



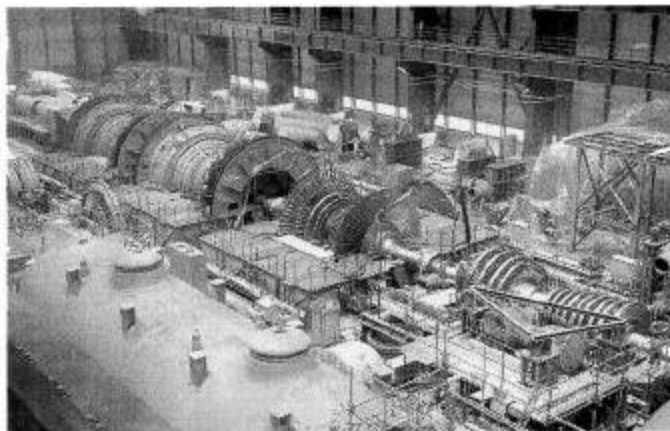
Институт исследований в области электроэнергетики

8-я выставка-семинар «Паротурбинные агрегаты»

**25-27 августа 2003 г.
Гостиница «Гэйлор Оприлэнд»
Нэшвилл, штат Теннесси**

Организатор: Управление по вопросам развития долины р. Теннесси (TVA)

Техническое обслуживание и ремонт
Неразрушающий контроль и проверка
Оценка срока службы
Контроль состояния оборудования
Оценка технического состояния
Проектирование и модернизация



Достоверность показаний систем непрерывного контроля режима работы генератора по продуктам пиролиза (СКПП)

Ди Джей Уоллис
Компания «Инноджи»
Windmill Hill Business Park
Electron Building
Whitehall Way
Swindon, Wiltshire SN5 6PB
Великобритания

Стив Килмартин
Компания «Энвайронмент Уан Корпорэйшн»
2773 Balltown Road Niskayuna,
New York NY 12309-1090
США

АННОТАЦИЯ

Выход из строя генератора электростанции зачастую заставляет задумываться о возможности предотвращения неисправностей за счет установки дополнительных приборов контроля. Во многих случаях, несмотря на отсутствие однозначного ответа, операторы признают целесообразным оснащение генераторов дополнительными техническими средствами контроля. Одним из вызывающих наиболее жаркие споры средств такого рода являются системы непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза (СКПП).

Несмотря на то, что подобные системы применяются в отрасли уже более четверти века, достоверность показаний СКПП с точки зрения предупреждения перегрева генераторов до сих пор вызывает определенные сомнения. В частности, особый скепсис связан с применением СКПП для контроля режима работы генераторов с воздушным охлаждением. Кроме того, ситуация усугубляется тем, что в некоторых случаях внедрение современных систем контроля не дает желаемых результатов из-за отсутствия у эксплуатантов необходимого опыта и знаний и (или) допускаемых при их установке ошибок.

Компания «Инноджи» использует системы непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза (СКПП) для генераторов с водородным и воздушным охлаждением в течение 21 года. За это время накоплен значительный опыт в части испытаний и калибровки таких систем.

В настоящей работе рассматриваются результаты проведенных испытаний и требования, соблюдение которых обеспечивает эффективность внедрения СКПП. Также рассматриваются примеры возможного поведения СКПП во время лабораторных испытаний и при возникновении предаварийных ситуаций в ходе промышленной эксплуатации.

ИСТОРИЯ ВОПРОСА

Зимой 1969-1970 года, в течение всего трех месяцев, имели место четыре случая замыканий в статорах генераторов мощностью 500 МВт в составе энергоблоков одной из электростанций мощностью 2000 МВт в системе Центрального управления электроэнергетики Великобритании. За ними последовали случаи выхода из строя аналогичного генератора мощностью 500 МВт в 1973 году и новой модели генератора мощностью 660 МВт в 1976 году. Схожие отказы наблюдались в течение обозначенного периода времени и на сопоставимых крупных электростанциях в составе других энергосистем.

В 1969 году, во времена упомянутых выходов из строя из-за замыканий в статоре, не существовало технических средств, позволяющих надежным образом выявлять перегрев до срабатывания системы защиты от замыкания статора на землю после прожога изоляции обмотки в результате расплавления пластин сердечника. В некоторых случаях отключение аварийных генераторов приходилось производить вручную после появления очевидных признаков существенных неисправностей, таких как взрывы внутри корпуса агрегата.

В тот период для выявления перегрева использовались только установленные в сердечник производителем генератора термопары. Число таких термопар неизбежно ограничено в силу практических соображений, в результате чего они позволяют контролировать лишь небольшую часть сердечника. Более того, как правило, термопары устанавливаются только с одной стороны статора. Из одиннадцати случаев замыканий в статорах генераторов мощностью 500 и 660 МВт в Великобритании только одно замыкание произошло в достаточной близости к термопаре для того, чтобы перегрев был выявлен своевременно.

