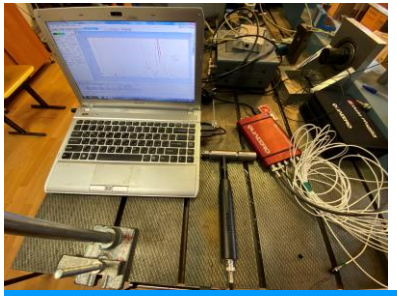
Определение модальных параметров конструкции экспериментальным путем

Научно-технический центр роторной динамики вращающихся машин “Альфа-Транзит”

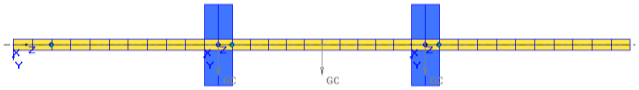
Инженер
ООО «Альфа-Транзит»
Шапошников К.В.

1. Модальные испытания



Необходимое оборудование для проведения измерений:
Система измерений с ПО для обработки результатов, ударный молоток, датчики-акселерометры

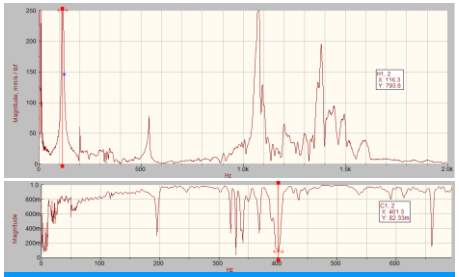
Ротор экспериментального стенда Bentley Nevada подготовленный для модальных испытаний



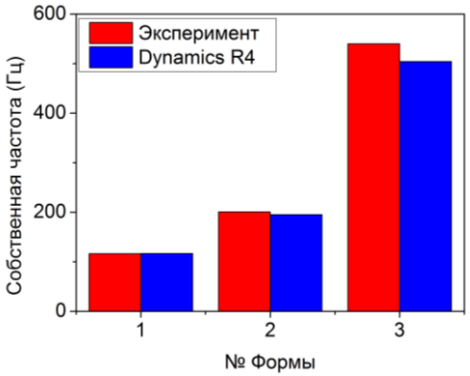
Модель ротора Bentley Nevada в программном пакете Dynamics R4

Основные задачи

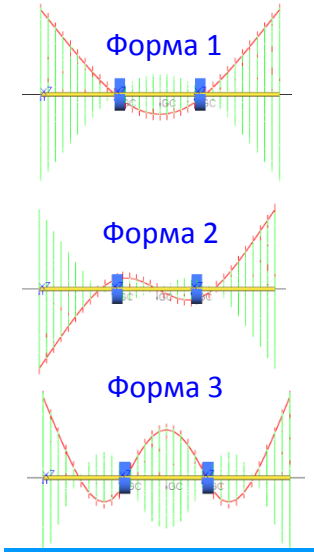
- Создание технологических моделей узлов для определения собственных частот и условий проведения испытаний.
- Определение требуемого набора и параметров инструментального обеспечения испытаний.
- Подготовка методик проведения модальных испытаний роторов и корпусов.
- Подготовка и проведение модальных испытаний узлов и деталей двигателей средствами предприятия.
- Проведение модальных испытаний узлов и деталей двигателей средствами ООО “Альфа-Транзит”.
- Обработка данных испытаний с целью проведения валидации моделей, построенных в DYNAMICS R4 или МКЭ программах.



