



Современные тенденции и вопросы диагностики электрооборудования

Выпуск от 18 февраля 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. [Метод локализации источников ЧР в замкнутых объёмах](#)
2. [Локализация разрядной активности ЧР при помощи акустических измерений и распознавания изображений оборудования подстанций](#)
3. [Метод оценки времени жизни трансформатора по степени полимеризации](#)
4. [Измерение вибрации при помощи чувствительного элемента из паучьего шёлка](#)
5. [Применение генетического алгоритма для определения фундаментальной частоты вращения при сигнатурном анализе тока асинхронного двигателя](#)
6. [Определение дефектов электромеханических систем по сигналам тока и вибрации](#)
7. [Исследование точности методов определения состояния оборудования в режимах работы, не включённых в обучающую выборку](#)
8. [Способ определения наличия короткозамкнутых витков обмотки синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи мониторинга магнитного потока рассеяния](#)
9. [Метод контроля состояния РПН трансформатора по данным вибрации](#)
10. [Метод диагностики асинхронных двигателей при помощи встроенных датчиков магнитного потока](#)
11. [Опыт разработки беспроводного датчика температуры для синхронных двигателей с постоянными магнитами](#)
12. [Исследование возможности контроля механических дефектов обмоток трансформатора по данным магнитного потока](#)

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

Метод локализации источников ЧР в замкнутых объёмах

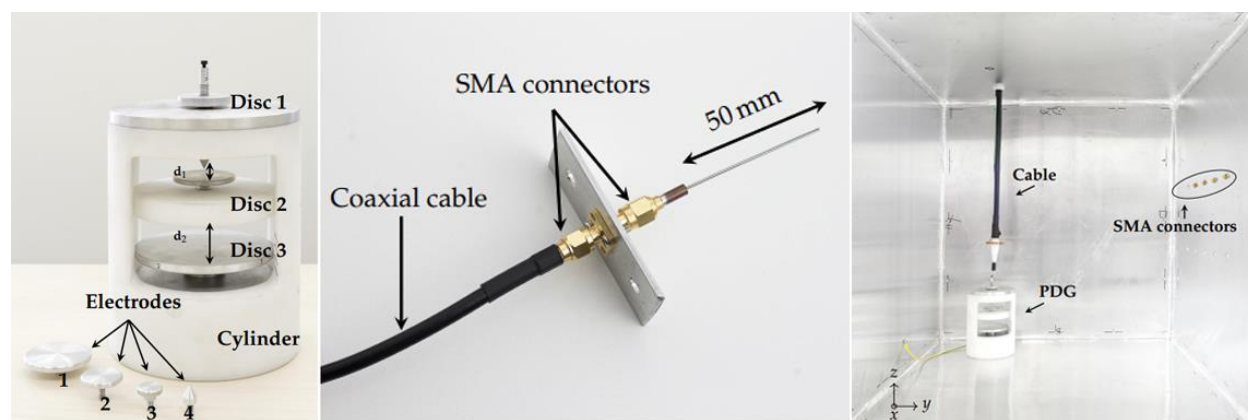
Источник: *Perfetto L, D'Antona G. Experimental Results of Partial Discharge Localization in Bounded Domains. Sensors. 2021; 21(3):935.*

<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/3/935>

Группа исследователей из Миланского технического университета в Италии разработала метод локализации источников ЧР в замкнутых объёмах в оборудовании среднего и высокого напряжения. Работа авторов была опубликована в издании MDPI Sensors в январе 2021 года.

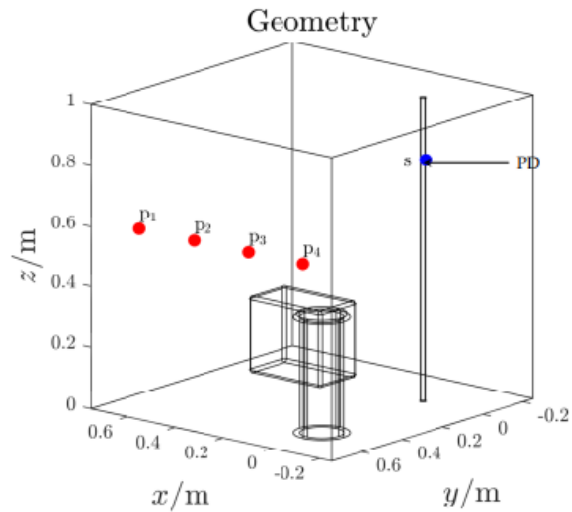
Суть метода состоит в математическом описании распределения электрического и магнитного полей в пространстве, задаваемом граничными условиями. В объёме выделяют ряд точек, в которых выполняется измерение характеристик электромагнитного поля. По характеру изменения затем эмпирическим методом выполняется обратное восстановление процесса развития электромагнитного поля. Результатом выполнения метода является набор локализованных объёмов в исследуемом объёме, которые являются источниками электромагнитной активности. Эти локализованные объёмы являются местами развития ЧР.

Работа метода была проверена в тестовой металлической камере, соответствующей исследуемому замкнутому объёму. В камере находился генератор ЧР, представлявший собой набор дисковых электродов с небольшим зазором между ними. На генератор ЧР подавалось напряжение 30 кВ. Для измерения уровня ЧР в стенку камеры были встроены SMA-разъёмы. К разъёмам были подключены monopольные антенны, которые подключались кабелями к системе сбора данных. Изображения генератора ЧР, антенны и испытательной камеры показаны ниже.



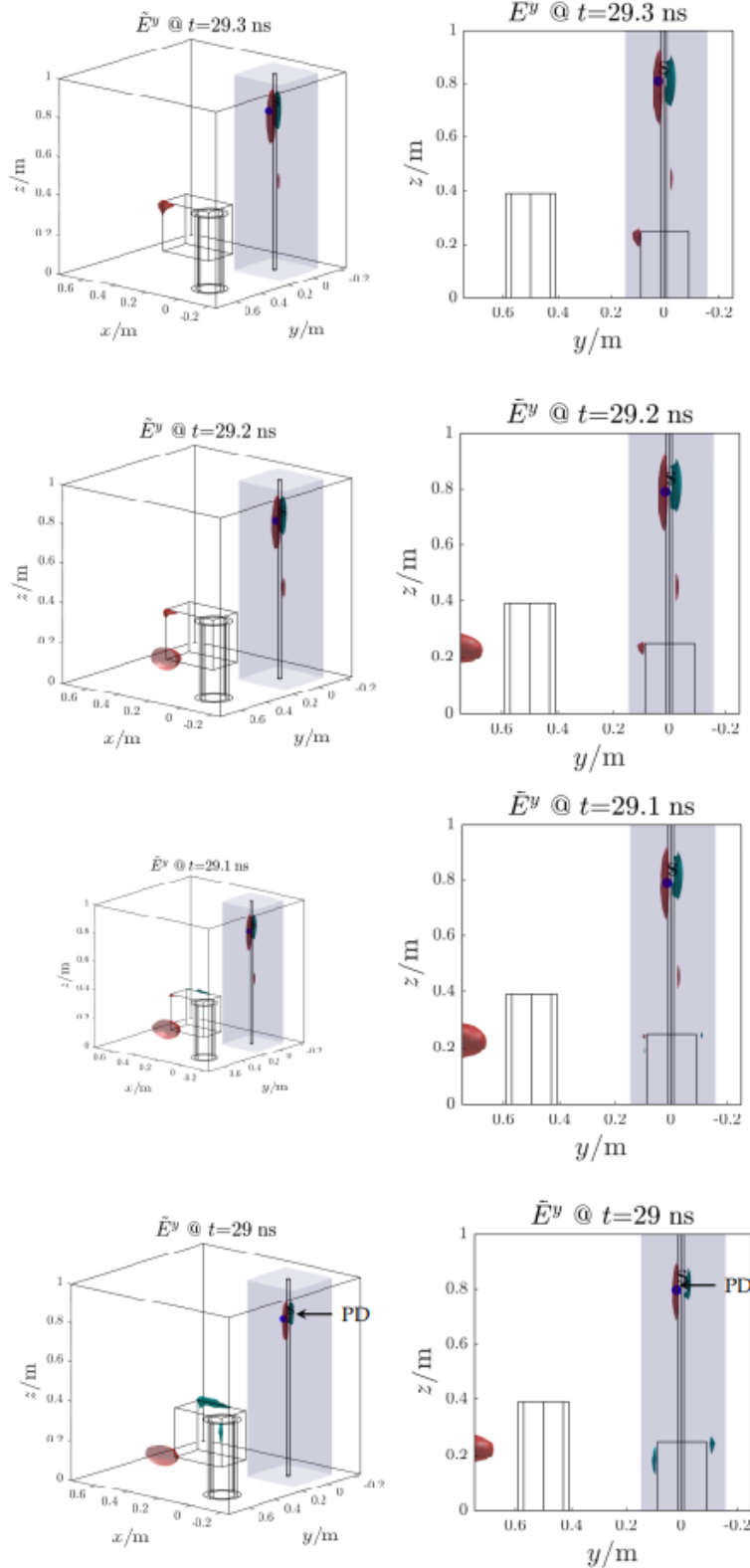
Слева направо: генератор ЧР, антенна, испытательная камера

Пример используемой при испытании расчётной модели показан ниже. Исследуемый объём показан в виде куба в трёхмерной системе координат, точки развития активности ЧР отмечены синим, точки измерения ЧР отмечены красным.



Расчётная модель

Этапы расчёта распределения электромагнитного поля показаны ниже. Верхнее изображение показывает начальный этап расчёта, когда границы локализуемого объёма источника ЧР размыты, нижнее изображение показывает конечный этап, когда источник ЧР локализован. Во внутренний объём камеры были помещены дополнительные металлические предметы для намеренного искажения распределения электромагнитного поля.



Этапы расчёта распределения магнитного поля. Левый столбец: аксонометрический вид, правый столбец: вид со стороны плоскости z-y

В заключении исследования указывается, что метод показал хорошую точность. Метод может использоваться для локализации источников ЧР во внутренних объёмах КРУЭ или трансформаторов. Дальнейшая работа исследователей будет направлена на разработку рекомендаций по оптимальному размещению датчиков и выбору параметров алгоритма.

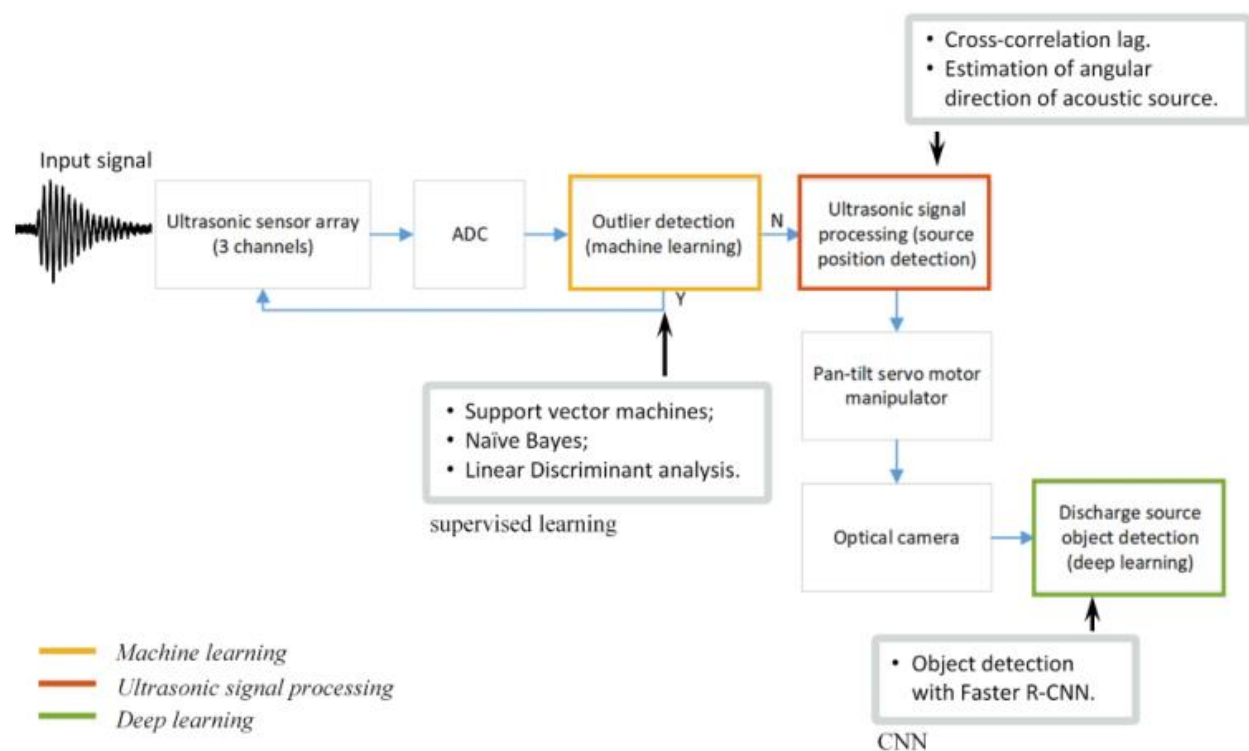
Локализация разрядной активности ЧР при помощи акустических измерений и распознавания изображений оборудования подстанций

Источник: Samaitis, Vykintas; Mažeika, Liudas; Jankauskas, Audrius; Rekuviene, Regina. 2021. "Detection and Localization of Partial Discharge in Connectors of Air Power Lines by Means of Ultrasonic Measurements and Artificial Intelligence Models" Sensors 21, no. 1: 20

<https://www.mdpi.com/1424-8220/21/1/20>

Группа исследователей из Каунасского технологического университета в Литве разработала метод и систему для локализации источников разрядной активности ЧР на электрических подстанциях, в которой используются акустические измерения ЧР и распознавание изображений оборудования подстанции. Соответствующая статья была опубликована в издании MDPI Sensors в декабре 2020 года.

