

20 ноября 2019, Москва



# Математическое моделирование как составная часть диагностики вращающихся машин

Мисюрин Сергей Юрьевич НИЯУ МИФИ

Назолин Андрей Леонидович ИМАШ РАН



НИЯУ МИФИ  
[www.mephi.ru](http://www.mephi.ru)

Кафедра №22 «Кибернетика»  
[www.kaf22.ru](http://www.kaf22.ru)



# Постановка задачи диагностики вращающихся машин

Andritz Hidro



Siemens

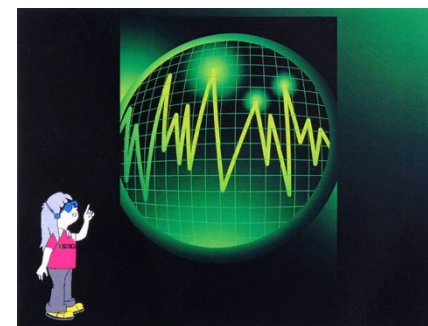
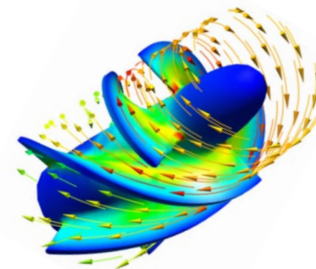


ПАО "Силовые  
Машины"



## Принципы предиктивной аналитики

- Математическое моделирование работы турбин и генераторов в исправном и неисправных состояниях (создание «цифровых двойников турбоагрегатов»)
- Обработка сигналов (фильтрация, компонентный анализ, частотно-временной анализ) с учетом влияния режимных параметров работы
- Искусственный интеллект - нейросетевое моделирование, моделирование на основе метрического анализа (обучающиеся системы на основе исторических данных и математического моделирования)

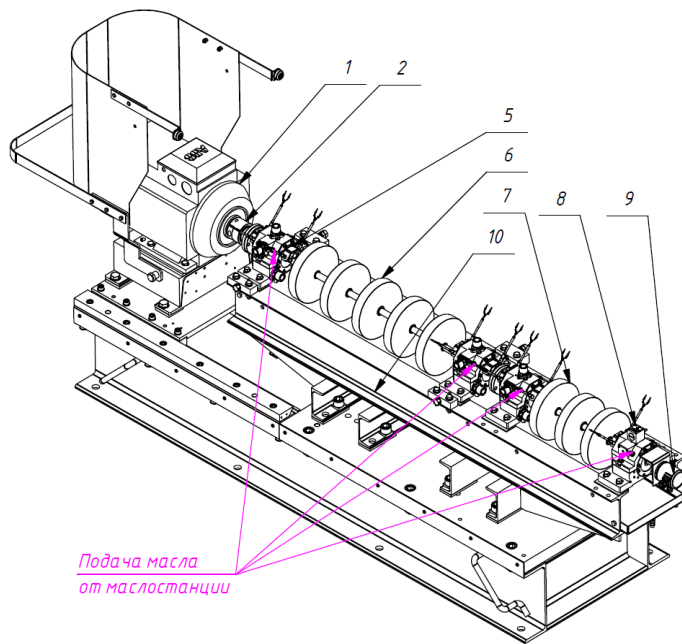
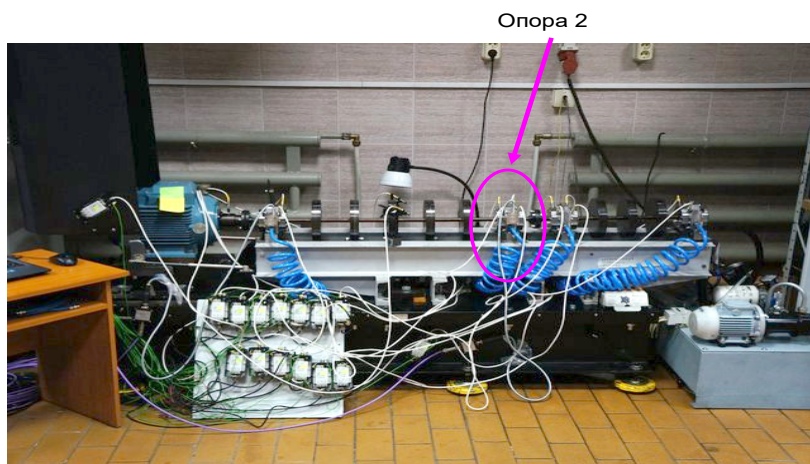


# Математическое моделирование





# Использование испытательного многоопорного стенда

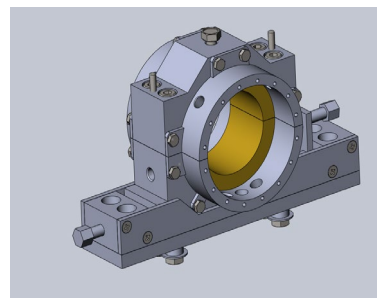


Общий вид испытательного стенда, оснащенного системой измерений.



Голубые гибкие шланги – подвод масла к подшипникам.

