



Перспективы цифровизации контроля текущего состояния и развития методов предиктивной диагностики турбогенераторов на электрических станциях

Шаров Ю. В., Бинько Г. Ф., Беляков В. В., Виницкий Ю. Д., Голоднова О. С., Федотов М. В.,
Тарасов В. М., Астанин А. А., Миляев Р. Г., Шумов П. В., Пичугин Д. Е.

ПАО «Интер РАО»

Ноябрь 2019

- ❑ Интеллектуализация технологического контроля позволит осуществить online мониторинг и диагностику турбогенераторов для более полной оценки их технического состояния и повышения эксплуатационной надежности.
- ❑ Проект Минэнерго России «Цифровая энергетика» предусматривает повышение надежности и эффективности функционирования энергооборудования **«путем внедрения риск-ориентированного управления на базе цифровых технологий»**.
- ❑ Online мониторинг и диагностирование на базе цифровых технологий – современный подход к контролю технического состояния турбогенераторов для риск-ориентированного управления.
- ❑ Основа online мониторинга и диагностирования – Комплексная информационная модель технического состояния в виде набора базовых и текущих моделей по основным контролируемым параметрам с учетом режимов и условий эксплуатации и нагрузки, параметров окружающей среды и охлаждающих сред.
- ❑ Испытания модернизированной системы контроля, диагностики и мониторинга турбогенераторов проводятся обязательно с использованием информационной модели.

Критические элементы, ресурсопределяющие узлы турбогенератора

Критические элементы, повреждение которых создает базовые угрозы безопасности электростанций:

- Вращающаяся масса – ротор турбогенератора (вал, бочка ротора, бандажные кольца ротора).
- Корпус турбогенераторов серии ТВ, ТВ2, ТВФ, ТВВ, ТГВ, заполненный горючим и взрывоопасным водородом, и газо-масляная система (уплотнения вала с горючим маслом).
- Подшипники и система смазки с горючим маслом.
- Статор турбогенератора с высокотемпературными очагами нагрева в местах нарушений изоляции.
- Система охлаждения статора генератора серии ТВМ горючим изоляционным маслом.

Ресурсопределяющие узлы:

Сталь ротора, сталь статора.

(Приказ Минэнерго России от 14.05.2019 N 465 "Об утверждении Правил проведения технического освидетельствования оборудования, зданий и сооружений объектов электроэнергетики»)

- а) цифровизация сбора и обработки данных об эксплуатации и данных технологического контроля турбогенераторов;
- б) интеллектуализация контроля турбогенераторов:
 - непрерывная оценка текущего технического состояния в процессе эксплуатации;
 - раннее выявление возникающих дефектов критических узлов;
- в) мониторинг и предиктивная диагностика на базе анализа данных технологического контроля;
- г) риск-ориентированное техническое обслуживание и ремонт, обеспечивающие повышение надежности и экономичности турбогенераторов.

Риск может быть определен как произведение вероятности P события, причинившего ущерб, на усредненную величину ущерба W :

