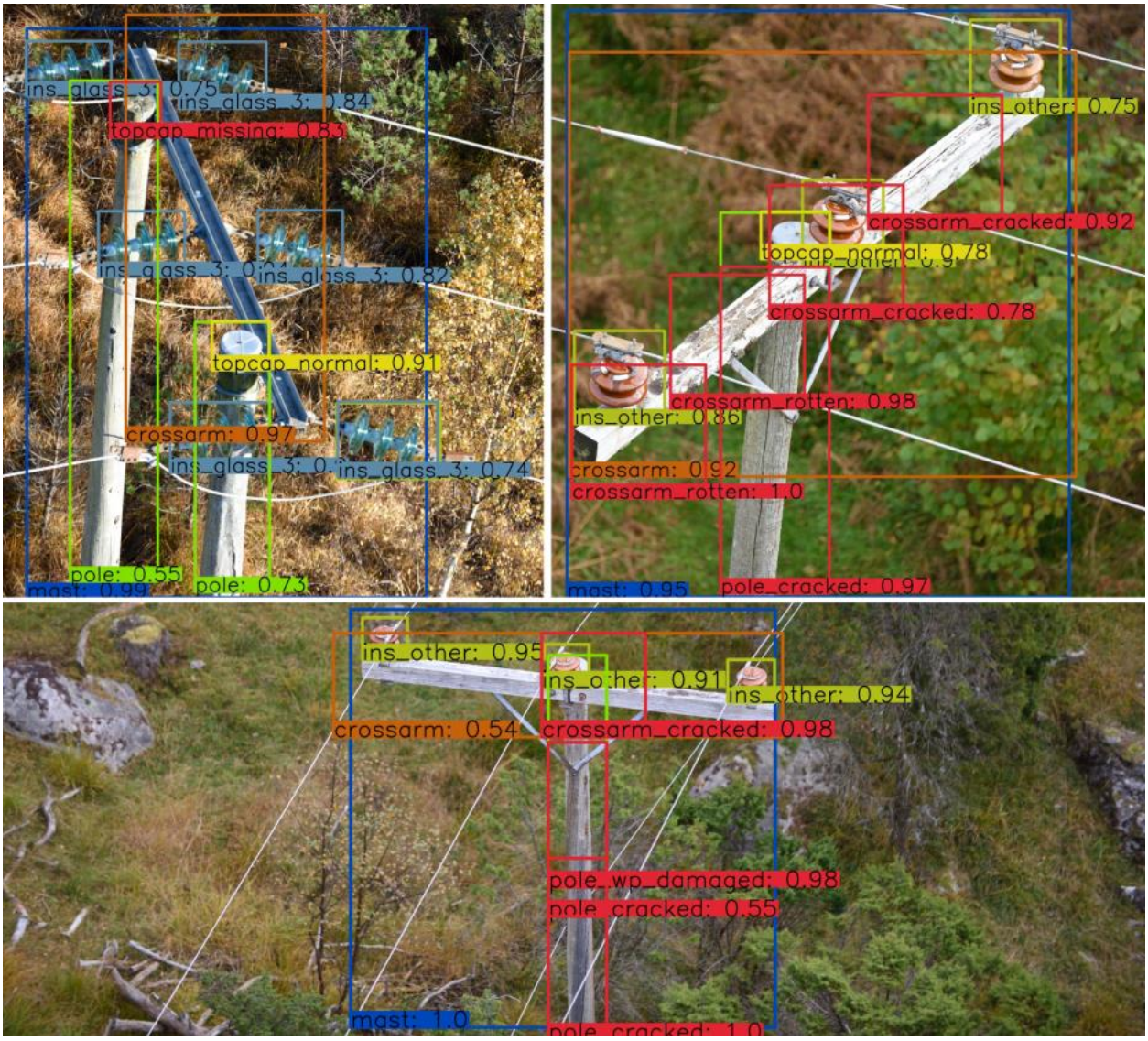



*Схема многоступенчатой классификации*

Пример результатов классификации состояния элементов опоры линии показан ниже.




*Результаты классификации состояния опор элементов опоры*

В примере выше каждый идентифицированный элемент опоры выделяется цветной рамкой. Для каждого идентифицированного элемента выполняется классификация его состояния по одной из заранее определённых категорий (например, «опора целая», «опора с трещиной», «опора, повреждённая дятлами») и указывается оценка точности классификации.

Исследователи также разработали две модели беспилотных летательных аппаратов (дронов) для сбора данных визуального контроля. Первая модель была сконструирована на опорной раме соосного коптера Gryphon Dynamics XV-1400. На раму устанавливались видеопамять Nvidia TX1 на базовой плате Auvidea J140 и три камеры: Sony DSC-QX30U, тепловизионная камера и action-камера для трансляции изображения в реальном времени. На дрон также устанавливались четыре аккумулятора Tattu 22000mAh 22.2V 25C 6S1P Lipo. Время автономной работы дрона составляло 42 минуты при средней скорости 60 км/ч и максимальном переносимом весе 40 кг.

Вторая модель дрона была сконструирована на квадрокоптере 3DR Solo с литий-полимерным аккумулятором 5200 mAh 14.8V DC. На дрон устанавливалась камера Sony DSC-QX30U. Управление

дроном осуществлялось при помощи одноплатного комьютера Raspberry Pi вместе с кардановым подвесом. Время автономной работы дрона составляло 20 минут при средней скорости 12 км/ч.

Изображения обоих дронов показаны ниже.

*Разработанные дроны*

В заключении исследования указывается, что результаты тестирования системы показали хорошую точность. Вместе с тем, в исследовании не рассматривались вопросы определения неизвестных состояний элементов линий, классификации состояний в плохих погодных условиях и разработки эффективных критериев оценки точности результатов. Дальнейшая работа исследователей будет направлена на решение этих вопросов.

# Метод определения огибающей тока для идентификации наличия неисправных стержней двигателя

*Источник: M. Malekpour, B. T. Phung and E. Ambikairajah, "Stator current envelope extraction for analysis of broken rotor bar in induction motors," 2017 IEEE 11th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Tinos, 2017, pp. 240-246, doi: 10.1109/DEMPED.2017.8062362*

*https://ieeexplore.ieee.org/document/8062362*

На прошедшем в 2017 году IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives группа исследователей из Австралии предложила алгоритм определения огибающей тока асинхронного двигателя. Заявляемым достоинством алгоритма является его универсальность и возможность реализации на низкопроизводительных устройствах.

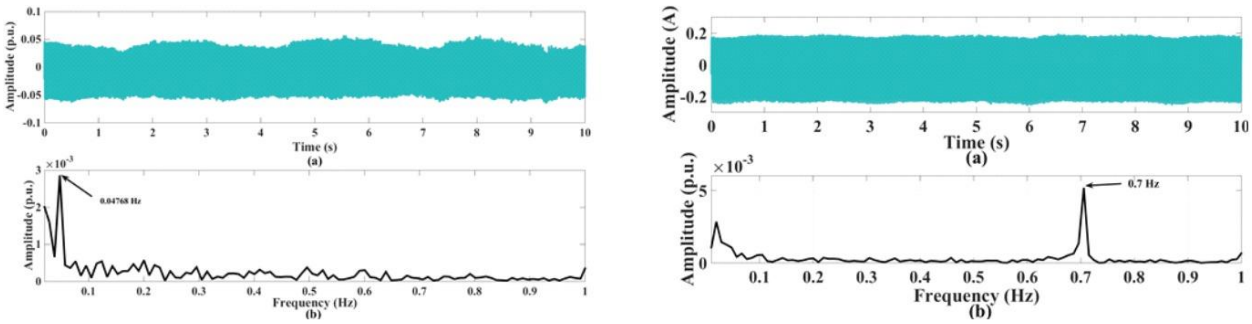
В алгоритме, получившем название SOGI-ANF (интегрально-адаптивный режекторный фильтр второго порядка), входной сигнал тока раскладывается на периодические компоненты, описываемые системой дифференциальных уравнений, в которой также используются параметры, контролирующие скорость схождения алгоритма (при решении системы дифференциальных уравнений) и точности разложения сигнала. Система поддаётся решению численными методами, после чего значение огибающей сигнала тока определяется через его компоненты.

Для проверки работы алгоритма исследователи провели испытания с лабораторной установкой, работающей в установившемся режиме и при помощи компьютерного моделирования, в котором имитировался резкое повреждение стержня при работе двигателя.

Вид лабораторной установки показан ниже.

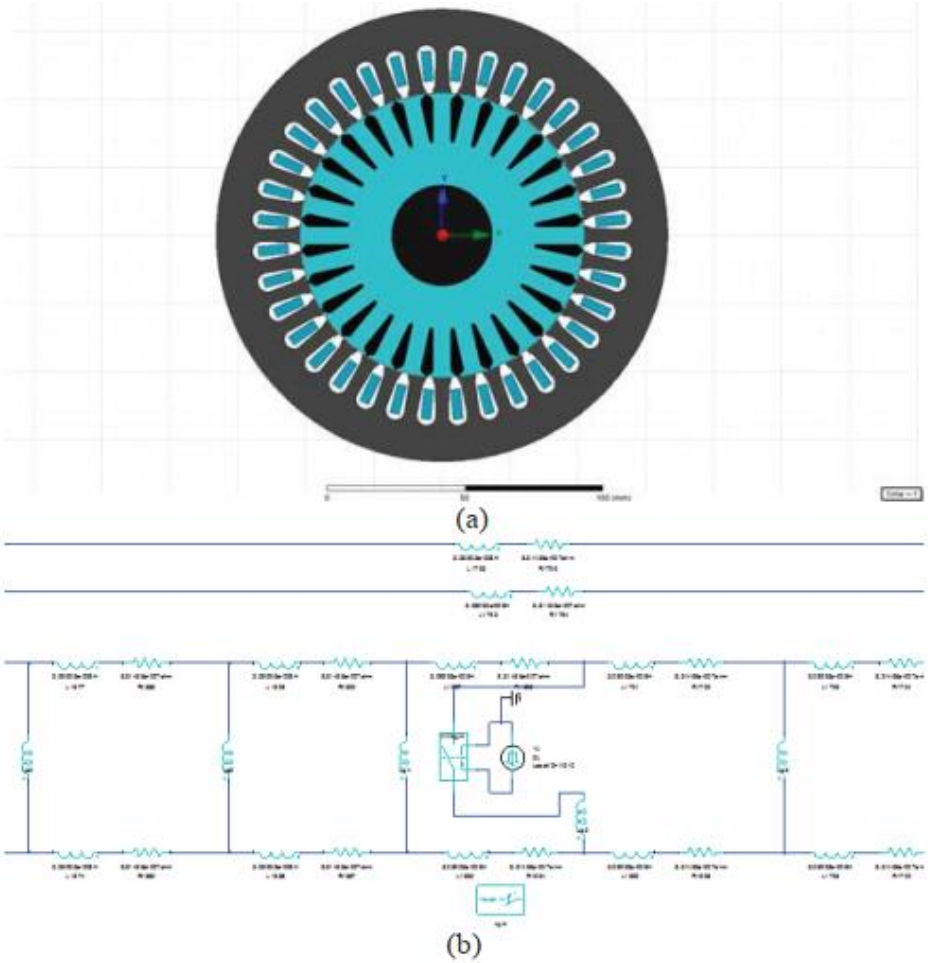
*Лабораторная установка*

Измеренные при работе установки осциллограммы тока и рассчитанные по ним спектры огибающей показаны ниже.



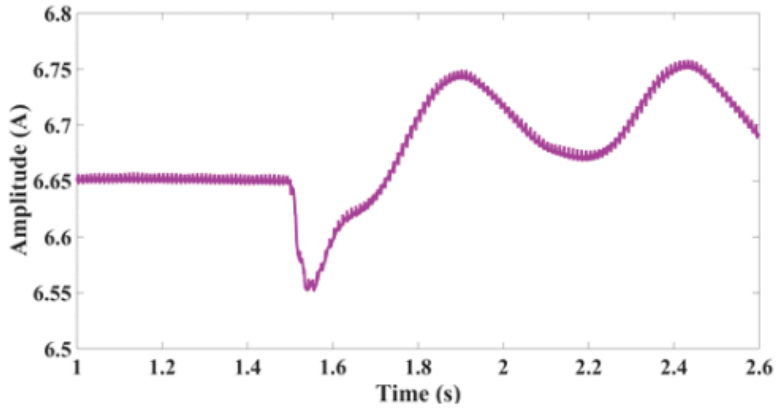

*Осциллограммы тока и спектры огибающей, слева - при работе без нагрузки с двумя повреждёнными стержнями, справа - при 25% нагрузки и двумя повреждёнными стержнями*

Моделирование выволнялось методом конечных элементов с использованием уравнений Максвелла. Сетка разбиения двигателя и эквивалентная электрическая схема показаны ниже.




