

Лабораторная работа № 5

Освоение основ расчета частот собственных колебаний (ЧСК) конструкций и совмещенного конструкционно-модального анализа в программе ANSYS Workbench

1. Расчет частот собственных колебаний лопатки компрессора низкого давления (КНД) авиационного двигателя (АД)

Задание: проанализировать 6 низших ЧСК титановой рабочей лопатки (РЛ) КНД по ранее построенной в программе КОМПАС-3D модели, определить тип ротора (*докритический* или *критический*) и рассчитать *запас вибрационной устойчивости* по формуле:

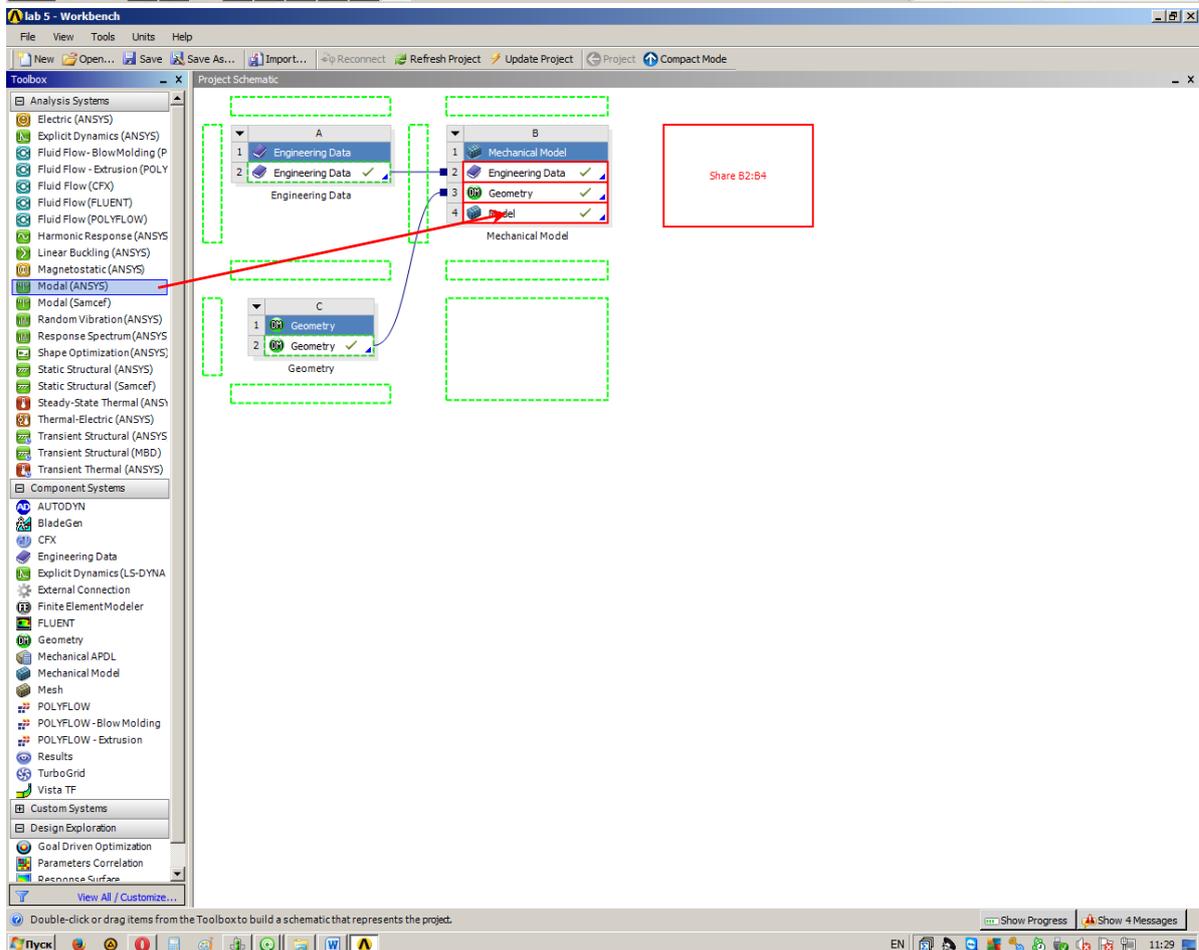
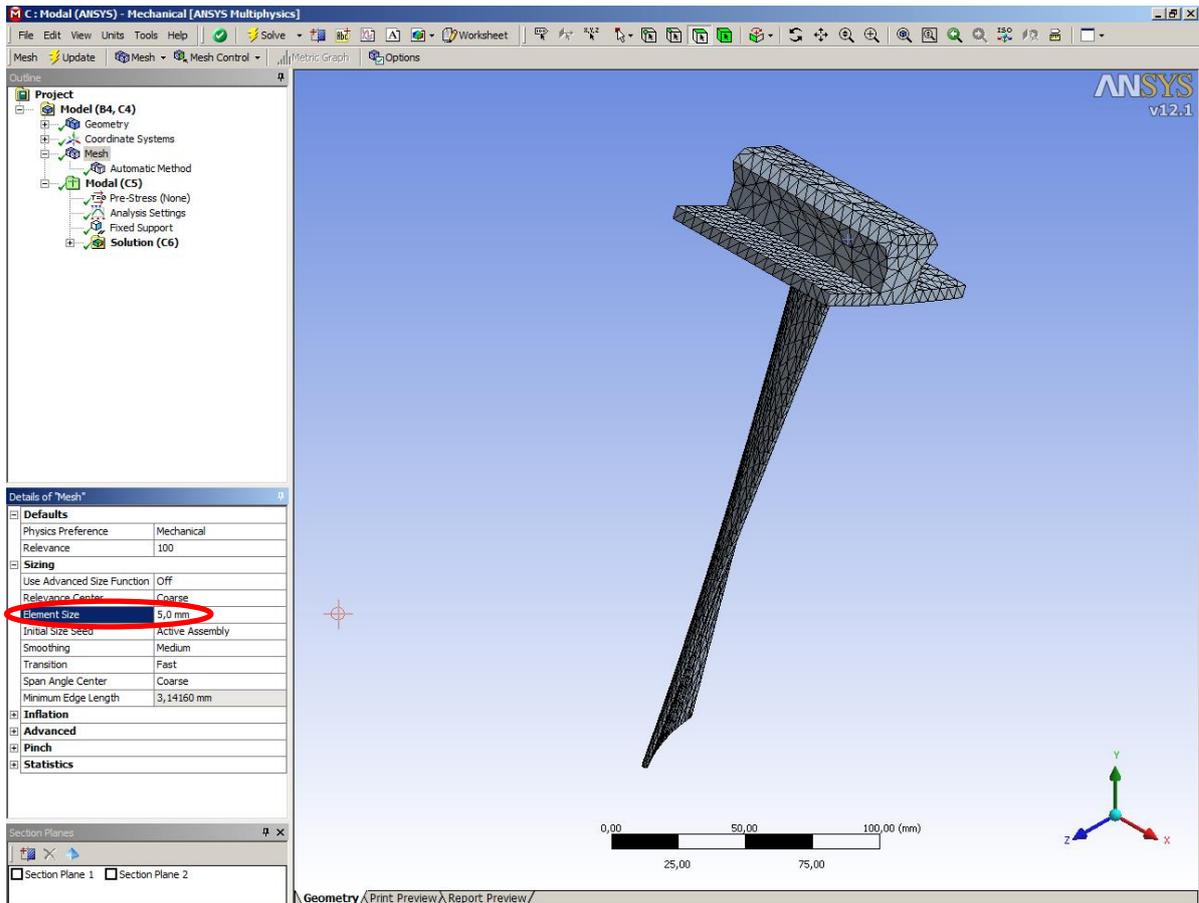
$$\Delta = \frac{|f_{\text{раб}} - f_{\text{ЧСК}}|}{f_{\text{раб}}} \cdot 100\% \geq 10\%, \quad (1.1)$$