Несмотря на тщательное расследование всех случаев выхода из строя, их причины так и не были установлены бесспорным образом. Тем не менее, в ходе расследований стало понятно, что раннее обнаружение возникновения опасных условий могло бы позволить остановить генератор и избежать существенного ущерба. Для раннего выявления возможных замыканий в сердечнике был предложен ряд технических решений. Одним из вариантов стали устройства для обнаружения микроскопических частиц, образующихся при тепловом разрушении подвергающихся перегреву электроизоляционных материалов.

При этом стало очевидно, что разрабатываемое для обнаружения замыканий в статоре решение также позволяет выявлять локальный нагрев других частей генератора и благодаря этому может стать средством раннего выявления возникающих неисправностей, дающим возможность принять коррективные меры для предупреждения катастрофических отказов.

Усовершенствованная с тех пор система контроля состояния сердечника генератора с водородным охлаждением получила известность как «система непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза» (СКПП, или GCM).

Прогресс в области проектирования генераторов с воздушным охлаждением привел к неуклонному повышению их мощности. При этом увеличение удельной мощности ведет к существенному ужесточению режимов работы материалов и узлов генератора, в связи с чем даже незначительное снижение эффективности охлаждения приобретает критическое значение. В результате этого по мере ужесточения режимов работы генераторов с воздушным охлаждением возрастает вероятность перегрева.

Снижение расчетных коэффициентов запаса при проектировании современных генераторов также требует обеспечения возможности как можно более раннего обнаружения перегрева. Для решения этой задачи и была разработана система непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза для генераторов с воздушным охлаждением (GCM-A).

РАННЕЕ ОБНАРУЖЕНИЕ ПЕРЕГРЕВА ГЕНЕРАТОРОВ

Используемые в конструкциях генераторов большой мощности электроизоляционные материалы в целом обладают схожими характеристиками. В их состав входят органические полимеры природного (битум), а чаще искусственного происхождения (эпоксидные смолы). Кроме того, для улучшения механических и электроизоляционных свойств применяются такие материалы, как стекловолокно и слюда.



Рис. 1 – Ионная камера СКПП

Нагрев ведет к химическому разложению органических веществ в составе электроизоляционных материалов. Образующиеся при этом частицы поступают в поток водорода, циркулирующего в системе охлаждения генератора. Способы выявления перегрева в узлах генератора в целом основаны на использовании устройств, позволяющих обнаруживать продукты теплового разрушения электроизоляционных материалов.

Образование аэрозольных частиц продуктов пиролиза

Химическое разложение электроизоляционных материалов начинается при нагреве до температур свыше 180°C, после достижения т. н. температуры начала выделения продуктов пиролиза (далее – ТВПП). Нагрев электроизоляционных материалов в узлах генератора ведет к повышению концентрации микроскопических частиц продуктов пиролиза. После прекращения выделения

продуктов пиролиза в связи с прекращением нагрева или полным выгоранием электроизоляционных материалов концентрация аэрозольных частиц начинает снижаться под действием процессов испарения, коагуляции и осаждения.

Обнаружение аэрозольных частиц

В нормальном режиме работы водород в системе охлаждения генератора не содержит аэрозольных примесей, а их присутствие указывает на перегрев органических материалов.

Таким образом, устройство, обеспечивающее непрерывный контроль содержания аэрозольных примесей в потоке водорода в системе охлаждения генератора, может стать средством раннего обнаружения перегрева.

Генераторы с водородным охлаждением

Для обнаружения частиц продуктов пиролиза, образующихся при перегреве электроизоляционных материалов, можно использовать ионизационную камеру. Подобные камеры отличаются простотой устройства и широко используются в качестве датчиков дыма в системах пожарной сигнализации. На рис. 1 изображена ионизационная камера, предназначенная для контроля содержания примесей в водороде системы охлаждения генератора.

Камера подключена к системе принудительного охлаждения генератора, что обеспечивает непрерывную подачу в нее водорода.



Рис. 2 – Первоначальная конструкция СКПП

Впервые ионизационная камера была применена для раннего оповещения о перегреве генератора американской компанией «Дженерал Электрик». ¹ В настоящее время аналогичная по принципу действия система, получившая известность как система непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза (СКПП), производится в США компанией «Энвайронментал Уан».

В состав СКПП входит смонтированная в боксе ионизационная камера, электрометр, усилитель выходного сигнала и система управления подачей водорода. Кроме того, в состав СКПП входит фильтр, подключаемый к патрубку для впуска водорода клапаном-соленоидом. Фильтр предназначен для улавливания микроскопических частиц, выявляемых ионизационной камерой. Подключение фильтра после падения выходного тока ионизационной камеры позволяет восстановить исходный уровень чистоты водорода и тем самым выполнить дополнительную проверку правильности обнаружения аэрозольных частиц.

