

Технологии цифрового двойника турбогенератора с использованием разработок Харбинского генераторного завода

ООО «ПК Сервис»

2019

В настоящее время, в условиях перехода РФ к цифровой экономике*, всеобщей автоматизации и модернизации энергетики, применение новых технологий, в частности, «цифровых двойников» турбогенераторов, могут позволить качественно трансформировать традиционную энергетику.

Цифровые двойники на основе анализа больших данных об объекте, системе или процессе позволяют выявлять скрытые закономерности в данных, определять отклонения параметров функционирования объекта/ системы или протекания физического процесса с высокой чувствительностью еще на стадии, когда такие отклонения не влияют на их состояние и не фиксируются традиционными системами управления и мониторинга.

* проект «Цифровая экономика» — один из национальных проектов в России на период с 2019 по 2024 годы.

Согласно Дорожной карте развития «сквозной» цифровой технологии «Новые производственные технологии», опубликованной на сайте Министерства цифрового развития, связи и массовых коммуникаций РФ 07.10.2019 г., *«... среди множества передовых технологий, технология цифровой двойник (Digital Twin) является технологией-интегратором практически всех сквозных цифровых технологий и субтехнологий, выступает технологией-драйвером, способной обеспечить технологические прорывы и позволяет высокотехнологичным компаниям переходить на новый уровень технологического и устойчивого развития на пути к промышленному лидерству на глобальных рынках.*

В сравнении с традиционными подходами, разработка изделий и продукции на основе технологии цифрового двойника может обеспечивать снижение временных, финансовых и иных ресурсных затрат до 10 раз и более».

Актуальность разработки систем цифровых двойников также подтверждается включением в Перечень цифровых и технологических решений, внедрение которых финансируется в рамках программы "Цифровизация промышленности", утвержденный Наблюдательным советом ФРП 10.05.2018, пункта «системы, поддерживающие технологии цифрового двойника изделия, цифрового двойника технологического процесса».

На сегодняшний день в энергетической отрасли РФ нет действующих примеров цифрового двойника генератора.

На базе Троицкой ГРЭС, г.Троицк, ООО «РК Сервис» создает сервисный центр по обслуживанию оборудования Харбинской электрической корпорации (ХЭК), одним из направлений работы центра будет внедрение систем дистанционной диагностики и цифрового двойника ТГ типа QFSN-660-2 производства ХГЗ, КНР.

Харбинский генераторный завод (ХГЗ), КНР, является технологическим партнером ООО «РК Сервис».

В качестве пилотного проекта предлагается адаптация и внедрение цифрового двойника для турбогенератора (ЦД ТГ) типа QFSN-660-2 ст.№10 Троицкой ГРЭС, произведенного на Харбинском генераторном заводе (ХГЗ), КНР, в феврале 2013г с учетом требований законодательства РФ (в том числе указанным в Приказе Минэнерго №1015 от 06.11.2018 г. "Об утверждении требований в отношении базовых (обязательных) функций и информационной безопасности объектов электроэнергетики при создании и последующей эксплуатации на территории Российской Федерации систем удаленного мониторинга и диагностики энергетического оборудования").

Первым этапом ООО «РК Сервис» планирует выполнение НИОКР внедрения цифрового двойника для турбогенератора типа QFSN-660-2 ст.№10 Троицкой ГРЭС.



Рис.1 Расположение сервисного центра ООО «РК Сервис»

В настоящее время ХГЗ работает над адаптации своей Интеллектуальной системы диагностики и технического обслуживания с использованием технологии цифрового двойника для внедрения на модернизируемых ТГ российского производства.

ООО «РК Сервис» совместно с ХГЗ готово предложить внедрение системы диагностики и технического обслуживания с использованием технологии цифрового двойника на турбогенераторы российского производства, модернизируемые по программе ДПМ-2, с учетом требований Приказа Минэнерго РФ №1015 от 06.11.2018 г. к системам удаленного мониторинга и диагностики энергетического оборудования.

Цифровой двойник турбогенератора (ЦД ТГ) — виртуальный аналог реального генератора, установленного на станции. Это сложный программный продукт, созданный на основе целого комплекса современных информационных технологий.

Рассматриваемый цифровой двойник турбогенератора базируется на моделях турбогенератора, разработанных специалистами ХГЗ, и накопленной базе данных по генераторам производства ХГЗ.

Используются численные методы моделирования физических процессов в генераторе - метод конечных элементов FEA (Finite Element Analysis), методы диагностики неисправностей на основе FTA (Fault tree analysis, Анализ дерева отказов) и др.