$$R = P \cdot W$$

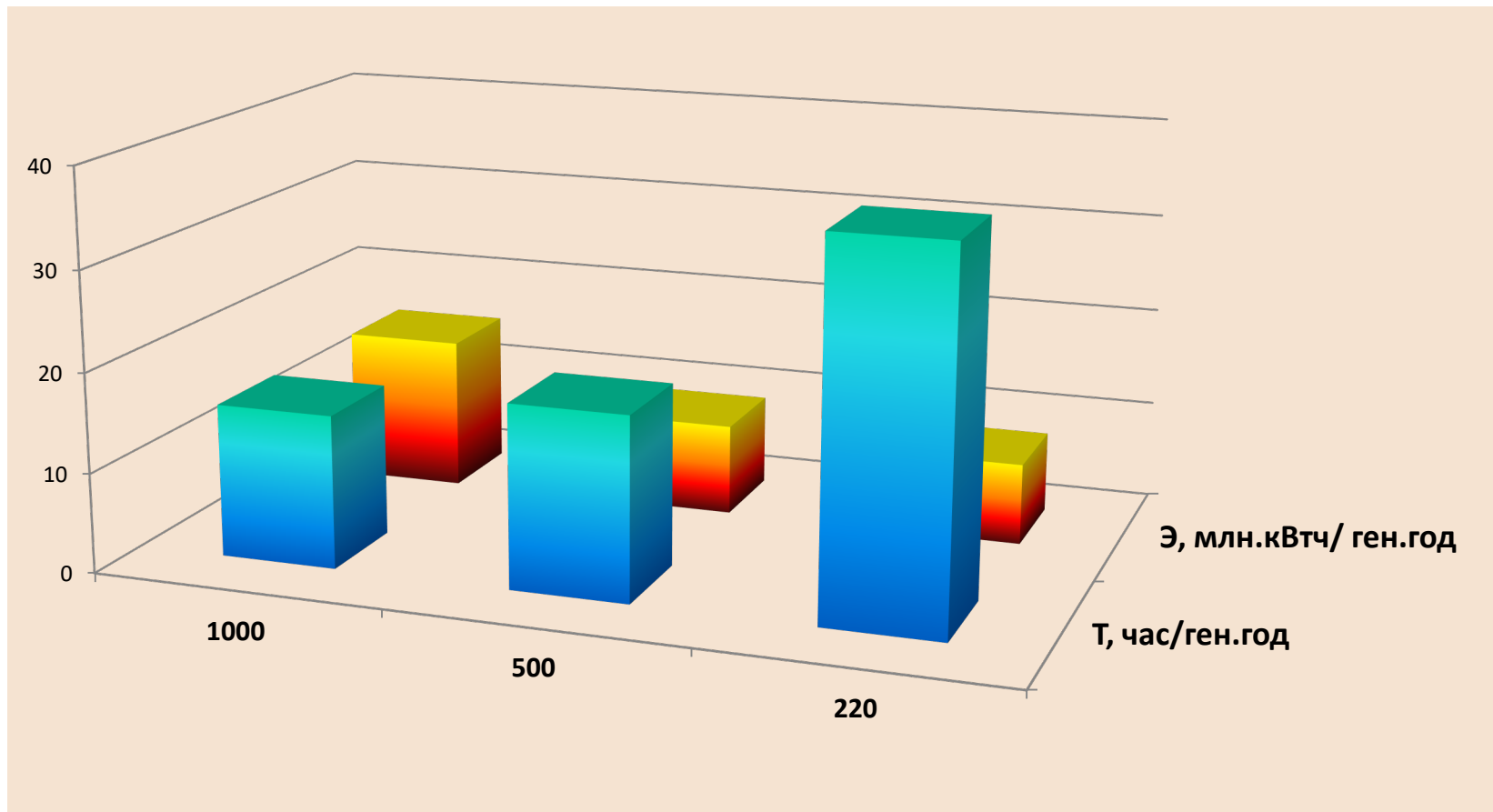
Приблизительно минимальный риск R от отказов ТГ можно оценить величинами:

T – средний удельный годовой простой ТГ (час/ген.год);

$Э$ – средняя удельная недовыработка электроэнергии (кВт.час/ген.год).

Эти величины определяются по ретроспективной информации для группы турбогенераторов.

Более точно вероятность отказов ТГ P и ущерб W должны оцениваться в соответствии с «Методическими указаниями по расчету вероятности отказа функционального узла и единицы основного технологического оборудования и оценки последствий такого отказа» (Приказ Минэнерго РФ от 19 февраля 2019 г. №123).



E – возрастает пропорционально установленной мощности;

T – в большей степени зависит от конструкции ТГ.