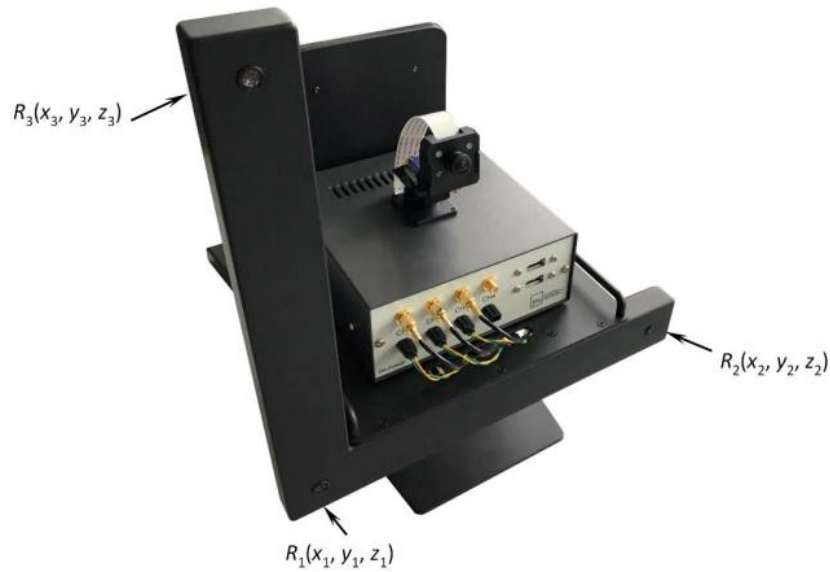
Суть разработанного исследователями метода показана ниже.



Предложенный метод

Данные об активности ЧР собираются тремя акустическими датчиками ЧР. Сигналы акустических датчиков обрабатываются методами машинного обучения для отделения истинных сигналов ЧР от шума. Затем по соотношению времён регистрации ЧР парами соседних датчиков выполняется определение угловых направлений на источник ЧР. Угловые направления от пар датчиков затем совмещаются, что позволяет определить координаты дефекта. Координаты передаются приводу оптической камеры, который выполняет поворот камеры в направлении источника ЧР. Изображение камеры затем обрабатывается методом распознавания изображений, который определяет элемент оборудования подстанции, в котором развиваются ЧР.

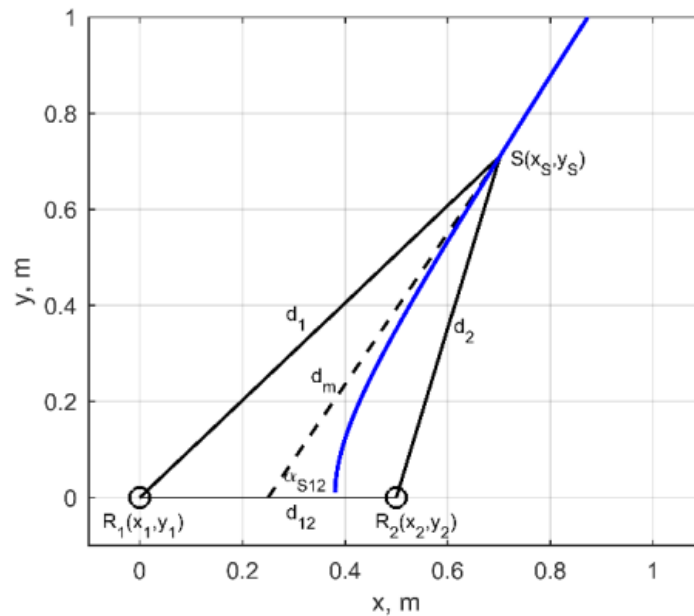
Для реализации метода исследователи специально разработали конструкцию детектора с тремя акустическими датчиками (R1, R2, R3), камерой и приводом. Угловое направление на источник ЧР определяется в плоскостях пар датчиков R1-R2 и R1-R3. Изображение детектора показано ниже.



Изображение детектора

Разделение импульсов истинных ЧР и шума в сигнале акустических датчиков выполнялось при помощи методов машинного обучения. Исследователи в лабораторных условиях проверили производительность нескольких методов, среди которых наилучшую точность показал метод опорных векторов с радиальной базисной функцией.

Принцип определения углового направления на источник ЧР между двумя датчиками показан ниже.



Принцип определения углового направления на источник ЧР от пары датчиков R1, R2

По временам прихода сигнала ЧР на оба датчика оцениваются координаты источника ЧР. Направление на ЧР будет соответствовать линии от средней точки между датчиками на источник ЧР.

После определения двух угловых направления на источник ЧР выполняется наведение оптической камеры и распознавание элемента оборудования подстанции при помощи свёрточной нейронной сети. Пример результата определения оборудования с дефектом, отображаемого пользователю, показан ниже.



Результат определения источника ЧР

Проведённые испытания показали, что при помощи разработанного метода можно определять источники развития ЧР в радиусе 8 метров с поперечной ошибкой не более 0.1 метров.

Метод оценки времени жизни трансформатора по степени полимеризации

Источник: Mohamadreza Ariannik, Ali A. Razi-Kazemi, Matti Lehtonen, *An approach on lifetime estimation of distribution transformers based on degree of polymerization, Reliability Engineering & System Safety, Volume 198, 2020, 106881, ISSN 0951-8320*

<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0951832019308555>

Группа исследователей из Финляндии и Ирана разработала метод оценки времени жизни распределительного трансформатора, в котором основным показателем качества работы трансформатора является состояние бумажной изоляции, которое оценивается по степени полимеризации. Работа авторов была опубликована в издании *Reliability Engineering and System Safety* в июне 2020 года.

В разработанном методе использовались вспомогательные модели развития влагосодержания бумажной изоляции и температуры наиболее нагретой точки обмотки по IEC 60076-7:2005. Дополнительно использовался параметр A , определяющий общее состояние бумажной изоляции в зависимости от влажности и содержания кислорода. Для расчёта развития степени полимеризации использовались модели из ранее опубликованных работ, где убывание минус первой степени степени полимеризации пропорционально произведению коэффициента A и отрицательной экспоненты времени. Общая схема основного алгоритма метода показана ниже.

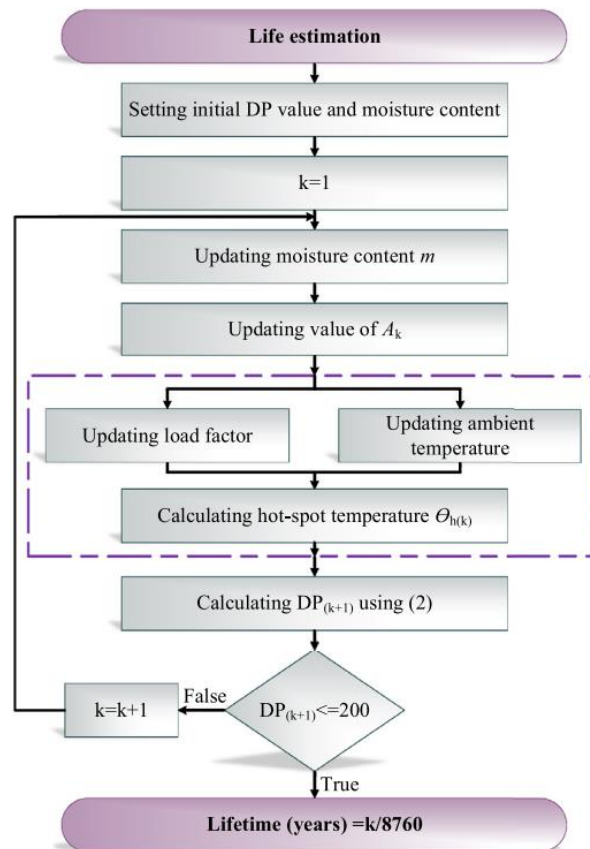
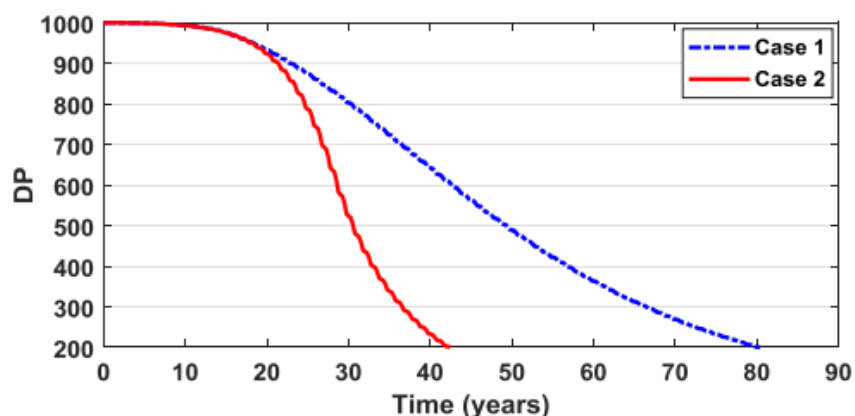


Схема определения времени жизни трансформатора

В методе сначала задавались начальные значения влагосодержания и степени полимеризации бумажной изоляции, для чего использовались паспортные данные или измерения на трансформаторе. Далее итеративно моделировалось развитие влагосодержания и рассчитывалось изменение параметра А. Далее, по данным коэффициента нагрузки трансформатора и температуры окружающей среды, определялась температура наиболее нагретой точки обмотки. На основании всех полученных данных в той же итерации определялось новое значение степени полимеризации. Точкой окончания срока жизни трансформатора считалось падение степени полимеризации до 200. В качестве базовой дискретности сбора данных для метода рассматривалось 1 значение измеряемых параметров в час, поэтому итоговое время жизни трансформатора в годах определялось как число итераций до падения степени полимеризации до 200, делёное на 8760.

Работа метода была проверена на двух кейсах распределительных трансформаторов мощностью 2500 кВА. Первый трансформатор работал в условиях увеличения коэффициента нагрузки от примерно 0,28 до 0,75 шагами по 2,6% в год. После достижения 0,75 коэффициент нагрузки оставался постоянным до конца жизни трансформатора. Второй трансформатор работал в аналогичных условиях, но коэффициент нагрузки поднимался до 1,00.

Расчётное изменение коэффициента полимеризации от 1000 в начале жизни до 200 в конце жизни трансформаторов показано ниже.



Изменение степени полимеризации трансформаторов

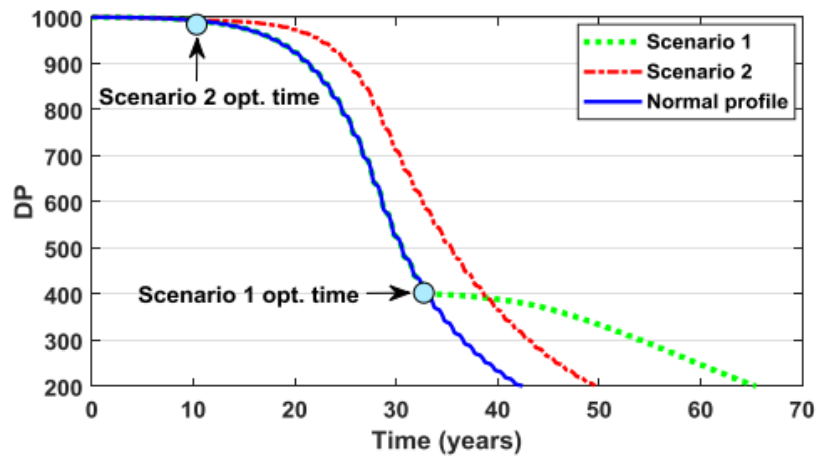
Результаты показали, что срок жизни первого трансформатора составляет 80,4 лет, второго 42,5 лет. Оценка срока жизни 80,4 лет первого трансформатора выглядит завышенной, но соответствует общей логике старения трансформатора, поскольку в данном кейсе предполагалось, что трансформатор никогда не будет работать с коэффициентом нагрузки выше 0,75 в течение всей жизни.

В исследовании также приведены рекомендации о выборе мероприятий по снижению влагосодержания бумажной изоляции. Выбор мероприятий делается между:

- Однократное снижение влагосодержания до начального уровня;
- Однократное снижение влагосодержания на определённую величину;
- Периодическое снижение влагосодержания на определённую величину.

Для каждого типа формулировалась задача оптимизации обслуживания, в рамках которой определялось оптимальное время для проведения мероприятия. Пример развития степени полимеризации при двух первых видах мероприятий по снижению влагосодержаний показан

ниже. Из примера видно, что мероприятия ведут к разному изменению времени жизни трансформатора.



Пример изменения кривой степени полимеризации при двух типах снижения влагосодержания: синий график – нормальное развитие, зелёный график – однократное снижение до начального уровня, красный график – развитие после однократного снижения на определённую величину

Измерение вибрации при помощи чувствительного элемента из паучьего шёлка

Источник: Zhen Liu, Qingbo He, Zhike Peng, Vision-based vibration measurement by sensing motion of spider silk, *Procedia Manufacturing*, Volume 49, 2020, Pages 126-131, ISSN 2351-9789

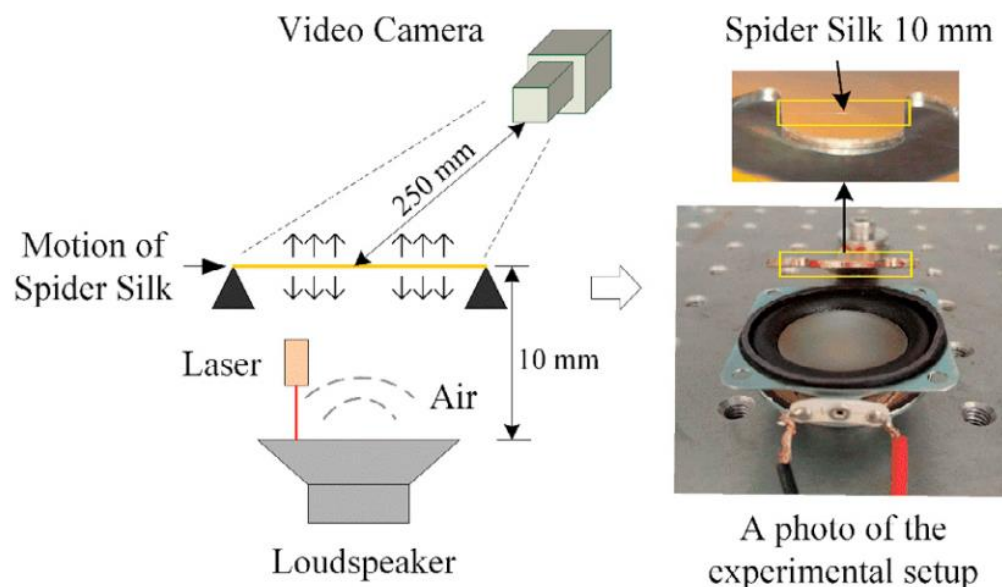
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978920316590>

Группа исследователей из Шанхайского университета транспорта предложила метод исследования вибрации, в котором в качестве первичного чувствительного элемента используется нить паучьего шёлка. Соответствующая статья была представлена на прошедшей в 2020 году International Conference on Through-Life Engineering Services.