Применяются CAD-модели, цифровой двойник генератора содержит аннотированную 3D-модель с размерами и допусками, спецификацию на материалы, в которой перечислены текущие (и прошлые) компоненты, спецификацию на процессы с перечислением операций, которые были выполнены при создании конкретного генератора, а также результаты всех тестов на генераторе, записи о сервисном обслуживании, включая замену компонентов, операционные показатели, результаты тестов и измерений, полученные от датчиков, текущие и прогнозируемые значения параметров мониторинга.



Рис.2 Представление цифрового двойника генератора

Программное обеспечение

Для САПР применяется ПО I-DEAS компании EDS США; программная платформа для мониторинга состояния - NI Insight CM ; программное обеспечение для анализа прочности – ANSYS и TurboDyn (Rotor Dynamic), КНР; специальное программное обеспечение для анализа и расчетов собственной разработки; программное обеспечение платформы PDM – Team Center и универсальное программное обеспечение для совместной работы.

Интеллектуальная система удаленной диагностики и технического обслуживания ТГ

ЦД ТГ интегрирован в интеллектуальную систему удаленной диагностики и технического обслуживания, разработанную специалистами ХГЗ, которая является одной из составляющих системы долгосрочного сервисного (технического) обслуживания турбогенераторов производства ХГЗ.

Применение системы дистанционной диагностики и ТО с использованием технологии цифрового двойника ТГ позволяет:

I. Осуществлять контроль рабочего состояния турбогенератора в реальном масштабе времени, производить диагностику уже возникших неисправностей и вырабатывать варианты устранения неисправностей;

II. Проводить оценку текущего состояния турбогенератора, предсказывать возможные неисправности, оптимизировать объемы и сроки ремонтов, снизить расходы на ремонт, повысить надежность агрегата, продлить срок службы агрегата, снизить количество дежурного персонала.

III. Вырабатывать рекомендации по оптимизации работы агрегата в реальном времени, с целью повышения экономической эффективности.

При разработке системы использованы следующие технологии:



Рис.3 Основные технологии, используемые при разработке системы дистанционной диагностики и ТО с использованием технологии ЦД ТГ

Ключевые преимущества:

1. База знаний экспертов. База знаний экспертов, основанная на богатом опыте проектирования и изготовления продукции, мощной команде научных исследований и сервисного обслуживания клиентов, а также современной испытательной и лабораторной базе, является важным элементом системы. Интеллектуальный анализ причин неисправностей, модуль выработки методов устранения неисправностей в составе системы постоянно совершенствуются взаимодействуя с базой знаний экспертов.

Научно-исследовательской базой ХГЗ является Харбинский исследовательский институт электрических машин (ХИИЭМ).

Специалисты ХГЗ и ХИИЭМ анализируют работу турбогенераторов производства ХГЗ, установленных по всему миру, обобщают полученные данные и выявляют причинно-следственные зависимости, интегрируя результаты в комплексную модель генератора.

2. Мощное ядро расчетов и принятия решений ЦД ТГ, в котором применяется усовершенствованный алгоритм машинного обучения – метод опорных векторов (SVM - Support Vector Machines) и нечеткой логики (Fuzzy Logic), оценивает вероятность неисправности ключевых компонентов ТГ.

Модуль анализа входных данных (переменных) находит корреляцию между переменными, в том числе линейную и нелинейную. Путем определения соответствия физических данных (переменных) правилам корреляции, полученным машинным обучением, производится анализ - является ли состояние ТГ нормальным или ненормальным.

Метод оценки работоспособности ТГ, основанный на плотности распределения пространства данных, использует взаимосвязь между всеми параметрами ТГ и позволяет определить состояния ТГ вне нормального диапазона.

3. Стратегия безопасности данных

Для обеспечения безопасности данных и системы, программного и аппаратного обеспечения осуществляется защита данных. Программное шифрование осуществляется с помощью алгоритмов гибридного шифрования на основе DES и RSA при дистанционной передаче данных, защита аппаратных средств осуществляется с помощью межсетевого экрана и цифровой выделенной линии.

4. Значительный экономический эффект. Переход на прогнозный ремонт (ремонт по состоянию), отказ от склада запчастей и другие функциональные возможности, в конечном счете, создают экономическую выгоду для клиентов прямо или косвенно при использовании системы на основе технологии ЦД ТГ.

Принцип работы системы

Сигналы с датчиков генератора поступают в модуль мониторинга состояния, входящей в систему диагностики турбогенератора, далее проводится анализ информации с использованием технологий больших данных и интегрированной базы знаний экспертов. Результаты диагностики и анализ возможных неисправностей, а также рекомендации предоставляются клиентам в рамках сервисного обслуживания. Система построена в частных облаках класса предприятия Харбинской электрической корпорации с использованием пятиуровневой структуры, которая объединяет различные уровни в полный набор прикладных систем с помощью технологии SOA - сервис ориентированной архитектуры. Используя частное облако предприятия в качестве центра, построена модель обслуживания всего жизненного цикла ТГ - включая проектирование, изготовление, техническое обслуживание для предоставления клиентам наилучшего качества сервиса.