Эффективность диагностирования и мониторинга турбогенератора оценивается по ожидаемому снижению риска повреждений

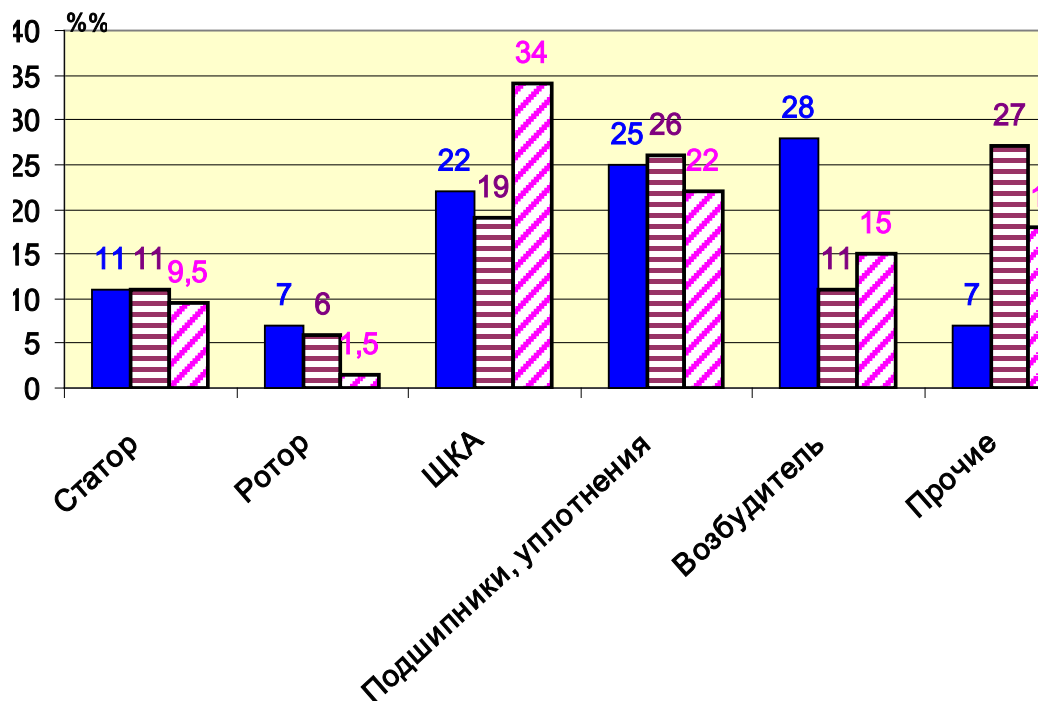
Для выбора решаемых задач online диагностирования и мониторинга необходимо обследование ТГ и его АСУ ТП с целью получения информации:

- Какие турбогенераторы и дефекты каких узлов отличаются наибольшим риском и подлежат диагностированию и мониторингу в первую очередь?
- Контроль каких параметров уже имеется в АСУ ТП и должен быть дополнен задачами диагностирования дефектов и дополнительным мониторингом?
- Какова степень изменчивости режимов эксплуатации турбогенераторов?

Эффективность диагностирования дефектов турбогенераторов

Оценка эффективности внедрения диагностических систем, проведенная путём анализа возможности предупреждения 228 отказов мощных турбогенераторов, показала, что интеллектуализация АСК ТГ, позволяющая предотвратить ряд отказов, сэкономила бы до 50 % недовыработки электроэнергии и примерно столько же – по числу отказов.

Распределение повреждаемости по узлам турбогенераторов и причинам отказов

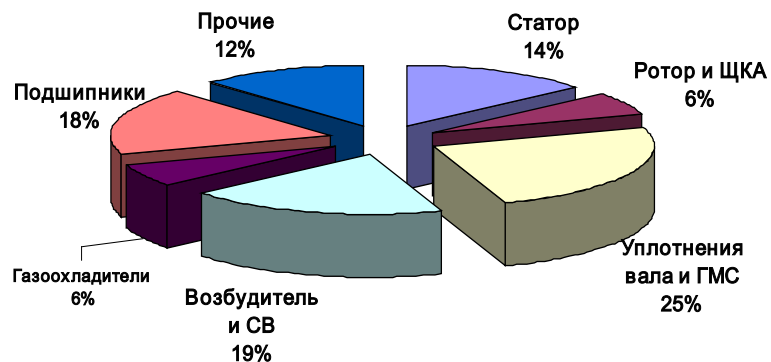


Распределение чисел отказов по узлам для ТГ от 60 до 800 МВт за три последовательных года

