

ЛОКАЛИЗАЦИЯ И МОНИТОРИНГ ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОЙ РАЗРЯДНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ

В.В. МИХАЙЛОВ, М.Е. БИТКИН, А.В. СТАРОВ, О.В. КРЮКОВ
(ООО "ТСН-электро", г. Н. Новгород)



Представлены результаты комплексных экспериментальных исследований по мониторингу работы высоковольтного электрооборудования распределительных устройств трансформаторных подстанций на объектах топливно-энергетического комплекса. Проанализированы параметры эксплуатационных факторов, влияющих на работоспособность и исправное состояние изоляции обмоток и других функциональных узлов трансформаторов. Дана оценка динамики активности частичных разрядов по фазе и интенсивности. Полученные результаты показали необходимость превентивных мер для увеличения ресурса РУ.

Ключевые слова: трансформаторная подстанция; мониторинг; частичные разряды; пробой изоляции; распределительное устройство.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время многочисленными нормативными документами установлены требования по оснащению всех высоковольтных транс-

форматоров, распределительных устройств (рис. 1) и приводных машин, установленных на объектах ТЭК, системами мониторинга для контроля состояния, диагностирования и прогнозирования ресурса [1-4]. Так, на-

Рис. 1.
Общий вид
комплектного РУ
типа "Каскад" в КТП





▲ Рис. 2. Примеры поверхностного трекинга ЧР в обмотках

пример, в соответствии с Федеральным законом РФ “О промышленной безопасности” все компрессорные станции (КС) и большинство газоперекачивающих агрегатов (ГПА) являются объектами повышенной опасности (ОПО) [5-8]. К оборудованию ОПО с истекшим нормативным сроком эксплуатации предъявляются особые требования по контролю технического состояния и продлению сроков безопасной эксплуатации [9-12].

В этой связи чрезвычайно актуальны работы по своевременному созданию инновационных систем мониторинга технического состояния наиболее ответственных технологических установок и их отдельных систем, таких как мощные высоковольтные трансформаторы, распределительные устройства (рис. 1) и приводные машины [13-16].

Так, например, согласно статистике [17-20], последние десятилетия наблюдается увеличение аварий в бронированных КРУ и электроприводных ГПА. Аварии часто возникают в результате возникновения трекинга между фазами или между фазой и землей в полиэфир-стекловолоконных изолирующих панелях. За годы эксплуатации такой трекинг может привести к аварии. Отмеченные обстоятельства определяют необходимость достоверной оценки ресурса электрооборудования мегаваттного класса и их текущего состояния с использованием независимых многокритериальных и универсальных систем мониторинга [21-24].

ПРИЧИНЫ ВОЗНИКНОВЕНИЯ ИСТОЧНИКОВ ВЫСОКОЙ РАЗРЯДНОСТИ В РУ

Разрушающие процессы возникают при смешивании загрязнений с влагой (высокая влажность), что создает частично проводящую пленку на поверхности изоляции. Данная пленка приводит к протеканию емкостных токов, которые в свою очередь яв-

ляются причиной возникновения разрядов на поверхности изоляции с ее последующей карбонизацией.

Плохо изготовленные трансформаторы тока и напряжения могут иметь внутренние пустоты в изоляции. Такие пустоты в изоляции могут способствовать возникновению ЧР, которые в конечном итоге пронизывают слои изоляции и приводят к короткому замыканию на землю (рис. 2).

Автономный тест, проводимый на распределительных устройствах (РУ) для обнаружения частичных разрядов (ЧР), имеет следующие недостатки:

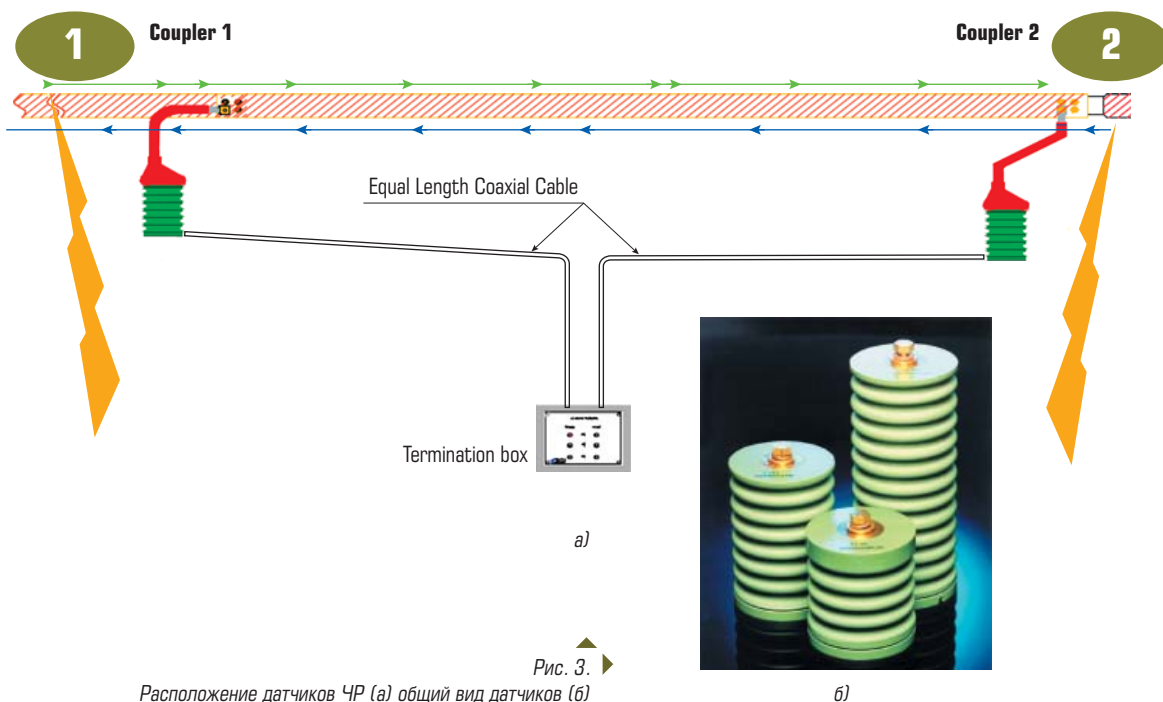
- длительное и дорогое время простоя электрооборудования;
- необходимость в субъективном экспертном анализе результатов;
- распределительное устройство тестируется не при рабочих режимах;
- наличие пауз и временных интервалов между тестами.

В этой связи необходимо обеспечить:

- снижение общей стоимости и времени упреждающего ремонта РУ;
- измерение и анализ данных параметров РУ штатными специалистами предприятия;
- проведение тестов в нормальном рабочем режиме или при штатных условиях;
- простоту реализации методики отделения шума в исходных данных измерений;
- использование поверенных датчиков и универсального оборудования для наблюдения;
- анализ перспективных изменений и прогноза динамики изменения ЧР.

ФИЗИКА ПРОЦЕССОВ ИЗМЕРЕНИЯ ЗНАЧЕНИЙ И ЛОКАЛИЗАЦИИ МЕСТА ЧР В РУ

При возникновении ЧР, он создает электрический импульс, который распространяется от места дефекта в обоих направлениях по



Расположение датчиков ЧР (а) общий вид датчиков (б)

высоковольтной шине (рис. 3). Если хотя бы два датчика установлены на шине, то наличие и приблизительное местоположение источника ЧР может быть достоверно установлено.

Если ЧР возникают в точке 1, то импульс тока перемещаясь вдоль шины будет обнаружен датчиком ЧР 1 (Coupler 1), подсоединенным ко входу измерительного прибора. Далее этот импульс будет также обнаружен датчиком ЧР 2 (Coupler 2).

Импульс распространяется вдоль медной шины со скоростью света. Зная время задержки его прохождения между точками 1 и 2, можно локализовать местонахождение источника ЧР на шине. Если изменять время задержки, то категоризация ЧР на датчике 1 и 2, наблюдаемая на измерительном приборе изменится, что позволит определить местоположение секции РУ с источником ЧР.

Первоначально разработанный для мониторинга ЧР в высоковольтных электродвигателях [25-28] и генераторах [29-32], измерительный прибор (ИП) типа TGA-B используется для измерений ЧР в шинах и для определения местоположения источника. Время задержки между датчиками заранее программируется и, изменяя его, можно определить местоположение любого источника ЧР в пределах нескольких сантиметров.

Дополнительно к локализации местоположения источника любых ЧР, измерительный прибор может определять число, уровень, и угловое положение ЧР относительно синусоиды переменного тока (50 Гц).

Поскольку при измерениях можно контролировать лишь одну пару датчиков, то пары датчиков ЧР (смежные) подключаются последовательно ко входам ИП.

Для организации непрерывного мониторинга РУ измерения производятся двумя вариантами измерительных систем анализа ЧР (рис. 4):

- производится мониторинг обоих концов шин распределительного устройства с регистрацией максимальных значений Q_m (слева) и NQN (справа);
- осуществляет мониторинг избранных датчиков с наивысшей активностью ЧР.

