

**III Международная Научно-Техническая конференция  
«Авиадвигатели XXI века», посвященная 80-летию ЦИАМ**

**Динамика роторных систем,  
опирающихся на магнитные  
подшипники**

**Леонтьев М.К.**

**Профессор МАИ, Генеральный директор инженерно-технического  
центра по роторной динамике Alfa-Tranzit Co., Ltd**

**Давыдов А.Л.**

**Аспирант МАИ**

**Дегтярев С.А.**

**Руководитель направления Alfa-Tranzit Co., Ltd**



***Декабрь 2010***



# Активные магнитные подшипники



## Области применения

- высоковакуумные турбомолекулярные насосы
- точные измерительные приборы, гироскопы, испытательные стенды и т.д.
- центробежные электрокомпрессоры
- шлифовальные и фрезерные шпиндели
- балансировочные станки
- супермаховики для накопления энергии
- газогенераторы
- насосные станции

## Особенности применения

- отсутствие смазки и износа
- отсутствие контакта и загрязнения
- активное управление жесткостью и демпфированием
- скорость вращения (до 800 000 об/мин)
- низкий уровень шумов
- точность позиционирования оси ротора (до 0.5 мкм)
- работа в экстремальных условиях (высокий вакуум, невесомость, переменные температуры)

## Проблемы

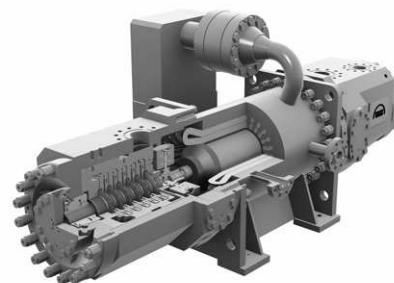
- ограниченная несущая способность
- большая требуемая мощность
- большое тепловыделение
- большой вес
- необходимость системы управления



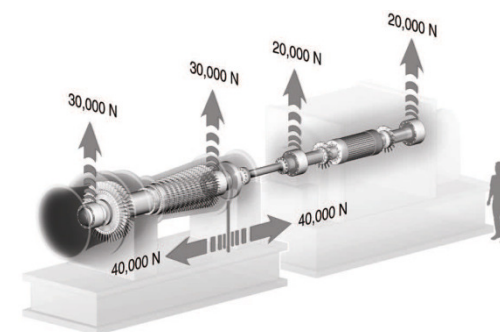
а) Турбовентилятор для охлаждения лазера  $CO_2$ , скорость вращения 54 000 об/мин



б) Синхронный генератор на сверхпроводящих магнитных подшипниках. Температура 28°К.

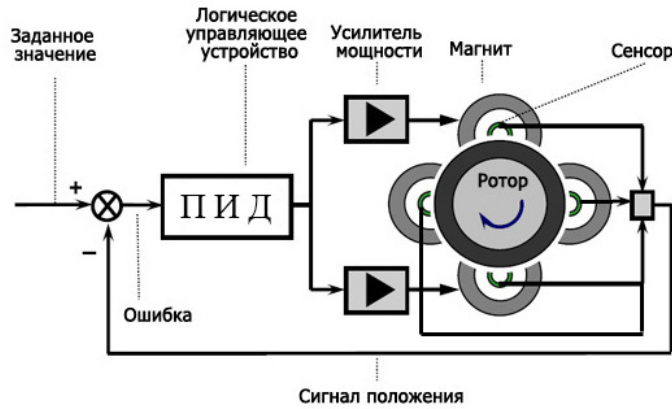
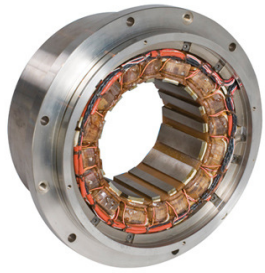


в) Компрессор HOFIM для перекачки природного газа (6 МВт, 9000 об/мин. MAN Turbo/S2M)



г) Газотурбинный генератор ГТЭ-009МЭ, Энергомашкорпорация, Россия (2x9 МВт, 6010 об/мин. S2M)

# Модуль – Магнитный подшипник – для задач роторной динамики



Магнитная сила:

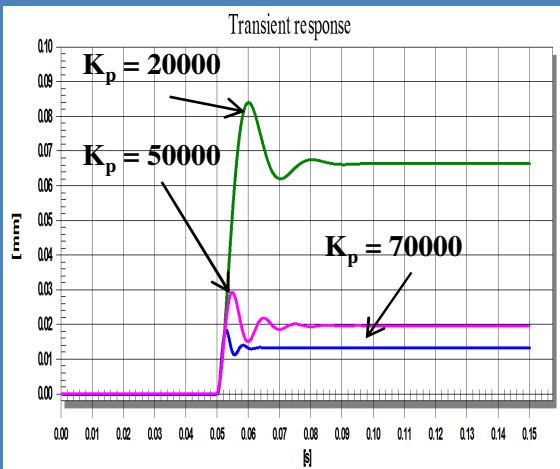
$$F = \frac{\mu_0 N^2 A \delta}{4} \left( \frac{I_1^2}{(\delta - y)^2} - \frac{I_2^2}{(\delta + y)^2} \right)$$

ПИД-регулятор:

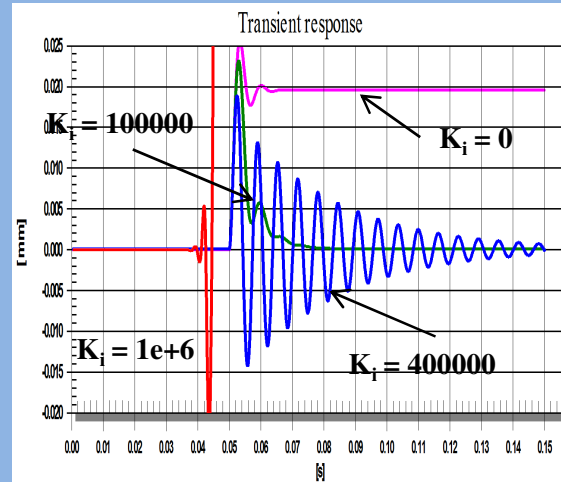
$$I(t) = P + I + D$$

$$I(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de}{dt}$$

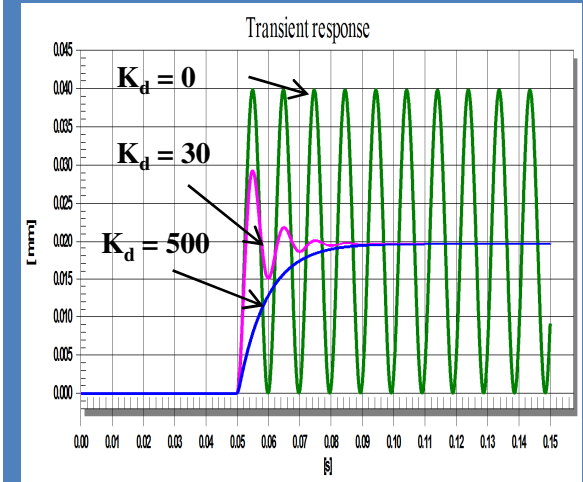
$K_i = 0$   $K_d = \text{const}$   
 $K_p = \text{var}$



$K_p = \text{const}$   $K_d = \text{const}$   
 $K_i = \text{var}$



$K_i = 0$   $K_p = \text{const}$   
 $K_d = \text{var}$



Динамические нагрузки любых типов – внутренние и внешние –  $F(t)$



Динамическая модель роторной системы  
Dynamics R4

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{F(t)\} + \{R\}$$

$\{u\}, \{\dot{u}\}$



$\{R\}$



Модель нелинейной связи (например, АМП)

$$\{R\} = K\{u\} + C\{\dot{u}\} + I \int \{u\}$$

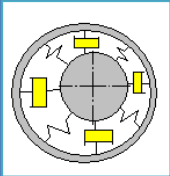
$$K = \frac{\mu_0 N^2 A_g I_b}{\delta_0^2} \left( \frac{I_b}{\delta_0} + K_p \right) \quad C = \frac{\mu_0 N^2 A_g I_b}{\delta_0^3} K_d \quad I = \frac{\mu_0 N^2 A_g I_b}{\delta_0^3} K_i$$

# Элементы для моделирования роторов в Dynamics R4

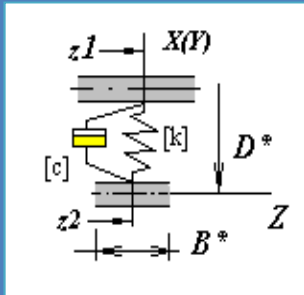


## Упругая связь

Обозначение



Модель

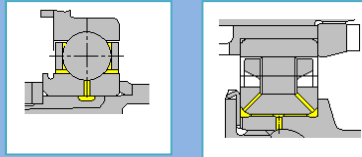


Исходные данные

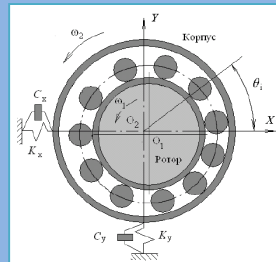
Des	Front support	Designation
conn_type	via body	Type of connection
side1_subs	Subsystem 1	Side1 subsystem
side1_l	0 mm	side1 offset
side2_subs		Side2 subsystem
trns_exclude	yes	Exclude from transient analysis
Type	Isotropic	Link type
stiff_matrix	...	Stiffness matrix
damp_matrix	...	Damping matrix
d*	0 mm	Inner diameter
D*	200 mm	Outer diameter
B*	100 mm	width

## Шариковый и роликовый подшипники

Обозначение



Модель

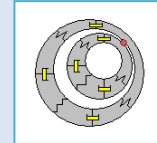


Исходные данные

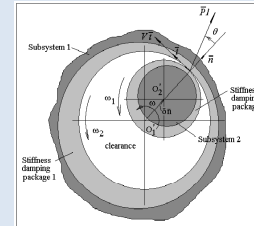
Des	Ball Bearing support 3	Designation
conn_type	via body	Type of connection
side1_subs	Subsystem 1	Side1 subsystem
side1_l	1 mm	side1 offset
side2_subs	Subsystem 2	Side2 subsystem
side2_l	1 mm	side2 offset
Dr	11.9062 mm	Rolling elements diameter
z	11	Rolling elements count
Di	40 mm	Inner race diameter
deltai	0 mm	Inner race clearance
deltao	0 mm	Outer race clearance
Kp_input	input	Type of Hertz stiffness input
KH	1.334e+010 N/m	Hertz stiffness
Cb	2940 N*s/m	Damping coefficient
d*	0 mm	Inner diameter
D*	0 mm	Outer diameter
B*	0 mm	width

## Ограничитель прогиба (зазор)

Обозначение



Модель

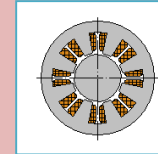


Исходные данные

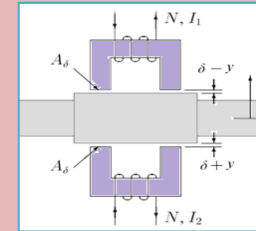
Des	Clearance 2 2	Designation
conn_type	via body	Type of connection
side1_subs		Side1 subsystem
side2_subs	Subsystem 1	Side2 subsystem
side2_l	1 mm	side2 offset
L1	0 mm	Displacement L1
L2	0 mm	Displacement L2
L3	0 mm	Displacement L3
k1	1600 N/m	Damper package 1 stiffness
c1	0 N*s/m	Package 1 damping
k2	1e+010 N/m	Damper package 2 stiffness
c2	0 N*s/m	Package 2 damping
R	50 mm	Packet radius
delta	1 mm	Radial clearance
e1	0 mm	Assembly eccentricity 1
e2	0 mm	Assembly eccentricity 2
Teta1	0 deg	Initial angle position of e1
Teta2	0 deg	Initial angle position of e2
mue	0	Friction coefficient
Vsmin	0.001	Minimal slipping speed
d*	0 mm	Inner diameter
D*	5 mm	Outer diameter
B*	0 mm	width

