

## Современные и перспективные методы диагностики турбогенераторов

Илья Романов

## О компании



Ракурс-инжиниринг, г. Санкт-Петербург

### Промышленная автоматизация

- ГЭС
- ТЭЦ
- АЭС
- Промышленность
- Производители турбогенераторов
- Производители систем



Проектов реализовано

1 545



Мощность проектов

50 000 МВт



Сотрудников в штате

200



Стран в портфолио

23



## План презентации

1. Ремонт по состоянию. Что для этого нужно?
2. Измерения – основа. Системы Ракурс на электростанциях, перспективные разработки
3. Экспертные алгоритмы. Машинное обучение и нейронные сети. Остаточный ресурс
4. Перспективы перехода к обслуживанию по состоянию



# Ремонт по состоянию

## Предпосылки

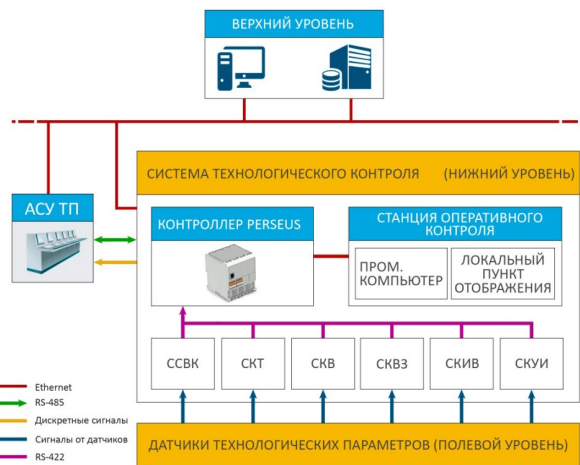
- Повышение надежности
- Снижение простоев, экономия средств

## Вопросы, на которые нужны ответить:

1. Текущее состояние, наличие скрытых неполадок ?
  - Различные способы диагностики
2. Остаточный ресурс и время работы до следующего ремонта?
  - Расчетная математическая модель учитывающая режимные параметры и данные он-лайн измерений

# Измерения, существующие системы

## Системы технологического контроля на АЭС



**Долгосрочные архивы работы оборудования в различных режимах, с историей возникновения отказов могут быть использованы для моделирования**

### Контролируемые параметры:

- температуры конструктивных элементов статора
- температуры, давления и другие технологические параметры сред
- электрические параметры
- вибрации конструктивных элементов статора (СКВ)
- межвитковые замыкания в обмотке ротора (СКВЗ)
- сопротивление изоляции цепей ротора (СКИВ)

### Основные функции:

- настройка и математическая обработка параметров
- формирование сигнализации, технологических защит
- диагностика измерительных каналов и элементов системы
- ведение истории событий и аналогового архива, формирование отчётов
- автоматизированная калибровка измерительных каналов
- интеграция с АСУ ТП

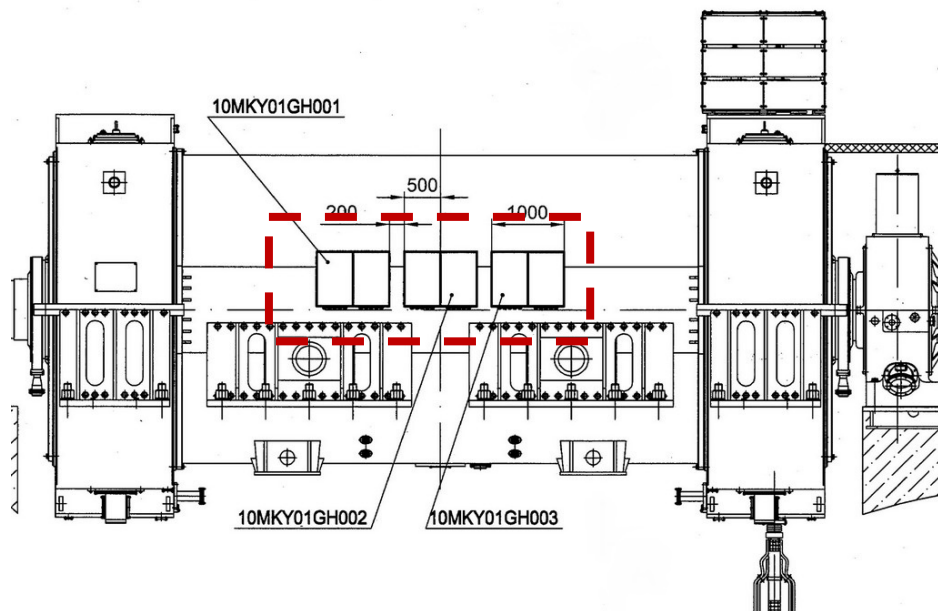
- Кольская АЭС
- Ленинградская АЭС-2
- Нововоронежская АЭС-2
- Калининская АЭС
- Балаковская АЭС
- Белоярская АЭС
- Курская АЭС
- Ростовская АЭС
- Билибинская АЭС
- ...