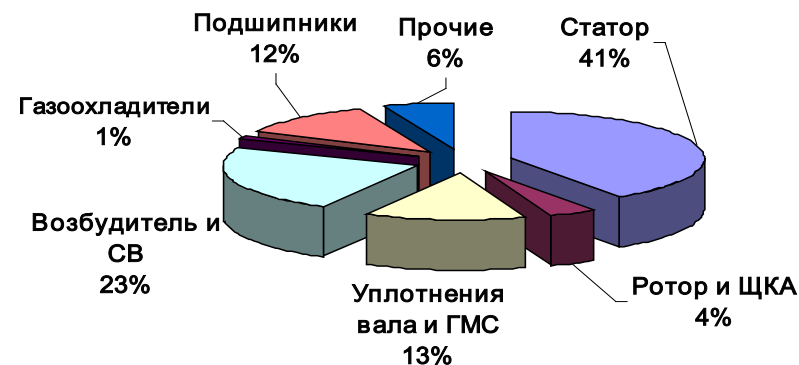
Распределение непосредственных причин отказов ТГ от 220 до 1000 МВт: числа отказов и соответствующая недовыработка электроэнергии



Сравнение повреждаемости отдельных узлов турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением



**Распределение
повреждаемости по узлам
для группы ТГ от 220 до
1000 МВт**



Существующая автоматизированная система контроля технологических параметров турбогенератора (АСК ТГ)

Функции АСК ТГ в настоящее время	АСК ТГ не соответствует современным требованиям
<p>Контролируется и регистрируется до 50÷100 параметров с заданной периодичностью: электрические параметры (мощность, токи и напряжения), температуры (активных частей ТГ, уплотнений вала, подшипников, щеточно-контактного аппарата, охлаждающих сред), гидравлические параметры, вибрации подшипников.</p>	<p>Не предусмотрен непрерывный анализ данных контроля, необходимых для оценки текущего технического состояния ТГ (интеллектуального контроля).</p>
<p>Осуществляется контроль состояния составных частей ТГ путем сравнения измеряемого параметра с заданным его предельным значением.</p>	<p>Не решаются задачи диагностирования основных составных частей и вспомогательных систем ТГ.</p>
<p>Выдается информация, отражающая:</p> <ul style="list-style-type: none"> а) результаты контроля состояния составных частей ТГ; б) функциональное соответствие ТГ; в) системные и управляющие воздействия и т.п. 	<p>Не обеспечивается предиктивная диагностика и мониторинг;</p> <p>Не обеспечивается достаточная информационная поддержка оперативного персонала.</p>

1. Внедрение компьютерного анализа данных, их хранения и передачи

Для диагностирования узлов турбогенераторов (ТГ) должен выполняться следующий анализ данных контроля по специальным алгоритмам:

- выявление значимых отличий текущих значений параметров контроля от исходных (базовых, эталонных) значений;
- совместный анализ изменений различных параметров с установлением различных дефектов узлов ТГ, в том числе по матрицам «признак-дефект».

Для мониторинга необходимо определение скорости изменения параметров и отличий текущих значений параметров от исходных.

Сравниваться должны параметры, определенные в установившихся по нагреву режимах.