## Магнитный подшипник

Обозначение



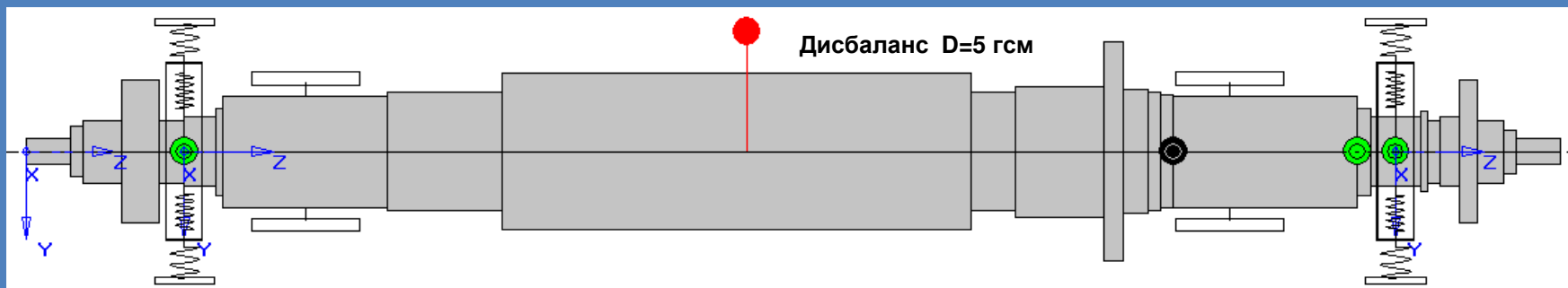
Модель



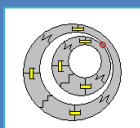
Исходные данные

Des	AMT1	Название
conn_type	via body	Тип подключения
side1_subs	Подсистема 1	Подсистема для сечения 1 связи
side1_l	155.316 mm	положение граничного сечения 1 связи
side2_subs		Подсистема для сечения 2 связи
Type	Исполнительный	Тип связи
Opt.Type	стандарт	Режим ввода параметров
Geometry Type	Цилиндр	Тип подшипника
d1	63 mm	Внутренний диаметр слева
D	220 mm	Внешний диаметр
b	70 mm	Длина пакета стали
gap	0.4 mm	Радиальный зазор между статором и ротором
Imax	5 A	Максимальный ток в обмотке
Np	16	Число полюсов электромагнитов
Ncp	4	Число полюсов управления
Teta_CP1	0 deg	Угол поворота первого полюса управления
Coiling	полное заполнение паза	Тип обмотки
Flux direction	поперечное	Направление магнитного потока
Imax	6 A/mm2	Максимальная плотность тока в обмотке
Controller	ПД - регулятор	Тип регулятора
Kp	50000	Пропорциональная составляющая ПИД-регул.
Kd	5	Дифференциальная составляющая ПИД-регул.
d*	0 mm	Внутренний диаметр
D*	0 mm	Наружный диаметр
B*	0 mm	ширина

# Модель ротора на магнитном подвесе в Dynamics R4

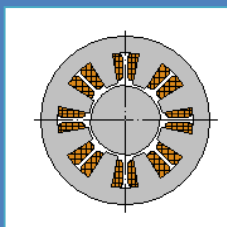


Зазор



Шариковый подшипник

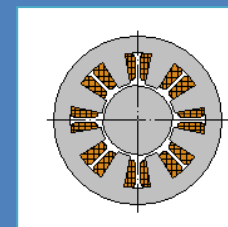
АМП



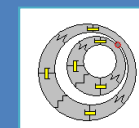
Параметры ротора

Масса, $m$	23.76 кг
Длина, $L$	851 мм
Момент инерции, $J_d$	0.92 кг м <sup>2</sup>
Номинальная частота вращения, $\omega$	500 Hz

АМП



Зазор

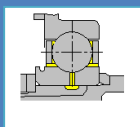


Шариковый подшипник

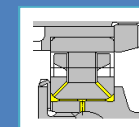
Параметры АМП

Номинальная жесткость, Н/м	0.5e +8
Номинальное демпфирование, Н сек/м	6000
Радиальный зазор, мм	0.5

Упругая связь с основанием

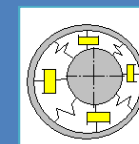
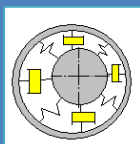


