



Российские САЕ-системы на службе промышленности²⁰²⁰

Гармонический анализ: промежуточные итоги и дальнейшие перспективы

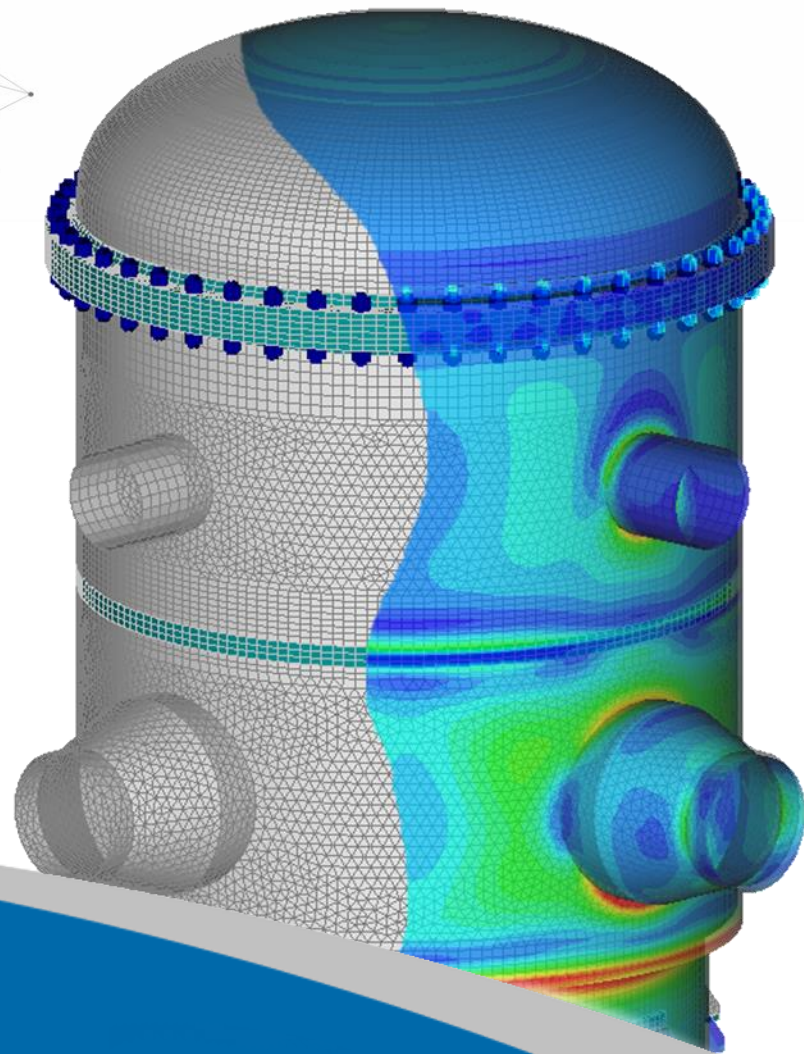
Михаил Ростовцев



НТЦ «АПМ» - ведущий разработчик ПО для инженерных расчетов



Гармонический анализ в APM Structure3D v.17





Общие понятия

Гармонический анализ предназначен для решения уравнений динамики в случае установившихся вынужденных колебаний от гармонического воздействия для заданного диапазона частот.

$$[\mathbf{M}]\{\ddot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{C}]\{\dot{\mathbf{u}}\} + [\mathbf{K}]\{\mathbf{u}\} = \{\mathbf{F}\}$$

$[\mathbf{M}]$ – матрица масс,

$[\mathbf{C}]$ – матрица демпфирования,

$[\mathbf{K}]$ – матрица жесткости,

$\{\ddot{\mathbf{u}}\}$ – вектор ускорений в узлах,

$\{\dot{\mathbf{u}}\}$ – вектор скоростей в узлах,

$\{\mathbf{u}\}$ – вектор перемещений в узлах,

$\{\mathbf{F}\}$ – вектор приложенных внешних усилий.



Нагрузки для ГА

Виды силового возмущения

- Сила
- Момент
- Давление

Виды кинематического возмущения

- Ускорение
- Смещение
- Скорость смещения

Кинематика узлов

Загрузка: Загрузка 0

Тип нагрузки: Ускорение

Нагрузка в л

по X [мм/с^2]: 0

по Y [мм/с^2]: 0

по Z [мм/с^2]: 1

вокруг X [градус/с^2]: 0

вокруг Y [градус/с^2]: 0

вокруг Z [градус/с^2]: 0

Способ задания

☐ Добавить к существующим

☒ Заменить существующие

Применить

OK Отмена Удалить

Загрузки

Название	Множит...	Фазовый угол, [градус]	Вкл/В...	Цвет
вес балки	1	0	⚡	🟢
сила на балку	0	0	⚡	🟡
вес сосредоточенной массы	0	0	⚡	🟠

Добавить...

Изменить...

Удалить

Активный

X->Активное

OK

Значения фаз загрузки



Настройки расчёта

Настройки программы

- Линейная устойчивость
- Частоты собственных колебаний
- Односторонние опоры/канаты
- Вынужденные колебания
- Усталостный расчёт
- Гармонический анализ
- Фундаменты

Свойство	Значение
$[M].\{x\}'' + [C].\{x\}' + [K].\{x\} = \{F(w)\}$	
Параметры визуализации спектров	
Начальное значение частотного интервала	1
Конечное значение частотного интервала	100
Общее кол-во частот на заданном интервале	1000
Тип размещения расчётных частот	Масштаб по собственным частотам
Минимальное число разделений по частоте	Линейный масштаб
Процент между частотами для их разделения	Логарифмический масштаб
Сохранять для частот	Масштаб по собственным частотам
Тип задания демпфирования	Демпфирование из свойств материала
Умолчательное демпфирование	Демпфирование из свойств материала
Alpha - демпфирование	0
Beta - демпфирование	0.001

Свойство	Значение
$[M].\{x\}'' + [C].\{x\}' + [K].\{x\} = \{F(w)\}$	
Параметры визуализации спектров	
Начальное значение частотного интервала	1
Конечное значение частотного интервала	100
Общее кол-во частот на заданном интервале	1000
Тип размещения расчётных частот	Масштаб по собственным частотам
Минимальное число разделений по частоте	7
Процент между частотами для их разделения	0.1
Сохранять для частот	Сохранять для резонансных
Тип задания демпфирования	Демпфирование из свойств материала
Умолчательное демпфирование	Демпфирование из свойств материала
Alpha - демпфирование	Релеевское демпфирование
Beta - демпфирование	0.001



Задание на расчёт

Расчет

☐ Линейный статический расчет

☐ Расчет устойчивости

☐ Собственные частоты

☐ Нелинейный расчет

☐ Вынужденные колебания

☒ Гармонические колебания

для загрузки:

☐ Предварительное нагружение:

☐ Усталостный расчет

☐ Расчет стационарной теплопроводности

☐ Расчет нестационарной теплопроводности

Запомнить **Расчёт** Отмена



Расчет

☐ Линейный статический расчет

☐ Расчет устойчивости

☐ Собственные частоты

☐ Нелинейный расчет

☐ Вынужденные колебания

☒ Гармонические колебания

для загрузки:

☐ Предварительное нагружение:

☐ Усталостный расчет

☐ Расчет стационарной теплопроводности

☐ Расчет нестационарной теплопроводности

Запомнить **Расчёт** Отмена

Общие настройки
Гармонический анализ

Свойство	Значение
$[M] \cdot \{x\}'' + [C] \cdot \{x\}' + [K] \cdot \{x\} = \{F(w)\}$	
Алгоритм решен...	Алгоритм FULL
Точность решен...	0.001
Максимальное к...	100
Объём оператив...	8000
Хранение разло...	AutoDecide
Размер сегмента...	1500

Параметры визуализации спект...

Начальное значени...	1
Конечное значение ...	100
Общее кол-во часто...	1000
Тип размещения ра...	Масштаб по соб...
Минимальное числ...	7

Объём оперативной памяти
Размер оперативной памяти (RAM) доступной алгоритму решения СЛАУ.



Карта результатов

Тип расчета: Гармонический расчет

Статика | Анимация

Загрузка: Для динамики без преднапряга

Шаг: 4 - 5.487

N	Frequency[Hz]
4	5.487
5	6.885
6	8.236
7	9.543
8	10.81
9	12.03
10	13.21
11	14.35
12	15.45
13	16.52
14	17.55
15	18.55
16	19.52
17	20.45

