КОЛЕБАНИЯ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ

Лекция 1

- **Колебания в двигателях**
- **Базовые положения при изучении колебательных систем**
- **Периодическое движение и гармонические колебания**
- **Примеры**

Колебания в двигателях

Вибрации в газотурбинных двигателях

- Существует большое количество сил, действующих на двигатели - внешние и внутренние, статические и динамические (переменные по частоте и амплитуде)

- Динамические силы приводят к вибрациям двигателя

- Механические колебания - вибрации с высокой частотой и малыми амплитудами

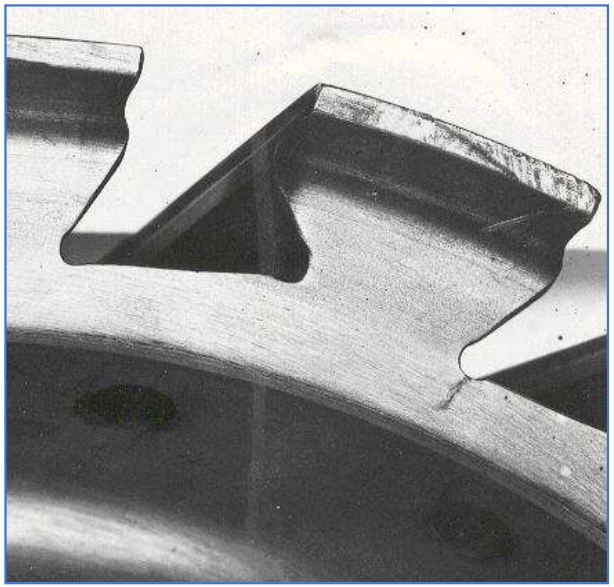
- Вибрации сопровождаются динамическими силами в узлах двигателя и приводят к деформациям, усталостным повреждениям, к повышенному износу деталей и узлов и соответственно быстрому выходу двигателя из строя.

- В реальных машинах практически невозможно избежать механических колебаний. Малый уровень вибрации является неотъемлемым условием обеспечения высокого качества авиационного двигателя.

- Поэтому одна из важнейших задач конструкторов создавать двигатели с низкими уровнями вибраций. Работы, направленные на снижение вибрации, ведутся на всех этапах жизненного цикла двигателей - этапах проектирования, доводки, серийного производства и эксплуатации.

- Несмотря на это более 60% усталостных поломок элементов двигателей связаны с воздействием вибрации.

Примеры усталостных повреждений



Примеры разрушений от вибрационных нагрузок

Разрушение вала генератора

Разрушение подшипников вала мотора

Полное разрушение ТЭЦ

Example of GTE failures under fan blade loss

Газотурбинные двигатели разного назначения

ОБЪЕДИНЕННАЯ ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНАЯ КОРПОРАЦИЯ

АЛ-55И

УМПО ОДК

Д-30КУ/КП

SATURN

САЛЮТ

AVIADVIGATEL

РД-33

ТВ3-117ВМ(ВМА), ВМ(ВМА) серии 02

ВК-800В

КЛИМОВ

и много других вращающихся машин

Основные направления изучения вибраций создаваемого двигателя

- аналитические на первых этапах проектирования, когда материальная часть отсутствует (расчетные)

- экспериментальные на этапах доводки перед началом серийного производства (испытания), на этапах серийного производства и эксплуатации двигателя

- экспериментально-аналитические, соединяют возможности обоих направлений, дополняя каждое из них своими возможностями

