



БО-ЭНЕРГО
СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА

ДОКЛАД

**Практический опыт применения системы мониторинга
высоковольтных вращающихся машин методом диагностирования
частичных разрядов.**

Рудченко И.А., ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС»

Москва, 2021

Контроль состояния изоляции обмотки статора.

Измерение частичных разрядов (далее ЧР) в процессе работы является хорошо зарекомендовавшим себя диагностическим инструментом и используется на многих тысячах двигателей и генераторов для обнаружения проблем изоляции обмоток статора. Однако, очень важно, чтобы измерительная система была способна отличать ЧР в обмотке статора от электромагнитного шума (далее ЭМШ). Ложная индикация может привести к неправильному заключению о состоянии статорной обмотки.

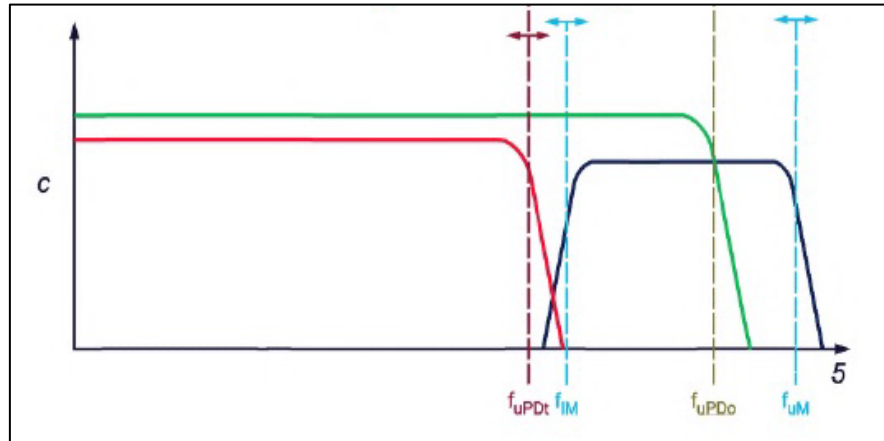


Рис. 1 ГОСТ IEC/TS 60034-27-2—2015, Идеализированные частотные характеристики импульса ЧР в точке ЧР и на выводах машины для измерительной системы СВЧ диапазона.

Для обеспечения надежности и корректности измерений специалистами IRIS Power было разработано несколько способов, основанных на фундаментальном принципе измерения в СВЧ диапазоне:

- измерение сигналов в частотном диапазоне, где оптимальное соотношение сигнал / шум;
- стробирование (или блокирование) сигнала, когда возникновение ЭМШ известно и зафиксировано во времени;
- использование двух датчиков на фазу и реализация алгоритма "время прихода и направление" для отделения внешних возмущений от ЧР в обмотке, которое определяется относительным временем поступления сигнала на два датчика;
- анализ формы импульсов, где исследования показали, что импульсы ЧР обмотки статора имеют более короткое время нарастания и различные формы колебаний / затухания, чем шум.

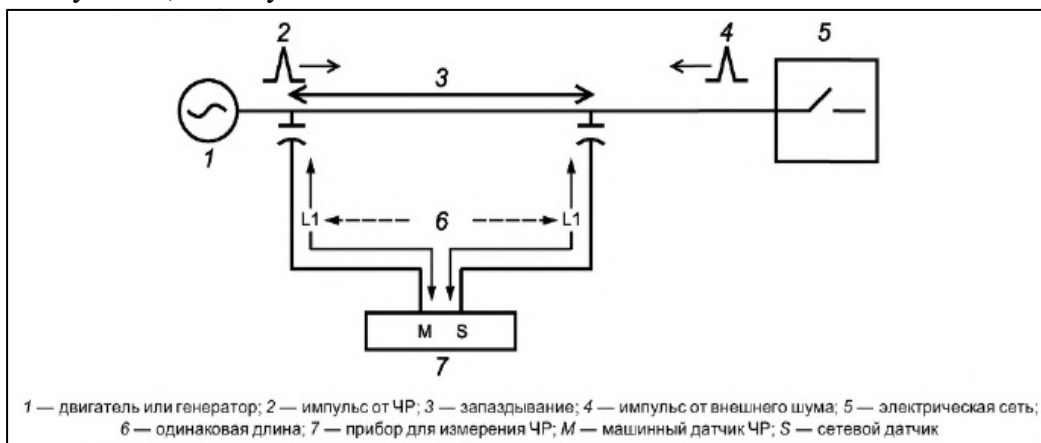


Рис. 2 ГОСТ IEC/TS 60034-27-2—2015, Отделение помех по времени поступления импульса

Рисунок 2 демонстрирует, как импульс от электрической сети приходит к сетевому датчику S раньше, чем к машинному датчику M. Эта разница во времени зависит от расстояния между двумя датчиками и скорости импульса по токопроводу. Цифровая логика фиксирует относительное время поступления импульса и определяет его как исходящим от сети и, таким образом, относит его к возмущению. Аналогичным образом, импульс от обмотки статора классифицируется как ЧР, если машинный датчик зафиксирует импульс раньше, чем сетевой.

