

# Модальный анализ лобовых частей турбогенератора для уточнения моделей предиктивной вибродиагностики

Сергей Кулаков

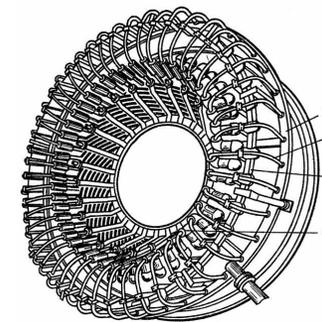


# ВИБРАЦИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

## Описание проблемы

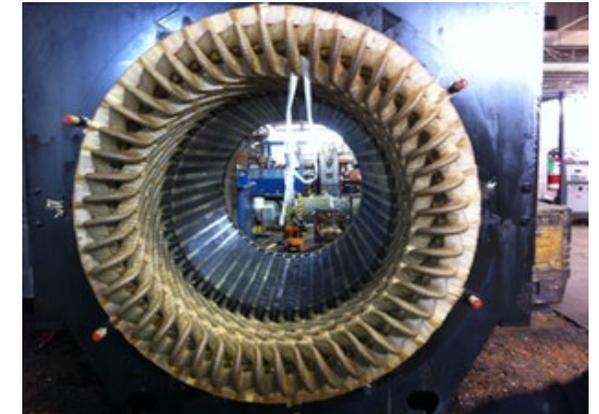
### Особенности

- Конструкция должна быть достаточно **ЖЕСТКОЙ** для предотвращения движения в нормальных и аварийных условиях
- Конструкция должны быть достаточно  **ГИБКОЙ** для разрешения теплового расширения во всех направлениях



Общий вид лобовой части обмотки статора турбогенератора серии ТБВ:  
1 – коллектор холодной воды,  
2 – гибкие изолирующие шланги,  
3 – коллектор горячей воды,  
4 – водораспределительные шланги

MyShared 6



### Причины

- Ослабление поддержки из-за механического старения и теплового расширения
- Плохая конструкция крепления -> резонансы на основной гармонике и кратным частоте сети 100/120 Гц
- КЗ в результате отклонений
- Механические задиры

### Последствия

- Износ изоляции, усталостные трещины в медных проводниках
- Дуговые токи, замыкание статора на землю



# ВИБРАЦИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

## Описание проблемы

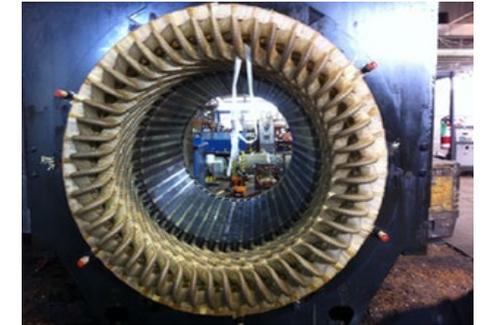
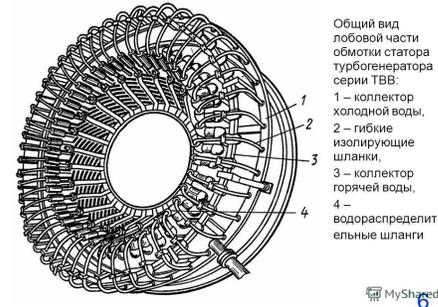
**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*

### Особенности

- Конструкция должна быть достаточно **ЖЕСТКОЙ** для предотвращения движения в нормальных и аварийных условиях
- Конструкция должны быть достаточно **ГИБКОЙ** для разрешения теплового расширения во всех направлениях

### Причины

- Ослабление поддержки лобовых частей из-за механического старения и теплового расширения
- Плохая конструкция крепления в условиях близких к резонансу на основной гармонике и двойной частоты сети 100/120 Гц
- КЗ в результате отклонений компонентов за их механические пределы
- Относительное движение компонентов вызывает истирание изоляции катушек обмотки



### Последствия

- Износ изоляции, усталостные трещины в медных проводниках
- Дуговые токи, замыкание статора на землю



### Недостатки существующего подхода

- Эффективным методом контроля является постоянное отслеживание уровня и частоты вибрации с использованием волоконно-оптических акселерометров, но они часто дают ложные показания

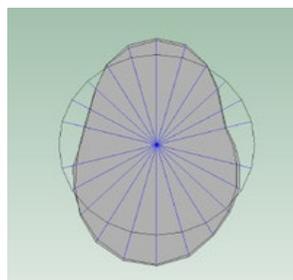
# ВИБРАЦИЯ ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ТУРБОГЕНЕРАТОРА

Модальные испытания для определения точек вибромониторинга

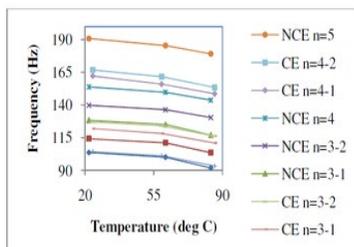
SIEMENS

Ingenuity for life

## Результаты модальных испытаний



Наложение форм 13,8 кВт  
4-полюсного статора в хол.  
и гор. режимах n= 1



Изменения собственных частот на хол. и гор. режимах

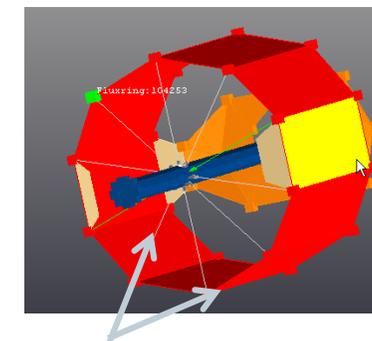
Mode	Non Connection End Mode Shape Frequency (Hz)		
	Cold (22°C)	Warm (61°C)	Hot (84-76°C)
n=1	103.66	100.13	91.87
n=2	114.25	111.12	103.59
n=3	128.38	125.12	117.13
n=3	139.8	136.44	130.39
n=4	153.83	149.7	143.79
n=5	190.72	185.4	179.11

- Собственные частоты лобовой части снизились на 9-12 Гц при изменении температуры с 22 оС до 85 оС
- Узловые точки формы колебаний при этом не изменяются!
- Это важно для выбора точных мест установки оптических датчиков вибрации постоянного мониторинга



## Возможности Simcenter Testing

- Анализ форм вынужденных колебаний на рабочей машине
- Анализ форм собственных колебаний на рабочей машине
- Сравнение вынужденных и собственных форм
- Экспериментальное моделирование модификаций (рекомендации подкрепления, повышения жесткости, смещения собственных частот из зоны вынужденных колебаний 100/120Гц)

