

Особенности организации комплексного мониторинга высоковольтных электрических машин.

Поиск и локализация дефектов в обмотках статоров электрических
машин по частичным разрядам.

Ботов С.В., ООО «DIMRUS», Пермь
dimrus@dimrus.ru

Организация эффективного обслуживания и ремонта электрических машин возможна только при использовании современных методов оценки технического состояния, которые позволяют выявлять возникновение дефектных состояний на ранних стадиях, когда у обслуживающего персонала будет еще достаточно времени для подготовки и устранению этих дефектов.

Для крупных электрических машин наиболее важными для оценки состояния являются следующие методы:

1. Вибрационный контроль подшипников.
2. Контроль состояния изоляции обмоток по уровню и распределению частичных разрядов в изоляции.
3. Выявление дефектов и замыканий в обмотке ротора на основании анализа пульсаций магнитного потока в зазоре электрической машины.
4. Контроль вибрации лобовых частей статора.
5. Генераторы. Контроль продольной ЭДС ротора (контроль состояния подстоловой изоляции подшипников).

На сегодняшний день, практическое применение каждого из этих методов в системах обслуживания по состоянию должно соответствовать следующим требованиям:

- Возможность контроля технического состояния вращающихся машин в режимах как периодического, так и непрерывного мониторинга.
- Наличие в программном обеспечении методов встроенных экспертно-диагностических подсистем, позволяющих выявлять типы и локализовать места их возникновения.
- Наличие в составе программного обеспечения методов адаптивных моделей, позволяющих прогнозировать временные и технические аспекты развития выявленных дефектных состояний.

Стандарты для измерения ЧР в изоляции электрических машин наиболее проработанные и содержат большое количество примеров различных дефектов, зарегистрированных как на лабораторных образцах, так и на реальных электрических машинах.

МЭК 60034-27-1. Измерение частичных разрядов в изоляции обмоток электрических машин с использованием испытательного напряжения (Rotating electrical machines – Part 27-1: Off-line partial discharge measurements on the winding insulation).

МЭК 60034-27-2. Измерение частичных разрядов в изоляции обмоток электрических машин под рабочим напряжением (Rotating electrical machines – Part 27-2: On-line partial discharge measurements on the stator winding insulation of rotating electrical machines).

При измерении частичных разрядов в изоляции обмоток электрических машин под рабочим напряжением стандарт выделяет 3 основных частотных диапазона регистрации ЧР:

- 1) **HF (high frequency)** : частотный диапазон от 3 МГц до 30 МГц.
 - 2) **VHF (very high frequency)** : частотный диапазон от 30 МГц до 300 МГц
 - 3) **UHF (ultra high frequency)** : частотный диапазон от 300 МГц до 3 ГГц
- Так же отмечается и низкочастотный диапазон **LF (low frequency)** – частотный диапазон ниже 3МГц. При этом отмечается, что более низкие частоты будут подвержены значительному влиянию помех из линии электропередачи, помехам от частотных преобразователей, помехам системы возбуждения и т.д., которые необходимо подавлять.

МЭК 60034-27-2:

«Как правило, чем выше верхняя частота среза системы обнаружения ЧР, тем выше будет отношение сигнал / шум, и, следовательно, ниже будет риск ложных показаний. Однако чем выше нижняя частота среза, тем ниже вероятность обнаружения ЧР, удаленного от датчика.»



Наиболее простым и оперативным способом регистрации частичных разрядов в статорах электрических машин является использование акустических и акустико-эмиссионных датчиков. Такие датчики монтируются на поверхности статора или на боковых щитах корпуса статора при помощи магнитов или специальных конструктивных элементов. Частота регистрируемых импульсов частичных разрядов – до 500 кГц(LF) .

Сравнительная дешевизна и простота установки акустических датчиков на корпусе статора значительно нивелируется их низкой помехозащищенностью. Также, поскольку акустические сигналы от частичных разрядов быстро затухают в конструкциях статора, вторым недостатком использования акустических датчиков является малая зона контроля.