2. Включение в состав АСК встроенных датчиков для обеспечения контроля

- ❑ **частичных разрядов (ЧР)** в обмотках статоров с высоковольтной изоляцией (напряжение выше 10,5 кВ) – **для ТГ с воздушным заполнением корпуса;**
- ❑ **вибраций лобовых частей и шин** обмотки статора – на ТГ мощностью 160 МВт и выше работающих в маневренных режимах, а также на всех генераторах мощностью 500 МВт и выше работающих в базовых режимах;
- ❑ **количества водорода**, попадающего в дистиллят, охлаждающий обмотку статора – **для ТГ с водородно-водяным охлаждением;**
- ❑ **сопротивления изоляции** обмотки ротора и наличия витковых замыканий в обмотке ротора (предпочтительно – с указанием количества) – **для всех ТГ.**

1. Значительный научно-технический задел, созданный разными фирмами

- ☐ Имеются результаты анализа повреждаемости отдельных узлов.
- ☐ Известны типичные дефекты – первопричины вынужденных остановов турбогенераторов и предваряющие изменение их технического состояния.
- ☐ Очевидность паттернов технических состояний при/до аварийных ситуациях для однотипных (и не только) турбогенераторов;
- ☐ Разработаны алгоритмы для специфической обработки и анализа данных АСК ТГ в процессе эксплуатации с решением задач диагностирования дефектов.
- ☐ Известны алгоритмы обеспечения безопасности ТГ с водородным охлаждением.
- ☐ Разработан ряд диагностических методик с компьютерной обработкой данных.

2. Прогресс развития аппаратуры и программного обеспечения

- ☐ Современные программно-технические комплексы с высокими быстродействием, надежностью и долговечностью.
- ☐ Вычислительные ресурсы и объемы памяти, позволяющие решать неограниченный круг задач диагностирования и мониторинга.
- ☐ Цифровые технологии сбора и передачи информации, которые позволяют непосредственно на электростанциях ограничиться сбором данных, а обработку и анализ их проводить в центрах обработки данных (ЦОД).