Генераторы с воздушным охлаждением

СКПП для генераторов с воздушным охлаждением обеспечивает обнаружение аэрозолей в воздухе, поступающем по нескольким пробоотборным линиям, при помощи туманной камеры Вильсона. По одной пробоотборной линии подается атмосферный воздух, который служит условным эталоном (поскольку содержание аэрозольных частиц в атмосфере изменяется в широких пределах и может влиять на общее содержание аэрозольных частиц в воздухе системы охлаждения). Кроме того, по одной или нескольким пробоотборным линиям подается воздух из системы охлаждения, который сравнивается с атмосферным воздухом по показателю содержания аэрозольных частиц (рис. 3).



Рис. 3 – Система непрерывного контроля режима по содержанию продуктов пиролиза для генераторов с воздушным охлаждением (GCMA)

Высокое содержание аэрозольных частиц в воздухе системы охлаждения генератора в отсутствие сопоставимого увеличения их содержания в атмосфере свидетельствует о том, что частицы поступают из источников внутри генератора. В случае генераторов с открытым циклом охлаждения пробы воздуха отбираются перед его подачей в генератор (для определения эталонного содержания примесей), а затем перед выпуском воздуха в атмосферу (для определения содержания примесей, поступающих из системы охлаждения). Воздух из отдельных пробоотборных линий подается к датчику последовательно с переключением каждые пятнадцать секунд при помощи распределительного клапана с электронным блоком управления. Датчик выполняет измерения раз в секунду и выдает непрерывный аналоговый сигнал, уровень которого изменяется в зависимости от концентрации частиц.

Оценка работы СКПП в лабораторных условиях

Генераторы с водородным охлаждением

Основной целью лабораторных исследований была оценка чувствительности системы контроля к содержащимся в водороде аэрозольным частицам, образующимся при нагреве ряда применяемых в генераторах электроизоляционных материалов при типичном для кожуха статора давлении 3-4 бар. Таким образом, в ходе лабораторных тестов были в максимально возможной степени воспроизведены условия, при которых обычно работают СКПП.

СКПП подключалась к испытательной камере, в которой размещался нагревательный стол. На его поверхность помещались образцы электроизоляционных материалов, которые постепенно

нагревались до 450°C с шагом 10°C. После изменения выходного тока СКПП в результате нагрева температура поддерживалась постоянной до полного восстановления исходного уровня выходного тока СКПП. В ходе испытаний проводились регулярные проверки правильности работы СКПП за счет подключения контрольного фильтра (рис. 4).

В ходе испытаний использовались следующие материалы, предоставленные производителями генераторов, а именно: лак для пластин статора, эпоксидно-слюда́ная изоляция статора, битумно-слюда́ная изоляция статора, изоляционные материалы марок Permalі, Elephantide и Presspahn и эпоксидное покрытие для поверхностей расточек ротора.

Лак для статора был представлен образцами в виде квадратных пластин со стороной 2 см, вырезанными из статоров списанных генераторов. Остальные материалы были представлены тонкими срезами квадратной формы со стороной 2 см.

Для всех подвергшихся испытаниям материалов температура начала образования аэрозольных частиц по показаниям СКПП составляла от 170 до 200°C. По мере нагрева образцов наблюдалось снижение выходного тока СКПП (табл. 1).

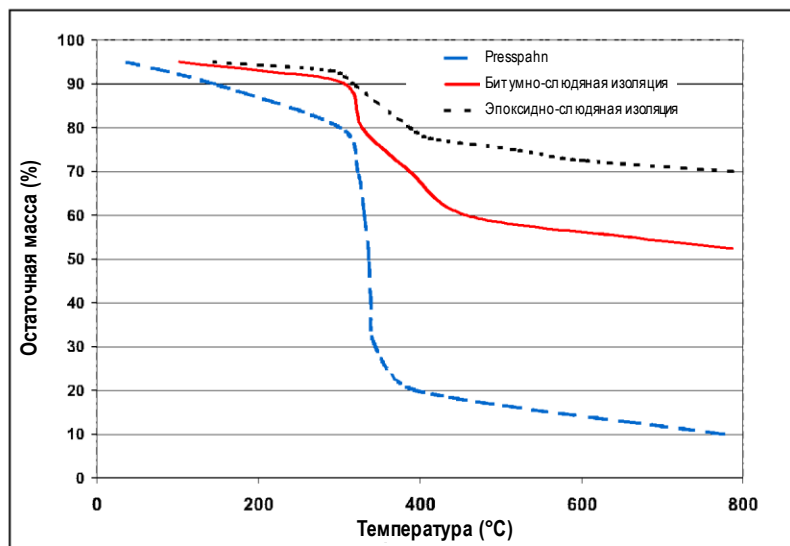


Рис. 4 – Снижение массы образца

По результатам испытаний пяти СКПП производства компании «Энвайронмент Уан» на протяжении нескольких лет было установлено, что все они обладают одинаковой чувствительностью.