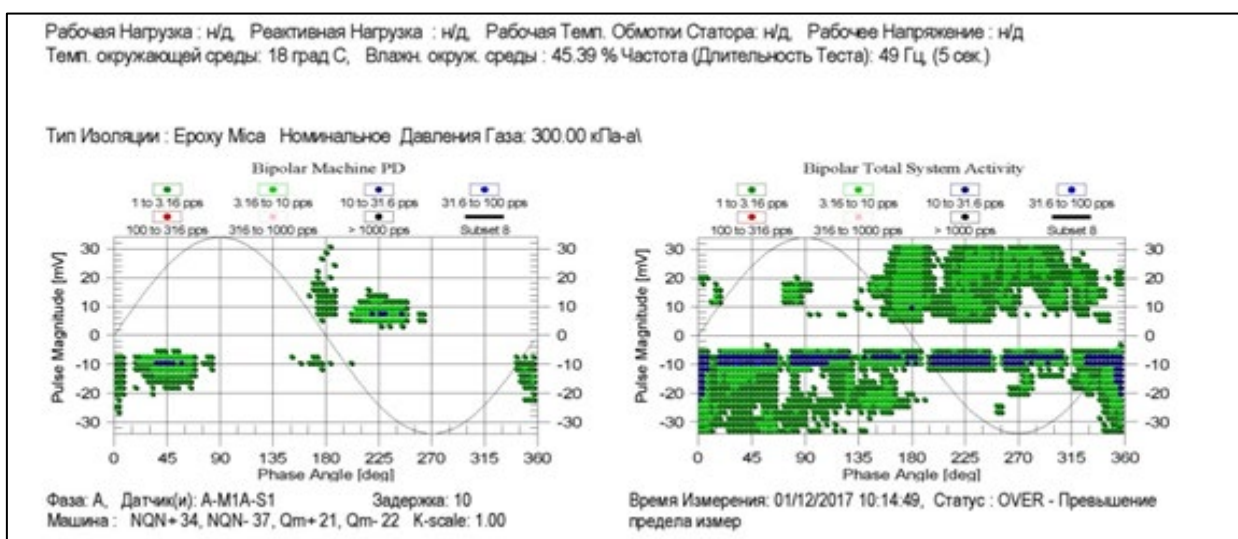


Рис. 3 Пример отделения ЧР от системного электромагнитного шума за счет калибровки датчиков (два датчика ЕМС на фазу), ТГ 15.75 кВ, 200 МВт.

Левый график на рисунке 3 показывает активность ЧР в обмотке статора, а правый график показывает возмущения от системы питания, определяемые фиксацией времени прибытия и направлением. ГОСТ ИЕС/TS 60034-27-2—2015 определяет требования к надежности конденсаторных датчиков. Данные обычно отображаются относительно синусоиды переменного напряжения.

Вертикальная ось — это величина ЧР в мВ, а горизонтальная ось — фазовый угол переменного напряжения 50 Гц. Цвет точек указывает на частоту следования импульсов ЧР.

Измерение в СВЧ диапазоне делает возможной дальнейшую квалификацию сигналов ЧР путем анализа формы импульсов, поскольку высокочастотное содержание и формы сигналов импульсов в основном сохраняются и поэтому могут быть измерены.

Контроль состояния обмотки ротора – короткозамкнутые витки обмотки ротора.

Короткое замыкание между витками в катушке является хронической проблемой, которая не защищена релейной защитой. Повреждения изоляции витка могут быть вызваны следующими процессами разрушения.:

- термическое разрушение в результате неудачного проектирования, перевозбуждения или неправильной эксплуатации;
- истирание корпусной изоляции под действием термических циклов;
- загрязнение меди.

Дисбаланс ротора приведет, в конечном итоге, к износу подшипников, вибрации и изгибу вала. Датчик потока представляет собой небольшую катушку, установленную на клине статора или зубе сердечника и выступающую в воздушный зазор. Напряжение на выходе датчика индуцируется радиальным потоком утечки, окружающим каждый паз в роторе. Сравнение осциллограмм потока противоположных полюсов позволяет определить количество замкнутых витков и место расположения (паз). Уменьшенный поток в любой пазу указывает на меньшее число витков катушки.

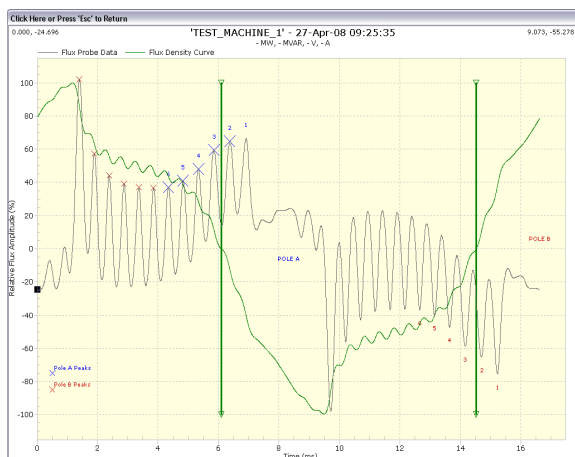


Рис. 4 Пример измерения магнитного потока (МП).