☒ Карта результатов

Тип результатов: Виброускорения

☒ Объемные элементы

Положение карты: На деформированной конструкции

Количество изоуровней: 10

☒ Усреднять значения

☐ Показывать шкалу

Масштабный коэффициент: 1

☐ Деформированная конструкция

☐ Недеформированная конструкция

☒ Карта результатов

Тип результатов: Виброускорения

☒ Объемные элементы

Положение карты: На деформированной конструкции

☒ Объемные элементы

Положение карты: На деформированной конструкции

Количество изоуровней: 10

☒ Усреднять значения по

☐ Показывать шкалу в виде

Масштабный коэффициент: 1

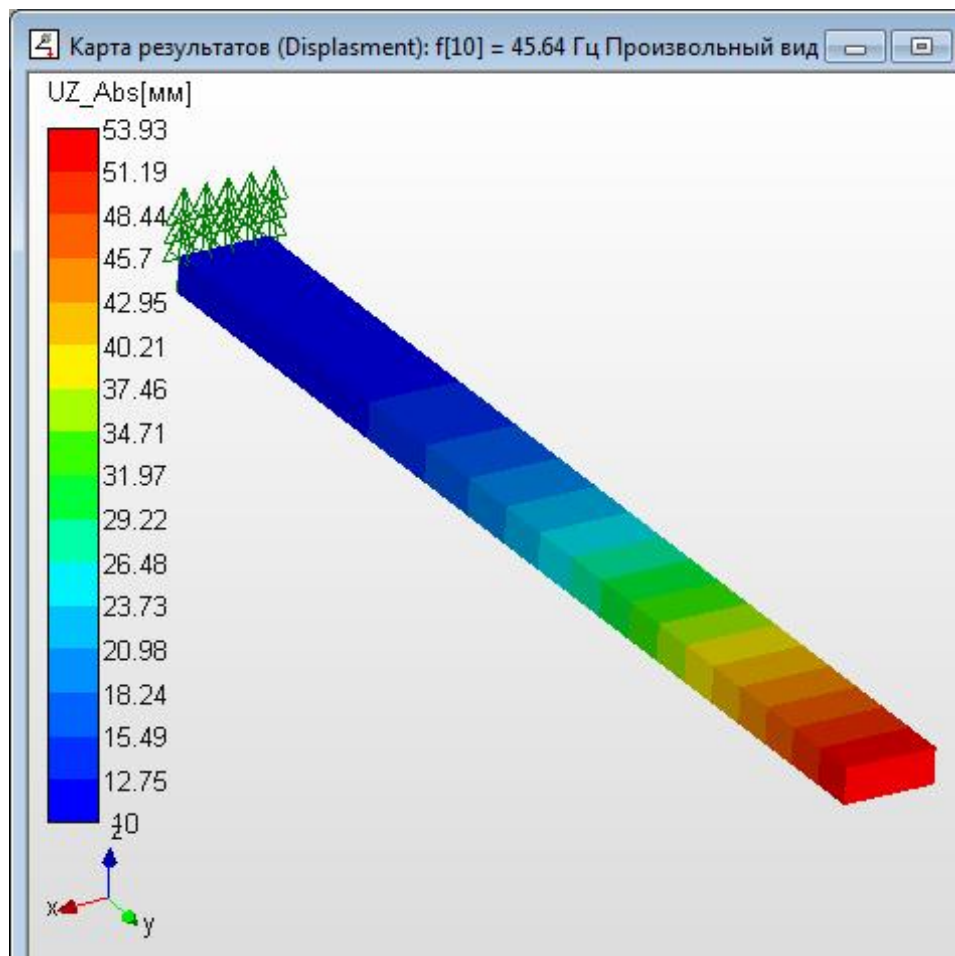
☐ Деформированная конструкция

☐ Недеформированная конструкция

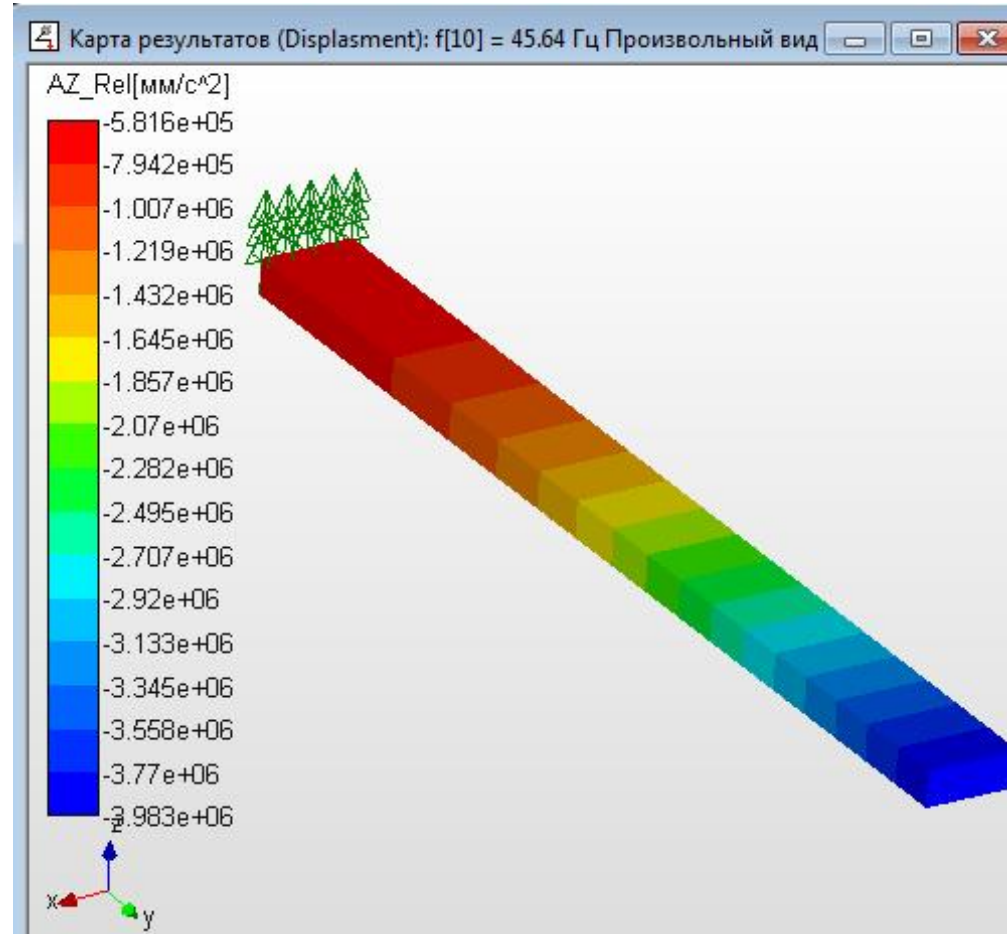
Оси: AX_Abs, AX_Rel, AX_Image, AX_Angle, AY_Abs, AY_Rel, AY_Image, AY_Angle, AZ_Abs, AZ_Rel, AZ_Image, AZ_Angle, ASUM_Abs, ASUM_Rel, ASUM_Image, ASUM_Angle, ASUM_SumAbs



Карта результатов



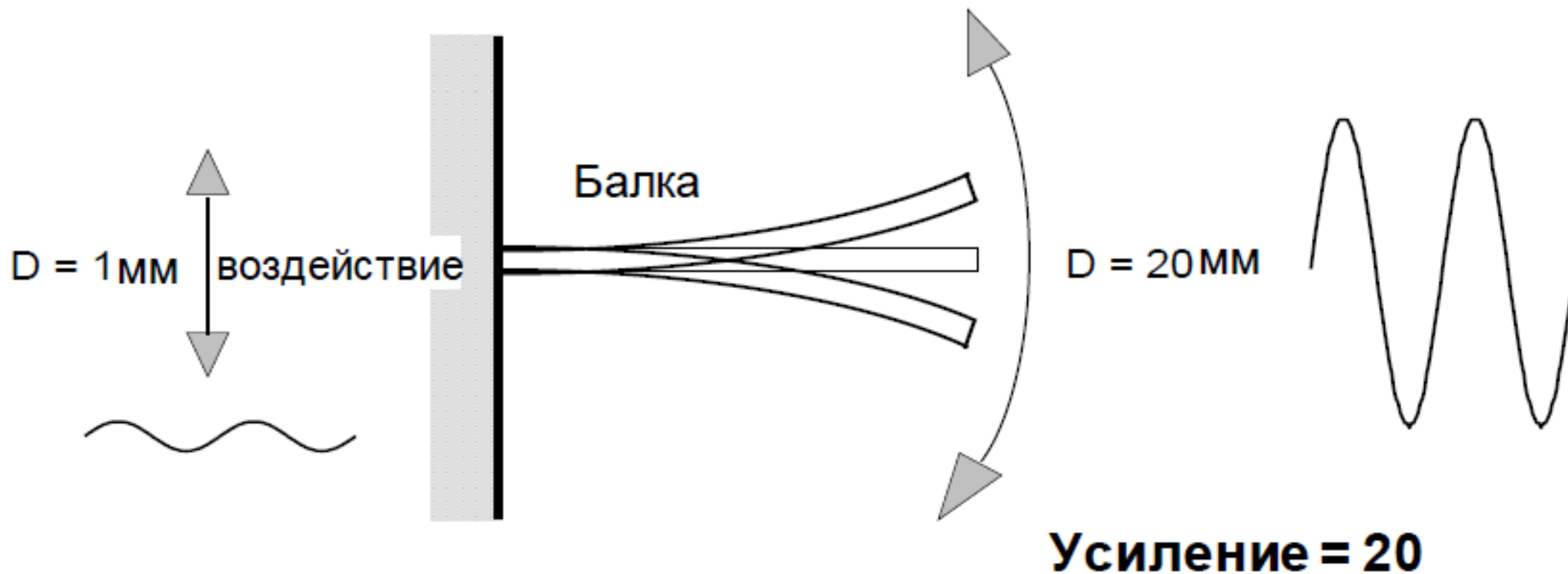
AX_Abs
AX_Real
AX_Image
AX_Angle
AY_Abs
AY_Real
AY_Image
AY_Angle
AZ_Abs
AZ_Rel
AZ_Image
AZ_Angle
ASUM_Abs
ASUM_Rel
ASUM_Image
ASUM_Angle
ASUM_SumAbs





Кинематическое возбуждение балки

Балка при резонансе





Спектры (АЧХ-ФЧХ)

Результаты

Окно

Справка

Выбор модели для вывода результатов...

Нагрузки...

Карта результатов...

Настройки карт результатов FGA...

Напряжения в сечении

Силовые факторы в элементе...

Реакции в опорах...

Срез композита...

Коэффициент концентрации напряжений...

Определение центра сил...

Таблица расхода...

Результаты PCU...

Устойчивость...

Собственные частоты...

Анимация

Вынужденные колебания...

Параметры вывода анимации вынужденных колебаний...

График перемещения

График напряжений

Долговечность при случайном усталостном нагружении...

Спектр по результатам гармонического расчёта

Карта армирования...

Параметры вывода армирования...

Диапазон результатов...

Параметры вывода результатов...

Свойство	Значение
$[M] \cdot \{x\}'' + [C] \cdot \{x\}' + [K] \cdot \{x\} = \{F(w)\}$	
Параметры визуализации спектров	
База виброперемещений, [мм]	8e-09
База виброскоростей, [мм/с]	5e-05
База виброускорений, [мм/с^2]	0.3
Использование дБ	<input checked="" type="checkbox"/>
Использование Гц	<input checked="" type="checkbox"/>
Использование логарифмирования	<input type="checkbox"/>
Выбор типа значений вибрации	Виброперемещение
Выбор типа расчёта для АЧХ	Один узел
Выбор типа значений для вы...	Модуль
Вид спектра	АЧХ
Минимальная частота анализ...	1
Максимальная частота анали...	1000
Значение частоты анализа, [Г...	100
Частоты для расчёта	Весь диапазон
Тип вибро-значений	Максимальное
Тип для частот	Для максимального

Выбор типа значений вибрации	Виброперемещение
Выбор типа расчёта для АЧХ	Виброперемещение
Выбор типа значений для вы...	Виброскорость
Вид спектра	Виброускорение

Выбор типа значений для вы...	Модуль
Вид спектра	Модуль
Минимальная частота анализ...	Действит. часть
Максимальная частота анали...	Мнимая часть