Датчики размещаются на каждом автоматическом выключателе, и для определения ЧР необходимо замкнуть магистральный выключатель и включить выключатели на каждом ответвлении. Данное размещение датчиков имеет следующие преимущества:

- любой квалифицированный специалист способен обеспечить сбор результатов тестов и провести первичный анализ базы данных;
- внезапный тест на наличие ЧР может быть сделан в любых штатных условиях;
- результаты тестов имеют типовой вид, удобный для экспресс-анализа и принятия решения по дальнейшим исследованиям;
- схема измерений может использоваться совместно с тестированием электрических машин [33-35].

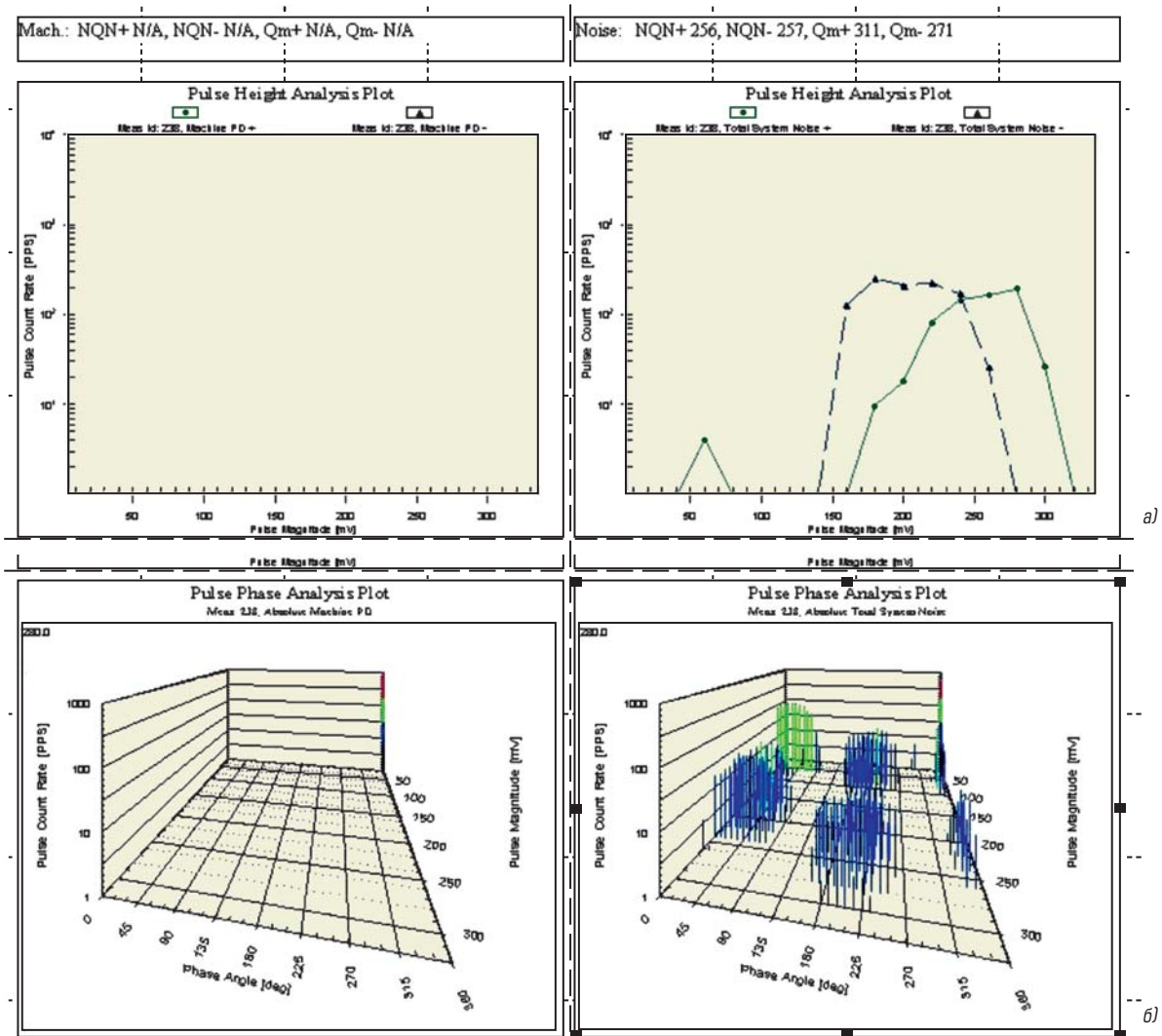


Рис. 2. Результаты двухмерных (а) и трехмерных (б) измерений ЧР на РУ по стороне А (слева) и В (справа)

МЕТОДОЛОГИЯ ДИАГНОСТИКИ РУ МЕТОДОМ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ

Максимальная амплитуда импульсов ЧР положительной и отрицательной полярности при частоте повторений 10 имп/сек по стандартам МЭК IEC60034 и IEEE 1434-2000 определяется величиной Q_m (мВ) как соотношение состояния исследуемого РУ к результатам измерений уровня Q_{max} в аналогичных РУ