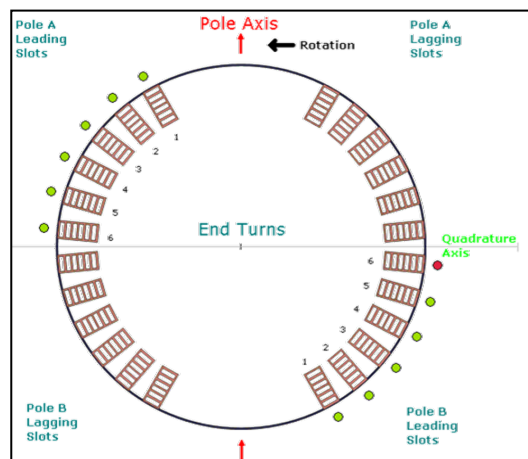


Рис. 5 Визуализация данных МП с указанием замкнутых витков.

Представленная технология, имеет ряд преимуществ перед технологиями, применяемыми ранее:

- измерения главного магнитного потока и магнитного потока утечки в каждом пазу;
- установка датчика для большинства типов машин не требует вывода ротора;
- усовершенствованный новый алгоритм, основанный на значениях главного магнитного потока что позволяет в большинстве случаев определить короткозамкнутые витки ротора без изменения нагрузки.

Контроль уровня вибрации лобовых частей обмотки статора генератора.

Корзина торцевой обмотки при нормальной работе подвергается воздействию высоких колебательных сил в радиальном и тангенциальном направлениях при удвоенной частоте за счет электрических токов, проходящих параллельно в соседних стержнях статора. Эти силы могут быть умножены в 100 раз в случае переходных процессов в энергосистеме. Наличие высоких электромагнитных сил и высокого напряжения исключают выбор прочных металлических конструкций для фиксации стержней статора и ограничивают их чрезмерное перемещение.

Проблемы с вибрацией обмотки статора в лобовой части чаще встречаются на больших генераторах с особенно большим вылетом обмотки в лобовой части генератора, которые не имеют достаточной опоры. Если какая-либо часть торцевой обмотки имеет собственную частоту, близкую к частоте вибрации, то реакция на смещение будет максимальной, и результат может быть катастрофическим. Следовательно, существует необходимость мониторинга вибрации при подозрении на наличие проблемы.

Контроль виброперемещения с помощью акселерометров, смонтированных на лобовых частях обмотки, обеспечивает прямую индикацию состояния опорной конструкции при ее ослаблении. Поскольку количество мест, которые будут контролироваться, ограничено количеством датчиков, следует проводить испытания на

удар в автономном режиме для определения компонентов, которые могут вибрировать больше всего во время работы. Учитывая, что акселерометры располагаются там, где существует высокое напряжение и сильные магнитные поля, выбор типа акселерометра имеет важное значение. Обычный пьезоэлектрический датчик может нарушить электрический зазор в обмотки и привести к частичному разряду.



Рис. 6 Акселерометры вибрации лобовой части (ВЛЧ).

В настоящее время используются оптоволоконные акселерометры, так как они невосприимчивы к электрическим и магнитным полям, присутствующим в лобовых частях высоковольтной обмотки статора. С помощью современной волоконно-оптической технологии можно собирать больше данных в более широком диапазоне частот. При этом оцениваются не только данные о перемещении, но и виброскорость и ускорение лобовых частей генератора.

Контроль напряжений и токов на валу для снижения риска повреждения подшипников и шейки вала ротора

Целью внедрения мониторинга данного типа является обнаружение и своевременное оповещение о развивающихся дефектах:

- Нарушение работы подшипников и подступовой изоляции;
- Пробои масляной плёнки;
- Присутствие второй точки заземления вала (в т.ч., при касании статора);
- Асимметрия магнитных полей, возникающая из-за замыканий в сердечнике статора;
- Появление уровня тока, достаточного для необратимых разрушений вала и подшипников (в т.ч. питтинговая коррозия);
- Влияние высоких уровней напряжения и тока на ухудшение свойств масла, в том числе, из-за попадания в него мелких металлических частиц.

Для этой подсистемы используются датчики регистрации напряжения и шунт на щётке заземления.

С помощью этой подсистемы становится возможным одновременно определять наличие недопустимых уровней напряжения и тока на валу, контролировать работу щётки заземления, получать раннее предупреждение целого ряда проблем, при использовании вместе с другим мониторингом (контроль межвитковых замыканий в обмотке ротора, вибрации и т.д.) значительно повысить качество диагностики.

Повышенное напряжение на валу характерно при:

- замыканиях витков обмотки ротора;
- замыканиях листов сердечника статора;
- асимметрии магнитных потоков;
- пробоях масляной плёнки;

- вибрации вала или его эксцентриситете;
 - плохой работе щётки, истирании;
Интерпретация получаемых значений*
 - Высокое значение напряжения (выше 10 В) считается опасным
 - Приемлемыми могут считаться токи до 1 А
 - Высокие значения тока может свидетельствовать о ряде дефектов
 - Слишком низкие значение тока говорят о прерывании контакта щёток и вала.
- * уровни допустимых значений ВАХ определяет изготовитель агрегата.