Модель сервисного обслуживания ТГ представлена на следующем рисунке



Рис.4 Модель сервисного обслуживания ТГ на основе дистанционной диагностики ТГ с использованием технологии ЦД ТГ ХГЗ

Применение системы диагностики с использованием технологии ЦД ТГ обеспечивает:

- снижение количества аварийных остановов оборудования;
- сокращение времени планового и внепланового технического обслуживания;
- проведение более целенаправленных и эффективных технических проверок;
- получение предварительной информации о необходимых запчастях, инструментах, специалистах для проведения техобслуживаний/ремонтов.

Система диагностики позволяет не только вовремя обнаружить неисправности генераторного оборудования, но и делать прогноз, основываясь на анализ трендов. Также система имеет круглосуточную горячую телефонную линию поддержки, позволяющую получать рекомендации экспертов в экстренных ситуациях.

Для турбогенератора в систему встроены 44 модуля диагностики неисправностей, часть из них показана ниже в таблице 1.

Таблица 1

№	Наименование модуля диагностики	Используемая методика
1	Закупорка полых проводников (по воде) стержня статора	Дедуктивная машина – база знаний
2	Контроль температуры торцевой части обмотки статора со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
3	Контроль температуры торцевой части обмотки статора со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
4	Контроль температуры сердечника статора со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
5	Контроль температуры сердечника статора со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
6	Контроль температуры холодного воздуха охладителя со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
7	Контроль температуры холодного воздуха охладителя со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний

Таблица 1(продолжение)

№	Наименование модуля диагностики	Используемая методика
8	Контроль температуры горячего воздуха охладителя со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
9	Контроль температуры горячего воздуха охладителя со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
10	Контроль температуры обмотки статора	Дедуктивная машина – база знаний
11	Контроль температуры входящего масла в подшипник со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
12	Контроль температуры входящего масла в подшипник со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
13	Контроль температуры выходящего масла из подшипника со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
14	Контроль температуры выходящего масла из подшипника со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний

Таблица 1(продолжение)

№	Наименование модуля диагностики	Используемая методика
15	Контроль вибрации подшипника со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
16	Контроль вибрации подшипника со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
17	Диагностика вибрации вала ротора со стороны паровой турбины	Дедуктивная машина – база знаний
18	Диагностика вибрации вала ротора со стороны КК	Дедуктивная машина – база знаний
19	Перегрузка по току статора генератора	Дедуктивная машина – база знаний
20	Перенапряжение статора генератора	Дедуктивная машина – база знаний
21	Диагностика утечек водорода генератора	Дедуктивная машина – база знаний

Таблица 1(продолжение)

№	Наименование модуля диагностики	Используемая методика
22	Диагностика по температуре воды на выходе из обмотки статора генератора	Дедуктивная машина – база знаний
23	Диагностика по температуре отдельного стержня статора генератора	Дедуктивная машина – база знаний
24	Модуль диагностики неисправностей по расходу охлаждающей воды в статоре генератора	Дедуктивная машина – база знаний
25	Модуль диагностики неисправностей утечки воды в месте соединения стержней статора генератора	Дедуктивная машина – база знаний
26	Система непрерывного онлайн мониторинга вибрации лобовых частей обмотки статора	FFT (Быстрое преобразование Фурье)
27	Система оценки усталостной прочности при изгибе ротора генератора	Теория усталости
28	Контроль крутильной вибрации вала ротора и оценка долговечности по напряжению при кручении	ПО TurboDyn (Rotor Dynamic) с использованием FEA (метода конечных элементов)