Упругая связь с основанием

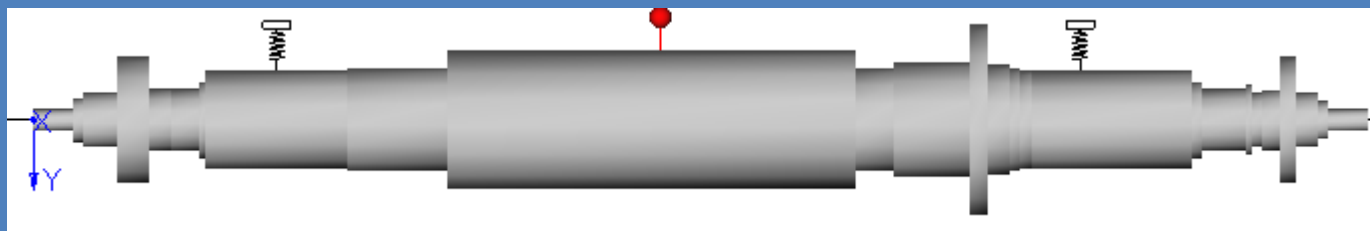


Параметры вспомогательных подшипников

Жесткость, Н/м	1e+8
Демпфирование, Н сек/м	800
Радиальный зазор, мм	0.25



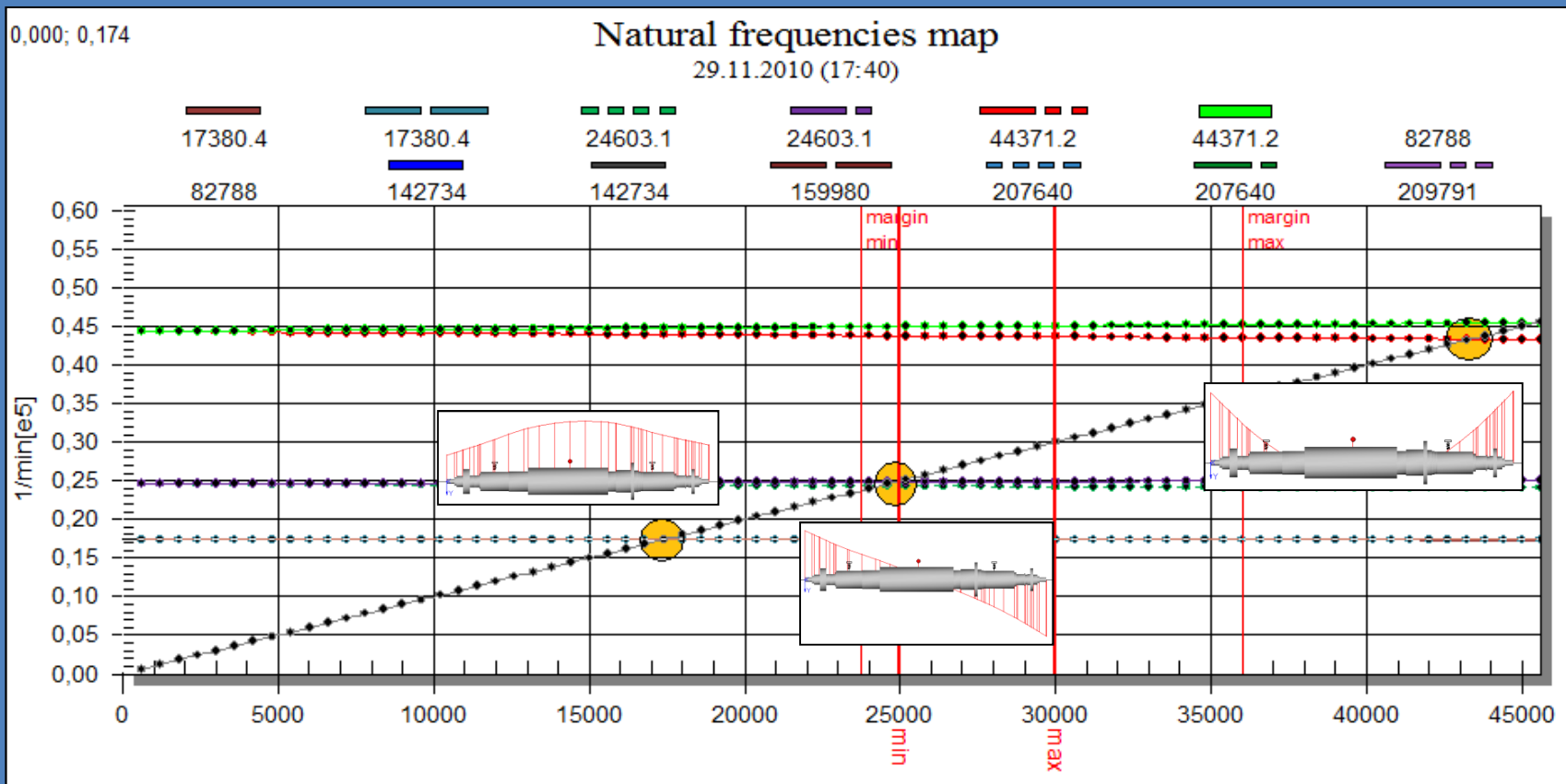
# Критические частоты вращения ротора на АМП



$k_1=0.5e+8$  Н/м

$k_2=0.5e+8$  Н/м

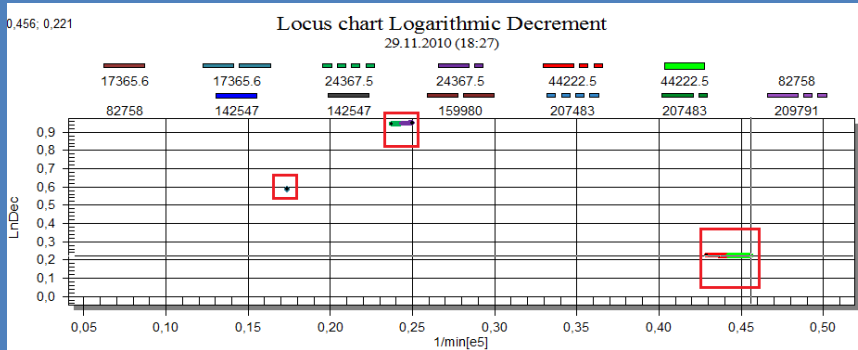
17358.2 (289.3)
17373.0 (289.6)
24106.4 (401.8)
24637.3 (410.6)
43213.1 (720.2)
45303.1 (755.1)



# Вынужденные колебания ротора на АМП



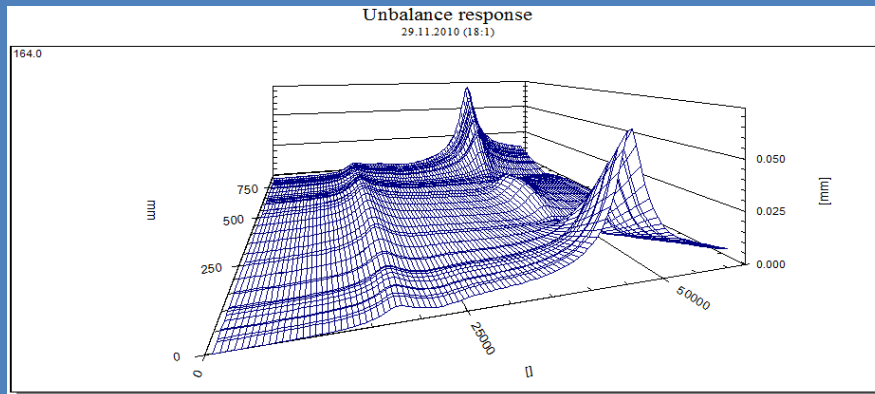
Локус-диаграмма логарифмических декрементов