Генераторы с воздушным охлаждением

Испытания в камере объемом 1 куб. м

В рамках программы оценки СКПП для генераторов с воздушным охлаждением компания «Нэшонал Пауэр» передала компании «Энвайронмент Уан» образцы ряда материалов, используемых в конструкциях генераторов с воздушным охлаждением. Полученные материалы

подвергались нагреву на лабораторной электроплитке в испытательной камере объемом 1 куб. м (в отсутствие потока воздуха).

Задачей испытаний было определение температуры начала выделения продуктов пиролиза (ТВПП) испытываемых материалов, применяющихся в конструкциях генераторов с воздушным охлаждением. В ходе испытаний была определена температура нагрева поверхности, необходимая для начала теплового разрушения контактирующего с ней образца и получения требуемой концентрации субмикронных частиц в небольшом ограниченном объеме (1 куб. м). При этом не предполагалось, что полученные данные обязательно будут иметь непосредственное отношение к процессам образования тех или иных концентраций частиц в кожухах генераторов относительно небольшого объема в условиях высоких скоростей потоков воздуха.

По результатам испытаний было установлено, что субмикронные частицы всех испытывавшихся материалов, за исключением эпоксидного текстолита с покрытием, начинали выделяться при температуре 200 +/- 15°C. Для стеклотекстолита с покрытием эта температура составила 274°C.

Таблица 1

Температура выделения продуктов пиролиза (°C)

Код	МАТЕРИАЛ	ТВПП*	30k PTUmi**
A	Пластина сердечника	195	209
B	Изоляция короткозамыкающего кольца	218	230
C	Номех	205	210
D	Стеклотекстолит	211	225
F	Стеклотекстолит с покрытием	274	300
K	Слюдяная изоляционная лента	215	225
M	Формованный стеклотекстолит	195	205
N	Слюдяная изоляционная лента	205	215
1	Резистор с эпоксидным покрытием	242	247
2	Масло SAE 10	190	225
3	Турбинное масло	205	240
4	Резистор (без покрытия)	240	258
*ТВПП – Температура выделения продуктов пиролиза			
**Температура достижения концентрации 30 тыс. ед./мл в испытательной камере объемом 1 куб. м			

Испытания в камере объемом 1 куб. м (искровой разряд)

Испытания показали, что при искровом разряде образуются субмикронные частицы, обнаруживаемые СКПП для генераторов с воздушным охлаждением (рис. 5)

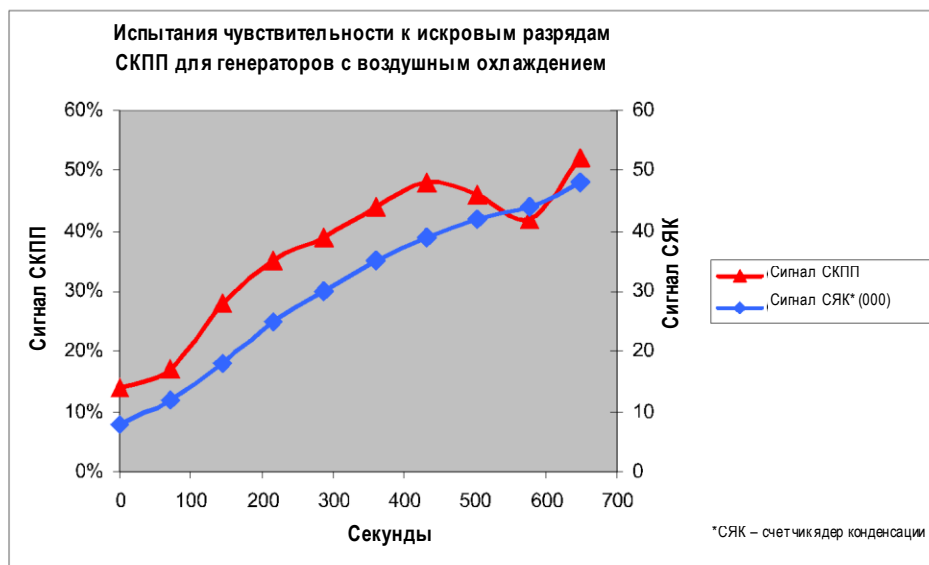


Рис. 5 - Выходной сигнал СКПП для генераторов с воздушным охлаждением и содержание аэрозольных частиц

Испытания вне камеры (с электронагревом)

В ходе испытаний была определена температура поверхности, необходимая для теплового разрушения соприкасающегося с ней образца и получения заданной концентрации субмикронных частиц в относительно большом объеме (25 куб. м).