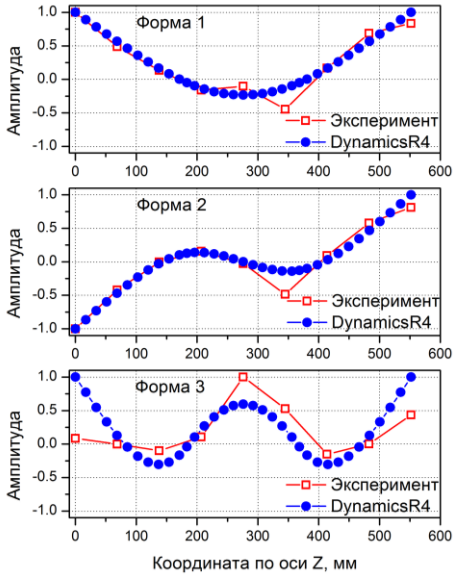
Результаты измерений



Сравнение собственных частот



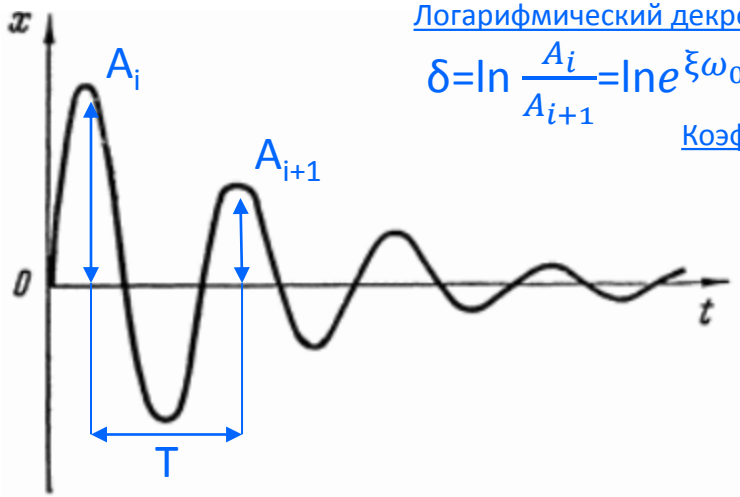
Формы колебаний Dynamics R4



Сравнение форм колебаний

2. Логарифмический декремент

- Применение ударного молотка во время проведения модальных испытаний приводит к импульсному возбуждению конструкции при котором она начинает колебаться с затухающей во времени амплитудой
- Темп уменьшения амплитуды при затухающих колебаниях определяется логарифмическим декрементом колебаний
- Логарифмический декремент (δ) колебаний представляет собой натуральный логарифм от отношения значений амплитуд (Ai) в начале и в конце (Ai+1) периода затухания колебаний (T)
- Затухание происходит тем быстрее чем больше демпфирования имеется в конструкции, чем меньше масса ее колеблющегося тела и больше период



Логарифмический декремент

$$\delta = \ln\frac{A_i}{A_{i+1}} = \ln e^{\xi\omega_0 T} = \xi\omega_0 T$$

Коэффициент демпфирования

$$\xi = \frac{c}{c_{cr}} = \frac{c}{2m\omega_0}$$

c- демпфирование в конструкции
c_{cr} – критическое демпфирование конструкции
m – масса колеблющегося тела
ω_0 – собственная частота без учета демпфирования