Стенд разработан д.т.н. Куменко А.И.



# Предиктивная аналитика

## Математические методы

**Обработка (фильтрация сигналов)**

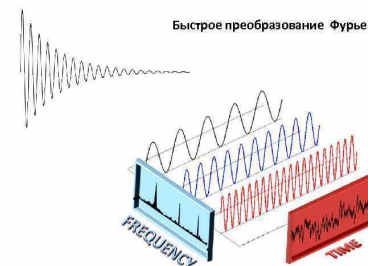
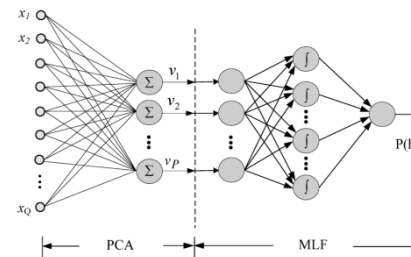
**Применение метода главных компонент для мониторинга состояния системы**

**Быстрого преобразования Фурье** выявление образования задиров в несущих подшипниках ротора (задиры при работе роторов могут служить основной причиной аварийной ситуации)

**Искусственный интеллект**

**Многокритериальная оптимизация**

Создание гибридных интеллектуальных систем поддержки принятия решений



# Предиктивная аналитика

## Применение метода главных компонент

**Матрица  $X$**  размерности  $n \times m$

$n$  – число наблюдений

$m$  – число признаков (измеряемых величин).

$$C = \frac{X^T X}{n} - \mu^T \mu, \mu = (\mu_1 \dots \mu_m)$$

$\mu_i$  – среднее значение признака  $i$

Вариация  $j$ -го признака:

$$\text{Var}(x^j) = c_{jj}$$

Найдем ортогональные векторы т.ч.

$$v^T C v \rightarrow \max$$

Общая вариация данных:

$$\text{Var}(X) = \sum_{j=1}^m c_{jj}$$

Представим  $C$  в виде  
 $C = V \Lambda V^T$

$$\Lambda = \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \lambda_2 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & \lambda_m \end{bmatrix}$$

$\lambda$  – собственные значения матрицы  $C$

$$\lambda_1 > \lambda_2 \geq \dots \geq \lambda_m \geq 0$$

$V$  – матрица собственных векторов матрицы  $C$

Итак главные компоненты можно записать в виде:

$$U = X \cdot [v^1, v^2, \dots, v^k]^T, k < m$$

при этом доля объясненной вариации зависит от выбранного количества главных компонент  $k$

$$\frac{\sum_{i=1}^k \lambda_i}{\text{Var}(X)}$$

# Предиктивная аналитика

## Диагностика задевания ротора за статор в машинах и механизмах

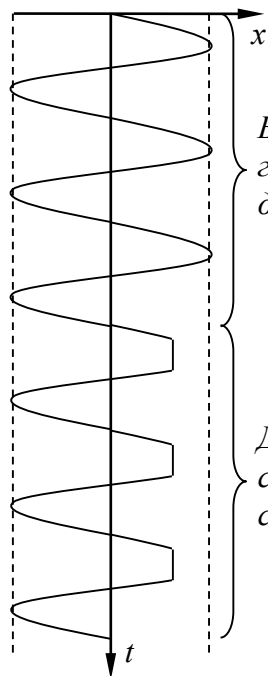
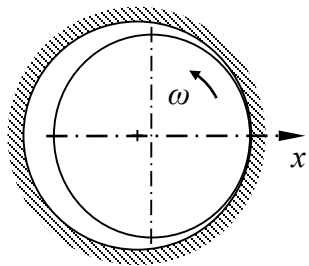


Рис.1

Ротор под действием собственной неуравновешенности совершает синхронную прецессию. А при возросшей неуравновешенности он входит в соприкосновение со статором один раз в пределах одного своего оборота (рис.1).

Роторное движение в плоскости представляет собой «усеченные» колебания с частотой вращения  $\omega$ , при которых перемещение изменяется в пределах от  $\delta$  до  $-1$  (рис.2):

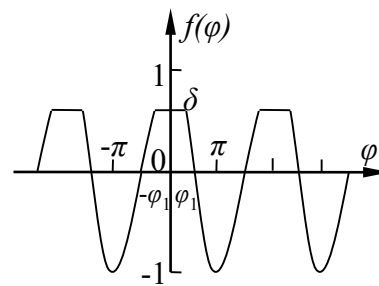


Рис.2

$$f(\omega) = \delta \quad \text{при} \quad -\varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_1,$$

$$f(\omega) = \cos \varphi \quad \text{при} \quad \varphi_1 < \varphi < -\varphi_1.$$

Здесь  $\delta$  – уровень ограничения колебаний ротора вследствие его задевания за статор,  $\varphi$  – угловая координата.

Причем  $\delta = \cos \varphi_1$ ,  $\varphi_1$  – половина длины дуги контакта на роторе.