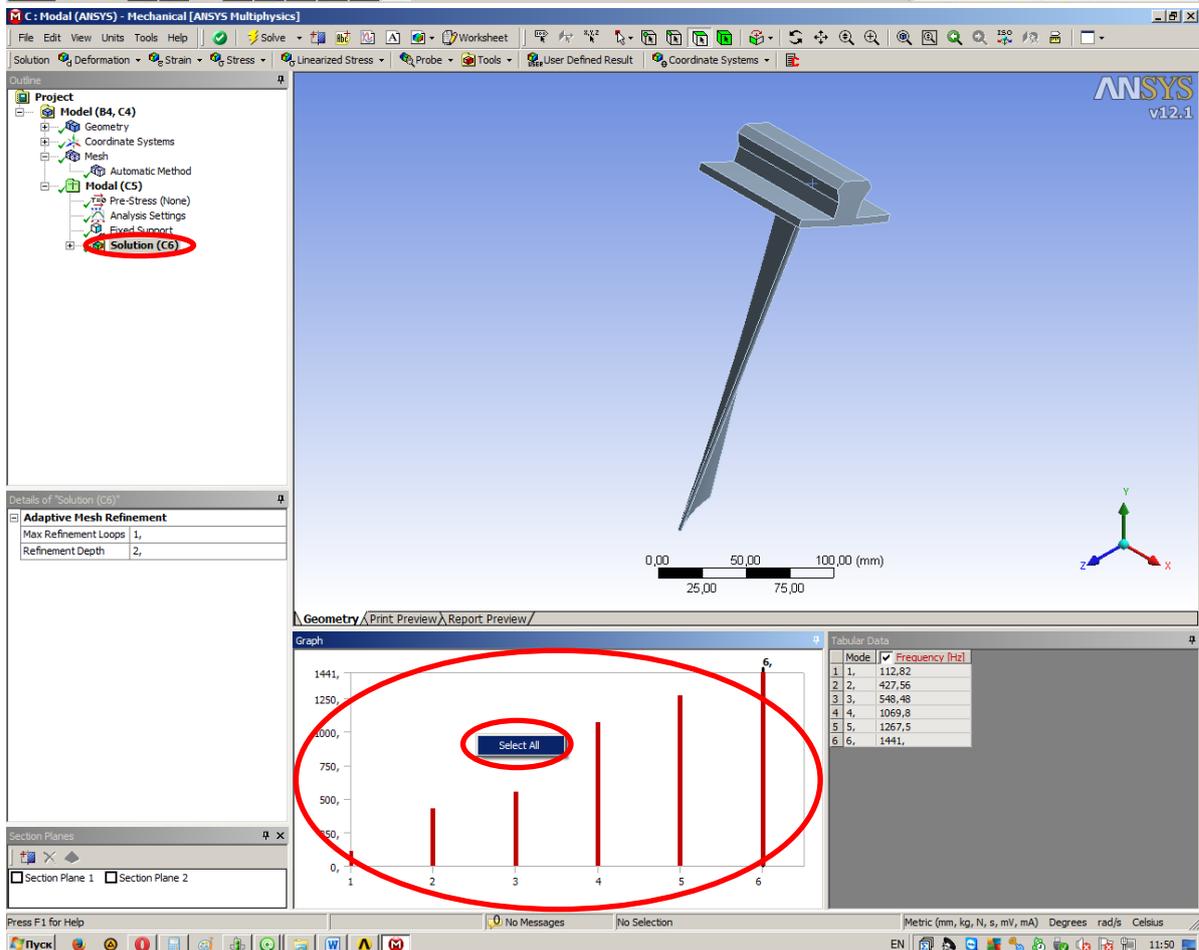
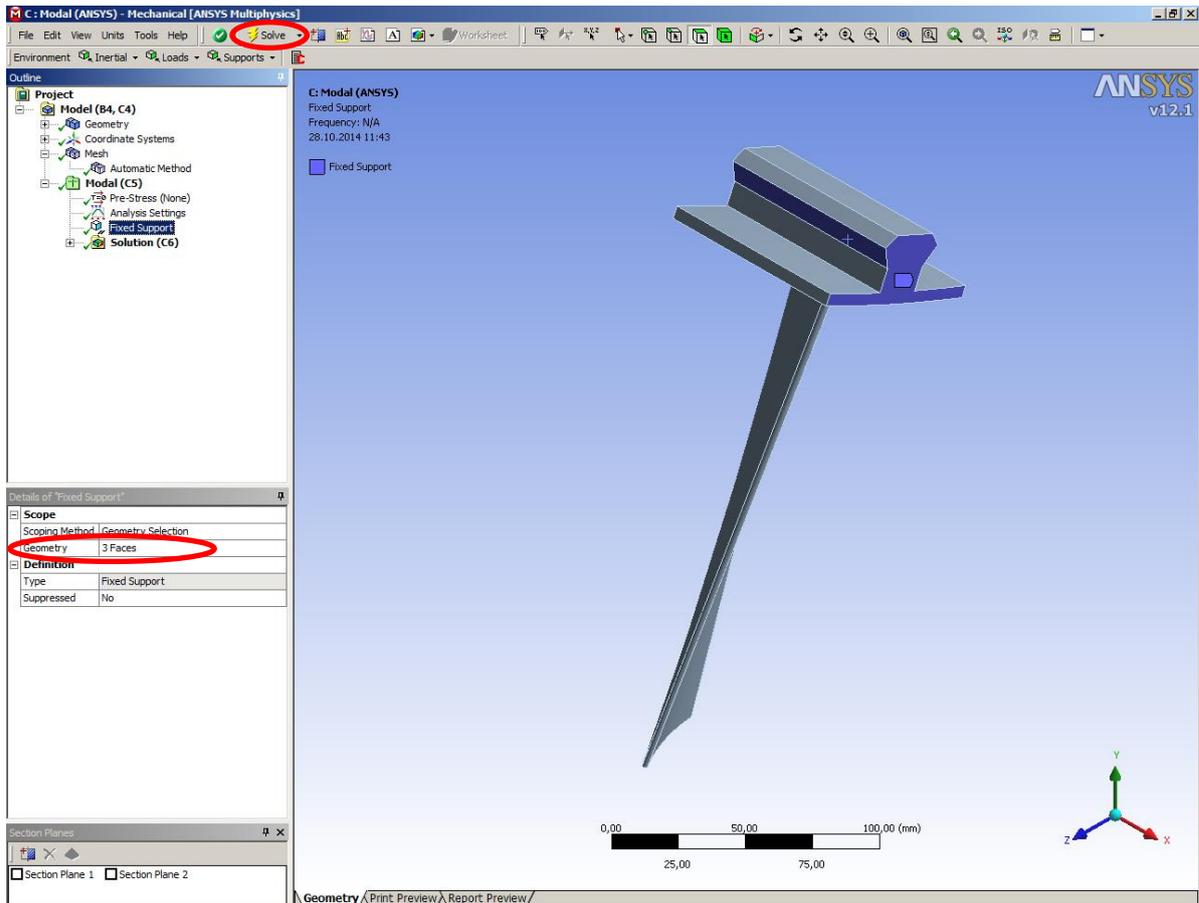
где $f_{\text{раб}}$ – частота вращения ротора в Гц; $f_{\text{ЧСК}}$ – частота собственных колебаний в Гц;

Граничные условия: жесткая заделка (*Fixed Support*) лопатки по хвостовику, угловая скорость вращения (*Rotational velocity*) $n = 9100$ об/мин. Материал лопатки – *титановый сплав*.

Порядок выполнения задания:

1. Алгоритм начала выполнения задания такой же, как и в предыдущей лабораторной работе. Выбираем нужный материал (*Titanium alloy*) в модуле *Engineering data*; далее в модуль *Geometry* импортируем геометрию лопатки, которую надо сохранить из *сборки* в формате *x_t*, предварительно отключив из расчета другие 59 лопаток и диск.
2. Анализ частот собственных колебаний осуществляется в модуле *Modal (ANSYS)*, который мы помещаем в дерево проекта по аналогии с модулем *Static structural (ANSYS)* в предыдущей лабораторной работе; устанавливаем жесткую заделку (*Fixed support*) по хвостовику лопатки; после задания граничных условий решаем задачу с помощью команды *Solve*.
3. Нажимаем ПКМ на появившейся диаграмме, выбираем *Select All*; затем опять ПКМ на диаграмме, выбираем *Create mode shape results*; далее ПКМ на *Solution* → *Evaluate all results*; теперь можно оценить частоты собственных колебаний лопатки и определить запас устойчивости по формуле (1.1). Следует учесть, что ANSYS выдает частоты в Герцах (Гц), поэтому необходимо перевести угловую скорость вращения ротора в соответствующие единицы прежде, чем производить расчет по формуле (1.1).





C: Modal (ANSYS) - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

File Edit View Units Tools Help Solve

Solution Deformation Strain Stress Linearized Stress Probe Tools User Defined Result Coordinate Systems

Outline

- Project
 - Model (B4, C4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Modal (C5)
 - Pre-Stress (None)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Solution (C6)
 - Solution Information

Details of "Solution (C6)"

Adaptive Mesh Refinement

Max Refinement Loops 1,
Refinement Depth 2,

Section Planes

Section Plane 1 Section Plane 2

Press F1 for Help 0 No Messages No Selection Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius EN 11:53

Graph

1441, 1250, 1000, 750, 500, 250, 0

1 2 3 4 5 6

Create Mode Shape Results
Select All
Zoom To Fit
Zoom To Range

Mode	Frequency [Hz]
1	112,82
2	427,56
3	548,48
4	1069,8
5	1267,5
6	1441,

C: Modal (ANSYS) - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

File Edit View Units Tools Help Solve

Solution Deformation Strain Stress Linearized Stress Probe Tools User Defined Result Coordinate Systems

Outline

- Project
 - Model (B4, C4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Modal (C5)
 - Pre-Stress (None)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Solution (C6)
 - Solution
 - Total Deformation 1
 - Total Deformation 2
 - Total Deformation 3
 - Total Deformation 4
 - Total Deformation 5
 - Total Deformation 6

Details of "Solution (C6)"