# Измерения, новое поколение систем



## КИ ВТК – набортный измерительный комплекс турбогенератора



### Особенности:

- Размещается на корпусе турбогенератора, на заводе-изготовителе ТГ
- Применяется на заводских испытаниях для записи базового уровня параметров ТГ
- Выполняет функции «Черного ящика» на ТГ
- Оснащен диагностическими алгоритмами

### Планы по внедрению

- Курская АЭС, Руппур АЭС, Бушер АЭС

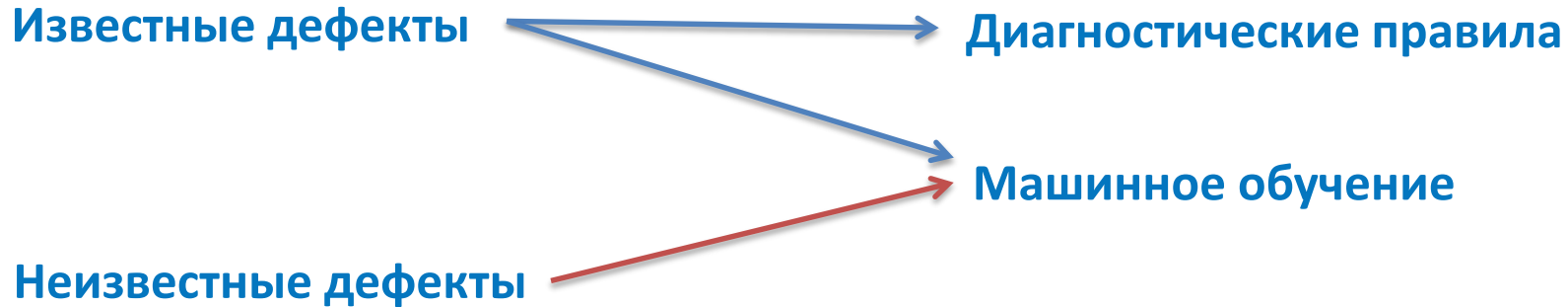




# Диагностика

## Существующие и перспективные методы диагностики оборудования

- Алгоритмы диагностики, разработанные экспертами
- Программные блоки расчета остаточного ресурса и срока службы
- Диагностика с применением методов машинного обучения







# Диагностика

## Экспертные алгоритмы

Набор правил, созданных экспертами на основе опыта эксплуатации.

Охватывает относительно небольшое количество типовых дефектов, ранее встречавшихся и хорошо изученных специалистами.