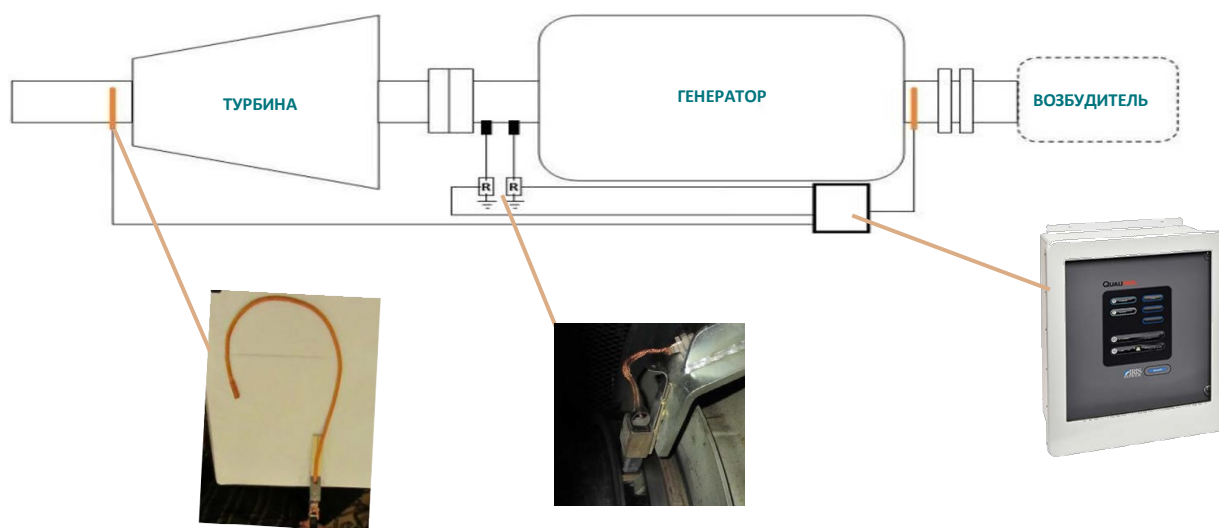


Рис. 7 Пример размещения элементов системы мониторинга

Техническое решение для контроля одним контролером четырех технологий.

Решение «ЗВЕЗДА.Плюс» является средством непрерывного текущего контроля состояния обмоток статора и ротора ВВМ. Система может быть модернизирована на месте монтажа и позволяет объединять в одном корпусе несколько технологий осуществления контроля. Это дает конечному пользователю возможность применения наиболее важных технологий, необходимых для контроля оборудования. Получаемая из системы информация используется для принятия решений о необходимости обслуживания на основе состояния, что позволяет оптимизировать периодичность технического обслуживания и расходы. Для каждого контролируемого генератора требуется один блок сбора данных «ЗВЕЗДА.Плюс», который должен быть установлен снаружи машины и рядом с датчиками. Коаксиальные и оптоволоконные кабели соединяют датчики с блоком сбора данных. Он подает сигнал тревоги, если значение измеряемого параметра превышает уставку для текущих условий эксплуатации машины. Ethernet-связь используется для подключения «ЗВЕЗДА.Плюс» к локальной сети пользователя для конфигурирования и загрузки данных.

Примеры практического использования систем непрерывного мониторинга и диагностики с использованием решений IRIS POWER.

В качестве практических примеров применения систем мониторинга и диагностики состояния высоковольтных вращающихся электрических машин на конференции были представлены следующие случаи:

Пример №2

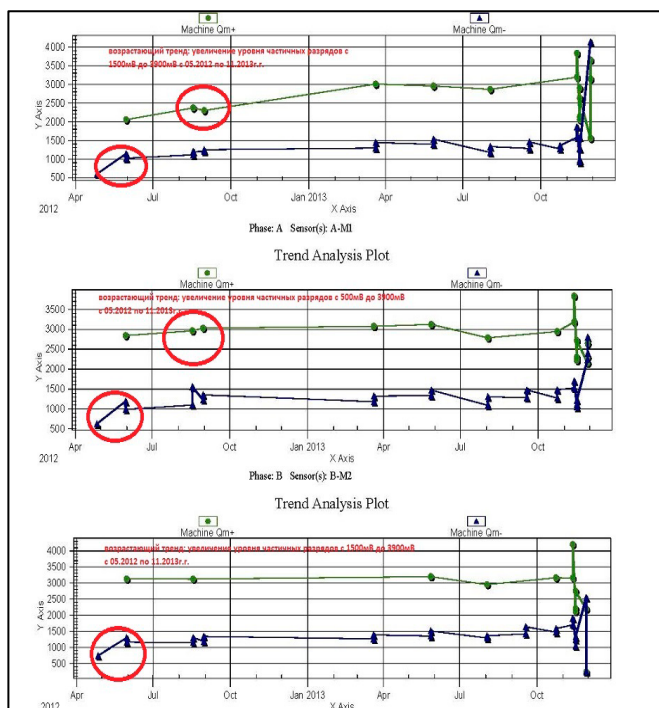


Рис. 10 Результат измерения ЧР

В августе 2013 года было принято решение о необходимости вывода в останов оборудования для проведения комплексного обследования в режиме off-line.

