

1

Дипломный проект на тему:

РАЗРАБОТКА СТЕНДА
ДЛЯ
БАЛАНСИРОВКИ ГИБКИХ РОТОРОВ

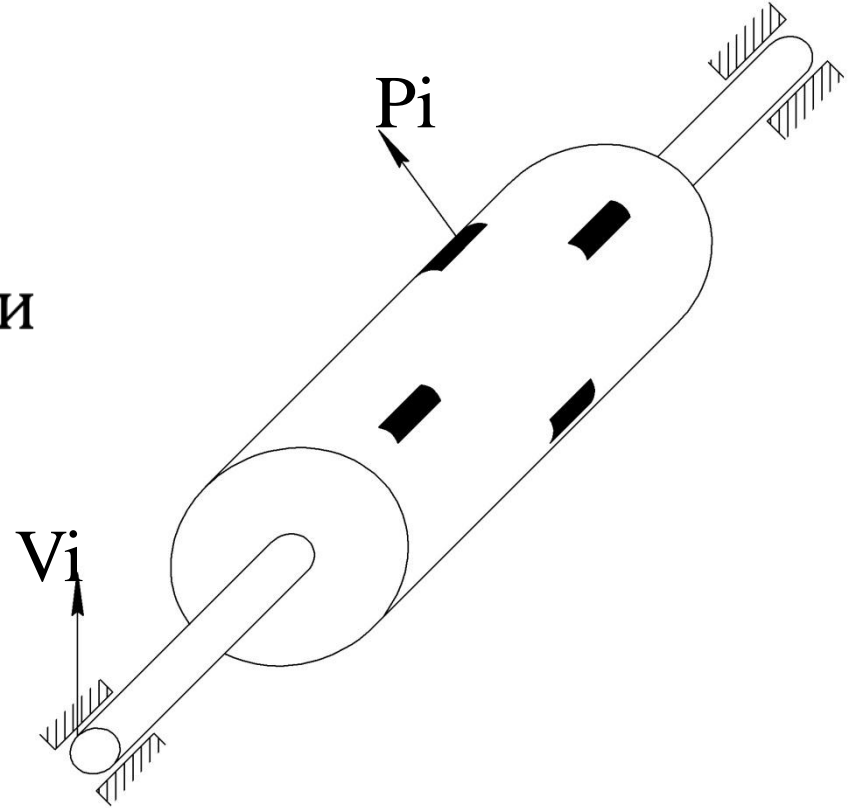
2 Ведение: Основное уравнение балансировки

$$[Z] \cdot \{P\} = -\{V\}$$

$[Z]$ – Матрица динамической податливости

$\{P\}$ – Вектор центробежных сил

$\{V\}$ – вектор начальной вибрации на Опорах несбалансированного ротора



3 Введение: Техническое уравнение балансировки

$$[D_s(\omega)] \cdot \{M\} = -\{X_s(\omega)\}$$

$$[D_m(\omega)] \cdot \{M\} = -\{X_m(\omega)\}$$

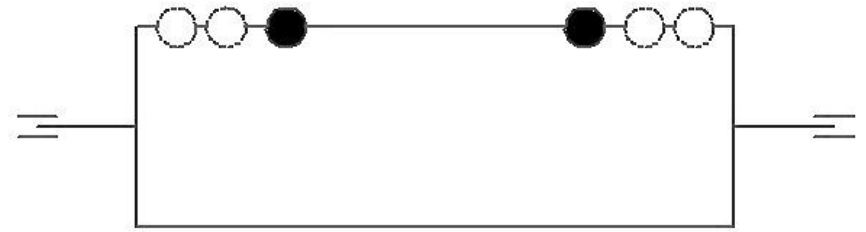
$D_s(\omega)$ – матрица ДКВ при статическом дисбалансе

$D_m(\omega)$ – матрица ДКВ при моментном дисбалансе

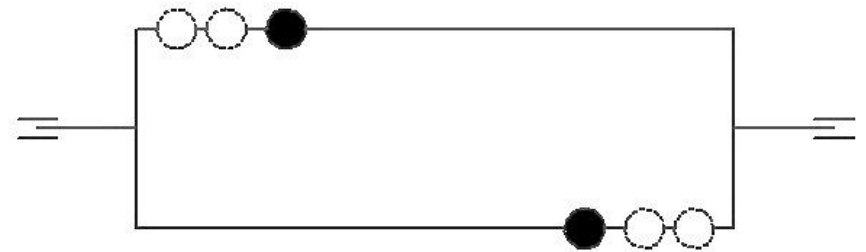
$X_s(\omega)$ – вектор перемещений для статического дисбаланса

