

Г. П. Езовит¹, В. П. Угляренко¹,
С. И. Бурлака¹, Н. И. Гороз²,
С. Е. Оринин², В. Н. Комарица³,
Д. Н. Завьялов³, О. А. Мазуренко⁴

¹ОП НТЦ НАЭК «Энергоатом», г. Киев, Украина

²Запорожская АЭС, г. Запорожье, Украина

³Ровенская АЭС, г. Ровно, Украина

⁴Национальный университет пищевых технологий,
г. Киев, Украина

Современная система диагностического контроля технического состояния основных узлов мощного турбогенератора

Рассматривается современная система диагностического контроля технического состояния мощного турбогенератора, позволяющая выявлять возникновение дефектов в его основных узлах и системе охлаждения на ранней стадии их развития, предотвращение повреждений и, как следствие, аварийных остановов мощных энергоблоков электростанций.

Ключевые слова: турбогенератор, диагностика, статор, ротор, водород, дистиллят, температура, давление, расход, датчики.

**Г. П. Єзовіт, В. П. Угляренко, С. І. Бурлака, М. І. Гороз,
С. Е. Орінін, В. М. Комариця, Д. М. Зав'ялов,
О. О. Мазуренко**

Сучасна система діагностичного контролю технічного стану основних вузлів потужного турбогенератора

Розглядається сучасна система діагностичного контролю технічного стану потужного турбогенератора, яка дозволяє виявляти появу дефектів в його основних вузлах і в системі охолодження на ранній стадії їх розвитку, запобігання пошкодженням і, як наслідок, аварійним зупинкам потужних енергоблоків електростанцій.

Ключові слова: турбогенератор, діагностика, статор, ротор, водень, дистиллят, температура, тиск, витрата, датчики.

© Г. П. Езовит, В. П. Угляренко, С. И. Бурлака, Н. И. Гороз,
С. Е. Оринин, В. Н. Комарица, Д. Н. Завьялов,
О. А. Мазуренко, 2011

Внаучно-техническом центре (НТЦ) Национальной атомной энергогенерирующей компании (НАЭК) «Энергоатом» в последнее время развернуты работы по оснащению турбогенераторов (ТГ) АЭС и ТЭС Украины системами диагностики, использование которых позволяет значительно повысить технический уровень контроля состояния основных узлов ТГ и систем их охлаждения в процессе эксплуатации по сравнению с используемыми в настоящее время на ТЭС и АЭС устаревшими устройствами и системами (логометры, мосты ЭМР, АСКР типа А701 и др.) и, соответственно, повысить эксплуатационную надёжность ТГ.

Эксплуатационный персонал электростанции контролирует техническое состояние ТГ (в частности нагрев его основных узлов) по инструкции завода-изготовителя независимо от срока эксплуатации ТГ. Главное требование — не должна быть превышена *уставка* (например, допустимое значение температуры обмотки статора). При этом в эксплуатации в связи с изменениями в режиме работы ТГ (неравномерный график нагрузки) практически невозможно проконтролировать начало возможного изменения (ухудшения) технического состояния (в частности нагрева) любого из основных узлов (обмотки статора и ротора, сердечник) и охлаждающих сред (водород и дистиллят), пока это состояние не достигло уровня *уставки*. Отметим, что при проектировании ТГ исходят из допустимых значений температуры для соответствующего класса изоляции и вполне определённой (регламентированной) температуры охлаждающей среды (водород, дистиллят). Повышение температуры охлаждающей среды или снижение эффективности охлаждения (вентиляции) ТГ вызывает увеличение температуры указанных выше основных узлов ТГ и снижение срока службы изоляции. Из практики эксплуатации электрических машин известно, что срок службы высоковольтной изоляции сокращается примерно в два раза при повышении ее температуры на 10 °С. При этом в расчет должна приниматься не средняя температура, а температура в наиболее нагретом месте, так как для повреждения изоляции достаточно одного самого напряжённого по нагреву места.