*Модель двигателя*

Пример результата моделирования показан ниже в виде огибающей тока при резкой поломке одного из стержней через 1.5 с после начала записи.




*Осциллограмма тока при резкой поломке стержня*

Во всех случаях алгоритм успешно выполнял расчёт огибающей, анализ который указывал на наличие повреждённых стержней.

Дополнительно исследователи реализовали алгоритм на микроконтроллере серии STM32F. Работоспособность алгоритма сохранилась в полном объёме. Изображение работающего микроконтроллера и установки для проверки его работы показаны ниже.

*Реализация алгоритма на микроконтроллере STM32F*

# Новый способ определения мест повреждений по параметрам аварийного режима

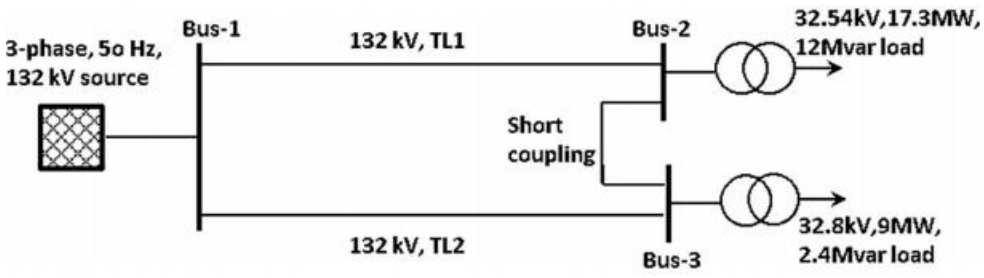
*Источник: A. Abu-Siada, Saif Mir, A new on-line technique to identify fault location within long transmission lines, Engineering Failure Analysis, Volume 105, 2019, Pages 52-64, ISSN 1350-6307*

*https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350630719306223*

Исследователи из Университета Кэртина в Австралии предложили новый метод определения мест повреждений воздушных линий по параметрам аварийного режима. Работа авторов была опубликована в издании Engineering Failure Analysis в ноябре 2019 года.

В основе метода лежит корреляция между разницей напряжений на концах линии и током на одном из концов линии. Корреляция изображается в виде эллипса, параметры которого определяются типом дефекта.

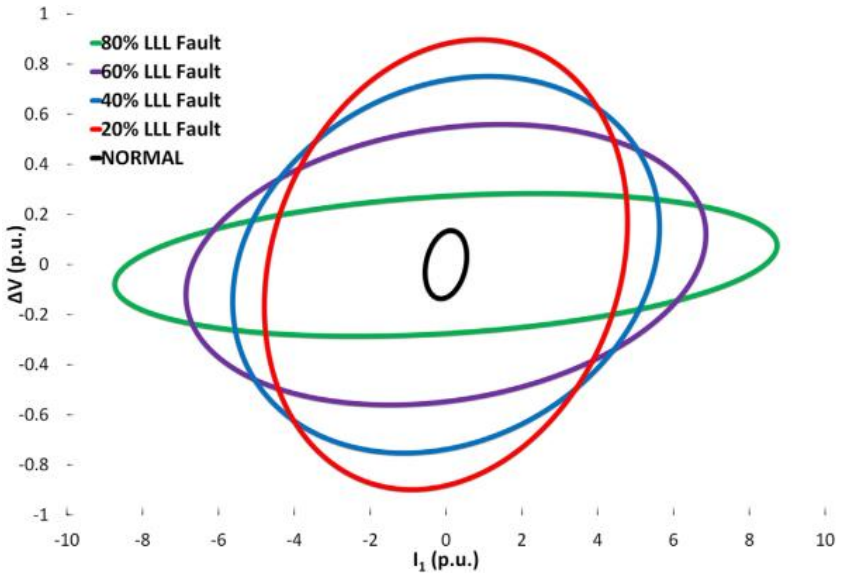
Для демонстрации работы метода исследователи использовали модель сети, состоящий из двух параллельных трёхфазных линий 135 кВ длиной 100 км. Для моделирования использовалась программа DIgSILENT Power Factory. Модель линии показана ниже.




*Модель линии*

Повреждения моделировались на линии TL1 в разных точках: 20%, 40%, 60% и 80% длины линии от шины Bus-2. Данные для построения круговой диаграммы напряжения и тока собирались в течение одного периода основного напряжения с частотой дискретизации 0,1 мс.

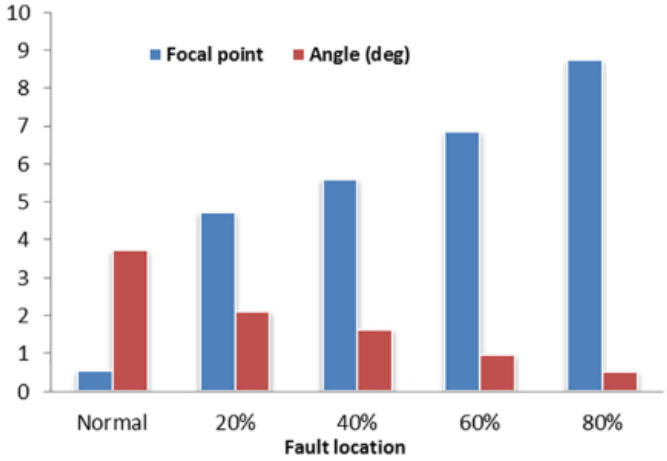
Круговая диаграмма, записанная при трёхфазном КЗ с нулевым импедансом показана ниже. Для сравнения на той же диаграмме показано изображение нормального режима работы.




*Изображение трёхфазного КЗ с нулевым импедансом и нормального режима*

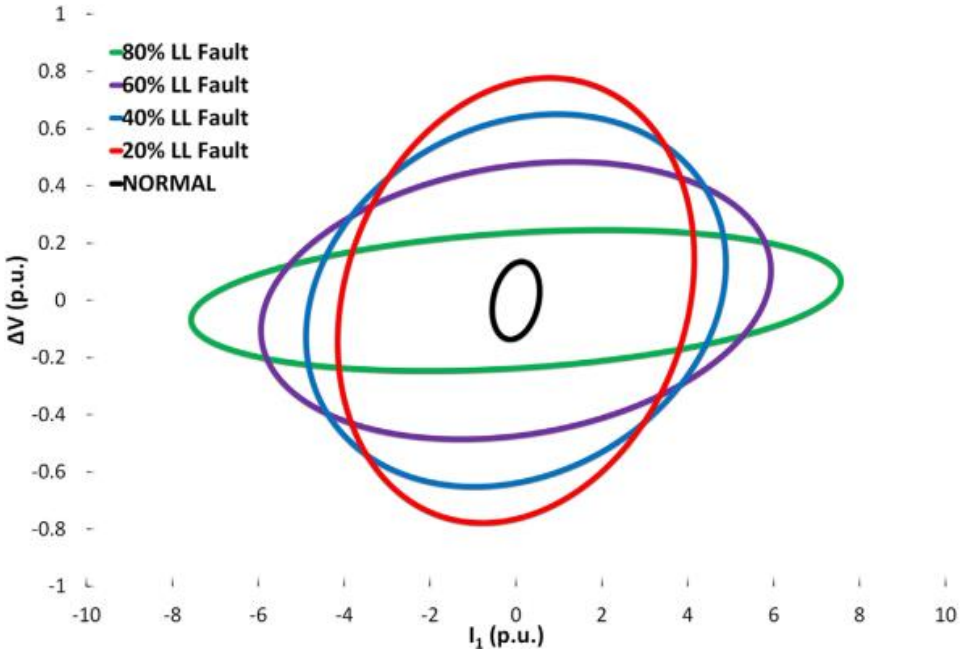
Из диаграммы видно, что при трёхфазном КЗ общая площадь эллипса увеличивается. С приближением места КЗ к Bus-2 угол наклона главной полуоси эллипса монотонно уменьшается.

Диаграмма зависимости расстояния между фокусами эллипса и углом наклона главной полуоси от положения места повреждения показана ниже. Из диаграммы видно однозначное соответствие между расстоянием и параметрами эллипса.

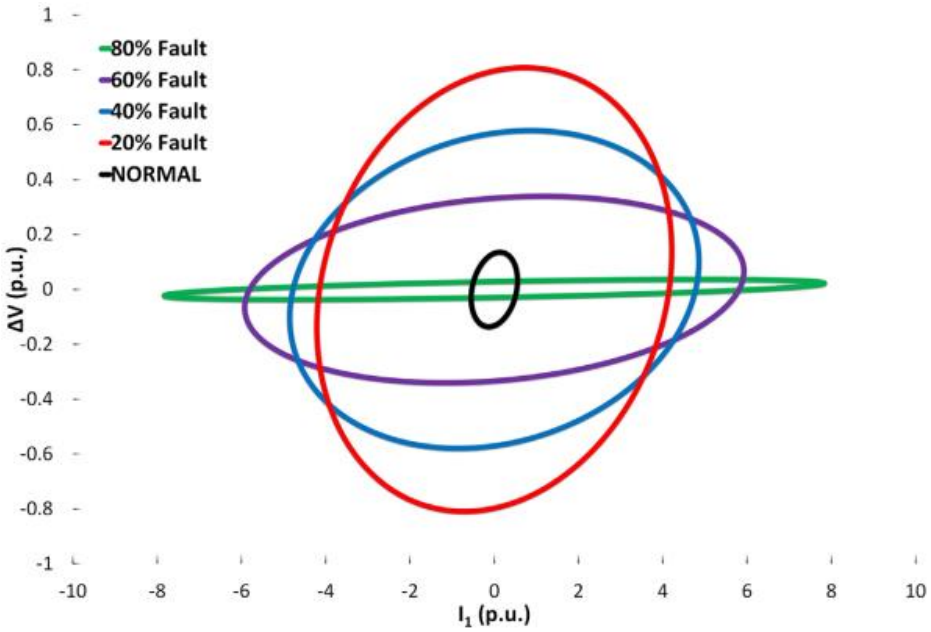



*Зависимость расстояния между фокусами эллипса и углом наклона главной полуоси от положения места повреждения*

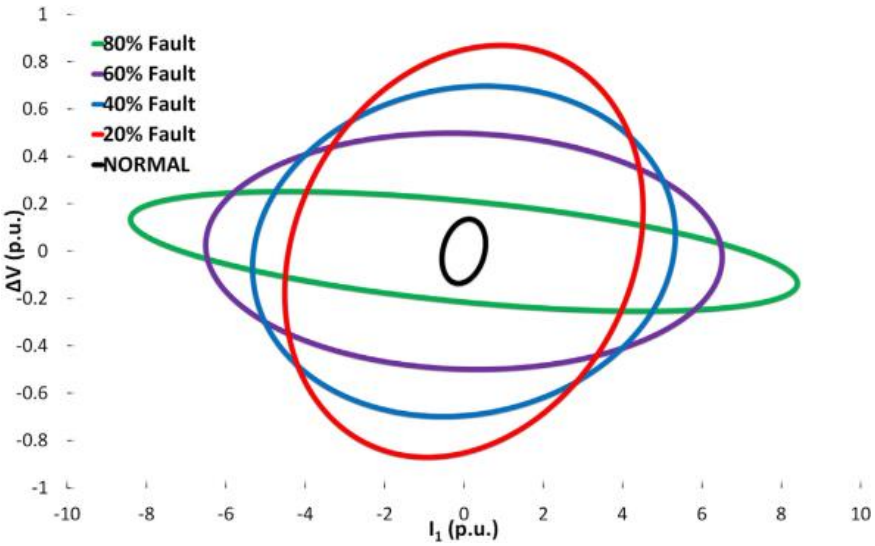
Изменения круговой диаграммы для других типов КЗ показаны ниже.




*Двухфазное КЗ. Изменения диаграммы аналогичны трёхфазному КЗ, но изменения параметров эллипса меньше*




*Однофазное КЗ на землю*




*Двухфазное КЗ на землю*

Дополнительно было исследовано влияние параметров линии (нагрузки, рабочего напряжения и длины) на форму эллипсов и формы эллипсов изображений соседних неповреждённых фаз при однофазных и двухфазных КЗ. Во всех случаях по параметрам эллипса можно было установить однозначное соответствие месту возникновения повреждения.

В заключении исследования указывается, что предложенная методика хорошо поддаётся аналитическому описанию и может быть внедрена в составе систем мониторинга состояния линий. Важной особенностью метода является требование к наличию синхронизированных измерений напряжения на концах линий. Это может выполняться при помощи синхрофазоров, стоимость которых в настоящее время относительно высока. Но развитие технологий Smart Grid будет делать подобные устройства более доступными и распространёнными, что, в свою очередь, откроет новые возможности для реализации предложенного метода.