Вторым типом датчиков частичных разрядов, используемых для диагностики электрических машин, и монтируемых на внешней поверхности корпуса статора и на боковых щитах, являются датчики растекания высокочастотных поверхностных токов, которые в принято обозначать как датчики TEV типа.

Эти датчики также оперативно монтируются на поверхности статора при помощи магнитных элементов и регистрируют импульсы в диапазоне до 150 МГц (VHF).

Недостатком датчиков типа TEV является очень низкая помехозащищенность. Это происходит потому, что на поверхность корпуса статора наводятся токи не только от внутренних частичных разрядов в обмотке, но и от высокочастотных импульсов, распространяющихся снаружи статора. Внешние высокочастотные импульсы обычно имеют большую амплитуду, и их количество значительно больше. В результате выявить небольшие импульсы от истинных частичных разрядов на фоне интенсивных помех такими датчиками очень сложно.



Вторую группу датчиков частичных разрядов, используемых для регистрации частичных разрядов в электрических машинах, составляют конденсаторы связи и высокочастотные трансформаторы тока. Их объединяет то, что они используют электрические методы регистрации импульсов и монтируются или на проводниках заземления или на питающей линии.

- Высокочастотные конденсаторы связи.

Датчики такого типа подключаются непосредственно к питающему напряжению, поэтому к ним предъявляются жесткие требования по стабильности параметров и работоспособности. Недостаток – высокая цена.

Емкость конденсаторов связи обычно составляет от 80 до 2000 пикофарад. Чем больше емкость конденсатора связи, тем выше будет чувствительность системы регистрации частичных разрядов, тем шире будет частотный диапазон регистрируемых импульсов.

- Высокочастотные трансформаторы токов марки RFCT (в литературе для них широко используется обозначение HFCT).

Они отличаются от обычных измерительных трансформаторов тока промышленной частоты использованием ферритовых высокочастотных сердечников. Частотный диапазон импульсов частичных разрядов, регистрируемых при помощи датчика типа RFCT, зависит от свойств сердечника, верхняя граница диапазона обычно не превышает 30 МГц (HF). Чувствительность и помехозащищенность этих датчиков можно характеризовать как средние.

Датчики марки RFCT, в силу своих конструктивных особенностей, монтируются только на проводниках без напряжения. В электрических машинах это обычно проводники заземления корпуса статора, заземление экрана КЛ, шины нулевых точек обмоток статора.



В качестве датчиков ЧР в крупных электрических машинах все чаще используются электромагнитные антенны различной конструкции.

- Электромагнитные антенны, располагающиеся в пазах статора под немагнитным клином. В статоре располагается несколько таких антенн, распределенных по окружности. Встроенные в паз электромагнитные антенны просты по своей конструкции, обладают хорошей чувствительностью и удовлетворительной помехозащищенностью, но сложны в монтаже. Установка таких антенн возможна только на заводе или при капитальном ремонте статора.