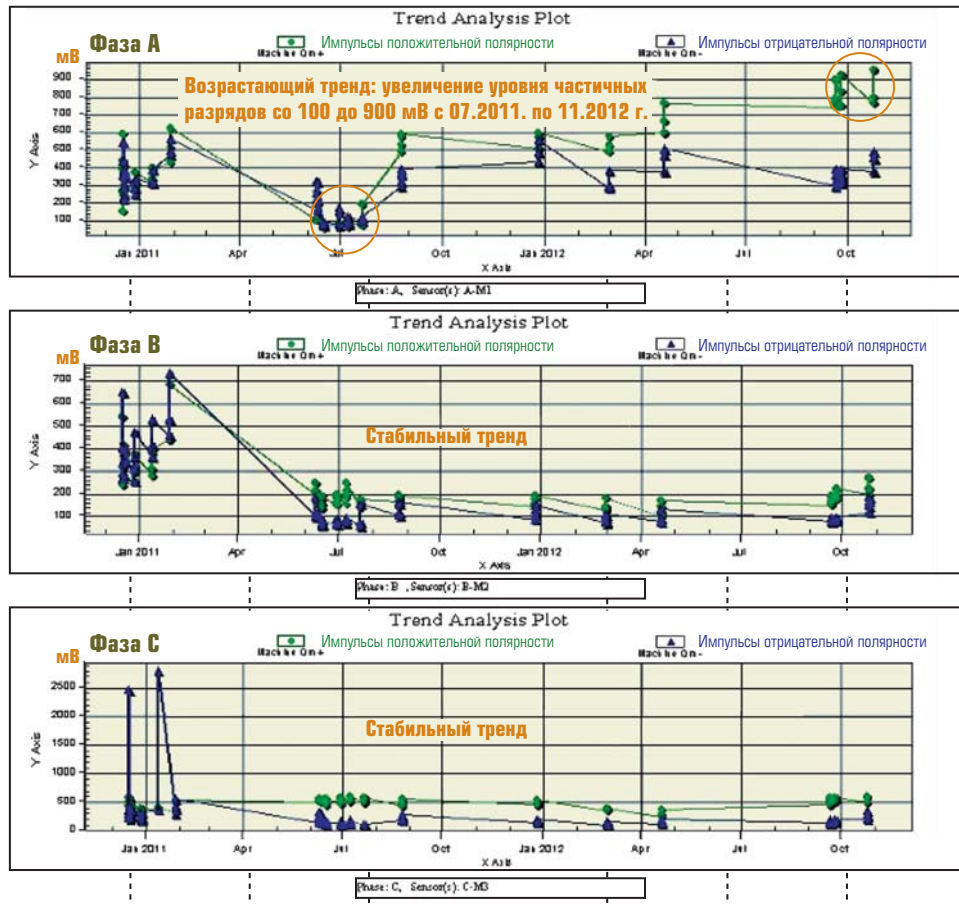
из статистической базы данных, содержащей результаты 270 000 тестов.

К примеру, при получении результата, входящего в 25 %, можно говорить о том, что 75 % аналогичных РУ, результаты измерений ЧР которых включает статистическая база данных, находятся в худшем состоянии, чем исследуемая. И, наоборот, при 75 % – только 25 % аналогичных РУ из базы данных находятся в более плохом состоянии, чем исследуемая в таблице 1.

Таблица 1. Результаты диагностики, полученные при эксперименте

ФАЗА	Q_{m+} , мВ	Q_{m-} , мВ
А	798 (значение выходит за 95 % допуск – критичный уровень частичных разрядов)	455 (значение входит в 95 % допуск – критичный уровень частичных разрядов)
В	227 (значение входит в 90 % допуск – повышенный уровень частичных разрядов)	184 (значение входит в 90 % допуск – повышенный уровень частичных разрядов)
С	580 (значение выходит за 95 % допуск – критичный уровень частичных разрядов)	288 (значение входит в 90 % допуск – повышенный уровень частичных разрядов)

Рис. 5.
Изменение амплитуды
частичных разрядов
во времени



Последовательное и систематическое тестирование позволяет оказать содействие в определении состояния обмотки трансформатора или статора. Хотя некоторые заключения можно извлечь из одного теста, одним из основных критериев оценки обмотки является тенденция возрастания ЧР. Возрастание значения ($\pm Q_m$) с удвоением уровня ЧР за период 6 месяцев часто указывает на быстро ухудшающееся состояние обмотки или шины. История трансформаторов и машин на предприятии может быть полезной для правильной характеристики активности ЧР и оценки состояния изоляции. По результату диагностики получены следующие значения (рис. 5):

- изменение амплитуды ЧР во времени фазы В и С – имеет стабильный тренд;
- изменение амплитуды ЧР во времени фазы А – имеет возрастающий тренд.