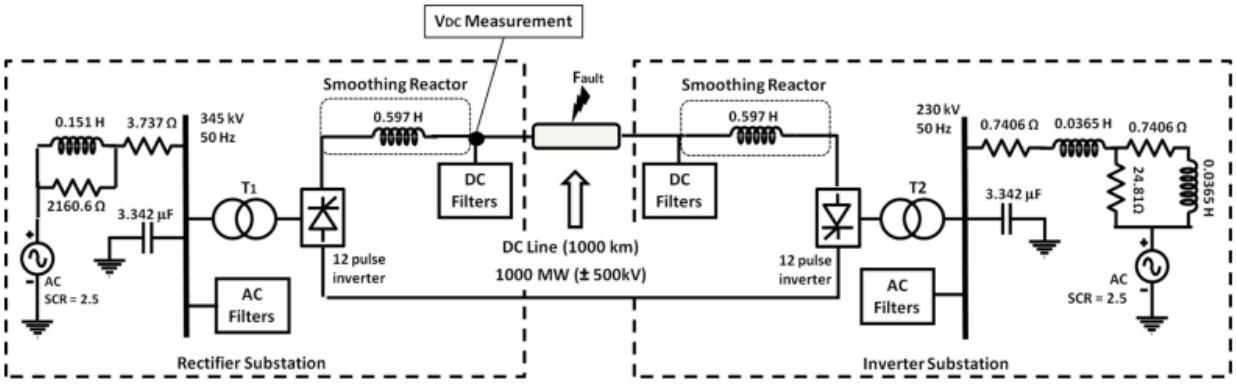
# Метод определения мест повреждений линий постоянного тока

*Источник: Alex S. Silva, Ricardo C. Santos, Julio A. Torres, Denis V. Coury, An accurate method for fault location in HVDC systems based on pattern recognition of DC voltage signals, Electric Power Systems Research, Volume 170, 2019, Pages 64-71, ISSN 0378-7796*

*https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378779619300197*

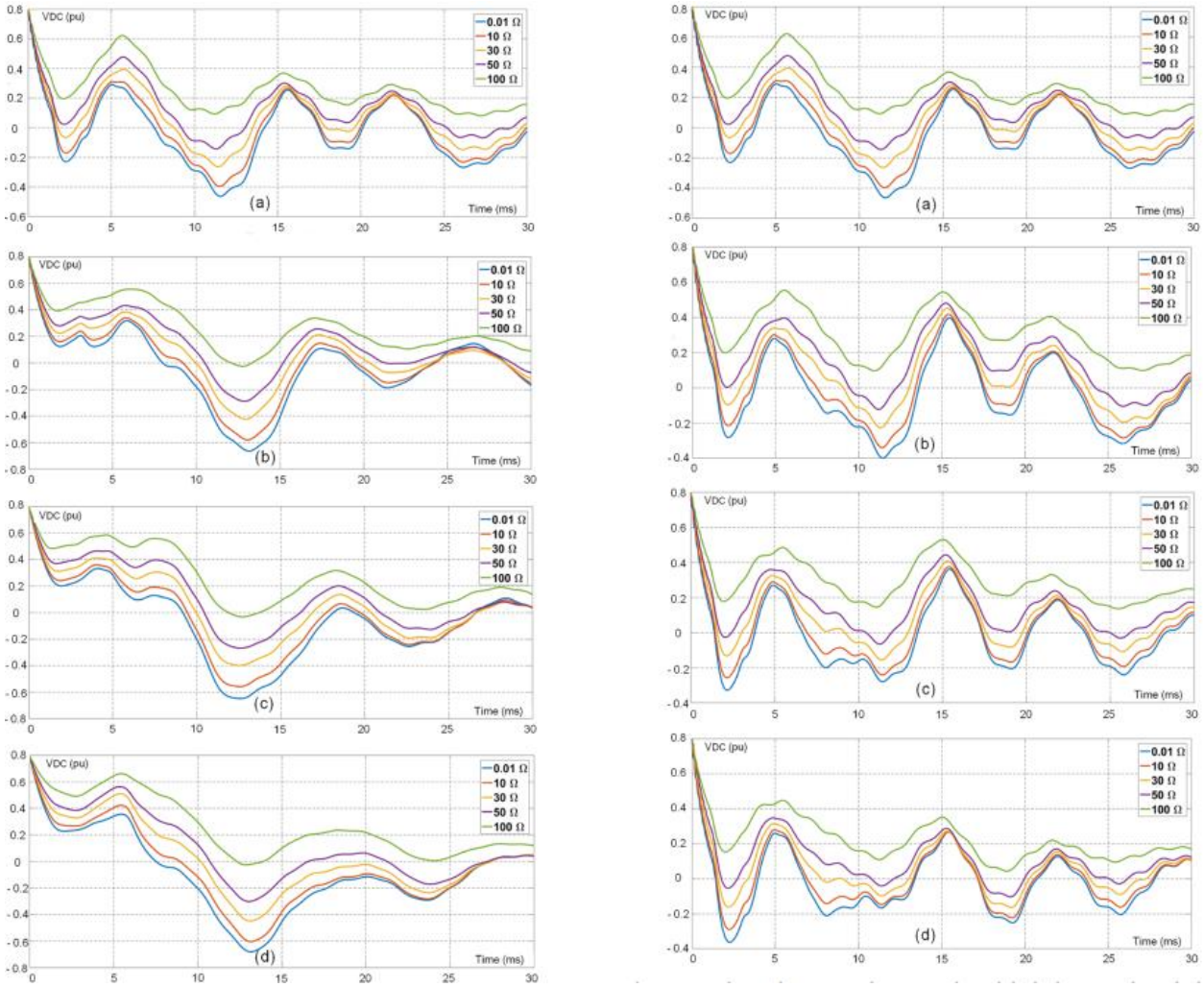
Группа исследователей из Бразилии разработала метод определения мест повреждений на линиях постоянного тока, основывающийся на анализе формы напряжения. Соответствующая статья была опубликована в издании Electric Power Systems Research в мае 2019 года.

Для разработки метода исследователи моделировали повреждения в эталонной тестовой сети постоянного тока, разработанной CIGRE. Сеть показана на изображении ниже.




*Эталонная сеть постоянного тока CIGRE*

Сеть состоит из выпрямительной и инвертерной подстанций и линии постоянного тока 500 кВ длиной 1000 км между ними. Исследователи моделировали КЗ в линии на расстоянии 250, 500, 750 и 900 км от одного из концов с импедансом КЗ 0.01, 30, 50 и 100 Ом. В записанных осциллограммах напряжения линии после КЗ наблюдалась корреляция между параметрами КЗ и формой напряжения. Примеры таких корреляций показаны ниже.




*Примеры записанных осциллограмм напряжений: слева сверху вниз – при разных импедансах КЗ для расстояния до повреждения 250, 500, 750, 900 км; справа сверху вниз – при разных импедансах КЗ и уровне тока 100, 75, 50 и 25%*

В предложенном методе запись осциллограммы начиналась при падении уровня напряжения линии до 80%. Длина осциллограммы составляла 10 мс, в течение которых записывались 200 выборок напряжения. Эти 200 выборок подавались на вход нейронной сети, которая выполняла расчёт расстояния до места повреждения. Схематично принцип работы метода показан ниже.

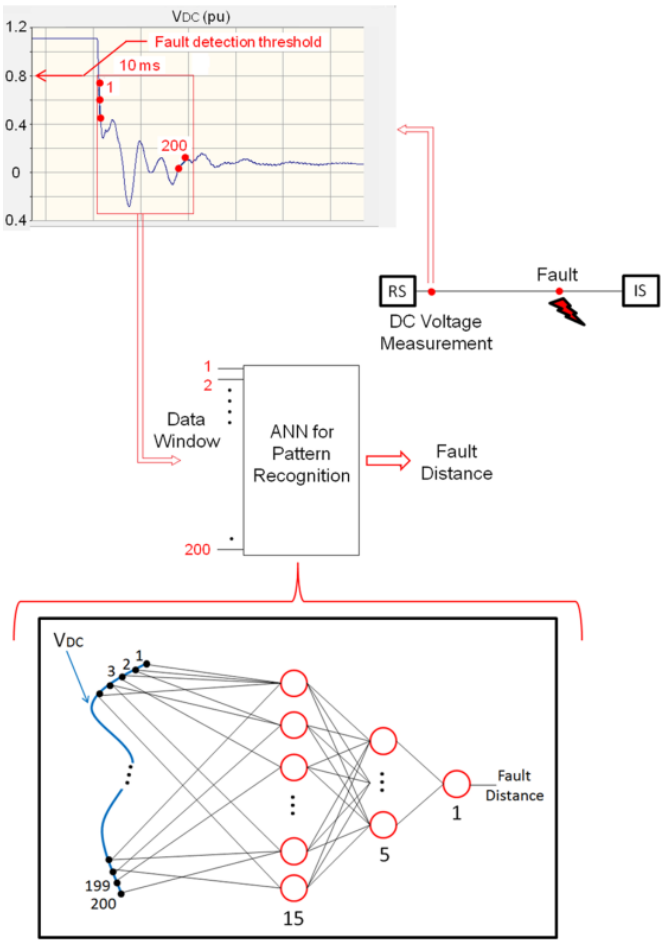



*Схема работы метода*

Исследователи также разработали метод итеративного подбора оптимальной архитектуры нейронной сети, наиболее эффективно выполняющей определение расстояния.

Используя модель линии, исследователи сгенерировали наборы данных для 480 случаев повреждения линии. Наилучшая ошибка определения расстояния при помощи разработанного метода составила 1.5% длины линии.

# Метод оценки остаточного ресурса при помощи интерполяции по принципу подобия

*Источник: Wennian Yu, Il Yong Kim, Chris Mechefske, An improved similarity-based prognostic algorithm for RUL estimation using an RNN autoencoder scheme, Reliability Engineering & System Safety, Volume 199, 2020, 106926, ISSN 0951-8320*

*https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832019307902*

Группа исследователей из Чунцинского университета в Китае и Университета Куинс в Канаде разработала метод оценки остаточного ресурса оборудования, основанный на интерполяции по принципу подобия. Соответствующая статья была опубликована в издании Reliability Engineering & System Safety в июле 2020 года.

Общая схема метода, предложенного исследователями, показана ниже.

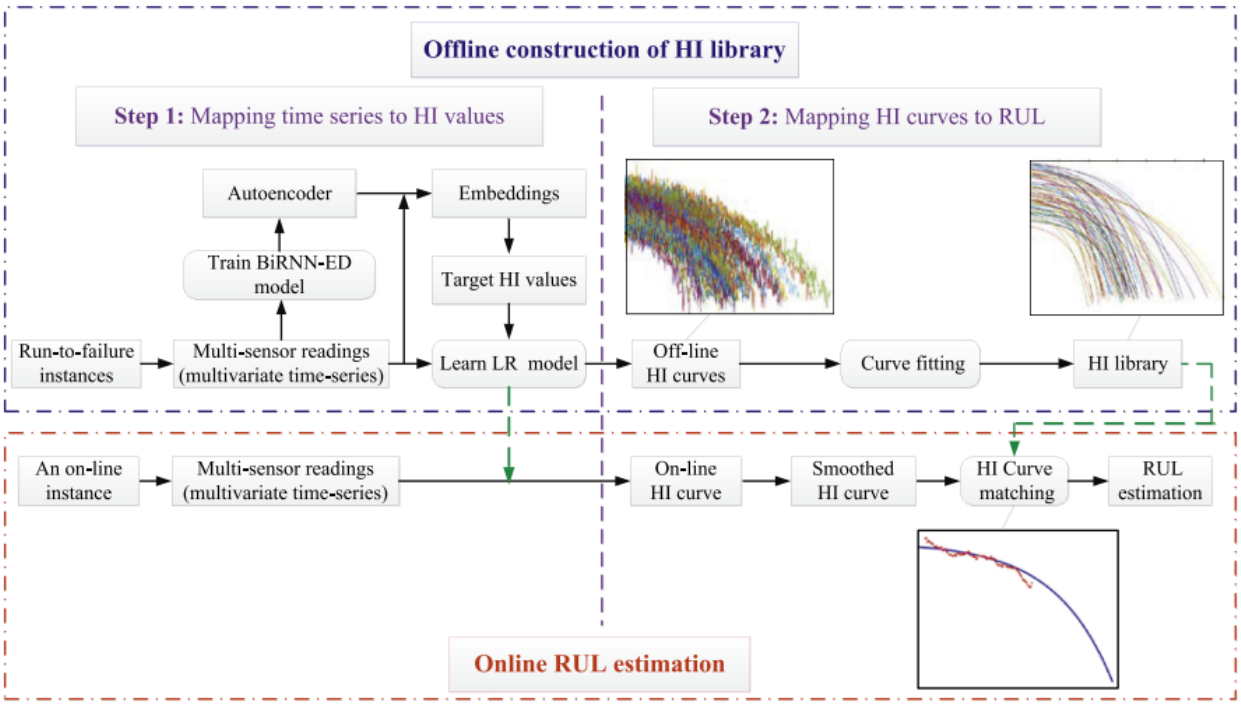
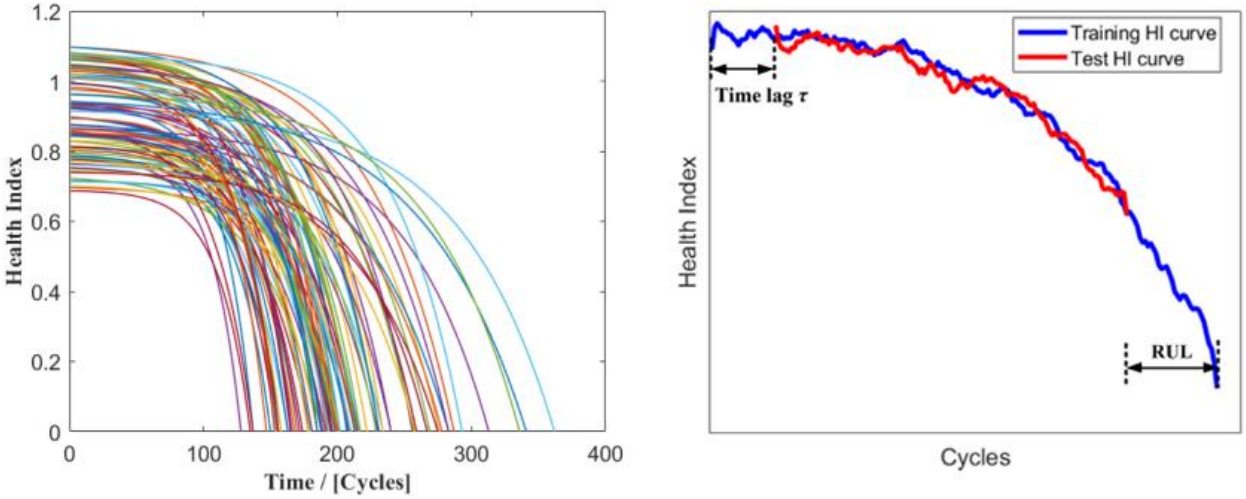