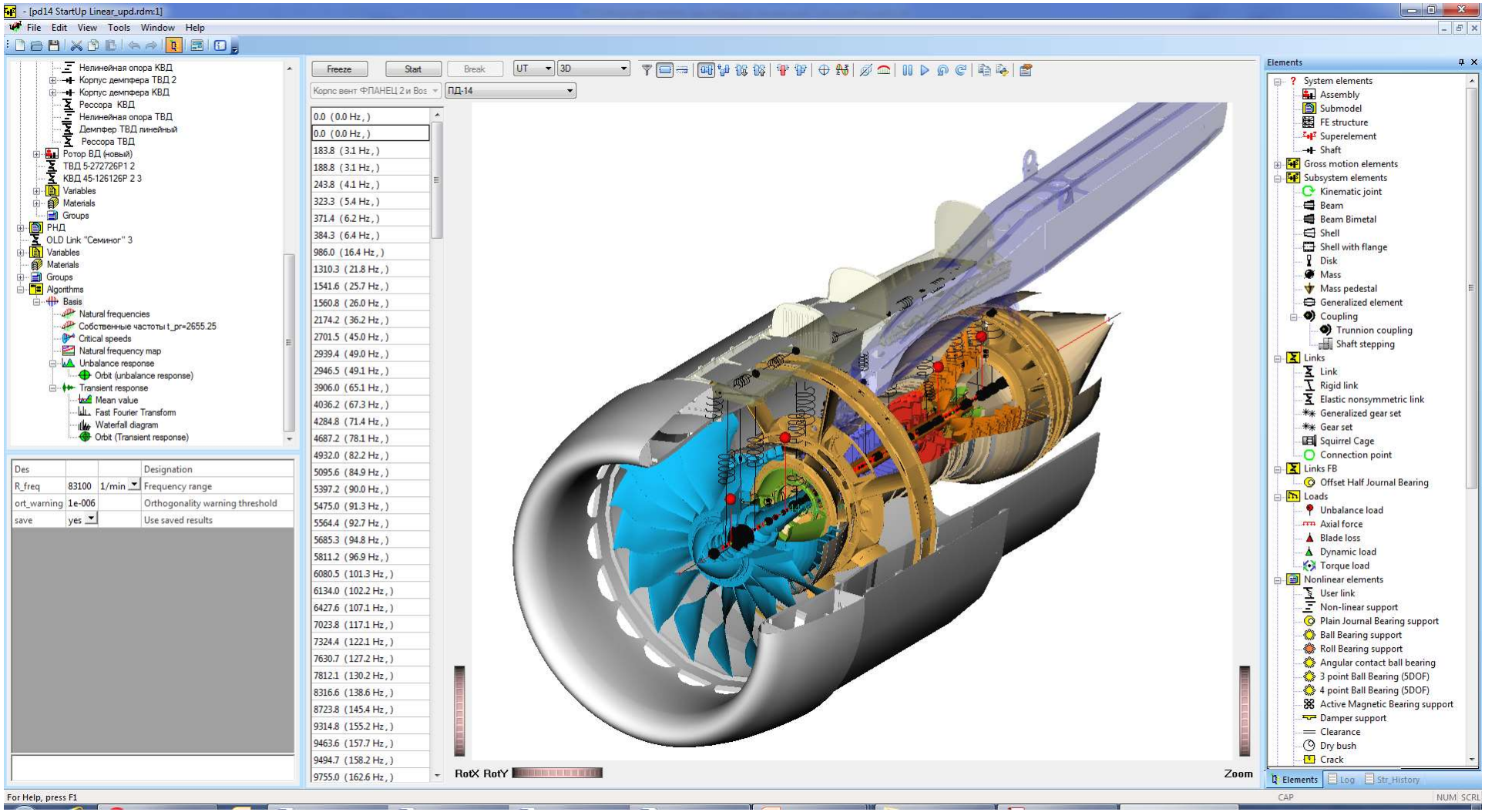
Программы мира

Rotordynamic specific codes:

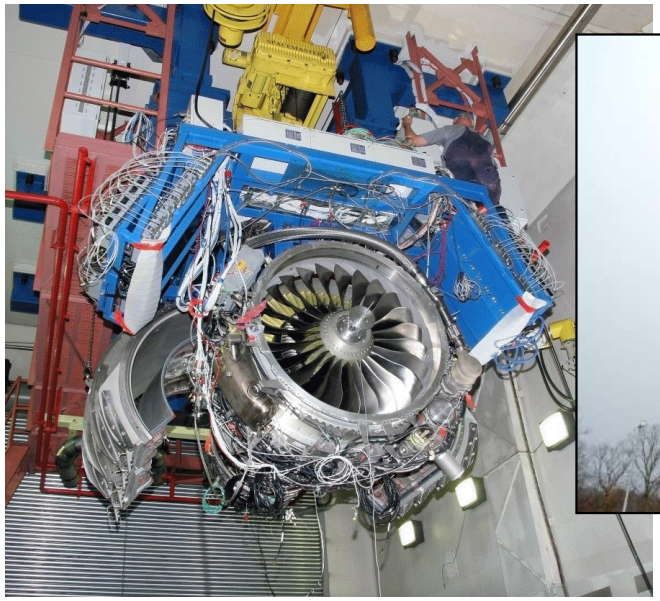
- AxSTREAM RotorDynamics, (SoftInWay) - Integrated Software platform for Rotor Dynamics, capable of lateral, torsional, and axial rotor dynamics for all widely used rotor types using the Finite Element Method on either beam or 2D-axisymmetric elements, and is capable of being automated.
- Dynamics R4 (Alfa-Tranzit Co. Ltd) - Commercial software developed for design and analysis of spatial systems
- Rotortest, (LAMAR - University of Campinas) - Finite Element Method based software, including different types of bearing solver. Developed by LAMAR (Laboratory of Rotating Machinery) - Unicamp (University of Campinas).
- SAMCEF ROTOR,(SAMCEF) - Software Platform for Rotors Simulation (LMS Samtech,A Siemens Business)
- MADYN (Consulting engineers Klement) - Commercial combined finite element lateral, torsional, axial and coupled solver for multiple rotors and gears, including foundation and housing
- MADYN 2000 (DELTA JS Inc.) - Commercial combined finite element (3D Timoshenko beam) lateral, torsional, axial and coupled solver for multiple rotors and gears, foundations and casings (capability to import transfer functions and state space matrices from other sources), various bearings (fluid film, spring damper, magnetic, rolling element)
- ISTRDYN (DynaTech Software LLC) - Commercial 2-D Axis-symmetric finite element solver
- FEMRDYN (DynaTech Engineering, Inc.) - Commercial 1-D Axis-symmetric finite element solver
- DyRoBeS (Eigen Technologies, Inc.) - Commercial 1-D beam element solver
- RIMAP (RITEC) - Commercial 1-D beam element solver
- XLRotor (Rotating Machinery Analysis, Inc.) - Commercial 1-D beam element solver, including magnetic bearing control systems and coupled lateral-torsional analysis. A powerful, fast and easy to use tool for rotor dynamic modeling and analysis using Excel spreadsheets. Readily automated with VBA macros, plus a plugin for 3D CAD software.
- ARMD (Rotor Bearing Technology & Software, Inc.) - Commercial FEA-based software for rotordynamics, multi-branch torsional vibration, fluid-film bearings (hydrodynamic, hydrostatic, and hybrid) design, optimization, and performance evaluation, that is used worldwide by researchers, OEMs and end-users across all industries.
- XLTRC2 (Texas A&M) - Academic 1-D beam element solver
- ComboRotor (University of Virginia) - Combined finite element lateral, torsional, axial solver for multiple rotors evaluating critical speeds, stability and unbalance response extensively verified by industrial use
- MESWIR (Institute of Fluid-Flow Machinery, Polish Academy of Sciences) - Academic computer code package for analysis of rotor-bearing systems within the linear and non-linear range
- RoDAP (D&M Technology) - Commercial lateral, torsional, axial and coupled solver for multiple rotors, gears and flexible disks(HDD)
- ROTORINSA (ROTORINSA) - Commercial finite element software developed by a French engineering school (INSA-Lyon) for analysis of steady-state dynamic behavior of rotors in bending.
- COMSOL Multiphysics, Rotordynamics Module add-on (Rotordynamics Module)
- RAPPID - (Rotordynamics-Seal Research) Commercial finite element based software library (3D solid and beam elements) including rotordynamic coefficient solvers