Анализ повреждаемости более 100 ТГ мощностью 200–1000 МВт за весь срок их работы с момента ввода в эксплуатацию показал, что 75–80 % повреждений ТГ приходится на такие *основные узлы* ТГ:

обмотка статора (нарушения в системе охлаждения; повреждения изоляции стержней, в основном в зоне выхода из пазов);

обмотка ротора (нарушения в системе охлаждения, витковые замыкания);

сердечник (повреждения зубцов, в основном в крайних пакетах);

На АЭС Украины в эксплуатации находятся турбогенераторы типа ТВВ мощностью 220 и 1000 МВт, двенадцать из которых проработали около 25 лет.

Длительный срок эксплуатации ТГ, устаревшие требования к системам контроля технического состояния основных узлов ТГ, выявление в процессе многолетнего анализа нарушений в работе ТГ основных повреждаемых узлов — всё это потребовало создания более современной системы контроля технического состояния ТГ. В новой системе диагностики основных узлов турбогенератора (СИДОУТ) использованы последние достижения в области информатики и вычислительной техники, что позволяет персоналу электростанции получать в *реальном* времени диагностическую информацию об изменении

технического состояния ТГ и выявлять дефекты на ранней стадии их развития. При этом СИДОУТ сравнивает техническое состояние контролируемого узла ТГ при любом режиме его работы с эталонным (исправным) состоянием этого узла в этом же режиме работы.

Разработаны алгоритмы диагностики основных узлов ТГ и соответствующее программное обеспечение.

Для достижения высокой достоверности результатов работы СИДОУТ, учитывающей индивидуальные конструктивные и технические особенности ТГ, задачи диагностики решаются с использованием математических функций изменения физических параметров (температура и др.) составных частей основных узлов ТГ. Эти математические закономерности определяются по результатам испытаний ТГ, в том числе на нагревание, с использованием специального программного обеспечения по обработке этой информации.

Для диагностирования СИДОУТ использует информацию только от штатных датчиков температуры, давления, расхода, которыми оснащен ТГ, и электрические величины, характеризующие режим его работы. Если появились отклонения, требующие ограничения мощности или останова ТГ, сообщения автоматически, в соответствии с принятым приоритетом, выводятся на экран на рабочем месте эксплуатационного персонала с одновременной звуковой сигнализацией. Персонал станции в любое время по запросу может также получить информацию о работе контролируемых узлов в мнемоническом, табличном или графическом виде на экране дисплея или документа (распечатки). СИДОУТ также позволяет архивировать диагностические данные с возможностью их графического отображения.

Перечислим задачи диагностики, решаемые в СИДОУТ.

Состояние эффективности охлаждения (нагрев) стержней обмотки статора (задача «СТАТОР-Н»). Контроль температуры стержней обмотки статора осуществляется по

заложенным термопреобразователям сопротивления (ТС) штатной системы термоконтроля ТГ. При этом выделяются стержни с минимальной и максимальной температурой.

Состояние эффективности охлаждения (нагрев) сердечника статора (задача «СЕРДЕЧНИК-Н»). Контроль температуры активной стали сердечника статора осуществляется по заложенным ТС штатной системы термоконтроля ТГ.

Состояние эффективности охлаждения (нагрев) обмотки ротора (задача «РОТОР-Н»). Температура обмотки ротора определяется во всем диапазоне изменения нагрузки ТГ по изменению сопротивления обмотки (по току и напряжению возбуждения).

Появление в обмотке ротора витковых и межкатушечных замыканий (задача «РОТОР-В»). Контроль появления витковых и межкатушечных замыканий в обмотке ротора осуществляется путём сравнения измеренного и рассчитанного тока возбуждения.

Газоплотность корпуса ТГ (задача «УТЕЧКА-Н₂»). Рассчитывается текущее значение утечки водорода с интервалом в 4 ч и далее определяется среднее значение суточной утечки. Ведётся суточное протоколирование газоплотности корпуса ТГ.