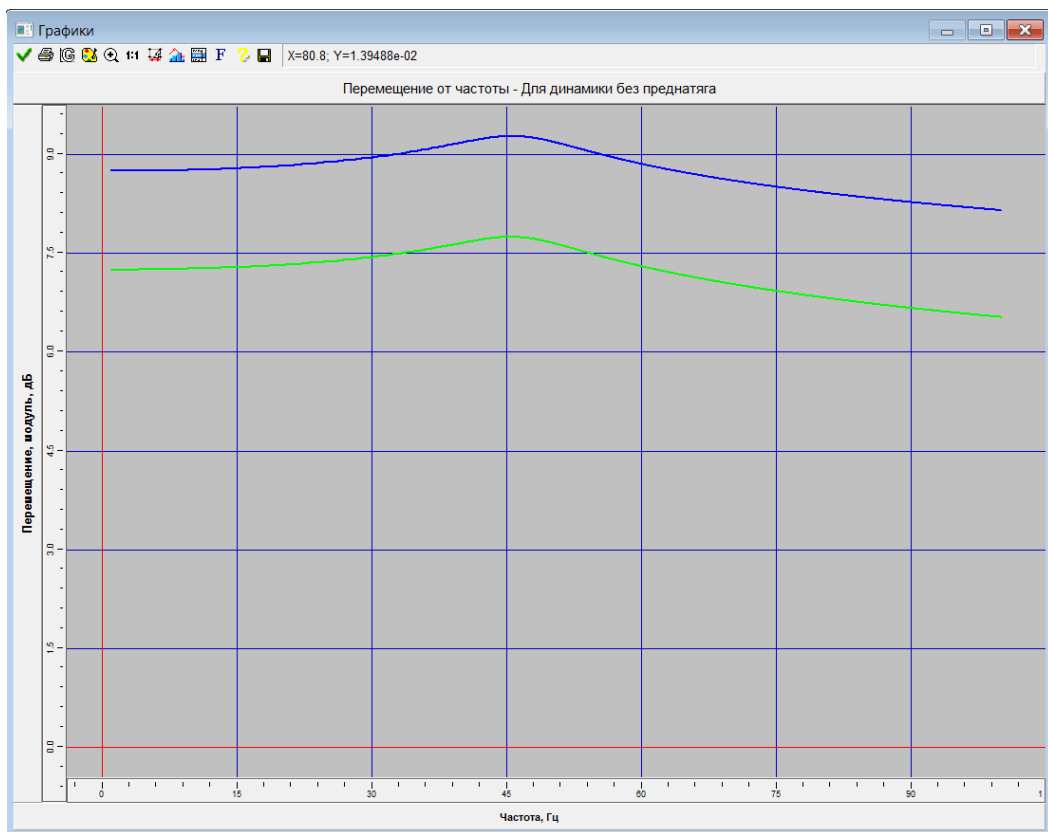
Вид спектра	АЧХ
Минимальная частота анализ...	АЧХ
Максимальная частота анали...	ФЧХ

Выбор типа расчёта для АЧХ	Один узел
Выбор типа значений для вы...	Один узел
Вид спектра	Пара узлов