Использование паучьего шёлка в качестве чувствительного элемента объясняется высокой удельной прочностью и широким диапазоном резонансных частот этого материала. В предложенном методе нить паучьего шёлка натягивается между двумя жёсткими опорами и размещается в непосредственной близости от источника вибрации. Воздушные колебания от источника вибрации воспринимаются нитью, которая начинает колебаться с аналогичными характеристиками, как и источник. За нитью постоянно следит видеокамера. Обработывая в реальном времени изображения с камеры можно получать непрерывный сигнал вибрации нити, соответствующий вибрации источника.

Для проверки работы метода исследователи использовали нить, закреплённую в гаечном ключе. Источником вибрации служил динамик, расположенный рядом с ключом. Движения нити постоянно контролировались камерой с частотой кадров 200 fps и разрешением картинки 256x128 пикселей. Для референса колебания динамика также контролировались лазерным виброметром.

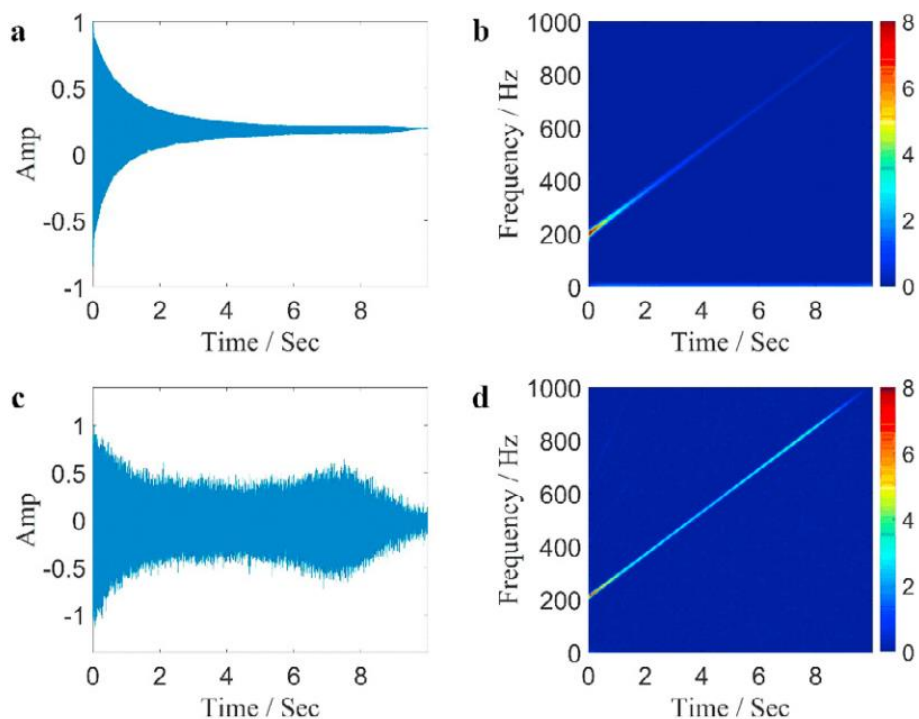
Общая схема предложенного метода измерения и изображения испытательной установки показаны ниже.



Слева: схема измерения, справа: схема испытательной установки

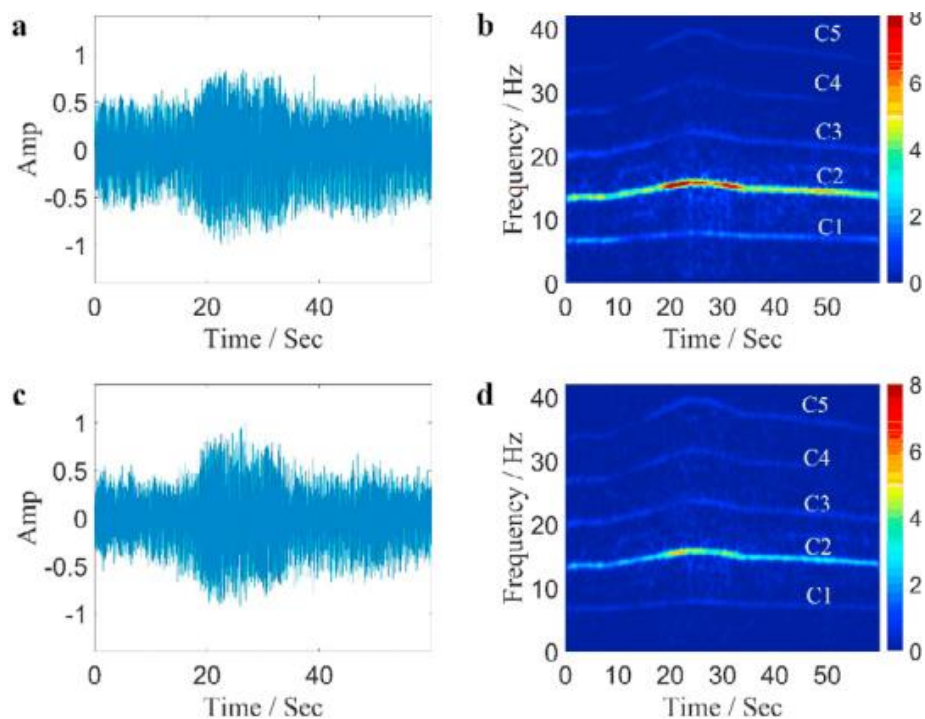
Испытания проводились в два этапа: сначала на динамик подавался сигнал с линейной модуляцией частоты от 200 Гц до 1000 Гц (chirp-сигнал), затем на динамик подавался сигнал, записанный на роторе работающего двигателя.

Осциллограмма и время-частотная диаграммы chirp-сигнала, записанные при помощи нити и лазерного виброметра, показаны ниже.



Осциллограмма и время-частотная диаграммы chirp-сигнала: выше – записанные при помощи лазерного виброметра, ниже – при помощи нити

Осциллограмма и время-частотная диаграммы сигнала работающего ротора, записанные при помощи нити и лазерного виброметра, показаны ниже.



Осциллограмма и время-частотная диаграммы сигнала ротора: выше – записанные при помощи лазерного виброметра, ниже – при помощи нити

Несмотря на некоторую зашумлённость сигнала, полученного при помощи нити, результаты измерений соответствуют друг другу.

В заключении исследования указано, что авторы также планируют использовать различные типы нити (радиальная, круговая) или отдельные элементы паутины для записи сигналов вибрации. Также планируется испытать передачу вибрации от источника нити не за счёт колебаний воздуха, а за счёт механической связи опор нити и источника.

Применение генетического алгоритма для определения фундаментальной частоты вращения при сигнатурном анализе тока асинхронного двигателя

Источник: D. A. Elvira-Ortiz, D. Morinigo-Sotelo, A. L. Zorita-Lamadrid, R. A. Osornio-Rios and R. J. Romero-Troncoso, "Genetic Algorithm Methodology for Broken Bar Detection in Induction Motor at Low Frequency and Load Operation," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 459-465, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864879.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864879>

Группа исследователей из Мексики и Испании предложила метод анализа потребляемого тока асинхронного двигателя для определения дефектов стержней при работе с низкой частотой и низкой нагрузкой. Работа авторов была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Для асинхронных двигателей, имеющих повреждённые стержни, характерно наличие боковых гармоник относительно гармоники фундаментальной частоты вращения. Точные значения частот боковых гармоник зависят от скольжения двигателя: чем оно ниже, тем ближе к фундаментальной гармонике будут располагаться дополнительные. Такое может происходить при работе двигателя в условиях низкой частоты или высокой нагрузки, в этом случае боковые гармоники будут плохо различимы на фоне фундаментальной, что существенно усложнит анализ спектра тока двигателя.

Схема предложенного исследователями метода показана ниже.

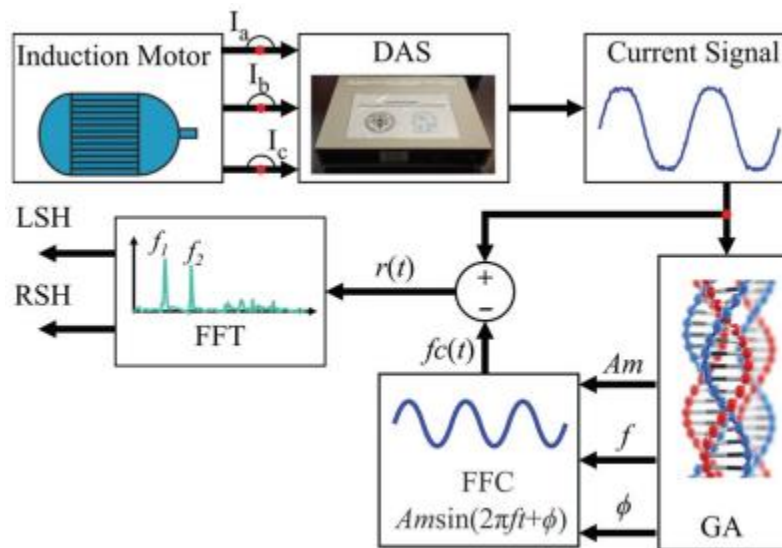


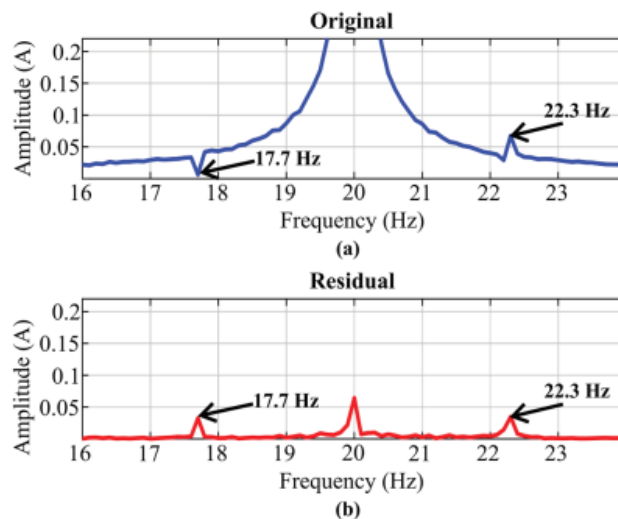
Схема предложенного метода

В схеме сигналы фазных токов двигателя собирает система цифрового сбора. Значения токов затем обрабатываются при помощи генетического алгоритма, который выделяет синусоиду фундаментальной гармоники из сигнала. Синусоида затем вычитается из значений фазных токов и получившийся сигнал подвергается Фурье-анализу. При исключённой из сигнала фундаментальной частоте боковые гармоники будут легко различимы.

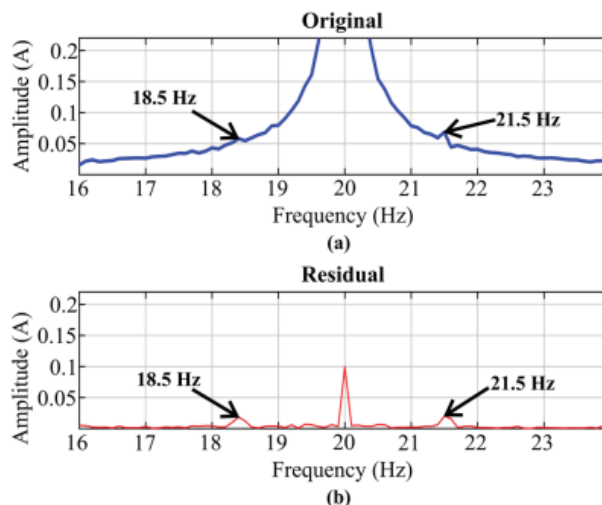
Генетический алгоритм, применённый авторами, имитирует процесс дарвиновской эволюции видов. В алгоритме рассматривается условная популяция синусоидальных сигналов, каждый из которых характеризуется амплитудой, частотой и фазой. Подвергая характеристики популяции случайным мутациям и проверяя значение критерия соответствия элемента популяции искомой фундаментальной синусоиде, через заданное число итераций можно найти синусоиду, максимально соответствующую фундаментальной.

Авторы проверили работу метода на тестовой установке, состоявшей из двигателя 0.75 кВт, работавший от преобразователя частоты, и электромагнитного тормоза, при помощи которого создавались разные условия работы двигателя.