*Схема предложенного метода*

Метод состоит из двух этапов: преобразование измеренных данных на оборудовании в кривую ресурса (слева от вертикальной пунктирной линии не схеме) и определение наиболее близкой по форме кривой ресурса из библиотеки прецедентов (справа от вертикальной пунктирной линии). Оба этапа состоят из оффлайн- и онлайн-части. Суть метода состоит в следующем – в оффлайн-режиме формируется база развития состояния оборудования одного типа по собранным ранее данным. Массив измерений на каждой единице оборудования, входящей в базу, обрабатывается нейронной сетью-автоэнкодером с одним выходом. Таким образом, весь массив измерений преобразовывается к одному параметру, определяющему состояние оборудования. Кривая ресурса (кривая развития параметра) сохраняется в базе прецедентов. В онлайн-режиме массив регистрируемых данных о состоянии оборудования обрабатывается сетью, после чего формируется кривая текущего развития состояния оборудования. Кривая текущего развития сравнивается с базой, из которой подбирается прецедентная кривая, наиболее соответствующая текущей кривой.

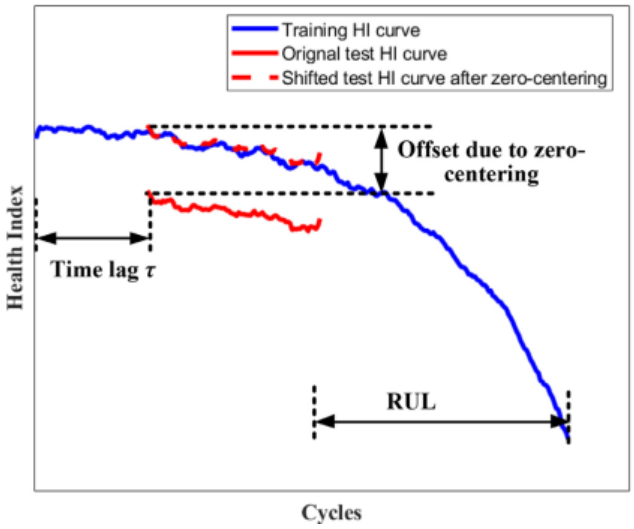
По развитию подобранной прецедентной кривой определяется оставшееся время жизни текущей единицы оборудования.

Примеры прецедентных кривых развития состояния оборудования и соответствия прецедентной кривой кривой текущего развития показаны ниже. На втором графике также показан определяемый в данном случае остаточный ресурс оборудования.



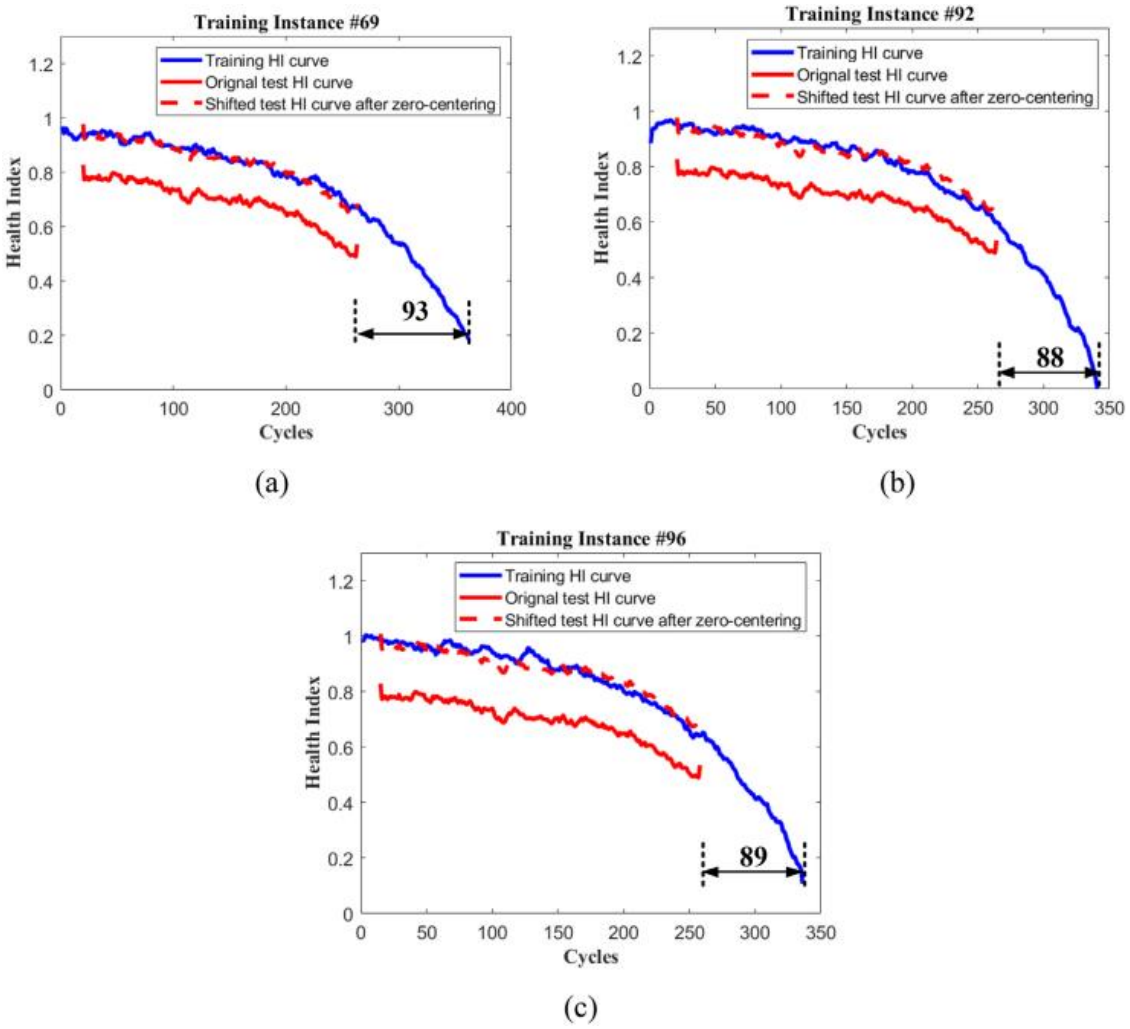

*Слева: прецедентные кривые развития состояния оборудования, справа: соответствие прецедентной кривой (синяя) кривой текущего развития (красная)*

Исследователи включили в метод алгоритм работы в случае наличия начального износа у единиц оборудования в базе прецедентов или у текущего оборудования – например, когда датчики для получения данных о состоянии оборудования были установлены не сразу, а после выработки некоторого ресурса. Суть алгоритма состоит в «выравнивании» текущей кривой по наиболее близкой прецедентной кривой на величину, соответствующую начальному износу. Суть алгоритма показана ниже.

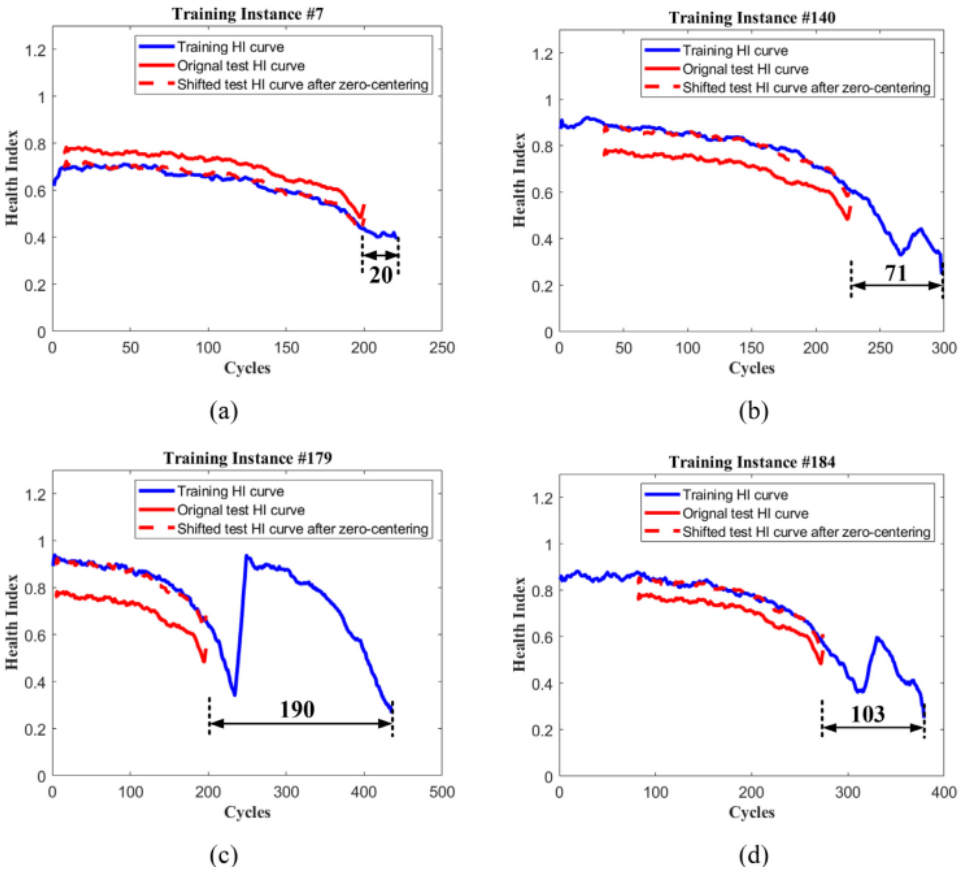



*Выравнивание прецедентной (синяя сплошная линия) и текущей (красная сплошная) кривых ресурса. Результат показан пунктирной красной линией, соответствующей текущей кривой, «выровненной» по прецедентной*

Метод был опробован на опубликованном NASA наборе данных о развитии состояния воздушно-реактивных двигателей. Примеры корректных и некорректных результатов работы метода показаны ниже.




*Примеры корректных результатов применения метода*




*Примеры некорректных результатов применения метода*

Результаты испытаний показали, что наилучшая точность, достигнутая на выборке данных составляет 67%, наихудшая – 47%. Дальнейшая работа авторов будет направлена на исследование производительности метода для других типов оборудования и дополнение его алгоритмами работы в условиях недостаточности данных.