Диагностика в реальном времени, сообщения о выявленных дефектах в системе

Требуются предварительные испытания для первичной настройки алгоритмов

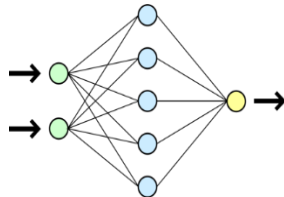
# Машинное обучение



Обучение на примере решения множества сходных задач

## 1. Обучение

Архивные данные:  
- штатные режимы;  
- дефекты, отказы;



ИНС: модель  
предиктивного анализа

## 2. Анализ

Выявление известных дефектов,  
Неизвестных заранее аномалий



Оператор

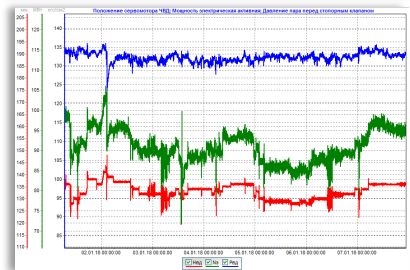
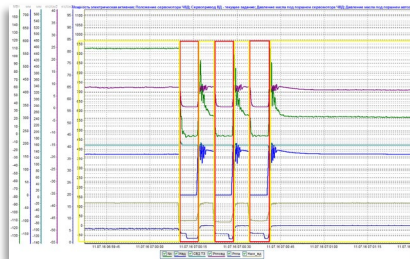
**Искусственная нейронная сеть (ИНС)** — математическая модель  
(программное или аппаратное воплощение)

- Обучение НС требует достаточно мощного серверного оборудования
- Эксплуатация менее требовательна к ресурсам

# Машинное обучение. Процесс

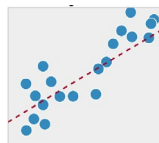


Архивные данные

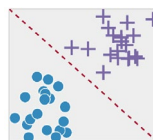


Машинное обучение + экспертиза

Эталонная модель



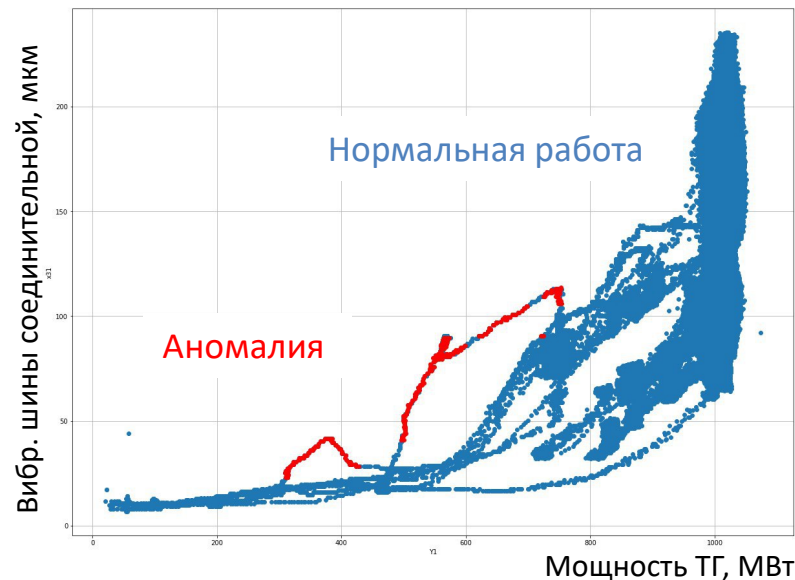
Классификация неисправностей



Прогнозные модели



Несколько пусков ТГ, в разные периоды времени



(Анализ проводился по 45 параметрам, показано только два!)

# Машинное обучение. Опыт построения моделей



## Цифровая модель на основе аналогового архива ПТК ЭЧСРиЗ ТГ-5 Павлодарской ТЭЦ-3



- 1. Задача и исходные данные:** прогноз мощности ТГ по давлению пара, и положениям регулирующих клапанов ВД и диафрагмы НД
- 2. Предобработка данных:** выбор интервалов, по которым турбина в сети и мощность выше 1 МВт; нормировка данных; введение искусственного параметра: введён параметр  $Z1 = Pvd * Hvd$
- 3. Выбор метода (алгоритма):** LR (линейная регрессия), RFR («случайный лес»), GRB (градиентный бустинг), NN (нейронная сеть)
- 4. Структура нейросети:** 3 слоя по 128 нейронов
- 5. Оптимизация:** минимизация среднеквадратичной разницы мощности ТГ (измеренной относительно прогнозной из цифровой модели)
- 6. Обучение:** обучающая выборка – 3 месяца
- 7. Оценка качества:** контрольная выборка – 2 недели