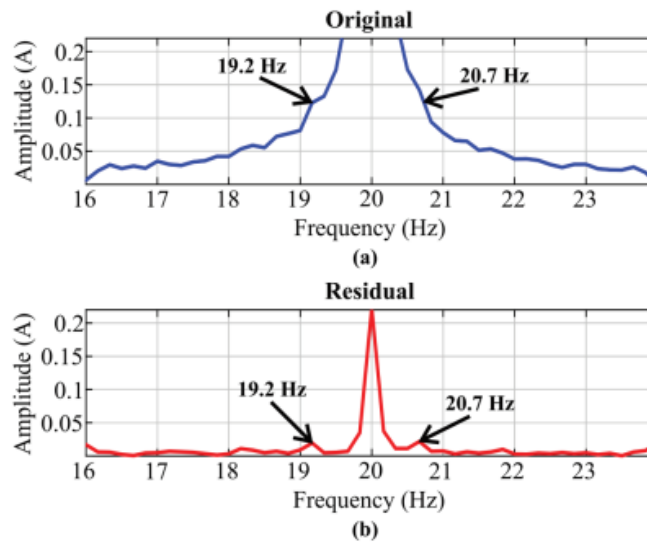
Примеры результатов применения метода показаны ниже.



Спектр тока двигателя в условиях высокой нагрузки: а) без удаления фундаментальной гармоники; б) с удалением фундаментальной гармоники



Спектр тока двигателя в условиях средней нагрузки: а) без удаления фундаментальной гармоники; б) с удалением фундаментальной гармоники



Спектр тока двигателя в условиях низкой нагрузки: а) без удаления фундаментальной гармоники; б) с удалением фундаментальной гармоники

Из примеров видно, что со снижением нагрузки фундаментальная гармоника всё больше маскирует боковые, что существенно усложняет диагностику двигателя. После вычитания синусоиды фундаментальной частоты эффект маскирования значительно снижается.

Определение дефектов электромеханических систем по сигналам тока и вибрации

Источник: J. J. Saucedo-Dorantes, R. A. Osornio-Rios, R. J. Romero-Troncoso, M. Delgado-Prieto and F. Arellano-Espitia, "Novel condition monitoring approach based on hybrid feature extraction and neural network for assessing multiple faults in electromechanical systems," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 466-473, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864835.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864835>

Группа исследователей из Мексики и Испании предложила способ определения множественных дефектов по сигналам тока и вибрации. Работа авторов была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

Схема предложенного метода показана ниже.

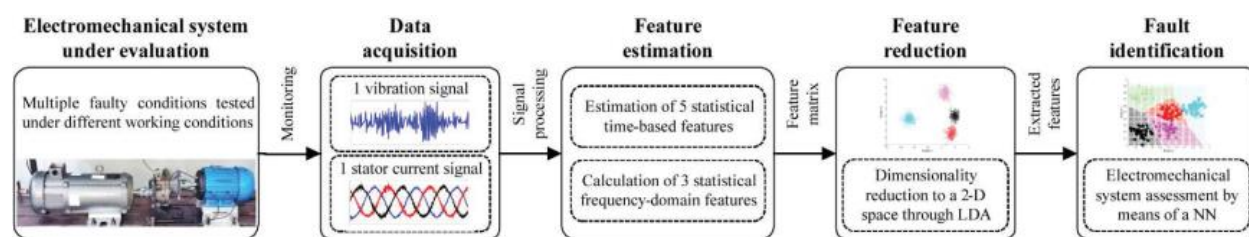
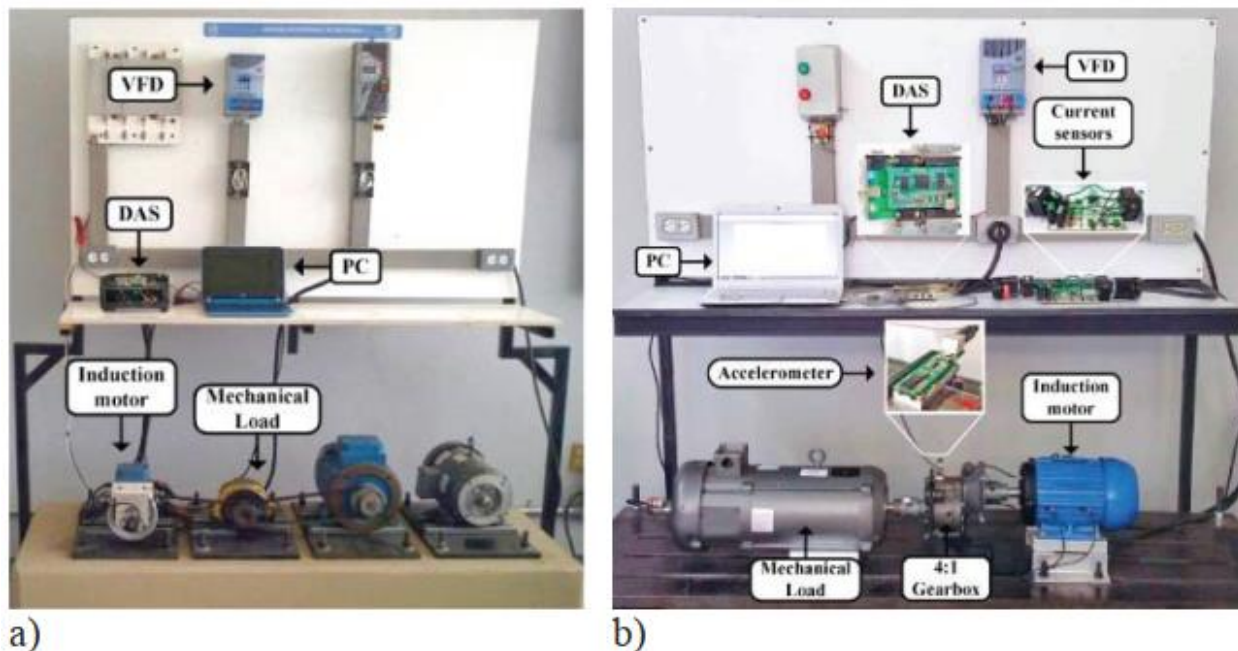


Схема предложенного метода

Входными данными метода являются ток одной из фаз двигателя, используемого в системе, и его вибрация. Сигналы собираются пакетами по 1 секунде в установившемся режиме работы. По осциллограмме каждого сигнала рассчитывается набор его характерных свойств во временном и частотном представлениях. Рассчитываемыми временными свойствами являются максимальное значение, действующее значение, среднеквадратичное отклонение, коэффициент пика нагрузки. Рассчитываемыми частотными свойствами являются средняя частота, действующее значение частоты, среднеквадратичное отклонение частоты. Получившийся таким образом набор из 14 свойств описывает состояние системы. К набору свойств затем применяется метод линейного дискриминантного анализа, в ходе которого определяются линейные комбинации свойств, которые наиболее полно характеризуют состояние системы в пространстве меньшего числа свойств. Результатом применения метода является определение 2 синтетических свойств, составленных комбинацией 14 ранее рассчитанных свойств. Затем кластеры точек, описывающие состояние системы в таком пространстве из 2 синтетических свойств, разделяют при помощи искусственной нейронной сети. Каждый отделённый кластер таким образом будет описывать один режим работы системы.

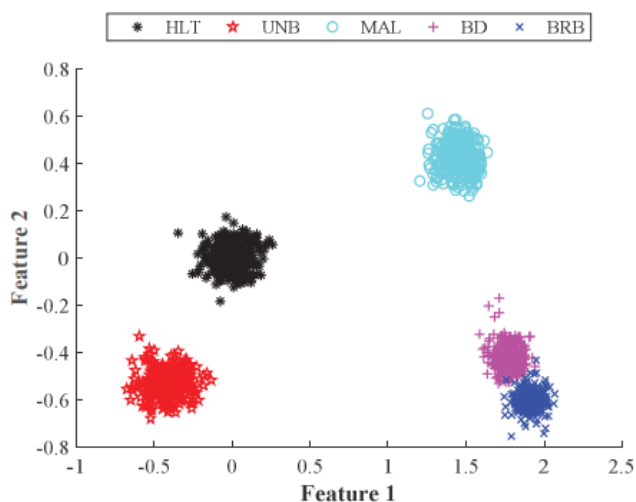
Работа метода была проверена на двух тестовых установках. Первая состояла из трёхфазного двухполюсного двигателя 971 Вт, 220 В WEG 00136APE48T, питаемого от преобразователя частоты WEG CFW08. Нагрузка на двигателе создавалась ременной передачей, соединяющей вал двигателя с маломощным генератором. Вторая установка состояла из трёхфазного двигателя 1492 Вт WEG 00236ET3E145T-W, питаемого от преобразователя частоты WEG CFW08. Нагрузка на двигателе создавалась при помощи генератора постоянного тока, который был соединён с двигателем через редуктор. Изображения обеих установок показаны ниже.



Изображения обеих тестовых установок

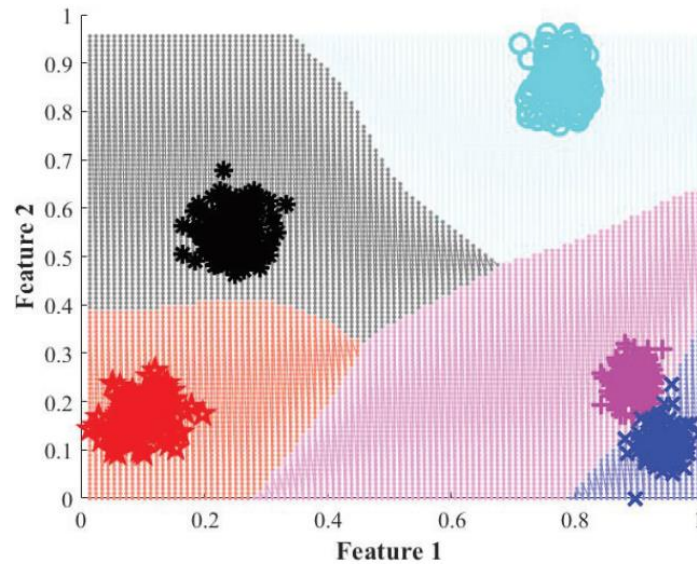
Данные датчиков, установленных на двигателях, собирались при помощи АЦП Texas Instruments ADS 7841, обработка данных выполнялась при помощи пакета Matlab. Во время испытаний первая установка запускалась в бездефектном режиме, с небалансом ротора, расцентровкой валов, дефектом подшипника и дефектом стержня обмотки двигателя. Вторая установка запускалась в бездефектном режиме, с 25- и 75-процентным износом шестерней редуктора, дефектом стержня обмотки двигателя и расцентровкой валов.

Пример одного из результатов испытаний показан ниже. Определённые при помощи линейного дискриминантного анализа синтетические свойства обозначены Feature 1 и Feature 2, каждый отдельный кластер точек соответствует отдельному режиму работы первой установки.



Режимы работы установки: HLT – бездефектный режим, UNB – небаланс, MAL – расцентровка, BD – дефект подшипника, BRB – дефект стержня

Границы разделения режимов работы, определённые искусственной нейронной сетью, показаны ниже.



Границы режимов работы

По информации авторов, точность классификации дефектов при испытаниях достигала 99%.

Исследование точности методов определения состояния оборудования в режимах работы, не включённых в обучающую выборку

Источник: M. Ramírez Chavez, L. Ruíz Soto, F. Arellano Espitia, J. J. Saucedo, M. Delgado Prieto and L. Romeral, "Evaluation of Multiclass Novelty Detection Algorithms for Electric Machine Monitoring," 2019 IEEE 12th International Symposium on Diagnostics for Electrical Machines, Power Electronics and Drives (SDEMPED), Toulouse, France, 2019, pp. 330-337, doi: 10.1109/DEMPED.2019.8864874.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8864874>

Группа исследователей из Мексики и Испании рассмотрела вопрос способности методов определения состояния оборудования, основанных на машинном обучении, определять состояние оборудования в режимах работы, параметры которых не включались в обучающие выборки методов. Работа авторов была представлена на прошедшем в августе 2019 года IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives.

В исследовании рассматривались три метода: по модели смеси нормальных распределений (GMM), по методу опорных векторов (OC-SVM) и по методу k -ближайших соседей (k -NN). В методе GMM состояние оборудования определяется по вероятности его принадлежности одному из классов состояния. Эта вероятность определяется по взвешенной сумме нормальных распределений, характеристики (матожидание и дисперсия) определяются обучающей выборкой. Методы OC-SVM и k -NN являются методами кластерного анализа, которые разделяют пространство признаков состояния оборудования на зоны, соответствующие разным режимам его работы. В методе OC-SVM решается задача разделения пространства признаков разделяющими плоскостями с максимальным зазором. В методе k -NN решается задача классификации каждой точки, определяющей состояние оборудования, так, чтобы она соответствовала тому же классу состояния оборудования, что и некоторое число (k) её соседей.

Схема проверки, реализованная в исследовании, показана ниже.

