

УДК 62-52-83:656.56

**СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ СОСТОЯНИЯ
ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ТУРБОКОМПРЕССОРОВ**

О. В. Крюков

ОАО «Гипрогазцентр»

ул. Алексеевская, 26, г. Нижний Новгород, 603950, Россия. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Представлены результаты разработки и реализации встроенной системы мониторинга и прогнозирования технического состояния электроприводов газоперекачивающих агрегатов. В результате статистического анализа экспериментальных данных работы компрессорных станций магистральных газопроводов выявлены эксплуатационные факторы, влияющие на надежность работы приводных синхронных машин большой мощности. Представлены методы синтеза алгоритмов мониторинга и прогнозирования технического состояния машины на основе нейро-нечеткой идентификации процессов. Предложены аппаратные средства на основе интеллектуальных датчиков и результаты компьютерного моделирования работы электроприводов турбокомпрессоров магистральных газопроводов.

Ключевые слова: турбокомпрессор, электропривод, синхронный электродвигатель, система мониторинга.

ЗАСОБИ ТА МЕТОДИ ПРОГНОЗУВАННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОПРИВОДІВ ТУРБОКОМПРЕСОРІВ

О. В. Крюков

ВАТ «Гіпрогазцентр»

вул. Олексіївська, 26, м. Нижній Новгород, 603950, Росія. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

Представлено результати розробки й реалізації вбудованої системи моніторингу й прогнозування технічного стану електроприводів газоперекачувальних агрегатів. У результаті статистичного аналізу експериментальних даних роботи компресорних станцій магістральних газопроводів виявлено експлуатаційні фактори, що впливають на надійність роботи приводних синхронних машин великої потужності. Представлено методи синтезу алгоритмів моніторингу та прогнозування технічного стану машини на основі нейро-нечіткої ідентифікації процесів. Запропоновано апаратні засоби на основі інтелектуальних датчиків і результати комп'ютерного моделювання роботи електроприводів турбокомпресорів магістральних газопроводів.

Ключові слова: турбокомпресор, електропривод, синхронний електродвигун, система моніторингу.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Применение электроприводов переменного тока в газоперекачивающих агрегатах (ЭГПА) на компрессорных станциях магистральных газопроводов (КС МГ) составляет сегодня в России 14 %. Преимущественно работают в приводе турбокомпрессоров синхронные электродвигатели (СД) мегаваттного класса с суммарной мощностью $P_{\Sigma} = 6$ млн. кВт [1]. Более 70 % парка ЭГПА имеет срок службы более 20 лет, и практически все их элементы (машины, возбуждители, щиты) выработали свой ресурс и устарели. Дальнейший износ ЭГПА повышает риск аварийности КС МГ, что определило важность разработки встроенной системы мониторинга и прогнозирования (ВСМП) технического состояния ЭГПА на КС ОАО «Газпром» с использованием современных средств и методов диагностики [2, 3].

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ. Основными этапами создания ВСМП являются:

- статистическая обработка данных отказов двигателей и исследование эксплуатационных факторов, влияющих на состояние ЭГПА;
- математическое описание СД и анализ изменения факторов повреждаемости;
- разработка новых аппаратных средств, интеллектуальных датчиков, алгоритмов и ПО для обработки данных о состоянии машин;
- синтез ВСМП технического состояния ЭГПА методом нейро-нечеткой идентификации с реализацией на КС.

Анализ аварийности ЭГПА. Более 17,6 % всех ЭГПА ОАО «Газпром» эксплуатируются на КС ООО «Газпром трансгаз Нижний Новгород». В совокупности парк ЭГПА составляет большую часть оборудования КС по сравнению с судовыми, авиационными и

газовыми турбинами. Это позволило накопить и систематизировать подробные и адекватные статистические данные по основным причинам отказов ЭГПА (табл. 1).

Таблица 1 – Основные причины отказов ЭГПА

Причина отказа	Доля, %	Тяжесть
САУ ЭГПА	28	2
САР возбуждения	17	3
Электроснабжение	11	3
Подшипники	10	3
Нагнетатель	9	4
Система уплотнения	8	2
Внешние ЛЭП	7	1
Ошибки персонала	5	1
Статор СД	5	5