$X_m(\omega)$ – вектор перемещений для моментного дисбаланса

M – вектор массы



Симметричная система нагружения



Кососимметричная система нагружения

4

Цели и задачи дипломного проекта

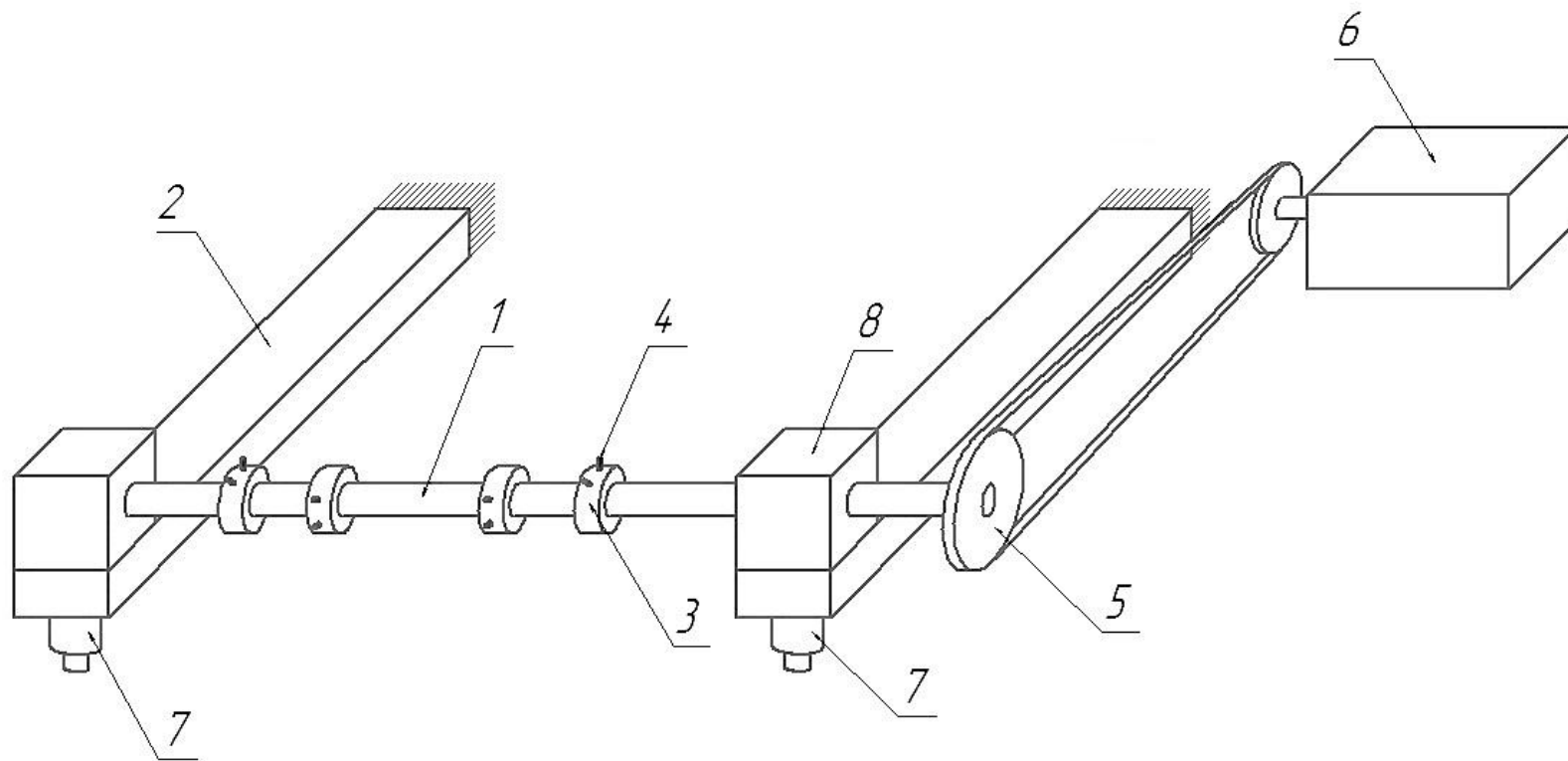
1) Общее конструирование стенда

**2) Динамический расчёт с целью определения
собственных частот и форм колебаний**

**3) динамический расчёт с целью определения
динамических коэффициентов влияния и выбора
балансируемых плоскостей**

5

Эскиз механической части станда



1) Ротор

2) Упругая опора

3) Место крепления
балансируемых грузов

4) Балансировочный груз

5) Ременная передача

7) Датчики

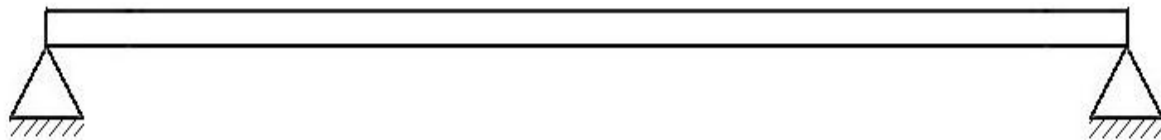
6) Электродвигатель