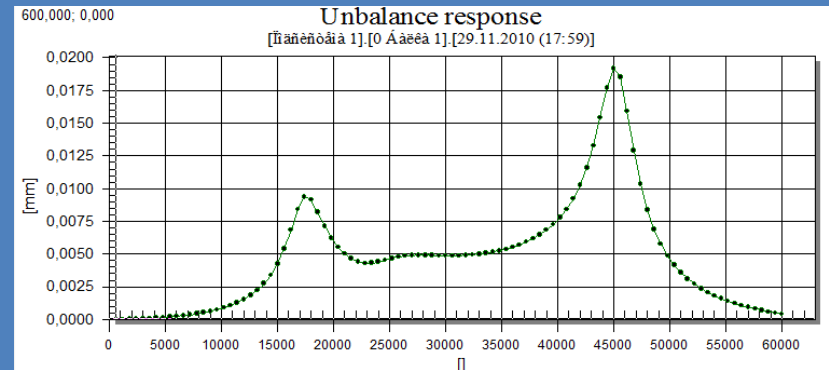
Распределение потенциальной энергии деформаций

Узел	Критические частоты вращения, об/мин		
	17373	24637	45303
Вал ротора	15.506	3.843	87.558
АМП <sub>1</sub>	48.745	43.710	3.602
АМП <sub>2</sub>	35.749	52.447	8.839
Сумма	100	100	100

3D - амплитудно-частотная характеристика ротора



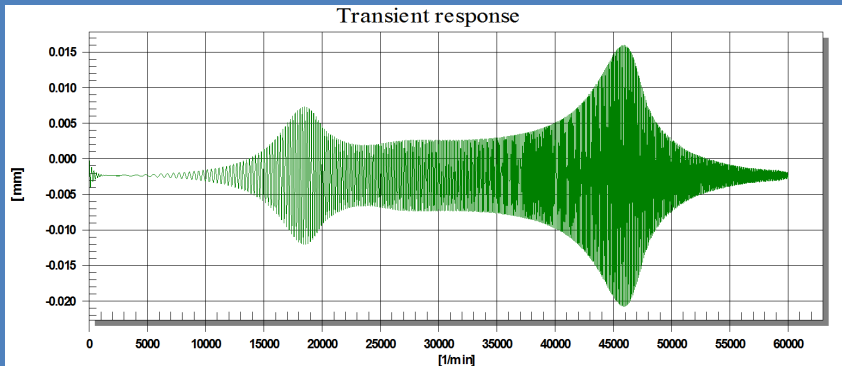
2D - амплитудно-частотная характеристика ротора. Сечение – АМП<sub>1</sub>



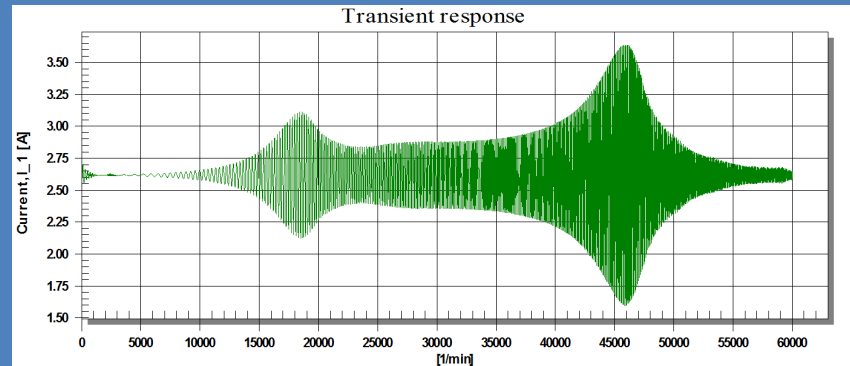
# Нестационарный анализ ротора на АМП



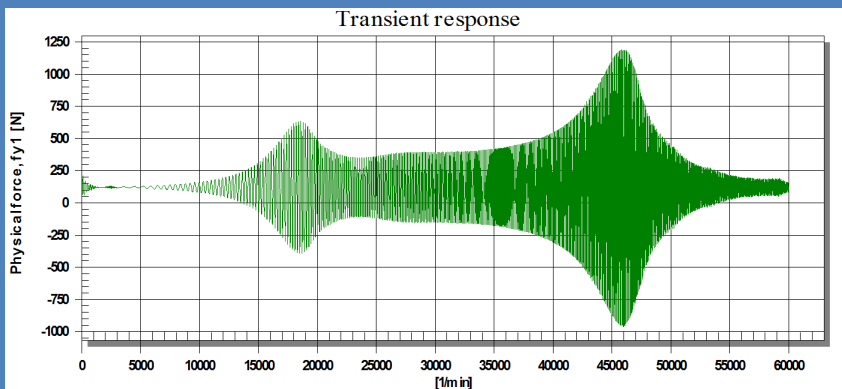
Нестационарный анализ с учетом веса  
 $K=0.5 \text{ e}+8 = \text{const}$