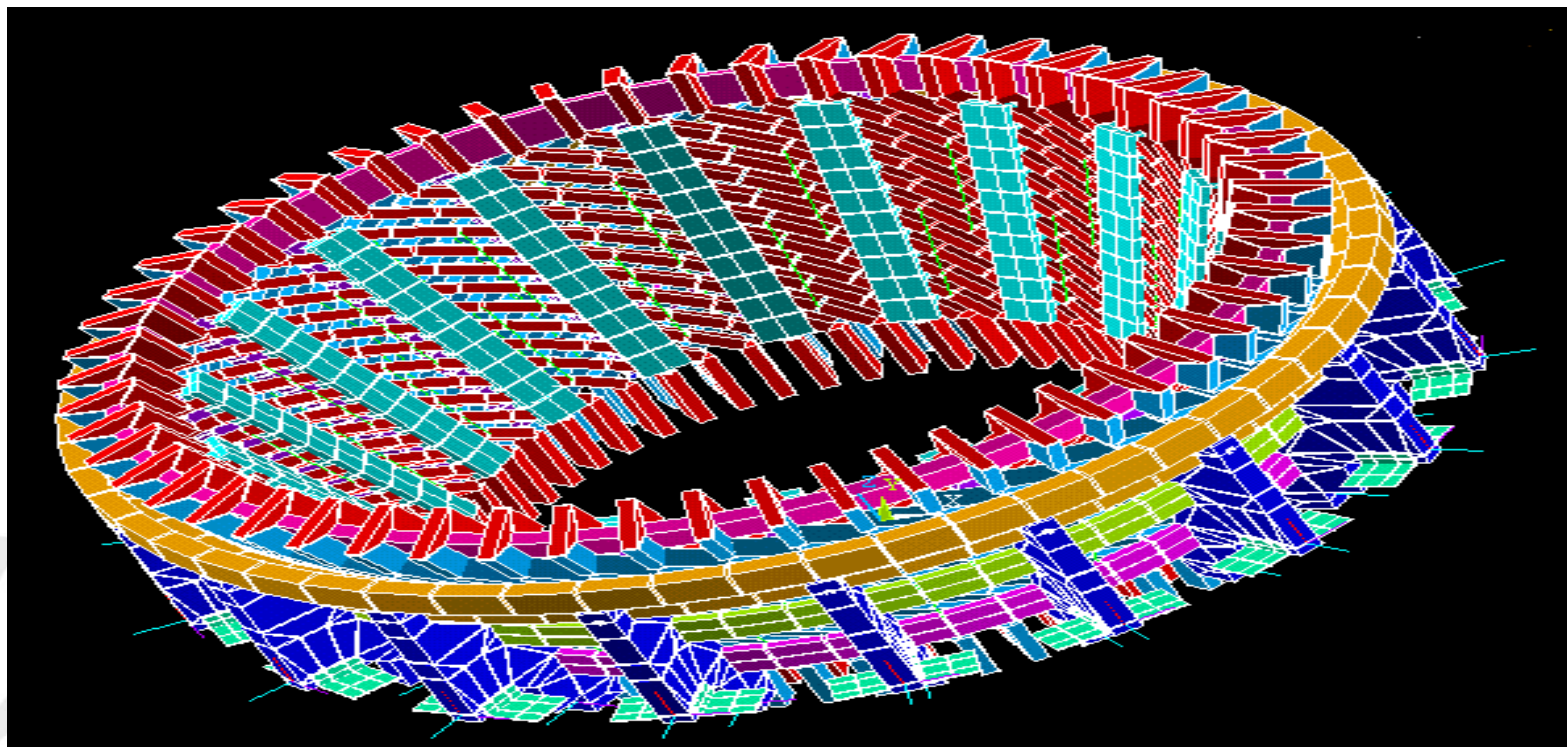


Рис.5 Пример модели торцевой части статора для анализа вибраций

Модули диагностики неисправностей турбогенератора, интегрированные в ядро расчетов, выявления причин неисправностей и принятия решений ЦД ТГ, реализуют более 80 различных алгоритмов:

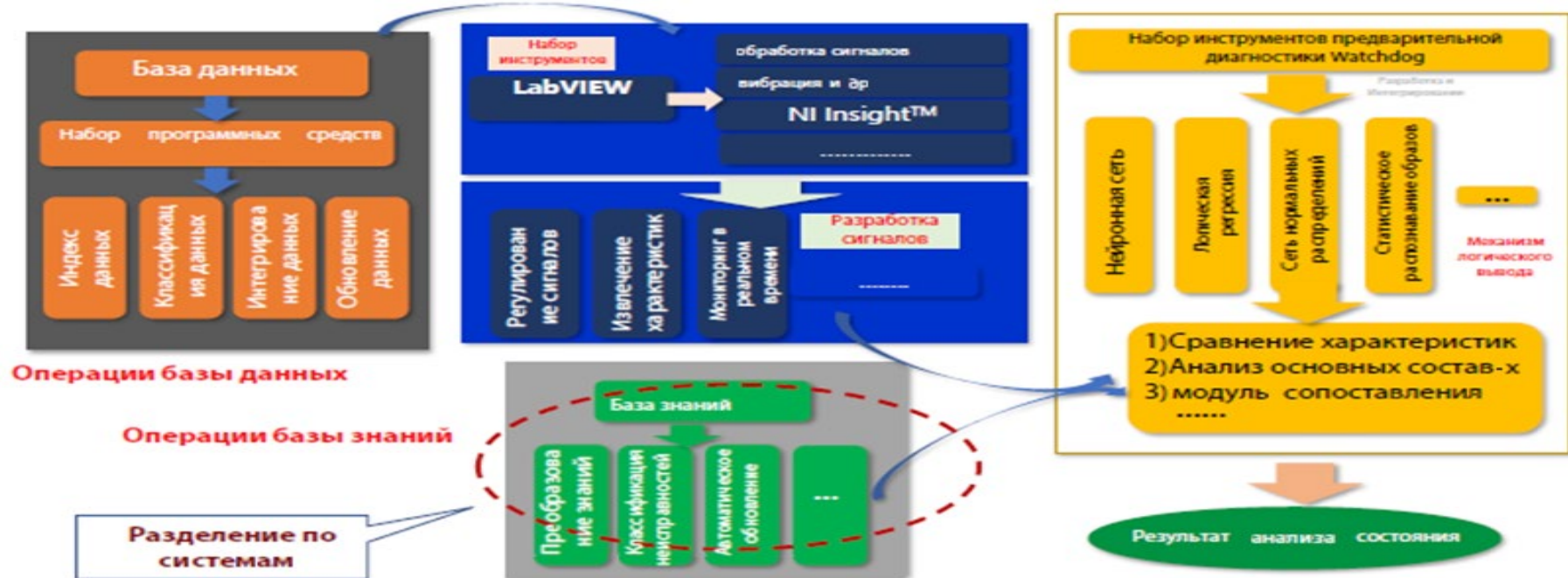


Рис.6 Модель ядра расчетов и принятия решений ЦД ТГ

Система осуществляет оценку состояния ТГ путем контроля ключевых параметров в реальном масштабе времени. Конечный результат выдается клиентам в форме отчета: отчет о диагностике неисправностей агрегата в реальном масштабе времени, включающий мониторинг текущего состояния, анализ причин неисправности, методы устранения неисправности, предложения по эксплуатации.

Возможно ежедневное сопровождение клиентов при эксплуатации ТГ для оперативной диагностики уже возникших и прогнозируемых неисправностей, предлагаются варианты устранения неисправностей. Система ранжирует тип неисправности и определяет допустимость продолжения работы ТГ.

Другой вариант – периодический «Отчет об оценке состояния ТГ» по требованию клиента, включает комплексную оценку состояния ТГ, оценку вероятности возникновения неисправности ключевых узлов, оценку параметров основных узлов, отчет о состоянии и предложения по ремонту, предложит перечень необходимых запасных частей в зависимости от прогноза неисправности.

С помощью данного отчета можно предоставить клиентам поддержку принятия решения для определения объема ремонта, сроков ремонта, подготовки запасных частей.

Чтобы персонал всех уровней знал о работоспособности отдельных узлов ТГ в любое время и в любом месте, а также повышения эффективности работы – возможен доступ к системе с использованием смартфона.

Система построена по модульному принципу, клиент может выбирать модули диагностики неисправностей по своим потребностям, обслуживание рассчитывается по годам, всего доступно четыре варианта доступа к системе:

Наименование	Период	Отчет о состоянии	Раннее предупреждение	Прогноз отказов	Анализ отказов	Диагностический отчет	Файрвол	Форма обслуживания
Дистанционное обслуживание в режиме реального времени	Долгосрочно в режиме онлайн	●	●	●	●	●	●	Онлайн
Дистанционное периодическое обслуживание	Периодическое	●	○	○	●	●	●	По сети
Режим черный ящик	Эпизодическое				●	●	●	По сети
Разовая диагностика	Разово				●	●	○	По сети
● Предоставляется полностью ○ Предоставляется частично								

Рис.7 Варианты получения сервиса диагностики

Ниже приводятся примеры видеок кадров Интеллектуальной системы удаленной диагностики и технического обслуживания с использованием технологии ЦД ТГ, разработанной специалистами ХГЗ



Рис.8 Титульный кадр Интеллектуальной системы удаленной диагностики и ТО с использованием технологии ЦД ТГ