В октябре 2013 года специалистами ООО «МТК Бизнес.Оптима» было проведено комплексное обследование электродвигателя компрессора К-291А, которое подтвердило ранее полученные результаты измерений в режим on-line. По результатам проведенных работ было выявлено критическое состояние в лобовой части и пазовой части обмотки статора электродвигателя и были предоставлены рекомендации о выводе его в ремонт для проведения комплекса мероприятий по ремонту обмотки статора электродвигателя. На основании полученных отчетов, было проведено обоснование необходимости ремонта обмотки статора электродвигателя К-201Аю

Пример №3

После измерения ЧР на Электродвигателе СДП-10-8000-2-УХЛ4 10кВ - 8000 кВт на всех фазах были обнаружены. На диаграммах PRPD эти импульсы группируются со сдвигом на 30° от углов 45° и 225° . Присутствие этих источников связано с загрязнением лобовых частей и/или недостаточным расстоянием между обмотками разных фаз. Большинство из упомянутых явлений порождает поверхностные разряды, в отличие от разрядов внутри изоляции, эти явления могут в итоге привести к межфазному или фазному отказу.



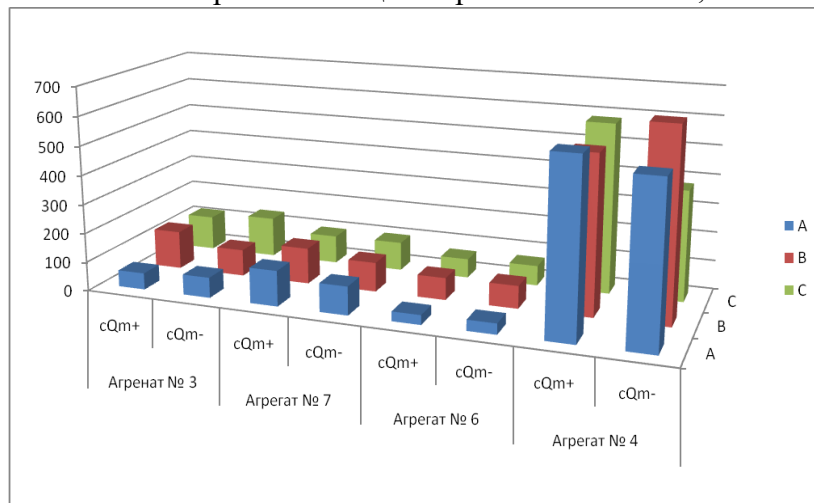
Рис. 11 Межфазный ЧР в лобовой части обмотки - образование белого налета в результате выделения озона.

В 2012 году проведена инсталляция оборудования IRIS для контроля состояния изоляции статорной обмотки методом измерения ЧР в режиме работы (on-line).

Проведены измерения уровня ЧР, которые при сравнении со статистической базой данных IRIS, показали высокую активность ЧР в статорной обмотке агрегата (рис.10). Было рекомендовано проводить измерения 1 раз/3 месяца, так как самым главным критерием является возрастание уровня ЧР в два и более раз в период от полгода до года. Все последующие измерения показывали увеличивающийся уровень ЧР.

Пример №2

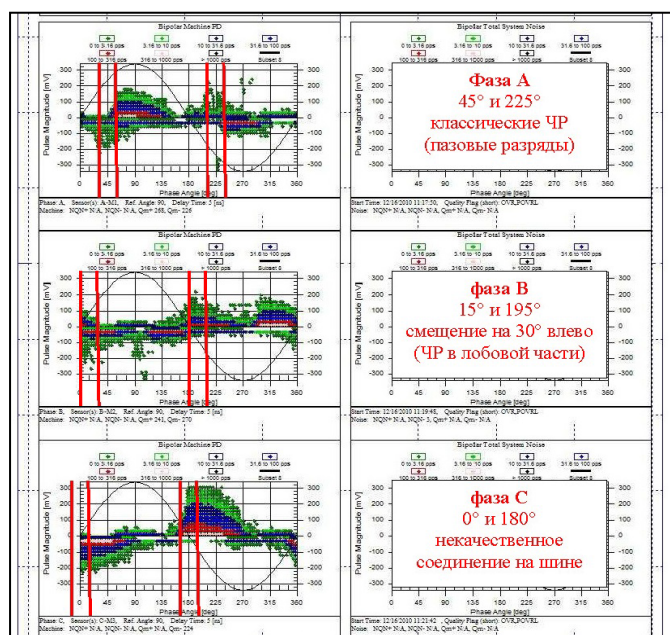
В декабре 2010 на Компрессорной Станции была установлена и введена в эксплуатацию система мониторинга ЧР на четырех приводных электродвигателях СТД-12500-2 газоперекачивающих агрегатов ЭГПА-12,5. Была поставлена задача, определить



худшую из этих машин. По результатам проведенных измерений ЧР был определен Электродвигатель у которого статорная обмотка находится в худшем состоянии по сравнению с другими машинами Агрегат №4.

На диаграмме PRPD представлены измерения, произведенные на Агрегате №4

Рис. 12 Сравнение данных системы мониторинга ЧР на четырех приводных электродвигателях СТД-12500-2



На фазе А были обнаружены частичные разряды в пазовой части обмотки статора электродвигателя, так называемые «классические ЧР» (45° и 225° относительно фазового угла референсного напряжения).