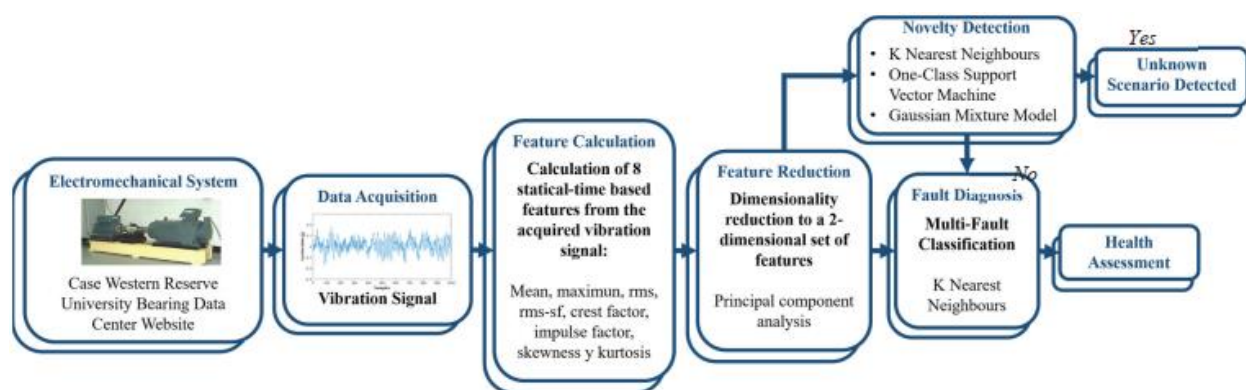
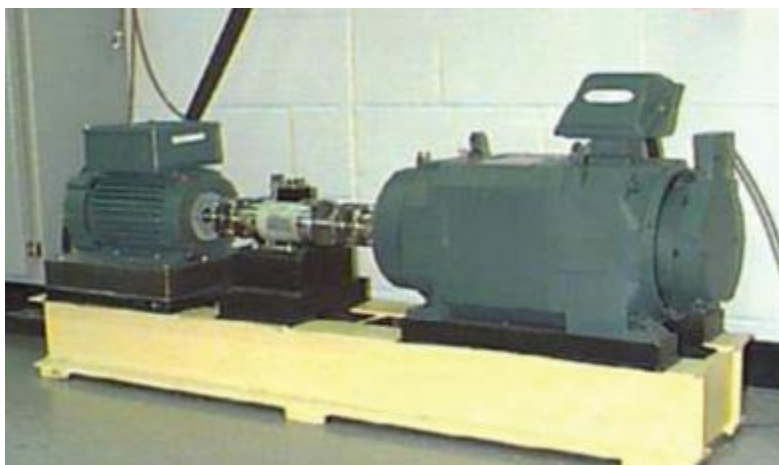


Схема исследования

Состояние оборудования определялось по сигналу вибрации. В ходе его обработки рассчитывались 8 характерных признаков: среднее значение, максимальное значение, действующее значение, коэффициент амплитуды, отношение максимального значения к среднему, коэффициент несимметрии, коэффициент формы, коэффициент эксцесса (куртосис). Далее пространство из 8 признаков при помощи метода анализа главных компонент преобразовывалось к пространству из

2 синтетических признаков для удобства визуализации. Затем выполнялась классификация состояния оборудования при помощи трёх рассматриваемых моделей: GMM, OC-SVM, k-NN. Каждая из моделей была предварительно обучена, но обучающая выборка включала меньшее число режимов работы оборудования, чем число режимов, используемых для проверки точности классификации. Для проверки точности затем повторно выполнялась классификация режима работы при помощи модели k-NN, которая была обучена на полном наборе режимов работы оборудования.

Работа метода была проверена на тестовой установке, состоящей из двигателя мощностью 2 л.с., задатчика механического момента, динамометра и схемы управления. Изображение установки показано ниже.



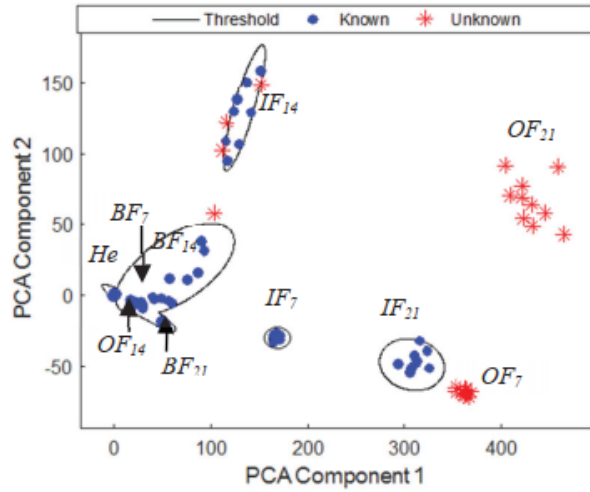
Тестовая установка

Были проведены 3 испытания. Объёмы обучающих выборок моделей и тестовых выборок для определения точности диагностики показаны ниже.

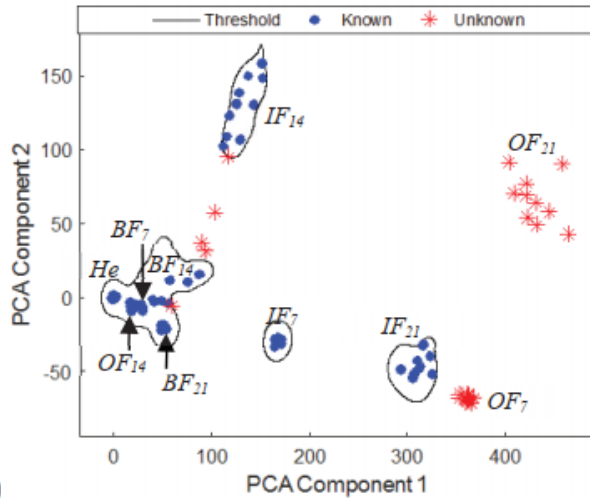
Case	Training	Test
1	He, BF14	He, BF7 , BF14, BF21
2	He, BF7, BF14, BF21, IF14	He, BF7, BF14, BF21, IF7 , IF14, IF21
3	He, BF7, BF14, BF21, IF7, IF14, IF21, OF14	He, BF7, BF14, BF21, IF7, IF14, IF21, OF7 , OF14, OF21

Обучающая и тестовая выборки в трёх испытаниях. Обозначения режимов работы: He – бездефектный, BF – дефект тела качения, IF – дефект внутреннего кольца, OF – дефект внешнего кольца подшипника. Число после типа дефекта указывает на его размер. Незвестные для моделей режимы работы установки в тестовой выборке отмечены жирным шрифтом

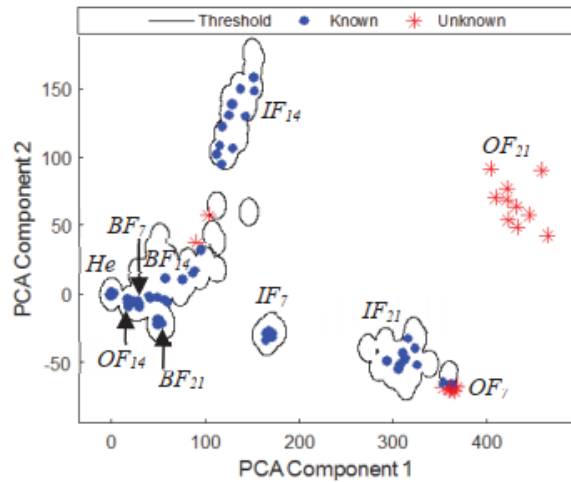
Результаты классификации состояния оборудования на примере испытания 3 показаны ниже.



a)



b)



c)

Результаты классификации состояний при испытании 3. Чёрной линией показаны границы разбиения зон состояний. Синие точки – режимы работы, присутствовавшие в обучающей выборке, красные – не присутствовавшие. Используемые модели (сверху вниз): GMM, OS-SCM, k-NN

Основные выводы, сформулированные исследователями после обработки результатов:

- Метод k-NN, как и другие методы, основанные на кластеризации при помощи расчётов расстояний между точками, имеет тенденцию к оверфиттингу (модель слишком близко приближает тренировочные данные и плохо работает на данных, даже несильно отличающихся от неё). Такое поведение нехарактерно для методов, основанных на вероятностном подходе (GMM) и на методе деления пространства признаков (OC-SVM).
- Метод GMM использует предопределённые начальные характеристики нормальных распределений, использованных при обучении. Это делает метод менее гибким и более требовательным к тренировочной выборке данных.
- Метод OC-SVM показал бóльшую гибкость и точность при классификации состояний оборудования.

Способ определения наличия короткозамкнутых витков обмотки синхронных двигателей с постоянными магнитами при помощи мониторинга магнитного потока рассеяния

Источник: V. Gurusamy, E. Bostanci, C. Li, Y. Qi and B. Akin, "A Stray Magnetic Flux-Based Robust Diagnosis Method for Detection and Location of Interturn Short Circuit Fault in PMSM," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-11, 2021, Art no. 3500811, doi: 10.1109/TIM.2020.3013128.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/9153063>

Группа исследователей из США и Турции предложила способ определения наличия короткозамкнутых витков в обмотке синхронных двигателей с постоянными магнитами, в котором используется сигнал магнитного потока рассеяния, измеряемый вне корпуса двигателя. Работа авторов была опубликована в *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* в июле 2020 года.

Подход, разработанный авторами, основан на том, что магнитный поток рассеяния будет повторять динамику изменения тока двигателя с поправкой на затухание. При отсутствии дефектов статорной обмотки двигателя его магнитный поток будет симметричен. При наличии короткозамкнутых витков распределение магнитного потока будет иметь перекося в районе повреждённых витков. Однако характер перекося может быть разным в зависимости от режима работы двигателя: как больше, так и меньше среднего уровня магнитного потока. Для обхода этого ограничения исследователи предложили использовать амплитуду третьей кратной гармоники фундаментальной частоты вращения двигателя. Согласно расчётам, её амплитуда всегда будет повышенной при наличии короткозамкнутых витков независимо от режима работы.

Схема измерения магнитного потока рассеяния показана ниже.

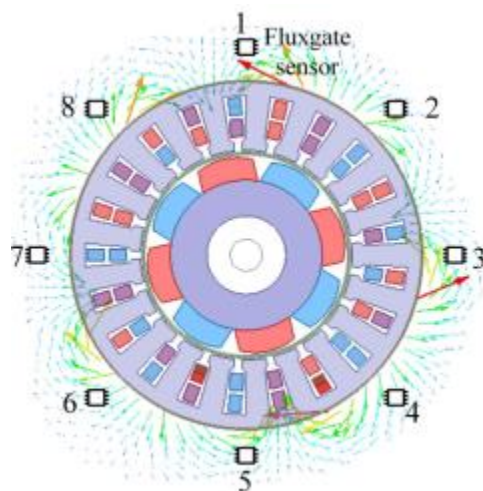
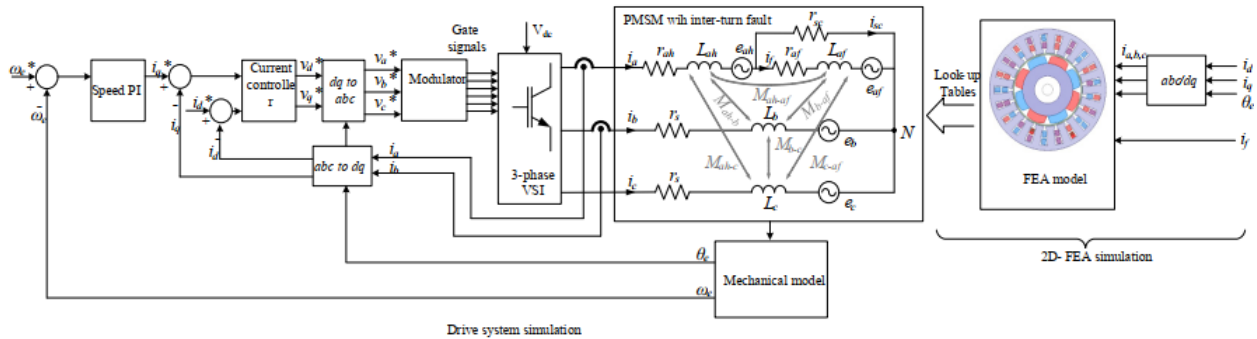


Схема измерения

В схеме набор датчиков магнитного потока размещается снаружи корпуса в непосредственной близости от него.

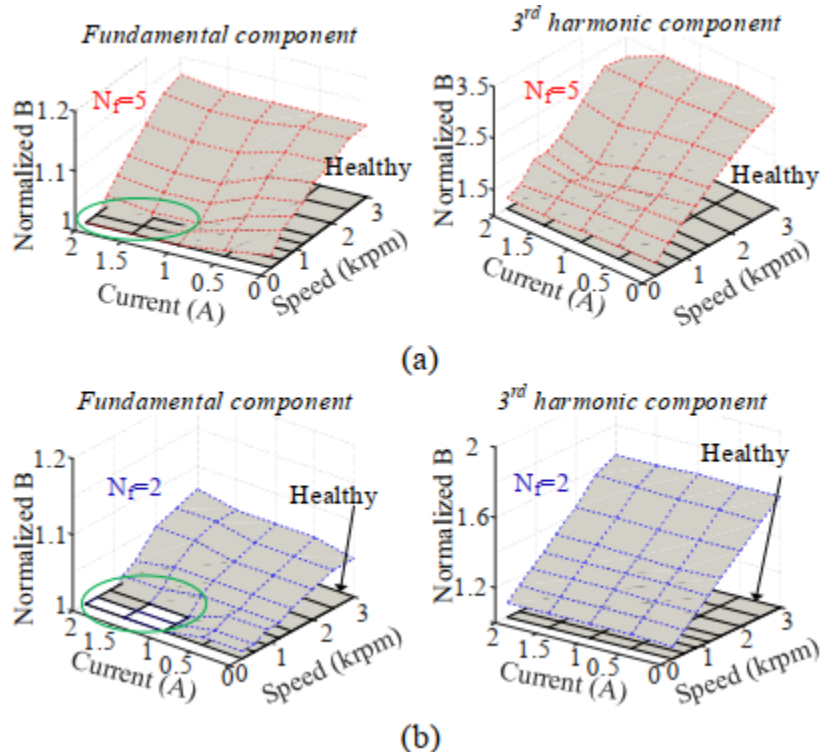
Работа метода была предварительно подтверждена комплексной моделью работы двигателя. Комплексная модель состояла из двух моделей: магнитной модели двигателя, выполнявшей расчёт

распределения магнитного потока, и электрической модели, выполнявшей расчёт фазных токов двигателя в разных режимах работы. Схема комплексной модели показана ниже.



Комплексная модель

Пример результатов моделирования, в котором исследовались режимы работы с 5 и 2 короткозамкнутыми витками, показан ниже.