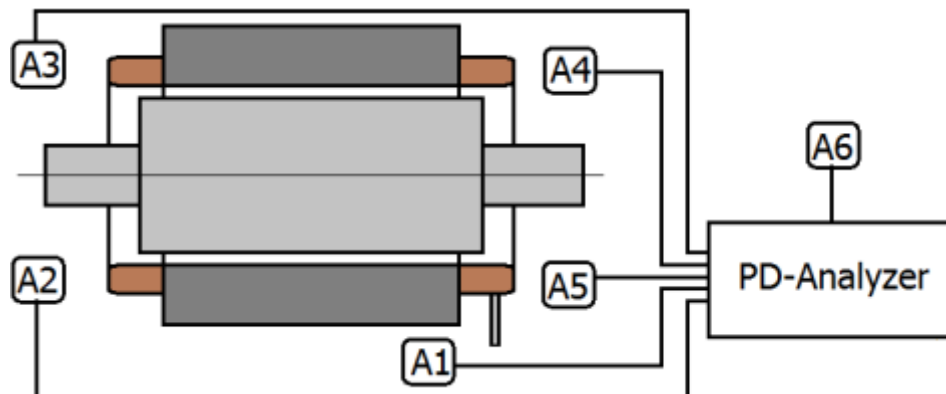


- Использование встроенных в пазы статора датчиков температуры в качестве антенн. Эти датчики располагаются в нескольких пазах между секциями обмотки и являются хорошими антеннами для регистрации частичных разрядов. Недостатком таких антенн является то, что они обычно подключены проводами, не предназначенными для передачи высокочастотных сигналов. В результате, при измерении частичных разрядов в крупных электрических машинах, особенно имеющих водородное охлаждение, итоговая чувствительность таких электромагнитных антенн может оказаться недостаточной.



- Электромагнитные антенны, устанавливаемые внутри корпуса статора в зоне лобовых частей. Это достаточно простые и дешевые датчики, работающие в СВЧ диапазоне частот, до 1,5 ГГц. Они крепятся на корпусе статора и не имеют контакта с токоведущими частями обмотки.

Электромагнитные антенны BA-1 производства фирмы Димрус имеют высокую чувствительность и помехозащищенность, так как располагаются внутри металлического корпуса статора. Наличие нескольких антенн внутри статора позволяет проводить электромагнитную локацию места возникновения частичных разрядов в изоляции обмотки статора.



Для контроля частичных разрядов в обмотке статора электрической машины в СВЧ диапазоне внутри статора необходимо устанавливать до пяти электромагнитных антенн.

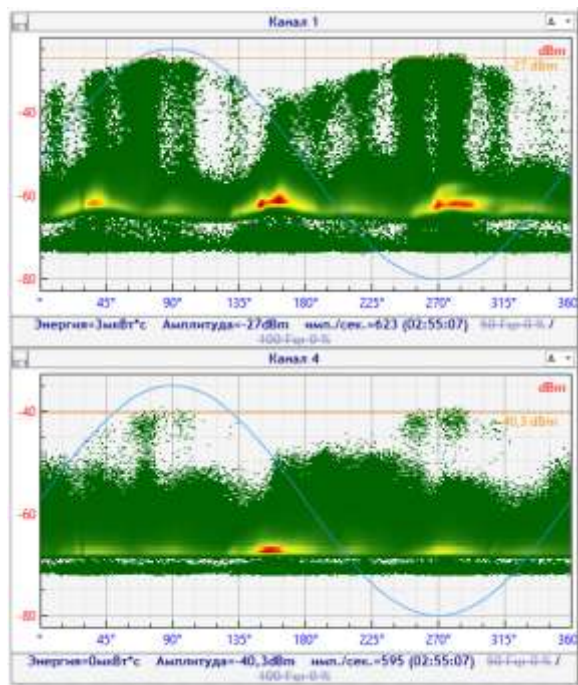
Первый датчик (электромагнитная антенна А1) устанавливается в зоне входа в статор питающего кабеля, подключенного к обмотке статора. При помощи этой антенны производится отстройка от высокочастотных помех, проникающих в обмотку статора из сети по питающему кабелю.

Электромагнитные антенны А2 – А5 располагаются в зонах лобовых частей обмотки, по две с каждой стороны. Антенны желательно устанавливать диаметрально противоположно друг от друга.

Антенна А6 предназначена для регистрации высокочастотных импульсов снаружи корпуса электрической машины. Использование этой антенны позволяет еще больше повысить помехозащищенность.

Внутренние антенны не должны располагаться в одной плоскости для того, чтобы в последствии повысить точность пространственной локализации мест дефектов в обмотке статора.

Регистрация частичных разрядов производится при помощи прибора PD-Analyzer HF/UHF, позволяющего синхронно регистрировать СВЧ импульсы от 6 электромагнитных антенн.



