

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЕ ДАТЧИКИ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

О.В. Крюков (ОАО «Гипрогазцентр»)

Рассмотрены особенности построения встроенных систем мониторинга и прогнозирования технического состояния мощных электродвигателей мегаваттного класса. Представлены интеллектуальные датчики, обеспечивающие прогнозирование состояния высоковольтных электродвигателей в режиме on-line.

Ключевые слова: высоковольтные электродвигатели, встроенная система мониторинга, интеллектуальные датчики.

Введение

Современное состояние газотранспортной техники и проблемы электроприводных газоперекачивающих агрегатов (ЭГПА) на компрессорных станциях (КС) характеризуются следующими особенностями [1].

- На КС используются около 700 высоковольтных синхронных двигателей (СД) мегаваттного класса суммарной мощностью > 6 млн. кВт.
- Большая часть ($> 70\%$) парка ЭГПА имеет срок службы > 20 лет, и практически все элементы ЭГПА (СД, возбудители, щиты) выработали свой ресурс.
- Необходимость оперативного мониторинга состояния СД ЭГПА как ответственной и дорогостоящей техники, относящейся к особой (высшей) категории надежности.
- Отсутствие отечественного рынка конкурентоспособных систем для модернизации ЭГПА, и при этом нерентабельность использования иностранных предложений.

Все это предопределило необходимость разработки системного подхода при модернизации ЭГПА на объектах ОАО «Газпром» [1–3] с комплектованием КС

современными средствами и методами оперативного мониторинга технического состояния ЭГПА и достоверного прогноза его работоспособности, в том числе для перехода к техническому обслуживанию и ремонту (ТОиР) по фактическому состоянию агрегатов.

Основными этапами создания системы оперативного мониторинга являются [4–6]:

- 1) статистическая обработка отказов приводных электродвигателей и исследование эксплуатационных факторов, влияющих на техническое состояние ЭГПА;
- 2) математическое описание и анализ физических процессов изменения основных факторов повреждаемости и параметров СД;
- 3) разработка аппаратных средств, «интеллектуальных» датчиков, алгоритмов и ПО для обработки данных о техническом состоянии машин;
- 4) синтез встроенной системы прогнозирования технического состояния СД ЭГПА.

Анализ повреждаемости приводных высоковольтных двигателей СТД-12500-2 на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород» выполнен за период 1985–2010 гг. [1]. Всего за данный период эксплуатации зафиксировано 62 случая выхода из строя СД.

Особенности системы мониторинга ЭГПА

Для контроля технического состояния статора электродвигателя необходимо в первую очередь непрерывно получать и анализировать следующую информацию:

- величину фазных и линейных напряжений, подаваемых на обмотки статора;
- значения токов в каждой фазе двигателя в статических и динамических режимах;
- температуру обмотки и стали статора, воздуха на входе/выходе системы охлаждения;
- интенсивность и амплитуду частичных разрядов (ЧР), возникающих во внутренних полостях и на поверхности изоляции статора.

На рис. 1 представлена схема взаимосвязи основных эксплуатационных факторов влияющих на ресурс изоляции статора. Все эти факторы поддаются прямому или косвенному измерению, но обычными математическими методами очень сложно описать системное влияние их на скорость старения изоляции и тем более спрогнозировать изменение ее состояния до перехода в критическое.

На основе данной схемы, применяя принципы нечеткой логики, можно создать встроенную систе-