Всего с момента ввода в эксплуатацию зафиксировано 62 случая выхода из строя двигателей типа СТД-12500-2 и СДГ-12500-2, что соответствует средней интенсивности 2,77 случаев в год. Как видно из табл. 1, наиболее тяжелые последствия имеют аварии в обмотках статора высоковольтной машины ЭГПА. При этом СД выводится из работы с дальнейшей перемоткой статора в заводских условиях. Общая статистика наработки на отказ статоров СД ЭГПА показала, что аварийность СТД-12500 не является функцией их наработки, а зависит только от условий эксплуатации. Анализ возникновения поврежденных статоров СТД-12500-2 выявил, что они происходили в процессе штатной работы агрегатов (52 %) и менее часто – при пусках (15 %) из-за перенапряжений от

однофазных замыканий (15 %), из-за механических и термических нарушений (10 %) и при высоковольтных испытаниях (8 %). Подавляющее количество (86 %) всех выходов из строя СТД–12500 связано с повреждением высоковольтной изоляции обмотки статора в пазовой части обмотки и только 11 % – в лобовой части, 3 % – на выводах.

Факторы старения изоляции СД. Проведенный выше статистический анализ повреждений статоров СТД–12500–2 позволил выявить основные эксплуатационные факторы, влияющие на ресурс изоляции статоров высоковольтных синхронных машин:

1) *старение органических составляющих изоляции под воздействием температуры.* Зависимость электрической прочности корпусной изоляции статора СД при напряжении промышленной частоты от числа часов ее работы в эксплуатации носит ярко выраженный экспоненциальный характер. Анализ температурных режимов работы электродвигателей СТД–12500–2 в условиях реальной эксплуатации на КС показал, что при одинаковых температурных режимах наружного и внутрищитового воздуха и равномерной нагрузке ЭГПА среднесуточные параметры температур отдельных частей машин различаются. Так, диапазон температур «меди» составляет 46,9–104,4 °С; «стали» – 51,0–87,0 °С; горячего воздуха – 62–79 °С при токах статора от 618 до 650 А. Нагрев СД большой мощности при двухсторонней системе вентиляции имеет максимум в средней части рашотки статора (рис. 1). Динамические режимы пуска и останова ЭГПА дополнительно ухудшают тепловое состояние обмоток статора СД;

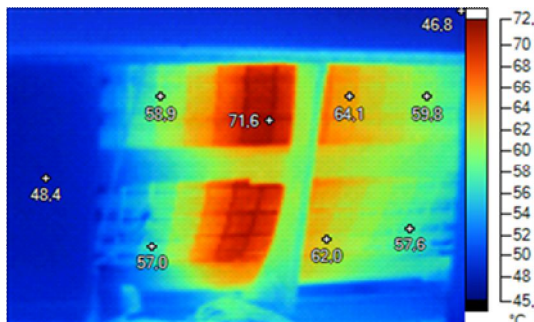


Рисунок 1 – Термограмма нагрева обмотки СТД

2) *влияние рабочих напряжений сети и перенапряжений при режимных возмущениях.* В связи с отсутствием на КС штатных систем мониторинга ЭГПА напряжение питания СТД–12500 периодически неконтролируемо выходит за пределы оптимального диапазона 10–10,5 кВ (рис. 2). Измерения питающего напряжения, проведенные на ЭГПА–3 КС «Починки» КЦ МГ «Ямбург–Елец–2» за период с 30.12.2008 по 02.01.2009 гг. с периодом один час (рис. 2), показали, что превышение линейных напряжений сети достигает значений 10,91 кВ при их существенной несинусоидальности.

В динамике ситуация с перенапряжениями в питающей сети еще сложнее:

- максимальная кратность перенапряжений при отключении выпавшего из синхронизма СД достигает 4,5 о.е.;

- максимальная кратность перенапряжений при

неодновременном замыкании контактов выключателя в момент пуска составляет 2,7 о.е.;

- максимальная кратность перенапряжений при однофазном замыкании и перемежающемся горении дуги достигает 4,0 о.е.;

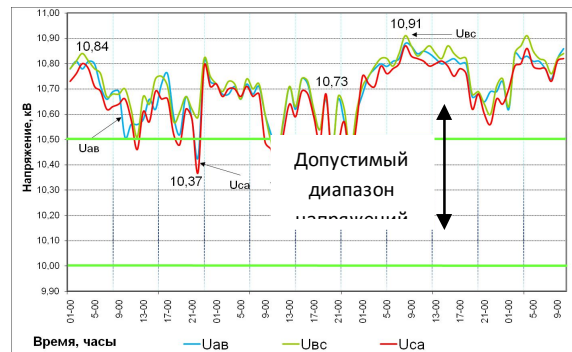


Рисунок 2 – Диаграмма питающего напряжения СТД

3) *механические – электродинамические и термомеханические нагрузки, вибрация.* Наибольшее влияние на износ изоляции оказывают термомеханические нагрузки и вибрации при недостаточной жесткости крепления обмотки. Радиальные и тангенциальные усилия на стержни обмотки статора, которые могли бы привести к их «выпучиванию» с нарушениями геометрии воздушного зазора машины, судя по известным эмпирическим выражениям, не достигают критических значений;