Частота собственных колебаний с учетом демпфирования

$$\omega_d = \omega_0\sqrt{1-\xi^2}$$

Период затухания колебании

$$T = \frac{2\pi}{\omega_d} = \frac{2\pi}{\omega_0\sqrt{1-\xi^2}}$$

Логарифмический декремент

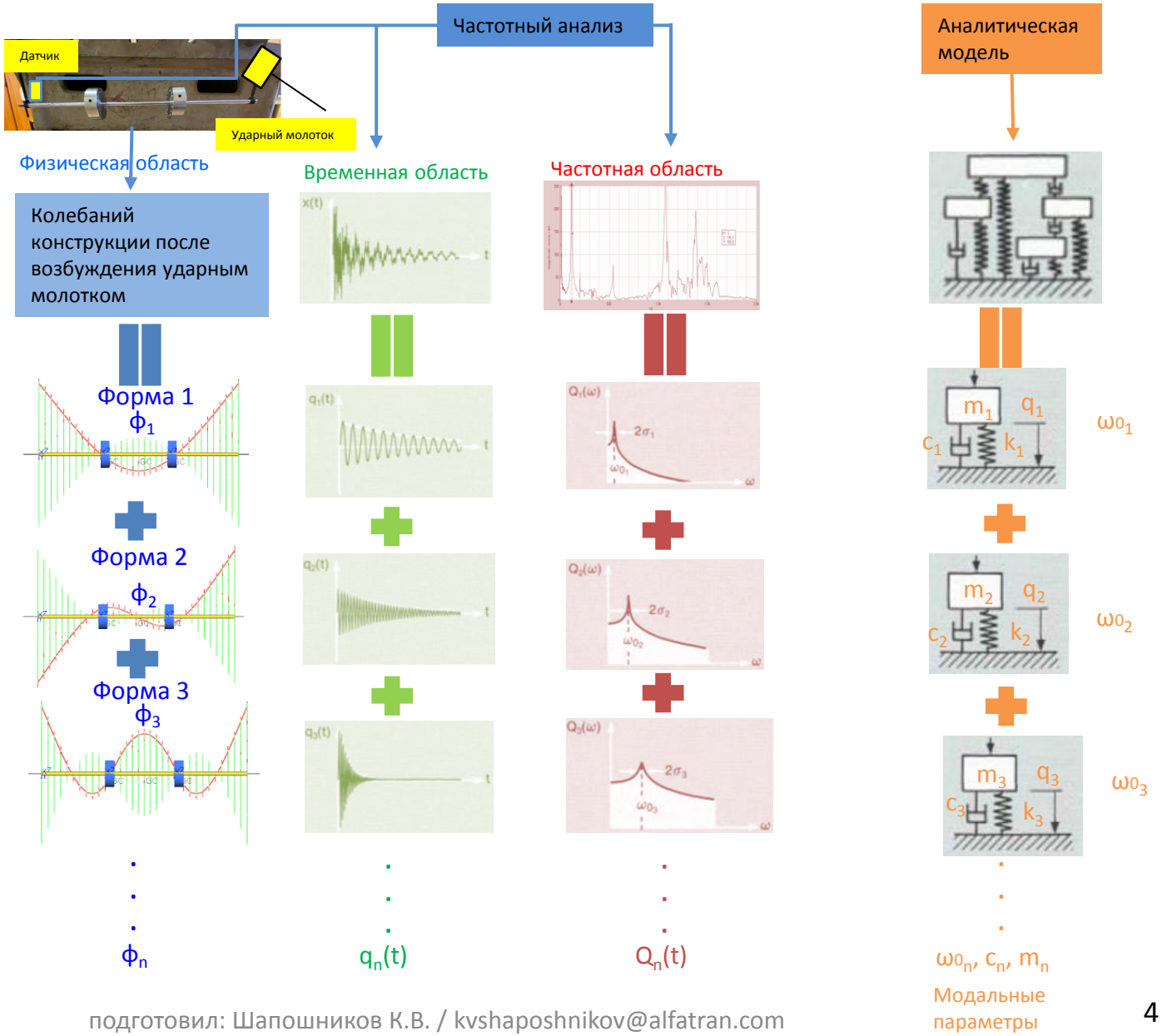
$$\delta = \frac{2\pi\xi}{\sqrt{1-\xi^2}}$$

Коэффициент демпфирования

$$\xi = \frac{\delta}{\sqrt{4\pi^2-\delta^2}}$$

3. Модальные параметры

- Проведение модальных испытаний позволяет определить модальные параметры конструкции в определенном частотном диапазоне
- К модальным параметрам относятся: модальная частота (ω_0), модальное демпфирование (c), модальная форма (ф), модальная масса (m)
- Основной принцип получения модальных параметров – любая вынужденная динамическая деформация конструкции может быть представлена в виде взвешенной суммы модальных форм ее колебаний (мод), где каждая мода может быть представлена в виде модели системы с одной степенью свободы
- Каждая мода конструкции может быть представлена при помощи модели системы с одной степенью свободы
- Аналитические модели не предназначены для представления физических конструкций, но они служат для интерпретации их динамического поведения