Изменение силы тока,  $I_{\text{пред}} = 5 \text{ A}$

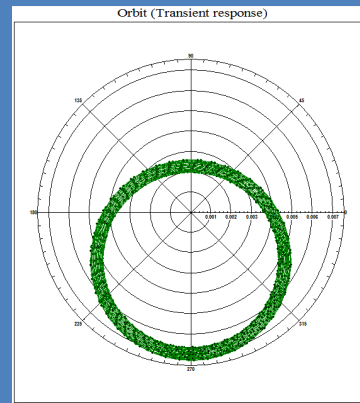


Реакции в опоре

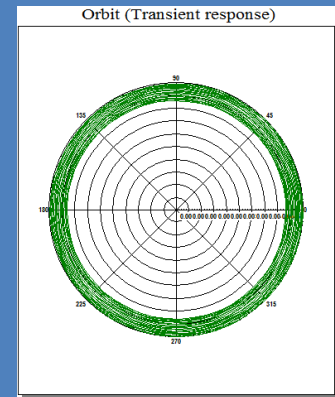


Орбиты движения, сечение АМП<sub>1</sub>

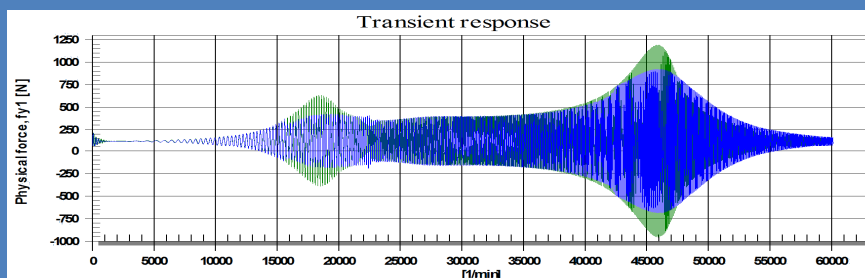
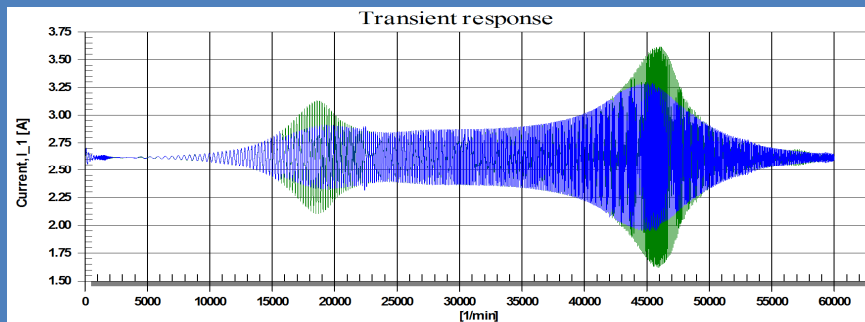
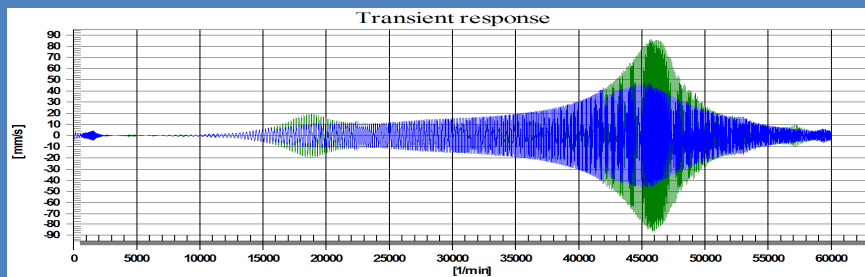
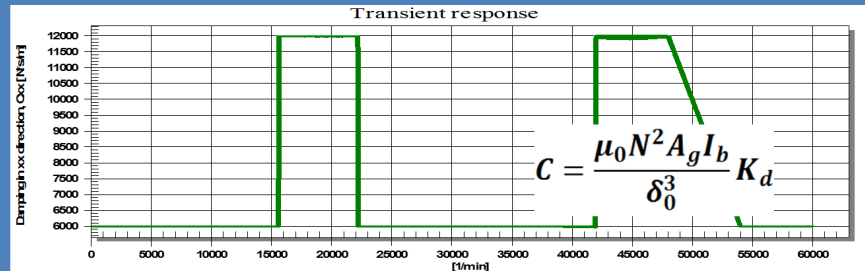
ПД регулятор



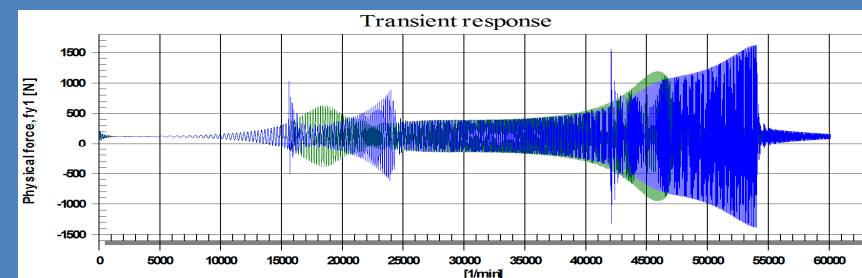
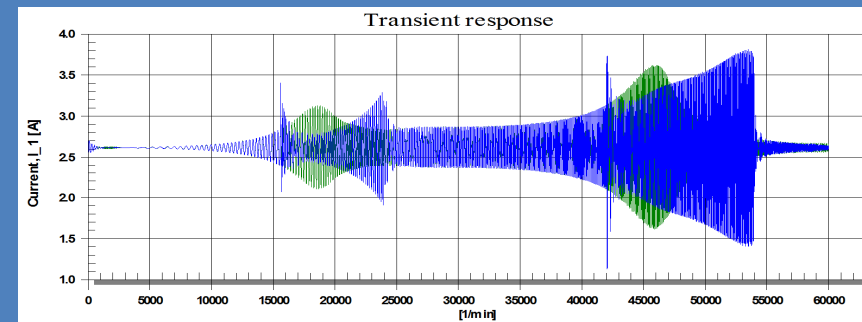
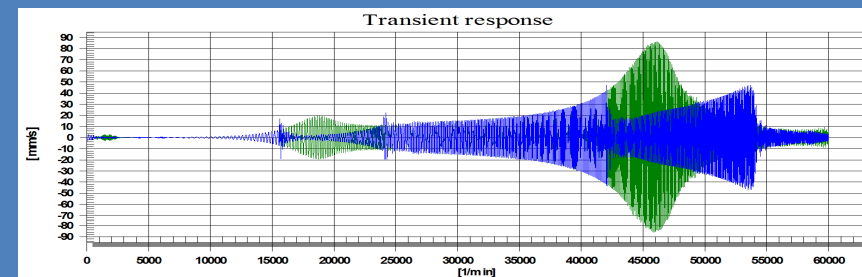
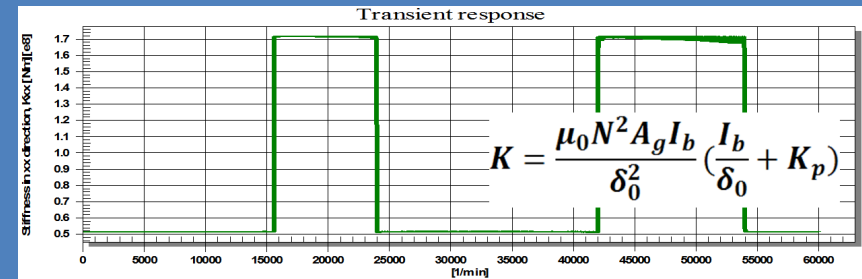
ПИД регулятор