Adaptive Mesh Refinement

Max Refinement Loops 1,
Refinement Depth 2,

Section Planes

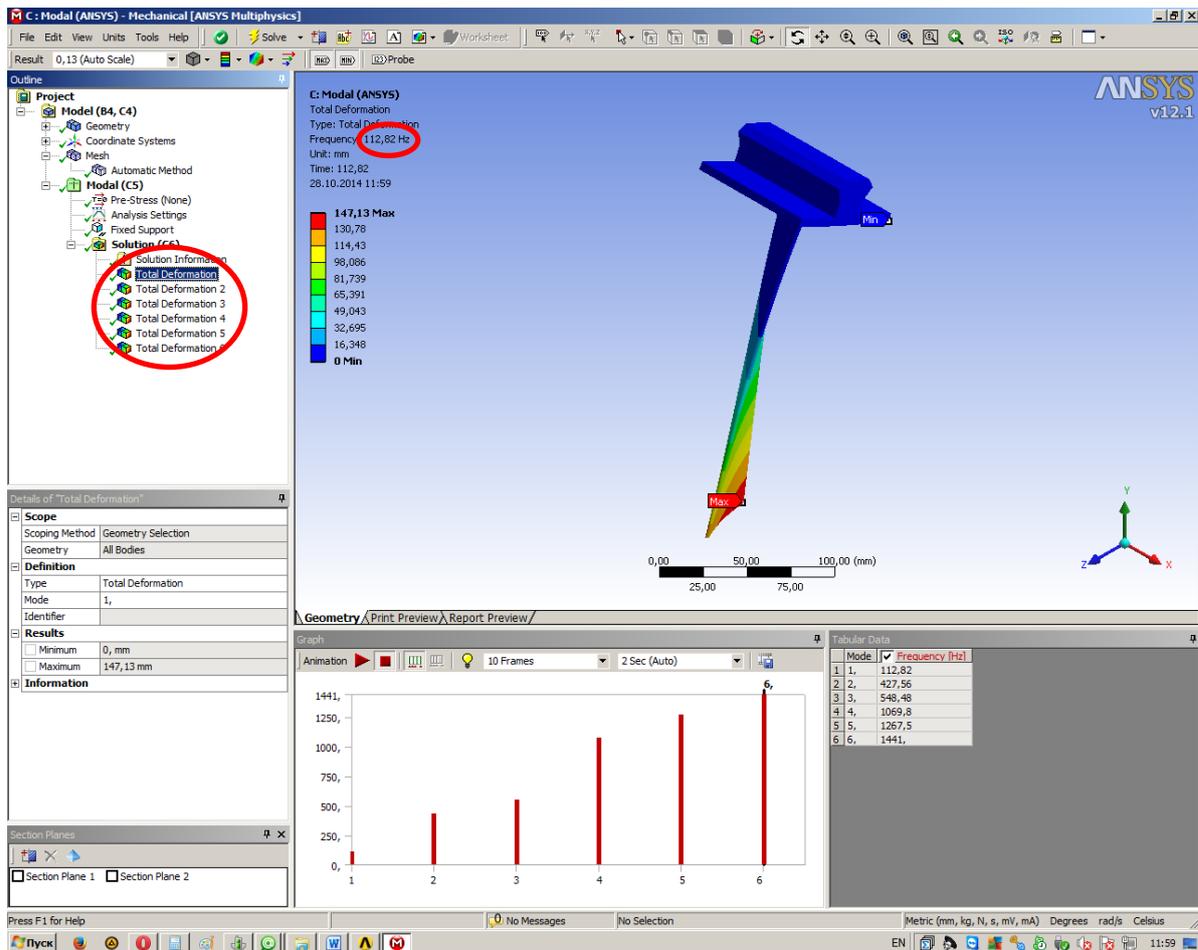
Section Plane 1 Section Plane 2

Press F1 for Help 0 No Messages No Selection Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius EN 11:54

Graph

1

Tabular Data



2. Расчет ЧСК пластины и разработка мероприятий по обеспечению запаса вибрационной устойчивости

Задание: провести модальный анализ и проанализировать **6 низших ЧСК** консольной пластины, рассчитать *запас вибрационной устойчивости* по формуле (1.1) и, в случае необходимости, разработать мероприятия по обеспечению вибрационной устойчивости пластины (*минимум 2 варианта из 3*). Параметры пластины: ширина $b = 60$ мм, толщина $h = 5$ мм, длина $l = 80$ мм. Материал пластины – *алюминиевый сплав*. Закрепление пластины – консольное по торцу b . Частота возмущающих колебаний $\nu = 666$ Гц.

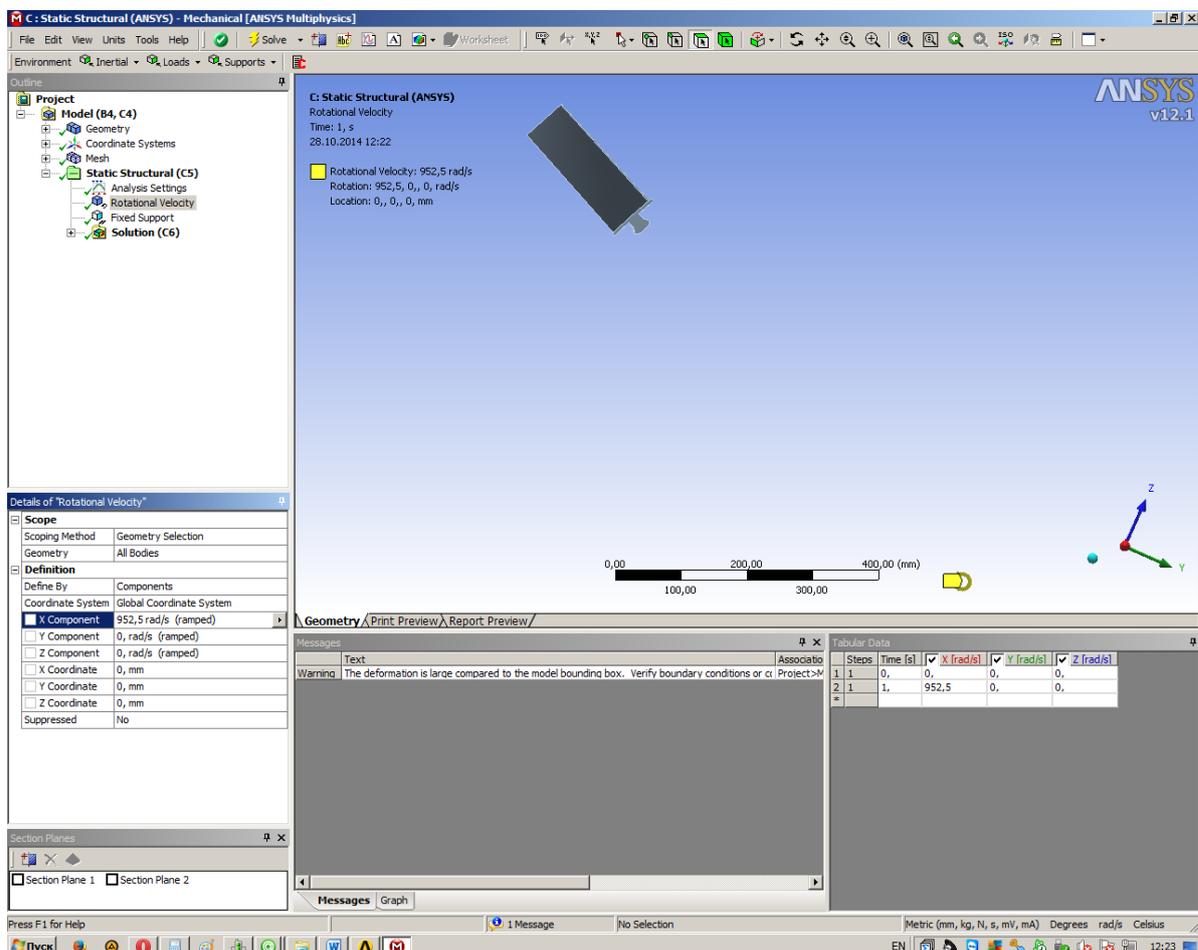
3. Совмещенный конструкционно-модальный анализ лопатки компрессора низкого давления авиационного двигателя