4. Модальные параметры

- Частотная характеристика может быть представлена в виде полюса (p), вычета (R) и их комплексных сопряженных величин (p*и R*)

$$H(\omega) = \frac{R}{j\omega - p} + \frac{R^*}{j\omega - p^*}$$

Модель с модальными параметрами

- Координаты полюса представляют собой комплексную величину

$$p = -\sigma + j\omega_d \qquad p^* = -\sigma - j\omega_d$$

$\sigma = \xi\omega_0$ - скорость затухания колебаний

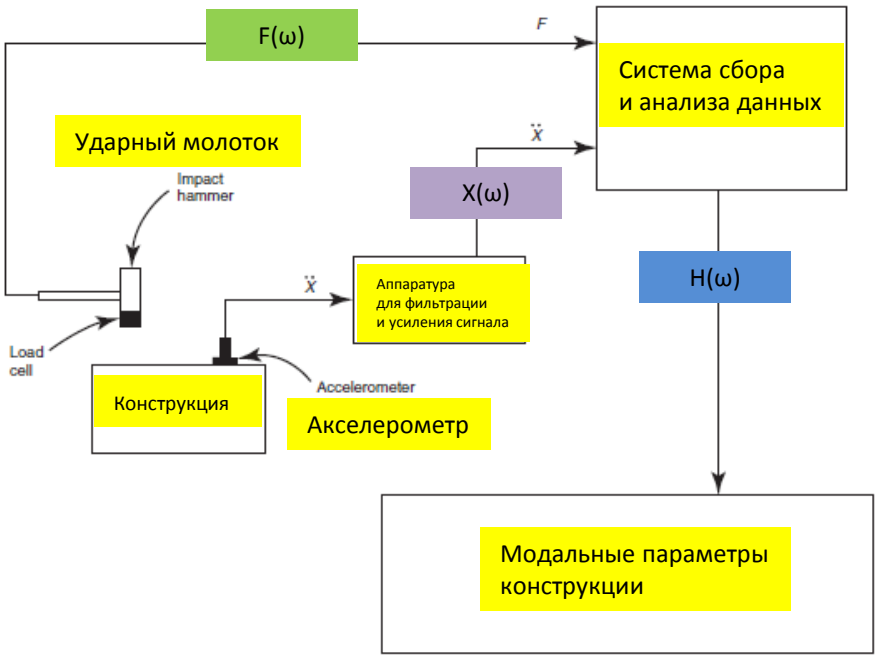
- Вычет представляет собой мнимую величину, которая отображает интенсивность моды колебаний

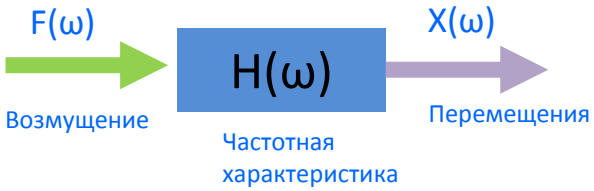
$$R = -j\frac{1}{2m\omega_d} \qquad R^* = j\frac{1}{2m\omega_d}$$

- Амплитуда моды определяется отношением вычета ко скорости затухания

$$H(\omega_d) \cong \frac{R}{\sigma}$$

- Координаты полюса и вычет могут быть получены экспериментальным путем на основе измеренной частотной характеристики, что позволяет связать аналитическую модель с результатами эксперимента





$$F(\omega) * H(\omega) = X(\omega)$$

Схематическое представление частотной модели получаемой экспериментально

5. Определение модального демпфирования по результатам измерений

- Определение модального демпфирования сопряжено с трудностями так как на результат очень сильно могут влиять погрешности измерений
- Для измерения модального демпфирования для в большинстве современных измерительных блоков реализован алгоритм по выделению частотной полосы для каждого идентифицированного пика известный как half power point method который позволяет выделить ширину частотной полосы порядка 3дБ
- Алгоритм выделяет две точки (ω_1 и ω_2) с амплитудой $1/\sqrt{2}\ H_{max}$ ($\sim 0.707\ Hmax$) расположенные по краям от величины самого пика (соответствует частоте свободно затухающих колебаний ω_d) используемые для определения коэффициент усиления (AF) так же известного как коэффициент Q

