

обратном: эксергетический КПД почти вдвое выше у АБТН, нежели чем у ПКТН. Это нам говорит о том, что процесс преобразования энергии у АБТН происходит термодинамически совершеннее, чем у ПКТН. Почему так происходит? Дело в том, что электрическая энергия является в большей степени ценным энергоресурсом, чем пар, в связи с этим, пытаясь забрать теплоту у низкопотенциального источника, мы используем очень малый потенциал энергии, которым обладает электроэнергия. Пар же, в свою очередь, является не таким качественным энергоресурсом, как электроэнергия, тем самым тепловой насос с приводом в виде пара имеет эксергетический КПД выше.

Хотелось бы отметить важность эксергетического анализа системы, так как он позволяет определить несовершенства системы и пути ее улучшения, а также дает более широкую оценку работы установки.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Хрусталёв Б.М., Несенчук А.П., Романюк В.Н.: Техническая термодинамика: учебник. В 2 частях. Часть 2 – Минск: Изд-во «Технопринт», 2004 – 560 с.
2. Хрусталёв Б.М., Несенчук А.П., Романюк В.Н.: Техническая термодинамика: учебник. В 2 частях. Часть 1. – Минск.: Изд-во «Технопринт», 2004 – 560 с.

Научный руководитель: к.т.н. И.Л. Иокова, доцент ПТЭиТ ЭФ БНТУ.

## ДИАГНОСТИКА ЧАСТИЧНЫХ РАЗРЯДОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ИЗОЛЯЦИИ НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА КОММУТАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ

С.И. Киреев

Томский политехнический университет  
ИШЭ, ОЭЭ, группа А2-42

Современный этап развития энергетики характеризуется интенсивным развитием технологий, обеспечивающих надежную работу основных составляющих электроэнергетической системы. Надежность высоковольтного оборудования в значительной степени определяется качеством его изоляции. На приемо-сдаточных испытаниях определяют кратковременную электрическую прочность изоляции в большинстве своем используя разрушающие методы контроля. В последнее время большое внимание уделяется неразрушающим методам контроля состояния изоляции высоковольтного оборудования [1]. Одним из таких методов является метод обнаружения частичных разрядов, позволяющий диагностировать целостность изоляции в период всего жизненного цикла установки, а также в процессе её нормальной эксплуатации.

К действующим методам обнаружения частичных разрядов относят: электрический и электромагнитный, акустический, химический и оптический методы.

**1. Электрический метод** основан на измерении импульса тока в системе. Используются различные типы датчиков, каждый из которых устанавливается в отдельной области исследуемого объекта. На данный момент реализованы и чаще всего используются 3 типа датчиков:

### 1.1. HVCC (High Voltage Ceramic Capacitors).

Датчики HVCC основаны на использовании высоковольтного конденсатора связи. Эти датчики встроены непосредственно в линию и обеспечивают непрерывный мониторинг частичных разрядов. Использование таких датчиков возможно только при установке на каждую фазу исследуемого объекта, а для эффективной работы и локализации места ЧР – двух на каждой фазе. Данные устройства нашли свое применение на электродвигателях, генераторах, трансформаторах.

### 1.2. HFCT (High Frequency Current Transformers).

Работа датчиков этого типа основана на явлении электромагнитной индукции. Частичный разряд вызывает импульс тока в линии. Аналогичный импульс возникает в изолирующем экране. Высокочастотный трансформатор улавливает импульсы и передает их параметры на прибор для измерения частичного разряда. Недостатками такого вида датчиков являются сложность установки, плохая помехоустойчивость.

1.3. TEV (Transient Earth Voltage) – датчик представляет собой конденсатор емкостного делителя. Второй конденсатор – это металлический корпус устройства, к которому прикреплен датчик. Как и в случае с датчиками HFCT, эта система обнаруживает импульсы тока, которые создают ЧР. Емкостные датчики предназначены для использования в ситуациях, когда использование датчиков HFCT или HVCC невозможно по конструктивным или другим причинам. Эти датчики могут быть установлены непосредственно на корпусе установки и проводить измерения без изменений в его работе.

Помимо очевидных преимуществ, таких как простота установки и использования, TEV – датчики имеют ряд недостатков, главным из которых является низкая помехоустойчивость, так как через заземление оборудования протекают не только импульсы, наводимые ЧР, но и другие высокочастотные процессы.

**2. Акустический метод.** Используется дистанционно и позволяет размещать датчики в КРУ и шинпроводах. Недостатком метода является низкая чувствительность при регистрации частичных разрядов малой интенсивности. Также при установке направленных акустических датчиков будет иметь место сложность калибровки. Распространение сигнала ЧР зависит от наличия физических препятствий. Для точной локализации места ЧР требуется установка большого количества датчиков.

**3. Химический метод** заключается в хроматографическом анализе жидкого диэлектрика – масла. Возникновение практически любого типа дефекта в оборудовании сопровождается образованием газов, которые растворяются в масле, при этом определенные типы дефектов выделяют свои газы в различных количествах. При ЧР основным газом является  $H_2$ , характерными газами с низким содержанием будут  $CH_4$  и  $C_2H_2$ .