4) *частичные разряды (ЧР) различной амплитуды и интенсивности между секциями обмотки.* Проведен контроль изоляции обмотки статоров 82 ЭГПА с использованием метода измерения ЧР при подаче переменного напряжения от независимого источника. Метод позволяет выявлять наличие скрытых дефектов во внутренних полостях изоляции, критические ЧР в пазовой части изоляции и скользящие разряды в лобовых частях обмотки.

По результатам диагностики установлено, что практически все СД имеют ЧР различной интенсивности и амплитуды. На некоторых ЭГПА наблюдаются следы активности ЧР в лобовых частях обмотки в виде налета белого порошка соединений азота. При пробое изоляции наблюдается «вздутие» или расслоение изоляции под действием ЧР. На рис. 3 приведена амплитудно-фазовая диаграмма распределения ЧР фазы «А» обмотки статора ЭГПА–3 КС «Починки».

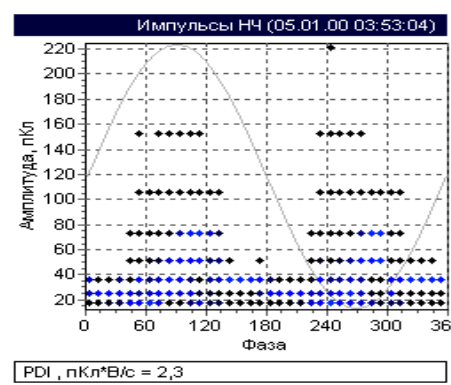


Рисунок 3 – Диаграмма распределения ЧР

На рис. 3 зафіксовано значительное число ЧР низкой амплитуды в диапазоне 0–360 °, что означает сильное загрязнение лобовых частей обмотки масляно-графитовой смесью. В случаях же, когда зафиксировано большое число ЧР, возникающих до достижения максимума амплитуды испытательного напряжения на обмотке (3000 пКл) и интенсивностью порядка 36,2 PDI (пКл*В/с), данная фаза обмотки имеет дефекты в пазовой части изоляции и возможен ее пробой. Все диаграммы получены при измерении прибором контроля типа R-400.

Методы формализации факторов. Поскольку физическая природа возникновения и действия эксплуатационных факторов старения изоляции СД различна, адекватные методы математического описания каждого из них индивидуальны. Большинство этих методов требуют установки на СД дополнительных датчиков и дорогостоящих систем контроля. В соответствии с рассмотренными принципами формализации диагностических процедур в исследовании представлены аналитические модели основных эксплуатационных факторов ЭГПА:

- анализ нагревостойкости СД выполнен по трёхступенчатой теории нагрева системы, состоящей из взаимосвязанных в тепловом отношении тел: обмотки статора («медь» пазовой и лобовой частей), самого статора («сталь» сердечника и корпуса) и ротора (обмотка возбуждения, сталь сердечника, подшипников, вала);

- воздействие на изоляцию статора рабочих перенапряжений при режимных возмущениях сети проведено по схеме замещения дуговых замыканий в результате расчета электромагнитных переходных процессов при пуске СД, представляемого сосредоточенными двухполосниками П-образной схемы с учётом активно-индуктивных сопротивлений;

- механические нагрузки (вибрационные, электродинамические и термомеханические) в стационарных и переходных режимах СД проанализированы по эмпирическим формулам;

- исследование ЧР проведено методом кластерного анализа с выводом аналитических регрессионных уравнений прогноза изменения технического состояния электродвигателей.

Кроме того, при экспресс-анализе воздействия эксплуатационных факторов использовались инженерные методы математического описания деструктивных возмущений. Они основаны, соответственно, на общем уравнении «кривой жизни» электрической изоляции по термофлуктуационной теории, вероятности безотказной работы обмотки при воздействии перенапряжений с различной кратностью к номинальному, условия работы изоляции при одновременном воздействии электрического поля и механических напряжений, а также уравнении «кривой жизни» электрической изоляции при воздействии ЧР.