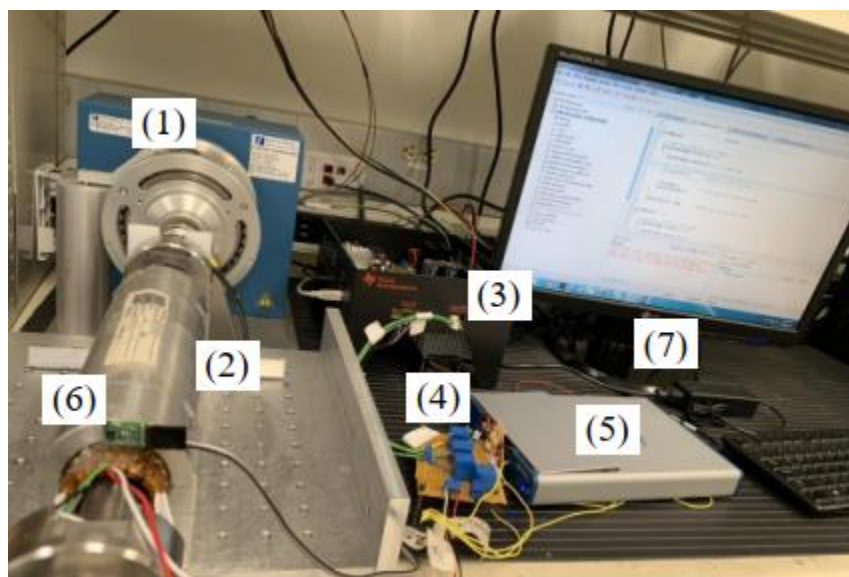


Результаты моделирования режимов работы: а) с 5 замкнутыми витками, б) с 2 замкнутыми витками, слева – изменение амплитуды фундаментальной гармоники, справа – изменение амплитуды третьей гармоники

Результаты представлены в виде трёхмерных диаграмм, показывающих изменения амплитуды фундаментальной или третьей гармоники в режимах работы с разным потребляемым током и разной скоростью вращения. На каждой диаграмме дополнительно показана плоскость, соответствующая постоянной амплитуде соответствующей гармоники в бездефектном режиме. Из результатов моделирования видно, что в режимах работы с низкой скоростью вращения и низким током амплитуда фундаментальной гармоники будет ниже её амплитуды в бездефектном режиме.

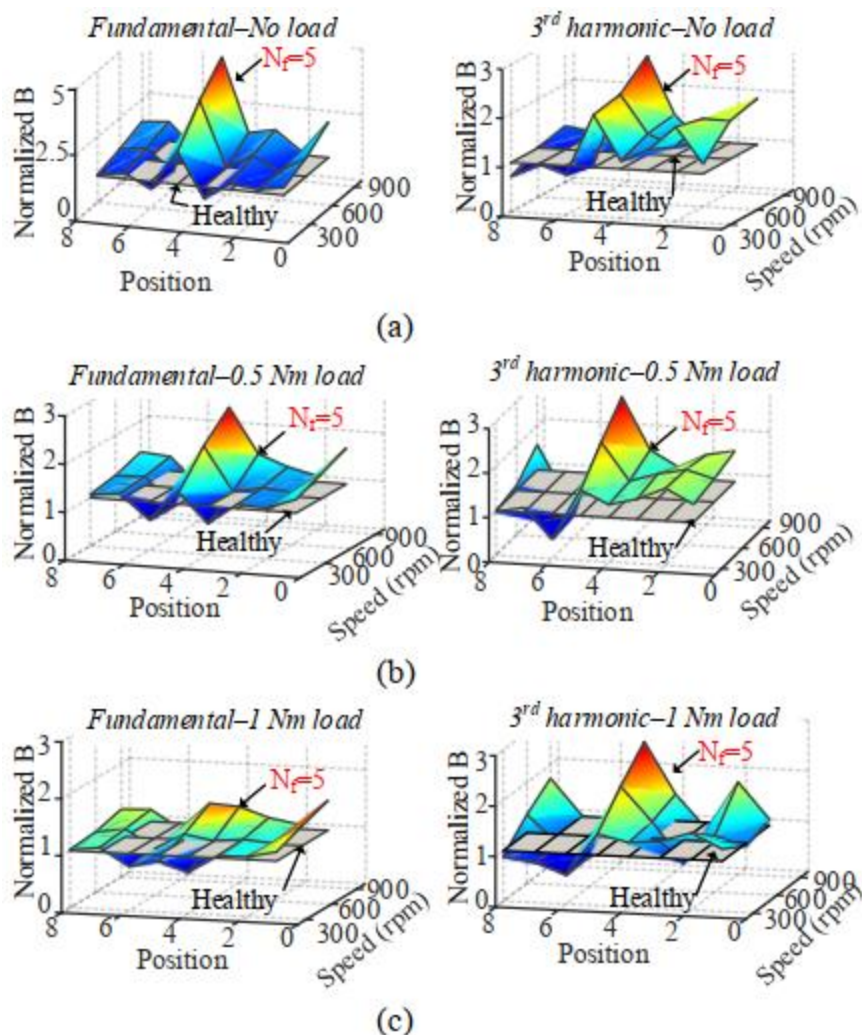
Амплитуда третьей гармоники более применима для диагностики, поскольку её значение всегда превышает амплитуду бездефектного режима.

Тестовая установка, собранная для проверки метода, показана ниже.



Тестовая установка: 1 – динамометр, 2 – двигатель, 3 – схема управления, 4 – датчики тока, 5 – АЦП, 6 – один из датчиков магнитного потока, 7 – ПК

Пример результата испытаний показан ниже.



Пример результата испытаний при работе двигателя с 5 короткозамкнутыми витками: а) без нагрузки, б) с нагрузкой 0,5 Н·м, с) с нагрузкой 1 Н·м, слева – фундаментальная гармоника, справа – третья гармоника

Результаты представлены в виде трёхмерных диаграмм, показывающих изменение амплитуды гармоник, регистрируемой разными датчиками (ось Position) вокруг двигателя на разных скоростях вращения (ось Speed). Результаты испытаний подтвердили применимость третьей гармоники для заявленной цели. Её амплитуда всегда превышала амплитуду бездефектного режима, что было нехарактерно для амплитуды фундаментальной гармоники.

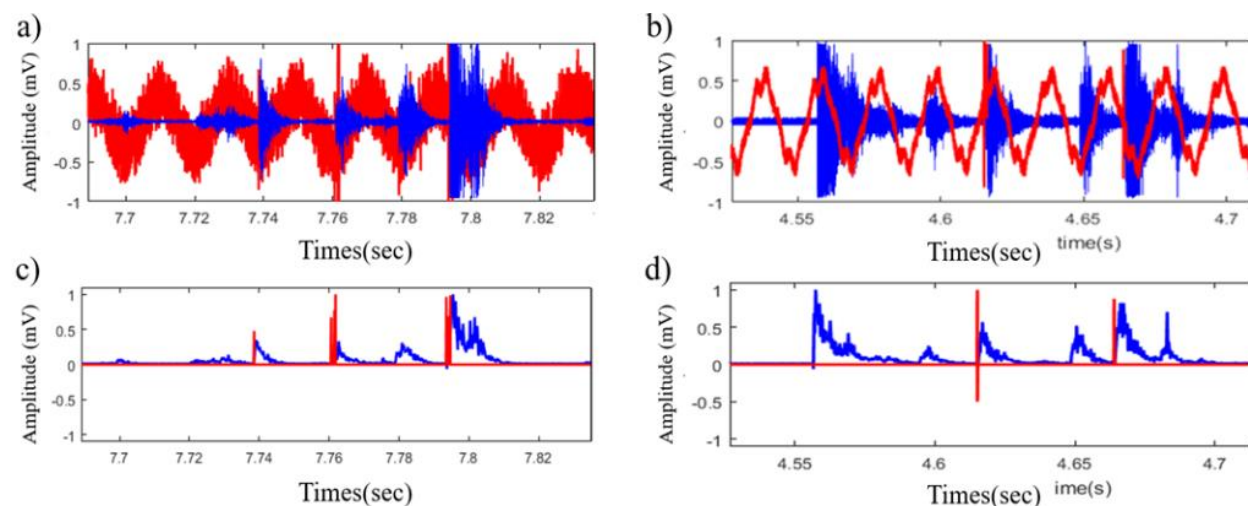
Метод контроля состояния РПН трансформатора по данным вибрации

Источник: J. Seo, "A Practical Scheme for Vibration Signal Measurement-Based Power Transformer on-Load Tap Changer Condition Monitoring," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-4, doi: 10.1109/CMD.2018.8535923.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535923>

Группа исследователей из Университета Квинсленда в Австралии предложила метод контроля состояния РПН силового трансформатора по данным вибрации. Метод основан на измерении и анализе вибрации, происходящей при переключениях РПН. Статья авторов была представлена на International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis в сентябре 2018 года.

Исследователи исходили из того, что вибрации при замыканиях контактов отражают состояние РПН. В частности, при ухудшении состояния, уровень вибрации будет изменяться, что можно использовать для целей диагностики. Вместе с тем, такие вибрации происходят в течение очень ограниченного времени на фоне общего уровня вибрации, поэтому их анализ представляет сложность. Для обработки сигнала вибрации исследователи предложили использовать метод фильтра Савицкого-Голея, который выполняет сглаживание сигнала, сохраняя при этом его основные временные характеристики. Результаты нескольких замеров, выполненных исследователями, показаны ниже. Для идентификации моментов переключений РПН осциллограммы вибрации показаны совместно с осциллограммами высокочастотного трансформатора тока (ВЧТТ), установленного на заземление вторичной обмотки трансформатора. Переключения РПН приводили к резким возрастаниям сигнала ВЧТТ.

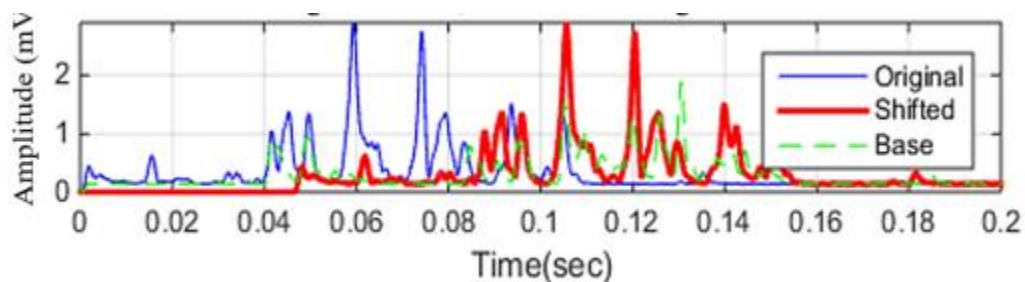


Осциллограммы сигналов: красный – ВЧТТ, синий – вибрация, левый столбец – сигналы на РПН шкафного исполнения, правый столбец – колонного исполнения, выше – необработанные сигналы, ниже – сигналы после обработки фильтром Савицкого-Голея

Для диагностического анализа осциллограмм вибрации исследователи предложили использовать библиотеку базовых осциллограмм. Такую библиотеку можно собрать, регистрируя вибрации при переключении РПН трансформатора, состояние которого известно. Для целей исследования использовался лабораторный трансформатор с 10 положениями РПН. На РПН была проведена серия из 10 переключений по всем положениям от 1 до 10 и затем обратно до 1. Все записанные осциллограммы были обработаны фильтром Савицкого-Голея. В качестве референсной осциллограммы для каждого положения РПН была выбрана осциллограмма, имеющая

наибольшую сумму коэффициентов корреляции с другими осциллограммами, характерными для заданного положения РПН.

В качестве диагностического критерия состояния РПН исследователи предложили использовать коэффициент корреляции между референсной осциллограммой и нормализованной осциллограммой, записанной при работе трансформатора. Нормализация осциллограммы заключается в применении фильтра Савицкого-Голея и совмещении моментов времени начала осциллограмм. Нормализация осциллограмм проиллюстрирована ниже.



Нормализация осциллограмм. Зелёная линия – референсная осциллограмма, синяя – записанная осциллограмма, красная – записанная осциллограмма после совмещения моментов начала вибрации

В заключении исследования указывается, что дальнейшая работа авторов будет направлена на доработку методов обработки осциллограмм и испытания метода.

Метод диагностики асинхронных двигателей при помощи встроенных датчиков магнитного потока

Источник: P. C. M. L. Filho, D. C. Santos, F. B. Batista and L. M. R. Baccharini, "Axial Stray Flux Sensor Proposal for Three-Phase Induction Motor Fault Monitoring by Means of Orbital Analysis," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 20, no. 20, pp. 12317-12325, 15 Oct.15, 2020, doi: 10.1109/JSEN.2020.2999547.

<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9106390>

Группа исследователей из Бразилии предложил метод диагностики трёхфазных асинхронных двигателей, в котором используются два компонента магнитного потока, получаемые при помощи датчиков, встроенных в двигатель. Работа авторов была опубликована в издании *IEEE Sensors Journal* в июне 2020 года.

Суть метода мониторинга заключалась в контроле двух компонентов магнитного потока двигателя. По форме кривой зависимости компонентов друг от друга можно делать вывод о характере развивающегося дефекта.

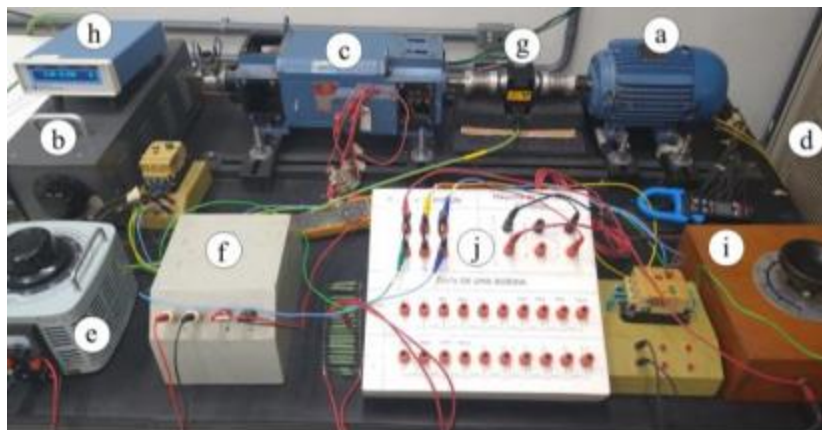
Предложенные исследователями встраиваемые датчики представляют собой две катушки из 40 витков проводом 0,4 мм, которые закреплены на внутренней поверхности крышки двигателя как показано на изображении ниже.