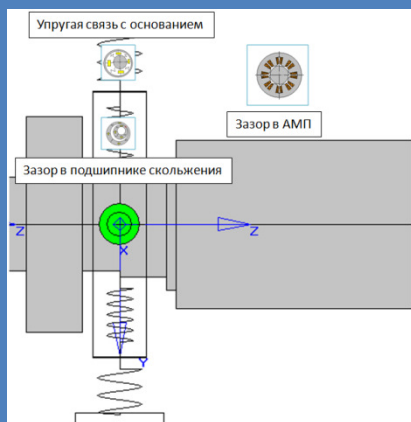
## Управление демпфированием в АМП



## Управление жесткостью в АМП

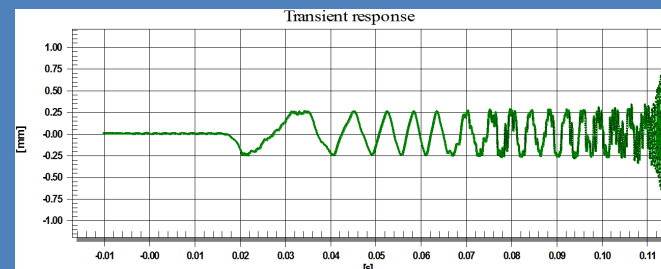


# Падение ротора на подшипники скольжения



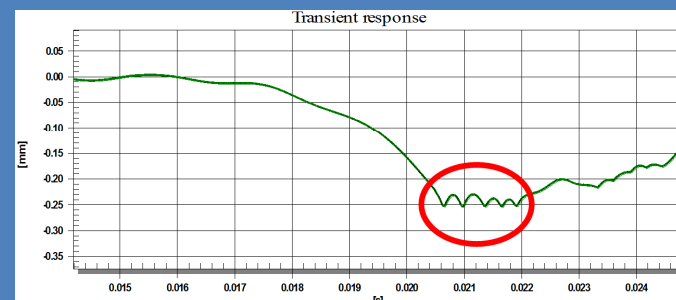
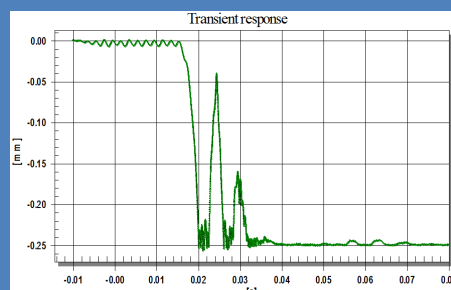
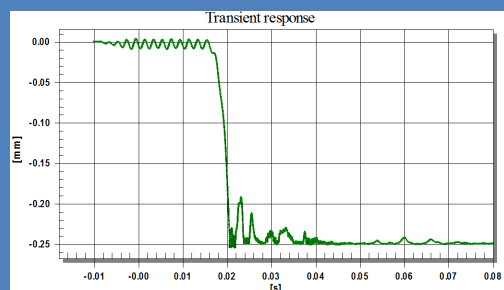
Радиальный зазор в АМП, мм	0.5
Радиальный зазор в подшипнике скольжения, мм	0.25
Жесткость АМП, Н/м	0.5e+8
Демпфирование в АМП, Н сек/м	6000
Контактная жесткость, Н/м	1e+10

$\mu$  (сталь по графиту) 0.1

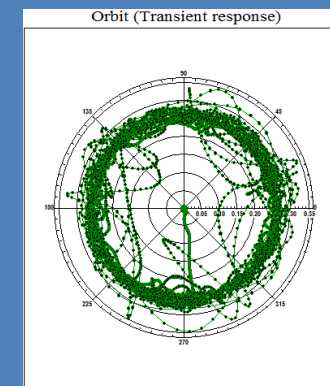
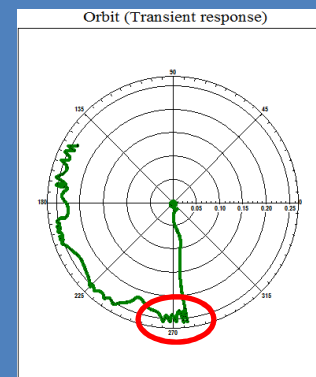
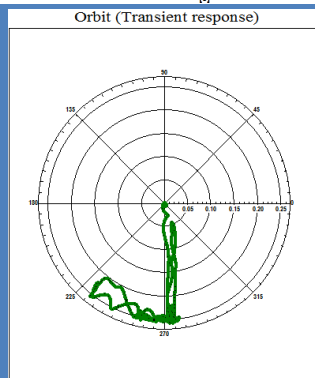
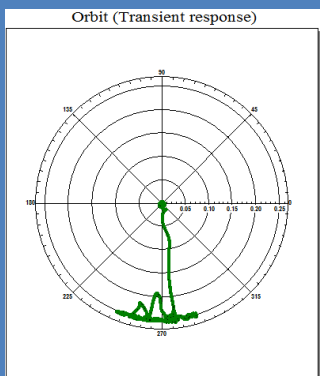