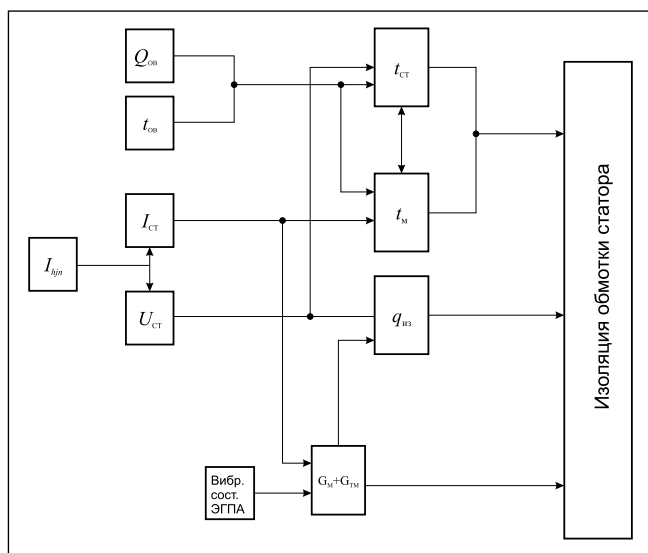


Рис. 1. Схема воздействия основных эксплуатационных факторов на ресурс изоляции статора, где $Q_{об}$, $t_{об}$ – объем и температура охлаждающего воздуха соответственно, $I_{ст}$, $U_{ст}$ – ток и напряжение статора в номинальных и переходных режимах соответственно, $t_{ст}$ – температура меди и стали статора, $q_{из}$ – частичные разряды в изоляции, $G_m + G_{тм}$ – механические и термомеханические нагрузки на изоляцию

му оперативного мониторинга с датчиками для прогнозирования состояния СД ЭГПА. Для создания алгоритма работы такого датчика, прежде всего, необходимо для каждого из эксплуатационных факторов, выраженных значением конкретной физической величины, определить соответствующий терм, исходя из метода экспертных оценок. Затем на основе термофлуктуационной теории разрушения твердых диэлектриков определить функцию принадлежности для каждого терма или группы.

В настоящее время на СД ЭГПА, находящихся в эксплуатации, параметры токов и напряжений с достаточной достоверностью можно получать по показаниям имеющихся трансформаторов тока и напряжения. Температура меди обмоток и магнитопровода статора ЭГПА-12,5 контролируется штатными датчиками температуры типа ТСМ-50 или ТСМ-9502 (рис. 2), которые уложены в середине расточки статора СД в каждой фазе (всего по три датчика температуры меди и стали).

Как показала практика, этого числа датчиков недостаточно для полного анализа температурного состояния статора, так как в различных режимах работы нагрев отдельных частей статора происходит неравномерно. В связи с этим для более достоверного определения температурных полей СД на КС при проведении капремонта ЭГПА во все статорные обмотки ЭГПА устанавливаются по девять датчиков температуры в меди и стали (рис. 2).

При измерении допустимого нагрева частей СД важнейшим параметром является превышение температуры этих частей над температурой окружающего воздуха, и для определения достоверных температур воздуха установку датчиков необходимо производить в соответствии с ГОСТ. При охлаждении СД окружающим воздухом измерительные датчики температуры необходимо располагать на расстоянии 1...2 м от нее и на высоте, равной половине высоты машины.

Математическое обеспечение диагностики СД

Наиболее эффективным способом контроля состояния изоляции обмоток статора высоковольтных СД ЭГПА является метод измерения ЧР, возникающих в результате искровых разрядов малой мощности на поверхности или внутри изоляции статора. В процессе штатной работы СД периодически повторяющиеся ЧР разрушают изоляцию обмоток и приво-

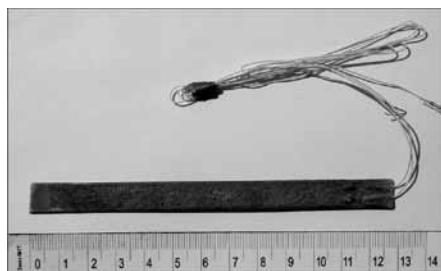


Рис. 2. Общий вид датчика температуры и частичных разрядов ТСМ-9502

дят к ее пробое. Параметры ЧР в изоляции определяют по значению силы тока через емкостной делитель высокого напряжения или по электромагнитному импульсу разряда с помощью высокочастотного датчика, подключаемого к датчику ТСМ-9502 (рис. 3). Более рациональным является использование емкостного датчика для контроля изоляции первых катушеч-

ных групп обмотки статора и датчиков температуры, используемых в качестве антенны для вторых, в схеме на рис. 2.