На фазе В – смещение пиков импульсов на 30° вправо или влево от классических ЧР – признак ЧР в лобовой части обмотки. Причина - не выдержаны необходимые физические расстояния между обмотками лобовых частей.

На фазе С дефект изоляции фазы С при нагреве – искрение на выводах.

Причина - некачественное соединение на шине (кабеле) на фазе С

Рис. 13 Результат измерения ЧР на фазах А, В, С

Пример №5

На турбогенераторе класс напряжения 6 кВ, мощностью 63 МВт была проведена инсталляция датчиков ЧР емкостью 80 пФ. На каждой фазе были установлены по два емкостных датчика в направленной конфигурации в соответствии ГОСТ ИЕС/TS 60034-27-2—2015 (рис.2). После проведения измерений и интерпретации полученных данных ЧР, определили, что основной источник ЭМШ расположен между датчиками ЧР «машинным» и «системным». Измерение выполнено прибором постоянного мониторинга BusTrac II.

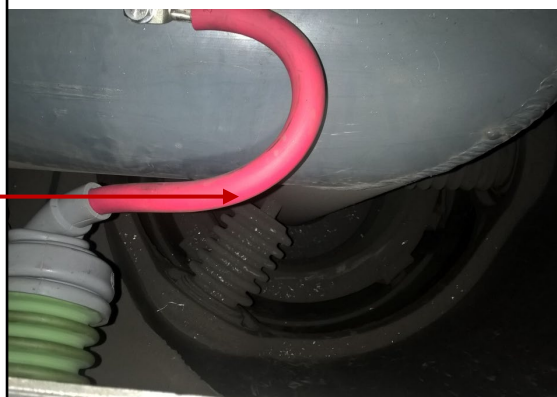
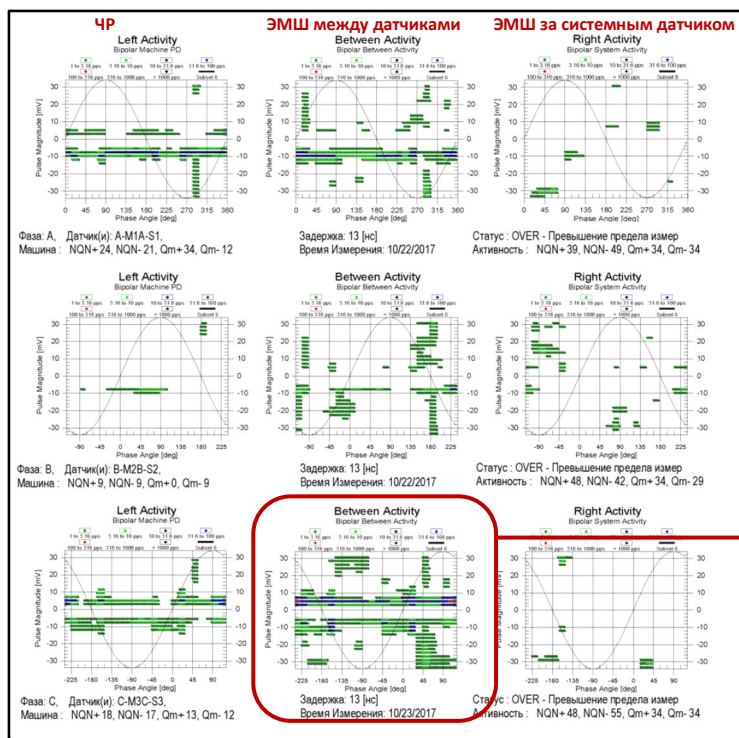


Рис. 14 Локализация электромагнитного шума (ЭМШ) на токопроводе

Использование тренда для определения критичности эксплуатации ВВМ

Пример №6

Безусловным признаком принятия решения для остановки ВВМ и проведения визуального осмотра является рост уровня ЧР ≥ 2 раза за период времени ≤ 6 месяцев.

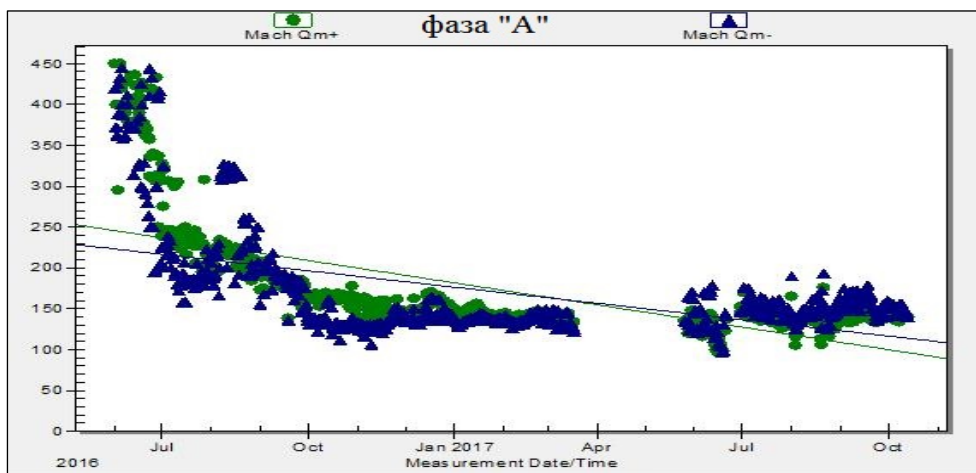


Рис.15 Типичный тренд ЧР в электродвигателе после капитального ремонта с заменой обмотки.