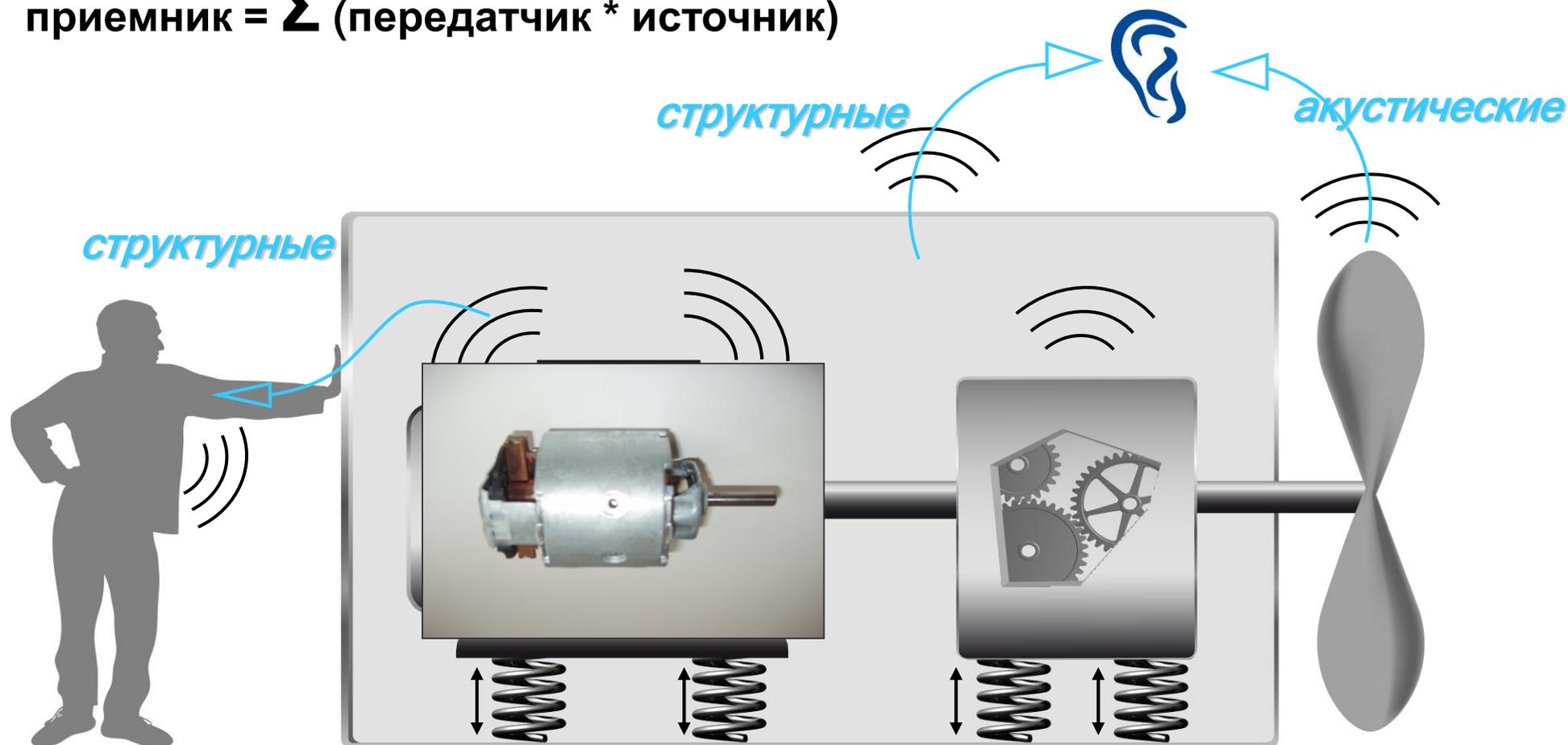


Изменить жесткость на  $+\Delta k$

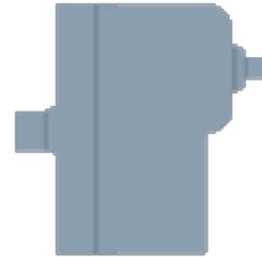
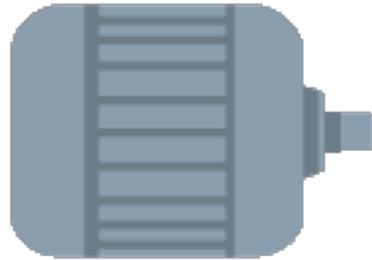
# Экспериментальный анализ вибрации и шума

## Системный подход

приемник =  $\Sigma$  (передатчик \* источник)



# Типичные и трудно диагностируемые источники неисправностей приводной системы



- Неисправность системы охлаждения
- Перебои питания системы управления
- Ошибки системы управления
- Неисправность трансформатора
- Неисправность конденсаторов
- Заземление

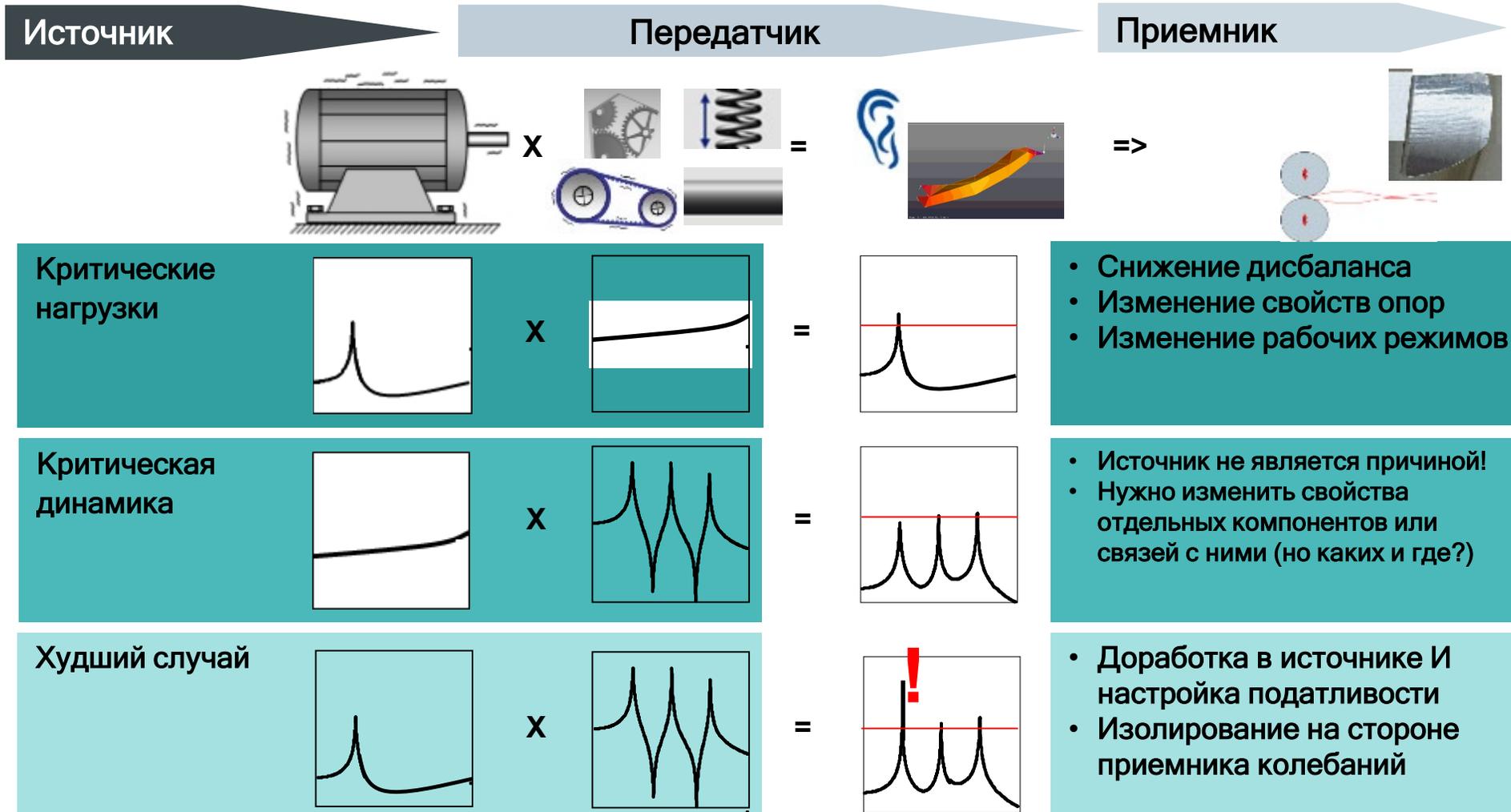
- Ослабление крепления
- Выпадение пазовых клиньев
- Неисправности обмотки статора
- Дисбаланс
- Изменение жесткости опор
- Вибрации ротора

- Неисправность подшипников
- Несоосность
- Дефекты зацепления
- Собственные колебания
- Крутильные колебания
- Повышенная нагруженность приводящая к выкрашиванию зубьев

- Проблемы с лопатками
- Резонанс
- Связанный резонанс
- Высокий уровень шума
- Упругие колебания

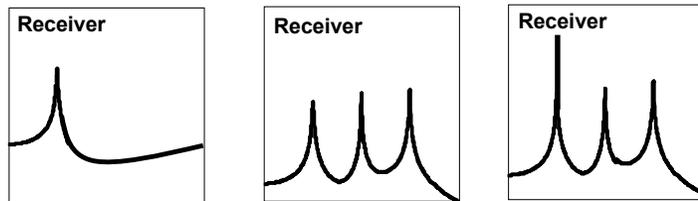
# Причинно-следственный анализ вибрации и шума

## Инженерный подход



# Причинно-следственный анализ вибрации и шума

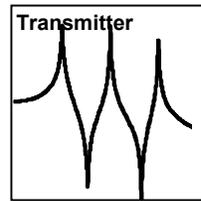
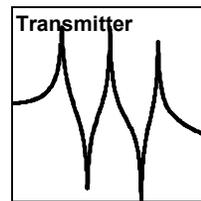
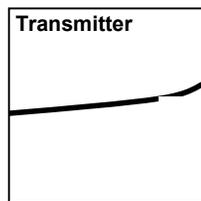
## Методы измерений и анализа



=

=

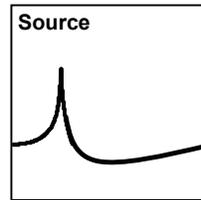
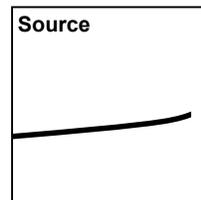
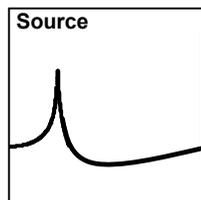
=



X

X

X



Критические нагрузки

Критическая динамика

Наихудший сценарий

### Измерения в рабочих условиях

Гармонический анализ  
Спектральный анализ  
Октавный анализ  
Фильтрация и аудио-воспроизв-е