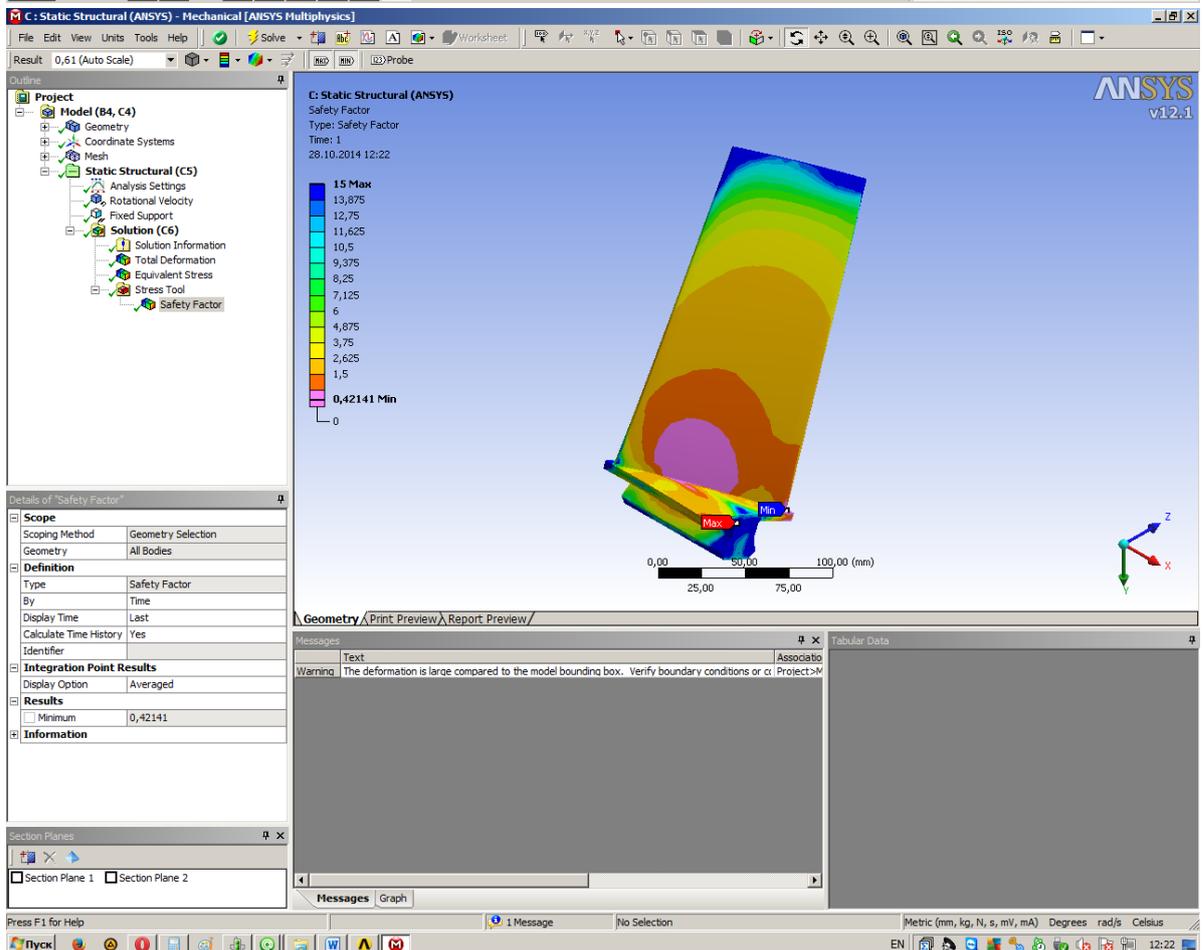
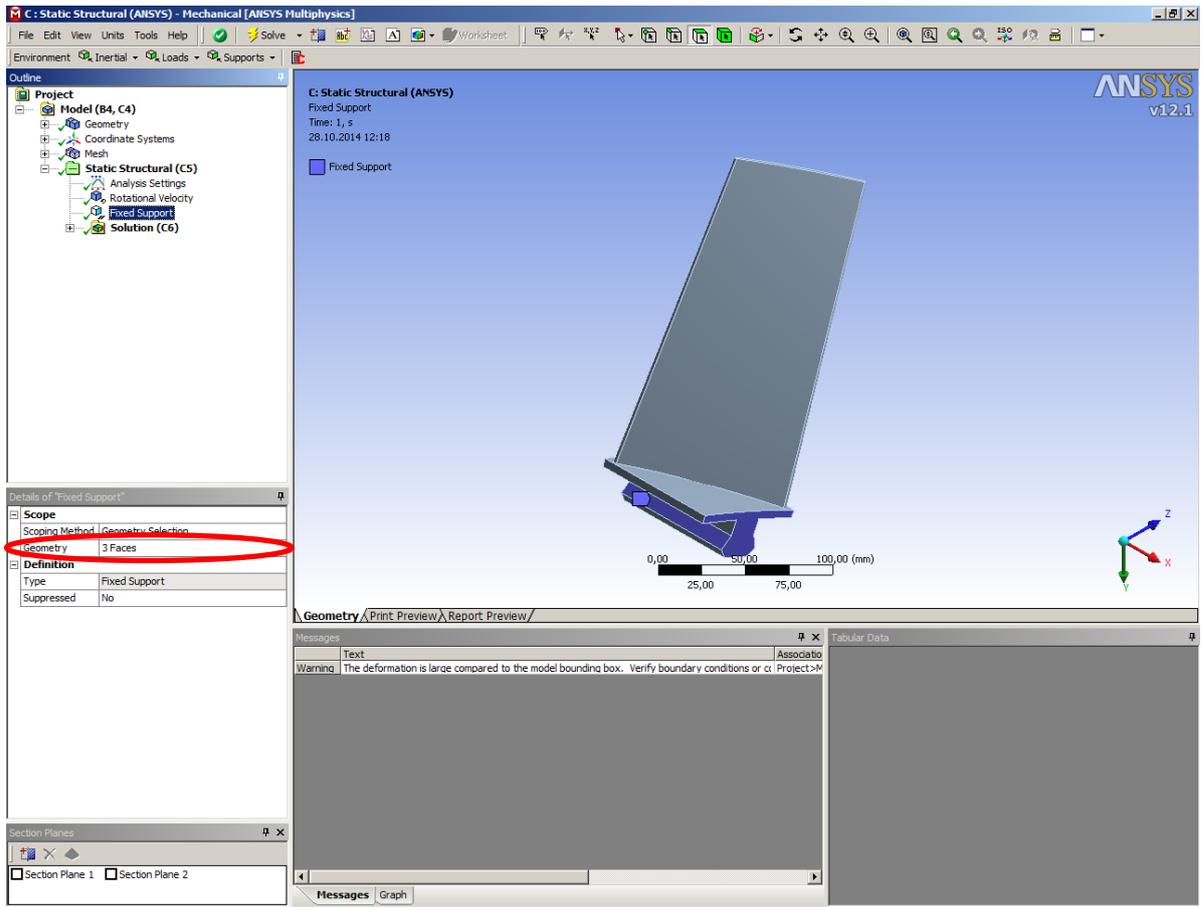
Задание: провести модальный анализ и проанализировать **7 низших ЧСК** титановой рабочей лопатки КНД с учетом предварительно напряженного состояния, определить тип ротора (*докритический* или *критический*) и рассчитать *запас вибрационной устойчивости* по формуле (1.1).