ПД-14 для МС-21

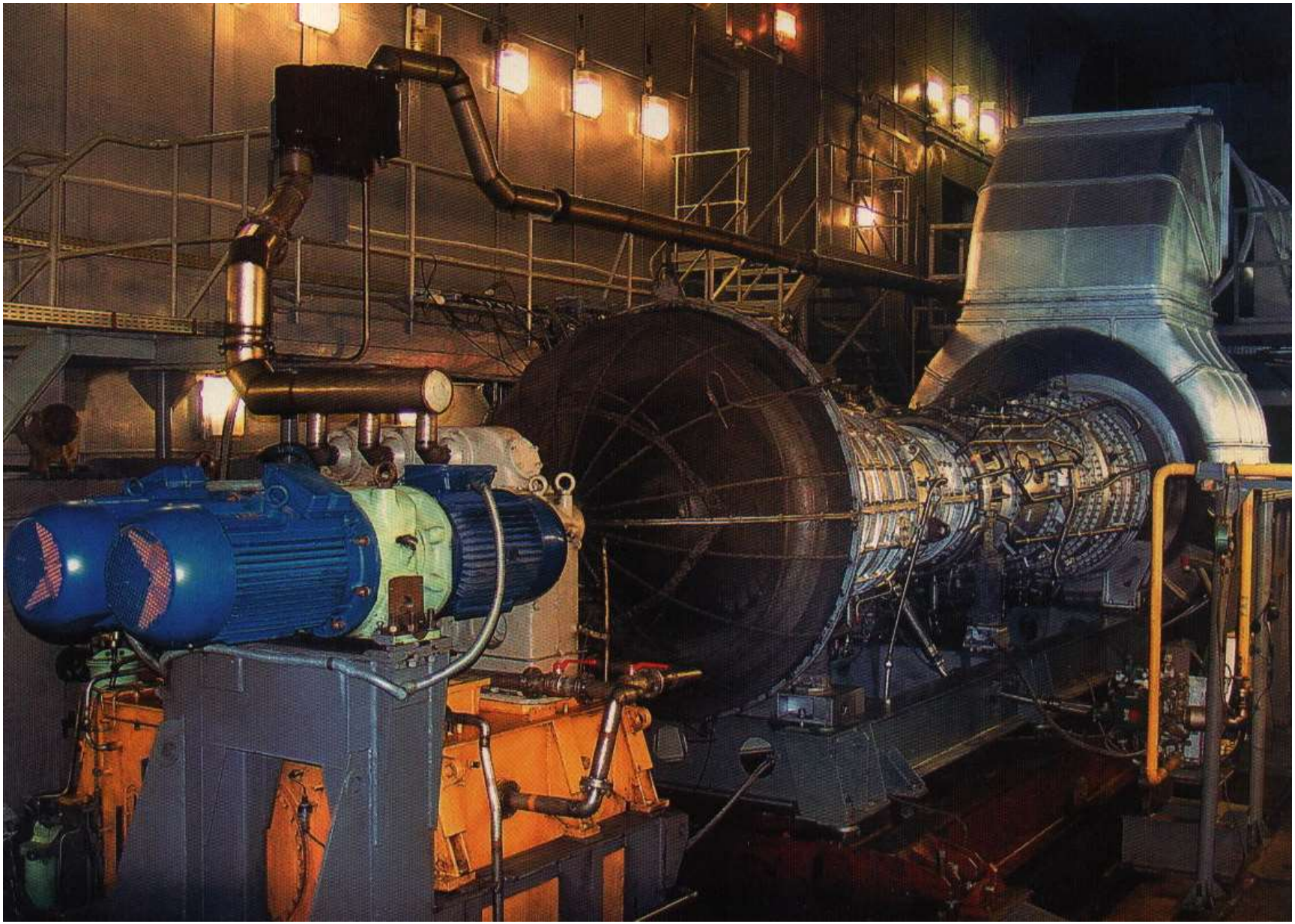
Моделирование роторных вибраций двигателя ПД-14 в российской программе DYNAMICS R4