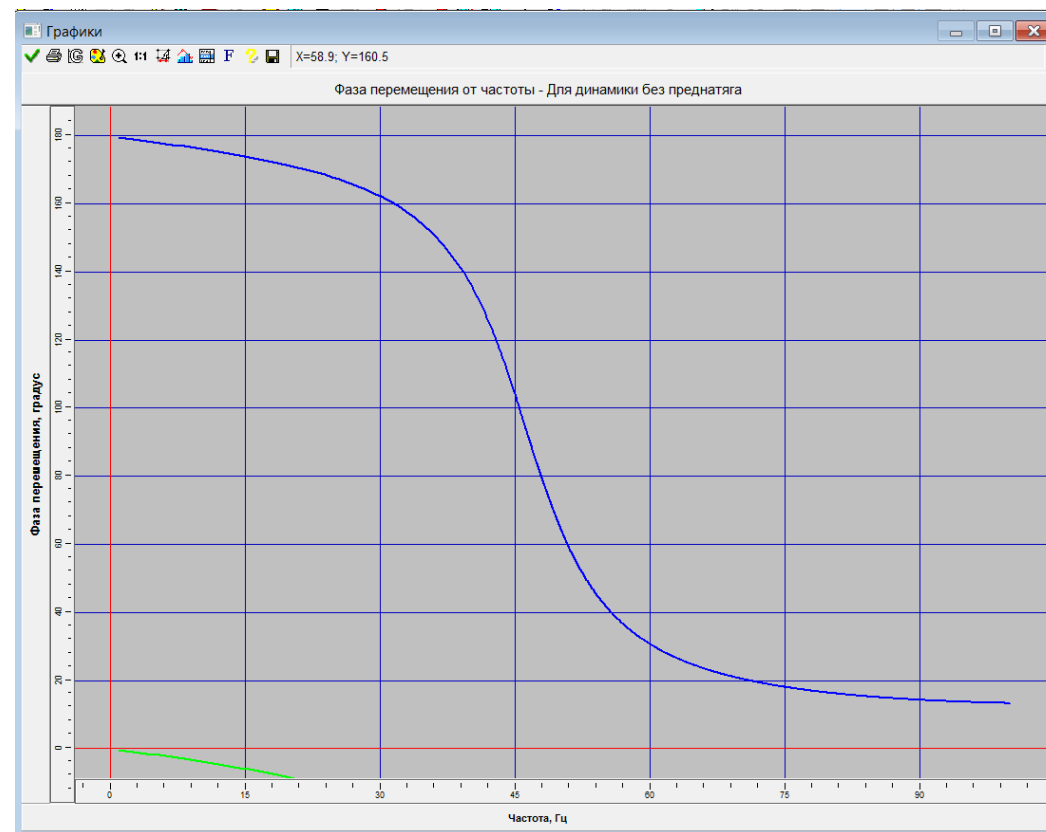


Результаты гармонического анализа

АЧХ

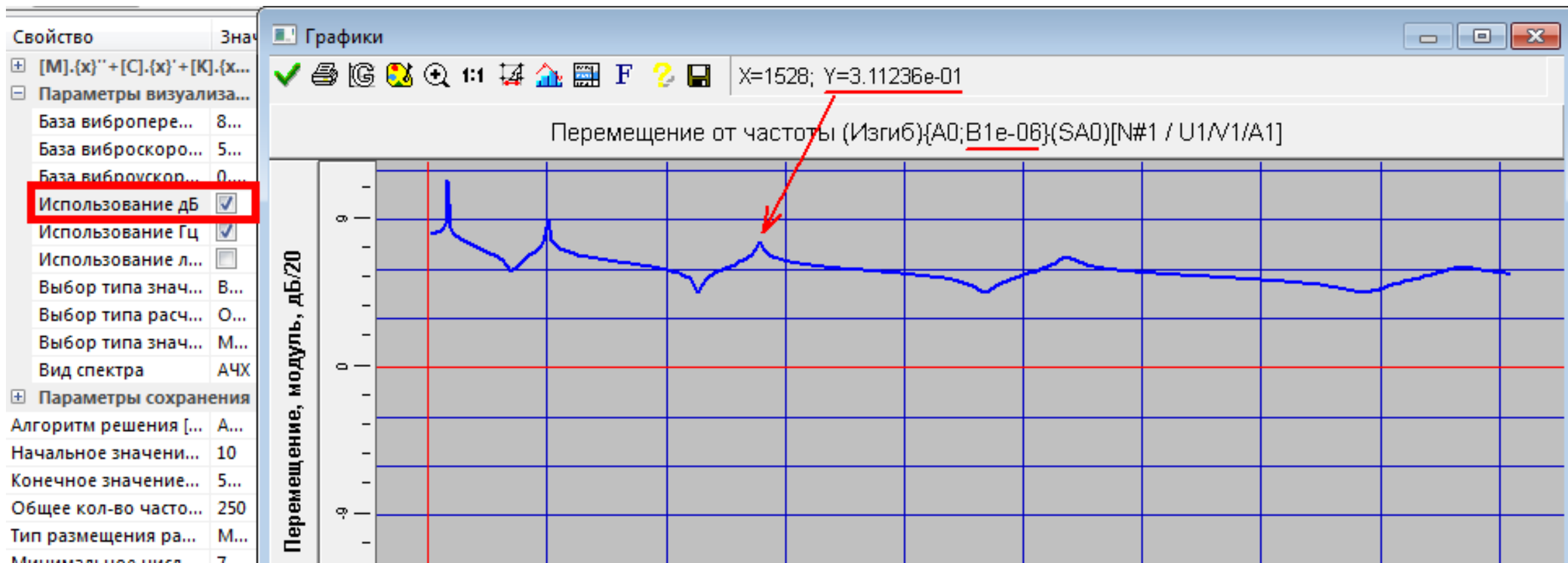


ФЧХ





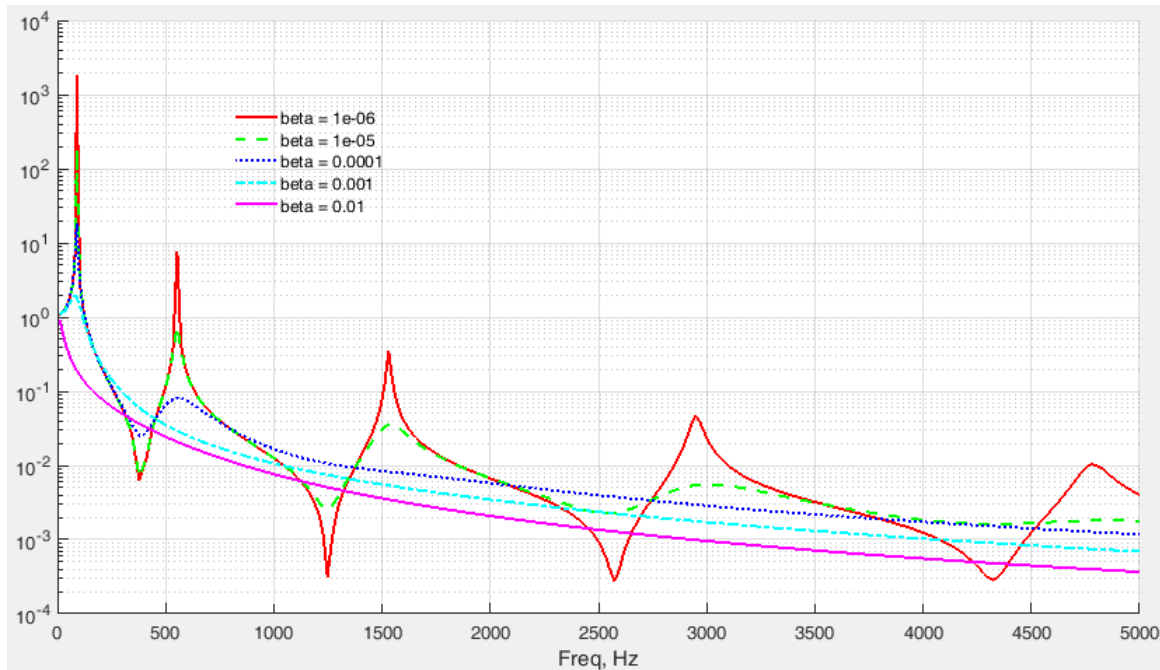
Результаты гармонического анализа



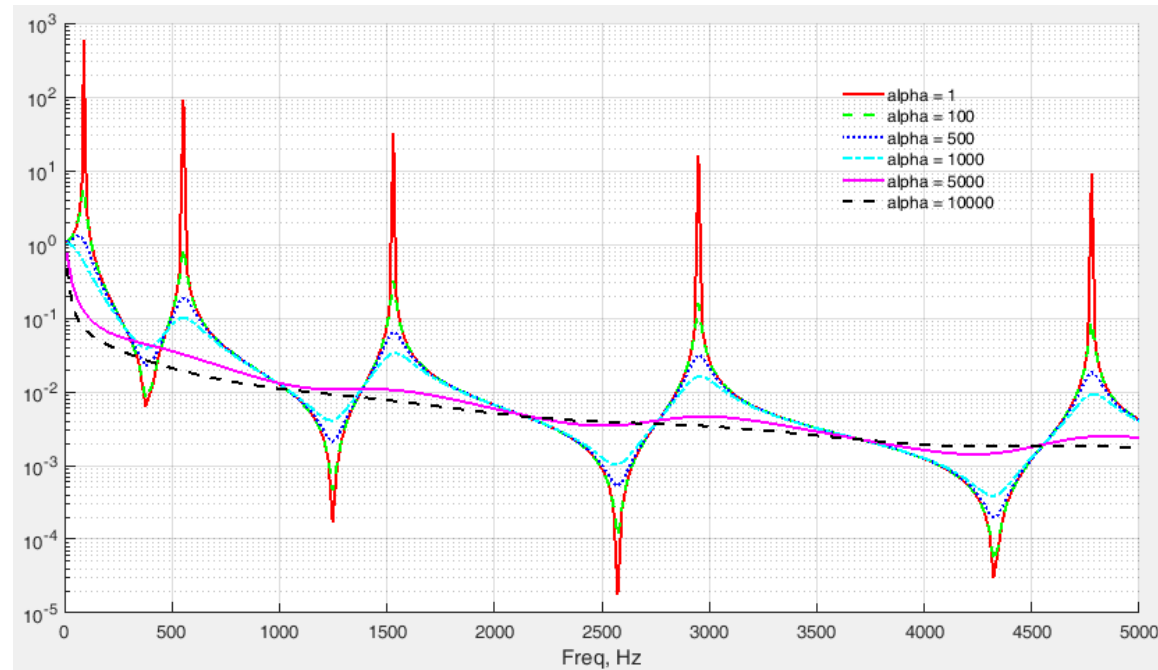


Результаты гармонического анализа

Варьирование β -демпфированием



Варьирование α -демпфированием



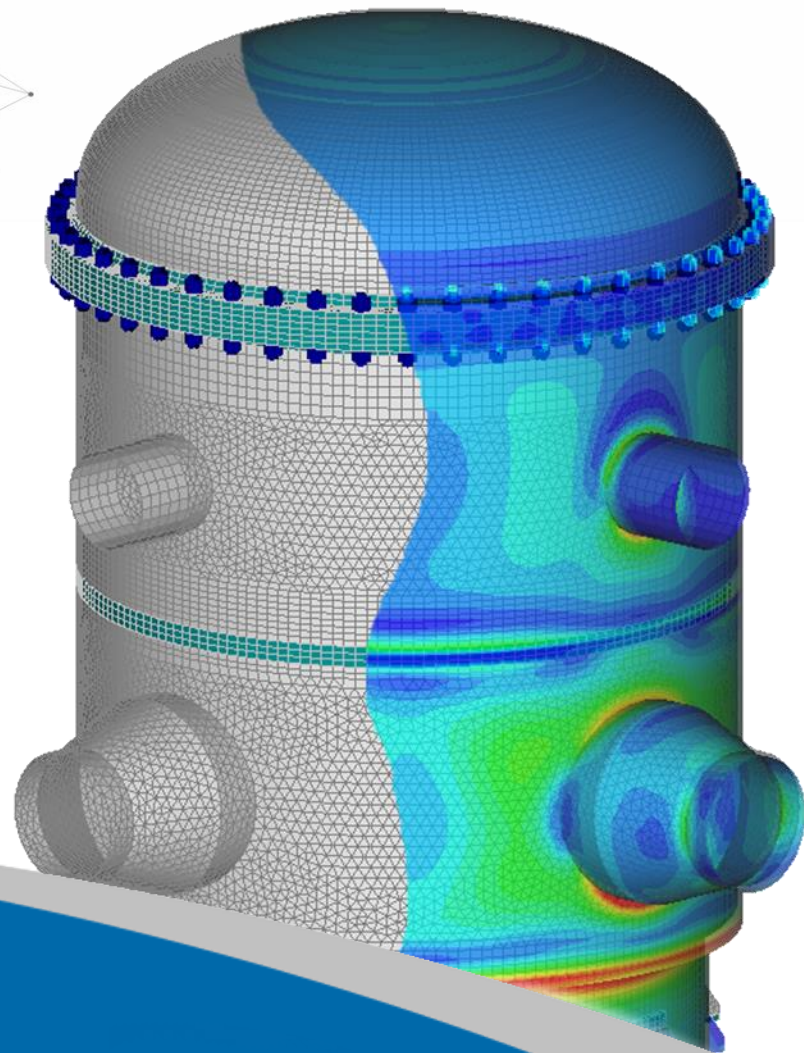



Промежуточные итоги

- 1) Реализован метод FULL, с возможностью выбора типа размещения частот для расчёта, в том числе с опорой на значения собственных частот конструкции.
- 2) Для силовых и кинематически заданных нагрузок реализовано получение результатов в комплексных значениях перемещений, скоростей и ускорений, а так же значений деформаций и напряжений для заданных значений начальной фазы и частоты.
- 3) Пользователю доступна возможность задания предварительного нагружения на конструкцию как постоянного воздействия, не изменяемого по гармоническому закону (нагружение типа веса или термические деформации).
- 4) Доступно на выбор пользователя информация по результатам в виде карт результатов для всей конструкции по определённой частоте или в виде спектральных графиков для выбранного узла или пары узлов.
- 5) Осуществлено сравнение результатов для различного вида возмущающего воздействия, а так же типов конечных элементов со значениями, полученными в комплексе Ansys. Расхождение по значениям вибро-перемещений на резонансных частотах не превысило 5% для ненулевого демпфирования.