Системы регистрации и анализа частичных разрядов в обмотках статора с использованием электромагнитных антенн марки ВА-1 в 2018 - 2019 годах были смонтированы на 11 синхронных двигателях марки СДМЗ мощностью 2 и 4 МВт.

На двигателях меньшей мощности установлено по три антенны ВА-1: две в зонах лобовых частей с двух сторон статора и одна антенна смонтирована в зоне питающего высоковольтного кабеля.

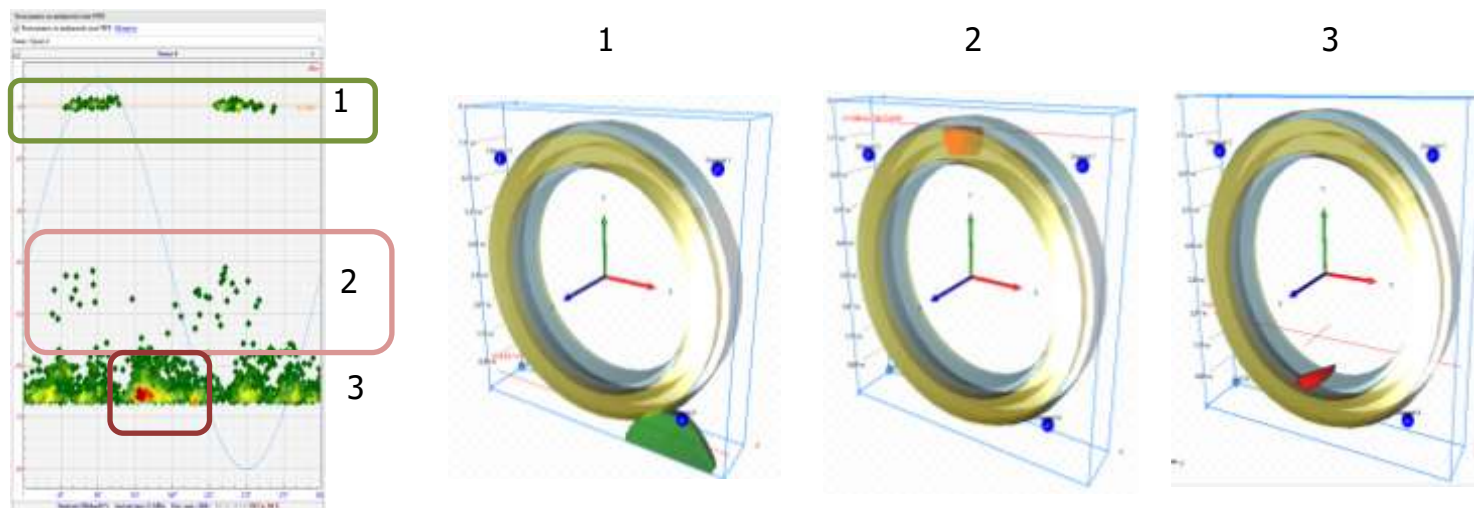
На двигателях большей мощности установлено по 5 электромагнитных антенн: по две в лобовых частях с двух сторон статора диаметрально противоположно. Одна антенна монтировалась в зоне подключения кабеля.

Для регистрации импульсов частичных разрядов использована стационарная система мониторинга на основе шестиканального прибора марки PD-Analyzer-HF/UHF. Анализ полученной информации, диагностика дефектов и оценка технического состояния производится при помощи специализированного программного обеспечения INVA.

Испытания показали высокую чувствительность смонтированных системы мониторинга и высокую помехозащищенность процесса измерений. Поэтому даже отказались от использования шестой (внешней помеховой) антенны.

Для примера приведены PRPD распределения ЧР на двух электродвигателях. На основании анализа этих распределений в ПО INVA в автоматическом режиме определяется тип дефекта в изоляции обмотки статора и тенденция к его развитию.