Виды и количество контролируемых параметров различны для разных типов ТГ

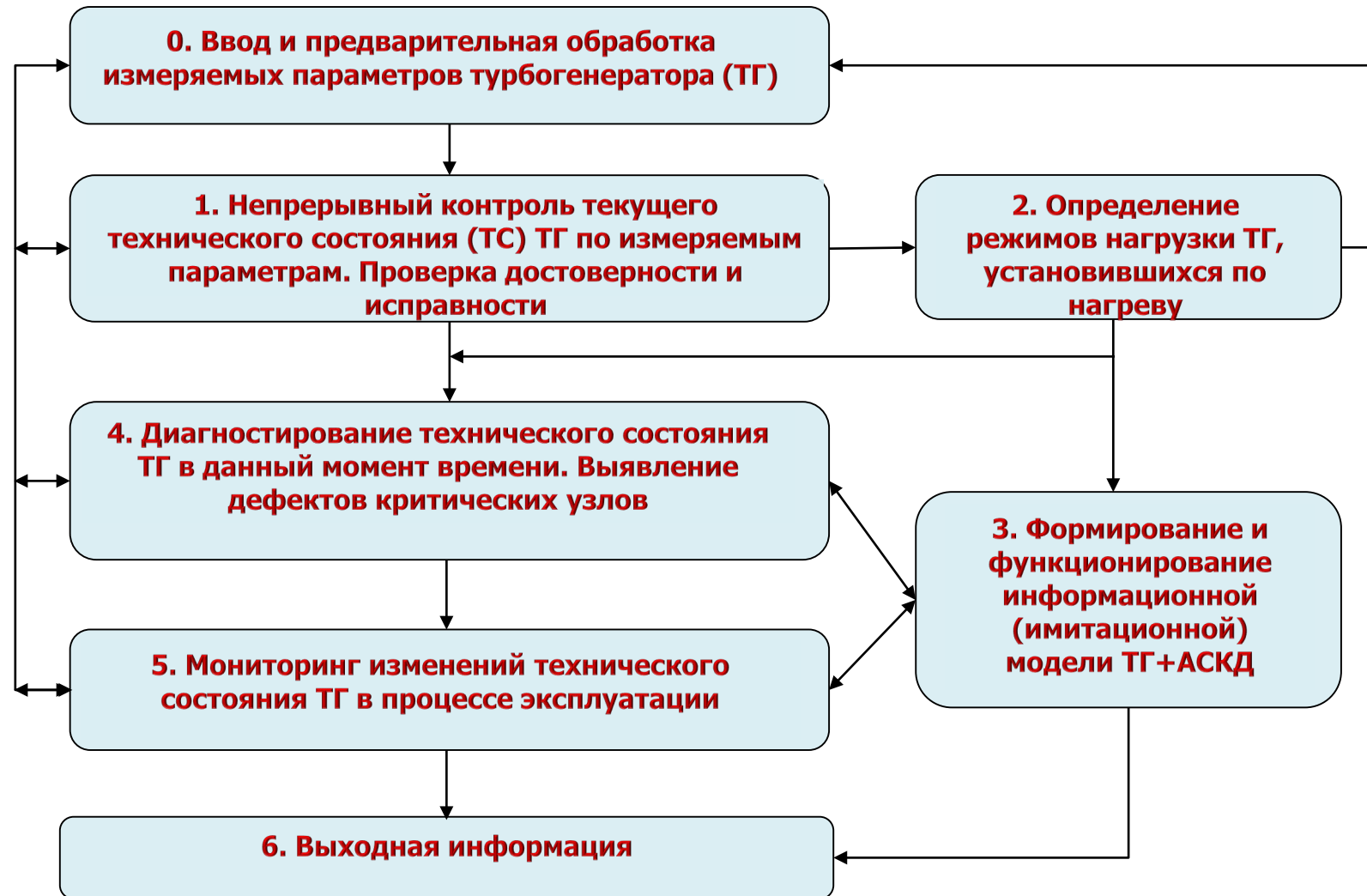
Параметр (узел; охлаждающая среда)	Типы охлаждения генераторов				
	А	Б	В	В ₁	Г
Штатные измеряемые параметры (основные)					
Электрические параметры (мощность, токи, напряжения, частота)	х	х	х	х	х
Температуры во всех пазах статора	х	-	-	х	х
Температуры в части пазов статора	-	х	х	-	-
Температуры газовых сред	х	х	х	х	х
Температуры и расходы дистиллята	х	-	-	х	х
Температуры и расходы технической воды	х	х	х	х	х
Температуры масла и вкладышей в подшипниках	х	х	х	х	х
Температуры вкладышей и масла в уплотнениях вала; расходы масла	х	х	-	-	-
Давление водорода в корпусе	х	х	-	-	-
Вибрация подшипников и вала	х	х	х	х	х
Дополнительные измеряемые параметры					
Вибрация обмотки статора*	х	х	х	х	х
Разрядная активность статора**	-	-	х	х	х
Магнитная индукция в зазоре	х	х	х	х	х
* Рекомендуется для всех турбогенераторов, работающих в пиковых и полупиковых режимах. ** Рекомендуется для всех турбогенераторов с воздухом в корпусе, а также для водородных турбогенераторов только с напряжением 20 кВ и выше.					

Обозначения:

- А** – непосредственное охлаждение:
водородное – ротора и сердечника статора, водяное непосредственное – обмотки статора;
- Б** – водородное непосредственное охлаждение ротора и сердечника статора; водородное косвенное или непосредственное – обмотки статора;
- В** – воздушное непосредственное охлаждение ротора и сердечника статора; воздушное косвенное – обмотки статора;
- В₁** – воздушное непосредственное охлаждение ротора; водяное непосредственное – обмотки и сердечника статора;
- Г** – полное водяное непосредственное охлаждение активных частей генератора при воздушном заполнении корпуса.

Знаки «х» или «-» соответствуют наличию или отсутствию контроля данного параметра в системе контроля.