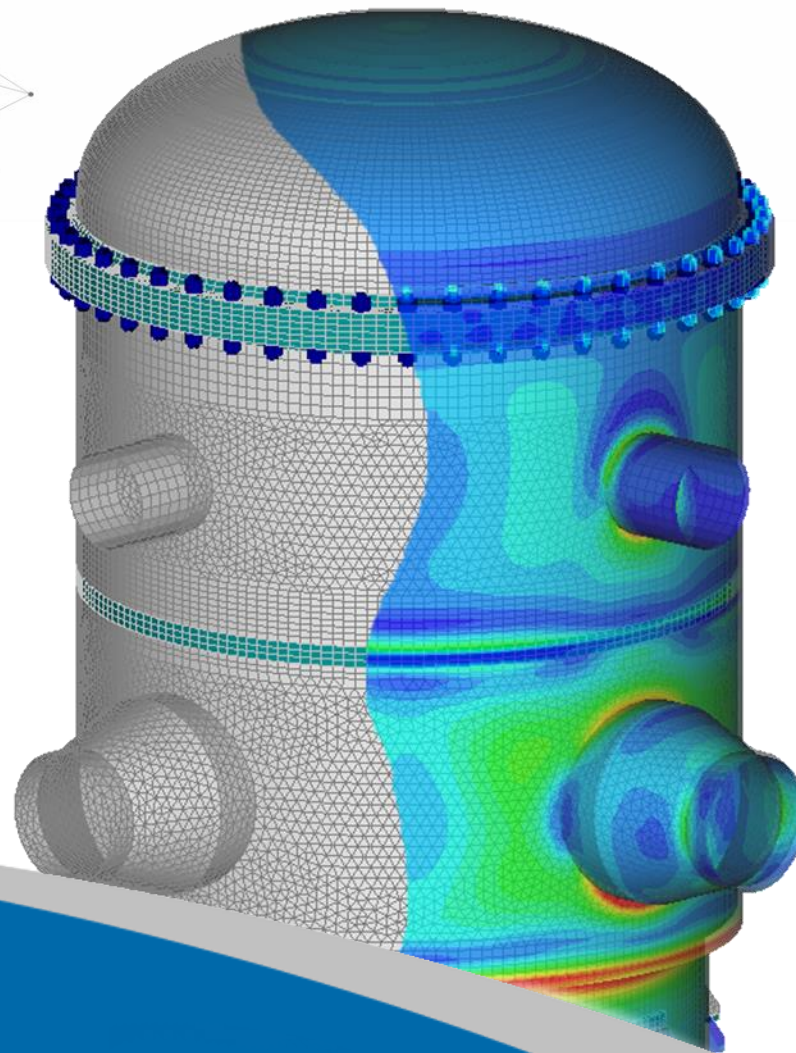


Показ работы APM Structure3D v.17



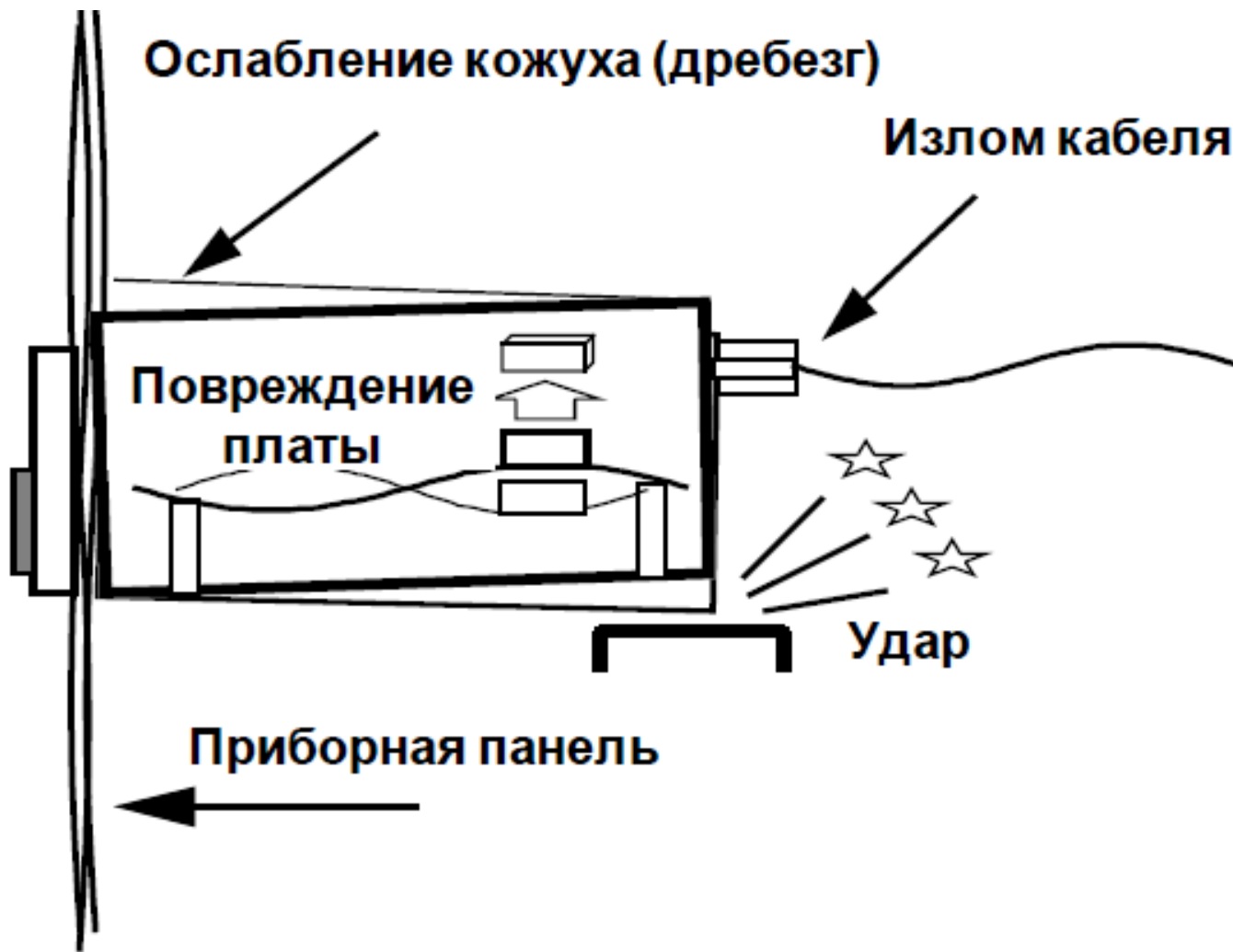


Моделирование виброиспытаний





Актуальность задачи



Влияние резонанса на
элементы прибора



Нормативные документы

- 1) ГОСТ РВ 20.39.304-98. Требования стойкости к внешним воздействующим факторам аппаратуры *наземной, морской, авиационной, ракетной и космической техники*, а так же аппаратуры боеприпасов артиллерии. Среди воздействующих факторов – **синусоидальная** вибрация и **случайная широкополосная** вибрация.
- 2) ГОСТ Р 513189-2008. Методы испытания на стойкость к механическим внешним воздействующим факторам машин, приборов и других технических изделий. Испытания на вибрацию. **Широкополосная случайная** вибрация, **узкополосная случайная** вибрация, **гармоническая** вибрация.
- 3) Квалификационные требования КТ-160D. Условия эксплуатации и окружающей среды для бортового авиационного оборудования. Требования, нормы и методы испытаний. Среди них методики испытаний на **синусоидальную** и **случайную** вибрацию.