8) Подшипниковая опора

6

Предварительный динамический расчёт.

Расчётная схема ротора

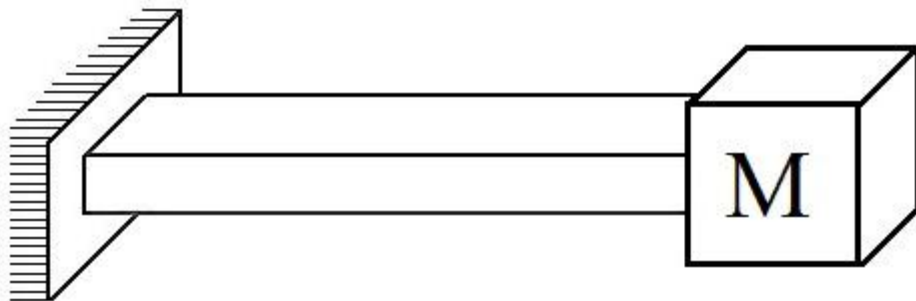


$$\omega = \frac{\Delta^2}{L_r^2} \cdot \sqrt{\frac{E \cdot J}{\rho \cdot F}} = 125 \text{ рад/с}$$

$$L_r = 1 \text{ м}$$

$$d_r = 0.01 \text{ м}$$

Расчётная схема опоры



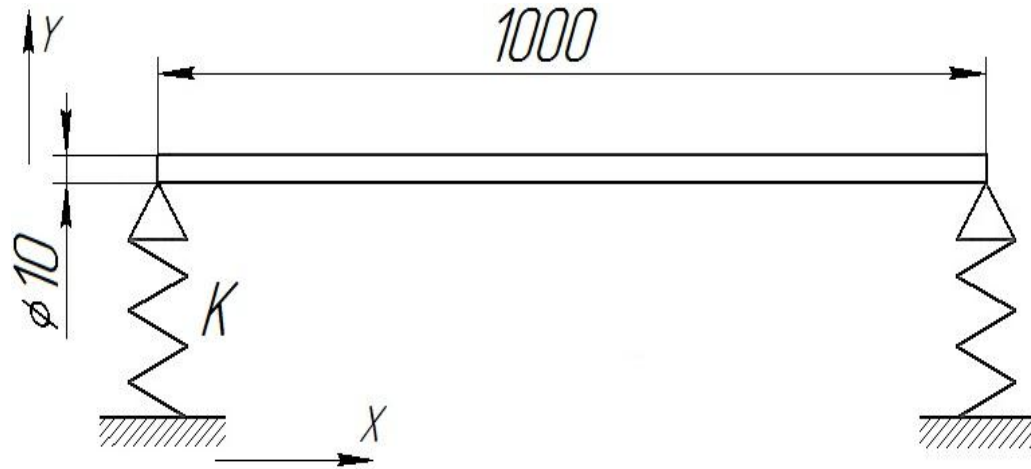
$$\omega_b = \sqrt{\frac{k_b}{M}} \quad M = 0.721 \text{ кг}$$

$$k_b = 1.822 \cdot 10^5 \text{ Н/м}$$

$$L_b = 0.5 \text{ м}$$

$$h = 0.04 \text{ м} \quad b = 0.006 \text{ м}$$

Уточнённый динамический расчёт



Уравнение свободных колебаний:

$$E \cdot J \cdot \frac{d^4 y(x, t)}{dx^4} + \rho \cdot F \cdot \frac{d^2 y(x, t)}{dt^2} = 0$$