Анимация во временной области  
Анализ вынужденных колебаний  
Когерентный анализ  
Анализ огибающей  
Частотно-временной анализ

### Анализ динамики системы

Измерения передаточных ф-ий  
Модальный анализ

Автоматический модальный анализ  
Операционный модальный анализ

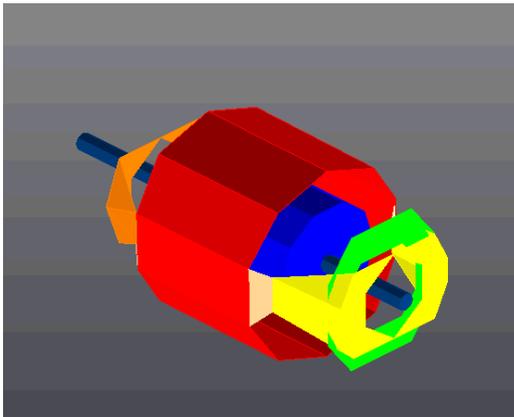
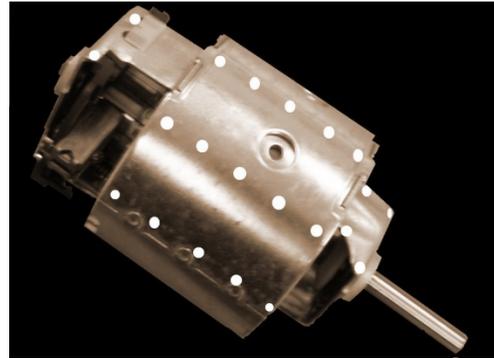
### Идентификация нагрузок

Гармонический анализ  
Спектральный анализ  
Когерентный анализ

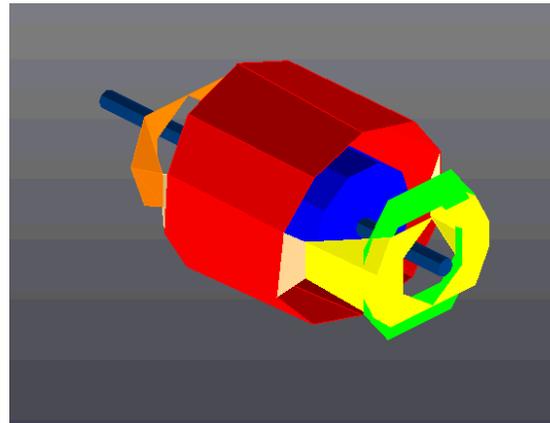
Частотно-временной анализ  
Анализ вынужденных колебаний  
Анализ огибающей  
Прямые методы измерения нагрузок  
Обратные методы идентификации нагрузок  
Анализ вклада отдельных нагрузок  
Анализ вклада отдельных путей передачи колебаний

# Экспериментальное моделирование

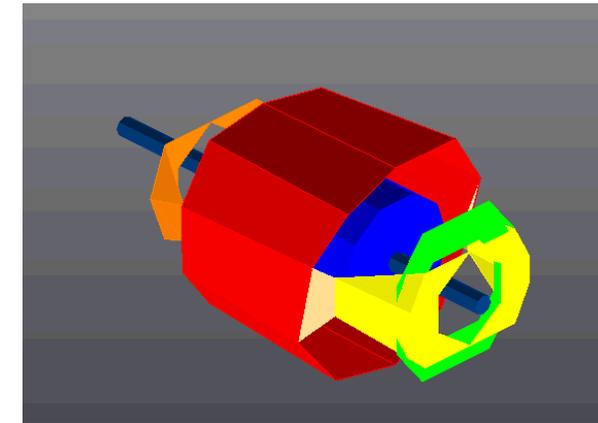
## Пример электродвигателя



**1-й режим работы**  
Нет проблем вибрации



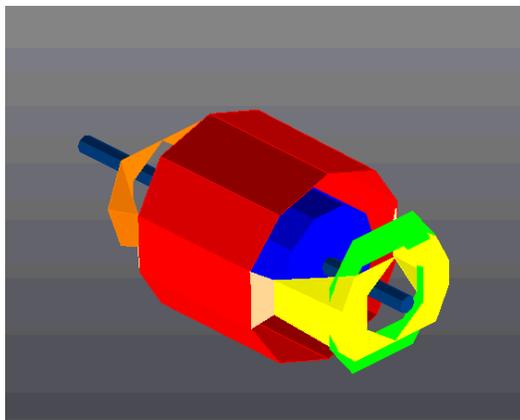
**2-й режим работы**  
Проблема вибрации



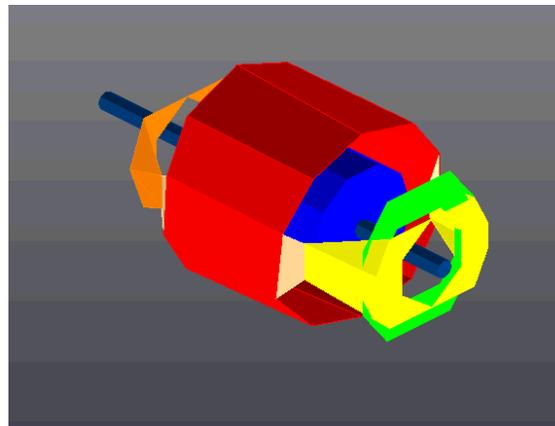
**3-й режим работы**  
Нет проблем вибрации

# Экспериментальное моделирование

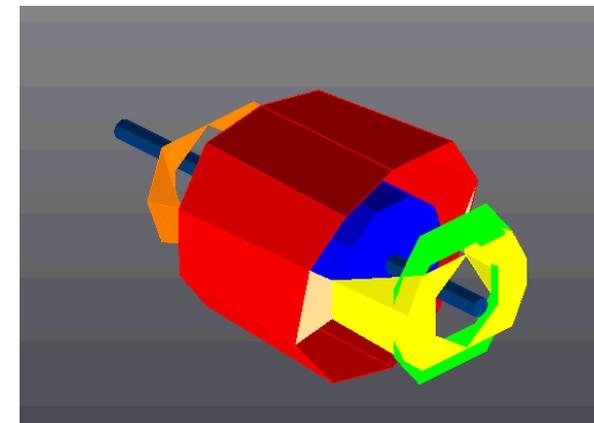
## Пример электродвигателя: Анализ форм вынужденных колебаний