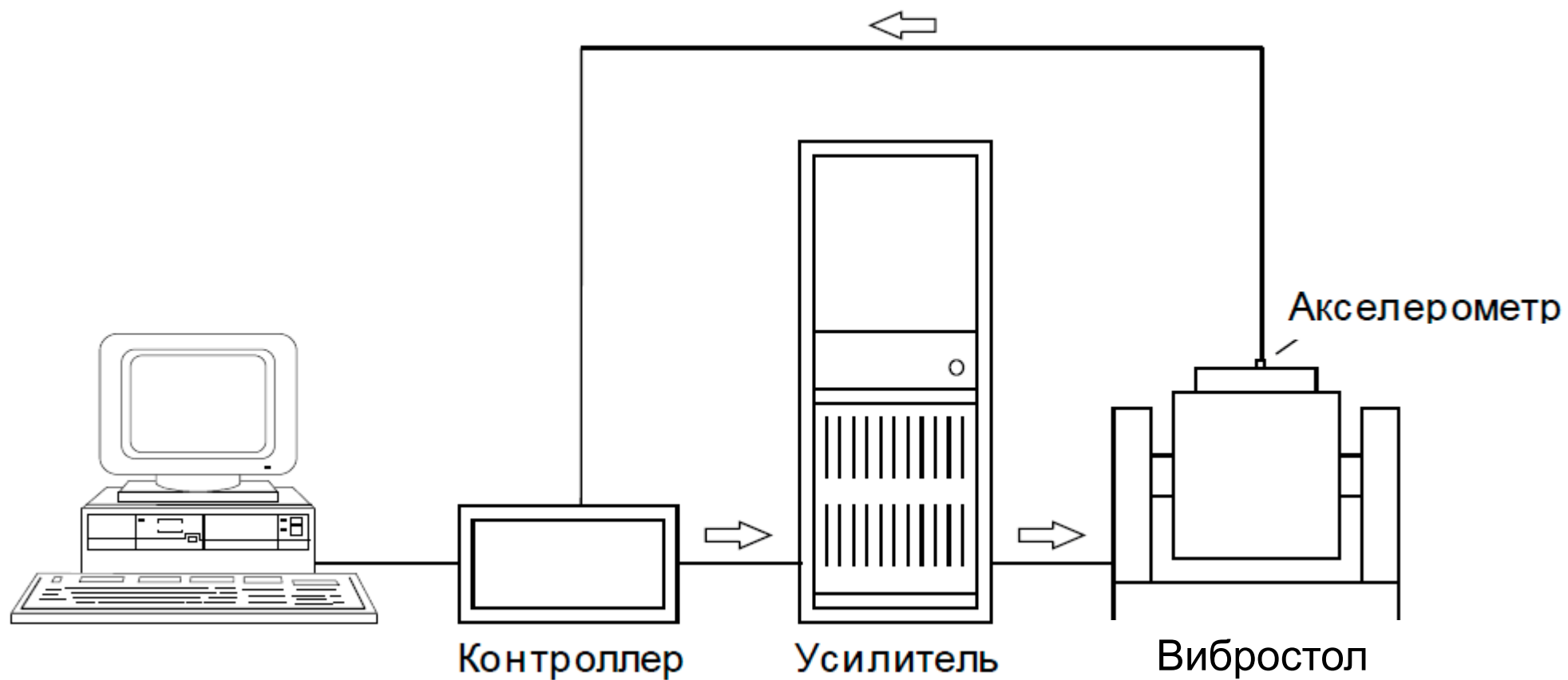


Аппаратура для виброиспытаний



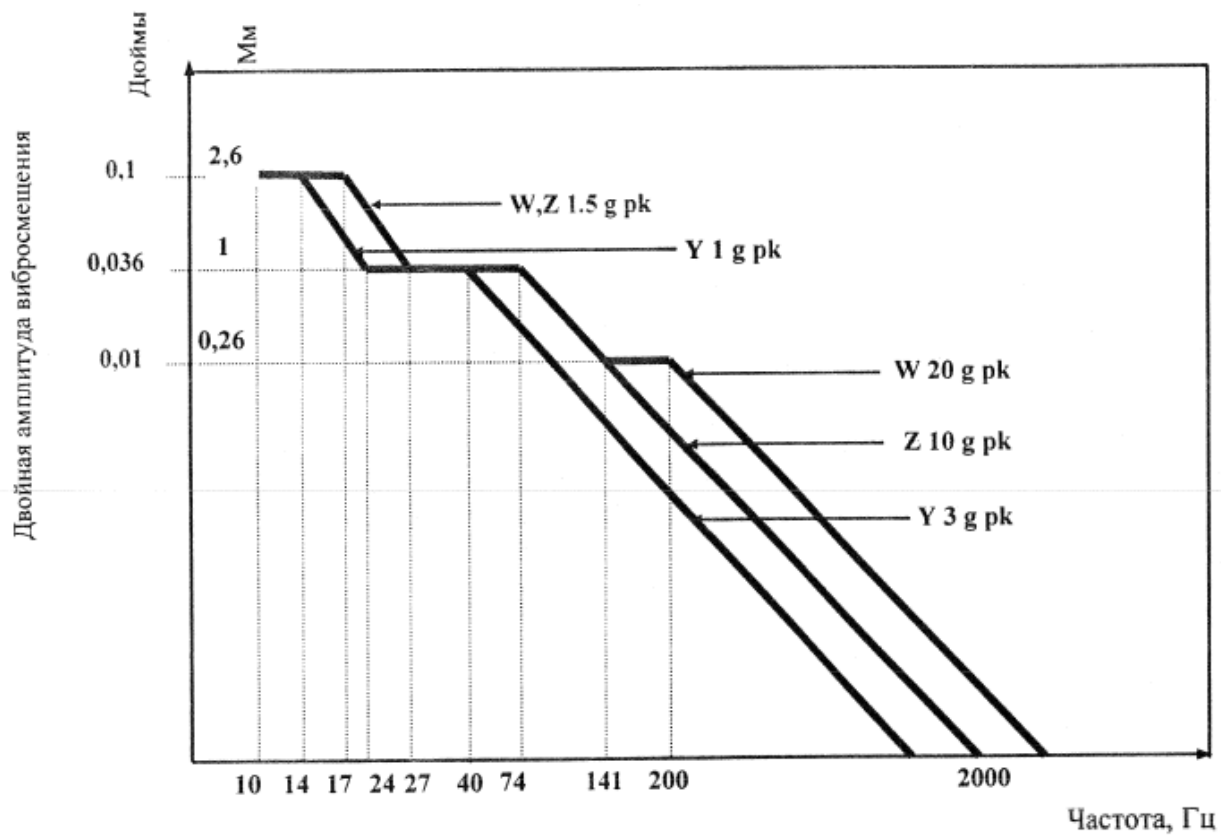


Компоненты тестовой вибросистемы

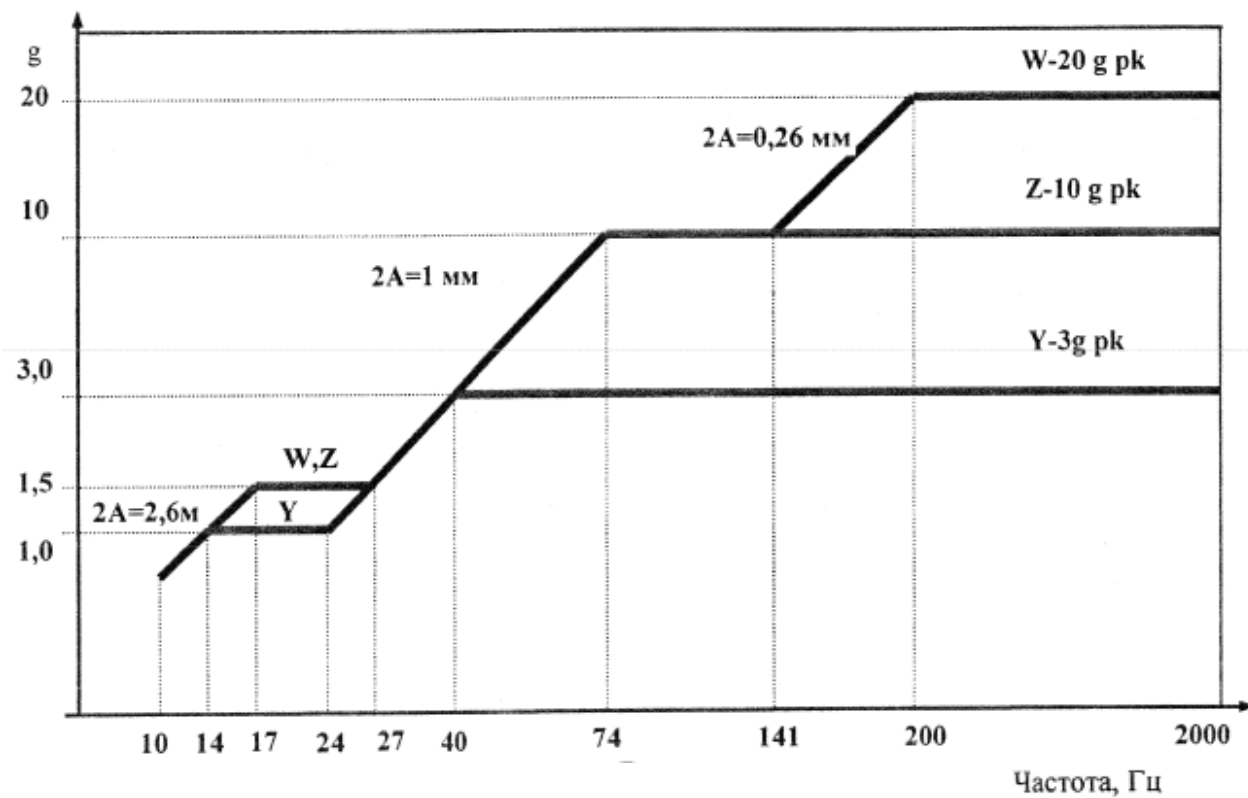




Нормы испытаний на синусоидальную вибрацию



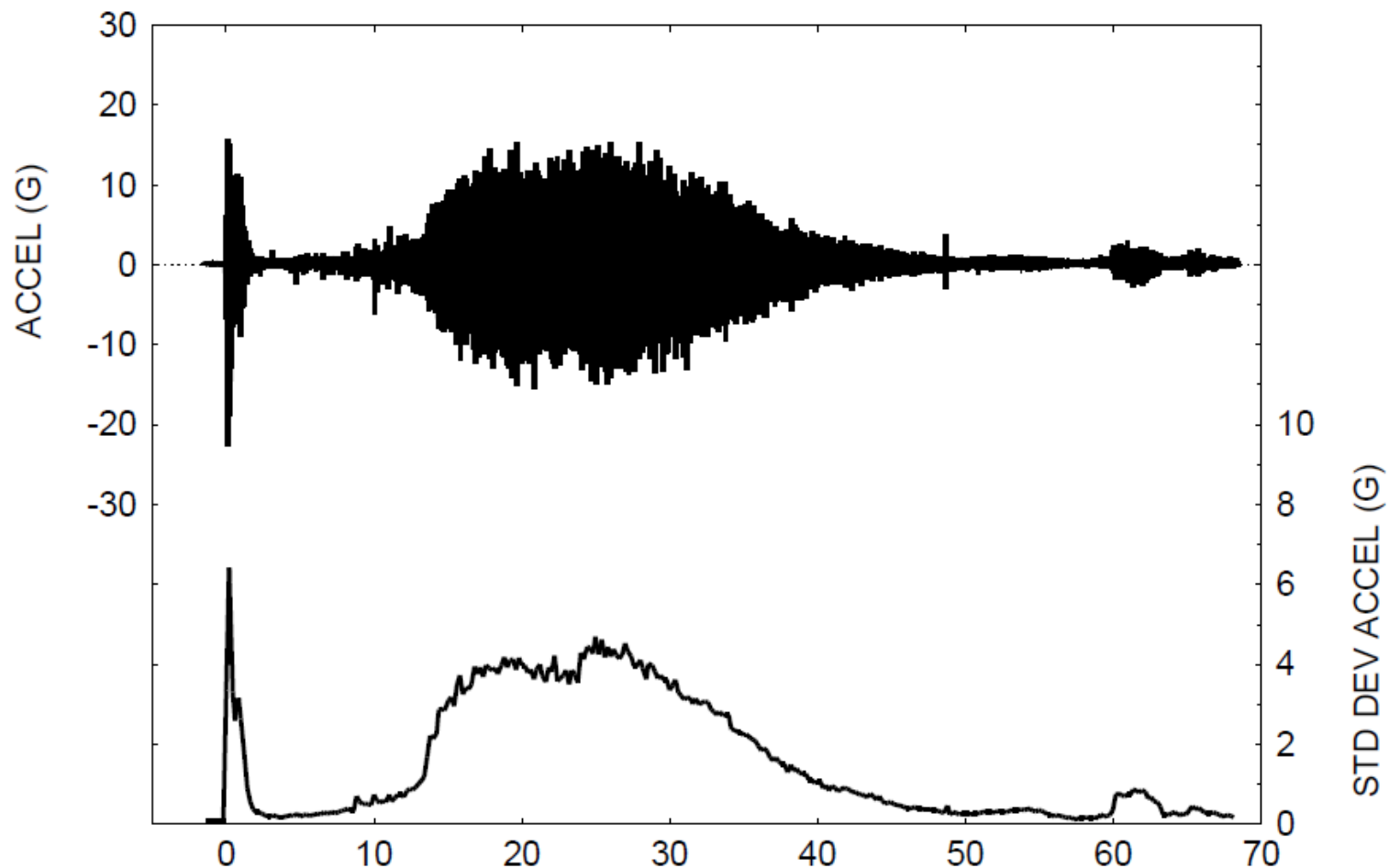
по виброперемещению



по виброускорению



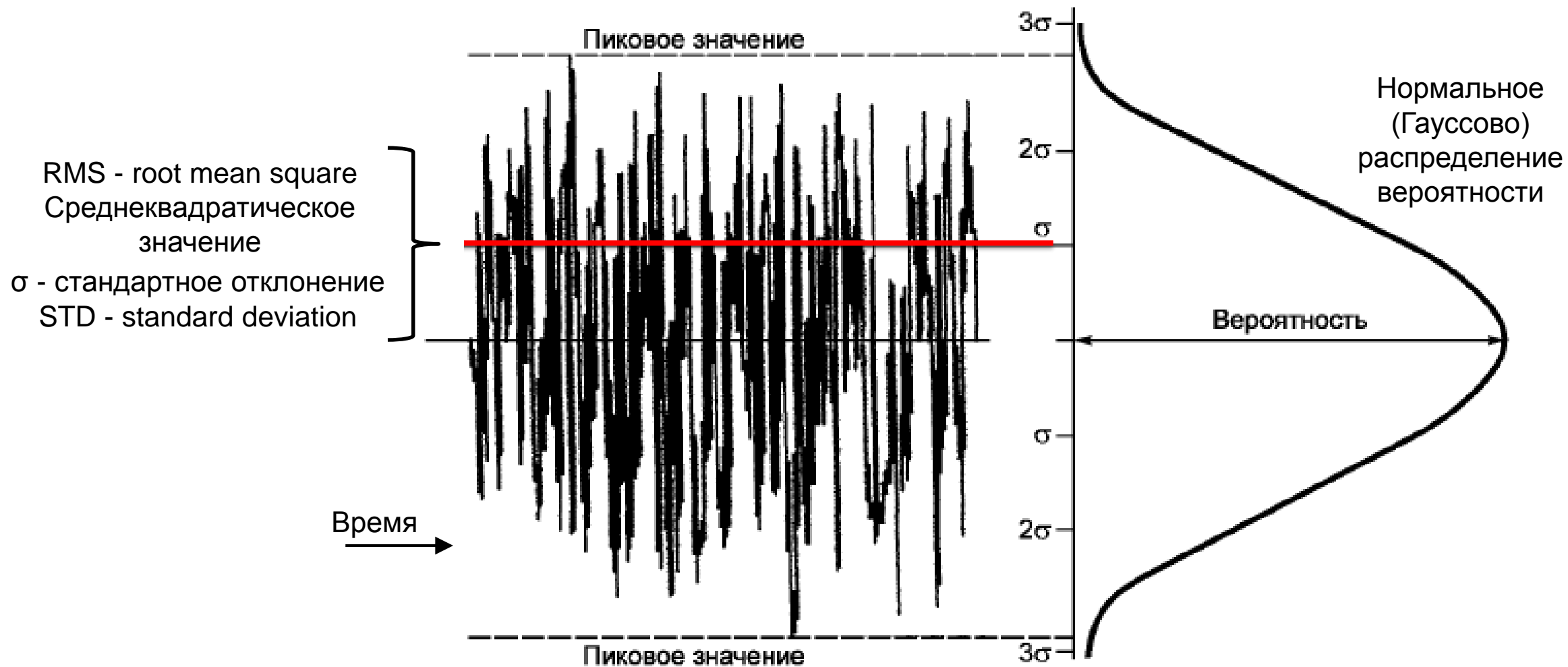
Сигнал ускорения от времени



Запись вибро-ускорения
двигателя ракеты на стенде
(левая шкала) и
соответствующее
среднеквадратическое
значение ускорения
(правая шкала) в величинах
 $G=9,8 \text{ м/с}^2$.