$$AF = \frac{\omega_d}{\omega_2 - \omega_1}$$

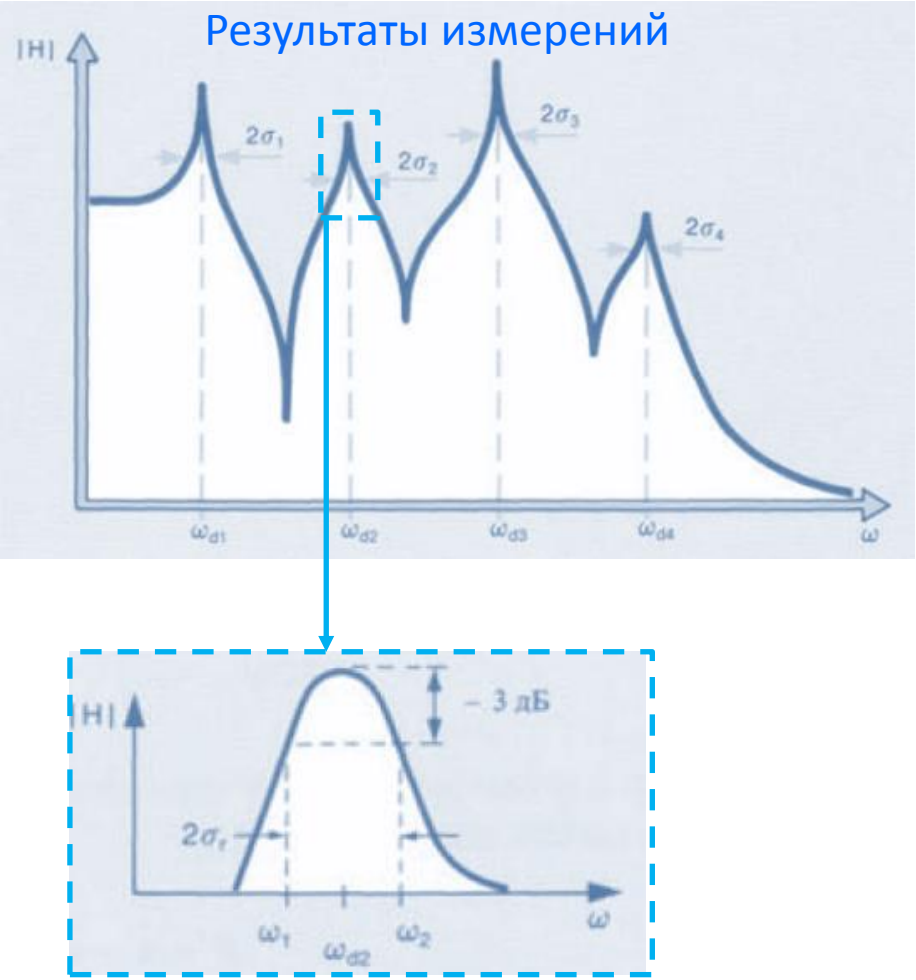
- Коэффициент усиления в свою очередь связан с коэффициентом демпфирования (ξ), через который и определяется модальное демпфирование (C) для выбранной частоты

$$AF = \frac{1}{2\xi}$$

т.к. $\xi = \frac{c}{c_{cr}}$

и $\xi = \frac{\sigma}{\omega_0}$

$$C = 2m\sigma$$



6. Рекомендуемая литература

- Vance J.M., Zeidan F.Y., Murphy B.G. Machinery vibration and rotordynamics. John Wiley & Sons, 2010
- Standard, A. P. I. "684." *API Standard Paragraphs Rotordynamic Tutorial: Lateral Critical Speeds, Unbalance Response, Stability, Train Torsionals, and Rotor Balancing,"* (2005)
- Døssing O. Structural testing, Brüel & Kjær, Denmark – 1988
- Хейлен В., Ламменс С., Сас П. Модальный анализ: теория и испытания. ООО «Новатест», 2010