Нисходящий тренд, новая машина - для ЧР на новой обмотке характерно понижение в течении первых 06-12 месяцев эксплуатации. Исходя из графика (рис.15) тренда, можно сделать вывод, что произошла «усадка» изоляции обмотки в условиях работы ЭД, что характерно для новой обмотки, ЭД Тошиба (ТИКЕ-РССРУ 5,75 МВт, 10кВ, 1485 об./мин) после ремонта произведен по технологии МОНОЛИТ.

ГОСТ 600-34-27-2 2015, 9.3 Базисные измерения, 9.3.1 Общие положения.
«В связи с использованием трендов ЧР необходимо иметь в виду следующее:

- новый статор может иметь относительно высокий уровень ЧР, который уменьшается после первых 5 - 10 тысяч эквивалентных часов работы;»

Пример №7

Амплитуда импульсов ЧР на прошедшем капитальном ремонте с заменой обмотки ЭД находится на уровне «высокий», но в течение 6-12 месяцев с начала эксплуатации снижается до значения «низкий», а сам тренд стабилизируется. На диаграмме (рис.16) отчетливо видны сезонные колебания уровня ЧР с 2014 года. Рост ЧР в осенне-зимний период и снижение в летний период. С сентября 2016 г. амплитуда ЧР стремительно растет и увеличивается в 3 раза за 6 месяцев.

Тренд аварийного ЭД (решение о своевременной замене электродвигателя не принято, электродвигатель аварийно вышел из строя).

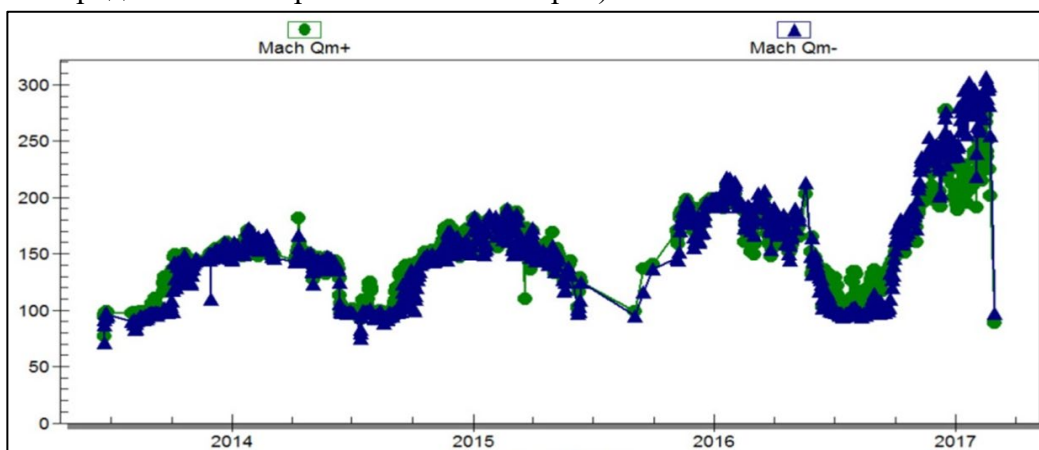


Рис. 16. Сезонные колебания ЧР.

Пример №8

На диаграмме (рис.17) виден рост уровня ЧР с сентября 2016г. по апрель 2017г. с 450 до 970 мВ. За 7 месяцев рост ЧР имеет более чем двукратное увеличение. Это свидетельствует, что рост вызван развивающейся неисправностью.

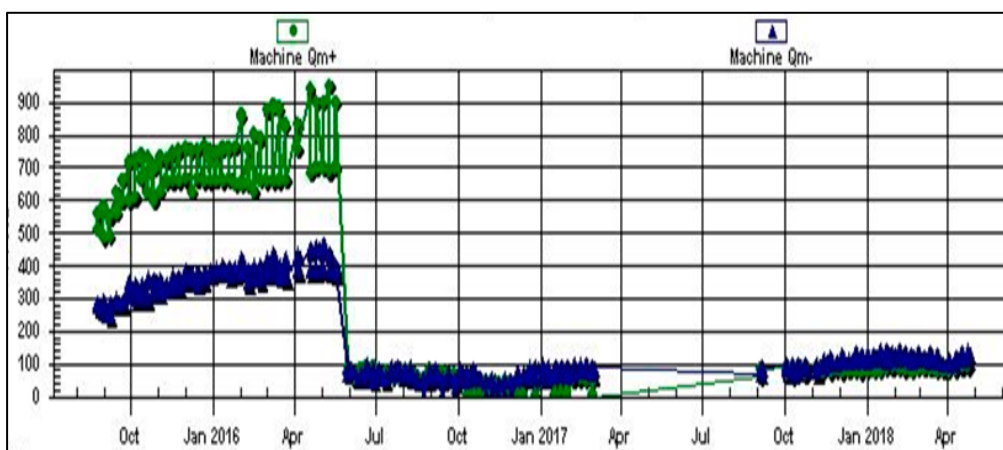


Рис. 17 Тренд аварийного электродвигателя

Интерпретация результатов мониторинга состояния обмотки статора с применением отраслевых стандартов.