При анализе графика импульсов частичных разрядов с привязкой к фазовому углу напряжения первой гармоники необходимо учитывать три основных положения:

1) если пики импульсов расположены на углах 45° и 225° (на графике) – разрушение происходит в центральной части обмоток (классические ЧР);

- 2) при смещении пиков импульсов относительно классических ЧР на 30° вправо или влево – разрушение происходит в концевых частях;
- 3) если пики импульсов расположены на углах 0° и 180° – ЧР при некачественном соединении на выводах подключения РУ, трансформаторов или машин.

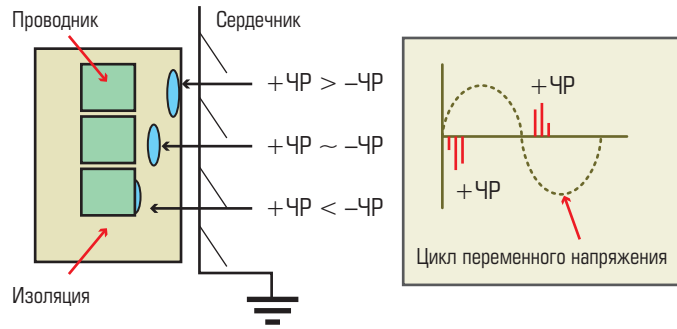
Полярность импульсов ЧР и их преобладание предоставляют информацию о доминирующем (преобладающем) механизме разрушения изоляции обмоток (рис. 6).

В зависимости от места возникновения, классические или фаза-земля ЧР, которые возникают в пазовой части обмоток, имеют положительную или отрицательную полярность. Благодаря этому становится возможным установить место, где происходят частичные разряды и возможные механизмы разрушения изоляции, которые имеют место в данном РУ. Преобладание положительных ЧР над отрицательными ($+Q_m \gg -Q_m$) является признаком поверхностной активности, тогда как преобладание отрицательных ЧР ($-Q_m \gg +Q_m$) – указывает на наличие пустот вблизи поверхности меди обмоток. Отсутствие преобладания полярности указывает на наличие пустот в толще

корпусной изоляции. Для удобства проведения интерпретации полученных данных на графиках, полярность импульсов отображается разными цветами.

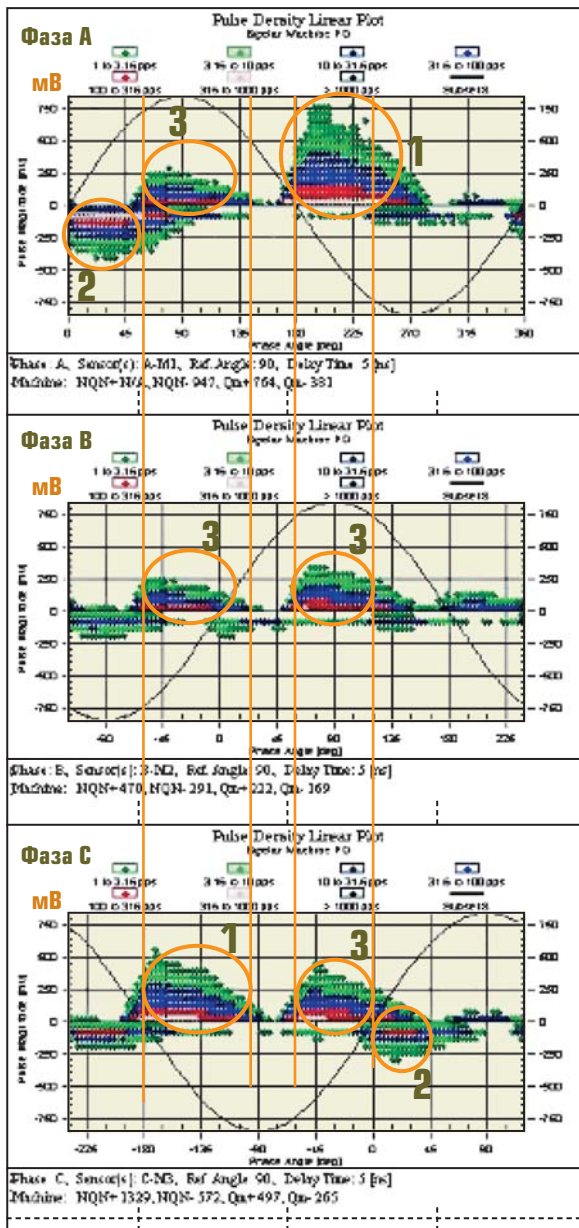
**РЕЗУЛЬТАТЫ
ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ НА РУ В КТП**

По результату диагностики получены следующие результаты (рис. 7).