Средства обработки информации. Все испытания и измерения тестовой диагностики ЭГПА сейчас выполняются на оборудовании, выведенном в ремонт и имеющим характеристики, отличающиеся от реальных, в связи с чем определить адекватное состояние статора СД и спрогнозировать его изменение практически невозможно. Системы вибрационного монито-

ринга не позволяют определять техническое состояние обмоток и активной стали статора СД. Достоверность результатов мониторинга требует многофакторного анализа оперативных данных тестовой и функциональной диагностики. Изучение механизма взаимодействия эксплуатационных факторов на изоляцию статора в рамках рассмотренной выше методологии позволило разработать соответствующие БД и функциональную схему комплексного определения эксплуатационных факторов на ресурс изоляции (рис. 4). Для мониторинга и прогнозирования состояния ЭГПА разработаны алгоритмы контроля текущего состояния параметров работы синхронной машины, а также интеллектуальные датчики прогнозирования состояния каждого эксплуатационного фактора. Причем для оперативности и достоверности прогноза технического состояния изоляции предложено использовать принцип экспертных систем на основе нейронных сетей и нечеткой логики.

Этапы вычисления износа изоляции и прогноза фактического технического состояния электродвигателей методами нечеткой логики следующие:

- фазсификация входных переменных для соответствующих факторов изоляции СД. При этом лингвистическая переменная, например, «Интенсивность ЧР» имеет термы «высокий», «средний», «низкий»;
- создание нечетких правил или базы знаний;
- построение нечеткой импликации.

Результаты измерений интенсивности ЧР представлены в соответствующих окнах и получены на экспериментальной установке с использованием средств измерительной техники и штатного щитового электрооборудования КС-25 «Починки» МГ «Ямбург–Елец-2» ЭГПА № 4: стойки монтажного оборудования А705–15–05; цифрового тиристорного возбудителя ВТЦ–СД–Щ 320/230; процессора CPU Card 5070–5*86.

Исследования ЧР в обмотках СД выполнены с использованием ПО «СКИ» с матрицей БД ЧР. Получено фазовое распределение ЧР, амплитуда и их частота, а также осциллограммы фазового распределения четырех видов ЧР в режиме “on-line” (скользящие, пазовые, во внутренних полостях, коронные) относительно напряжения и в зависимости от характера дефекта в ЭГПА. По полученным данным построены трехмерные графики (на каждый канал) распределения импульсов в секунду по амплитудным зонам. Для этого получены пять вариантов совмещенных диаграмм состояния изоляции СД с фактическим преобладанием той или иной разновидности ЧР.

ВЫВОДЫ. 1. Выполнены измерения основных параметров работы электродвигателей в различных режимах работы в условиях действующих КС. Определены четыре группы эксплуатационных факторов, влияющих на ресурс электродвигателя ЭГПА. Разработана функциональная схема механизма воздействия эксплуатационных факторов на ресурс изоляции.

2. Разработаны алгоритмы функциональной диагностики состояния статора главного электродвигателя ЭГПА. Предложена и запатентована оптимальная структура системы мониторинга и прогнозирования технического