Функцию  $f(\omega)$ , описывающую «усеченные» колебания ротора, можно представить в виде разложения в ряд Фурье:

$$f(\omega) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t.$$

Здесь  $a_0/2$  – среднее или статическая составляющая  $f(\omega)$  и

$$a_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\varphi_1} \delta \cos n\varphi d\varphi + \frac{2}{\pi} \int_{\varphi_1}^{\pi} \cos \varphi \cos n\varphi d\varphi.$$



# Спектр-признак задевания ротора за статор в машинах и механизмах

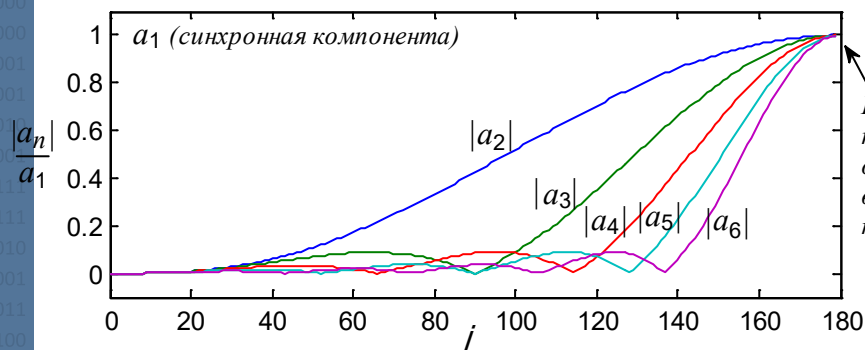
В зависимости от  $\varphi_1$  могут быть рассчитаны статическая составляющая:  $\frac{a_0}{2} = \frac{\varphi_1 \cos \varphi_1 - \sin \varphi_1}{\pi}$ ,

амплитуда синхронной составляющей:  $a_1 = 1 - \frac{\varphi_1}{\pi} + \frac{\sin 2\varphi_1}{2\pi}$ ,

амплитуды высших гармоник:  $a_n = \frac{2 \cos n\varphi_1 \sin \varphi_1}{\pi (n^2 - 1)} - \frac{2 \sin n\varphi_1 \cos \varphi_1}{\pi n(n^2 - 1)}$ , где  $n = 2, 3, \dots$

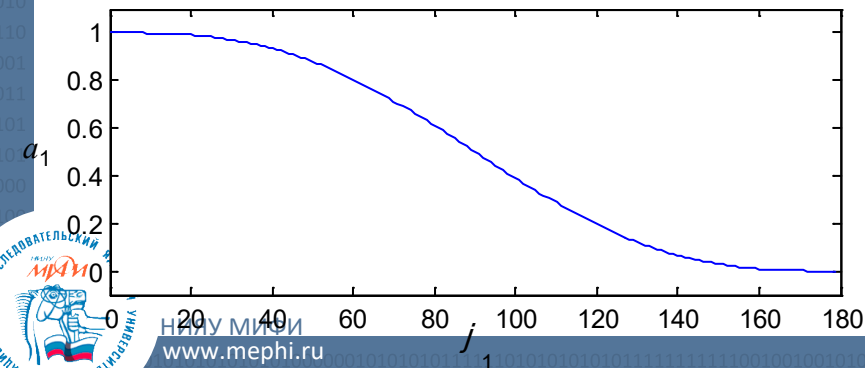
Графики зависимостей относительных амплитуд высших гармоник и амплитуды синхронной составляющей колебательного процесса от половины длины дуги контакта на роторе  $\varphi_1$ :

Относительные амплитуды

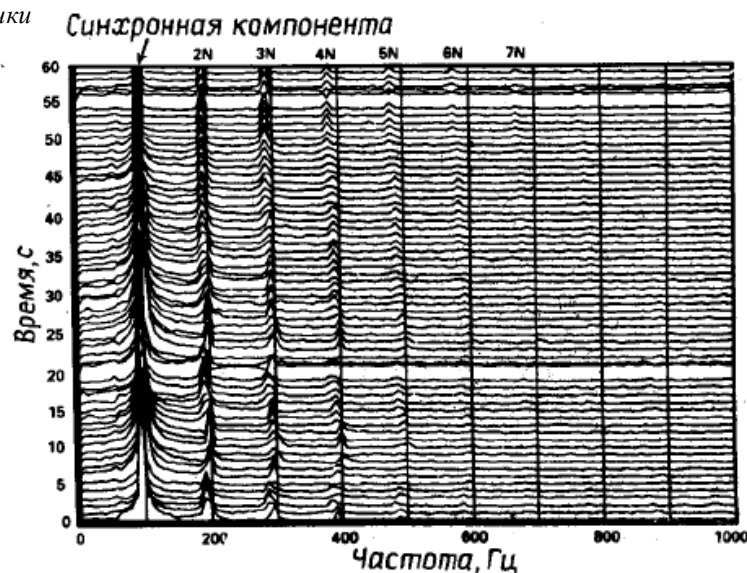


При контакте вдоль половины длины окружности и больше высшие гармоники не появляются

Амплитуда синхронной компоненты



Эволюция во времени частот сигнала с акселерометра при работе турбины в условиях задевания ротора в месте уплотнения, причем как показал разбор, в пределах дуги длиной  $135^\circ$