Испытания газотурбинных двигателей



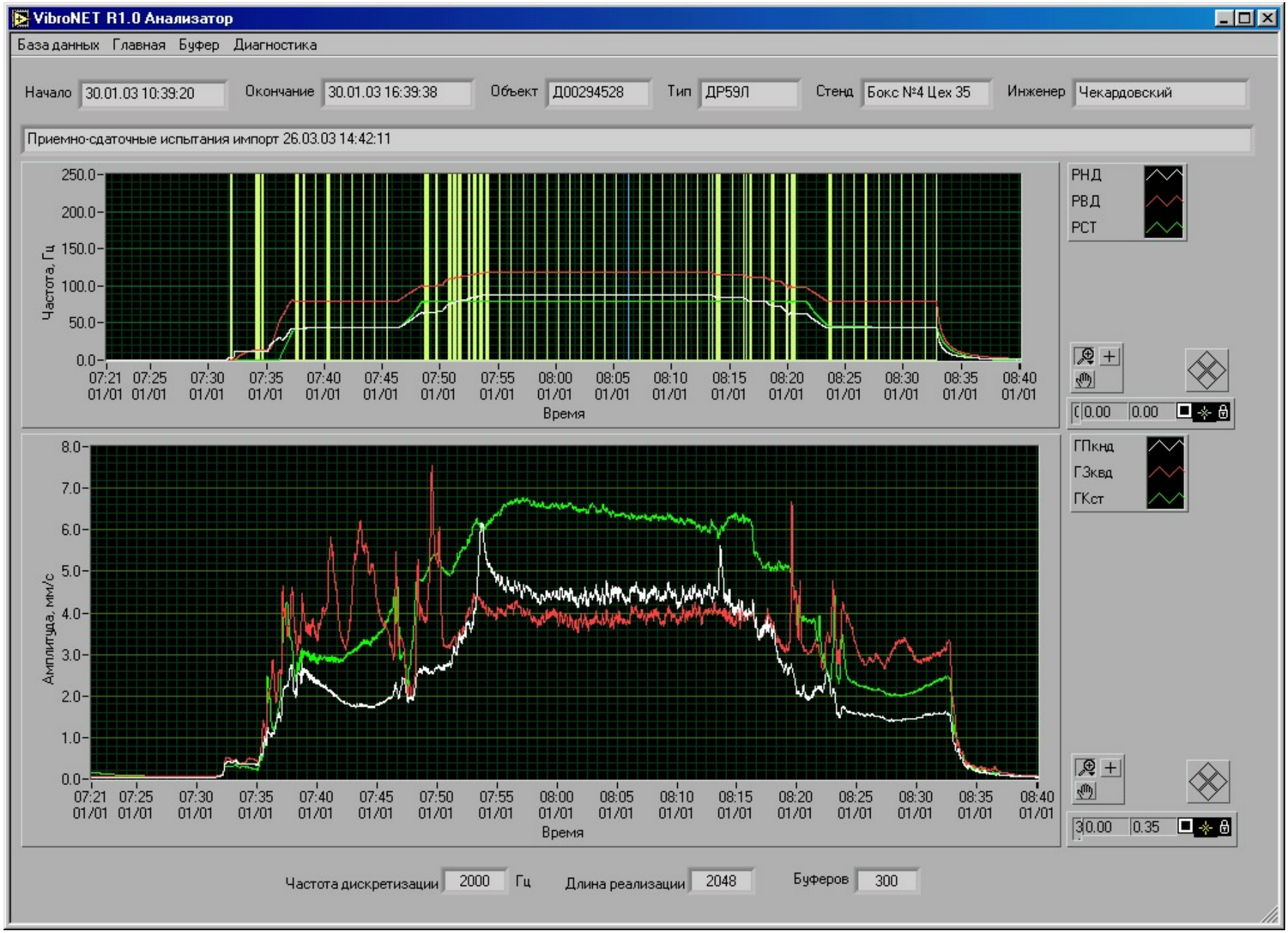
ОБЩИЙ ВИД БОКСА С ИСПЫТУЕМЫМ ДВИГАТЕЛЕМ



ПУЛЬТОВАЯ ИСПЫТАТЕЛЬНОГО СТЕНДА В ЦЕХУ ПРЕДПРИЯТИЯ

Пультовая с экранами САУ ИС, системы вибрационного контроля и диагностики, системы параметрической диагностики, средствами ручного контроля и переключателями

ЭКРАН СИСТЕМЫ ВИБРАЦИОННОГО КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ



EJ-200

The **Eurojet EJ200** is a military low bypass turbofan used as the powerplant of the Eurofighter Typhoon. The engine is largely based on the Rolls-Royce XG-40 technology demonstrator which was developed in the 1980s.

ЭКРАН СИСТЕМЫ КОНТРОЛЯ ДВИГАТЕЛЯ EJ-200 НА СТЕНДЕ

Испытания газотурбинных двигателей

Базовые положения при изучении колебательных систем

Базовые положения при изучении колебательных систем

- Все тела, обладающие массой и упругостью, способны совершать колебательное движение
- Методы изучения динамических свойств реальных объектов - экспериментальные и аналитические
- Экспериментальные методы - измерение и анализ вибраций. Требуется материальная часть
- Аналитические методы - на этапах начального проектирования, доводки и эксплуатации (появление дефектов)
- Аналитические методы предполагают создание математических моделей объекта (например ротора двигателя) и анализа полученных моделей (например, определение частот собственных колебаний).
- Математические модели, описывающие колебательное поведение реальной системы могут быть линейными или нелинейными
- Если параметры колебательной системы (масса, упругость, демпфирование) меняются по линейному закону, то система называется линейной.
- Для линейных систем можно применить принцип суперпозиции, математический аппарат хорошо развит.
- Принцип суперпозиции — один из самых общих законов во многих разделах физики. В самой простой формулировке принцип суперпозиции гласит: результат воздействия на частицу нескольких внешних сил есть векторная сумма воздействия этих сил.
- Для нелинейных систем принцип суперпозиции не действителен
- Дифференциальные уравнения, описывающие движение линейной или нелинейной системы соответственно называются линейными или нелинейными
- Два типа колебаний – свободные и вынужденные