Мониторинг технического состояния СД ЭГПА основан на анализе элементов двигателя СТД-12500-2 как объекта диагностирования, а также синтезе алгоритмов диагностики и их реализации в САУ ЭГПА и АСУ КС.

Задача обследования СД как объекта диагностирования связана с анализом его функционирования в исправном состоянии, выделением узлов, элементов и связей между ними, анализом их возможных технических состояний, определением параметров, пределов, характера изменения и технической возможности их контроля, оценкой степени детализации возможных мест, видов, причин и частоты дефектов (глубины диагностирования), сбором данных о затратах, связанных с осуществлением элементарных проверок.

Особенностью электродвигателя ЭГПА как объекта диагностирования является тесная взаимосвязь электрических, электромеханических и механических устройств и элементов, отличающихся функциональным назначением и принципом действия. При описании их технического состояния логично применять те математические формы и аппараты, которые наилучшим образом соответствуют поиску дефекта в устройстве (дифференциальные, разностные, логические уравнения, функциональные, структурные схемы, ориентированные графы, конечные автоматы и т. п.). Однако необходимость сопряжения между собой разноодных математических моделей вынуждает

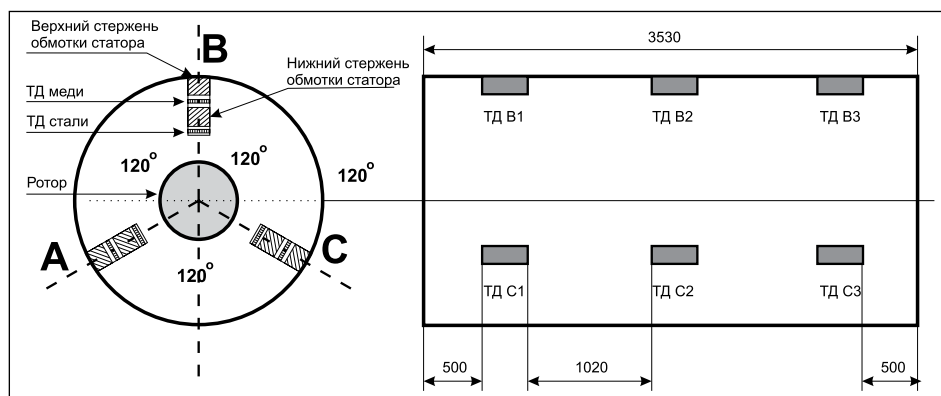


Рис. 3. Расположение датчиков температуры статора электродвигателя СТД-12500-2

использовать обобщенные математические описания ЭГПА. К их числу можно отнести представление ЭГПА абстрактной динамической системой, процесс функционирования которой состоит в изменении состояния системы под воздействием внешних и внутренних причин [1,5].

Математическая модель системы может быть определена как взаимосвязь переменных, выходные сигналы у которой определяются следующим функционалом:

$$y = F(T, X, Z, S, S_0, F^*, F, L^*, L), \quad (1)$$

где T — множество моментов времени t ; X, Z — множества входных x и z сигналов системы; S — множество состояний s системы; S_0 — замкнутая область состояний системы, ограничивающая возможные перемещения s при функционировании системы; $F^*(T, X, S) = S^*C$, $F(T, X, S) = SC$ — операторы переходов, отражающие изменения состояния системы под воздействием внутренних и внешних возмущений; $L^*(T, X, S) = Z^*C$, $L(T, X, S) = ZC$ — операторы выходов, описывающие формирование выходного сигнала под воздействием внутренних и внешних возмущений. Индекс (*) принадлежит операторам, учитывающим действие внутренних возмущений.