Давление водорода (задача «РН₂»). Контроль давления водорода в корпусе ТГ.

Расход дистиллята (задача «F_{дис}»). Контроль расхода дистиллята в обмотке статора ТГ.

Состояние изоляции стержней обмотки статора (задача «СТАТОР-ЧР»). Измеряется уровень частичных разрядов (ЧР) в обмотке статора. Задача требует дополнительной установки специальных датчиков.

Основной диагностический кадр СИДОУТ сообщает о состоянии ТГ:

исправное состояние ТГ — «НОРМА» — зелёный цвет (рис. 1);



Рис. 1



Рис. 2

обнаружено отклонение — «ДЕФЕКТ» (рис. 2): жёлтый цвет — без ограничения нагрузки; красный цвет — указывается допустимое значение тока статора (либо ротора) или/и наличие витковых замыканий, или/и превышение допустимого значения *ЧР* или *УТЕЧКИ*.

Приведем несколько примеров возможных вариантов работы СИДОУТ (рассматривается отображение информации на экране ПЭВМ для задачи диагностики «СТАТОР-Н») при работе ТГ типа ТВВ-1000-4УЗ Запорожской АЭС в сети с активной нагрузкой $P = 1006$ МВт, $Q = 192$ МВАр, ток статора 26,433 кА, ток ротора 5,94 кА.

Пример 1 (рис. 1). Диагноз состояния ТГ — НОРМА (зелёный цвет). Все «светофоры», идентифицирующие задачи диагностики, также светятся зелёным цветом, т. е. отклонений диагностируемых параметров от эталонных значений нет и, соответственно, ограничений нагрузки нет.

На рис. 1 слева приведены значения электрических параметров текущего режима диагностируемого ТГ, а справа — результат диагностики ТГ:

$I_{ст. допустимый}, кА — I_{ст. ном}$ (допустимый ток статора — не ниже номинального значения);

$I_{рот. допустимый}, кА — I_{рот. ном}$ (допустимый ток ротора — не ниже номинального);

К.З. витков в роторе, шт. — НЕТ (витковых замыканий в обмотке ротора нет).

Пример 2 (рис. 2). Диагноз состояния ТГ — ДЕФЕКТ (жёлтый цвет). При этом все «светофоры», кроме СТАТОР-Н, светятся зелёным цветом, т. е. отклонений этих диагностируемых параметров от эталонных значений нет. «Светофор» СТАТОР-Н светится жёлтым цветом, т. е. повысился нагрев только обмотки статора, однако ограничений нагрузки нет.

Подробную информацию о состоянии обмотки статора можно получить, раскрыв дополнительные кадры, на которых отображается мнемоническая, табличная и графическая информация, описывающая состояние обмотки статора с выделением номера стержня, имеющего повышенный нагрев. На мнемоническом кадре показано, требуется ремонт стержня согласно инструкции по эксплуатации при останове ТГ в плановый ремонт [жёлтый квадрат с буквой Р (ремонт) — при повышении нагрева более, чем на 5 °С] или не требуется [жёлтый квадрат с буквой Н (нагрев — при повышении нагрева менее, чем на 5 °С)].

Результат диагностики:

$I_{ст. допустимый}, кА — I_{ст. ном}$ (допустимый ток статора — не ниже номинального значения);

$I_{рот. допустимый}, кА — I_{рот. ном}$ (допустимый ток ротора — не ниже номинального);

К.З. витков в роторе, шт. — НЕТ (витковых замыканий в обмотке ротора нет).