Граничные условия

Момент

$$y''(0) = y''(L_r) = 0$$

Поперечная сила

$$E \cdot J \cdot y'''(0) = -k \cdot y(0)$$

$$E \cdot J \cdot y'''(L_r) = k \cdot y(L_r)$$

Решение уравнения

$$y(x, t) = Y(x) \cdot \cos \omega_k t$$

Уравнение формы

$$Y(x) = A \cdot \sin\left(\Delta \cdot \frac{x}{L_r}\right) + B \cdot \cos\left(\Delta \cdot \frac{x}{L_r}\right) + C \cdot e^{\left(\Delta \cdot \frac{x}{L_r}\right)} + D \cdot e^{-\left(\Delta \cdot \frac{x}{L_r}\right)}$$

8 Система уравнений получена из граничных условий

$$F1(\Delta) + F2(\Delta) = 0$$

$$F3(\Delta) + F4(\Delta) = 0$$

Где:

$$F1(\Delta) = e^{\Delta} - \cos(\Delta) - \sin(\Delta) \left(1 + \frac{2\gamma}{\Delta^3} \right)$$

$$F2(\Delta) = e^{-\Delta} - \cos(\Delta) + \sin(\Delta) \left(1 - \frac{2\gamma}{\Delta^3} \right)$$

$$F3(\Delta) = \sin(\Delta) \left(\frac{2\gamma^2}{\Delta^6} + \frac{\gamma}{\Delta^3} - 1 \right) + \cos(\Delta) \left(1 + \frac{3\gamma}{\Delta^3} \right) + e^{\Delta} \left(\frac{\gamma}{\Delta^3} - 1 \right)$$

$$F4(\Delta) = \sin(\Delta) \left(\frac{2\gamma^2}{\Delta^6} - \frac{\gamma}{\Delta^3} - 1 \right) + \cos(\Delta) \left(-1 + \frac{3\gamma}{\Delta^3} \right) + e^{-\Delta} \left(\frac{\gamma}{\Delta^3} + 1 \right)$$

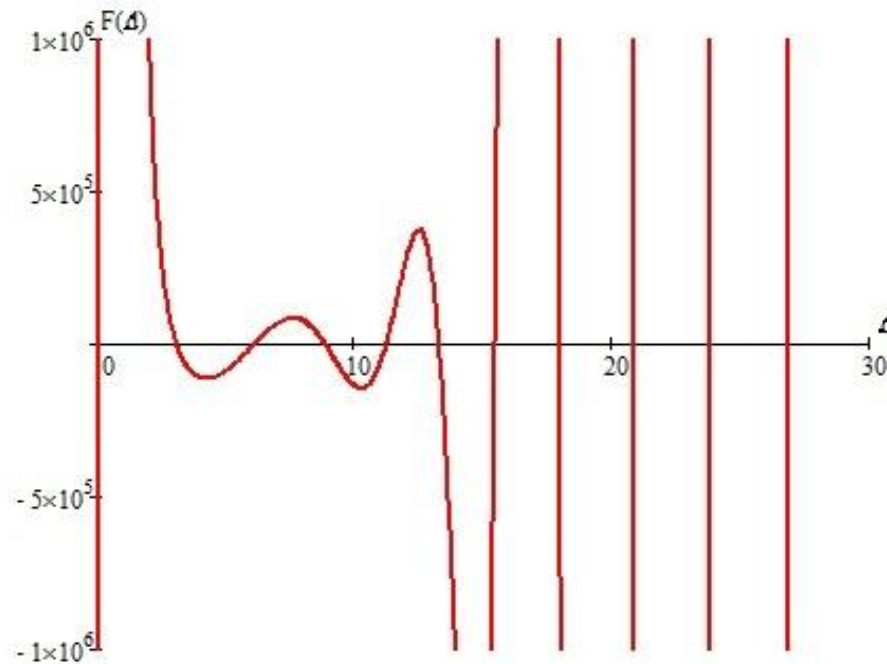
$$\gamma = \frac{k_b \cdot L_r^3}{E \cdot J}$$

9

Определитель системы уравнений:

$$F(\Delta) = F1(\Delta) \cdot F4(\Delta) - F2(\Delta) \cdot F3(\Delta)$$

График функции $F(\Delta)$



$\Delta 1=3.123;$	$f1=20.751\text{Гц};$	$\omega 1=130.38 \text{ рад/с}$
$\Delta 2=6.132;$	$f2=80.014\text{Гц};$	$\omega 2=502.743 \text{ рад/с}$
$\Delta 3=8.892;$	$f3=168.255\text{Гц};$	$\omega 3=1057 \text{ рад/с}$
$\Delta 4=11.256;$	$f4=269.588\text{Гц};$	$\omega 4=1694 \text{ рад/с}$
$\Delta 5=13.312;$	$f5=377.08\text{Гц};$	$\omega 5=2369 \text{ рад/с}$