**Ошибка прогноза:** средняя по модулю – **0,95%**, максимальная – **4,21%** (в зависимости от метода)

**Использование большего числа параметров (датчиков) и введение нового параметра (Z1) снижают ошибку:** среднюю – до **0,89%**, максимальную – до **2,72%**



# Машинное обучение. Планы по внедрению

- **Опытное внедрение: диагностика работы паровых турбин с ПТК ЭЧСРиЗ Краснодарской ТЭЦ**
  - В рамках сопровождения ПТК ЭЧСРиЗ ПГУ-410 выполняем диагностику состояния турбины
  - Ожидаем несколько договоров в 2020-2021 годах
- **Диагностика работы турбогенераторов, котлоагрегатов, гидроагрегатов**
  - Создание моделей по различным видам оборудования на основе архивных данных измерений, ввод в опытную эксплуатацию;

# Остаточный ресурс. Методика



Результаты расчета		
фактические данные		
жгутовая частота, Гц	$f_{ж}$	0.46
лопастная частота, Гц	$f_{л}$	29.1
лопаточная частота, Гц	$f_{лоп}$	49.9
частота жгутовых пульсаций на рабочем колесе, Гц	$f_{об} - f_{ж}$	1.62
средняя наработка в год, час.	$t_{ср}$	5694
фактическое накопленное усталостное повреждение	$\lambda_{\sigma}$	0.976
остаточное усталостное повреждение	$\lambda_{ост}$	0.024
<b>исчерпанный ресурс, %</b>		<b>97.6%</b>
прогноз		
прогнозируемое к следующему КР* повреждение	$\lambda_{КР}$	0.998
<b>остаточный ресурс, %</b>		<b>2.4%</b>
остаточный ресурс, год	$T_{ост}$	7.77
остаточный ресурс, тыс. час	$t_{ост}$	44.2