Характер соответствия состояний S модели диагностирования (1) области S_0 позволяет разделить объекты диагностирования на правильно и неправильно функционирующие, исправные и неисправные. Если область S_0 выбрать таким образом, чтобы все точки внутри нее соответствовали исправным состояниям объекта, а точки вне ее — неисправным, то попадание точки s на границу области S_0 можно квалифицировать как появление дефекта в объекте. Это событие можно выявить, контролируя сигналы Z на выходе объекта и оценивая попадание множества значений z_i каждого i -го сигнала в интервале $z_{in} \leq z_i \leq z_{ie}$, где z_{in} , z_{ie} — множества нижних и верхних допустимых значений z_i сигналов.

Для распознавания технического состояния объекта диагностирования принято пользоваться набором классов технических состояний:

$$E = [E_i], i = 0, 1, 2, \dots, N, \quad (2)$$

где E_i — подмножество технических состояний объекта, характеризующих совокупность возможных его состояний s_i с указанием соответствующих граничных условий (областей s_{0i}) и выполнимости этих условий по всем переменным состояниям s_i ; класс E_0 (при $i=0$) соответствует исправному состоянию объекта, а класс E_i (при $i \neq 0$) — его неисправному состоянию, вызванному появлением дефекта в i -ой составной части объекта.

Для обеспечения целей диагностики структура устройств нижнего уровня системы должна содержать первичный датчик измеряемого параметра и схему анализа состояния параметра. Кроме этого, для

прогнозирования необходим также блок первичного измерения с аналого-цифровым преобразователем (АЦП). В зависимости от конкретных требований на выходе датчиков может присутствовать информация о контролируемом параметре с разной степенью точности.

Интеллектуальные датчики обладают достаточно высокой надежностью и могут быть унифицированы. В качестве первичных датчиков можно использовать типовые устройства на базе специализированных микросхем-компараторов, тогда на выходе необходим порт сопряжения с микропроцессорной системой управления ЭГПА.

Для прогноза в режиме реального времени целесообразно использовать алгоритмы нечеткой логики, которая все шире используется в практике прогнозирования. Нечеткая логика в отличие от булевой двухуровневой “жесткой” логики является многоуровневой “мягкой” логикой с языковым синтаксисом, использующим лингвистические переменные и уровни — “нулевой”, “положительный большой”, “отрицательный малый”, “положительный средний” и т.п. Для составления алгоритма прогнозирования используется предварительная фазификация текущих входных (измеряемых) переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения определяется прогнозируемое значение этого параметра через определенный временной интервал.

Для составления алгоритма мониторинга используется предварительная фазификация текущих измеряемых переменных и их скоростей изменения. По полученным лингвистическим величинам текущего значения параметра и скорости его изменения определяется прогнозируемое значение каждого фактора.

Результаты экспериментальных замеров с помощью автоматизированной системы мониторинга и прогнозирования технического состояния СД ЭГПА подтверждают повышенную интенсивность ЧР в пазовой части и во внутренних полостях изоляции. Однако наибольшее влияние на износ изоляции оказывают термомеханические нагрузки и вибрации при недостаточной жесткости и ослабления крепления обмотки статора СД в течение эксплуатации. Исследования интенсивности ЧР в высоковольтных обмотках СД выполнены с использованием вкладки программы «СКИ» с матрицей значений ЧР. На вкладке отображено фазовое распределение импульсов, амплитуда и частота их следования в режиме on-line. В результате получены графики фазового распределения ЧР относительно напряжения питания в зависимости от характера дефекта в ЭГПА. Кроме того, по полученным данным построены трехмерные графики (на каждый включенный канал) распределения количества импульсов в секунду по амплитудным зонам.

Выводы

Применение интеллектуальных датчиков в системе прогнозирования состояния СД ЭГПА на семи компрессорных станциях ОАО «Газпром» дает возможность:

- 1) оперативно получать полную и достоверную информацию о техническом состоянии приводного электродвигателя ЭГПА в режиме on-line;
- 2) планировать капитальные и текущие ремонты приводного электродвигателя на основе его фактического состояния, сократив время простоя в ремонте с 12 до 2...3 тыс. ч;
- 3) за счет предотвращения повреждений СД в работе исключить тепловое действие токов и снизить стоимость капитальных ремонтов в 3 раза;
- 4) на СД с гибкой многослойной слюдинитовой обмоткой выполнять текущие ремонты вместо капитальных с заменой дефектных стержней (стоимость ниже в 4 раза);
- 5) контролировать работу системы охлаждения СД и поддерживать оптимальные режимы, позволяющие увеличить ресурс изоляции;
- 6) при совместном использовании данных вибрационного анализа и FFT-анализа потребления мощности точно выявлять причины повышенных уровней вибрации СД;