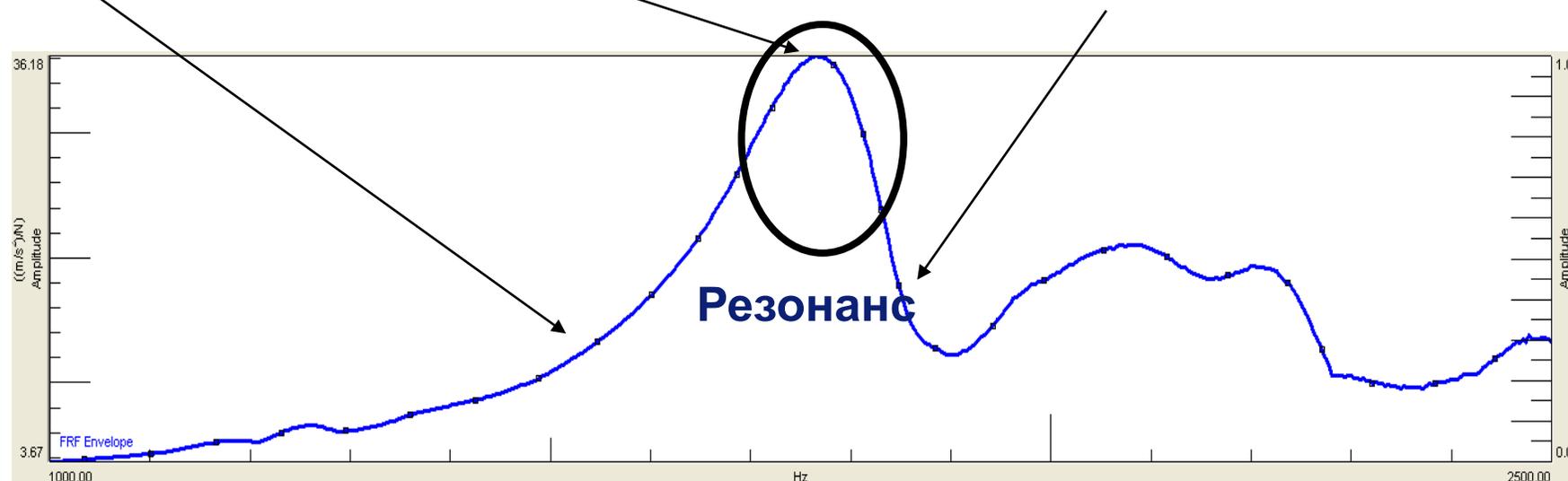
Первый режим



Второй режим



Третий режим

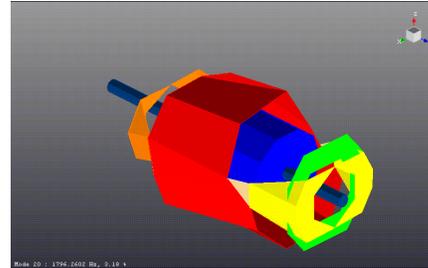


# Модальный анализ и Резонанс

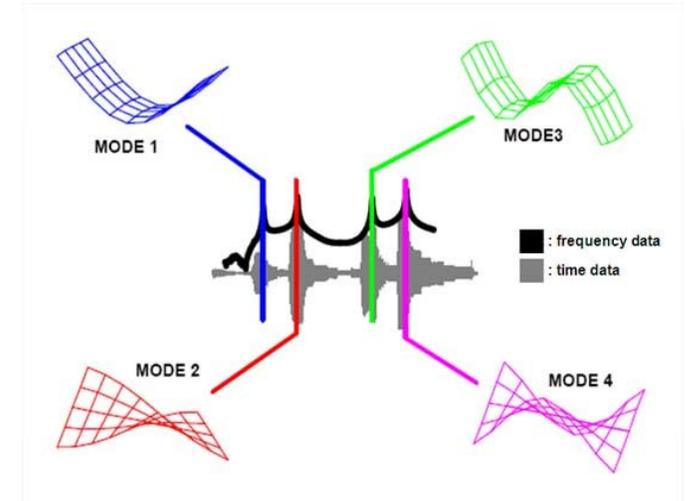
## Пример электродвигателя: сравнение собственных и вынужденных колебаний

Деформация в определенный момент времени = линейная комбинация мод колебаний \* коэффициенты  
Коэффициенты зависят от уровня нагрузки, частоты, демпфирования и формы колебаний в точке приложения нагрузки

### Вынужденные колебания



||



$a_1$

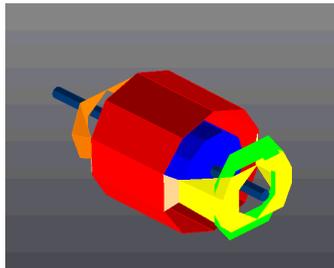
$a_2$

$a_3$

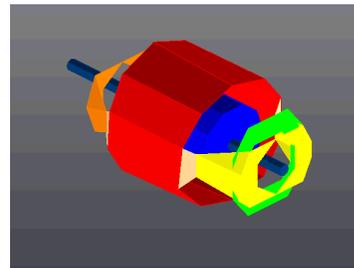
x

x

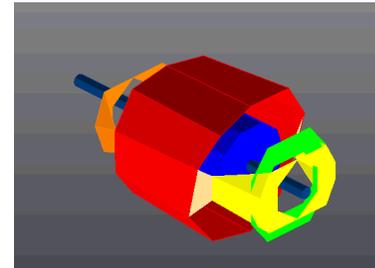
x



+



+



+

...

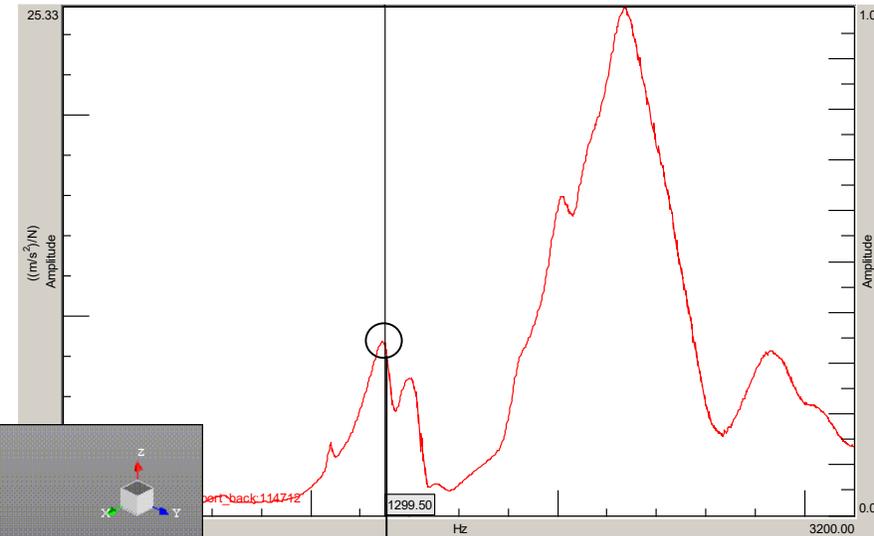
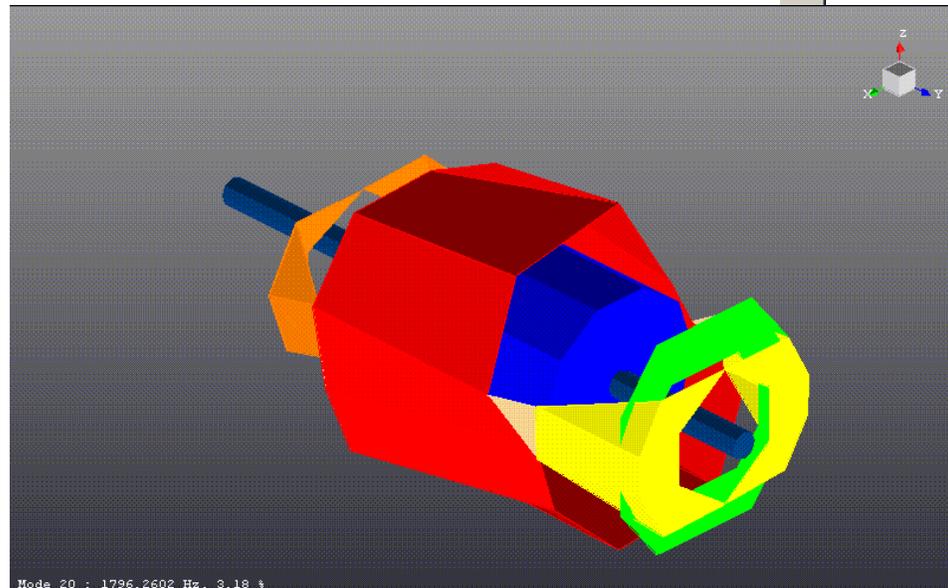
Мода колебаний = Резонанс конструкции

Моды колебаний

# Экспериментальное моделирование

## Пример электродвигателя: Модальный анализ

- Собственные частоты
- Демпфирование
- Собственные формы колебаний
- Обобщенные массы



$\omega_k$

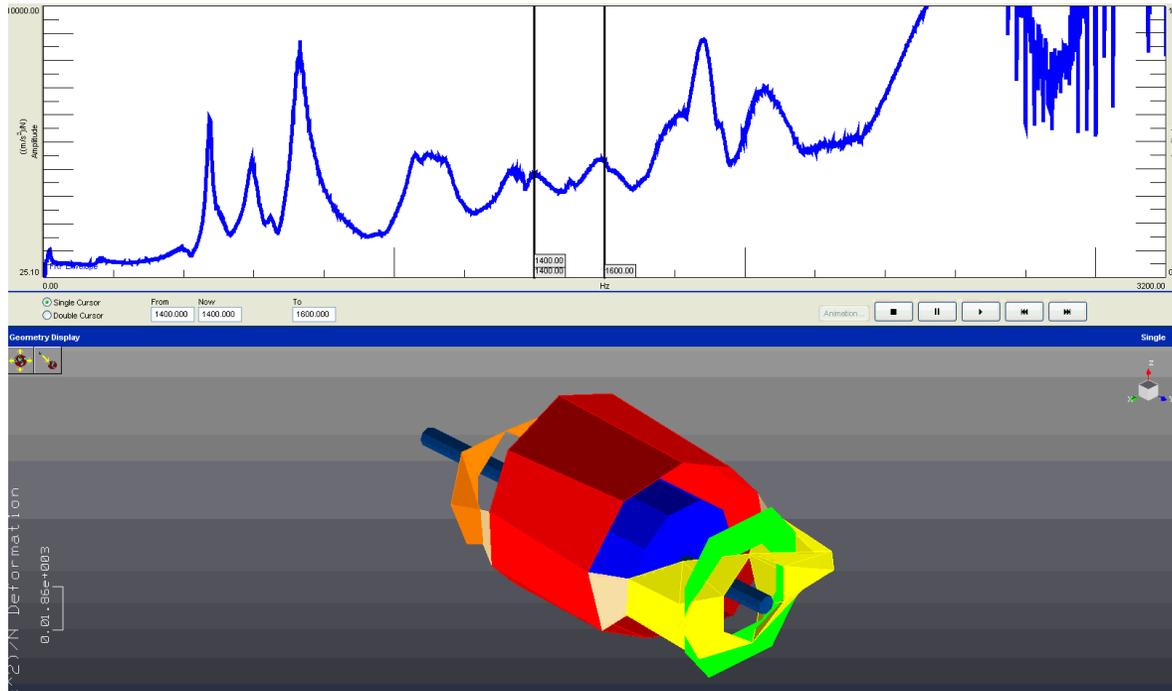
$$H(\omega) = \sum_{k=1}^n \frac{A_k}{j\omega - \lambda_k} + \frac{A_k^*}{j\omega - \lambda_k^*}$$

$$A_k = Q_k \{ \phi_k \} < \phi_k^T >$$

$$\lambda_k, \lambda_k^* = -\zeta_k \omega_k \pm j\sqrt{1 - \zeta_k^2} \omega_k$$