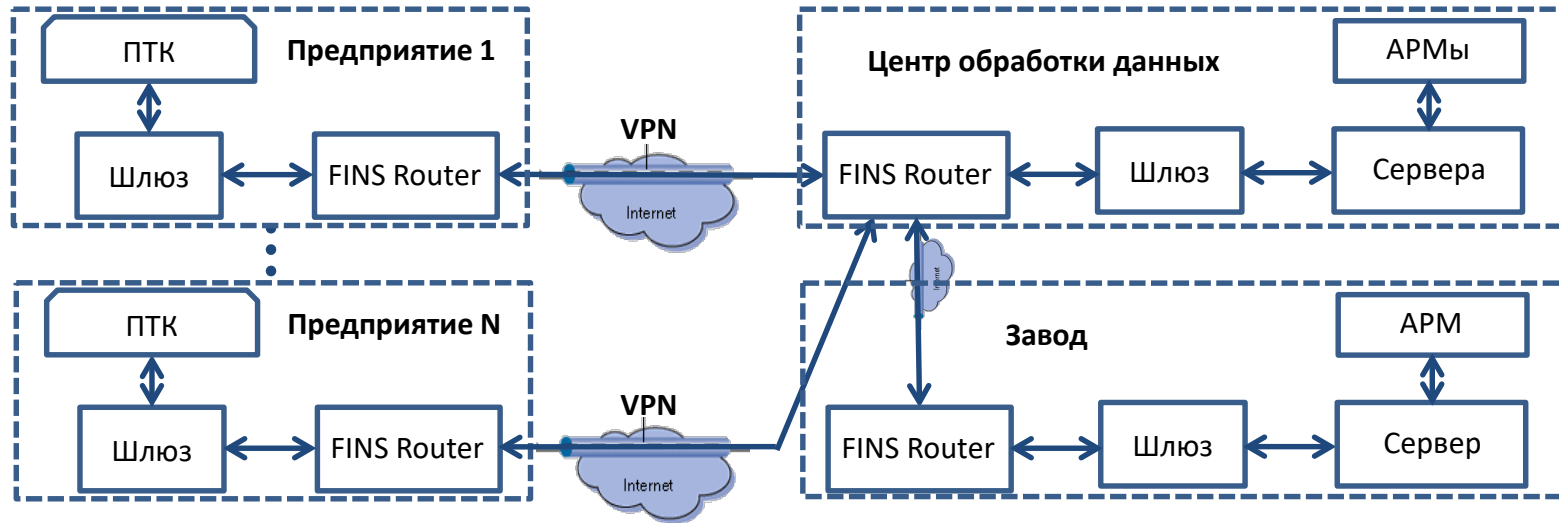
\* КР - капитальный ремонт

Основа – характерные частоты, прочностная модель узлов, ввод данных по режимам и измеряемым параметрам в реальном времени



# Централизованный мониторинг и диагностика в ЦОД

- Каналы передачи данных системы в ЦОД
- Обработка данных в реальном времени на мощных серверах ЦОД
- Доступ экспертов центра к полученным данным и результатам их обработки
- Доступ специалистов предприятия к результатам работы алгоритмов и рекомендациям экспертов
- Доступ специалистов заводов-изготовителей





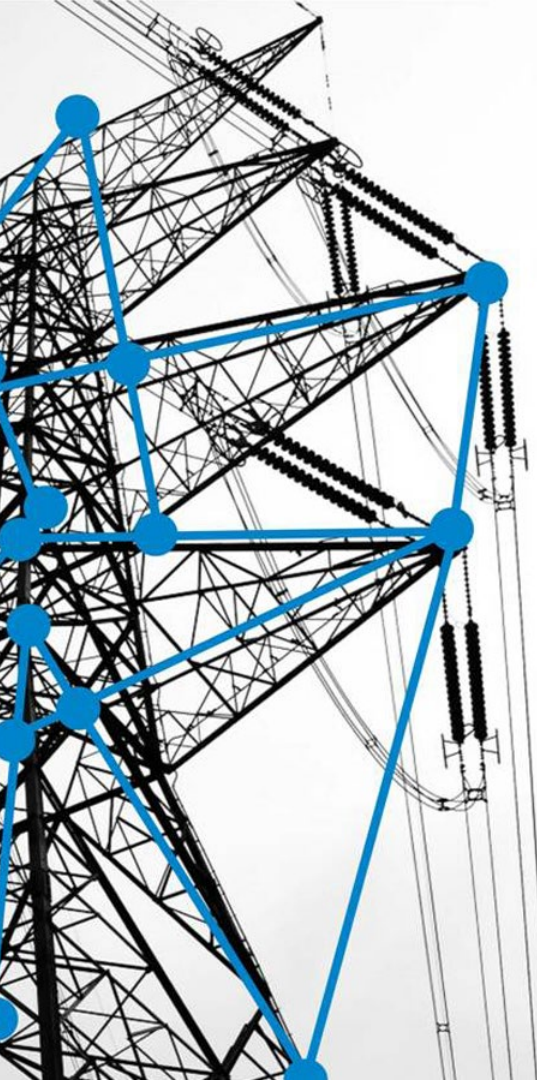


## **Переход к ремонту по состоянию требует:**

- точного определения текущего состояния узлов оборудования на основе различных методов;
- точных методов расчета остаточного ресурса и сроков его исчерпания

## **Перспективные направления:**

- экспертные алгоритмы на основе диагностических признаков;
- машинное обучение
- блоки расчета остаточного ресурса и срока эксплуатации до ремонта;



**Спасибо  
за внимание!**

**Группа компаний «Ракурс»**

Тел. +7 (812) 252-32-44

Факс +7 (812) 252-59-70

E-mail: [info@rakurs.com](mailto:info@rakurs.com)

198515 Санкт-Петербург,  
Стрельна, ул. Связи, 30А