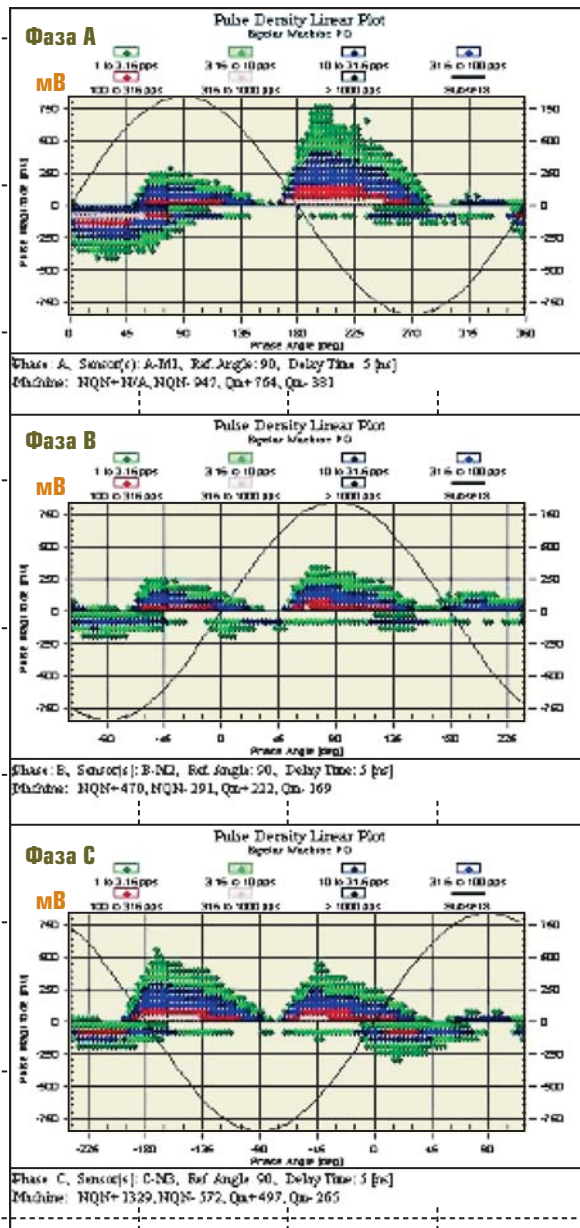


▲ Рис. 6. Полярность импульсов частичных разрядов

Результаты измерения частичных разрядов с контрольными точками



Исходные результаты измерения частичных разрядов



▲ Рис. 7. График импульсов ЧР с привязкой к фазовому углу синусоиды напряжения: 1 – импульсы частичных разрядов положительной полярности; 2 – импульсы частичных разрядов отрицательной полярности; 3 – импульсы наводок с других фаз

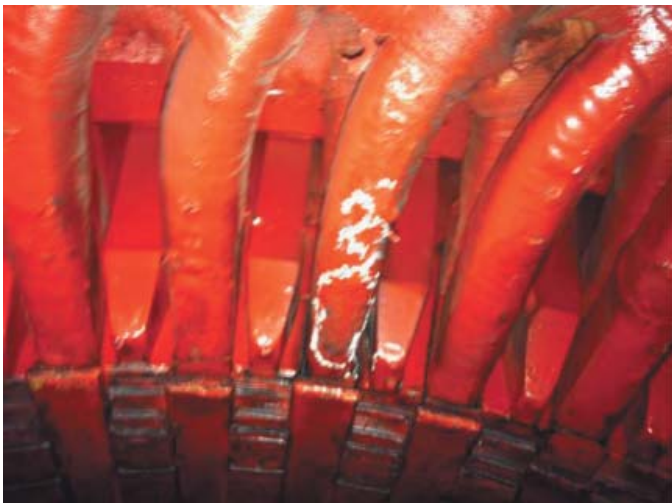


Рис. 8. Общий вид выпучивания и растрескивания изоляции из-за ЧР

Фаза А и С показывают присутствие внутренних ЧР с заметным преобладанием положительных ЧР. Это главный источник ЧР на данном РУ. Все эти факты, а также положение кластеров ЧР относительно фазового угла и их форма указывают, что в данной системе присутствуют высокие поверхностные ЧР в центральной части обмотки трансформатора и непосредственно на выходе. Как указано выше, это, как правило, главный источник ЧР. Поверхностные ЧР могут возникнуть или в результате разрушения полупроводящего слоя, и/или ослабления крепления обмоток.