Рис.9 Пример кадра диагностики ТГ



Рис.10 Пример кадра с трендами параметров ТГ



Рис.11 Пример кадра с отображением параметров ТГ

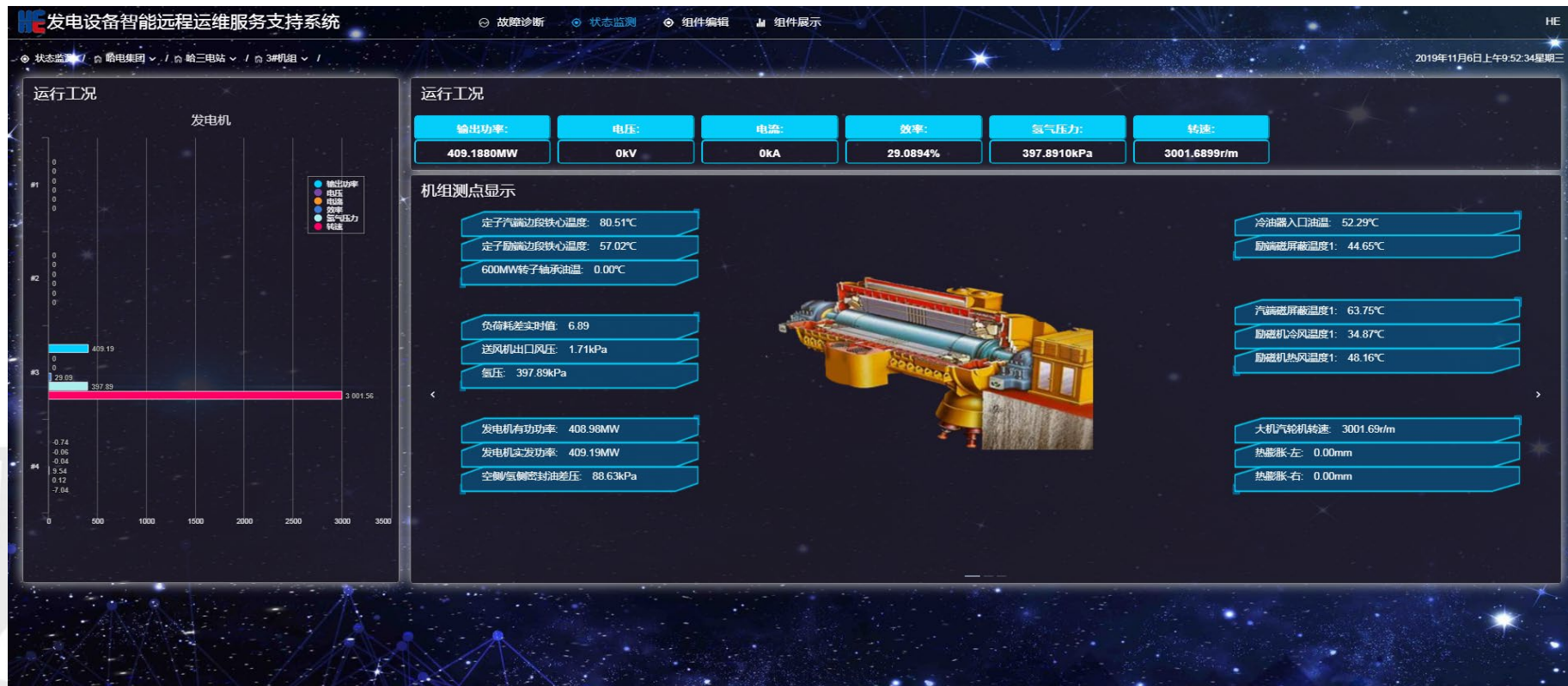


Рис.12 Пример кадра с параметрами ТГ

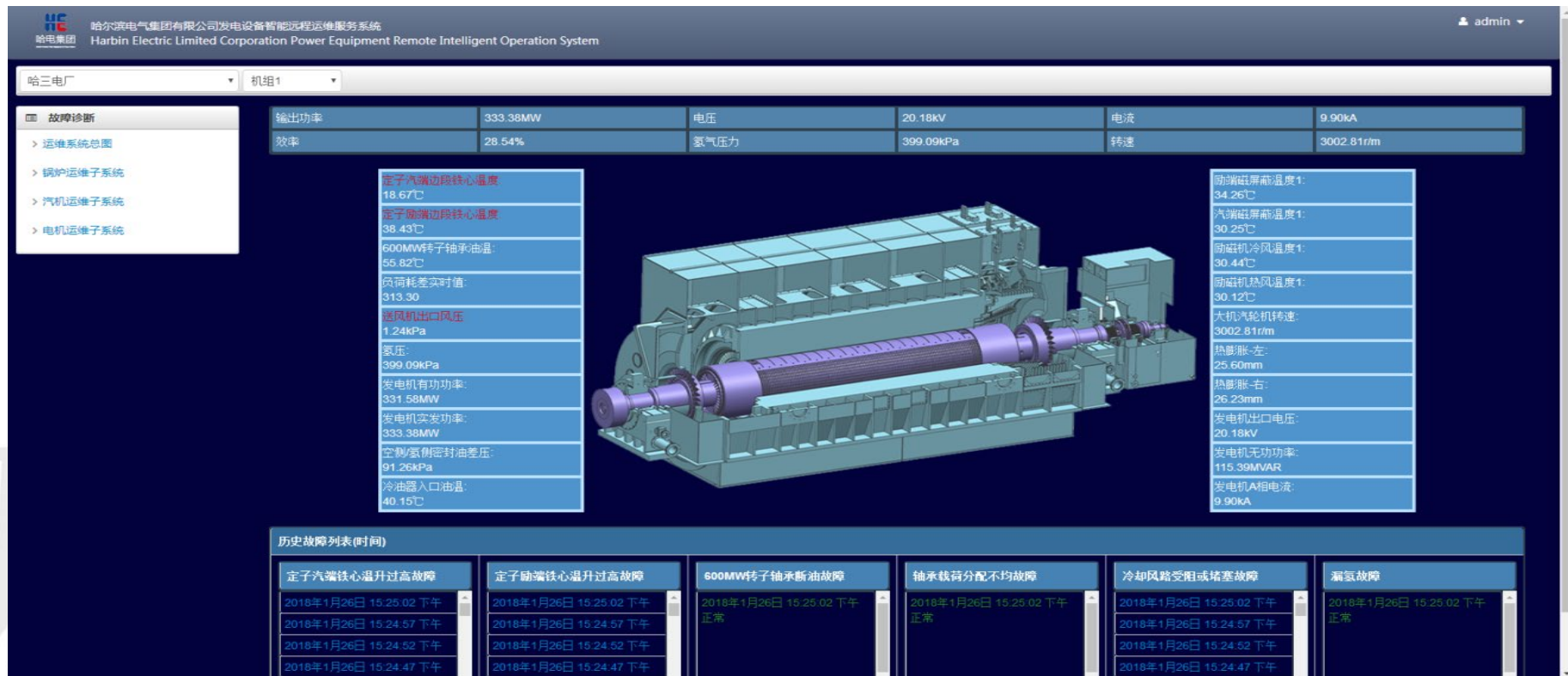


Рис.13 Пример кадра с параметрами ТГ

Референции применения Интеллектуальной системы удаленной диагностики и технического обслуживания с использованием технологии цифрового двойника генератора, разработанной специалистами ХГЗ, на электростанциях Китая:

Таблица 2

№	Наименование электростанции	Кол-во	Единичная мощность	Примечание
1	Харбинская ТЭС-3	2	600МВт	V2.0
		2	200МВт	
2	Дацинская ТЭС группы компаний Хуанэн	2	350МВт	V3.0
3	Электростанция «Санься»	8	700МВт	V1.0
4	Электростанция «Сянцзяба»	4	800МВт	V1.0
5	Электростанция «Силоду»	6	770МВт	V1.0

Таблица 2 (продолжение)

№	Наименование электростанции	Кол-во	Единичная мощность	Примечание
6	Электростанция «Фэнмань»	6	200МВт	V2.0
7	Электростанция «Дунцин»	4	220МВт	V2.0
8	ГАЭС «Фэннин»	12	300МВт	V3.0
9	ГАЭС «Хуангоу»	4	300МВт	V1.0
10	Электростанция «Чжалутэ»	2	300МВт	V2.0

V1.0 – дистанционное измерение параметров,

V2.0 – дистанционное измерение параметров и диагностика в реальном времени,

V3.0 – дистанционные измерение параметров, диагностика в реальном времени, анализ трендов, автоматическое формирование и отправка диагностических отчетов.

Заключение

Моделирование процессов в турбогенераторе с использованием технологий цифрового двойника позволяет:

- определять и прогнозировать ключевые показатели генератора;
- выявлять проблемные места и неисправности в системах генератора;
- запускать как подробные, так и экспресс сценарии «что-если», оказывая тем самым содействие процессу принятия решений.

Применение технологии цифрового двойника в составе Интеллектуальной системы диагностики и технического обслуживания способствует снижению эксплуатационных расходов за счёт уменьшения времени простоя из-за неплановых ремонтов оборудования, оптимизации процессов планирования и выполнения ремонтов.

Отображение генератора в виде цифрового двойника дает отличные возможности для анализа и прогнозирования. Технология позволяет моделировать самые разные ситуации, которые могут возникать в процессе эксплуатации генератора.

Аналогичные технологии разработаны и для остального основного оборудования станций – турбин и котлов позволяя решать прикладные задачи эксплуатации и ремонтов на новом технологическом уровне.



Рис.14 Пример кадра диагностики ТА



Рис.15 Пример кадра диагностики котла



СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Пример отчета о неисправности энергоблока (котла):




哈尔滨电气集团有限公司发电设备智能远程运维服务中心
Harbin Electric Limited Corporation Power Equipment Remote Intelligent Operation Service Center