Блок-схема автоматизированной системы контроля, диагностики и мониторинга турбогенератора



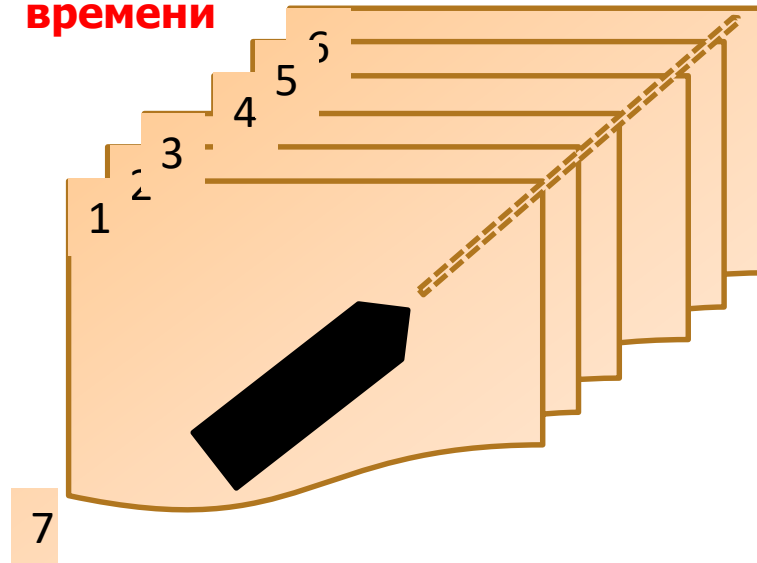
Этап 1. Контроль текущего технического состояния ТГ по измеряемым параметрам

1.1 Проверка наличия необходимых параметров и их достоверности	Недостоверные данные не должны поступать далее на вход алгоритмов диагностирования
1.2 Проверка нахождения параметра в пределах диапазона значений, заданного уставками	Выход параметра за пределы уставок означает аварийное состояние

Этап 2. Выбор режимов нагрузки ТГ, установившихся по нагреву

Режим нагрузки ТГ считается установившимся по нагреву, если основные контролируемые параметры остаются в заданных пределах $\pm \varepsilon$ в течение заданного времени T . Обычно время T принимается равным одному часу.

Информационная модель – комплекс моделей состояний узлов ТГ, характеризующихся разными параметрами, в последовательные моменты времени



- 1 – тепловое состояние;
- 2 – вибрационное состояние;
- 3 – изоляционное состояние;
- 4 – состояние газовой среды;
- 5 – состояние водяной системы охлаждения обмотки;
- 6 – другие виды состояний;
- 7 – общий вход данных от реального генератора

ИМ ТГ имитирует отклик датчиков контроля турбогенератора на текущие или заданные внешние воздействия, создавая таким образом имитированное базовое состояние.

Каждый последовательный набор откликов датчиков определенного параметра характеризует соответствующий вид текущего состояния ТГ в данный момент времени.

- 3.1 Расчет и корректировка базовых математических зависимостей параметров – температурных и вибрационных характеристик – от нагрузки ТГ, охлаждения и др. факторов в установившихся режимах.**
- 3.2 Имитация базового состояния путем расчета базовых значений параметров, соответствующих текущим значениям режимных параметров.**
- 3.3 Анализ и оценка динамики изменений показателей модели в зависимости от режимных показателей работы ТГ.**
- 3.4 Разработка и ввод правил оценки изменений показателей технического состояния ТГ, диагностических матриц, в т. ч. матриц «признак-дефект».**
- 3.5 Испытания диагностических и прогностических программ по специальным программам (тестирование, валидация и верификация).**
- 3.6 Обучение персонала (тренинг).**

Этап 4. Диагностирование технического состояния ТГ в данный момент времени. Выявление дефектов критических узлов

- 4.1 Оценка показателей технического состояния ТГ в режиме нагрузки, установившемся по нагреву.**
- 4.2 Оценка динамики изменений показателей технического состояния ТГ (направление и скорость изменения).**
- 4.3 Установление дефектов по правилам оценки изменений показателей технического состояния ТГ и по диагностическим матрицам «признак-дефект».**