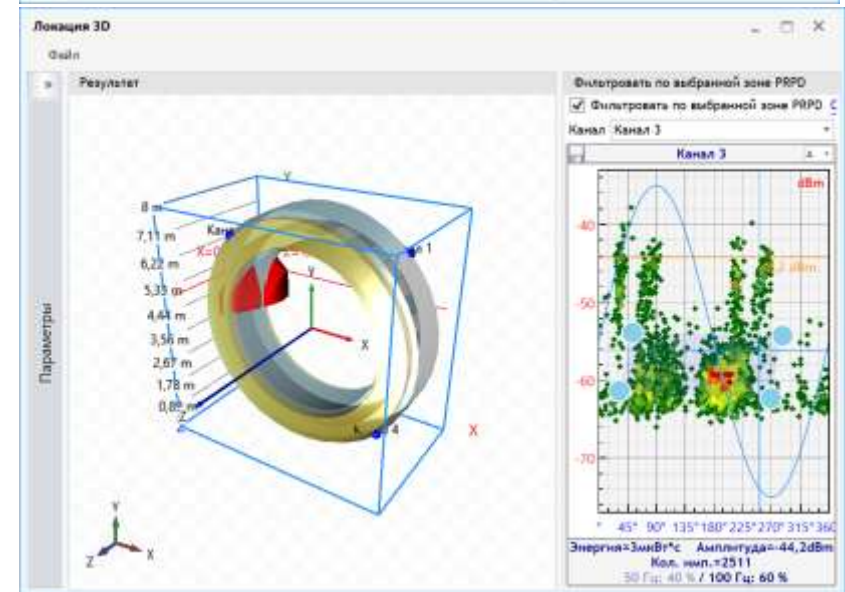
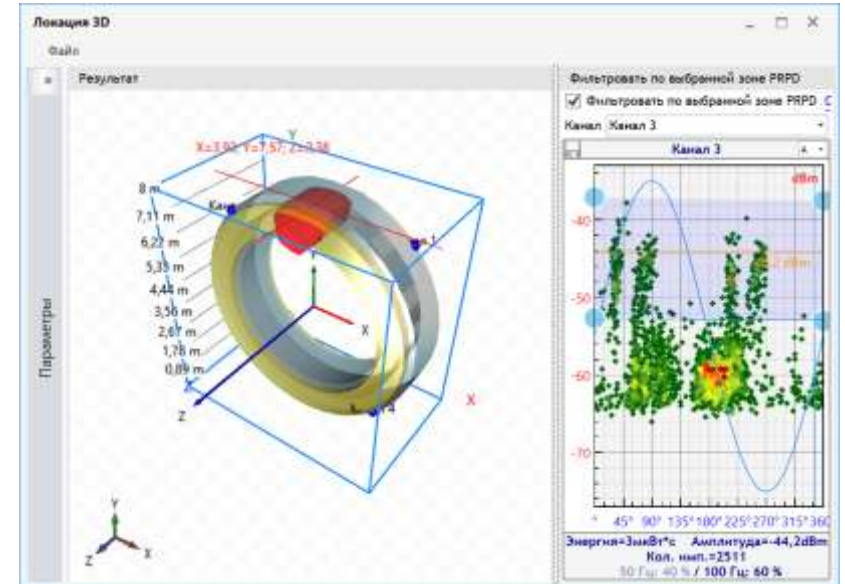
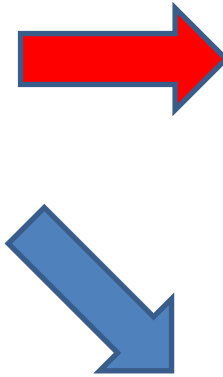
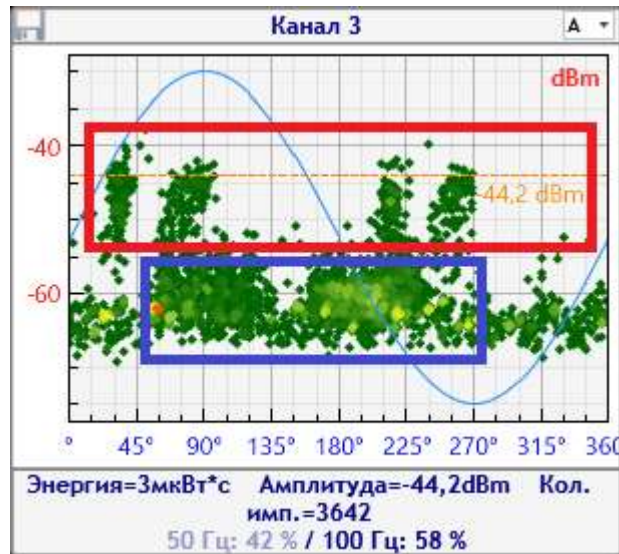