На практике для хроматографического анализа используются два метода. Первый, который используется чаще всего – это сбор масла в специальную емкость, а затем анализ образцов в лаборатории. Данный анализ является комплексным на определение потенциальных дефектов различного типа и не специализируется на отдельной диагностике частичных разрядов для которых необходим постоянный мониторинг.

Второй способ – онлайн мониторинг. Принцип тот же, что и при лабораторном анализе, но образцы исследуются на месте с помощью мобильных приборов, и все данные мгновенно отображаются в систему программного контроля. Все, что происходит с трансформатором либо другим исследуемым оборудованием, отображается в режиме реального времени. При такой системе уже имеет место быть постоянный мониторинг, но будет отсутствовать возможность локализации места ЧР, а также диагностики в рабочем режиме.

**4. Оптический метод** основан на регистрации излучения, выделяемого ЧР, с помощью различных датчиков. Спектр излучения света варьируется от ультрафиолетового излучения до видимого диапазона в зависимости от энергии частичных разрядов [2]. Действующими оптическими методами на сегодня являются:

4.1. При ультрафиолетовом излучении, выделяемым частичными разрядами используют фотодетектор.

4.2. С помощью флуоресцирующего вещества, прикрепленного к наконечнику оптоволоконной линии. Работает как точечный датчик.

4.3. Использование оптоволоконной линии с жилой, легированной флуоресцирующим веществом. Датчики такого типа встраивают в изоляцию, что обеспечивает более точное определение источника, генерирующего частичные разряды.

Одним из главных недостатков оптических датчиков это ограничение по углу приема. Данный недостаток присущ первым двум типам датчиков, вследствие чего имеем низкую их

чувствительность к выделяемому излучению. Для осуществления эффективного контроля исследуемого объекта на ЧР требуется большое их количество.

На сегодняшний день существует широкий спектр контроля частичных разрядов. Действующие методы обнаружения не всегда эффективны на ранних этапах развития частичного разряда. Учитывая сложность их установки, отключение и расшиновку электрооборудования, фильтрацию помех. А ведь рекомендации к контролю состояния частичных разрядов является периодические проверки, а в идеальных условиях постоянный контроль в режиме реального времени. Итоговая стоимость и полученные результаты измерений, не всегда являются финансово целесообразными. Одним из путей решения проблемы контроля состояния без снятия напряжения является использование коммутационных импульсов [3]. На рисунке 1 приведена блочная схема физической модели для обнаружения частичных разрядов.

Принцип работы модели: высоковольтным источником постоянного тока через первое положение коммутационного ключа заряжается высоковольтный конденсатор. Далее коммутационный ключ переключается во второе положение, тем самым на испытуемый объект подается импульсное напряжение от конденсатора.

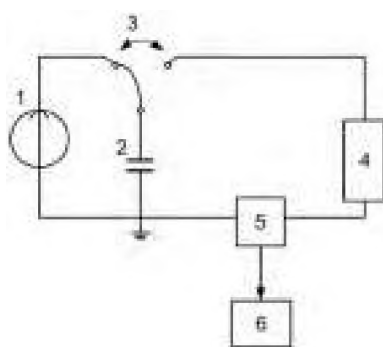


Рис. 1. Блочная схема модели:

- 1 – высоковольтный источник постоянного тока;
- 2 – высоковольтный конденсатор; 3 – ключ;
- 4 – испытуемый объект; 5 – датчик;
- 6 – осциллограф Tektronix типа TDC-2012 с полосой 100 МГц

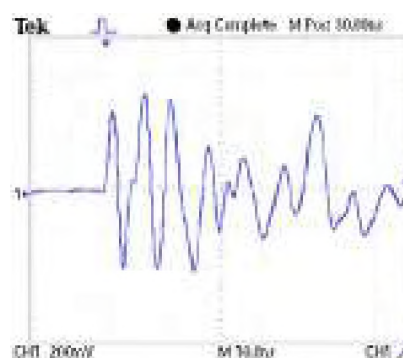


Рис. 2. Осциллограмма коммутационного импульса. Ячейка с частичным разрядом содержит пору. Напряжение на ячейке 2 кВ

Таким образом, результаты исследований на физической модели продемонстрировали возможность осуществления контроля частичного разряда путем использования импульсов коммутационного происхождения. Критерием, по которому можно констатировать наличие частичного разряда, является уменьшение амплитуды токового сигнала в случае присутствия частичного разряда.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. Кочура М. Б. Диагностика технического состояния мощных силовых трансформаторов: автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. техн. наук. – Минск, 1996. – 3 с.
2. M. Muhr, R. Schwarz Experience with optical partial discharge detection // Materials Science-Poland. – 2009. – V. 27(4). – P. 1139–1146.
3. Экспериментальное исследование контроля состояния обмоток высоковольтных трансформаторов на основе коммутационных импульсов / В.А. Лавринович, А.В. Лавринович, А.В. Мытников // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2020. – Т. 331. – No 5. – С. 77–86

Научные руководители: профессор, д.т.н. В.Я. Ушаков, профессор ОЭЭ ИШЭ ТПУ, к.т.н. А.В. Мытников, доцент ОЭЭ ИШЭ ТПУ.