# Предиктивная аналитика

## Искусственный интеллект

### Метод MSET (Multivariate State Estimation Technique).

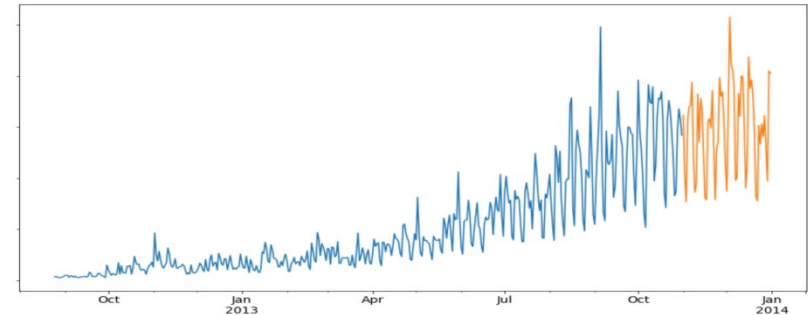
Сравнение наблюдаемых значений показателей с прогнозом и анализ рассогласований между ними.

Нетипичные рассогласования могут свидетельствовать об аномальном поведении объекта.



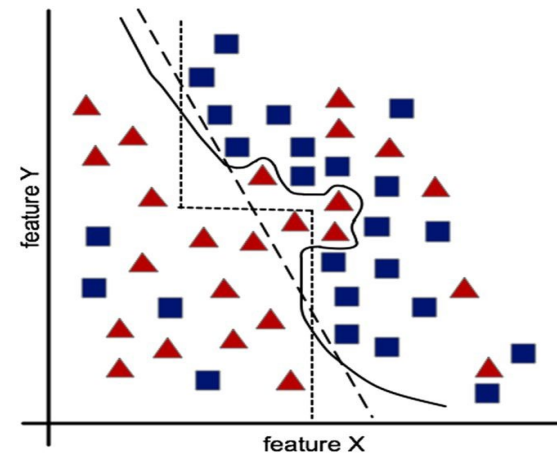
**Регрессионные модели.** Моделирование и прогнозирование показателей функционирования объекта и времени до аварии (Remaining Useful Lifetime).

Предиктивный анализ проводится на основе сравнения прогнозных значений с номинальными (в т.ч. с заданными уставками).



**Методы классификации** (байесовская классификация, логистическая регрессия, деревья решений и др.).

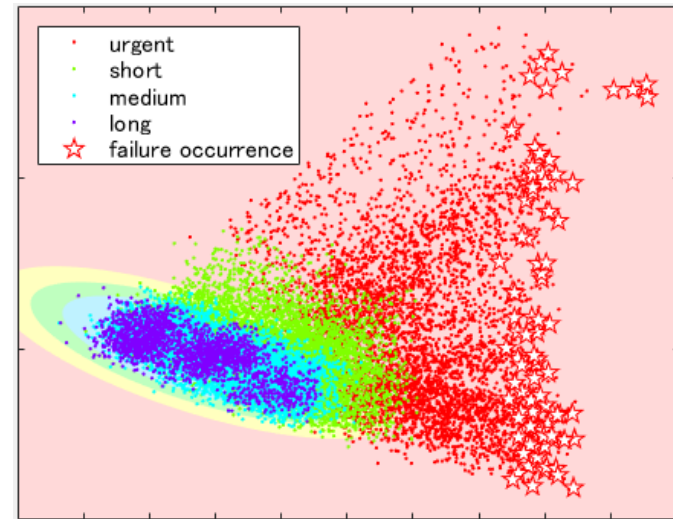
Классификация состояния объекта и оценка степени аномальности функционирования в каждый момент времени.



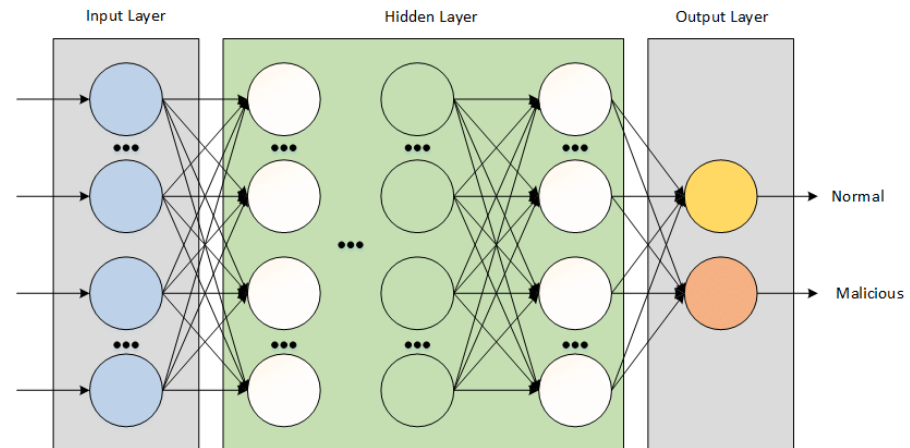
# Предиктивная аналитика

## Искусственный интеллект

**Машинное обучение без учителя.** Автоматическая детекция аномалий в данных о функционировании объекта. Использование кластерного анализа для предсказания типа аномалий.