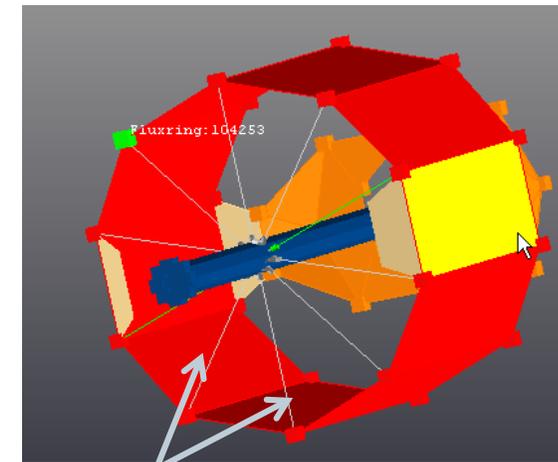
# Экспериментальное моделирование

## Модальные модификации



**Оценка эффекта простых модификаций  
(масса, жесткость, демпфирование и настр.  
амортизатор)**

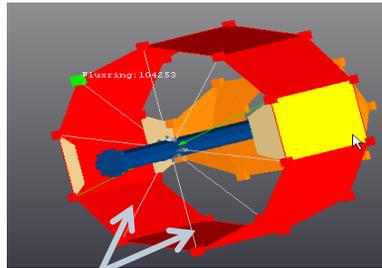
**Цель – повлиять на измерение колебаний в  
критических диапазонах частот.**



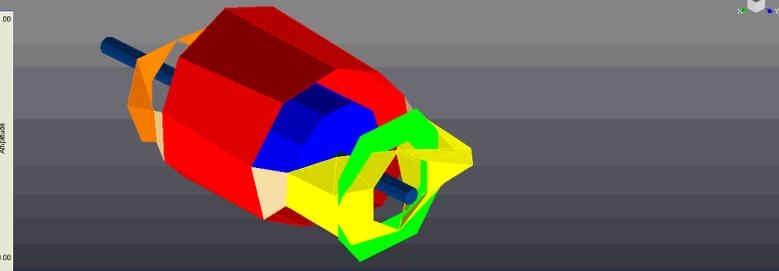
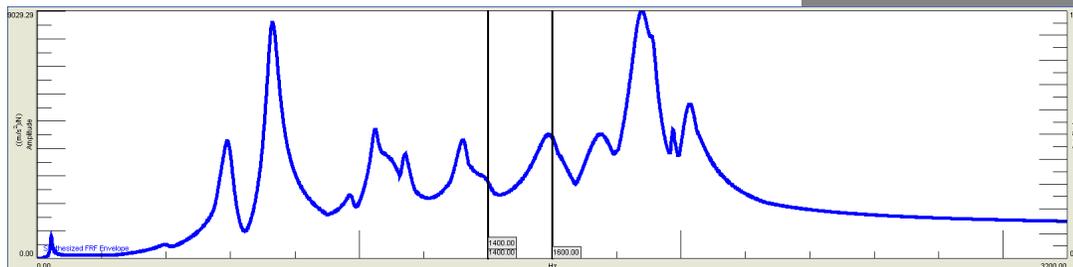
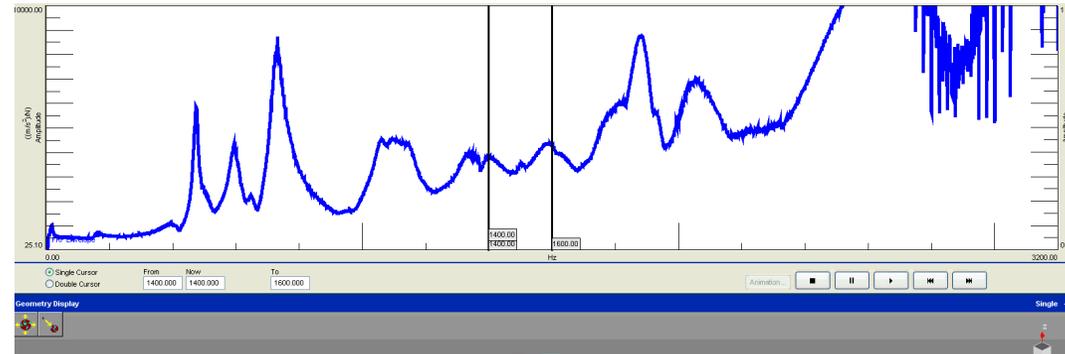
Добавляем жесткость

# Экспериментальное моделирование

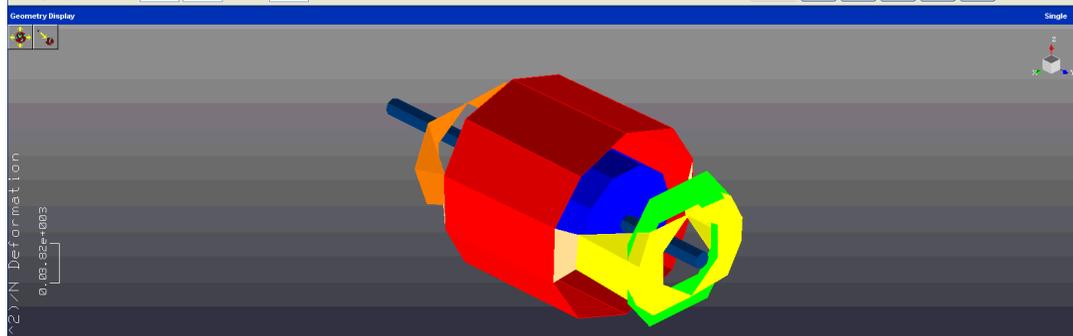
## Модальные модификации



**Добавлена  
жесткость**



**Исходная**



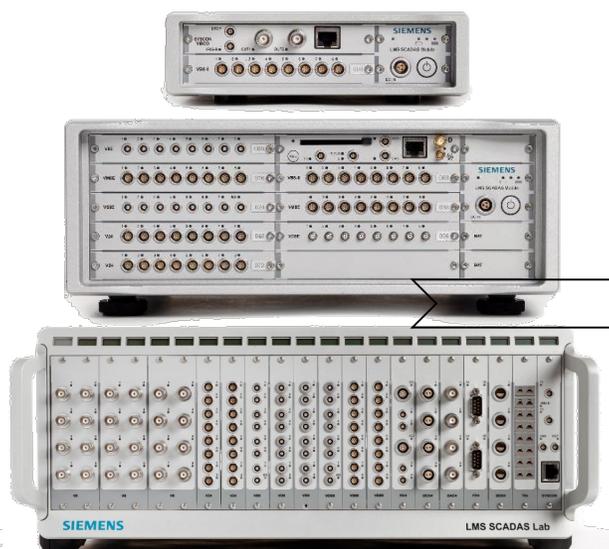
**После  
модификации**

# Типовые инструменты вибродиагностики

**SIEMENS**  
*Ingenuity for Life*

## Производитель оборудования

- ✓ Большое количество каналов
- ✓ Различные типы датчиков
- ✓ Широкие возможности обработки
- ✓ Автоматизированные отчеты
- ✗ Стационарное или ограниченно мобильное исполнение



## Эксплуатант оборудования

- ✓ Наладонные или переносные
- ✓ Вычисления в реальном времени
- ✓ Специализированные функции обработки
- ✗ Обычно 1-4 канала
- ✗ Маленький экран
- ✗ Ограниченная интерпретация результатов
- ✗ Уникальные форматы данных



# LMS SCADAS XS

## Основные характеристики аппаратного обеспечения

**SIEMENS**

*Ingenuity for life*

- ✓ Помещается в кармане
- ✓ Легкий (540 гр)
- ✓ Простота в использовании
- ✓ Автономная работа в течение всего рабочего дня



- 12 V/ICP/TEDS каналы через 4 прочных LEMO разъема
- Headset interface - Digital Head interface - 2 analogue tacho - CAN Bus and GPS