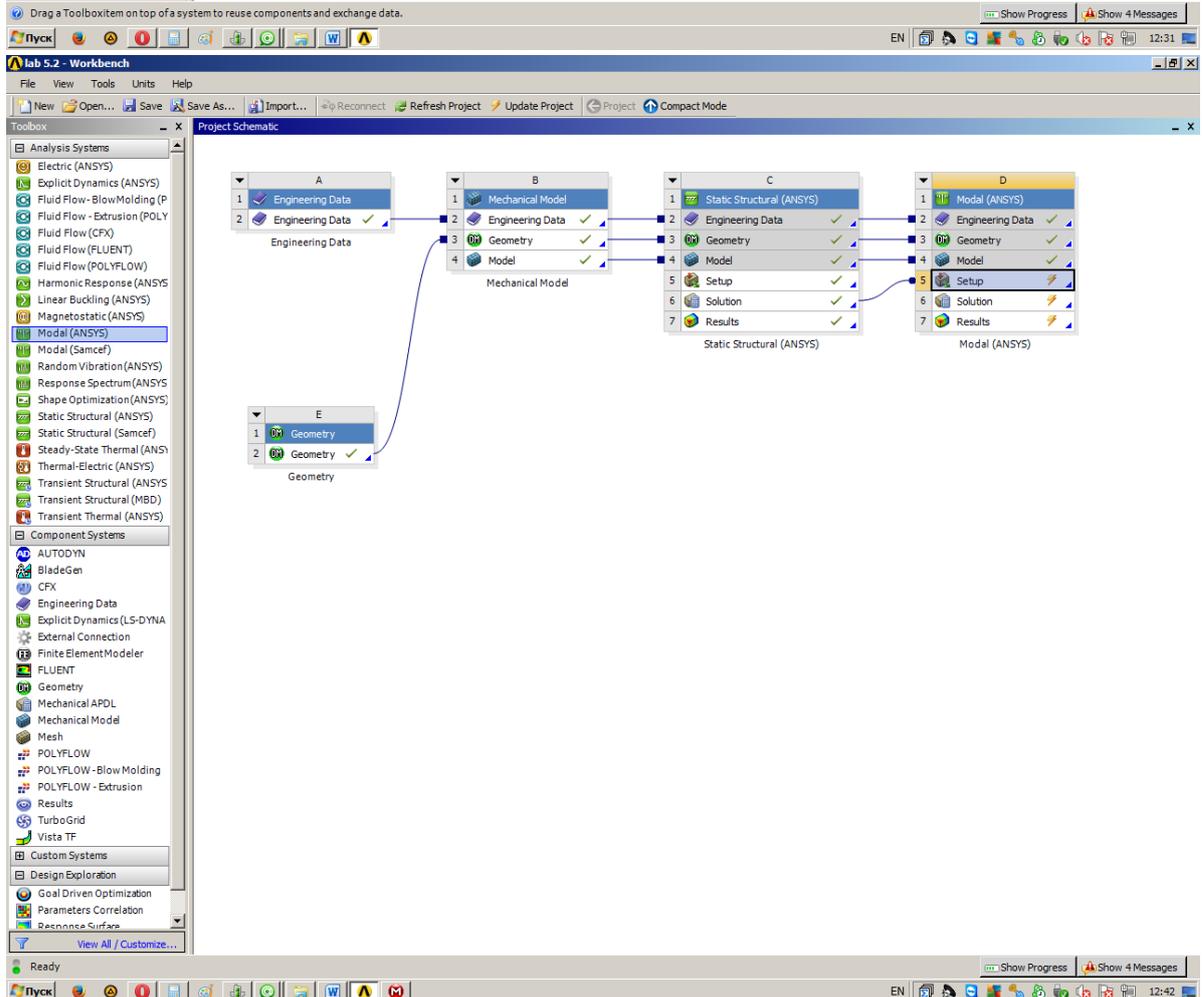
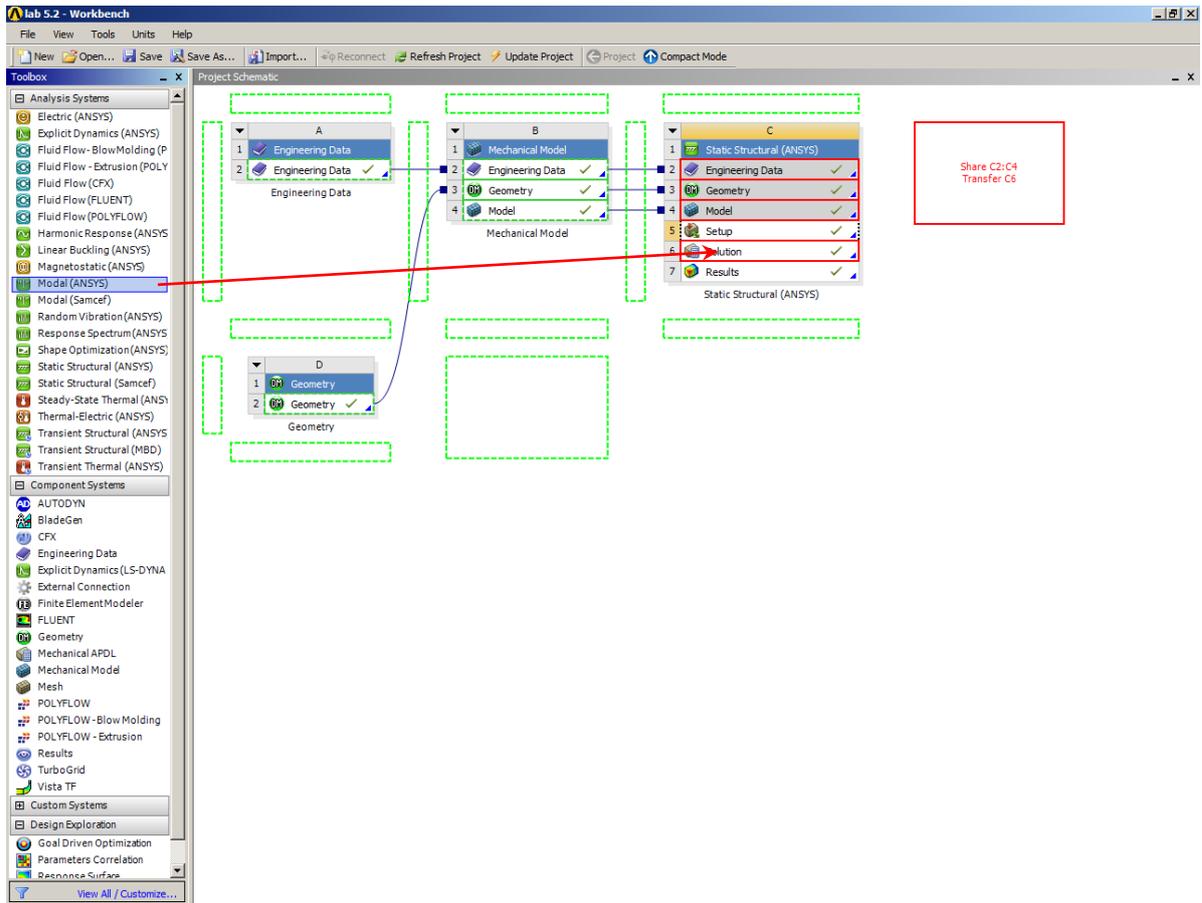
Граничные условия: жесткая заделка (*Fixed Support*) лопатки по хвостовику, угловая скорость вращения (*Rotational velocity*) $n = 9100$ об/мин. Материал лопатки – *титановый сплав*.

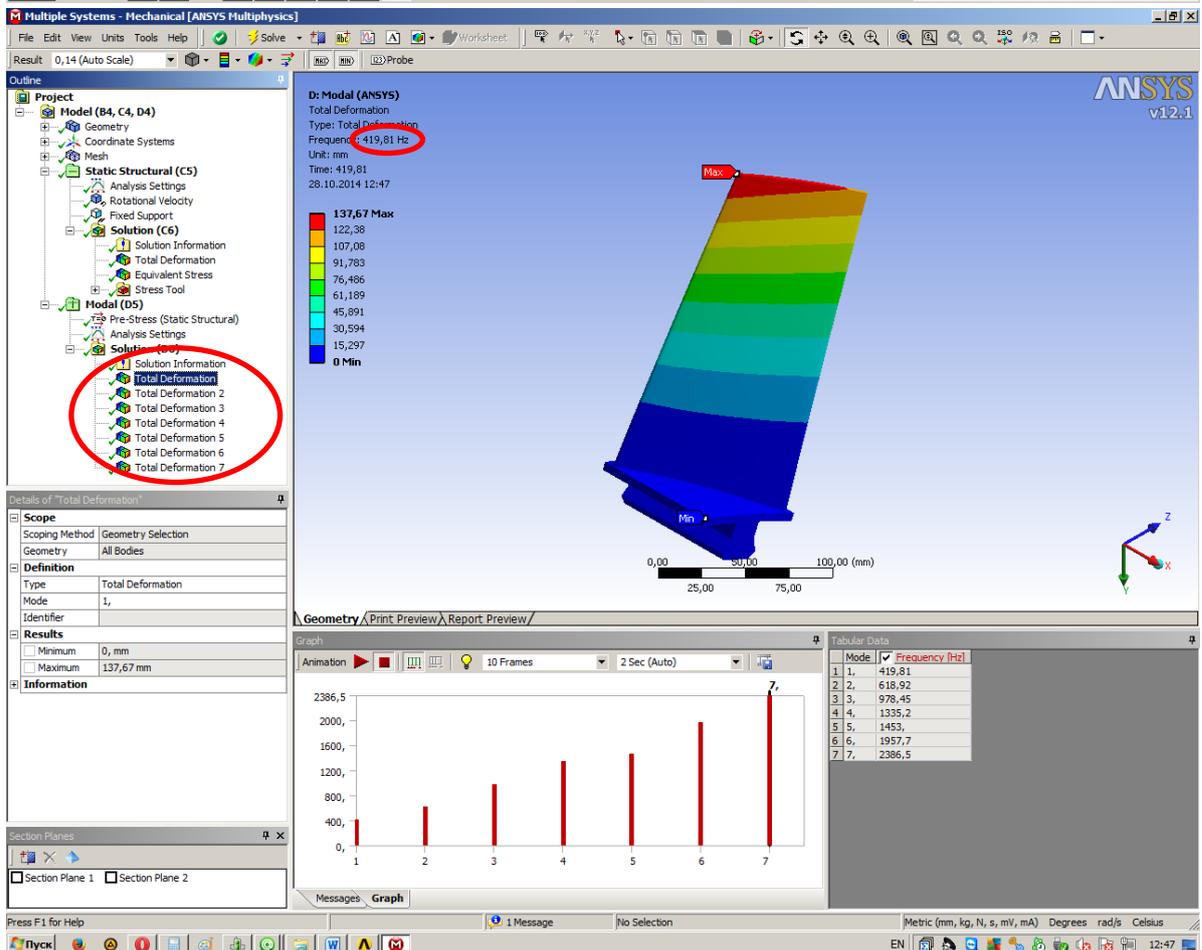
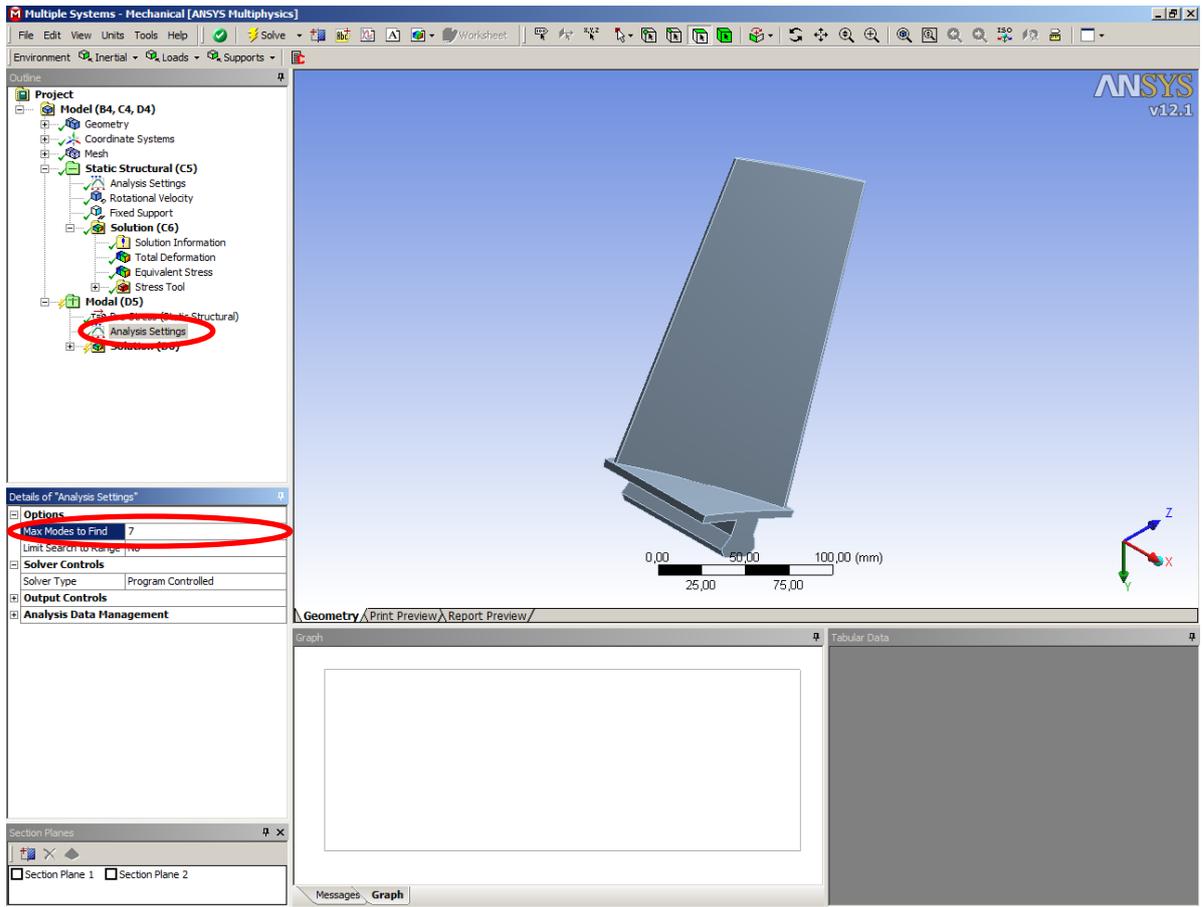
Порядок выполнения задания:

1. Сначала производится расчет напряженно-деформированного состояния РЛ КНД под действием указанных выше сил по аналогии с предыдущей лабораторной работой. По окончании расчета на прочность сделать *вывод о работоспособности лопатки*.
2. Добавить в имеющуюся структуру проекта модуль *Modal (ANSYS)* так, как показано на рисунке; изменить количество ЧСК для анализа: внутри модуля *Modal (ANSYS)* ЛКМ на *Analysis settings* → *Max modes to find* → 7; произвести расчет и определить минимальный запас устойчивости по ЧСК.









4. Совмещенный конструкционно-модальный анализ *рабочего колеса компрессора низкого давления авиационного двигателя*

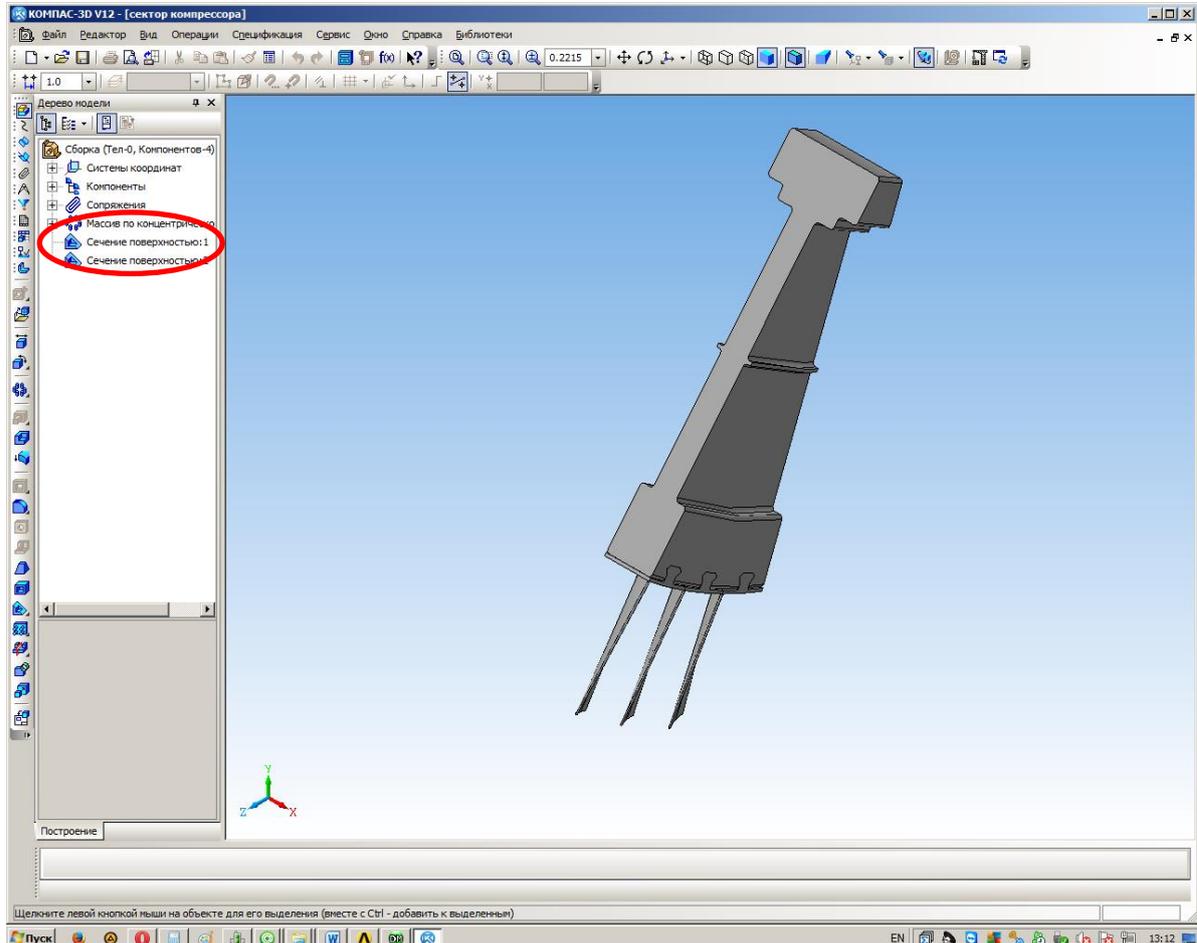
Задание: провести модальный анализ и проанализировать 6 низших ЧСК рабочего колеса (РК) КНД с учетом предварительно напряженного состояния, определить тип ротора (*докритический* или *критический*) и рассчитать *запас вибрационной устойчивости* по формуле (1.1).

Граничные условия: жесткая заделка (*Fixed Support*) диска по внутреннему отверстию и его торцу, заделка без трения (*Frictionless support*) по боковым поверхностям диска, угловая скорость вращения (*Rotational velocity*) $n = 9100$ об/мин. Материал лопатки – *титановый сплав*, материал диска – *стальной сплав*.

Порядок выполнения задания:

1. Подготовить исходную модель сектора колеса в программе КОМПАС-3D: сектор диска (18°) и 3 рабочих лопатки.
2. Импортировать данную модель в модуль *Geometry* в ANSYS Workbench 12.1.
3. Далее расчет проводится аналогично задаче №2 данной лабораторной работы.