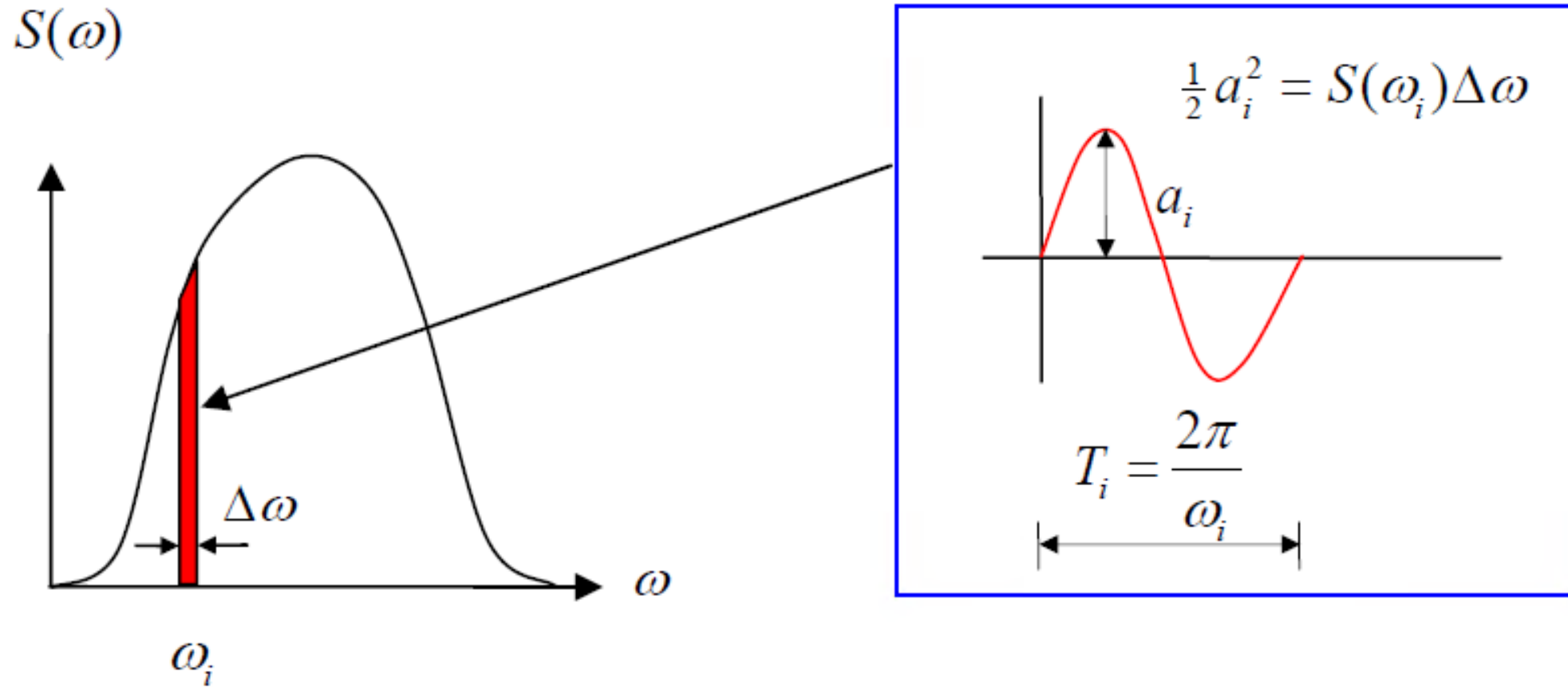


Статистические параметры случайного сигнала во времени



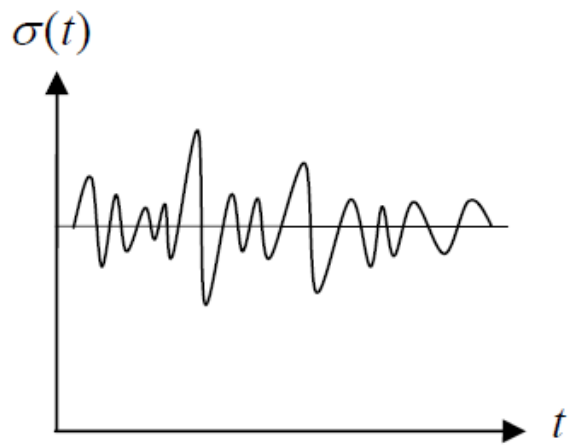


Спектральная плотность как частотное распределение дисперсий

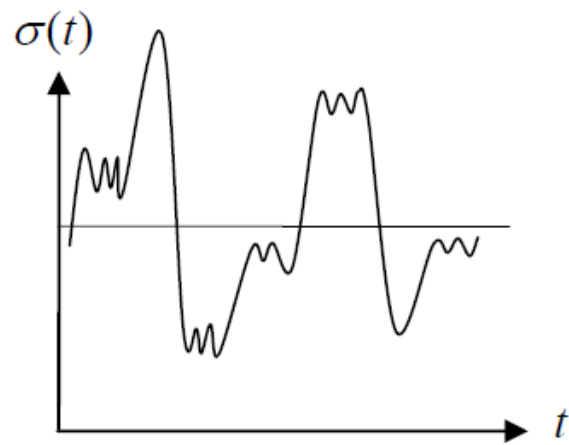




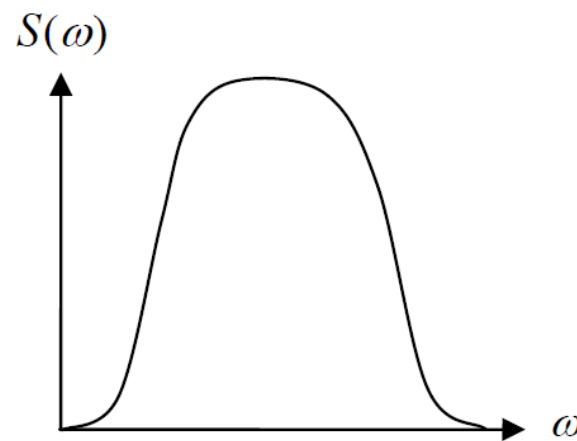
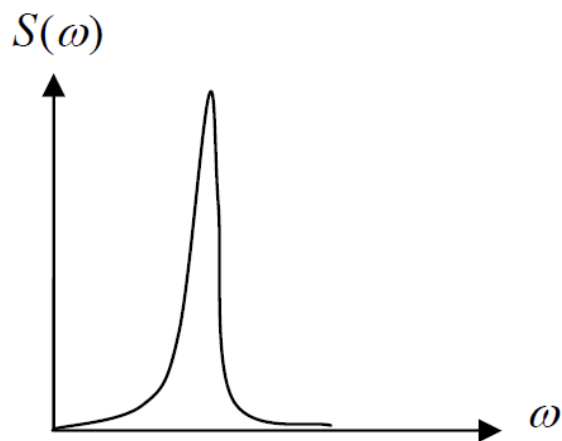
Виды сигналов во времени и их спектральные плотности



Узкополосный
сигнал



Широкополосный
сигнал

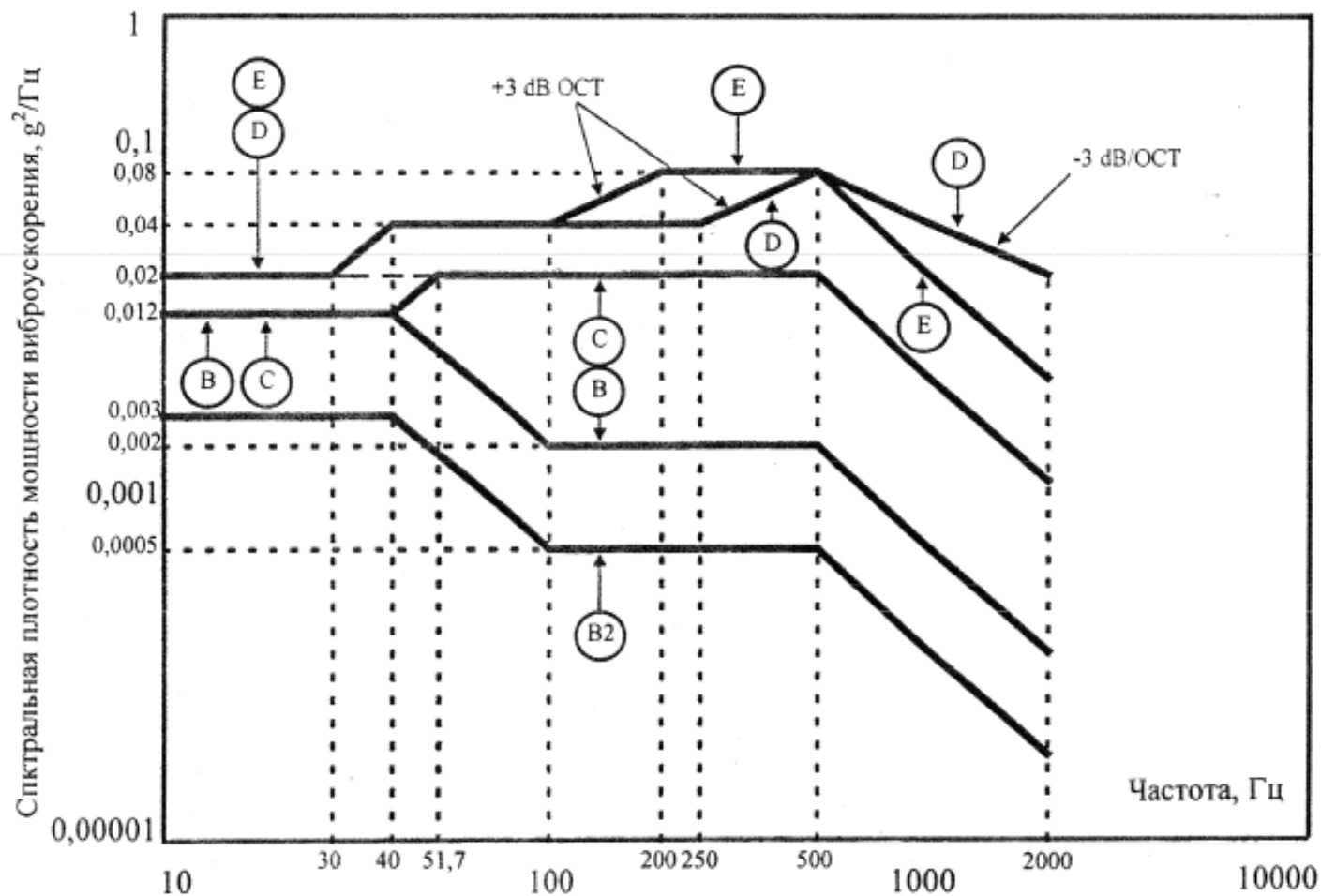




Спектральная плотность мощности

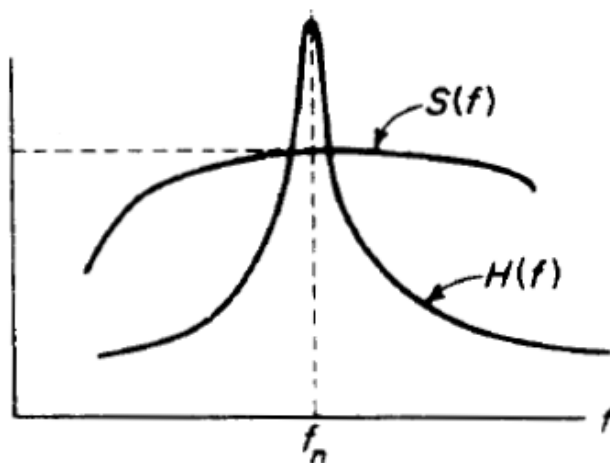
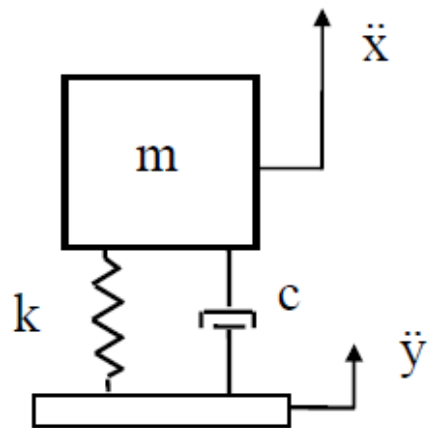
Кривая	СКЗ, g
B2	0,7
B	1,48
C	4,12
D	8,92
E	7,94

Некоторые нормы испытаний
на случайную стандартную
вибрацию





Решение для одномассовой системы



$$(\ddot{x}_{G(RMS)})^2 = \int_0^{\infty} H(f)^2 S(f) df$$

$$(\ddot{x}_{G(RMS)})^2 = \int_0^{\infty} \frac{\left(1 + \left(2 \frac{c}{c_c} \frac{f}{f_n}\right)^2\right) S(f) df}{\left(1 - \left(\frac{f}{f_n}\right)^2\right)^2 + \left(2 \frac{c}{c_c} \frac{f}{f_n}\right)^2} = \frac{\pi}{2} \left(\frac{f_n}{2 \frac{c}{c_c}}\right) S(f_n)$$