**Нейросетевые модели и глубокое обучение.** Разработка нейронных сетей для распознавания типа аномальности и прогноза времени до наступления аварийной ситуации.



**Гибридные методы.** Сочетание экспертных знаний, анализа исторических данных о функционировании объекта и моделей машинного обучения, в т.ч. нейросетевых.

# предложение



- **Обобщить современные достижения в области** диагностики состояния и прогноза аварийности высоковольтных вращательных машин.
- Создать адекватную **математическую модель** высоковольтных вращательных машин
- Для отладки математических моделей создать стенд высоковольтных вращательных машин
- **Проанализировать** имеющуюся систему контроля работы высоковольтных вращательных машин и при необходимости дооснастить дополнительными датчиками измерения.
- На основе математической модели и систем искусственного интеллекта **разработать систему диагностики и предсказания аварийных ситуаций** для высоковольтных вращательных машин



1. Виброакустическая диагностика статора на работающем генераторе.
2. Диагностика целостности валопровода турбоагрегата по крутильным колебаниям вала.
3. Диагностика герметичности каналов водяного охлаждения обмоток статоров ТГ.
4. Диагностика проходимости каналов водяного охлаждения обмоток статоров ТГ по показаниям штатных приборов.
5. Диагностика витковых замыканий в обмотке ротора турбогенератора по показаниям штатных приборов.

# Виброакустическая диагностика статоров турбогенераторов

## Объект диагностики:

дефекты ослабления креплений элементов статора



сердечник



обмотка



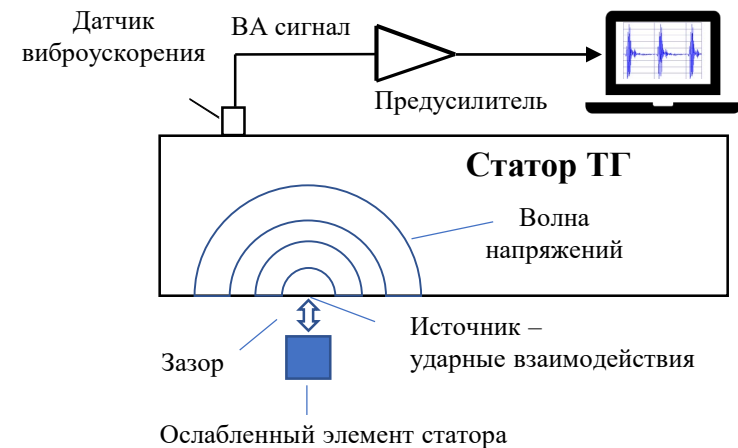
шины обмотки



крайние пакеты

## Источник информации

Виброударные процессы в ослабленных узлах крепления элементов статора

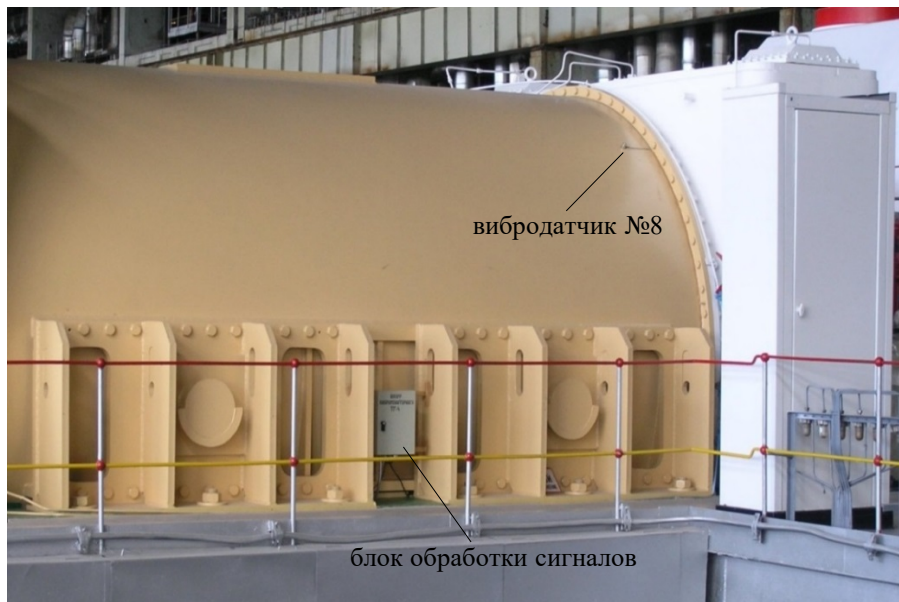


## Научное обеспечение метода

- Диагностическая модель виброакустических колебаний статора (дисс. д.т.н. Назолина А.Л. 2013 г.).
- Инновационные технологии диагностики - 5 патентов РФ.