Этап 5. Мониторинг изменений технического состояния ТГ в процессе эксплуатации

- 5.1 Сравнения текущих состояний ТГ с имитированными базовыми состояниями.**
- 5.2 Анализ отличий текущих состояний ТГ от базовых.**
- 5.3 Определение динамики и причин изменения текущих состояний ТГ.**
- 5.4 Установление связи изменений текущих состояний с эксплуатационными режимными показателями работы ТГ и другими внешними факторами.**

Обобщенная структура матрицы «Дефект-Признак»

Признаки	Дефекты								
	a	b	c	d	e	f	g	h	j
<i>I</i>	0	1	0	1	1	1	1	1	1
<i>II</i>	0	0	0	0	1	1	1	1	1
<i>III</i>	1	0	1	0	0	0	0	0	0
<i>IV</i>	1	1	1	1	0	0	0	0	0
<i>V</i>	0	1	0	0	0	0	0	0	1
<i>VI</i>	1	1	1	1	1	0	0	1	0
<i>VII</i>	1	1	1	1	1	0	1	0	0
<i>VIII</i>	0	0	1	1	0	0	0	0	0
<i>IX</i>	1	0	1	0	0	0	0	0	0

Обозначения:

1 – наличие признака;
0 – отсутствие признака;

Каждый столбец с последовательностью единиц и нулей соответствует наличию определенного дефекта.

Пример: диагностирование регулятора перепада давлений масла и газа в газо-масляной системе турбогенератора путем анализа изменений величины ΔP

ΔP	Воздействия факторов			Вероятные диагнозы			
	N	P₁	P₂	a	b	c	d
↑	↓	—	—	1	0	1	0
↑	—	↑	—	1	0	1	0
↑	—	—	↓	1	0	0	1
↑	—	—	—	0	0	1	0
↓	↑	—	—	1	1	1	1
↓	—	↓	—	1	0	0	0
↓	—	—	↑	1	0	0	1
↓	—	—	—	0	1	0	1

Диагнозы:

a – застревание золотника регулятора;
 b – велик диаметр сопла (для вращающегося золотника);
 c – нарушение обратной связи регулятора по маслу;
 d – нарушение обратной связи регулятора по газу.

Обозначения:

ΔP – перепад давлений масла и газа;

Факторы:

N – частота вращения вала;

P₁ – давление масла на входе в регулятор;

P₂ – давление газа в корпусе генератора.

Признаки дефектов:

1 – наличие признака;

0 – отсутствие признака;

↑ – возрастание величины;
 — величина остаётся без изменения;

↓ – снижение величины.

Мониторинг изменений состояния ТГ путем сравнения текущей измеренной величины с базовой величиной

Точка измерения величины	Заданные параметры режима		Расчетная базовая величина*	Текущая измеренная величина	Изменение величины
	нагрузка I, U	охлаждение θ_g, θ_w	θ_{s6}	θ_{st}	$(\theta_{st} - \theta_{s6t}) / \theta_{s6t}$
1					
2					
3					
.....					
N					

Расчетная базовая величина определяется как указано в пункте 3.2 на слайде 17.

- ❖ **Проведение испытаний АСКДМ непосредственно на действующем ТГ путем анализа результатов в процессе нормальной эксплуатации не может считаться эффективным, вследствие малой вероятности событий, подлежащих выявлению.**
- ❖ **Тестирование диагностических и прогностических программ должно проводиться по специальным программам с использованием имитационных моделей турбогенератора (ИМ ТГ).**
- ❖ **Без компактных испытаний на ИМ ТГ потребуется многолетняя проверка АСКДМ в процессе эксплуатации ТГ с многочисленными ложными остановами для проверки диагнозов, прежде чем можно будет судить об экономической и технической эффективности АСКДМ, а главное – для персонала – доверять диагнозам.**
- ❖ **Методика испытаний предусматривает проверку соответствия функционирования АСКДМ в ситуациях, имитирующих различные режимы работы и технические состояния ТГ, вспомогательных систем и средств контроля и диагностики, а также различные виды нарушений. Описания ситуаций содержатся в базе данных ИМ ТГ.**



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