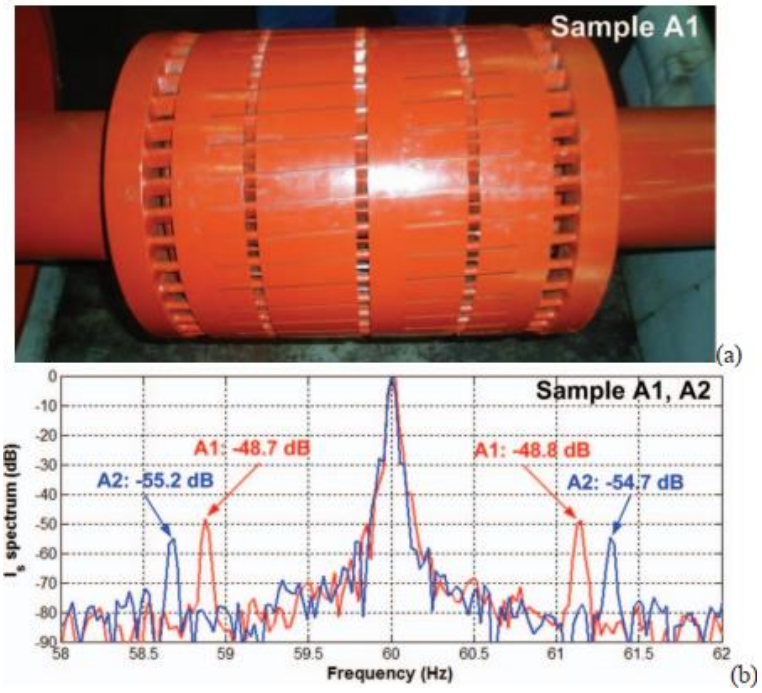
# Определение дефектов роторов асинхронных двигателей в условиях анизотропии магнитных свойств

*Источник: J. A. Antonino-Daviu, J. Pons-Llinares, S. Shin, K. W. Lee and S. B. Lee, "Reliable detection of induction motor rotor faults under the influence of rotor core magnetic anisotropy," 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Guarda, 2015, pp. 14-21, doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303663*

*https://ieeexplore.ieee.org/document/7303663*

Выпускаемые с производства асинхронные двигатели могут иметь небольшую магнитную анизотропию ротора, что проявляется в разных значениях магнитной проницаемости ротора при разных углах его поворота. В большинстве случаев анизотропия невелика и не оказывает сильного влияние на ток двигателя или магнитный поток ротора. Однако в некоторых случаях анизотропия может значительно превышать предполагаемые значения и существенно затруднять анализ состояния ротора из-за создания дополнительных гармоник на частоте, совпадающей с частотой, характерной для дефектов ротора. Группа исследователей из Испании и Кореи рассмотрела эту проблему и предложила подход к её решению. Доклад группы был представлен на прошедшем в 2015 году IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

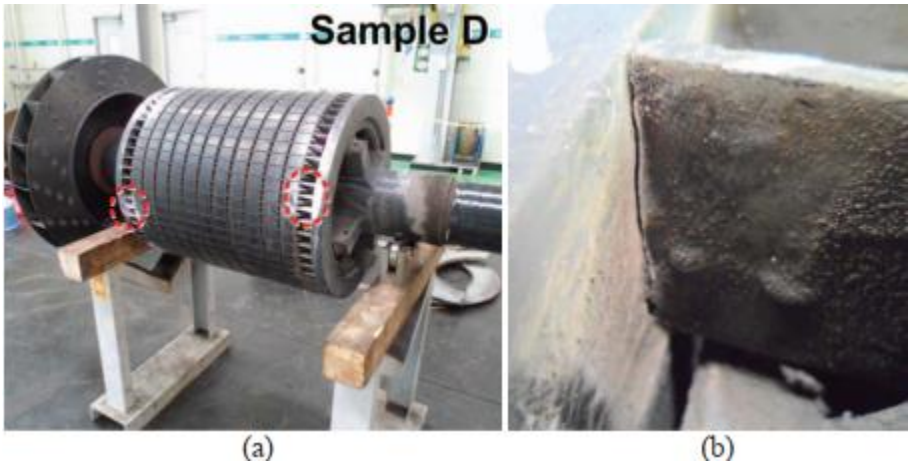
Исследователи приводят пример случая неверного определения дефекта ротора из-за его анизотропии. Двухполюсный двигатель нефтяного насоса 3,3 кВ, 200 кВт был остановлен из-за появления в его спектре гармоник на частотах, соответствующих дефекту стержней. После выкатки и обследования ротора было определено, что стержни ротора в порядке, а дополнительные гармоники были вызваны анизотропией. Выкаченный ротор двигателя и спектр его тока показаны ниже.




*Выкаченный ротор двигателя и спектр тока (образец A1)*

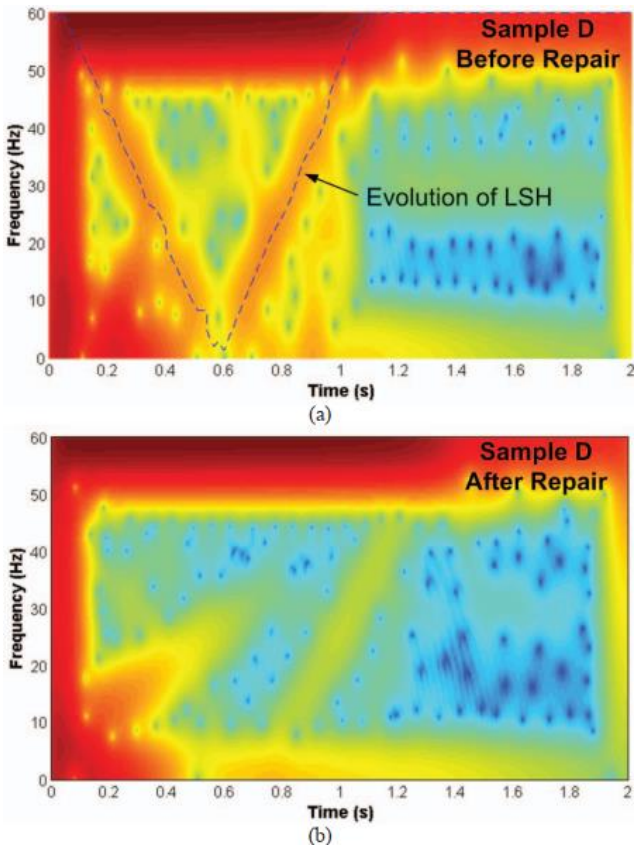
Предложенный исследователями подход заключался в анализе пускового тока при помощи краткосрочного преобразования Фурье. Развитие спектра тока будет разным для двигателей с анизотропией и с дефектами стержней.

Для подтверждения применимости метода исследователи использовали измерения на двигателе 6,6 кВ 270 кВт, имеющем дефект стержня, обнаруженный при осмотре ротора. Вид ротора двигателя и дефектного стержня показан ниже.



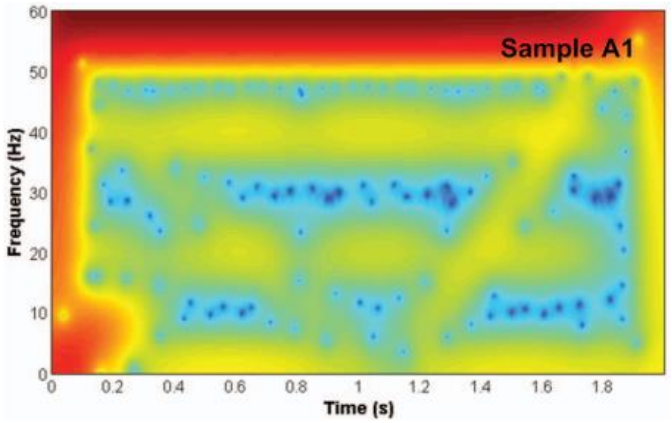

*Ротор двигателя с дефектом*

Развитие спектра пускового тока до и после ремонта двигателя показано ниже.



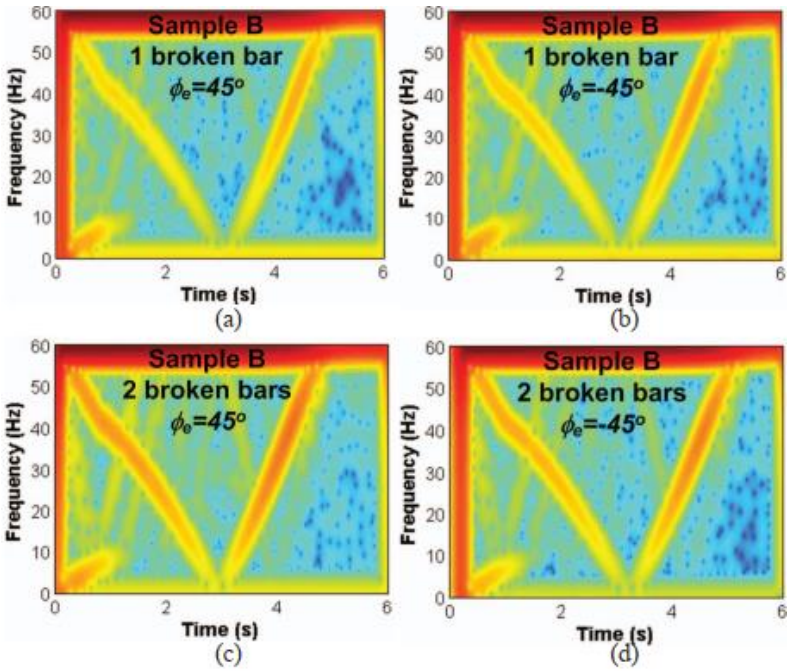
*Спектр пускового тока до (выше) и после (ниже) устранения дефекта. Отчётливо виден V-образный след развития гармоник*

В то же время развитие спектра двигателя 3,3 кВ, 200 кВт с анизотропией показано ниже. Видно, что развитие гармоник происходит менее динамично, чем при действительном повреждении стержня.

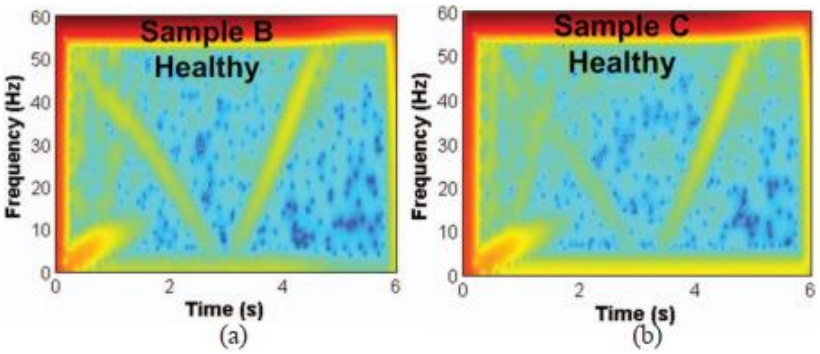



*Развитие спектра тока двигателя с анизотропией ротора*

Дальнейшие исследования подтвердили этот подход. На изображении ниже показано развитие спектров двух двигателей 380 В 5,5 кВт с 1 и 2 дефектными стержнями и без дефектных стрежней, но с анизотропией ротора.




*Развитие спектров пусковых токов двигателей с повреждёнными стержнями*




*Развитие спектра пускового тока двигателя с анизотропией ротора*

Для количественной оценки наличия дефекта или анизотропии ротора исследователи предложили использовать максимум амплитуды гармоники нижней боковой полосы частот. Значение индикатора было относительно высоким при дефектах и невысоким при анизотропии.

# Новый метод анализа тока асинхронных двигателей для определения дефектов ротора

*Источник: Z. Hou, J. Huang, H. Liu, T. Wang and L. Zhao, "A current product signal analysis method for rotor fault diagnosis in induction motors," 2015 IEEE 10th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Guarda, 2015, pp. 27-32, doi: 10.1109/DEMPED.2015.7303665.*

*https://ieeexplore.ieee.org/document/7303665*

Группа исследователей из Чжэцзянского университета в Китае предложила новый подход к определению дефектов роторов асинхронных двигателей, который призван обойти сложности, которые могут возникнуть при спектральном анализе тока двигателя. Доклад группы был представлен на прошедшем в 2015 году IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Суть метода состоит в использовании двух новых диагностических индикаторов. Первый, называемый произведением токов M, равен сумме попарных произведений фазных токов двигателя. При бездефектной работе M пропорционален квадрату амплитуды тока. При появлении дефектов ротора, вследствие искажения синусоид фазных токов, в M будут появляться дополнительные компоненты, указывающие на дефект. Второй диагностический критерий M' равен отношению амплитуды дополнительных компонентов M, появляющихся при дефекте двигателя, к значению M бездефектного режима.

Общая схема метода показана ниже.