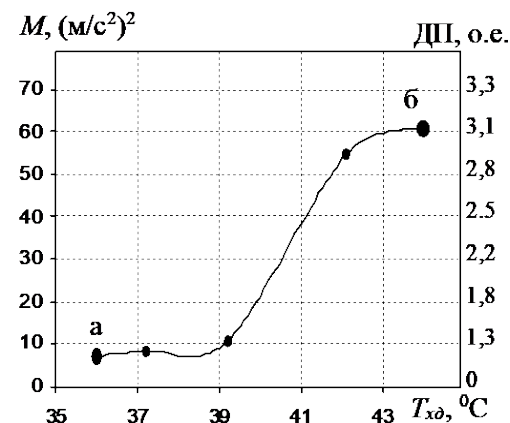
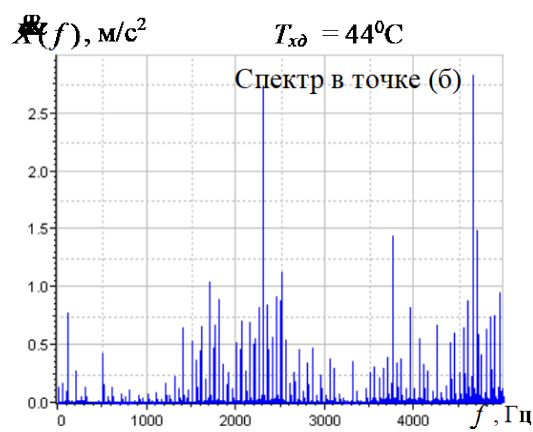
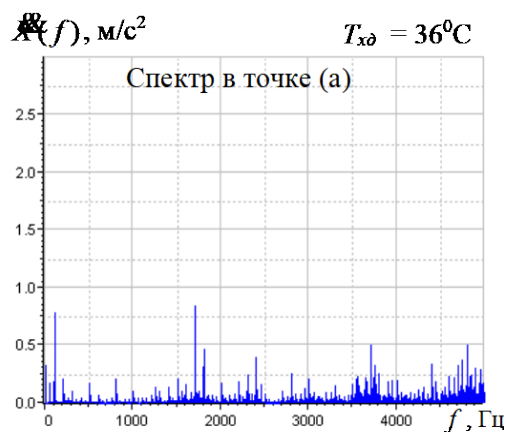


# Программно-технический комплекс виброакустического мониторинга дефектов статора, ПТК «МоДеСт»



## Характеристики ПТК «МоДеСт»:

1. Обнаружение и распознавание виброударных дефектов ослабления креплений элементов статора по спектру виброускорения обшивки корпуса статора работающего турбогенератора.
2. Оценка интенсивности и продолжительности ударных процессов.
3. Оценка значимости дефектов и скорости их развития.
4. Ресурсосберегающая технология эксплуатации турбогенераторов, основанная на возможности управления развитием дефектов.
5. Локация дефектов, выдача целеуказания на устранение во время ППР.
6. Оценка качества сборки и ремонтных работ.



Статор с дефектом ослабления креплений лобовых частей обмотки. Режим Р = 300 МВт, Q = 120 МВАр.

$T_{хд}$  - температура холодного дистиллята обмотки статора.



# Диагностика целостности валопровода по крутильным колебаниям вала (ККВ)

## Объект диагностики:

- трещины усталости валопровода,
- ослабление жесткости муфтовых соединений.

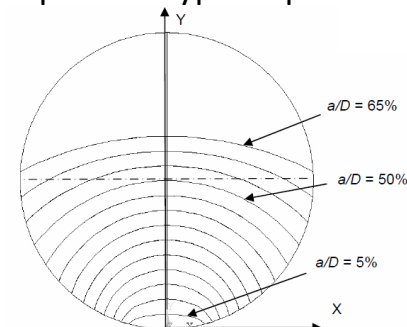
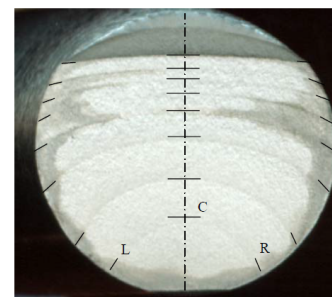


## Научное обеспечение метода

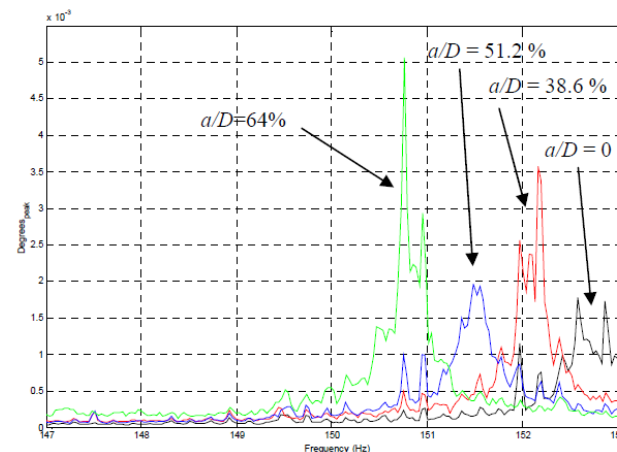
- Диагностическая модель крутильных колебаний валопровода ТА.
- Алгоритм оценки ККВ методом временных интервалов.
- Инновационные технологии диагностики - 3 патента РФ.