Базовые положения при изучении колебательных систем

- Свободные колебания совершаются под действием внутренних сил, присущих системе, и в отсутствии внешних сил. Колебания совершаются по одной собственной частоте или нескольким.
- Собственная частота – свойство динамической системы, определяемой ее массовыми и жесткостными характеристиками.
- Вибрации (колебания) под действием внешних сил – вынужденные колебания. Система колеблется с частотой возмущающей силы
- Если частота возмущающей силы совпадает с частотой собственных колебаний, то возникает резонанс, который может привести к опасным вибрациям (катастрофическим разрушениям). Определение частоты собственных колебаний – важнейшая задача в изучении вибраций.
- Все колебательные системы обладают демпфированием вследствие рассеяния энергии в результате трения или других сил сопротивления.
- Если демпфирование незначительно, то оно имеет малое влияние на частоты собственных колебаний системы. Однако влияние демпфирования на амплитуды резонансных режимов может быть очень значительным.
- Количество независимых координат, описывающих движение системы определяет количество степеней свободы системы

Еще раз - принцип суперпозиции

В общем случае внешняя сила может быть произвольной:

- периодическая
- непериодическая
- импульсная

Если внешняя сила может быть представлена в виде суммы гармонических колебаний

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n} P_i \cos(\omega_i t - \alpha_i), \qquad i = 1, 2, 3, \ldots, n$$

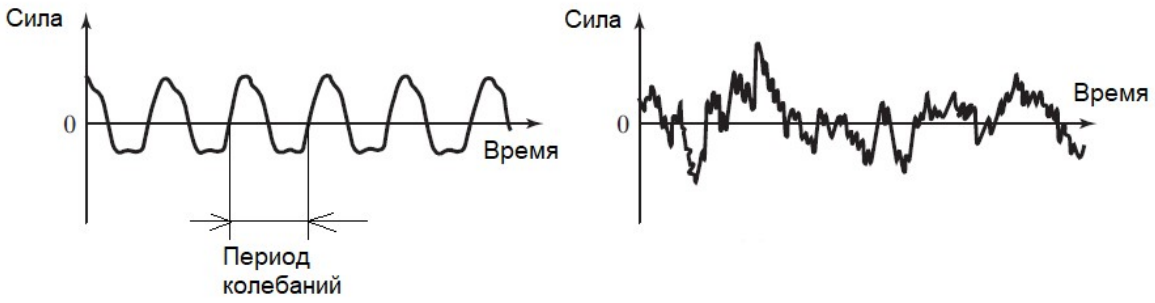
То установившиеся вынужденные колебания можно представить в виде линейного наложения колебаний, вызванных каждой гармоникой составляющей внешней силы

$$s(t) = \sum_{i=1}^{n} S_i \cos(\omega_i t - \varphi_i)$$

Периодическое движение и гармонические колебания

Периодическое движение

- Колебательное движение может повторяться **регулярно** (маятник часов). **Нерегулярно** повторяющееся движение (землетрясение, случайные колебания).
- Движение, повторяющее себя регулярно через одинаковый период времени – **периодическое движение.**



- Время повторения τ – **период колебаний, сек**
- **Частота колебаний, Гц** $f=1/\tau.$
- Если движение обозначить временной функцией

$$x(t),$$

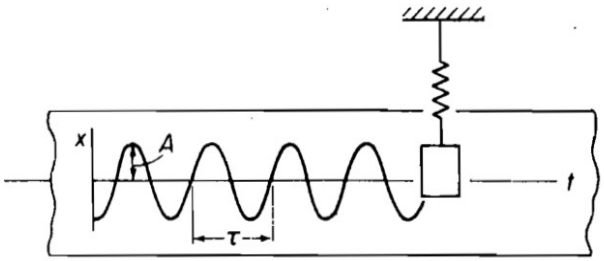
то периодическое движение должно удовлетворять соотношению

$$x(t)=x(t+\tau)$$

- Любое нерегулярное движение, которое появляется с неопределенным периодом может быть представлено суммой большого количества различных регулярных движений
- Простейшая форма периодического движения – **гармоническое**