Дополнительные аспекты: сетку надо делать достаточно *мелкой*, чтобы в местах контакта лопатки и диска происходило совместное деформирование; в качестве заделки наряду с традиционным жестким закреплением (*Fixed support*) используем закрепление без трения (*Frictionless support*) по боковым поверхностям сектора;



Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

File Edit View Units Tools Help Solve Mesh Update Mesh Mesh Control Metric Graph Options

ANSYS v12.1

Outline

- Project
 - Model (B4, C4, D4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Static Structural (C5)
 - Modal (D5)

Details of "Mesh"

Defaults

Physics Preference: Mechanical

Relevance: 100

Sizing

Use Advanced Size Function: Off

Relevance Center: Coarse

Element Size: Default

Initial Size Seed: Active Assembly

Smoothing: Medium

Transition: Fast

Span Angle Center: Coarse

Minimum Edge Length: 3,14160 mm

Inflation

Advanced

Pinch

Statistics

Section Planes

Section Plane 1 Section Plane 2

0,00 150,00 300,00 (mm)

75,00 225,00

Geometry / Print Preview / Report Preview /

Messages

Text	Association	Timestamp

Press F1 for Help

0 No Messages No Selection

Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

EN

Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

File Edit View Units Tools Help Solve Environment Inertial Loads Supports

ANSYS v12.1

Outline

- Project
 - Model (B4, C4, D4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Static Structural (C5)
 - Analysis Settings
 - Rotational Velocity
 - Fixed Support
 - Frictionless Support
 - Solution (C6)
 - Solution Information
 - Total Deformation
 - Equivalent Stress
 - Stress Tool
 - Safety Factor
 - Modal (D5)

Details of "Rotational Velocity"

Scope

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: All Bodies

Definition

Define By: Components

Coordinate System: Global Coordinate System

X Component: 952,5 rad/s (ramped)

Y Component: 0, rad/s (ramped)

Z Component: 0, rad/s (ramped)

X Coordinate: 0, mm

Y Coordinate: 0, mm

Z Coordinate: 0, mm

Suppressed: No

Section Planes

Section Plane 1 Section Plane 2

C: Static Structural (ANSYS)

Rotational Velocity

Time: 1, s

28.10.2014 13:29

Rotational Velocity: 952,5 rad/s

Rotation: 952,5, 0, 0, rad/s

Location: 0, 0, 0, mm

0,00 150,00 300,00 (mm)

75,00 225,00

Geometry / Print Preview / Report Preview /

Graph

Tabular Data

Steps	Time [s]	X [rad/s]	Y [rad/s]	Z [rad/s]
1	1	0,	0,	0,
2	1	952,5	0,	0,

Graph

952,5

750

625

500

375

250

125

0

1

1

Messages: Graph

Press F1 for Help

0 No Messages No Selection

Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

EN

Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

Environment: Inertial, Loads, Supports

Outline:

- Project
 - Model (B4, C4, D4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Static Structural (C5)
 - Analysis Settings
 - Rotational Velocity
 - Fixed Support**
 - Frictionless Support
 - Solution (C6)
 - Solution Information
 - Total Deformation
 - Equivalent Stress
 - Stress Tool
 - Safety Factor
 - Modal (D5)

Details of "Fixed Support":

Scope

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: 3 Faces

Definition

Type: Fixed Support

Suppressed: No

Section Planes

Section Plane 1, Section Plane 2

C: Static Structural (ANSYS)

Fixed Support

Time: 1, s

28.10.2014 13:29

0,00 150,00 300,00 (mm)

75,00 225,00

Graph

Tabular Data

Messages: Graph

Press F1 for Help

0 No Messages No Selection

Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

EN 13:29

Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

Environment: Inertial, Loads, Supports

Outline:

- Project
 - Model (B4, C4, D4)
 - Geometry
 - Coordinate Systems
 - Connections
 - Mesh
 - Automatic Method
 - Static Structural (C5)
 - Analysis Settings
 - Rotational Velocity
 - Fixed Support
 - Frictionless Support**
 - Solution (C6)
 - Solution Information
 - Total Deformation
 - Equivalent Stress
 - Stress Tool
 - Safety Factor
 - Modal (D5)

Details of "Frictionless Support":

Scope

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: 2 Faces

Definition

Type: Frictionless Support

Suppressed: No

Section Planes

Section Plane 1, Section Plane 2

C: Static Structural (ANSYS)

Frictionless Support

Time: 1, s

28.10.2014 13:32

0,00 150,00 300,00 (mm)

75,00 225,00

Graph

Tabular Data

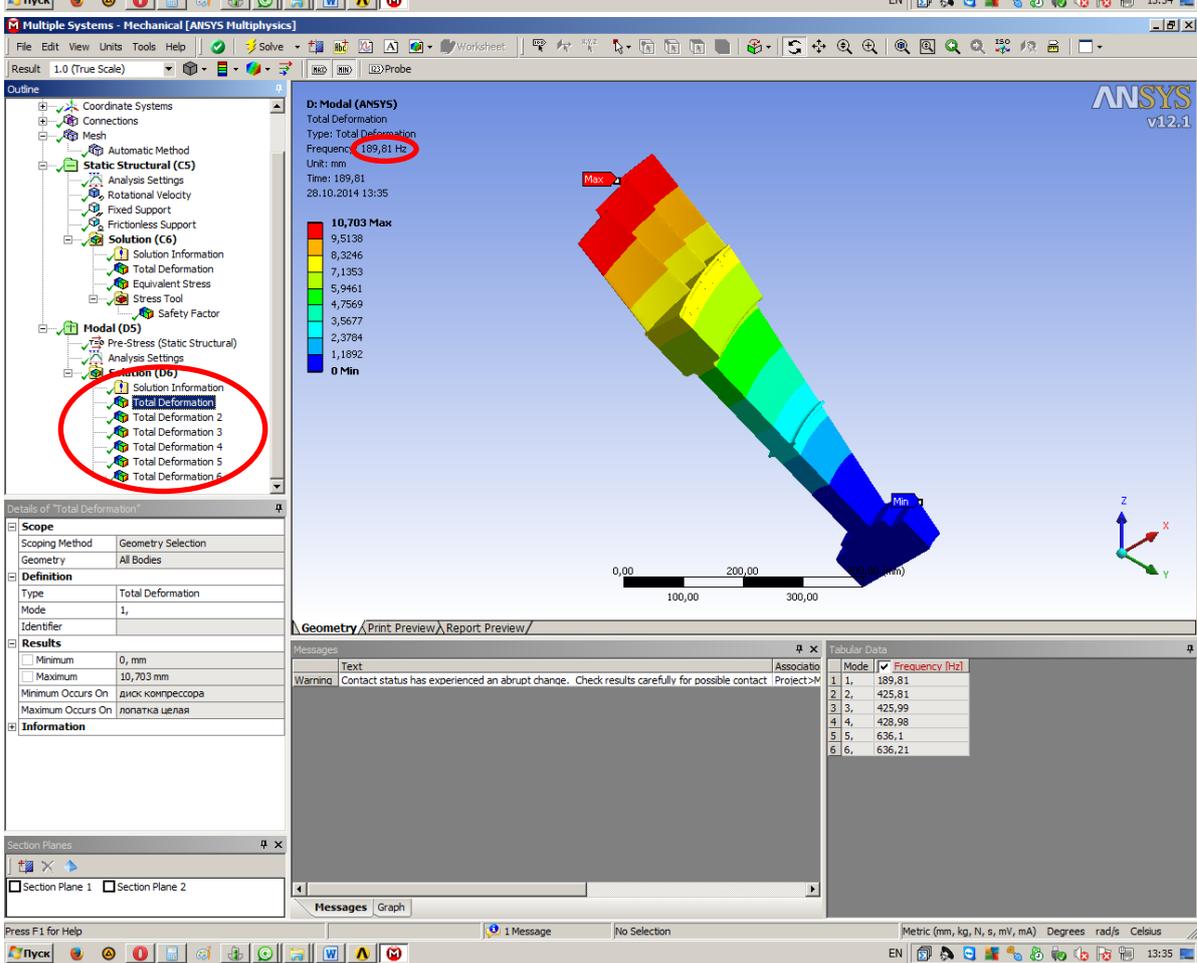
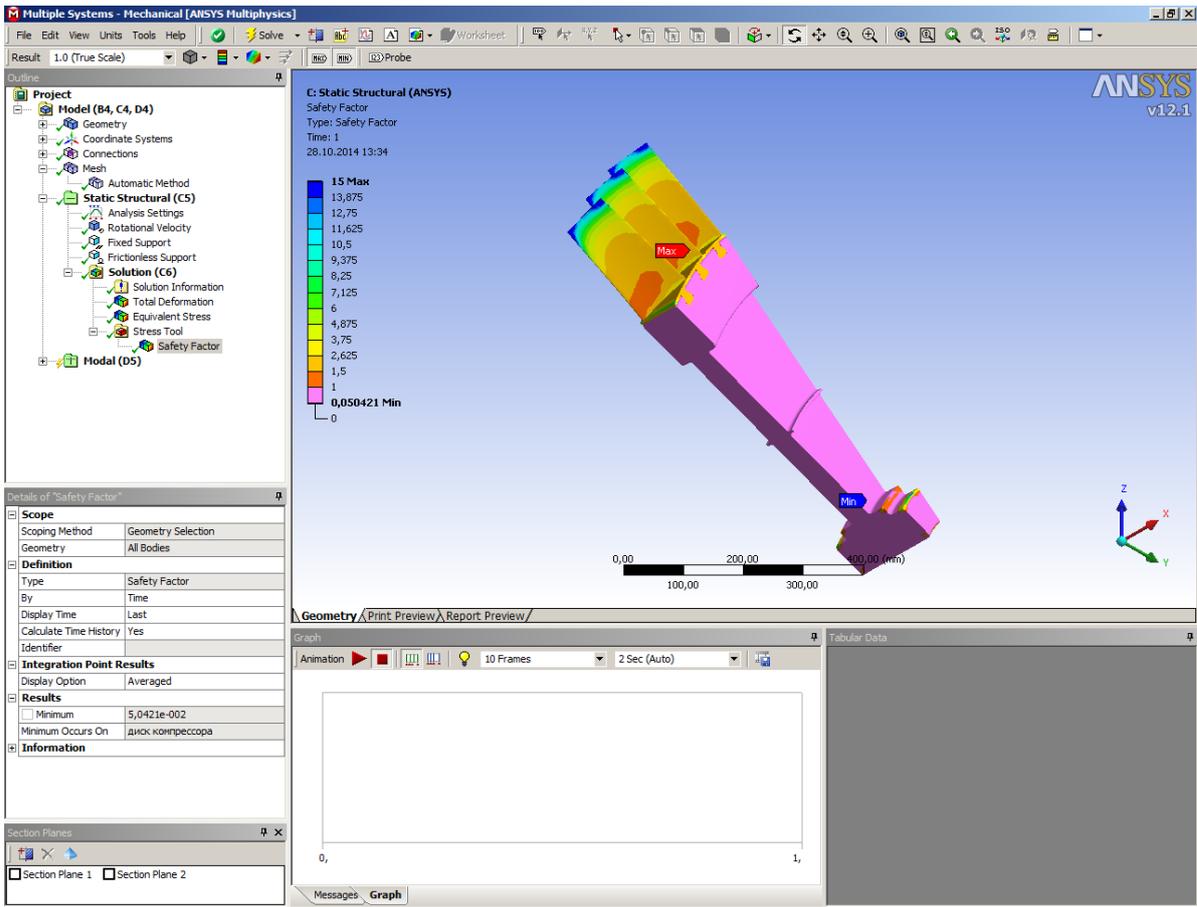
Messages: Graph