## Источник информации

Уменьшение значений собственных частот ККВ в стационарных режимах работы турбоагрегата



Рост площади трещины усталости



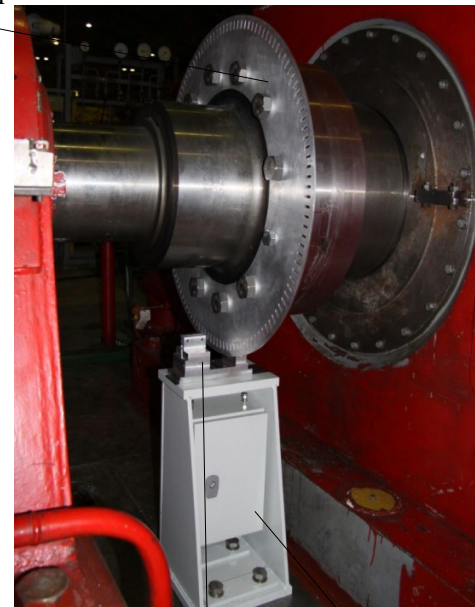
Уменьшение собственной частоты ККВ

Lebold, M.S., Maynard, K.P., Trethewey, M.W., Bieryla, D.J., Conference, held in Chicago, IL, August 18-20. Lissenden, C.J., Tossot, S.P., Verrier, P. & Metz, J. (2003). Technology development for shaft crack detection in rotating equipment, EPRI International Maintenance