На рис. 8 показано расслоение и вспучивание изоляции, которое не считается опасным из-за небольшой глубины расслоения. В месте вспучивания возможен проводящий канал, и необходим дополнительный инструментальный контроль.

Большинство источников частичных или коронных разрядов могут быть вызваны разрушением полупроводящего слоя изоляции трансформатора РУ или нарушением технологии его наложения. Таким образом, на основании проведенных исследований можно сделать вывод о неудовлетворительном состоянии изоляции данного РУ. Для восстановления работоспособности двигателя в максимально сжатые сроки, можно рекомендовать проведение следующего комплекса мероприятий:

1. Для снижения активности разрядов на выходе обмотки необходима укладка дополнительных слоев изоляции в найденных точках с последующей пропиткой. Работы могут быть выполнены на месте эксплуатации РУ.

2. Для устранения поверхностных ЧР необходимо восстановление полупроводящего слоя. Высокие токи утечки в частях обмотки требуют замены изоляции с последующей пропиткой.

Выводы

По результатам комплексного исследования было выявлено неудовлетворительное состояние обмотки испытуемого РУ. Наиболее слабые места наблюдаются в концевой части, где пробой и проявление искр видны невооруженным взглядом. Тест штатным прибором измерения ЧР в режиме *OFF-Line* показал преобладание положительных частичных разрядов над отрицательными, а смещение ЧР по углу наклона свидетельствует о межфазовых разрядах. Данные показания подтверждает и тест с помощью прибора РРМ-97.

Список литературы

1. Груздев В.В., Волков А.С., Крюков О.В. Методологический подход к прогнозированию технического состояния трансформаторов распределительных устройств // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2021, № 1(138), с. 14-19.
2. Kryukov O.V., Serebryakov A.V. Energy efficient power supply systems of oil and gas pipelines electric drives // Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering. 2017, b. 17, № 3, p. 102-110.
3. Степанов С.Е., Крюков О.В. К выбору методов мониторинга электроприводов энергетических объектов // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015, т. 2, № 4, с. 53-61.
4. Крюков О.В., Серебряков А.В. Экологические направления электроснабжения и задачи энергосбережения при реконструкции объектов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2015, № 8, с. 23-33.
5. Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В., Титов В.Г. Реализация капсулированных электроприводных ГПА на объектах ПАО «Газпром» // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. 2020, т. 63, № 1, с. 31-37.
6. Крюков О.В., Степанов С.Е., Титов В.Г. Встроенные системы мониторинга технического состояния электроприводов для энергетической безопасности транспорта газа // Энергобезопасность и энергосбережение. 2012, № 2, с. 5-10.