- Компактный размер
- (В 170 мм x Ш 114 мм x Т 23 мм)
- USB, WLAN и LAN

- Встроенная аккумуля. Батарея +6 часов автономной работы
- Хранение данных на SD карте
- «Персональная» (12A) и «Сетевая» (12N) версии

# Различные режимы применения LMS SCADAS XS

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*

Автономно

Планшет

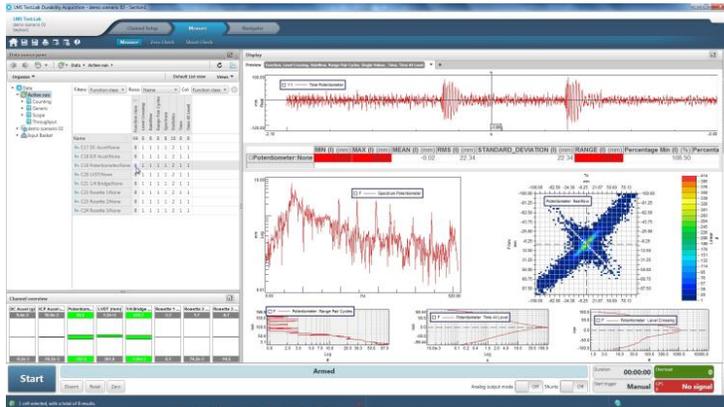
Ноутбук

Распределенные

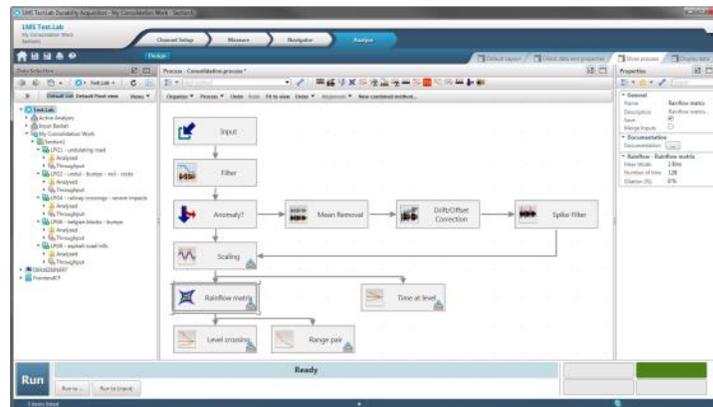


# Анализ вибрации, шума и усталостной долговечности

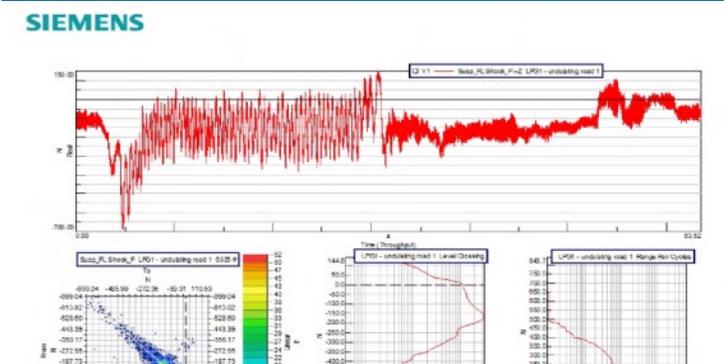
## Специализированные инструменты и методы обработки, анализа и интерпретации результатов



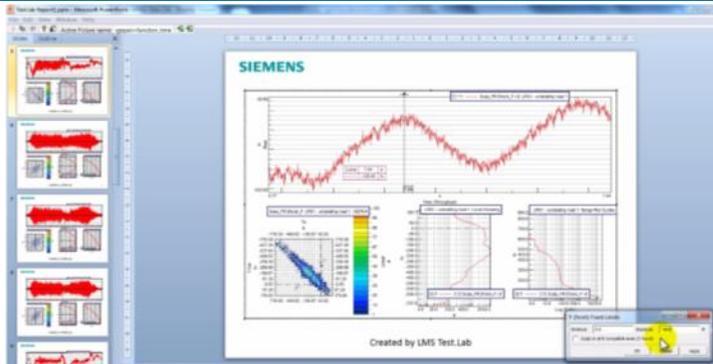
Представление результатов



Пакетная обработка



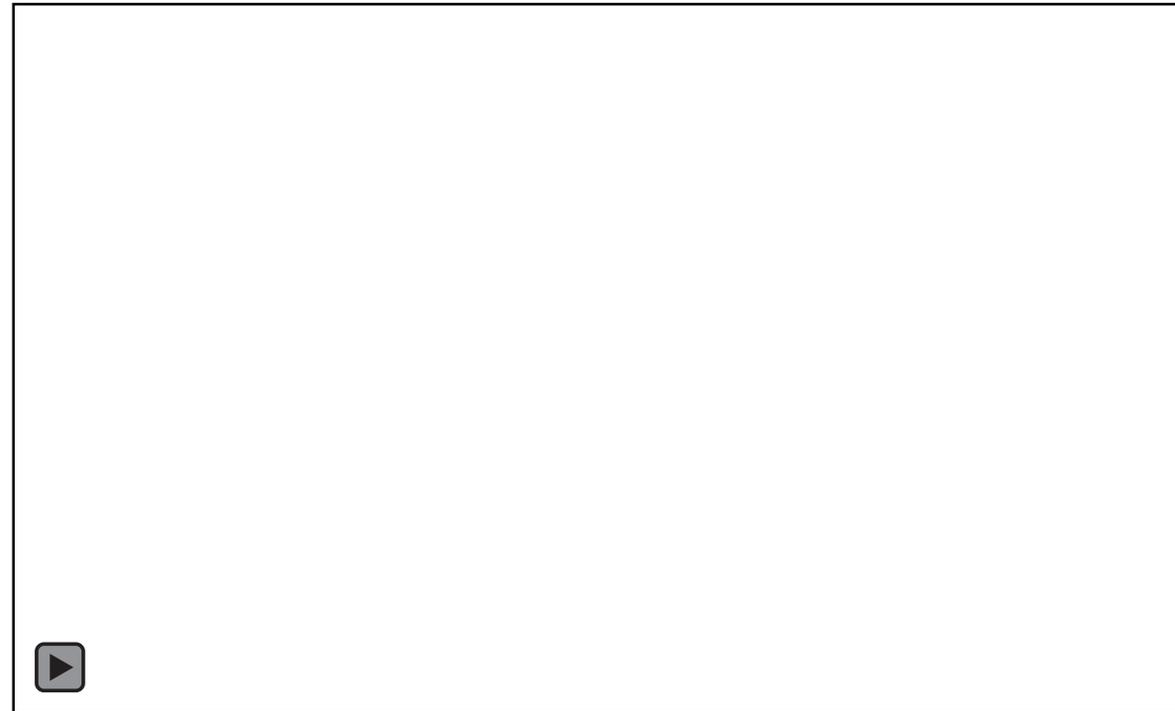
Мощные средства для отчетов



ActiveX Pictures

# Simcenter Sound Camera

От установки до результата меньше 2 мин



# Модульная конструкция камеры Для локализации в ближнем и дальнем поле

**SIEMENS**  
*Ingenuity for life*



**Центральная  
часть**

**Вблизи (<0.5 м)**



**Короткие  
кронштейны**

**Вблизи и на удалении (<1  
м)**



**Длинные кронштейны**

**Вблизи и на удалении (~0.3 м до >2 м)**

**Использование одной модульной конструкции камеры для локализации  
вблизи и на удалении**



# Дополнительный пример: Анализ основных причин возникновения вибрации

Отладка роторных машин на основе результатов испытаний

# Введение. Основные детали и узлы



ВОЗДУХОЗАБОРНЫЕ  
ПАТРУБКИ ОХЛАДИТЕЛЯ

ОХЛАДИТЕЛЬ  
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ

КОМПРЕССОР  
(не рассматривался)

# Введение.

## Описание проблемы

### Информация о проекте

Замена 6 электродвигателей привода газовых компрессоров на различных ГПЗ. Существующие электродвигатели мощностью 24 тыс. л.с. заменялись на новые мощностью 27 тыс. л.с. с массой 82 т. Новые электродвигатели устанавливались на старые фундаменты.

Была проведена замена первого электродвигателя. После монтажа новый электродвигатель испытывал сильную вибрацию, скорость которой превышала предельное значение в **3 мм/с**, заданное в стандарте предприятия.