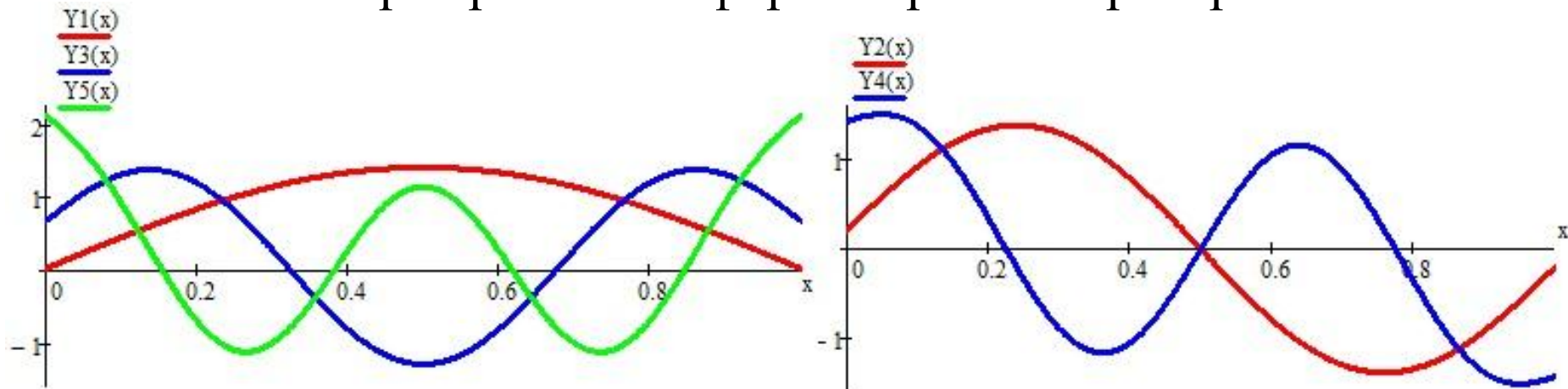
Уравнение формы прогибов

$$Y_i(x) = A_i \cdot \sin\left(\Delta_i \cdot \frac{x}{L_r}\right) + B_i \cdot \cos\left(\Delta_i \cdot \frac{x}{L_r}\right) + C_i \cdot e^{\left(\Delta_i \cdot \frac{x}{L_r}\right)} + D_i \cdot e^{-\left(\Delta_i \cdot \frac{x}{L_r}\right)}$$