# Программно-технический комплекс мониторинга дефектов ротора турбоагрегата по ККВ, ПТК «МоДеРо»

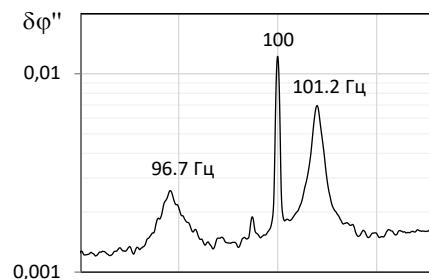


Измерительный диск

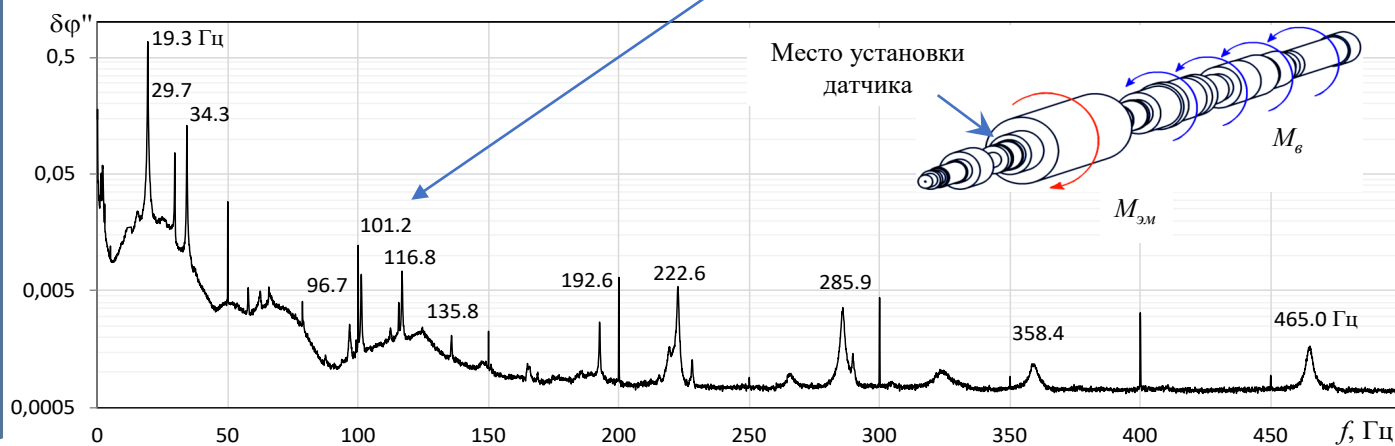


Оптический датчик

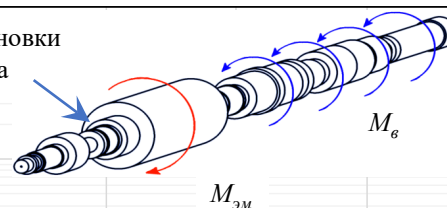
Блок обработки сигналов



Спектр ККВ турбоагрегата 300 МВт

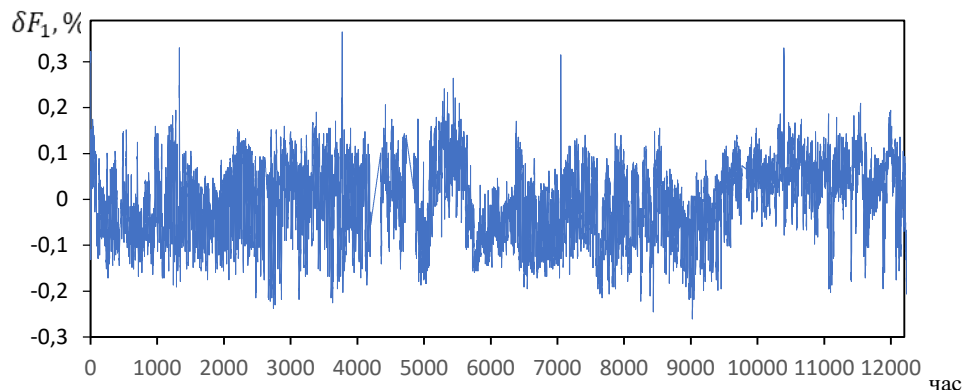


Место установки датчика

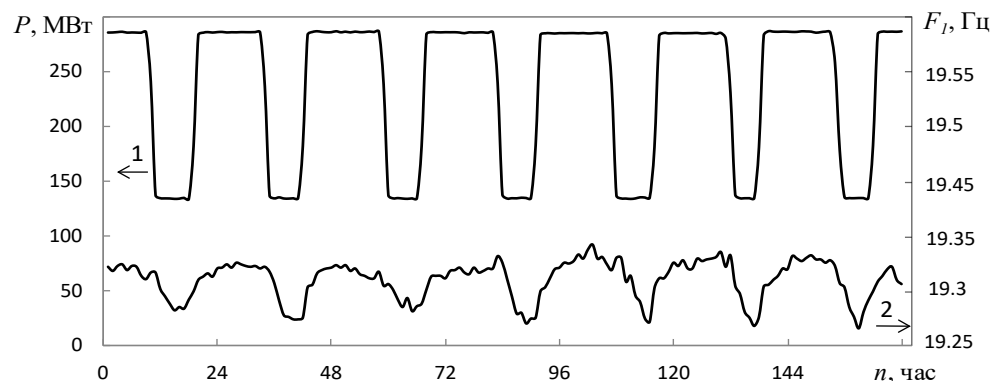


# ПТК «МоДеРо» на турбоагрегате 300 МВт

## Результаты мониторинга



Вариации 1-й СЧ ККВ турбоагрегата 300 МВт за 2 года



Влияние режима работы на 1-ю СЧ ККВ ТА 300 МВт

## Характеристики ПТК «МоДеРо»:

1. Регистрация более 10 собственных частот ККВ до 450 Гц во всех режимах работы турбоагрегата.
2. Обнаружение дефектов целостности валопровода по изменению параметров собственных частот ККВ в стационарных режимах работы.
3. Локация дефектов целостности валопровода, выдача целеуказания на устранение во время ППР.
4. Алгоритм повышения точности оценки собственных частот ККВ, позволяющий обнаруживать усталостные трещины вала всех видов, в том числе кольцевые, начиная с 2-5 % площади сечения вала.
5. Оценка значимости и скорости развития дефекта.
6. Оценка качества сборки и ремонтных работ.



# Методы оперативной диагностики турбогенераторов на основе штатных средств измерения

## Метод диагностики проходимости

Позволяет на работающем генераторе по данным измерения температур стержней определять косвенным методом:

- Реальный расход охлаждающего дистиллята по стержню с точностью около 10 % от номинального значения, что позволяет эффективно контролировать степень засорения каналов охлаждения. Стержни со снижением расхода дистиллята ниже технической нормы завода-изготовителя обнаруживаются практически на каждом третьем генераторе.
- Состояние клиновки обмотки статора по результатам измерения чувствительности уложенных на изоляцию ТС.
- Качество укладки ТС на боковой поверхности нижнего стержня на турбогенераторах более 800 МВт. Нижние стержни с отсутствием теплового контроля из-за дефектов укладки штатных ТС обнаруживаются практически на каждом генераторе до 5 штук и более.

## Метод диагностики герметичности

основан на измерении высокоточными приборами концентрации растворенного в дистилляте водорода на сливном и напорном трубопроводах во время работы турбогенератора. Позволяет:

- Определить разгерметизацию задолго до появления пузырьков водорода в штатной газовой ловушке.
- Определить место разгерметизации по длине обмотки.
- На основе анализа полученных результатов определить оптимальные условия дальнейшей эксплуатации, способные предотвратить ускоренное развитие дефекта.

## Метод диагностики витковых замыканий

- Позволяет на генераторе с форсированным охлаждением обмотки ротора, работающем с нагрузкой, близкой к номинальной, определять наличие и количество витковых замыканий в обмотке ротора с точностью до 1-го витка.
- В расчетах используются показания штатных средств измерений тока ротора, токов, напряжений, коэффициента мощности и частоты тока статора.
- Высокая разрешающая способность обеспечивается применением специальных математических методов для подавления случайных и систематических погрешностей измерений.



010101  
000100  
100100  
101010  
101010  
100000  
010101  
010111  
111010  
101010  
011111  
111111  
100100  
100101  
010001  
010010  
101010  
010100  
101010  
010100  
100000  
010000  
111001  
010001  
000010  
100001  
011111  
111111  
101010  
101001  
001011  
111100  
100010  
001010  
111110  
000001  
001011  
010101  
010101  
010000  
111100

**Спасибо за внимание**