Двигатель с установленными катушками

Катушки были изолированы от обмоток двигателя. Выходной сигнал катушек находился в диапазоне ± 100 мВ при работе двигателя. Центральные оси катушек были разнесены на 90° .

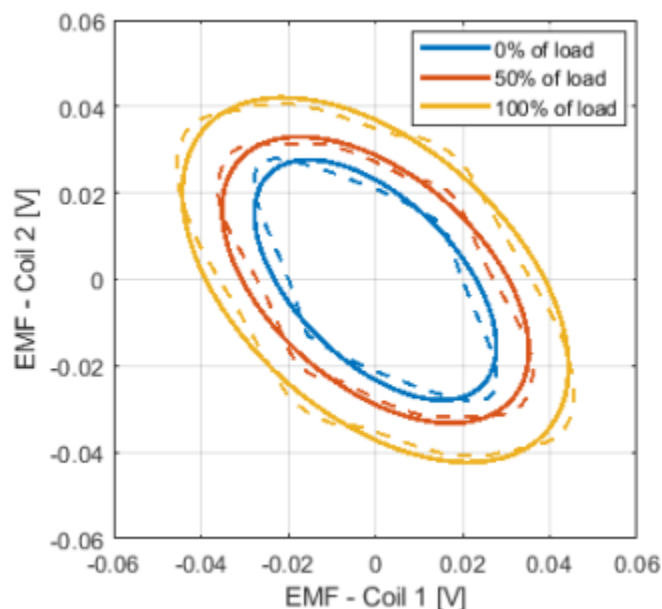
Испытательная установка для проверки работы метода показана на изображении ниже.



Испытательная установка

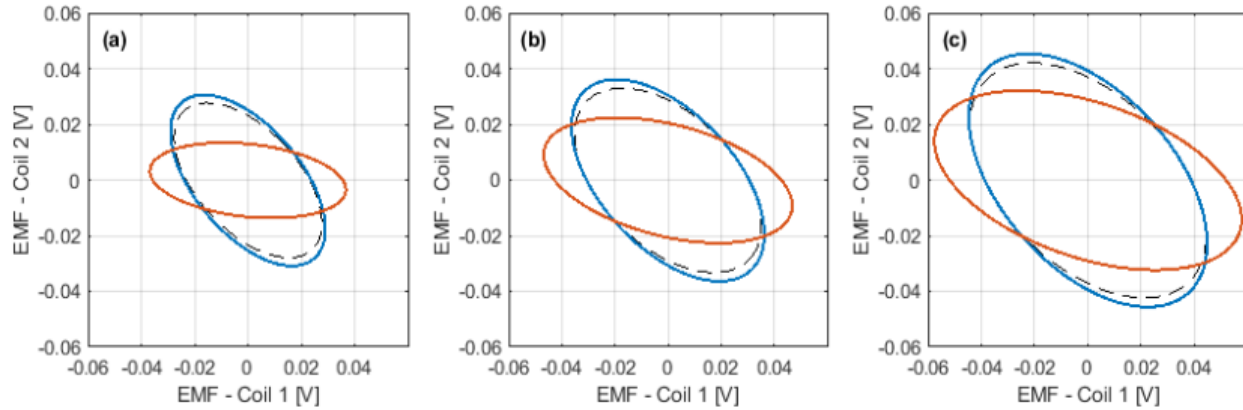
Установка состояла из трёхфазного четырёхполюсного двигателя WEG (a) с номинальными характеристиками: 220 В, 3 л.с., 60 Гц, 1735 об/мин. Питание двигателя осуществлялось через подстроечный трансформатор (b). Нагрузку на двигателе создавал генератор (c) постоянного тока с магазином сопротивлений (d). Величина нагрузки регулировалась трансформатором напряжения (e) с выпрямителем (f). Параметры режима работы контролировались датчиком механического момента (g), подключенным к вторичному преобразователю (h). Для обработки сигнала встроенных датчиков магнитного потока применялись переменный резистор (i), подключённый к выводам датчиков (j). Сигналы датчиков обрабатывались при помощи платы National Instruments PCI-4461 на частоте 5,12 кГц.

Результат измерений магнитного потока в бездефектном режиме с разной нагрузкой показан ниже.

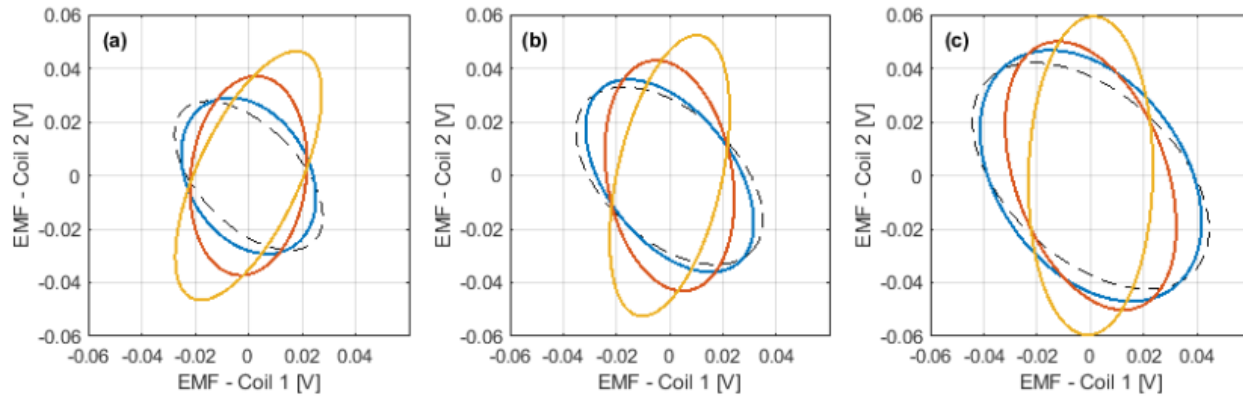


Кривые зависимости компонентов магнитного потока в бездефектном режиме с разной нагрузкой. Сплошная и пунктирная линии показывают разные способы аппроксимации данных

Результаты измерений компонентов магнитного потока с разными дефектами двигателя показаны ниже.



Кривые зависимости компонентов магнитного потока: пунктирная – бездефектный режим, оранжевая – с небалансом питания, синяя – с расцентровкой валов, а) с 0% нагрузки, б) с 50% нагрузки, в) с 100% нагрузки



Кривые зависимости компонентов магнитного потока: пунктирная – бездефектный режим, синяя – с дефектом изоляции 3 витков, оранжевая – с дефектом изоляции 6 витков, жёлтая – с дефектом изоляции 9 витков, а) с 0% нагрузки, б) с 50% нагрузки, в) с 100% нагрузки

Проведённые испытания подтвердили предположение авторов о возможности диагностики двигателя по двум компонентам магнитного потока. В качестве сводных критериев состояния двигателя авторы предложили использовать отношение длин осей эллипса, изображающего зависимость компонентов магнитного потока, а также угол наклона его главной оси.

Опыт разработки беспроводного датчика температуры для синхронных двигателей с постоянными магнитами

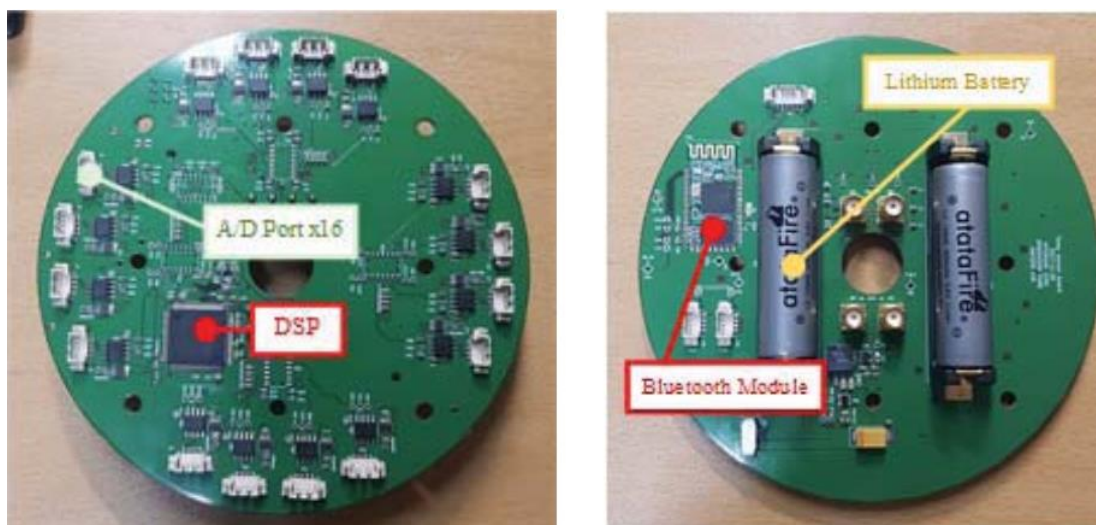
Источник: D. Park, H. Jung, H. Cho and S. Sul, "Design of Wireless Temperature Monitoring System for Measurement of Magnet Temperature of IPMSM," 2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC), Long Beach, CA, 2018, pp. 656-661, doi: 10.1109/ITEC.2018.8450124.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8450124>

Исследователи из Сеульского университета в Южной Корее разработали беспроводной датчик температуры, предназначенный для контроля температуры магнитов ротора в синхронных двигателях с постоянными магнитами. Работа авторов была представлена на прошедшей в июне 2018 года IEEE Transportation and Electrification Conference and Expo.

Важность такого типа мониторинга вызвана тем, что температура магнита оказывает влияние на его остаточный магнетизм, что, в свою очередь, влияет на перегрузочную способность по крутящему моменту. Однако прямое измерение температуры на роторе затруднено из-за сложностей с передачей сигнала (контактной или бесконтактной) и необходимостью вносить изменения в конструкцию ротора, что может повлечь изменение распределения магнитного потока.

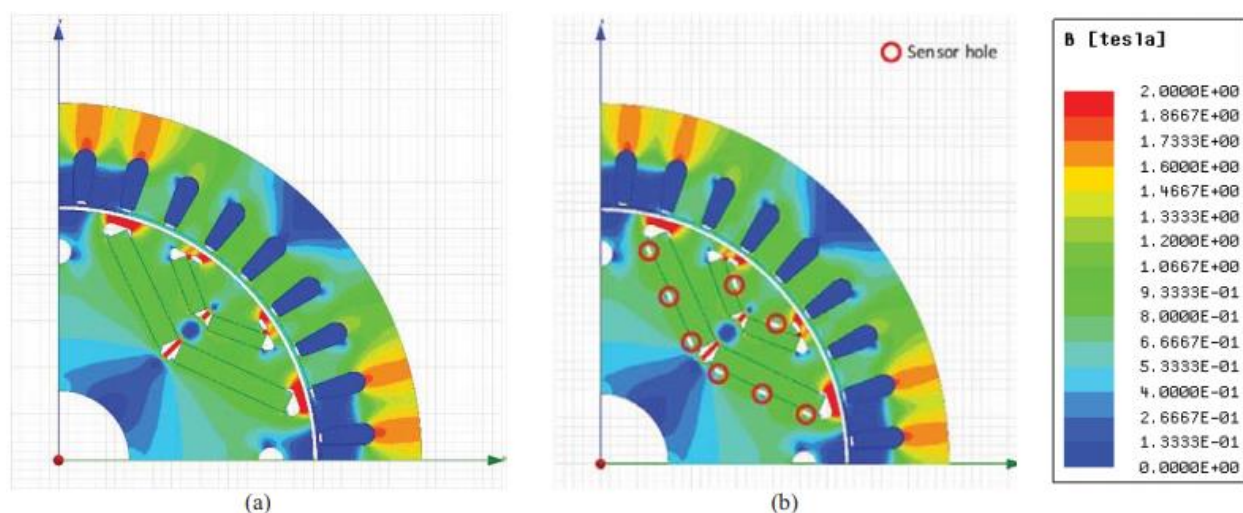
Для подхода к этой проблеме исследователи разработали макет многоканального датчика температуры, состоящего из 16 термосопротивлений и платы обработки. Термосопротивления и плата размещаются на поверхности магнитов ротора двигателя. Крепление термосопротивлений выполняется винтами в отверстия, высверливаемые в магнитах. Изображение платы показано ниже.



Плата датчика температуры

В датчике используется беспроводная передача сигнала по протоколу Bluetooth. Питание датчика осуществляет от литий-тионил-хлоридных батареек.

Для контроля изменения, вносимого датчиком в распределение магнитного потока, исследователи выполнили моделирование работы двигателя с установленным датчиком и без него. Изображение модели ротора показано ниже.