Гармонические колебания

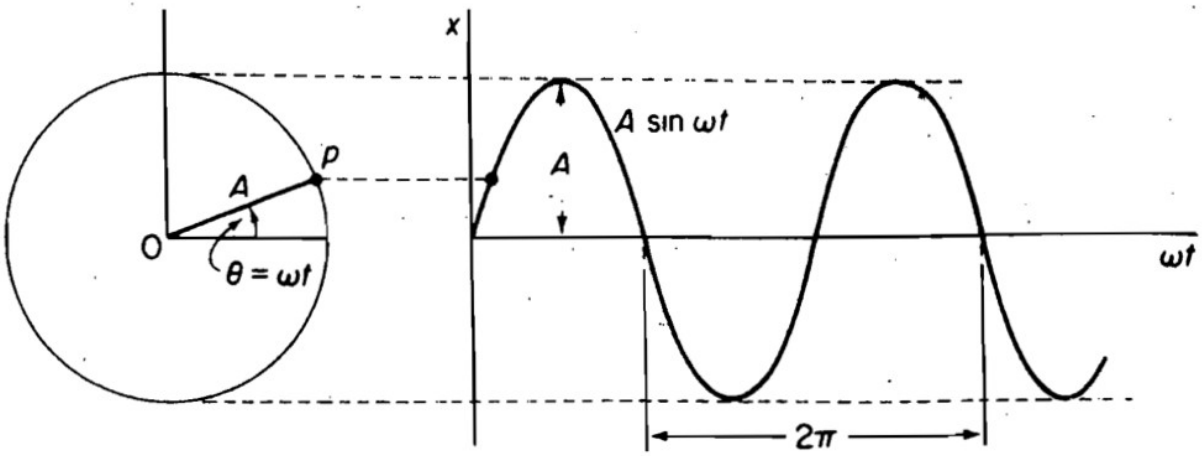
Академическое представление записи гармонического движения



$$x = A \sin 2\pi \frac{t}{\tau} \qquad f = \frac{1}{\tau}$$

f – линейная частота. Измеряется в циклах в секунду - [1/сек] или в [Гц]

Гармоническое движение часто представляется как проекция точки, совершающей круговое движение с постоянной угловой скоростью



$$\boxed{x = A \sin \omega t}$$

$\boldsymbol{\omega}$ – круговая частота, [рад/сек]

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega}{2\pi} \qquad \omega = \frac{2\pi}{\tau} = 2\pi f \qquad \tau = \frac{2\pi}{\omega}$$

Определения

Период колебаний – время необходимое, чтобы завершить один цикл колебаний. Равен времени, требующееся вектору повернуться на угол 2π

$$\tau = \frac{2\pi}{\omega}$$

где **ω** называется круговой частотой.

Частота колебаний. Число циклов в единицу времени, и обозначается как ***f*** **–**линейная частота**.**

$$f = \frac{1}{\tau} = \frac{\omega}{2\pi}$$

Здесь ω называется круговой частотой, чтобы отличать ее от линейной частоты, и обозначает угловую скорость циклического движения. Линейная частота измеряется в **1/сек**, угловая скорость в **рад/сек**.

Гармоническое движение (частный случай периодического движения) описывается амплитудой, частотой и фазой.

$$x_1 = A_1 \sin \omega t$$

$$x_2 = A_2 \sin(\omega t + \phi)$$

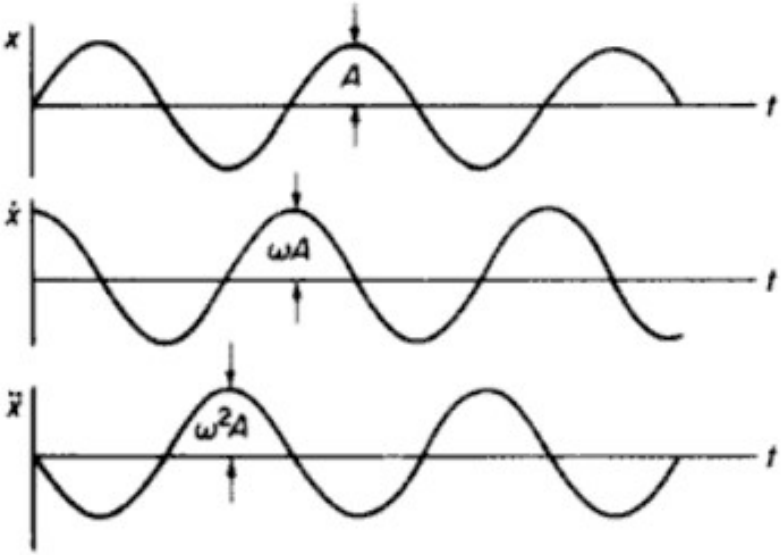
Два гармонических движения с одинаковой частотой называются синхронными.
Несинхронные – разная частота колебательного движения