哈三电厂 3 号机组故障报告


编号: 0100103-20180813-0001

时间: 2018/08/15 10:00:10

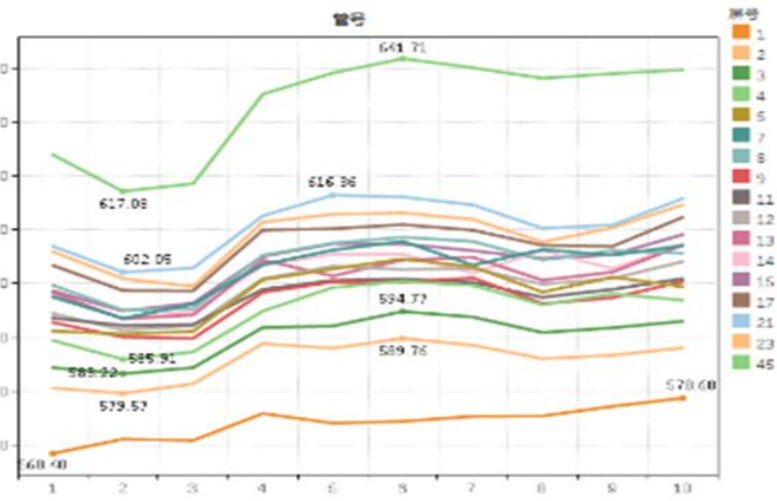
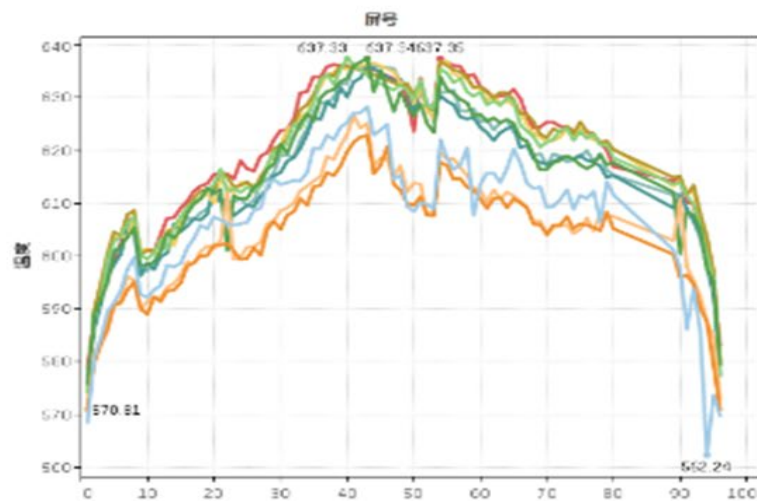
1、故障现象

故障名称	故障部位	故障等级	故障持续时间
末级过热器壁温超温	末级过热器		10min

1. Неисправность

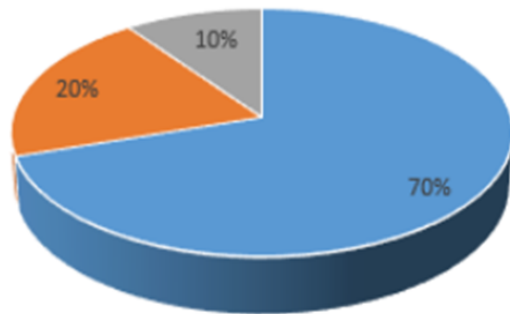
Наименование неисправности	Место неисправности	Класс неисправности	Продолжительность неисправности
Высокая температура стенки перегревателя последней ступени	Перегреватель последней ступени		10мин

2、数据特征 2. Характеристики данных



3、故障原因

3. Причина неисправности



■ 整体吸热偏高

Поглощение тепла в целом высоко

■ 局部偏差

Частичный перепад

■ 测温元件故障

Неисправность элемента измерения температуры

4、处理措施

故障原因	相应处理措施
整体吸热偏高	1、燃烧器摆角下摆 2、投运下层磨 3、减少燃尽风量 4、增加炉膛吹灰频率 5、降低未过吹灰频率
局部偏差	1、检查是否发生单点堵塞 2、进行燃烧调整
测温元件故障	1、检查测温元件盒是否异常 2、检查 DCS 测点逻辑图中热电偶温度补偿参数设置是否合理

4. Мероприятия по устранению

Причина неисправности	Мероприятия по устранению
Поглощение тепла в целом высоко	<ol style="list-style-type: none">1. Описание2. Описание3. описание
Частичный перепад	<ol style="list-style-type: none">1. Описание2. описание
Неисправность элемента измерения температуры	<ol style="list-style-type: none">1. Описание2. описание



Технологии ЦД ТГ с использованием разработок ХГЗ

备品备件	所需工具

ЗИП	Необходимый инструмент

5、机组运行建议

紧急停机	<input type="checkbox"/>	通过运行调整降低管屏温度，防止超温爆管。
监视运行	<input checked="" type="checkbox"/>	
正常运行	<input type="checkbox"/>	

5. Рекомендации по эксплуатации блока

Аварийный останов	<input type="checkbox"/>	Снизить температуру стенки трубы путем регулирования при эксплуатации во избежание взрыва из-за превышения температуры
Работа под контролем	<input checked="" type="checkbox"/>	
Нормальная работа	<input type="checkbox"/>	