*Крюков Олег Викторович – канд. техн. наук, доцент, главный специалист ОАО «Газпрогазцентр».
Контактный телефон (831) 428-25-84.
E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru*

- 7) повысить технический уровень эксплуатации ЭГПА, за счет чего снизить общие эксплуатационные расходы.

Список литературы

1. Пужайло А. Ф., Савченков С. В., Спиридович Е. А. и др. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций: монография // Под ред. О. В. Крюкова. Н. Новгород: Вектор ТиС. Т 2. 2011.
2. Захаров П. А., Киянов Н. В., Крюков О. В. Системы электрооборудования и автоматизации для эффективного транспорта газа // Автоматизация в промышленности. 2008. №6.
3. Кадин С. Н., Казаченко А. П., Крюков О. В. и др. Вопросы разработки метрологического обеспечения при проектировании объектов ОАО «Газпром» // Измерительная техника. 2011. № 8.
4. Бабичев С. А., Захаров П. А., Крюков О. В. Мониторинг технического состояния приводных электродвигателей газоперекачивающих агрегатов // Контроль. Диагностика. 2009, № 7.
5. Крюков О. В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Изв. Вузов. Электромеханика. 2005. № 6.
6. Бабичев С. А., Крюков О. В., Титов В. Г. Автоматизированная система безопасности электроприводных газоперекачивающих агрегатов // Электротехника. №12. 2010.

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ ПОРТАТИВНЫЙ ПРИБОР ДЛЯ ДИНАМИЧЕСКОЙ КОРРЕКЦИИ ПСИХОФИЗИОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ ОПЕРАТОРА В ТЕЧЕНИЕ РАБОЧЕГО ДНЯ

А.Н. Варнавский, Ю.С. Крахмаль, Е.С. Малахов, М.Н. Питерская, А.С. Чубаров (РГРТУ)

Рассмотрен прибор для динамической коррекции функционального состояния оператора в течение рабочего дня, направленной на осуществление здоровьесбережения работника и обеспечения максимального уровня его работоспособности. В качестве способа коррекции выбрана аудиовизуальная стимуляция. Предложена конструкция портативного прибора, позволяющего осуществить анализ психоэмоционального состояния оператора и сформировать терапевтические воздействия, величина и продолжительность которых зависит от величины отклонения функционального состояния работника от оптимального.

Ключевые слова: функциональное состояние оператора, работоспособность, коррекция, аудиовизуальная стимуляция, электроэнцефалограмма, портативный прибор.

Введение

В сфере трудовой деятельности стрессовые состояния у работников приводят к ухудшению функционального состояния, увеличению риска развития целого ряда заболеваний стрессовой этиологии так называемых «болезней стресса»: некоторых сердечно-сосудистых заболеваний, язвенной болезни желудка и двенадцатиперстной кишки, невротических состояний и др. Стрессовые состояния помимо угрозы здоровью, а часто и жизни человека, являясь причиной несчастных случаев, аварий, травм по вине «человеческого фактора», существенным образом снижают успешность и качество выполнения работы, увеличи-

вают уровень психофизиологической цены деятельности, а также могут приводить к возникновению целого ряда неприемлемых социально-экономических и социально-психологических последствий: повышению текучести кадров, снижению удовлетворенности трудом, деформации личностных и характерологических качеств человека [1]. Зависимость уровня работоспособности и эффективности деятельности от активации нервной системы и уровня психоэмоциональных воздействий на работающего человека описывается законом Йеркса-Додсона: «максимальная работоспособность обеспечивается оптимальным уровнем активации» (рис. 1).