Таблица 2

Испытания СКПП для генераторов с воздушным охлаждением на открытом участке

Код	Материал	Начальная температура отклика*	Температура максимального выделения аэрозольных частиц	Максимальная температура образца	Показания СКПП при макс. выделении частиц
A	Пластина сердечника	344	401	445	48%
B	Изоляция короткозамыкающего кольца	425	561	561	95%
C	Nomex	323	498	498	84%
D	Стеклотекстолит	375	447	455	80%

F	Стеклотекстолит с покрытием	443	533	533	94%
K	Слюдяная изоляционная лента	369	492	492	90%
1	Резистор с эпоксидным покрытием	81	172	172	95%
2	Масло SAE 10	н. п.	н. п.	н. п.	н. п.
3	Турбинное масло	н. п.	н. п.	н. п.	н. п.
4	Резистор (без покрытия)	152	195	214	95%
*Температура первого отклика на изменение концентрации по данным СЯК и СКПП для генераторов с воздушным охлаждением					

Нагрев производился с контролем концентрации частиц, температуры электроплитки и температуры, при которой наблюдалось резкое увеличение концентрации частиц (табл. 2). После этого образцы обдувались воздухом при помощи вентилятора с расходом 17 куб. м/мин. с целью особенностей дальнейшего изменения концентрации.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ НЕПРЕРЫВНОГО КОНТРОЛЯ РЕЖИМА ГЕНЕРАТОРА ПО СОДЕРЖАНИЮ ПРОДУКТОВ ПИРОЛИЗА В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

Генераторы с водородным охлаждением

Подобные описанным выше маломасштабные лабораторные испытания принципиально не позволяют достаточно точно воссоздать условия, возникающие внутри крупных генераторов. Пытаться воспроизвести влияние быстрого охлаждения аэрозольных частиц в газовом потоке с большим расходом и снижением их концентрации в большом объеме водорода при интенсивном перемешивании представляется нецелесообразным.

Образование аэрозольных частиц происходит на поверхности материала. Для заданного материала и температуры выше 200°C общее число выделяемых аэрозольных частиц изменяется пропорционально площади поверхности. Нагрев электроизоляционных материалов с известной площадью поверхности до заданной температуры внутри генератора, оснащенного СКПП, при условии выделения достаточного для изменения выходного сигнала системы контроля числа частиц, позволяет оценить зависимость показаний СКПП от площади и температуры.

В связи с этим были организованы испытания образцов электроизоляционных материалов с нагревом в охлаждающем тракте крупного генератора. Для испытаний был выбран генератор компании AEI мощностью 500 МВт, поскольку его конструкция облегчала ввод большого числа электрических кабелей в кожух статора. Конструкция генератора также позволяла разместить оборудование на большом удалении от сердечника и обмотки статора, но непосредственно в потоке водорода, отводимого к охладителям.

Конструкция пиролизеров

Опыты с использованием генератора мощностью 200 МВт на предприятии производителя показали, что нагрев электроизоляционных материалов с площадью поверхности 330 кв. см до 210°C должен привести к снижению выходного тока СКПП производства компании «Энвайронмент Уан» на 60%. Указанная температура соответствовала максимальной температуре, которую можно было получить при применении выбранной конструкции пиролизера. Дальнейшее повышение температуры должно вести к более высокой концентрации частицы, соответственно, большему изменению выходного тока СКПП.

Исходя из результатов описанных выше опытов было подготовлено несколько пиролизеров с площадью наружной поверхности до 500 кв. см, позволяющих выполнить оценку корреляции для достаточно широкого диапазона изменения площадей при минимальной температуре образования аэрозольных частиц.

Нагрев твердых электроизоляционных материалов в потоке водорода с поддержанием равномерной температуры поверхности связан с большими сложностями. В связи с этим большинство пиролизеров было рассчитано на нагрев тонкого слоя лакокрасочного покрытия. Для испытаний использовались два материала, а именно: черный лак для пластин сердечника РЈ и серый лак Sterling В9, который наносится распылением на поверхности расточек и лобовые доли обмоток статоров, производимых в Великобритании. В случае перегрева сердечника или обмоток статора эти материалы с большой вероятности становятся первыми по направлению движения потока водорода источниками аэрозольных частиц.



Рис. 6 - Пиролизер для установки в генераторе

Лаки наносились кистью на наружную поверхность латунных оболочек патронных нагревательных элементов, закрепленных в штампованных соединительных коробках (рис. 6). Площадь открытой наружной поверхности нагревателя составляла 110 кв. см. Пиролизеры комплектовались одним, двумя или тремя нагревателями. В средней части нагревателя размещалась термопара.

Кроме того, были подготовлены пиролизеры с площадью наружной поверхности 62 кв. см. Они оснащались дисковым нагревателем, установленным под круглой латунной пластиной и

соединительными коробками с сетчатыми газовыми фильтрами. Пиролизеры монтировались на стальных пластинах попарно, при этом на каждом выпускном соединении с наружными охладителями размещалось по 12 пиролизеров. Пиролизеры были установлены за 14 месяцев до начала испытаний с целью обеспечения надлежащего старения всех используемых в ходе испытаний материалов.

Пиролизеры нагревались в двух режимах, а именно: быстрый нагрев до 220°C (т. е. чуть выше температуры начала образования продуктов пиролиза), и быстрый нагрев до температуры более 500°C (максимальная возможная температура). Образцы лаковых покрытий с разной площадью поверхности нагревались до температуры, позволяющей зарегистрировать отклик СКПП для определения его зависимости от площади поверхности образца при минимальной и максимальной температуре образования аэрозольных частиц.