В основе локации лежит анализ времени прихода импульсов от одного разряда к нескольким антеннам. Точность локации в ПО INVA составляет 0,2–0,4 м, и зависит от размеров статора, и мест установки антенн.

На PRPD распределении импульсов цифрой «1» выделены самые большие по амплитуде импульсы, относящиеся к дефекту типа «плавающий потенциал». Дефект локализуется в зоне подключения кабеля питания, поэтому он вероятнее всего находится в разделке концевой муфты питающего кабеля или месте подключения. Это не очень опасный (зеленый) дефект, слабо влияющий на дальнейшую эксплуатацию самой электрической машины.

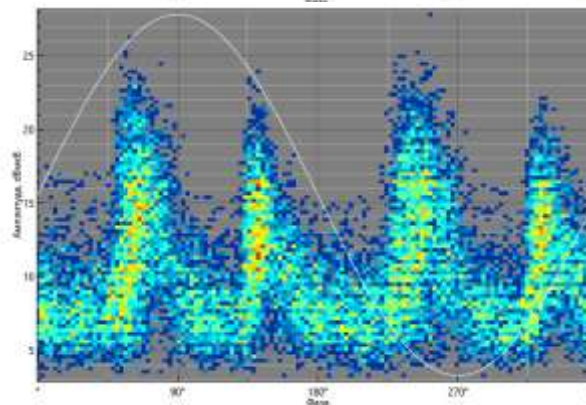
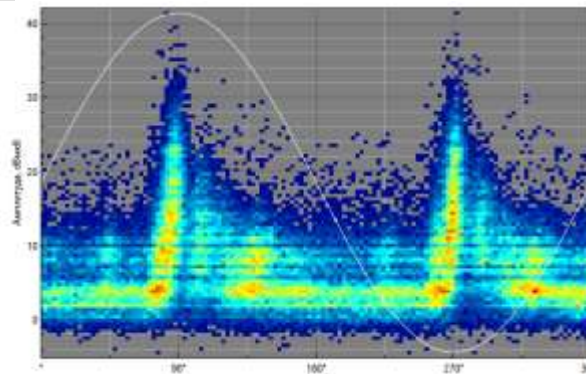
Дефект «2», с разрядами меньшей амплитуды диагностируется системой как «дефект в изоляции». Он локализуется в зоне лобовых частей обмотки, вверху статора. Это опасный дефект, поэтому он автоматически выделен системой на рисунке статора красным цветом.

Импульсы группы «3» на PRPD диагностируются как «разряд в пазу» в нижней части статора. Это опасный дефект, поэтому на статоре он показан красным цветом.



На амплитудно-фазовом распределении импульсов, зарегистрированной системой мониторинга, присутствуют несколько источников разрядной активности.

Результат 3D локации по разности времени прихода импульсов для зоны активности 1 (красный цвет) и зоны активности 2 (синий цвет).



Измерения проводились при помощи направленного акустического микрофона с рефлектором для усиления сигнала и прибором PD-Unit.

Последовательно обследовались все лобовые части и обвязка статора с двух сторон. Для наибольшей точности измерений место измерения подсвечивалось лучом лазера, встроенным в направленную акустическую антенну.

Результат локации по времени прихода с СВЧ датчиков подтвердился измерением направленной акустической антенной.