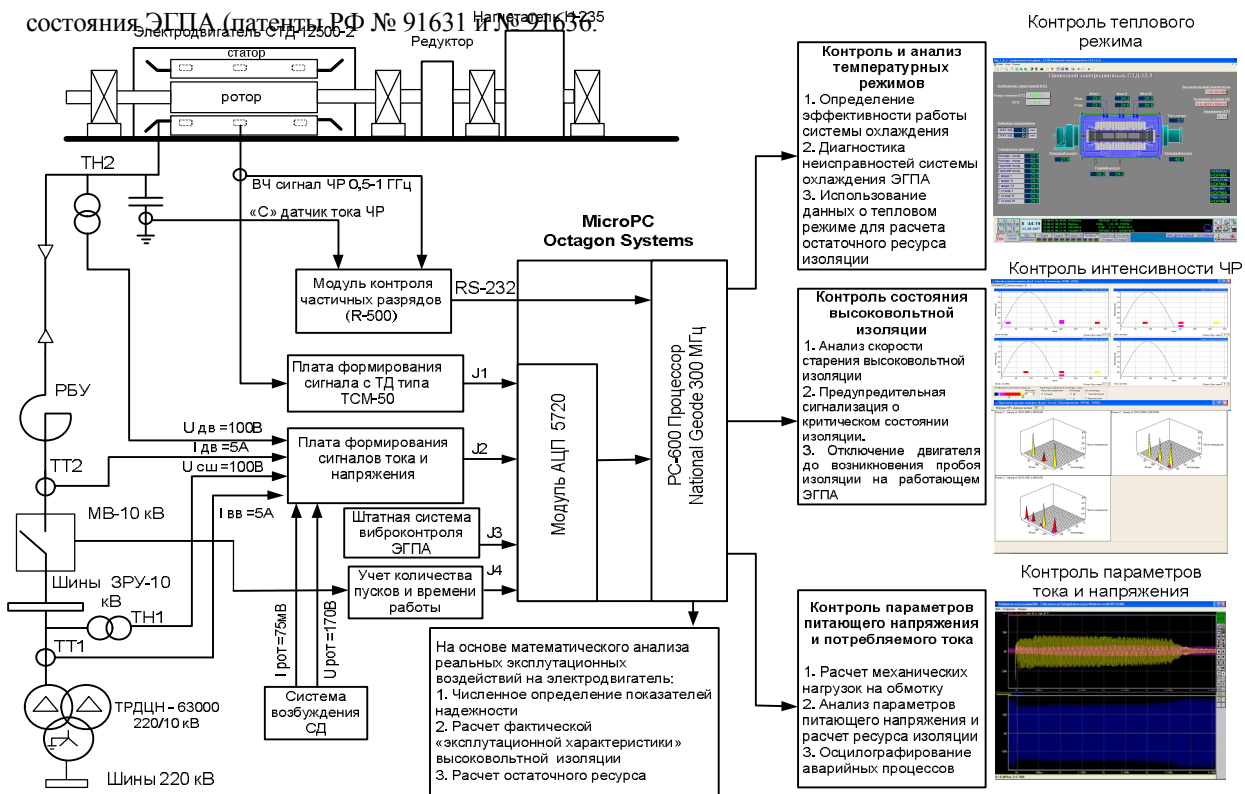


Рисунок 4 – Структурна схема встроеної системи прогнозування стану двигателів ЕГПА

ЛИТЕРАТУРА

1. Энергосбережение и автоматизация электрооборудования компрессорных станций / Под ред. О.В. Крюкова. – Н. Новгород: Вектор ТиС; в 2-х т. – 2011.
 2. Крюков О.В. Встроенная система диагностирования и прогнозирования работы асинхронных электроприводов // Изв. вузов. Электромеханика. – 2005. – № 6. – С. 43–46.

3. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated Safety System for Electric Driving Gas-Pumping Units // Russian Electrical Engineering. – 2010. – Iss. 81. – № 12. – PP. 649–655.
 4. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. The automated system of operative monitoring of gas compressor units with electric drive // Automation and Remote Control. – 2011. – Iss. 72, – № 1. – PP. 175–180.

MATERIALS AND METHODS OF FORECASTING ELECTRIC TURBOCHARGERS

O. Kryukov
 JSC “Giprogazcenter”

ul. Alekseevskaya, 26, Nizhniy Novgorod, 603950, Russia. E-mail: o.kryukov@ggc.nnov.ru

The development and realization results of the embedded system of monitoring and forecasting of the technical state of gas-compressor units’ electric drives are presented. As a result of the experimental data statistical analysis of the main gas pipelines’ compressor stations work the operational factors affecting the work reliability of driving synchronous machines of higher power capacity are revealed. Synthesis methods of monitoring and forecasting algorithms of the machine technical state on the basis of neuro-fuzzy processes identification are presented. Hardware on the basis of smart sensors and computer modeling results of electric drives work of turbocompressors of main gas pipelines.

Key words: turbocompressor, electric drive, synchronous motor, monitoring system.

REFERENCES

1. Energy saving and automation of electrical equipment of compressor stations / Edited by O.V. Kryukov. – N. Novgorod: Vektor TiS; in 2 vol. – 2011. [in Russian]
 2. Kryukov O.V. Embedded system of diagnosis and forecasting of asynchronous electric drives work // Electromechanics. – 2005. – № 6. – PP. 43–46. [in Russian]
 3. Babichev S.A., Kryukov O.V., Titov V.G. Automated Safety System for Electric Driving Gas-Pumping Units // Russian Electrical Engineering. – 2010.

– Iss. 81. – № 12. – PP. 649–655.

4. Babichev S.A., Zakharov P.A., Kryukov O.V. The automated system of operative monitoring of gas compressor units with electric drive // Automation and Remote Control. – 2011. – Iss. 72, – № 1. – PP. 175–180.

Стаття надійшла 10.07.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Клепиковим В.Б.