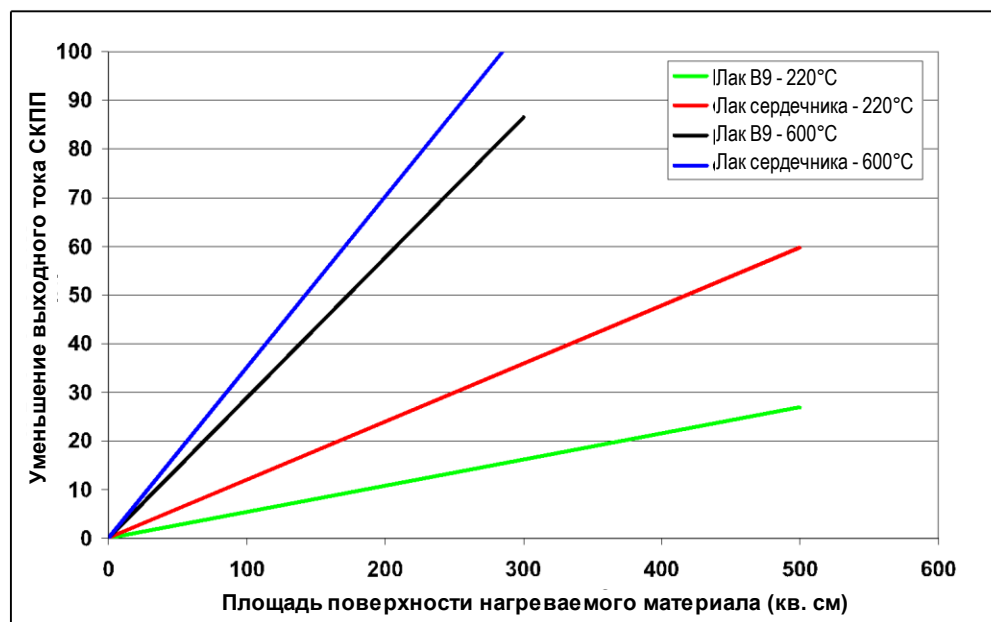
Результаты испытаний

Результаты испытаний приведены на рис. 7. Как и ожидалось, для заданного материала и режима нагрева снижение выходного тока СКПП находится в линейной зависимости от площади поверхности образца. Для заданной площади поверхности наблюдается значительно большее снижение выходного тока при более высоких температурах, соответствующих максимальной интенсивности образования аэрозольных частиц.

Интерпретация снижения выходного тока СКПП

Присутствие аэрозольных частиц в водороде системы охлаждения генератора ведет к снижению выходного тока СКПП. Величина снижения также зависит от распределения размеров частиц и их концентрации. На практике значения этих параметров останутся неизвестными из-за отсутствия пригодных для их измерения технических средств. В связи с этим представляется нецелесообразным пытаться увязать показания СКПП находящегося в промышленной эксплуатации генератора с ожидаемой теоретически концентрацией частиц.

По результатам опытов установлено, что изменения выходного тока СКПП, вызванные выделением аэрозольных частиц подвергающихся перегреву электроизоляционных материалов, могут зависеть от площади их поверхности и температуры. Тем не менее, не представляется возможным однозначно истолковать, например, показания, соответствующие выделению частиц с поверхности электроизоляционного материала заданной площади при нагреве до 200°C, особенно если принять во внимание то, что те же самые показания СКПП соответствуют меньшей площади поверхности при температуре 500°C. Любой, даже самый незначительный, перегрев следует считать опасным явлением, в связи с чем в идеальной ситуации следовало бы предусмотреть ответные действия при малейшем изменении выходного тока СКПП.



**Рис. 7 – Снижение выходного тока СКПП
в зависимости от площади поверхности нагреваемого материала**

На практике реализация подобного идеализированного подхода не представляется возможной. Работа ионизационной камеры неизбежно связана с присутствием шумов и помех, амплитуда колебаний выходного тока СКПП составляет $\pm 5\%$, а дополнительное сглаживание сигнала чревато снижением быстродействия системы контроля. Кроме того, незначительные изменения выходного тока могут быть обусловлены воздействием температуры окружающей среды на электронные устройства и пр. Вышеизложенные соображения и необходимость обеспечения достаточного запаса во избежание ложных срабатываний сигнализации ведут нас к выводу о том, что коррективные меры уместны только после того, как уровень выходного сигнала СКПП составит менее 50% полной шкалы. При выборе названного порога система контроля, в зависимости от температуры, будет срабатывать при перегреве электроизоляционных материалов с площадью открытой поверхности от 100 до 700 кв. см (рис. 7). При этом характер и степень серьезности повреждений, возникающих до срабатывания сигнализации СКПП, будет зависеть от вида неисправности.

ПРОМЫШЛЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ – СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДЛЯ ГЕНЕРАТОРОВ С ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Можно полагать, что в обычных нормальных условиях эксплуатации до первого срабатывания сигнализации СКПП в связи с перегревом может пройти несколько лет, что указывает на необходимость обеспечения высокого уровня надежности. В то же время действия оператора в случае срабатывания сигнализации должны выполняться по согласованному регламенту.

Оценка систем непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза в лабораторных и промышленных условиях свидетельствует о том, что они способны с большой степенью достоверности выявлять перегрев до возникновения серьезных неблагоприятных последствий.

Тем не менее, как показывает опыт эксплуатации, для принятия обоснованных решений по изменению режима работы генератора после срабатывания сигнализации необходимы проверка и подтверждение причин срабатывания сигнализации и отбор проб.



Рис. 8 – СКПП с автоматической сигнализацией первого поколения

Отвечающая приведенным критериям система непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза была разработана и установлена для работы с рядом генераторов в ведении Центрального управления электроэнергетики Великобритании в начале 1980-х годов. Система стояла из трех основных подсистем:

- установленная в боксе вблизи генератора система непрерывного контроля режима генератора по содержанию продуктов пиролиза с пробоотборными линиями;
- устанавливаемый на пульте управления генератором или вблизи него и обеспечивающий отображение выходного сигнала СКПП блок индикации и управления, в состав которого входит модуль автоматической проверки и подтверждения причины срабатывания сигнализации СКПП перед выдачей указаний оператору (рис. 8);
- дисплей для вывода подробных инструкций по порядку действий в случае срабатывания сигнализации.

В то же время в конструкцию СКПП были внесены изменения с целью обеспечения возможности их эксплуатации в опасных зонах. В наши дни в отрасли используются современные версии систем с описанными выше функциональными возможностями (рис. 9).



Рис. 9 – Современная СКПП

Интерпретация снижения выходного тока СКПП

Уровень выходного тока в 80% полной шкалы, соответствующий т. н. «чистому газу», устанавливается за счет регулировки коэффициента усиления электрометра. Присутствие аэрозольных частиц в водороде системы охлаждения генератора ведет к снижению выходного тока СКПП.

Любой, даже самый незначительный, перегрев следует считать опасным явлением, в связи с чем в идеальной ситуации следовало бы предусмотреть ответные действия при малейшем изменении выходного тока СКПП. Тем не менее, на практике реализация подобного идеализированного подхода не представляет возможной, и, как показывает опыт, во избежание ложных срабатываний сигнализации коррективные меры должны приниматься только после того, как уровень выходного сигнала СКПП составит менее 50% полной шкалы.

Порядок действий при срабатывании сигнализации СКПП

При срабатывании сигнализации СКПП необходимо принимать надлежащие ответные действия с целью снижения перегрева и предупреждения связанных с ним повреждений. Описываемый ниже порядок действий был выработан исходя из опыта промышленной эксплуатации.

Прежде всего при срабатывании сигнализации СКПП необходимо убедиться, что снижение выходного тока вызвано присутствием аэрозольных частиц в водороде системы охлаждения, а не неисправностями датчика. Такая проверка выполняется автоматически и является важнейшим условием для предупреждения возможных ошибок в действиях оператора.

После подтверждения причины срабатывания сигнализации необходимо немедленно принять меры для предупреждения развития повреждений и неблагоприятных последствий. Поскольку точно определить место возникновения перегрева не представляется возможным, регламент ответных действий должен учитывать все потенциальных варианты. В некоторых случаях, особенно в случае неисправностей в сердечнике статора, аварийная ситуация развивается

стремительно (снижение до менее чем 20% полной шкалы), в связи с чем до отключения генератора просто не остается времени на оценку возможных вариантов.

В целом в случае большинства серьезных неисправностей оптимальным решением следует считать значительное снижение нагрузки. Снижение нагрузки ведет к уменьшению тока статора и, соответственно, температуры обмотки. Снижение аксиального магнитного тока в сердечнике позволяет исключить один из существенных факторов перегрева сердечника. При этом нейтрализации перегрева также способствует снижение тока и напряжения в обмотке ротора.

Если сигнализация СКПП не отключается после первого снижения нагрузки, ее следует снизить еще раз на примерно такую же величину. Интервал между последовательными отключениями нагрузок связан со временем, необходимым для восстановления выходного тока СКПП после прекращения образования аэрозольных частиц. Как правило, в случае получения требуемого эффекта от снижения нагрузки, уровень выходного сигнала системы контроля восстанавливается в течение примерно одной минуты.

В случае продолжения работы сигнализации после полного сброса нагрузки генератор необходимо остановить.

После этого следует принять решение в отношении продолжения эксплуатации с пониженной нагрузкой с учетом экономических соображений.