7. *Крюков О.В.* Оптимальное управление технологическим процессом магистрального транспорта газа // в сборнике: XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014. Ин-т проблем управления им. В.А. Трапезникова РАН. 2014, с. 4602-4613.
8. *Крюков О.В., Серебряков А.В., Макриденко Л.А.* и др. Мониторинг и прогнозирование технического состояния электро-механических систем энергетики / М.: ВНИИЭМ. 2017, т. 1.
9. *Степанов С.Е., Крюков О.В.* Выбор методов мониторинга и прогнозирования технического состояния автоматизированных электроприводов энергетических объектов // Контроль. Диагностика. 2018, № 11, с. 32-39.
10. *Васенин А.Б., Степанов С.Е., Крюков О.В.* Методология и средства оперативного мониторинга электродвигателей на КС // Контроль. Диагностика. 2019, № 11, с. 52-58.
11. *Зюзов А.М., Крюков О.В., Метельков В.П., Михальченко С.Г.* Оценка теплового состояния электродвигателей переменного тока КС МГ // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2021, т. 332, № 1, с. 88-96.
12. *Крюков О.В.* Оценка эксплуатационных факторов электроприводных газоперекачивающих агрегатов по нормативным требованиям мониторинга // Контроль. Диагностика. 2018, № 10, с. 50-57.
13. *Конonenко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В.* Расширение функциональных возможностей автоматизации и мониторинга распределительных устройств КТП "Каскад" // Автоматизация и ИТ в энергетике. 2020, № 12, с. 26-31.
14. *Крюков О.В.* Моделирование и микро-процессорная реализация электромеханических систем // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2015, № 3, с. 55-61.
15. *Крюков О.В.* Принципы малолюдных технологий в организации работы электроприводных компрессорных станций // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2014, № 4, с. 10-13.
16. *Kryukov O.V., Serebryakov A.V.* Modern systems of outdoor illumination for compressor stations // Light & Engineering. 2016, b. 24, № 2, p. 128-131.
17. *Ziuzev A., Metelkov V., Kryukov O.* Analysis and simulation of thermodynamic processes in high-powered AC electric motors // в сборнике: 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 – Proceedings. 11. 2020, p. 9249327.
18. *Крюков О.В.* Оптимизация работы технологически связанных электроприводов ГПА КС // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. 2014, т. 1, № 2, с. 26-31.
19. *Valtchev S., Kryukov O.V., Meshcheryakov V.N., Belousov A.S.* Comparative analysis of electric drives control systems applied to two-phase induction motors // в сборнике: Proceedings – 2020 2nd International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2020. 2. 2020, p. 918-922.
20. *Крюков О.В., Степанов С.Е., Васенин А.Б.* Поддержка диспетчерских решений ГТС на базе оценки их энергоэффективности // Наука и техника в газовой промышленности. 2019, № 4, с. 71-81.
21. *Репин Д.Г., Крюков О.В.* Концепты системы мониторинга технического состояния компрессорных станций // Контроль. Диагностика. 2017, № 12, с. 30-35.
22. *Крюков О.В.* Коммуникационная среда передачи данных сети ETHERNET на полевом уровне различных объектов // Автоматизация в промышленности. 2012, № 12, с. 26-30.
23. *Крюков О.В., Саушев А.В.* Методология вейвлет-преобразования при анализе автоматизированных электроприводов // в сборнике: Фёдоровские чтения – 2020: 50-я МНПК с элементами научной школы. 2020, с. 174-178.
24. *Крюков О.В.* Научные основы создания интеллектуальных электроприводов технологических установок нефтегазового комплекса // В сборнике: Труды IX международной (XX Всероссийской) конференции по автоматизированному электроприводу АЭП-2016. 2016, с. 423-427.
25. *Kryukov O., Gulyaev I., Teplukhov D.* Invariant automatic control system for a group of fans in gas air cooling devices by means of energy efficiency algorithms // в сборнике: 2020 11th International Conference on Electrical Power Drive Systems, ICEPDS 2020 – Proceedings. 11. 2020, p. 9249270.
26. *Воеков В.Н., Мещеряков В.Н., Крюков О.В.* Вентильный электропривод для погружных нефтяных насосов с импульсным повышающим преобразователем напряжения в звене постоянного тока ПЧ и релейным управлением инвертором напряжения // Вестник ЮУрГУ. Серия: Энергетика. 2020, т. 20, № 2, с. 110-119.

27. Степанов С.Е., Крюков О.В., Плехов А.С. Принципы автоматического управления возбуждением синхронных машин газокompрессорных станций // Автоматизация в промышленности. 2010, № 6, с. 29-31.
28. Belousov A.S., Meshcheryakov V.N., Valchev S., Kryukov O.V. Development of a control algorithm for three-phase inverter in two-phase electric drives reducing the number of commutations // в сборнике: Proceedings – 2019 1st International Conference on Control Systems, Mathematical Modelling, Automation and Energy Efficiency, SUMMA 2019. 2019, с. 444-449. DOI: 10.1109/summa48161.2019.8947487.
29. Серебряков А.В., Крюков О.В. Оптимизация управления автономными энергетическими установками в условиях стохастических возмущений // Промышленная энергетика. 2013, № 5, с. 45-49.
30. Крюков О.В., Сычев Н.И., Сычев М.Н. и др. Диагностика и прогнозирование технического состояния электротехнических систем энергетики // Вологда. 2021.
31. Серебряков А.В., Крюков О.В., Титов В.Г. Прогнозирование технического состояния энергетических установок // Электротехника. 2017, № 1, с. 60-65.
32. Крюков О.В. Идентификация параметров приводных электродвигателей газовых турбокомпрессоров // в сборнике: Идентификация систем и задачи управления: Труды X Международной конференции. ИПУ им. В.А. Трапезникова. 2015, с. 348-367.
33. Крюков О.В. Автоматизированное нагружающее устройство для комплексных испытаний поршневых двигателей // Двигателестроение. 2016, № 2(264), с. 30-35.
34. Ипполитов В.А., Кононенко А.Б., Косоротов А.А., Крюков О.В. Мониторинг и новые функциональные возможности распределительных устройств трансформаторных подстанций с НКУ “КАСКАД” // Контроль. Диагностика. 2021. Т. 24, № 5 (275), с. 32-39.
35. Крюков О.В., Мещеряков В.Н., Гуляев И.В. Электроприводы на основе машины двойного питания и асинхронного вентильного каскада с преобразователями в цепях статора и ротора // Саранск, 2020.

ООО “ТСН-электро”, г. Нижний Новгород:

Михайлов Владимир Валерианович – инженер-электрик,

Биткин Максим Евгеньевич – инженер-электрик,

Старов Андрей Васильевич – ведущий инженер-проектировщик,

Крюков Олег Викторович – д-р техн. наук, заместитель директора по науке.