Система мониторинга марки MDR-S20 предназначена для мониторинга и оперативной оценки технического состояния генераторов и мощных высоковольтных электродвигателей. В основе комплексной системы мониторинга MDR-S20 лежит система контроля частичных разрядов марки MDR-3/UHF, возможности которой расширены новыми диагностическими функциями.

Оценка технического состояния электрических машин в системе MDR-S20 производится 4 различными методами:

- Контроль технического состояния изоляции обмотки статора по частичным разрядам в СВЧ диапазоне частот с локацией места возникновения дефекта в изоляции.
- Контроль вибрационного состояния лобовых частей обмотки статора при помощи беспроводных датчиков.
- Выявление дефектов и замыканий в обмотке ротора на основании анализа пульсаций магнитного потока в зазоре электрической машины.
- Контроль продольной ЭДС ротора (контроль состояния подстоловой изоляции подшипников).

Основной модуль системы мониторинга MDR-S20 (PD-Analyzer) монтируется в защитном шкафу рядом с контролируемой электрической машиной. Это делается для того, чтобы затухание сигналов СВЧ импульсов частичных разрядов в соединительных коаксиальных кабелях было минимальным.

Органическое сочетание четырех методов диагностики в одном устройстве позволяет повысить эффективность работы и значительно снизить затраты на поставку и внедрение всей системы мониторинга.



Контроль вибрации лобовых частей.

Повышенная вибрация лобовых частей обмотки статора приводит к истиранию изоляции, появлению частичных разрядов и, в итоге, к электрическому пробое. При высоком уровне вибрации возможно даже разрушение межфазных перемычек.

Обычно для контроля вибрации лобовых частей используются оптоволоконные датчики, имеющие необходимую чувствительность и хорошую электрическую изоляцию. Основным недостатком таких датчиков является очень высокая цена.

В системе мониторинга марки MDR-S20 для контроля вибрации лобовых частей используются более дешевые беспроводные датчики вибрации марки WSV. Эти датчики имеют компактный изолированный корпус и могут работать при температурах до 125 градусов.

Датчики монтируются на поверхности контролируемых лобовых частей обмотки. Питание, необходимое для их работы, они получают в виде наводок от тока, протекающего по проводникам обмотки статора. Выходная информация от датчиков вибрации передается по беспроводному интерфейсу Bluetooth на приемники WDM-2, смонтированные с двух сторон внутри корпуса.

Датчики контролируют вибрационный сигнал в трех направлениях и работают синхронно. Это дает возможность при анализе вибрационных процессов контролировать пространственное перемещение лобовой части секции обмотки и всех лобовых частей электрической машины в целом.



Контроль замыканий в обмотке ротора.

Возникновение короткозамкнутых витков в обмотке ротора приводит к искажению сигнала синусоиды магнитного поля в зазоре электрической машины, повышению уровня высших гармонических составляющих, повышенному нагреву машины и снижению ее общего КПД.

Контроль наличия замыканий в обмотке ротора в MDR-S20 производится на основании анализа магнитного потока в зазоре электрической машины. В зазоре между статором и ротором устанавливается датчик магнитного потока, регистрирующий мгновенные изменения в процессе вращения ротора.

На основании анализа выявленных искажений магнитного потока при помощи экспертной системы определяется секция обмотки (паз), в которой произошло замыкание.

Контроль продольной ЭДС обмотки ротора.

В силу особенностей конструкции роторов генераторов в них часто возникает электромагнитная несимметрия, приводящая к возникновению на противоположных концах ротора переменного напряжения (продольной ЭДС). Величина этого напряжения может достигать больших значений, до сотни вольт.

При замыкании этого напряжения через подшипники и фундамент возникает ток, который разрушает опорные подшипники ротора электрической машины.

Для контроля продольной ЭДС и состояния подступовой изоляции в системе MDR-S20 предусмотрено измерение до двух токов в цепях заземления и до двух напряжений на роторе.



Спасибо за внимание