Условие нормирования

$$\int_0^{L_r} Y_i^2(x) dx = 1$$

Нормированные формы прогибов ротора



Расчётная схема симметричной и кососимметричной систем нагружения

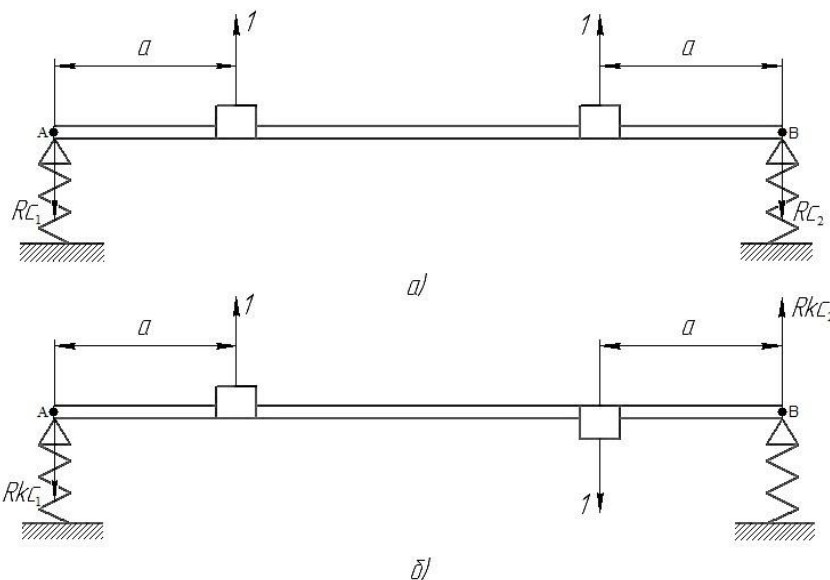
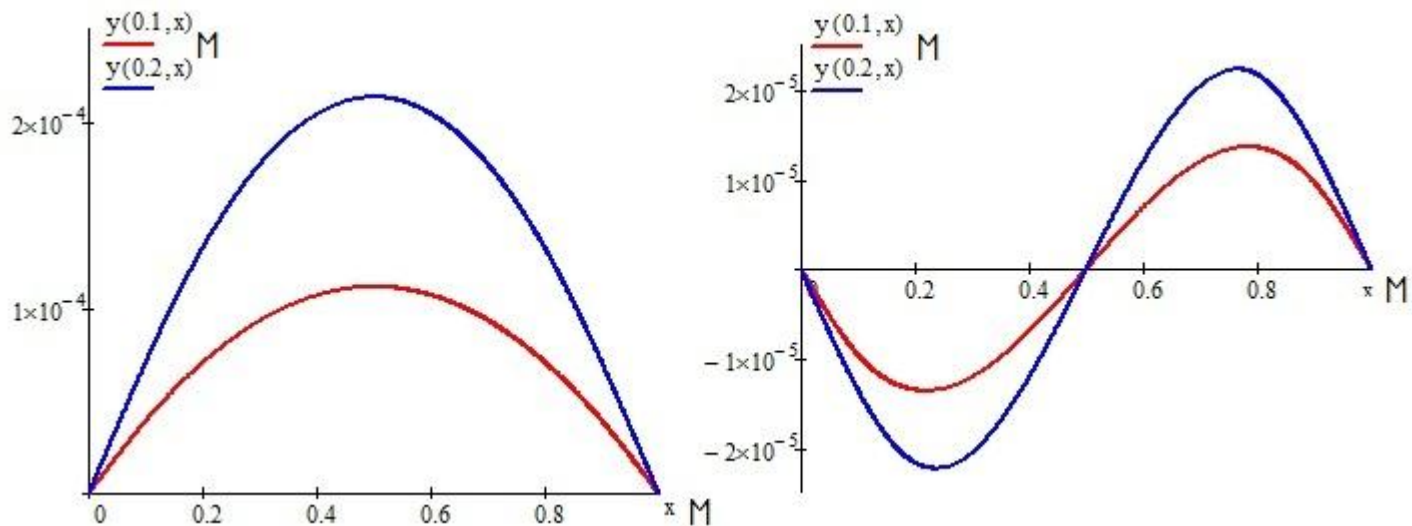
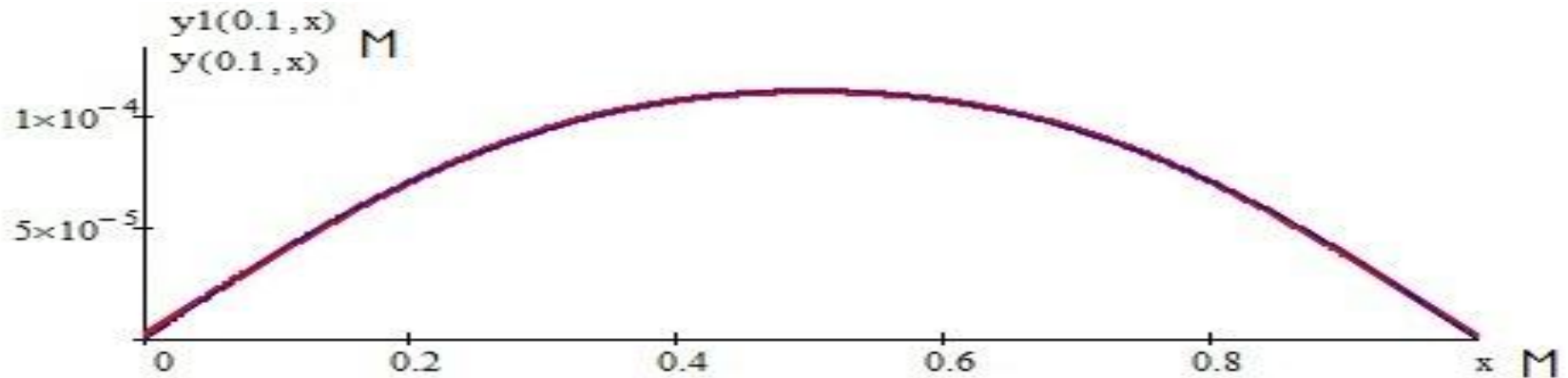