В настоящее время в условиях перехода РФ к цифровой экономике, всеобщей автоматизации и модернизации энергетики, компания [«БО-ЭНЕРГО.АСТС»](#) разработала программно-технический комплекс (ПТК) предиктивной аналитики «ЗВЕЗДА» с функцией интегральной оценки состояния высоковольтных вращающихся машин (далее ВВМ) по

ключевым параметрам. [ПТК «ЗВЕЗДА»](#) успешно апробирован на предприятиях в России. Мониторинг частичных разрядов является одним из ключевых методов оценки состояния ВВМ, используя который можно выявить зарождающиеся неисправности на ранней стадии и эффективно спланировать мероприятия по обслуживанию.

Программно-технический комплекс мониторинга ЧР «ЗВЕЗДА» состоит из аппаратной и программной частей. Аппаратная часть представлена в виде отдельно устанавливаемых датчиков, сигналы с которых собирает прибор мониторинга линейки приборов «ЗВЕЗДА» (производство ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС»).

Приборы «ЗВЕЗДА» предназначены для непрерывной работы в автоматическом режиме на объектах, эксплуатирующих ВВМ. Программная часть системы мониторинга [«ЗВЕЗДА.ЧР»](#) (производство ООО «БО-ЭНЕРГО.АСТС») выполняет сбор данных с прибора мониторинга и проводит анализ полученных данных для отображения пользователю оценки состояния контролируемой машины. [«ЗВЕЗДА.ЧР»](#) – представляет собой программный продукт собственной разработки, предназначенный для анализа состояния ВВМ на основе активности ЧР. Контроль ЧР производится в режиме online, т.е. в процессе работы ВВМ. Контроль осуществляется по значениям амплитуд импульсов ЧР положительной и отрицательной полярности (Q_{m+} и Q_{m-}), а также дополнительных параметров (температура и влажность окружающей среды). Измерение Q_{m+} и Q_{m-} выполняется прибором, измерение температуры и влажности выполняется отдельным датчиком, сигнал которого преобразуется в цифровую форму, а полученные данные от подключенных приборов и результаты расчётов интерпретирует в графическом интерфейсе.

Программный комплекс [«ЗВЕЗДА.ЧР»](#) включён Единый реестр российских программ для электронных вычислительных машин и баз данных под номером [7026](#).

Таким образом, персонал в удаленных офисах может удобно определять или изменять условия срабатывания и уровни предупреждений, а также загружать результаты тестов для отображения и анализа. Программное обеспечение также является единой платформой для определения состояния генератора, конфигурации датчиков, загрузки данных и анализа данных. Общая база данных архивирует данные всех технологий вместе с соответствующими операционными данными. Инженеры могут просматривать долгосрочные и краткосрочные тенденции, сравнивать данные и проводить детальный анализ для оценки состояния генератора

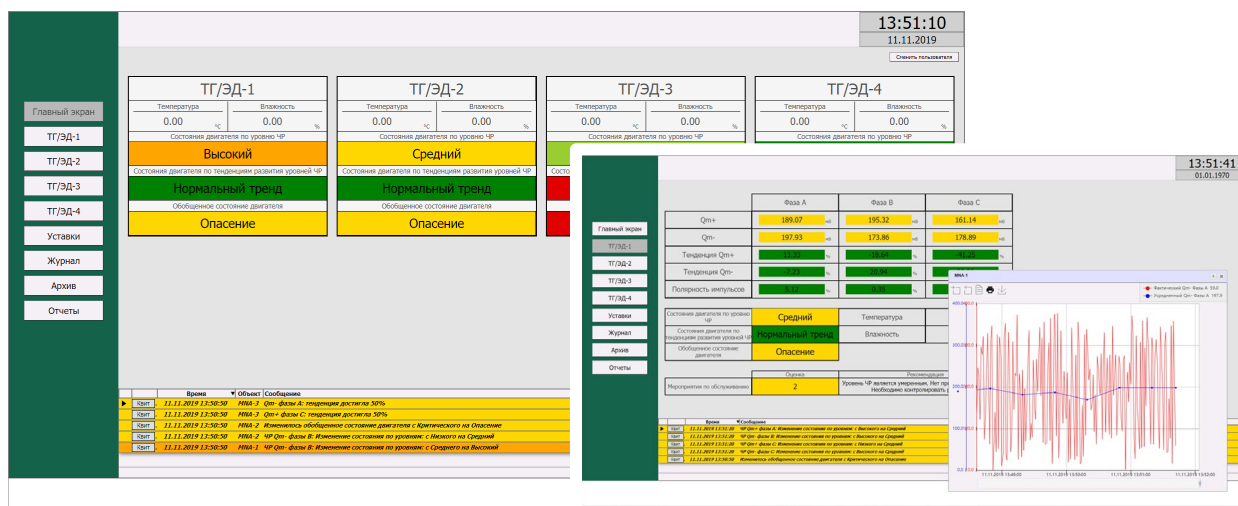


Рис.18 Пример интерфейса «ЗВЕЗДА» (станционный, агрегатный)