Итоговые результаты

Задание
спектральной
плотности
по y, \dot{y}, \ddot{y}



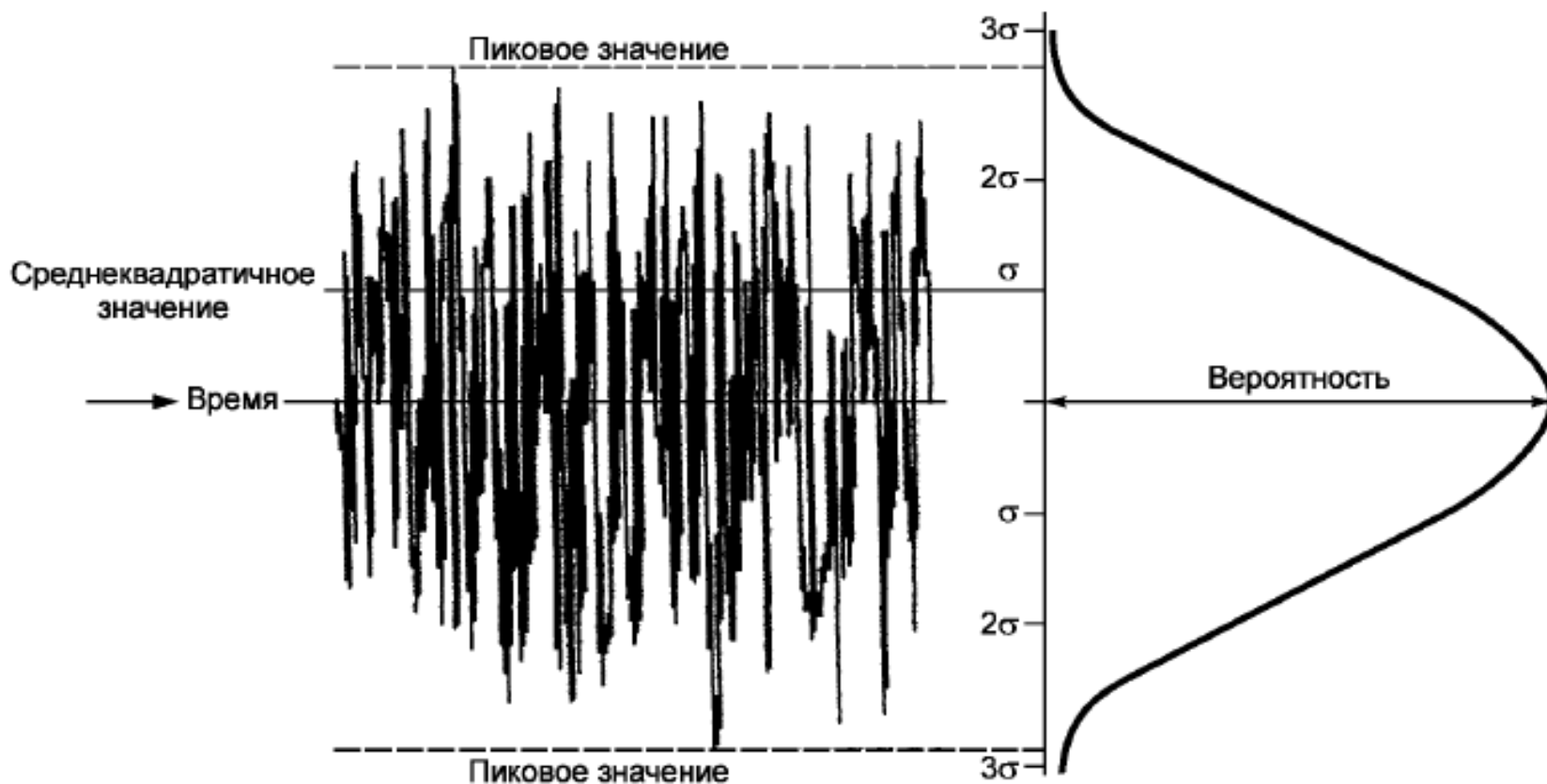
Гармонический
анализ



Вероятностные
результаты
по $x, \dot{x}, \ddot{x},$
 ε и σ



Итоговые результаты



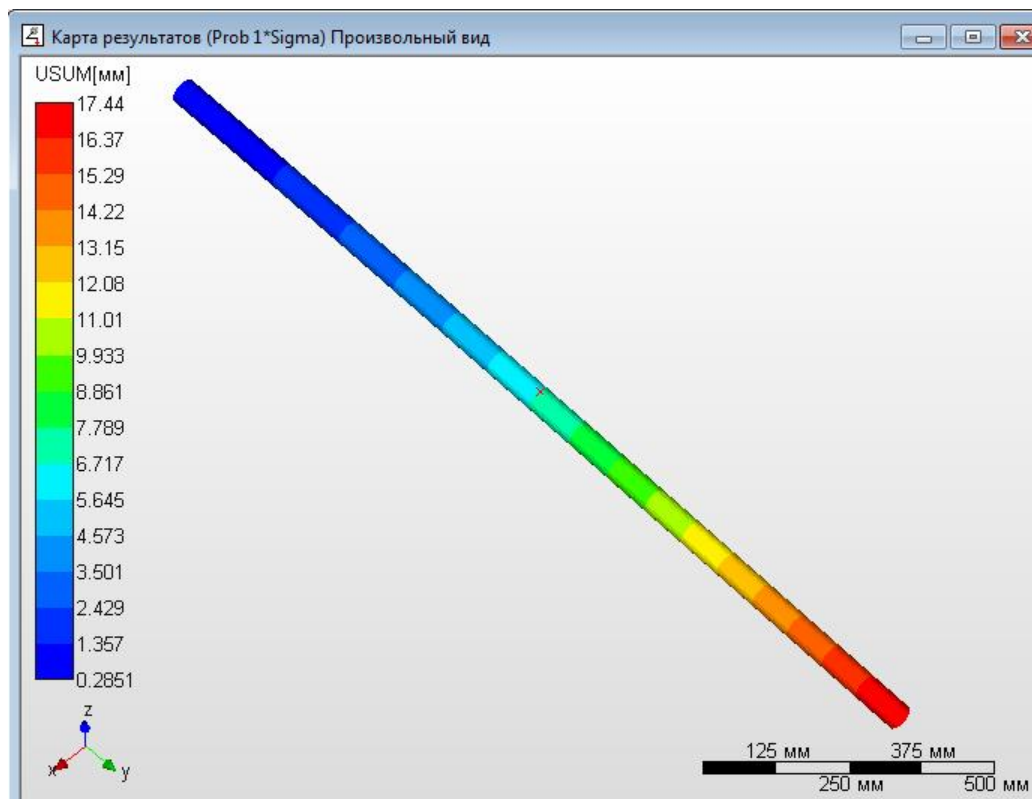
σ - стандартное отклонение

Статистическая вероятность для нормального распределения		
Внутри	$\pm 1\sigma$	68,27%
Снаружи	$\pm 1\sigma$	31,73%
Внутри	$\pm 3\sigma$	99,73%
Снаружи	$\pm 3\sigma$	0,27%

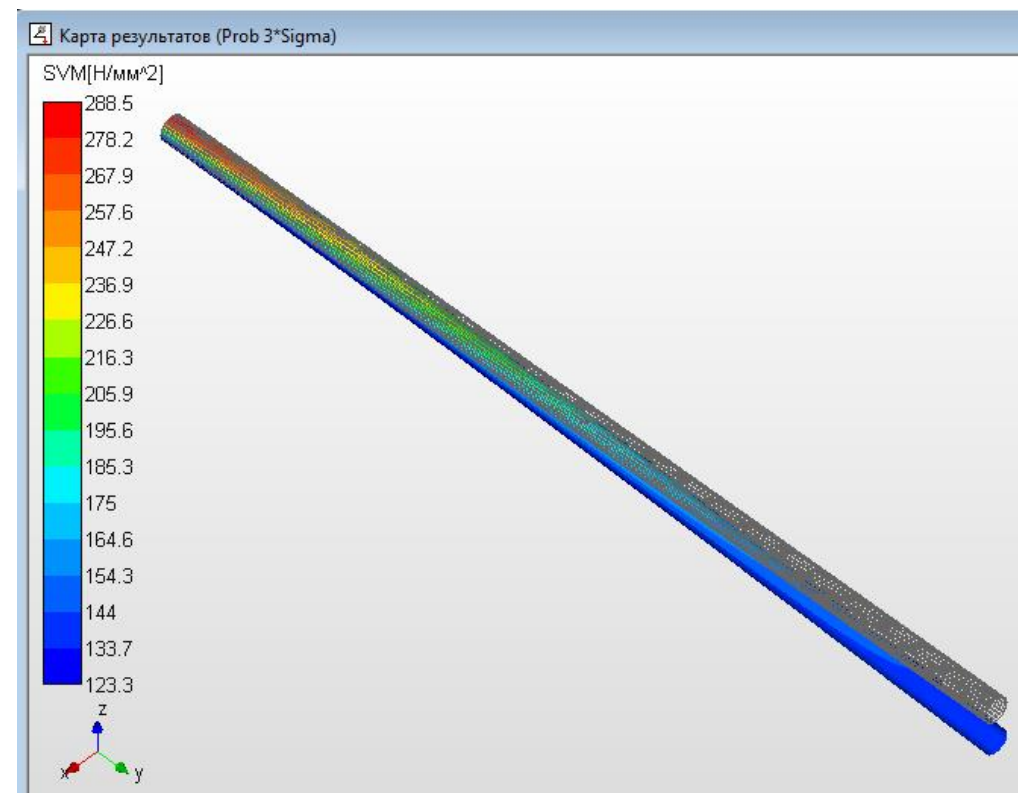


Итоговые результаты

Перемещение с вероятностью 1σ



Эквивалентные напряжения с вероятностью 3σ



σ - стандартное отклонение



Задачи на ближайшую перспективу

- 1) Сравнение результатов численного моделирования не только по зарубежным КЭ-системам, но и с **аналитическими** решениями.
- 2) Расширение модуля отображения частотно-временных графиков функционалом, позволяющим произвести как основные статистические расчёты, так и специфические, типа расчёта **логарифмического декремента** колебания или **добротности** резонансного пика. А так же дополнение специфическими графиками, которые востребованы на стендовых испытаниях.
- 3) Создание модуля **виброусталостного расчёта** на основе ГА и задаваемого пользователем графика синусоидальной вибрации и/или графика спектральной плотности мощности.
- 4) Для задачи виброизоляции расчёт параметров демпфера и выбор из доступного ассортимента.
- 5) Задачи роторной динамики.



Спасибо за внимание!

**Компания НТЦ «АПМ»
(научно-технический центр)
Московская область, г. Королев
Октябрьский бульвар, д. 14, офис 6
Тел.: (495) 120-58-10
Internet: www.apm.ru
E-mail: com@apm.ru**