Пример 3 (рис. 2). Диагноз состояния ТГ — ДЕФЕКТ (красный цвет). При этом все «светофоры», кроме СТАТОР-Н, светятся зелёным цветом, т. е. отклонений диагностируемых параметров от эталонных значений нет. «Светофор» СТАТОР-Н светится красным цветом, что свидетельствует о повышении температуры одного из стержней обмотки статора до такого уровня, что требуется ограничение текущей токовой нагрузки ($I_{ст} = 26,433$ кА). При этом в поле « $I_{ст. допустимый}, кА$ » вместо $I_{ст. ном}$ (как было в примерах 1 и 2) высвечивается красным цветом допустимое значение тока статора — 23,89 кА. На дополнительных кадрах гистограмма показывает, что температура одного стержня при $I_{ст} = 26,433$ кА достигла 78,9 °С, а при новом допустимом значении $I_{ст} = 23,89$ кА она не превысит допустимого значения 75 °С.

Результат диагностики:

$I_{\text{ст. допустимый}}$, кА — 23,89 кА (допустимый ток статора — не выше значения 23,89 кА при текущем 26,433 кА, т. е. требуется разгрузка ТГ по току статора);

$I_{\text{рот. допустимый}}$, кА — $I_{\text{рот. ном}}$ (допустимый ток ротора — не ниже номинального);

К.З. витков в роторе, шт. — НЕТ (витковых замыканий в обмотке ротора нет).

В другом случае этого же примера повышение температуры одного из стержней обмотки статора таково, что не требуется ограничение текущей нагрузки, например 22,5 кА. Однако повышение нагрузки возможно только до $I_{\text{ст}} = 23,89$ кА ($T_{\text{доп}} = 75$ °С).

Подобным образом отображаются результаты диагностических задач СЕРДЕЧНИК-Н и РОТОР-Н. Для задачи РОТОР-Н ограничения указываются по току ротора.

Во всех рассмотренных примерах при желании можно вызвать на экран информацию о состоянии системы охлаждения ($F_{\text{дис}}$ — расход дистиллята в обмотке статора, P_{H_2} — давление водорода в корпусе ТГ, УТЕЧКА- H_2 — величина утечки водорода).

Задача РОТОР-В решается сравнением значений измеренного и рассчитанного тока возбуждения для каждого текущего режима работы ТГ.

Задача СТАТОР-ЧР, позволяющая определять в реальном времени изменение состояния изоляции обмотки статора по уровню «частичных» разрядов, требует установки дополнительных специальных датчиков фирм PDTech (Швейцария) или IRIS Power (Канада).

При внедрении СИДОУТ на различных АЭС и ТЭС в зависимости от технического уровня и особенностей АСУ блока или электростанции были использованы три варианта подключения СИДОУТ в информационную среду электростанции:

1) непосредственно через устройство связи с объектом, которое преобразовывает и представляет исходные данные. Они поступают для обработки в программное обеспечение СИДОУТ посредством специально разработанных программных компонент обмена;

2) СИДОУТ работает как клиентское автономное приложение на ПЭВМ, которая подключена в компьютерную сеть электростанции. Программное обеспечение СИДОУТ в этом случае принимает данные из сервера посредством специально разработанных программных компонент;

3) интеграция СИДОУТ в программное обеспечение АСУ электростанции. В этом случае программное обеспечение задач диагностики реализуется непосредственно на сервере компьютерной сети электростанции, что позволяет иметь доступ к результатам работы СИДОУТ многим пользователям сети.

Выводы

Замена существующих систем контроля технического состояния ТГ на СИДОУТ позволит значительно повысить технический уровень эксплуатации ТГ за счет контроля в *реальном времени* технического состояния (его возможного изменения) основных узлов ТГ (обмотка и сердечник статора, обмотка ротора) и его системы охлаждения.

В алгоритмах СИДОУТ учтены основные положения и требования инструкций заводов-изготовителей, нормативных документов и директивных материалов по эксплуатации ТГ.

СИДОУТ позволит предотвращать вынужденные (аварийные) остановки мощных энергоблоков, вызванные повреждениями основных узлов или нарушениями в системах охлаждения ТГ. В результате снижается число длительных простоев оборудования в аварийно-восстановительных ремонтах, что даст значительный экономический эффект.

Надійшла до редакції 07.04.2011.