Изготовителю электродвигателя не удалось воспроизвести проблему

мм/с (0...100 Гц)		Сторона компрессора			Сторона привода		
		Осевая	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	Горизонтальная	Вертикальная
Исходное	Под полной нагрузкой	2,54	4,64	0,84	3,46	5,36	0,55



1

Анализ форм вынужденных колебаний

2

Частотный гармонический анализ

3

Анализ форм собственных колебаний

4

Выводы

# Анализ форм вынужденных колебаний

## Частота 30,17 Гц

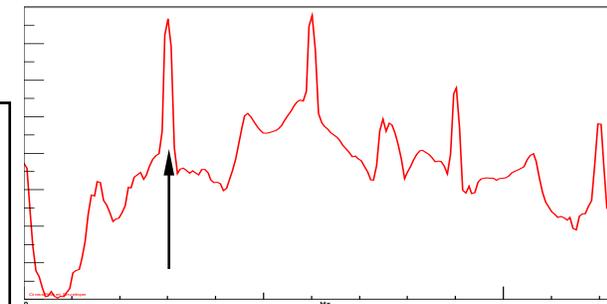
Наблюдается вторая мода поперечных изгибных колебаний агрегата «электродвигатель-охладитель» и колебания охладителя.

Локальная мода воздухозаборников

### Важные примечания

Уровни вибрации левой передней опоры электродвигателя (со стороны компрессора) и бетонного фундамента сильно отличаются.

Электродвигатель плохо закреплен на фундаменте!



1

Анализ форм вынужденных колебаний

2

Частотный гармонический анализ

3

Анализ форм собственных колебаний

4

Выводы

# Частотный гармонический анализ Выключение электродвигателя

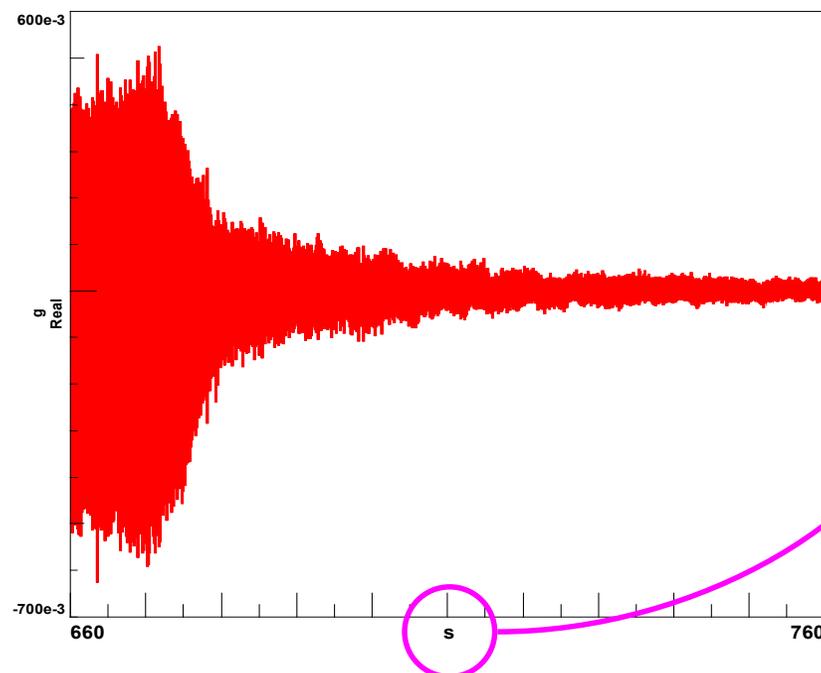
Принцип расчета:

- Анализ частотных характеристик различным шагом по времени (например, 0,5 с)
- Сведение всех результатов измерений частот в единую схему с цветовым кодированием
- Выбег электродвигателя после выключения

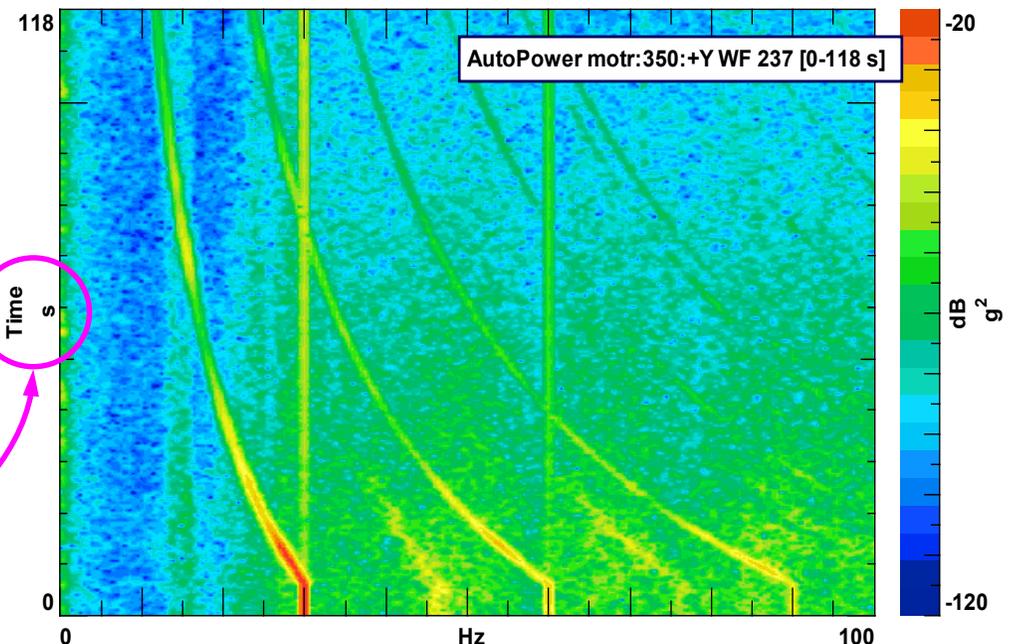
Информация:

- Присутствие важных частот в спектре
- Причины сильных вибраций:
  - Резонансы
  - Большие возбуждающие воздействия

Типичная виброграмма при выключении



Цветовая схема: объединенный спектр колебаний при выключении электродвигателя



# Анализ сигналов с датчиков

## Выводы

При наблюдении за ходом выключения газокompрессорного агрегата установлено следующее:

- Появление сильных вибраций в диапазоне 28...29 Гц явно указывает на возникновение резонанса на 28...29 Гц.
- **Резонансная частота практически совпадает с частотой возбуждения, равной 30 Гц!**
- Хотя резонансная частота и частота возбуждения совпадают неточно, ответная вибрация на 30 Гц несомненно усиливается соседним резонансом.

**Явление резонанса требует дополнительных исследований.**

1

Анализ форм вынужденных колебаний

2

Частотный гармонический анализ

3

Анализ форм собственных колебаний

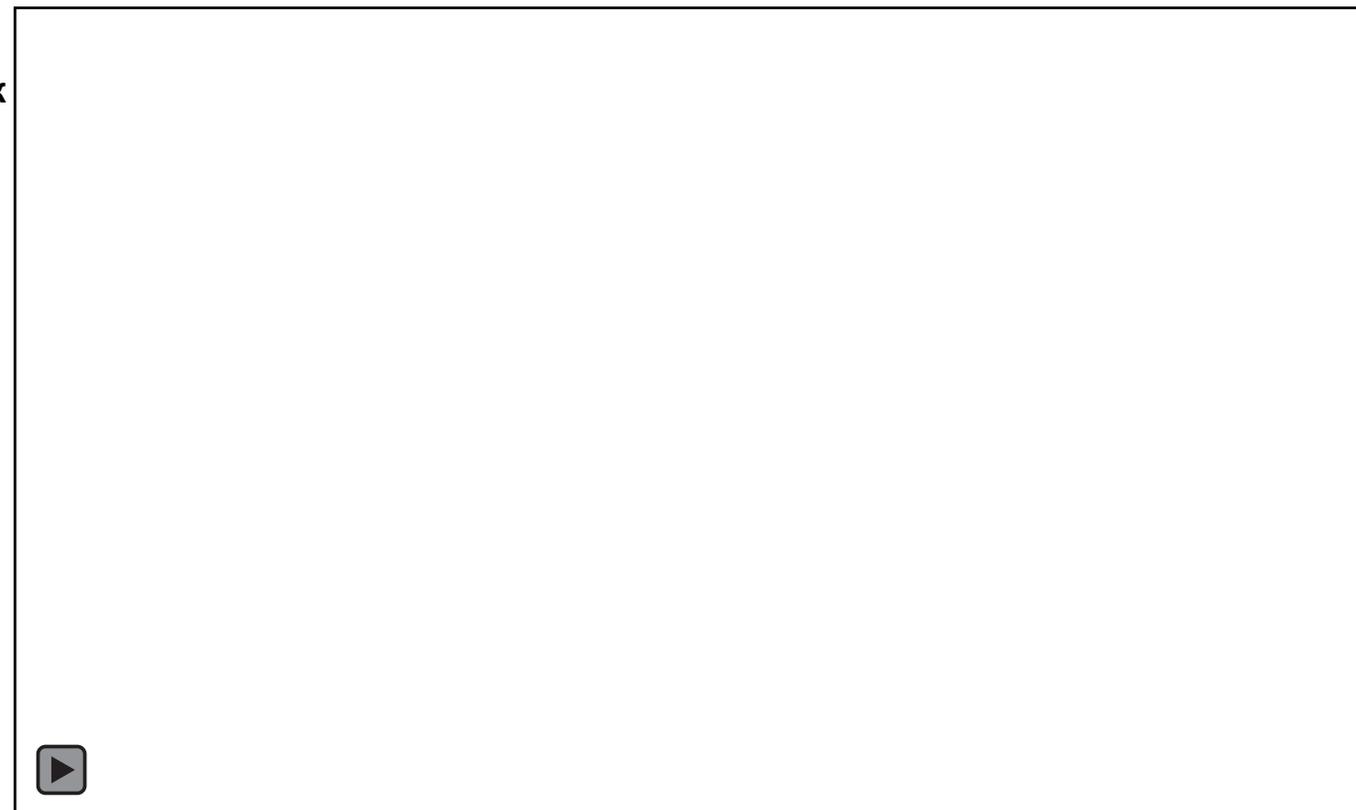
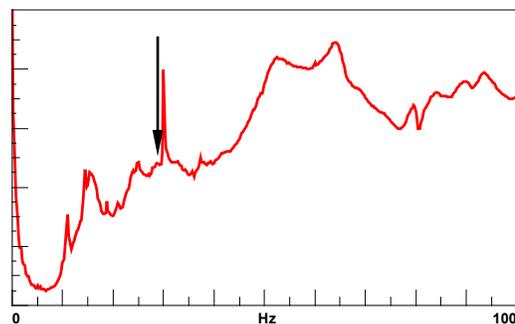
4