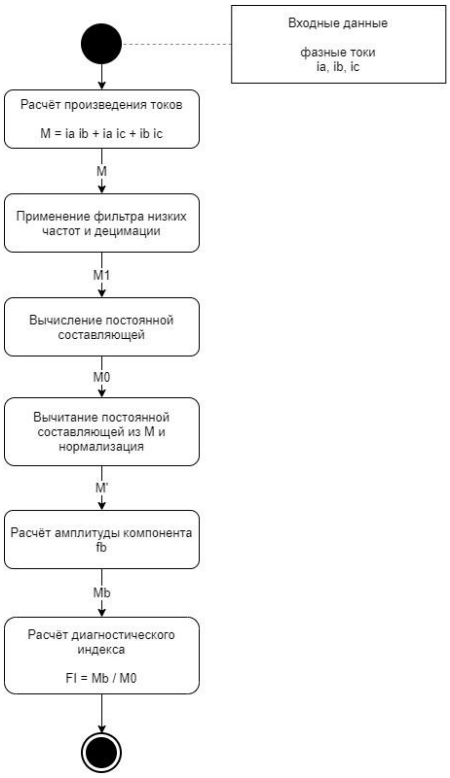



*Схема метода*

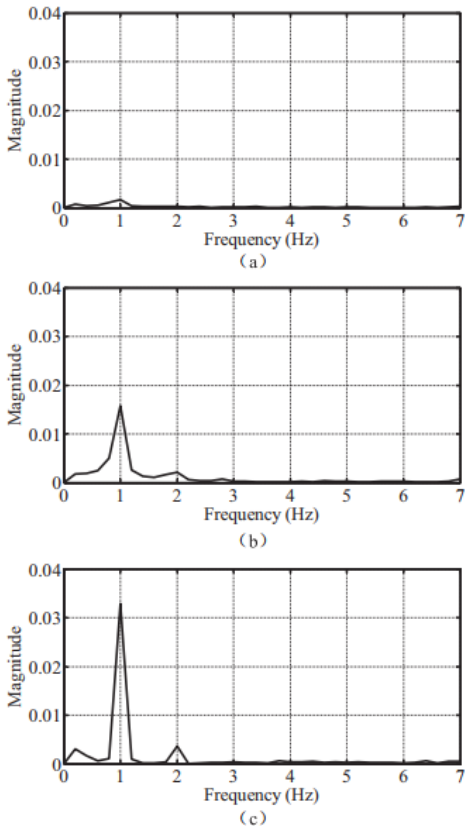
Метод состоит в следующем. Сначала рассчитывается произведение токов M. Далее к M применяется фильтр нижних частот и децимация (прореживание сигнала для уменьшения частоты дискретизации) для снижения вычислительной сложности алгоритма. Обработанный сигнал M1 затем усредняется для определения его постоянной составляющей M0. Разница между M1 и M0 будет являться вкладом, вносимым дефектом ротора двигателя. Отношение разницы между M1 и M0 к M0 будет являться диагностическим критерием, по спектру которого можно делать вывод о наличии дефекта. Амплитуда Mb гармоники на частоте дефекта fb будет указывать на степень развития дефекта, а её отношение к M0 можно использовать как основной диагностический критерий.

Опробование метода на симуляционной модели двигателя подтвердило предположение о его применимости.

Метод также был опробован на данных лабораторного двигателя. Двигатель запускался без дефекта, с одним дефектным стержнем и двумя дефектными стержнями ротора. Вид трёх роторов показан ниже.

*Роторы, слева направо: без дефекта, с одним дефектным стержнем, с двумя дефектными стержнями*

Спектры диагностического индикатора M’ показан ниже. Из спектров видно, что индикатор показывает явный рост с увеличением степени развития дефекта.




*Спектры индикатора M', сверху вниз: бездефектный режим, с одним дефектным стержнем, с двумя дефектными стержнями*

В заключении исследования указывается, предложенный метод имеет хорошие перспективы. В частности, он не подвержен проблеме маскирования гармоник дефектов гармоникой основной частоты вращения при анализе спектра тока двигателя. Анализ спектра предложенного индикатора M' происходит целиком в низкочастотной области, что позволяет снизит требования к вычислительной мощности оборудования, на котором будет реализовываться предлагаемый алгоритм.

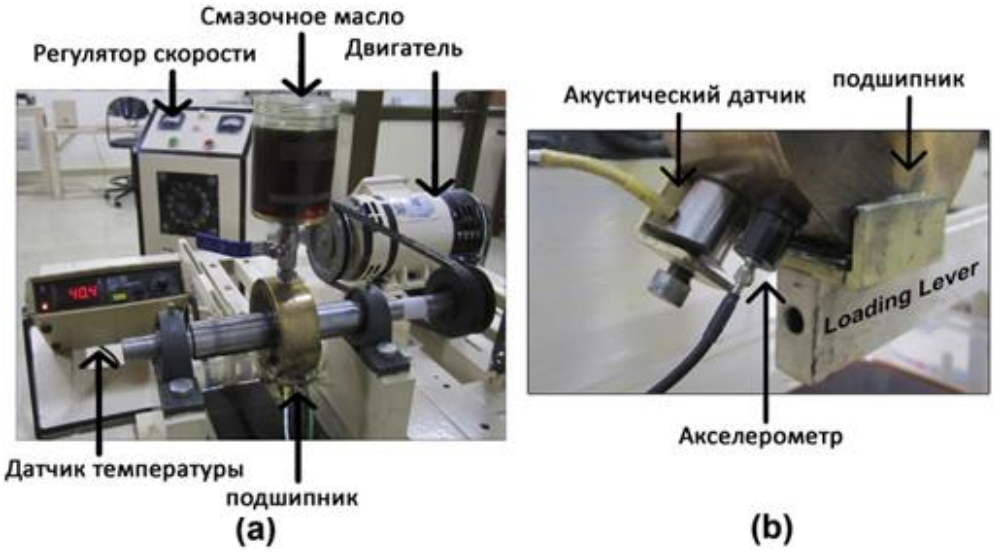
# Определение загрязнения подшипников скольжения инородными частицами по сигналам акустической эмиссии и вибрации

*Источник: Surojit Poddar, N. Tandon, Detection of particle contamination in journal bearing using acoustic emission and vibration monitoring techniques, Tribology International, Volume 134, 2019, Pages 154-164, ISSN 0301-679X*

*https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0301679X19300635*

Группа исследователей из Индийского технологического института рассмотрела проблему загрязнения подшипников скольжения инородными частицами, присутствующими в смазочном масле, и предложила подход к определению степени загрязнения по данным акустической эмиссии и вибрации. Соответствующая статья была опубликована в издании Tribology International в июне 2019 года.

Для исследования задачи была собрана тестовая установка, показанная на изображении ниже.



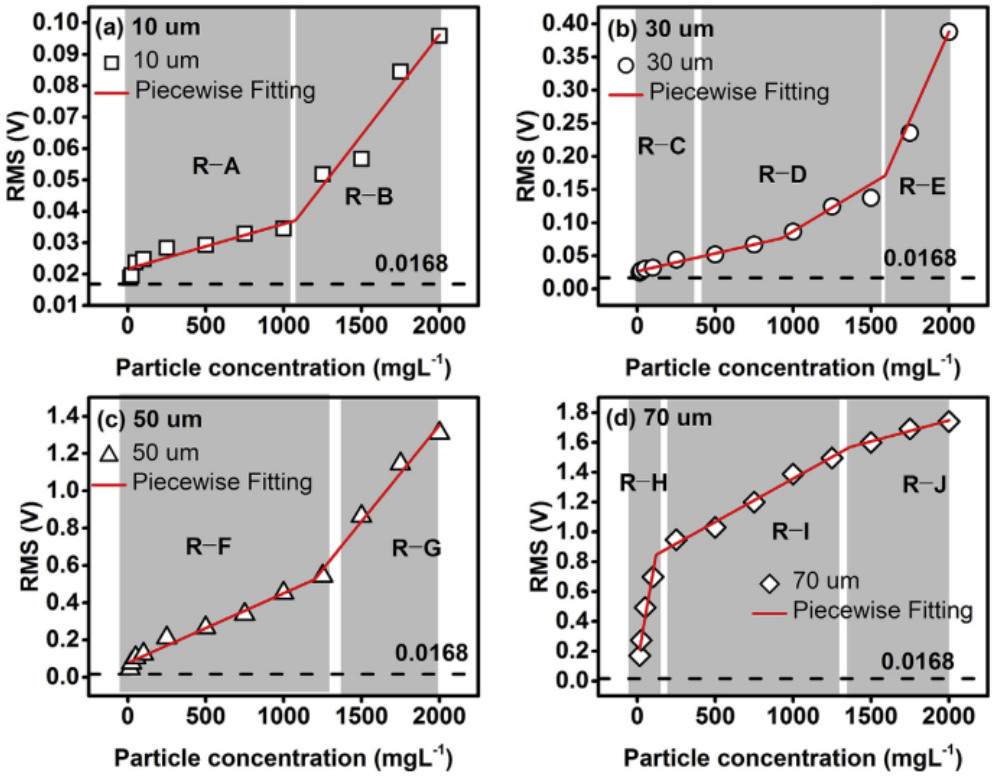

*a) тестовая установка, b) установленные датчики*

Установка состояла из подшипника скольжения на валу с двумя подшипниками качения. Нагрузка на подшипник скольжения создавалась прижиманием к нему нагрузочного рычага снизу. Вал приводился во вращение двигателем 0,75 кВт через ремённую передачу. Скоростью вращения двигателя управлял регулятор скорости. Над подшипником была установлена ёмкость со смазочным маслом для создания гравитационного тока масла в подшипник. Измерения снимались тахометром, датчиком температуры подшипника, датчиком акустической эмиссии и акселерометром.

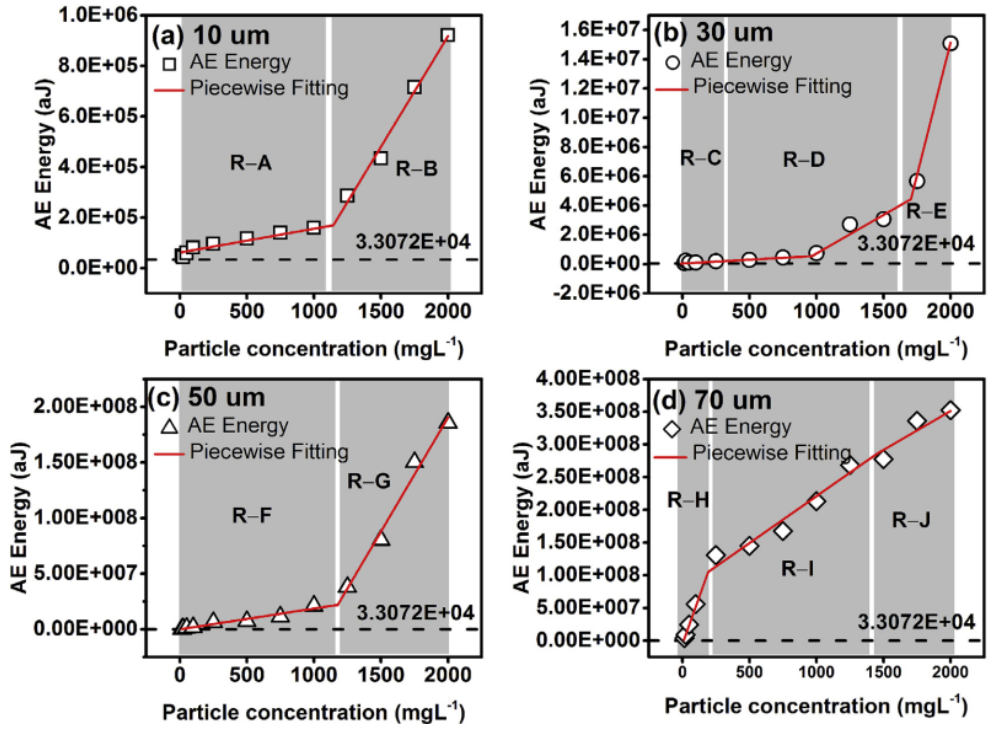
Для загрязнения масла использовались частицы кварцевого песка. В ходе исследования был проверен режим работы с незагрязнённым маслом и с четырьмя кейсами загрязнений:

1. Размером частиц загрязнения 10 мкм при 12 разных концентрациях.
2. Размером частиц загрязнения 30 мкм при 12 разных концентрациях.
3. Размером частиц загрязнения 50 мкм при 12 разных концентрациях.
4. Размером частиц загрязнения 70 мкм при 12 разных концентрациях.

В качестве основных характеристик акустической эмиссии использовались среднеквадратичное значение амплитуды и энергия излучения. Графики этих величин в разных кейсах с разными концентрациями загрязняющих частиц показаны ниже.