Момент перехода

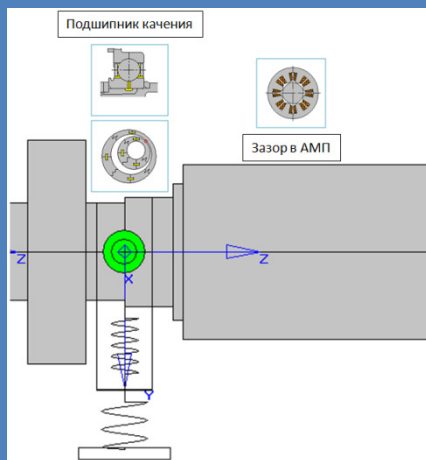
$\mu$  (сталь по бабиту) 0.005  
Подшипник скольжения 1      Подшипник скольжения 2



Выход на обратную прецессию      Обратная прецессия

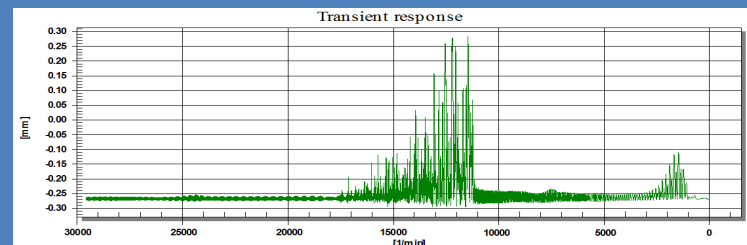


# Падение ротора на подшипники качения

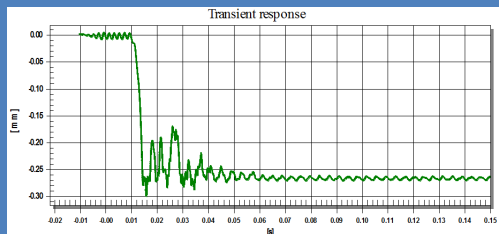


Радиальный зазор в АМП, мм	0.5
Радиальный зазор в подшипнике качения, мм	0
Радиальный зазор между валом и подшипником качения, мм	0.25
Жесткость АМП, Н/м	0.5e+8
Демпфирование в АМП, Н сек/м	6000
Контактная жесткость в подшипнике качения, Н/м	1e+10

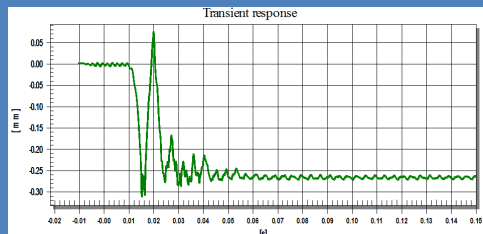
Останов ротора.  
Частота вращения меняется от  $n = 30000$  об/мин до  $n = 0$  об/мин  
 $\Delta t = 10$  сек



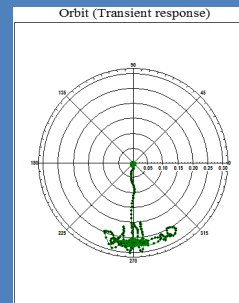
Подшипник 1



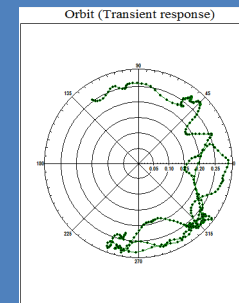
Подшипник 2



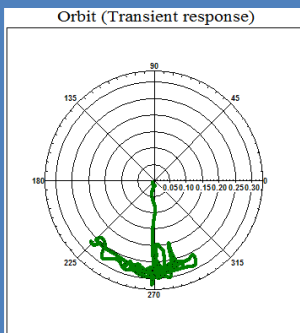
Движение до обкатки



Выход на обкатку

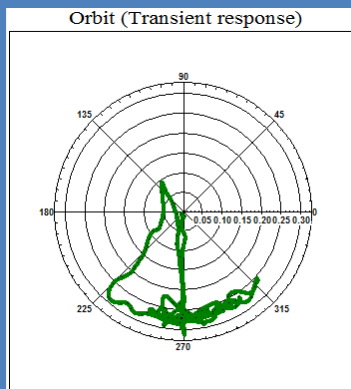


Orbit (Transient response)

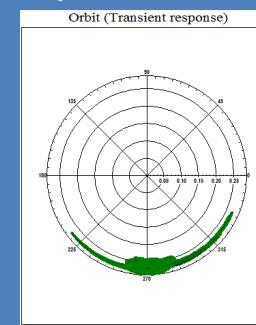
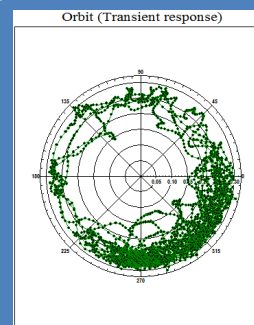


Частота вращения внутреннего кольца подшипника качения  $n = 30000$  об/мин

Orbit (Transient response)



Движение по зазору Последующий останов



**Определение необходимых значений жесткости и демпфирования для АМП**

**Определение коэффициентов регулирования в АМП и настройка системы управления**

**Определение демпфированных критических частот вращения ротора и форм колебаний – мест потенциальных резонансов**

**Расчет вынужденных колебаний и амплитудных значений вибропараметров – перемещений, виброскорости, реакций в опорных узлах ...**

**Подготовка программы управления силой тока – жесткостью и демпфированием АМП для перехода через резонансы системы и выхода в зону рабочих оборотов**

**Нестационарный анализ ротора на АМП с целью уточнения характеристик ротора на переходных режимах**

**Моделирование ротора со страховочными подшипниками. Нелинейный нестационарный анализ ротора. Цель - определение возможности выхода ротора на обратное прецессионное движение**

**Нестационарный анализ ротора после выключения АМП на нелинейных подшипниках качения в процессе торможения ротора и определение резонансных режимов**

**СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!**