График эюр прогиба, рассчитанные методом Бубнова

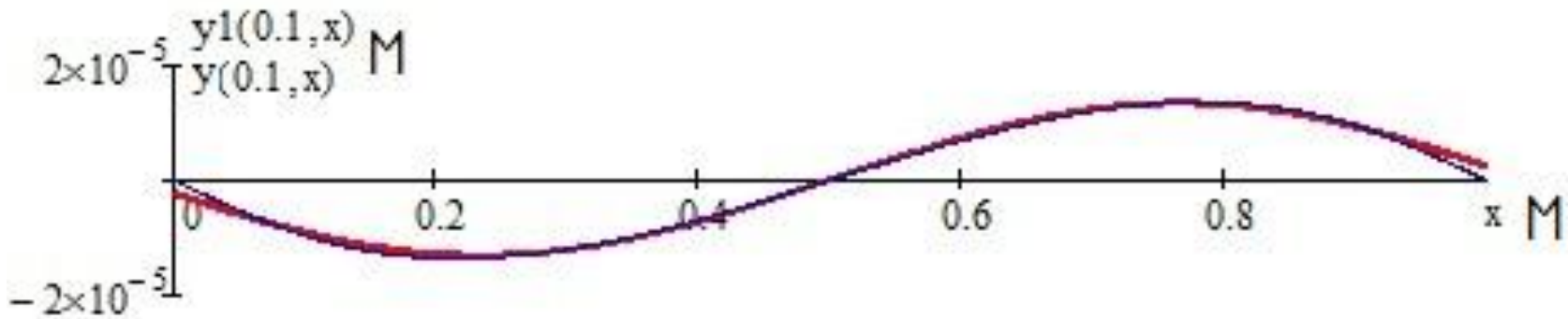


12 Разложение эюр статического прогиба по формам колебаний

$$y_1(a, x) = \psi_1(a) \cdot Y_1(x) + \psi_3(a) \cdot Y_3(x) + \psi_5(a) \cdot Y_5(x)$$



$$y_1(a, x) = \psi_2(a) \cdot Y_2(x) + \psi_4(a) \cdot Y_4(x)$$



Где: $\psi_k(a) = \frac{1}{L} \int_0^L y(a, x) \cdot Y_k(x) dx$ Коэффициент формы

13 Уравнения динамических прогибов от единичных сил

Симметричная система балансировки:

$$y(x, a, \omega) = \psi_1(a) \cdot Y_1(x) \cdot v_1(\omega) + \psi_3(a) \cdot Y_3(x) \cdot v_3(\omega) + \psi_5(a) \cdot Y_5(x) \cdot v_5(\omega)$$

Кососимметричная система балансировки:

$$y(x, a, \omega) = \psi_2(a) \cdot Y_2(x) \cdot v_2(\omega) + \psi_4(a) \cdot Y_4(x) \cdot v_4(\omega)$$

$$v_k(\omega) = \frac{\omega_k^2}{\sqrt{(\omega_k^2 - \omega^2)^2 - 4\varepsilon_k^2 \omega^2}} e^{i \cdot \varphi_k(\omega)} \quad - \text{ Коэффициент динамичности}$$

$$\text{Где: } \varphi_k(\omega) = -\text{atan} \left(\frac{2\varepsilon_k \omega}{\omega_k^2 - \omega^2} \right) \quad - \text{ Фазовый сдвиг}$$

Динамические коэффициенты влияния

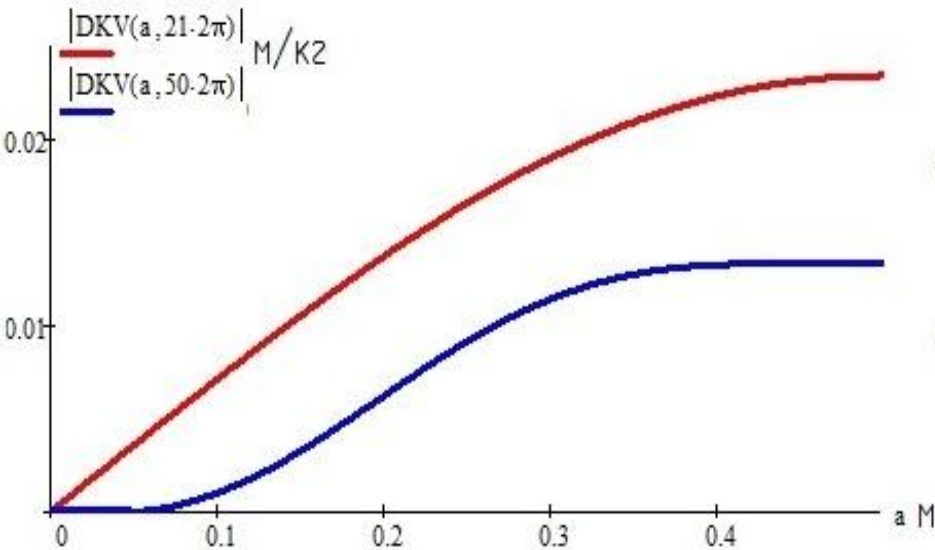
Симметричная система балансировки:

$$DKV(a, \omega) = (\psi_1(a) \cdot Y_1(0) \cdot v_1(\omega) + \psi_3(a) \cdot Y_3(0) \cdot v_3(\omega) + \psi_5(a) \cdot Y_5(0) \cdot v_5(\omega)) \cdot r_0 \cdot \omega^2$$

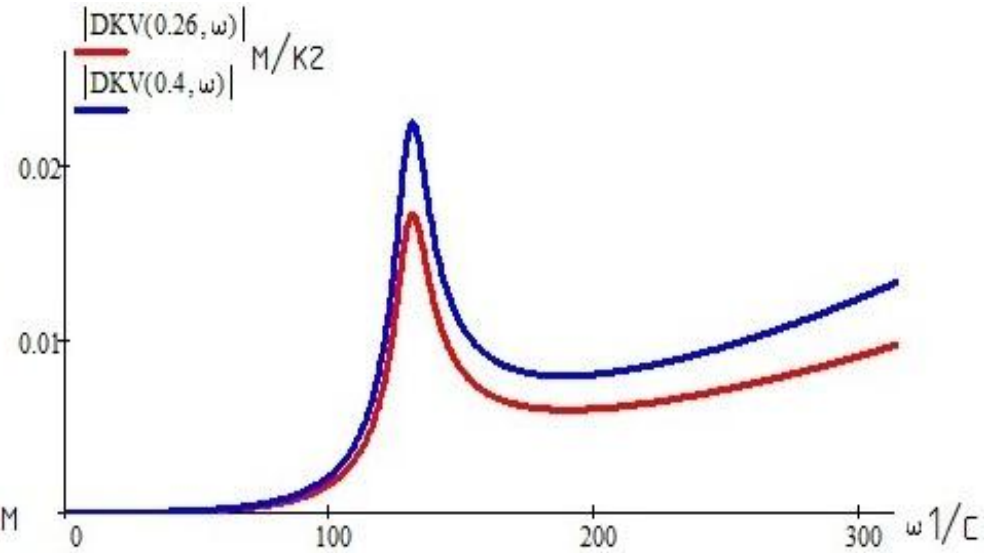
Кососимметричная система балансировки:

$$DKV(a, \omega) = (\psi_2(a) \cdot Y_2(0) \cdot v_2(\omega) + \psi_4(a) \cdot Y_4(0) \cdot v_4(\omega)) \cdot r_0 \cdot \omega^2$$

Где: r_0 – радиус установки груза



Зависимость модуля ДКВ от частоты
(плоскости балансировки 0.26 м. и 0.4 м.)



Зависимость модуля ДКВ от положения
балансировочных плоскостей на
частотах 21 Гц и 50 Гц.

15 Значения ДКВ для симметричной системы нагружения

Матрица ДКВ

$$\begin{aligned} DKV_{\text{общ}} &= \begin{pmatrix} DKV11 & DKV12 \\ DKV21 & DKV22 \end{pmatrix} = \\ &= \begin{pmatrix} 17.089 \cdot e^{j \cdot 1.013} & 22.325 \cdot e^{j \cdot 1.016} \\ 9.665 \cdot e^{-j \cdot 3.141} & 13.283 \cdot e^{j \cdot 3.121} \end{pmatrix} \quad [\text{мкм/гр}] \end{aligned}$$

Коэффициент эффективности схем балансировки

$$\frac{\sqrt{|\det DKV|}}{\frac{1}{4} \sum_{n=1}^4 |DKV_n|} = \frac{1}{4}$$

Значения ДКВ для кососимметричной системы нагружения

$$DKV = |DKV(0.17, 50 \cdot 2\pi)| \cdot e^{-i \cdot \arg(DKV(0.17, 50 \cdot 2\pi))} = 8.812 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-j \cdot 3.033}$$

$$|DKV| = 8.812 \quad [\text{мкм/гр}]$$