Модель ротора, слева – без отверстий, справа – с отверстиями для датчика температуры

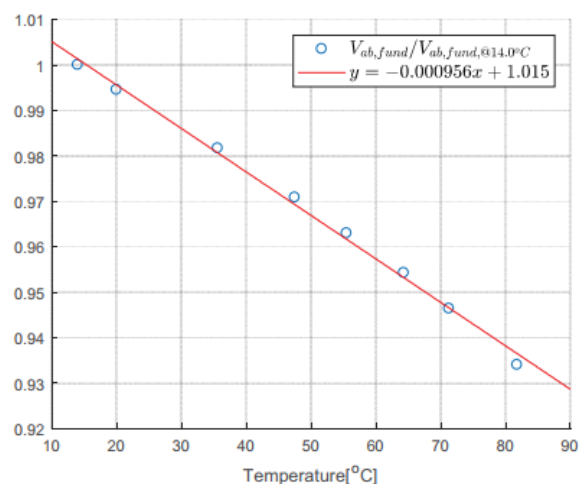
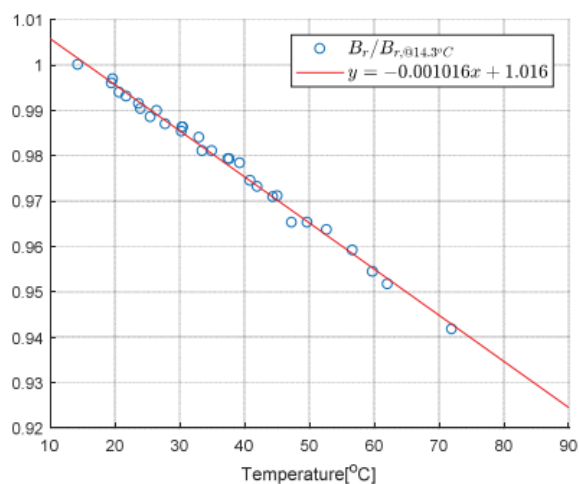
Моделирование показало, что максимальное изменение магнитного потока в результате высверливания отверстий не превышает 1,5%, что делает возможным такой метод установки датчика.

Для испытаний датчики были установлены на синхронный двигатель с номинальной частотой вращения 1200 об/мин. Изображение собранного двигателя показано ниже.



Собранный двигатель с датчиками

Основной величиной, контролируемой при испытаниях, была зависимость магнитного потока от измеряемой температуры. Полученные при испытаниях зависимости остаточного магнитного потока от температуры и амплитуды фундаментальной гармоники 40 Гц магнитного потока от температуры показаны ниже.



Зависимость от температуры: слева – остаточного магнитного потока, справа – амплитуды фундаментальной гармоника магнитного потока. Значения магнитного потока указаны в относительных единицах

В заключении исследования указывается, что полученные зависимости соответствуют теоретической форме зависимости и могут использоваться для учёта влияния температуры магнитов на нагрузочную способность двигателя.

Исследование возможности контроля механических дефектов обмоток трансформатора по данным магнитного потока

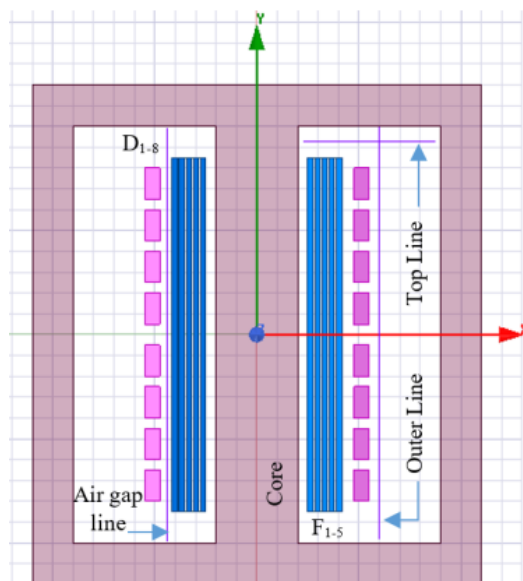
Источник: A. Subramaniam, P. Mukherjee, S. S. Manohar and S. K. Panda, "Diagnosing Axial Movements in Transformer Windings by Leakage Flux Monitoring," 2018 Condition Monitoring and Diagnosis (CMD), Perth, WA, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/CMD.2018.8535713.

<https://ieeexplore.ieee.org/document/8535713>

На прошедшей в сентябре 2018 года International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis группа исследователей из Национального университета Сингапура представила результаты исследования возможности контроля механических дефектов сухих трансформатора при помощи измерения магнитного потока.

Работа авторов была основана на разработанной модели обмоток трансформатора, в которой моделировались распределения магнитного потока и индукции магнитного поля при осевых смещениях обмотки или её элементов.

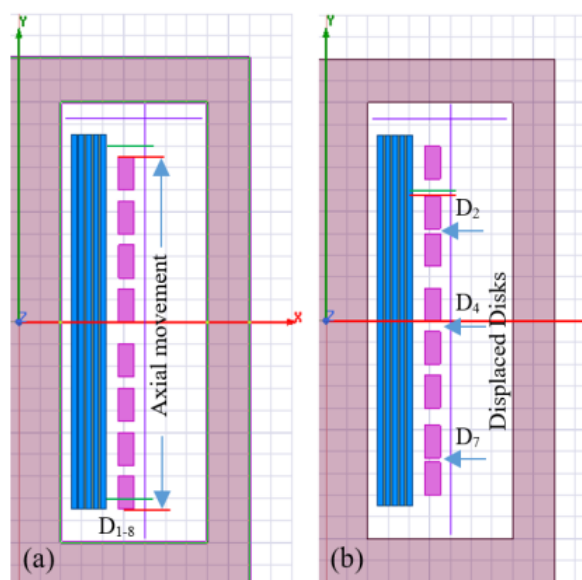
Изображение модели трансформатора показано ниже.



Модель трансформатора

Модель состояла из сердечника, пяти слоёв F_{1-5} обмотки низкого напряжения и восьми дисков D_{1-8} обмотки высокого напряжения. Авторы рассматривали распределение магнитного потока и напряжённости магнитного поля вдоль трёх линий: линии воздушного зазора (air gap line), внешней линии (outer line) и верхней линии (top line).

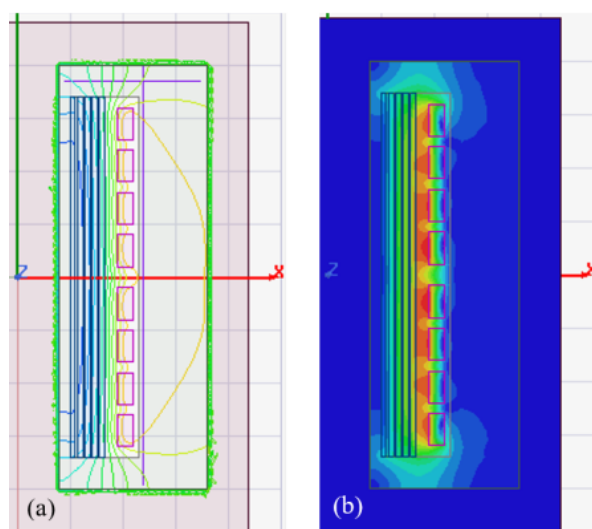
Рассмотренные в исследовании модели дефектов показаны ниже.



Модели дефектов

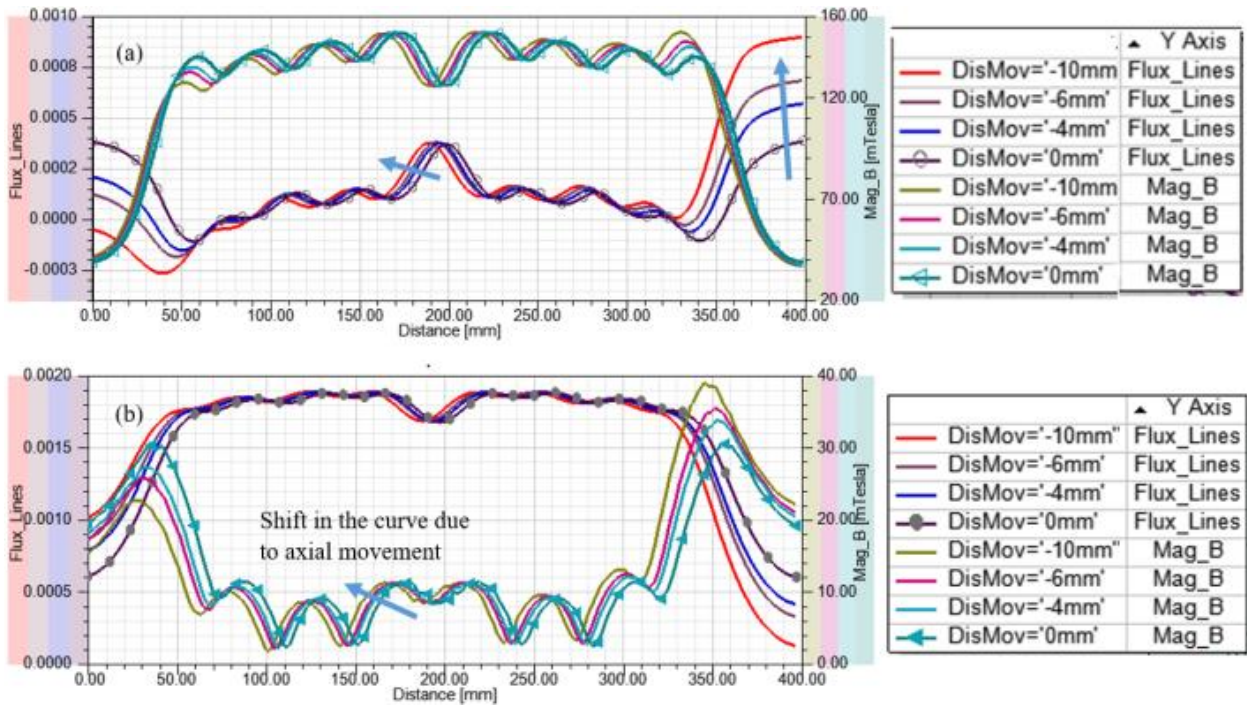
В первом дефекте все диски обмотки высокого напряжения смещались вниз на 10 мм, что может происходить, например, при ослаблении крепления дисков. Во втором дефекте вниз смещались только диски D2, D4, D7.

Пример результатов моделирования показан ниже.



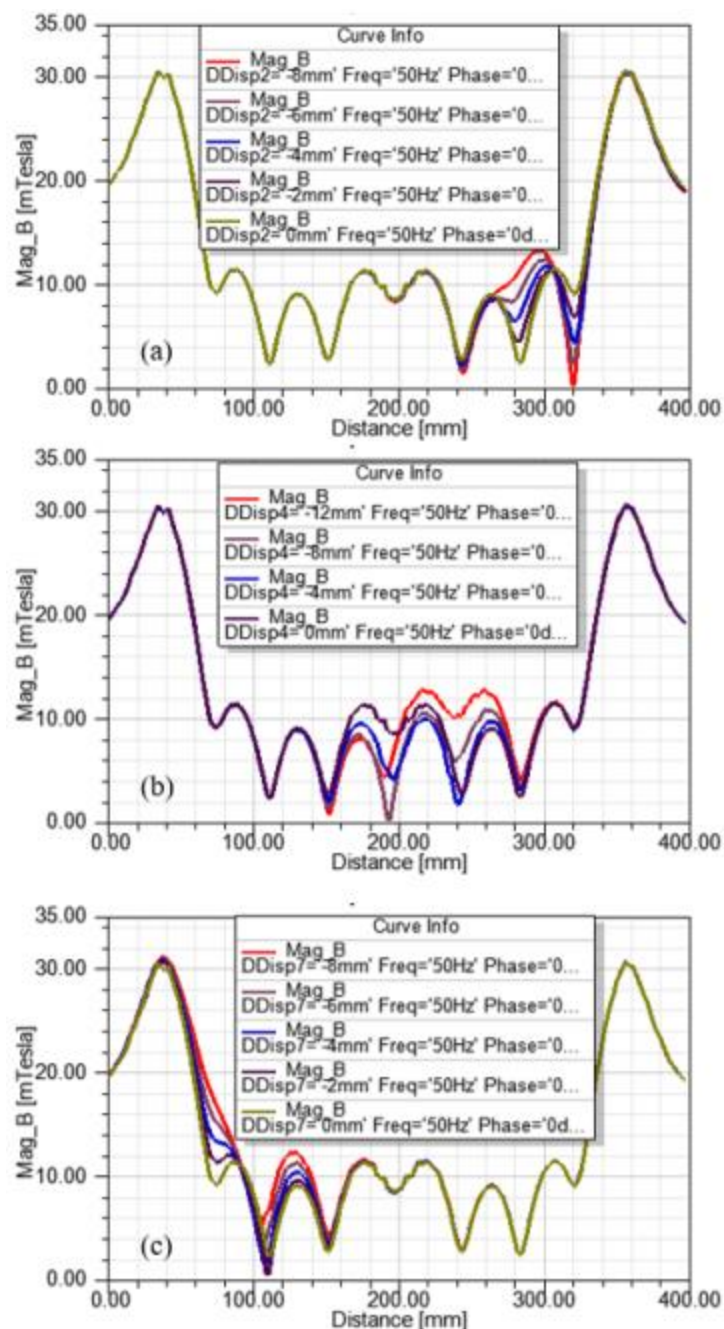
Результаты моделирования магнитного потока (слева) и индукции магнитного поля (справа) в бездефектном режиме

Изменение распределения магнитного потока и индукции магнитного поля при смещении обмотки вниз на 0 (дефект отсутствует), 4, 6 и 10 мм вдоль линии воздушного зазора и внешней линии показано ниже. Стрелками отмечены направления смещения характерных пиков распределений при увеличении смещения, т.е. при развитии дефекта.



Магнитный поток и индукция при смещении обмотки вниз на 0, 4, 6 и 10 мм, выше - вдоль линии воздушного зазора, ниже - вдоль внешней линии

Изменение индукции магнитного поля вдоль внешней линии при смещении одиночных дисков на 0 (дефект отсутствует), 2, 4, 6 и 8 мм для дисков D2 и D7 и на 0, 4, 8 и 12 мм для диска D4 показано ниже.



Изменение распределения индукции вдоль внешней линии при смещении диска D2 (верхний), D4 (средний) и D7 (нижний)

В заключении исследования указывается, что изменение характеристик магнитного поля может однозначно указывать на происходящие механические дефекты в обмотке трансформатора. Дальнейшая работа авторов будет направлена на исследование механических дефектов в радиальном направлении.