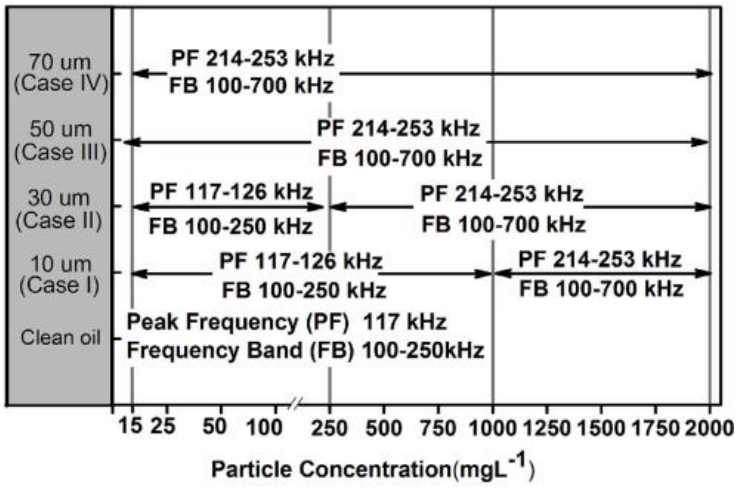

*Развитие сренеквадратичного значения амплитуды эмиссии для четырёх кейсов*



*Развитие энергии излучения для четырёх кейсов*

На графиках пунктирной линией показано значение амплитуды или энергии в бездефектном режиме. Красной линией показан результат кусочной аппроксимации.

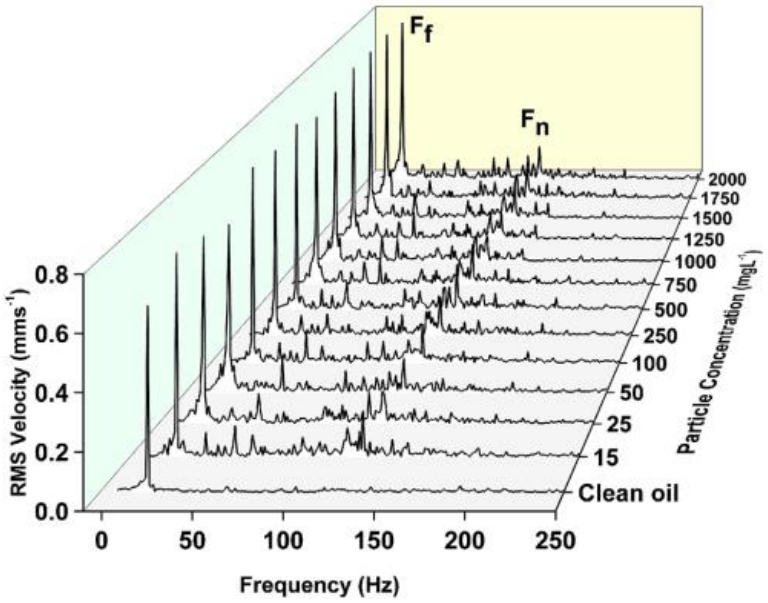
Результат обработки спектров сигнала акустической эмиссии всех четырёх кейсов показан ниже.




*Диаграмма, показывающая результат обработки данных акустической эмиссии бездефектного режима и четырёх кейсов*

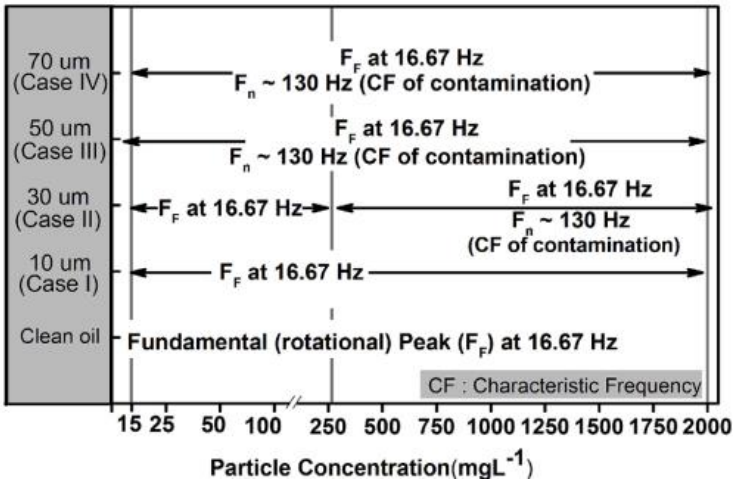
На диаграмме горизонтальная ось соответствует концентрации загрязнения, вертикальная – кейсам. Для каждого кейса указаны границы концентраций, при которых для спектра были характерны активности на указанных доминирующих частотах PF и в указанном частотном диапазоне FB.

Пример данных вибрации, записанных при испытаниях, показан ниже.




*Спектры СКЗ виброскорости в бездефектном режиме и при различной концентрации загрязнения с размером частиц 50 мкм*

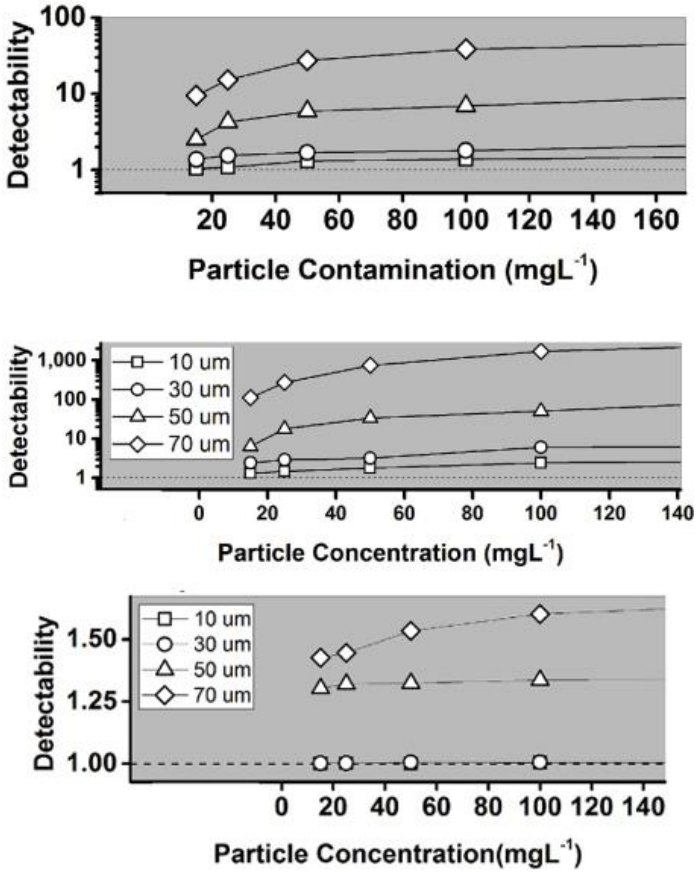
Результат обработки данных вибрации всех четырёх кейсов показан ниже.




*Диаграмма, показывающая результат обработки данных вибрации бездефектного режима и четырёх кейсов*

На диаграмме для каждого кейса указаны границы концентраций, при которых в спектре доминировали фундаментальная частота $F_F$ или частота, характеризующая загрязнение $F_n$.

Исследователи также рассмотрели вопрос распознаваемости загрязнения. Распознаваемость определялась как отношения уровня сигнала при дефекте к уровню сигнала без дефекта. Чем выше распознаваемость при использовании какого-либо сигнала, тем проще определить наличие дефекта по уровню сигнала. На изображении ниже показаны графики распознаваемости при использовании среднеквадратичного значения уровня акустической эмиссии, энергии акустической эмиссии и уровня вибрации.




*Распознаваемость при использовании (сверху вниз): среднеквадратичного значения уровня акустической эмиссии, энергии акустической эмиссии и уровня вибрации*

В результате проведённых испытаний исследователи сформулировали основные диагностические правили, при помощи которых можно оценивать степень загрязнения подшипников скольжения:

1. Спектр акустической эмиссии подшипника без дефекта сосредоточен в диапазоне 100-250 кГц с доминирующей частотой 117 кГц. С увеличением степени загрязнения частотный диапазон расширяется до 100-700 кГц, доминирующая частота смещается в область 214-253 кГц.
2. Для виброспектра подшипника без дефекта характерно присутствие доминирующей гармоники на фундаментальной частоте $F_F$. С развитием загрязнения в спектре развивается гармоника на характерной частоте загрязнения $F_n$.
3. Временные характеристики акустической эмиссии и вибрации (среднеквадратичное значение, энергия), как правило, возрастают с повышением концентрации загрязнения. Для загрязнения с размером частиц 10 мкм рост практически незаметен.
4. Распознаваемость загрязнения растёт с увеличением концентрации. Распознаваемость загрязнения выше при рассмотрении энергии акустической эмиссии, чем при рассмотрении среднеквадратичного значения.

# Определение состояния ветрогенератора методами кластерного анализа

*Источник: Turnbull A, Carroll J, McDonald A, Koukoura S. Prediction of wind turbine generator failure using two-stage cluster-classification methodology. Wind Energy. 2019;1–10.*

*https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/we.2391*

Группа исследователей из Университета Стратклайда в Шотландии предложила способ определения состояния ветрогенератора методами кластерного анализа данных вибрации. Соответствующая статья была опубликована в издании Wind Energy в ноябре 2019 года.

Исследователи основывались на том, что генераторы, имеющие близкие состояния, будут обладать схожими свойствами вибрации основных элементов. Для математического описания предложенного способа исследователи использовали данные 15 ветряных генераторов с 8 ветряных ферм. Набор данных каждого генератора включал в себя от 4 до 10 выборок сигналов вибрации, записанных с промежутком не менее недели. Каждая выборка представляла собой десятисекундную осциллограмму, записанную с частотой 25 кГц. Генераторы относились к трём группам: за год, за 5-6 месяцев, за 1-2 месяца до наступления дефекта. Помимо данных вибрации, выборки также были дополнены рабочими параметрами генератора.

Для применения алгоритмов классификации исследователи преобразовали наборы данных в наборы характерных свойств. Из каждой выборки были получены следующие свойства:

- Временные:
  - Минимальное значение;
  - Максимальное значение;
  - Среднее значение;
  - Действующее значение;
  - Среднеквадратичное значение;
  - Коэффициент эксцесса (куртозис);
- Частотные:
  - Амплитуда гармоники с индексом 0,5;
  - Амплитуда гармоники с индексом 1;
  - Амплитуда гармоники с индексом 1,5;
  - Амплитуда гармоники с индексом 2;
  - Амплитуда гармоники с индексом 2,5;
  - Амплитуда гармоники с индексом 3;
  - Амплитуда гармоники с индексом 3,5;
- Относящиеся к рабочим параметрам:
  - Среднее значение вырабатываемой мощности;
  - Средняя скорость вращения вала;
  - Средний электромагнитный момент;
  - Средняя скорость ветра.

Суть предложенного исследователя способа состоит в двойной классификации состояния генератора. Первый этап классификации группирует выборки данных по подобию рабочих характеристик, таким образом выделяя группы данных, соответствующих работе генераторов в примерно одинаковых условиях. На втором этапе выполняется группировка выборок в каждой из

выделенных ранее групп рабочих параметров. Выделенные на втором этапе группы соответствовали трём описанным ранее состояниям генераторов.

Общая схема предложенного способа, включая подготовку данных для обучения и тестирования, показана ниже.

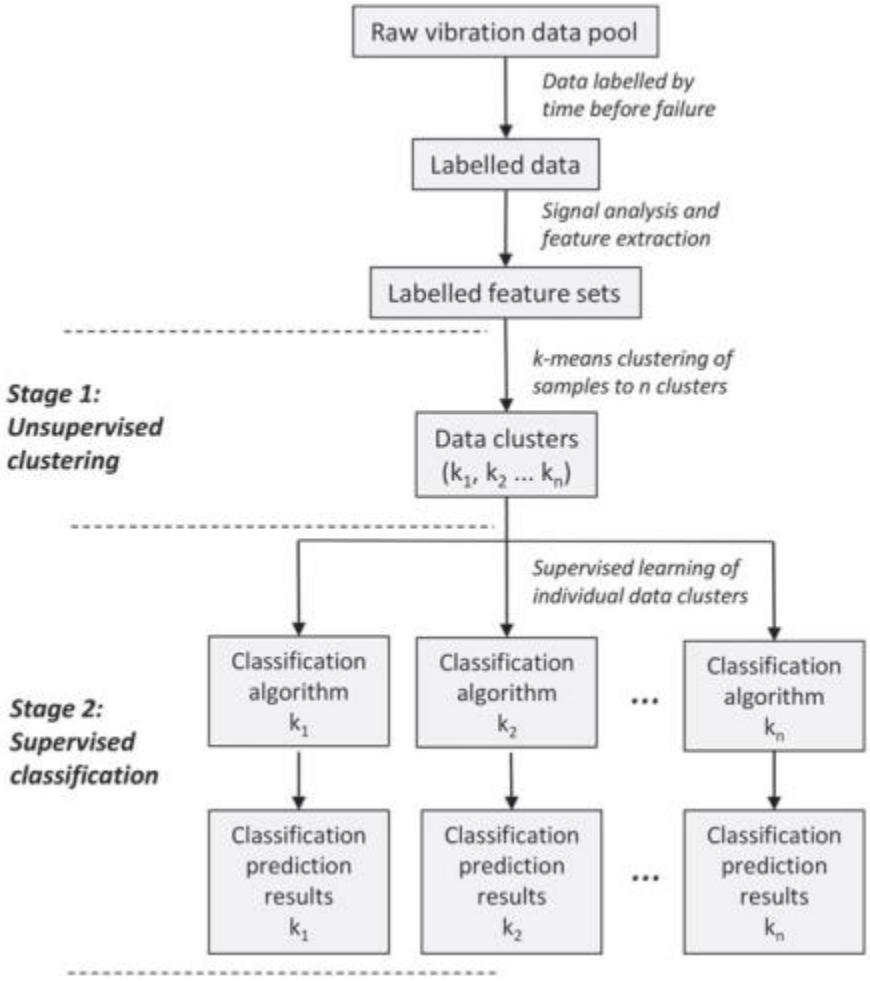



*Схема предложенного способа*

Исследователи также использовали алгоритм прямой одноступенчатой классификации состояния генератора напрямую по всем доступным свойствам. Общая точность одноступенчатой классификации составила 67%, двухступенчатой 81,6%.