Выводы

# Экспериментальный модальный анализ

## Мода № 6: 29,4 Гц

Вторая мода поперечных изгибных колебаний агрегата «электродвигатель-охладитель» со скручиванием корпуса электродвигателя  
Локальная мода воздухозаборников охладителя



**Примечание: мода количественно соответствует  
форме вынужденных колебаний на рабочем режиме**

# Экспериментальный модальный анализ

## Выводы

### Выводы по результатам анализа форм колебаний:

- Резонанс возникает на частоте 29,4 Гц, что очень близко к частоте возбуждения, равной 30 Гц.
- Форма колебаний на частоте 29,4 Гц соответствует деформированному состоянию на частоте 30 Гц:
- Жесткость бетонного фундамента достаточная.
- Ослабление болтов крепления электродвигателя к фундаменту уменьшает резонансную частоту (29,4 Гц) на 0,5 Гц. Такое смещение частоты оказывает благоприятный эффект: увеличение разницы между резонансной частотой и частотой возбуждения приведет к уменьшению ответной вибрации на частоте возбуждения.
- Полученный результат подтверждается более низкой вибрацией при испытаниях на заводе-изготовителе, где применялось иная схема фиксации электродвигателя.

1

Анализ форм вынужденных колебаний

2

Частотный гармонический анализ

3

Анализ форм собственных колебаний

4

Выводы

# Выводы.

## Основная причина вибраций

- Высокий уровень вибрации вызван недостаточной жесткостью агрегата «электродвигатель-охладитель».
- Частота возбуждения (30 Гц) практически точно совпадает с резонансной частотой поперечных изгибных колебаний (29,4 Гц)



## Рекомендации

- Требуется увеличить разницу между частотой возбуждения (30 Гц) и резонансной частотой поперечных изгибных колебаний агрегата

«электродвигатель-охладитель».

А: Повысить жесткость агрегата

«электродвигатель-охладитель»

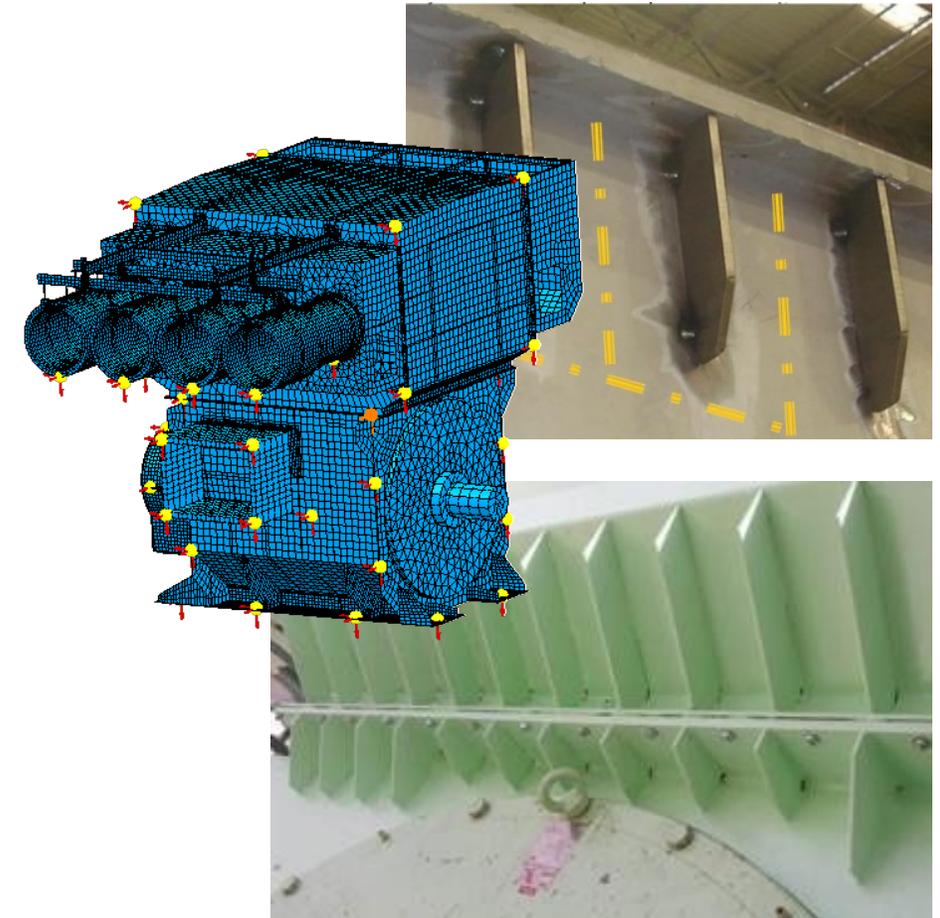
В: Понизить жесткость агрегата

«электродвигатель-охладитель»



# Следующий этап — проверка эффективности предложенных мер

- Построение конечноэлементной модели для численного моделирования последствий вносимых изменений
- Практическая реализация наилучшего варианта на установленном электродвигателе
- Проверка достигнутого эффекта путем измерения нового уровня вибраций



# Контрольные испытания первого варианта модификации: Анализ деформированного состояния при эксплуатации Частота 29,97 Гц

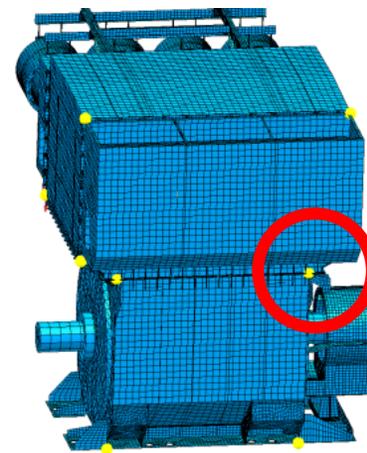
Вторая мода поперечных опрокидывающих колебаний агрегата «электродвигатель-охладитель».

Колебания охладителя и электродвигателя находятся в противофазе.

Кроме того, наблюдаются общие колебания охладителя.

мм/с (0...100 Гц)		Сторона компрессора			Сторона привода		
		Осевая	Горизонтальная	Вертикальная	Осевая	Горизонтальная	Вертикальная
Исходное	Под полной нагрузкой	2,54	4,64	0,84	3,46	5,36	0,55
	Под малой нагрузкой	0,85	2,85	0,88	1,83	3,56	0,56
Модификация	Под малой нагрузкой	0,88	2,41	0,82	1,37	3,23	0,54

# Второй вариант модификации



Требуется системный подход к анализу возникающих проблем с шумом и вибрациями:

**При каких режимах работы возникают максимальные вибрации?**

→Спектр вибраций, деформированное состояние при эксплуатации

**Каковы собственные частоты конструкции?** →Модальный анализ

**В чем коренная причина возникновения вибраций?** →Анализ путей передачи колебаний

**Сложная задача успешно решена благодаря:**

- Комбинирование испытаний с конечно-элементными расчетами, тесное сотрудничество компании Siemens, ГПЗ и поставщика электродвигателя
- Предлагаемые проектные решения проверяются виртуально — до их практической реализации
- Результаты расчетов по конечноэлементной модели совпали с результатами испытаний, проведенных при помощи технологий Siemens. Получено отличное совпадение глобальных мод колебаний