При первом срабатывании сигнализации отбор проб производится автоматически. Кроме того после срабатывания сигнализации СКПП следует тщательно отслеживать температуру по данным установленных в генераторе термопар, параметры работы статора и ротора и уровень вибрации. Названные показатели в сочетании с данными анализа аэрозольных частиц помогают в некоторых случаях выявить источник перегрева.

СРАБАТЫВАНИЕ СИГНАЛИЗАЦИИ СКПП В ПРОМЫШЛЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В настоящее время известен ряд случаев срабатывания сигнализации СКПП находящихся в промышленной эксплуатации генераторов.

- В одном из случаев сигнализация была вызвана серьезным замыканием в сердечнике статора. К сожалению, отсутствие надлежащих ответных мер со стороны оператора привело к значительным повреждениям генератора.
- Во втором случае показания СКПП свидетельствовали о постепенном развитии перегрева. Генератор было остановлен, после чего в ходе проверки была выявлена закупорка тефлонового шланга системы охлаждения статорной обмотки, ставшая причиной перегрева двух токопроводящих шин.
- В третьем случае сигнализация срабатывала время от времени с указанием на незначительные «блуждающие» неисправности в течение девяти месяцев. По мере значительного увеличения частоты, амплитуды и продолжительности срабатываний несколько раз возникали ситуации, в которых для восстановления исходного выходного тока СКПП требовалось частичное отключение нагрузки.

Отобранные автоматически во время срабатываний сигнализации с максимальным падением входного тока пробы не содержали органических материалов, что свидетельствовало об отсутствии перегрева электроизоляционных материалов или масла. Тем не менее, они содержали частицы цинка и меди (в пропорции, соответствующей составу латуни с высоким содержанием цинка), а также образовавшиеся при высокой температуре частицы низколегированной стали.

Анализ конструкции генератора показал, что вероятным источником перегрева являются дефлекторы в системе водородного охлаждения или болты и пластины для их установки.

В конечном счете интенсивность и частота срабатывания сигнализации СКПП достигли такого уровня, что генератор был остановлен.

При осмотре было выявлено ослабление креплений и смещение лабиринтного уплотнения, что привело к соприкосновению латунных пластин с деталью, закрепленной к крепежному кольцу лобовой части обмотки ротора (диаметр ротора в этом месте составлял 1,1 м). Выделенного в результате тепла оказалось достаточно для расплавления латунных пластин уплотнения. Проверка пластин уплотнения подтвердила, что именно они были источником выявленных СКПП частиц.

- В четвертом случае СКПП была смонтирована вблизи генератора, но так и не была подключена: неудивительно, что генератор вышел из строя из-за серьезного замыкания в сердечнике!

Помимо всего прочего, СКПП позволяют выявлять межвитковые замыкания в обмотках ротора.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Как показывает опыт, СКПП для генераторов с водородным и воздушным охлаждением позволяют выявлять перегрев небольших участков электроизоляционных материалов во время работы генератора. Тем не менее, СКПП не выдает информации, позволяющей идентифицировать химический состав подвергающихся перегреву материалов. Существующие химико-аналитические методы значительно уступают СКПП в чувствительности к продуктам разрушения электроизоляционных материалов и пригодны только для выявления масляного тумана. Даже в случае повышения их чувствительности до требуемого уровня высокая степень сходства химических составов большинства применяемых в конструкции генераторов электроизоляционных материалов в значительной степени затрудняет их идентификацию и дифференциацию.² (Barton et al, 1981).

В отсутствие соответствующих методов анализа сигнализация сама по себе не указывает на расположение участка перегрева. При этом чувствительность СКПП настолько высока, что при условии оперативного принятия ответных мер после срабатывания сигнализации (и в зависимости от расположения участка перегрева) выявляемые неисправности оказываются настолько незначительными, что их не представляется возможным идентифицировать путем осмотра или с использованием других существующих технических средств проверки. Например, локальный перегрев многожильного проводника из-за разрушения изоляции одной из жил, который вполне может привести к срабатыванию сигнализации СКПП, крайне сложно обнаружить другими известными способами.

Для обнаружения перегрева необходимо подключение СКПП к генератору, а предотвращение повреждений требует надлежащих действий со стороны оператора.

Опыт показывает, что, несмотря на трудности, связанные с выявлением конкретных причин срабатывания сигнализации, ложные срабатывания происходят редко, а игнорирование сигнализации чревато серьезными отрицательными последствиями!

ЛИТЕРАТУРА

1 Crobel, L.P. and Carson, C.C. (1969) Overheating Detector for Gas Cooled Electrical Machines. US Patent 342 7880. (Датчик перегрева для электрических машин с газовым охлаждением. Патент США 342 7880.)

2 Barton, S.C., Carson, C.C., Gill, R.S., Ligan, W.V. and Webb, J.L. (1981) Implementation of Pyrolysate Analysis of Material Employing Tagging Compounds to Locate an Overheated Area In a Generator. IEEE PES Summer Meeting, July (Применение анализа продуктов пиролиза для поиска участков перегрева в генераторах.)