Гармонические колебания

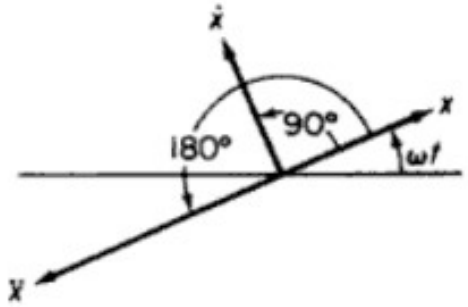
$$x = A \sin \omega t$$

$$\dot{x} = \omega A \cos \omega t = \omega A \sin(\omega t + \pi/2)$$

$$\ddot{x} = -\omega^2 A \sin \omega t = \omega^2 A \sin(\omega t + \pi)$$



(a)



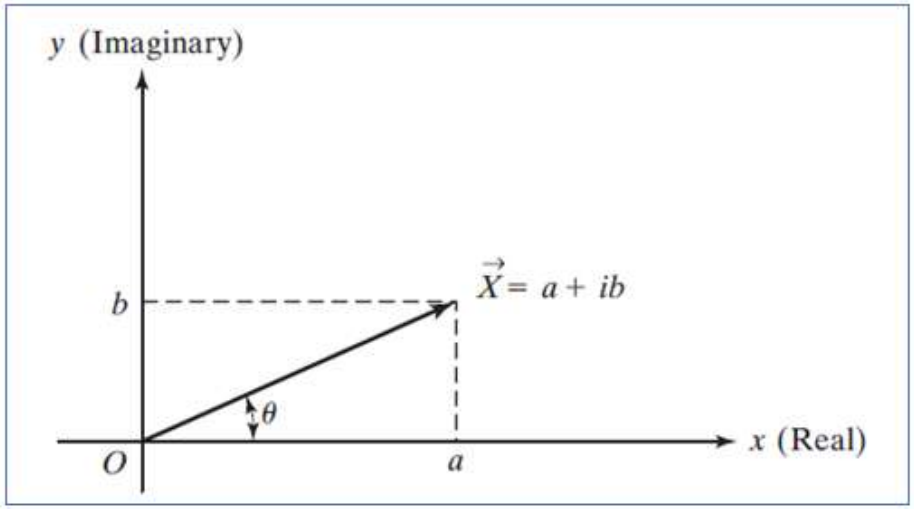
(b)

Из кинематических соотношений можно получить следующее дифференциальное уравнение

$$\ddot{x} = -\omega^2 x$$

Экспоненциальная форма описания гармонического движения

С учетом сказанного любой вектор в плоскости XY может быть представлен комплексным числом Формула Эйлера



$$\vec{X} = a + ib$$

$$i = \sqrt{-1}$$

- a и b - компоненты x и y комплексного числа X
- также a и b – реальная и мнимая части вектора X

$$\vec{X} = A\cos\theta + iA\sin\theta$$

Если A обозначает модуль или абсолютную величину комплексного числа, а Θ - аргумент или угол между вектором и осью x, то X может быть представлен как

$$A = (a^2 + b^2)^{1/2}$$

$$\theta = \tan^{-1}\frac{b}{a}$$

Формула Эйлера и показательная форма комплексного числа

$$e^{ix} = \cos x + i\sin x,$$

$$\vec{X} = a + ib = Ae^{i\theta}$$

Комплексное представление гармонического движения

Формула Эйлера утверждает, что для любого вещественного числа x выполнено следующее равенство:

$$e^{ix} = \cos x + i \sin x,$$

где e — одна из важнейших математических констант, определяющаяся следующей формулой: $e = \lim\limits_{x\to\infty}\left(1+\frac{1}{x}\right)^x$,

i — мнимая единица.

Доказательство формулы Эйлера можно провести с использованием ряда Маклорена. Разложим функцию e^{ix} в ряд Тейлора в окрестности точки a = 0 (в ряд Маклорена) по степеням x. Получим:

$$e^{ix} = 1 + \frac{ix}{1!} + \frac{(ix)^2}{2!} + \frac{(ix)^3}{3!} + \ldots = \left(1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots\right) + i\left(\frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots\right)$$

Но

$$1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} - \frac{x^6}{6!} + \ldots = \cos x$$

$$\frac{x}{1!} - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots = \sin x$$

Поэтому $e^{ix} = \cos x + i \sin x$, что и требовалось доказать.