# Способ разделения сигналов и локализации множественных источников разрядной активности в силовых кабелях

*Источник: G. Robles, M. Shafiq and J. M. Martínez-Tarifa, "Multiple Partial Discharge Source Localization in Power Cables Through Power Spectral Separation and Time-Domain Reflectometry," in IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 68, no. 12, pp. 4703-4711, Dec. 2019, doi: 10.1109/TIM.2019.2896553.*

*https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/8653470*

Группа исследователей из Испании и Финляндии предложила метод разделения сигналов и локализации множественных источников разрядной активности в силовых кабелях, основанный на анализе частотных характеристик сигнала. Статья авторов была опубликована в IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement в феврале 2019 года.

При распространении по кабелю сигналы будут искажаться, что проявляется в повышении амплитуд одних и снижении амплитуд других гармоник. Множество сигналов разрядной активности, происходящих из одного места, будут обладать статистически похожими характеристиками гармоник. Этот принцип лёг в основу метода, предложенного исследователями. В методе выделяются две полосы частот: одна в низкочастотной, другая в высокочастотной частях спектра. Названия «низкочастотная» и «высокочастотная» являются условными и необязательно соответствуют НЧ- и ВЧ-областям спектра. Далее рассчитывается спектральная энергия сигналов в каждой из областей. Две полученные спектральные энергии нормализуются делением на спектральную энергию всего сигнала. По двум полученным величинам, PRL (спектральная энергия низкочастотной части сигнала) PRH (спектральная энергия высокочастотной части сигнала), можно делать вывод о принадлежности групп сигналов к разным источникам разрядной активности в кабеле. Для разделения сигналов удобно использовать кластерный анализ в пространстве PRL-PRH.

Схема испытательной установки для проверки результатов предложенного способа показана ниже.

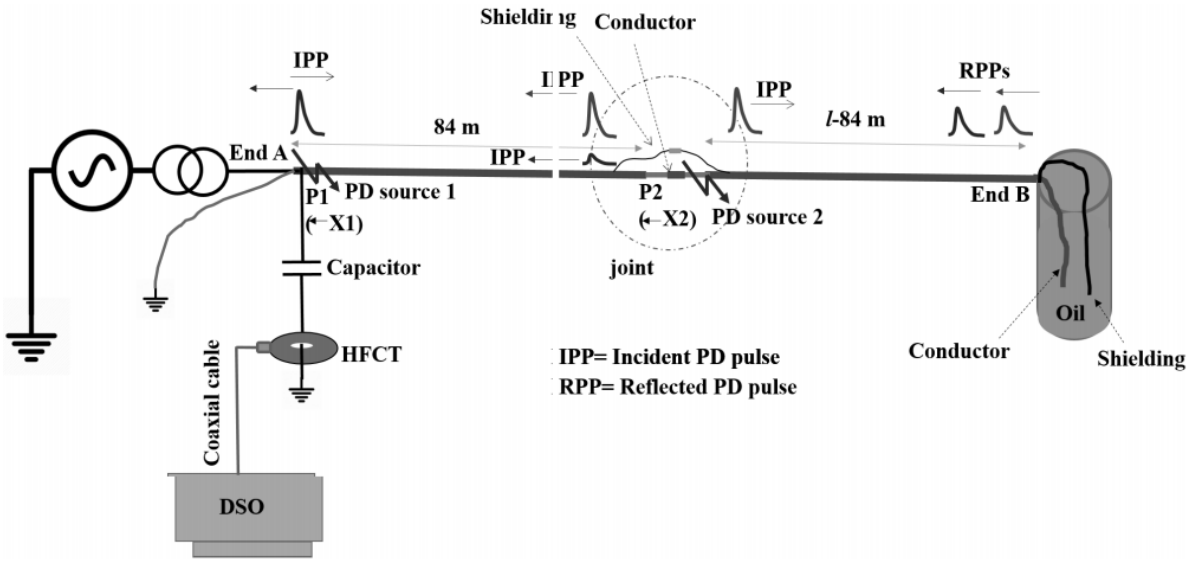
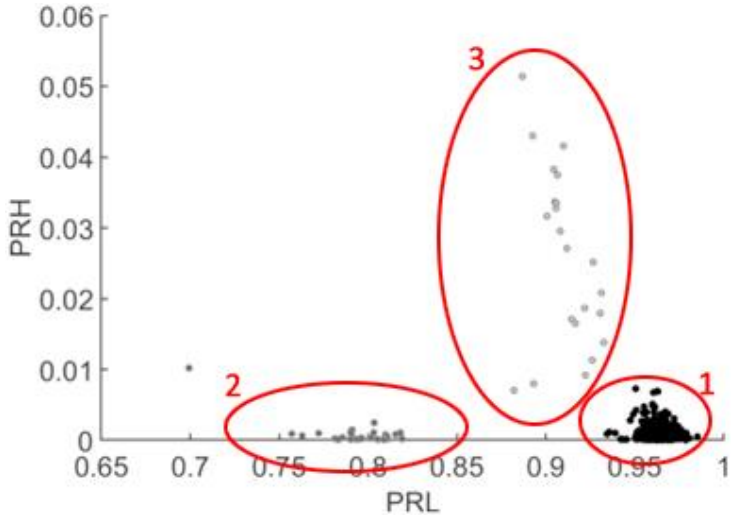



*Схема испытательной установки*

В установке использовался новый кабель 20 кВ с изоляцией из полиэтилена низкой плотности. Длина кабеля составляла 150 метров, площадь проводника 1 мм$^2$, диаметр внешней оболочки 7,7

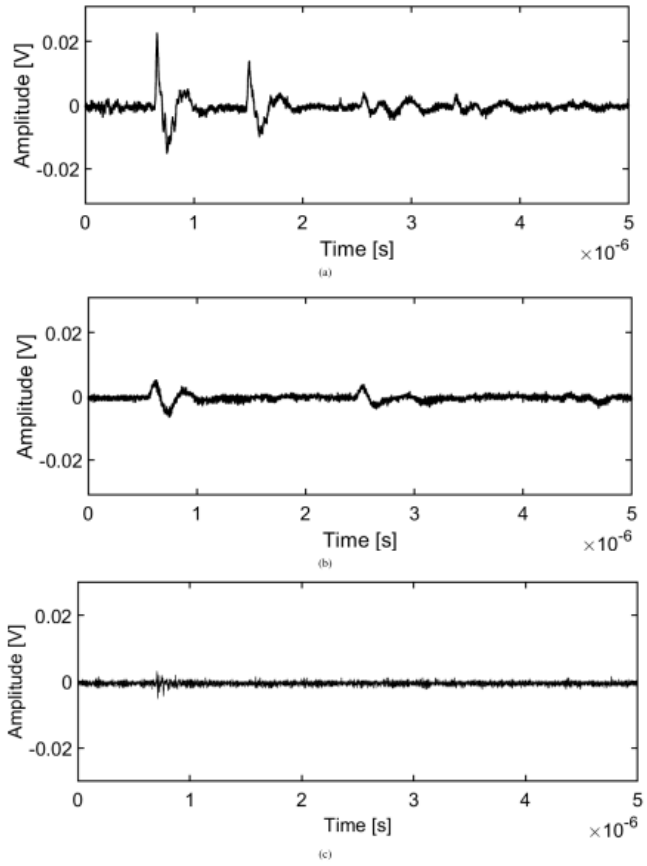
мм. Оба конца кабеля были зачищены от изоляции, конец В был помещён в ёмкость с трансформаторным маслом чтобы предотвратить образование дополнительных ЧР. Конец А был соединён с высоковольтным генератором. На этом же конце на вывод экрана кабеля был установлен высокочастотный трансформатор тока (ВЧТТ) с диапазоном 80 МГц и чувствительностью 5 В/А. ВЧТТ был подключен к осциллографу с частотой 10 Гвыборок/с. Для приведения установки в соответствие указаниям IEC 60885-3 на конце А также был установлен измерительный конденсатор ёмкостью 1 нФ. Таким образом, конец кабеля А имел низкий импеданс, а конец В – высокий. Все импульсы разрядной активности, происходящей в кабеле, отражались от конца В обратно в кабель и затухали на конце А. Для создания дефекта кабель был разрезан в средней точке (Р2 на схеме). Затем центральные проводники двух частей кабеля в этой точке были спаяны, а экраны были соединены зажимами типа «крокодил». Точкой нахождения второго дефекта являлся сам конец А кабеля, на котором была удалена изоляция.

При обработке данных использовались границы 2.4 - 57.6 МГц для низкочастотной области и 58.4 - 59.2 МГц для высокочастотной области. Результат разделения разных сигналов по значениям PRL и PRH показан ниже.




*Результат разделения сигналов. Разные выделенные группы сигналов показаны точками разных типов*

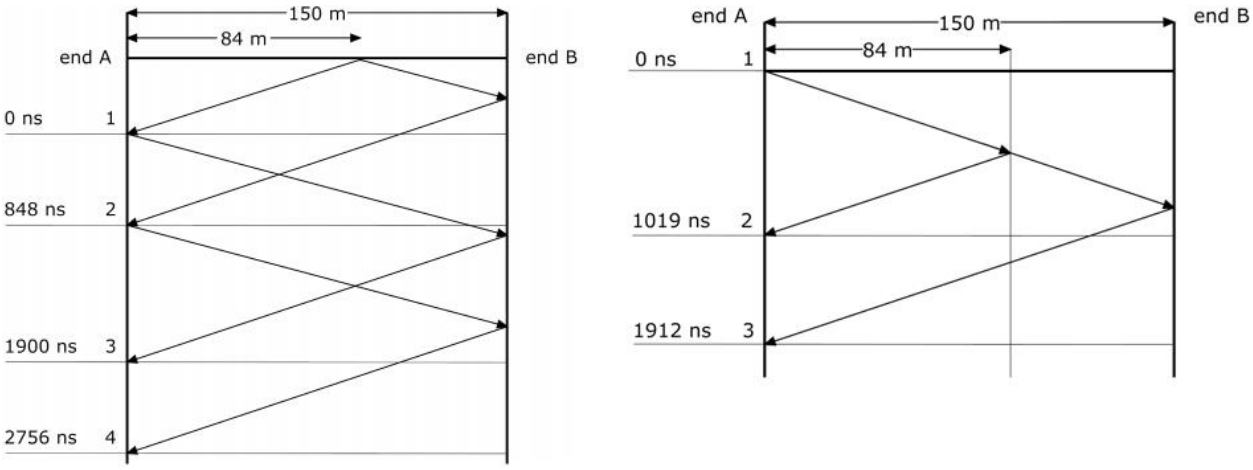
Типичные осциллограммы сигналов 1, 2 и 3 кластеров показаны ниже.




*Осциллограммы сигналов 1, 2 и 3 кластеров (сверху вниз)*

Первые два типа сигналов содержат чётко различимые всплески сигнала, соответствующие прямому и отражённому сигналам. Третий тип сигнала не содержит отдельных всплесков. Его дальнейший анализ показал, что спектральная энергия сосредоточена в диапазоне 88-108 МГц, что соответствует FM-радиоволнам, которые были зарегистрированы свободным концом экрана кабеля.

Дальнейший анализ сигналов первого и второго кластеров методом рефлектометрии позволил определить места разрядной активности обоих типов сигналов. Рассчитанные лестничные диаграммы распространения сигналов обоих типов показаны ниже.




*Рассчитанные лестничные диаграммы сигналов первого (слева) и второго (справа) кластеров*