Press F1 for Help

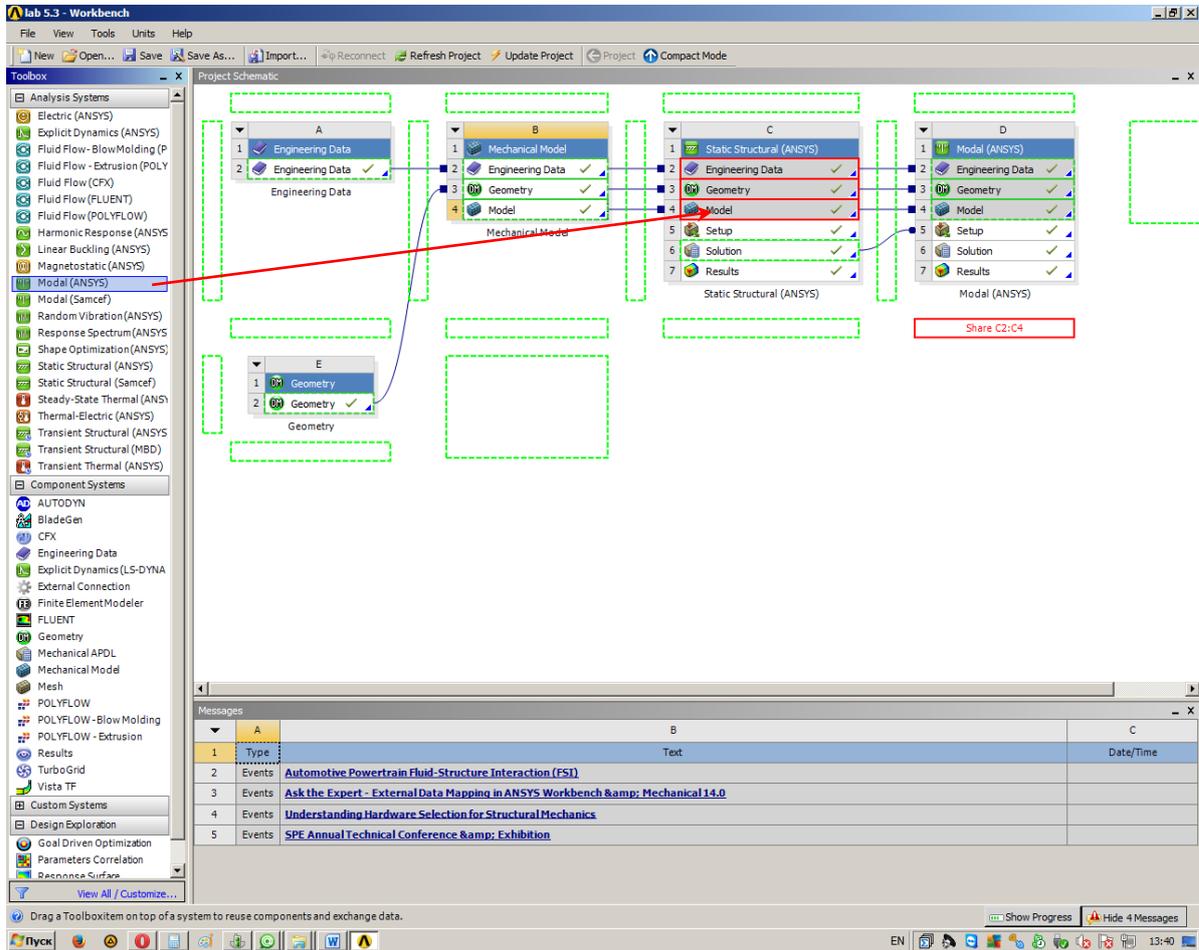
0 No Messages No Selection

Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

EN 13:32



4. После проведения анализа с учетом предварительного напряженного состояния (*престрессовый анализ*) и определения запасов вибрационной устойчивости по формуле (1.1) необходимо провести *модальный анализ без учета* напряженного состояния и сравнить его результаты с результатами *престрессового модального анализа*. Для этого дерево проекта должно быть таким, как представлено на рисунке далее. Работа заканчивается после определения *типа ротора* и *запасов вибрационной устойчивости* по формуле (1.1).



lab 5.3 - Workbench

File View Tools Units Help

New Open... Save Save As... Import... Reconnect Refresh Project Update Project Project Compact Mode

Toolbox

Analysis Systems

- Electric (ANSYS)
- Explicit Dynamics (ANSYS)
- Fluid Flow - Blow Molding (P)
- Fluid Flow - Extrusion (POLY)
- Fluid Flow (CFX)
- Fluid Flow (FLUENT)
- Fluid Flow (POLYFLOW)
- Harmonic Response (ANSYS)
- Linear Buckling (ANSYS)
- Magnetostatic (ANSYS)
- Modal (ANSYS)
- Modal (Samcef)
- Random Vibration (ANSYS)
- Response Spectrum (ANSYS)
- Shape Optimization (ANSYS)
- Static Structural (ANSYS)
- Static Structural (Samcef)
- Steady-State Thermal (ANS)
- Thermal-Electric (ANSYS)
- Transient Structural (ANSYS)
- Transient Structural (MBD)
- Transient Thermal (ANSYS)

Component Systems

- AUTODYN
- BladeGen
- CFX
- Engineering Data
- Explicit Dynamics (LS-DYNA)
- External Connection
- Finite Element Modeler
- FLUENT
- Geometry
- Mechanical APDL
- Mechanical Model
- Mesh
- POLYFLOW
- POLYFLOW - Blow Molding
- POLYFLOW - Extrusion
- Results
- TurboGrid
- Vista TF
- Custom Systems
- Design Exploration
- Goal Driven Optimization
- Parameters Correlation
- Response Surface

Project Schematic

A: Engineering Data (1, 2)

B: Mechanical Model (1: Engineering Data, 2: Geometry, 3: Model)

C: Static Structural (ANSYS) (1: Engineering Data, 2: Geometry, 3: Model, 4: Setup, 5: Solution, 6: Results)

D: Modal (ANSYS) (1: Engineering Data, 2: Geometry, 3: Model, 4: Setup, 5: Solution, 6: Results)

E: Modal (ANSYS) (1: Engineering Data, 2: Geometry, 3: Model, 4: Setup, 5: Solution, 6: Results)

F: Geometry (1, 2)

Messages

	A	B	C
1	Type	Text	Date/Time
2	Events	Automotive Powertrain Fluid-Structure Interaction (FSI)	
3	Events	Ask the Expert - External Data Mapping in ANSYS Workbench & Mechanical 14.0	
4	Events	Understanding Hardware Selection for Structural Mechanics	
5	Events	SPE Annual Technical Conference & Exhibition	

Multiple Systems - Mechanical [ANSYS Multiphysics]

File Edit View Units Tools Help Solve

Result: 1.0 (True Scale)

Outline

- Equivalent Stress
- Stress Tool
- Modal (D5)
 - Pre-Stress (Static Structural)
 - Analysis Settings
 - Solution (D5)
 - Solution Information
 - Total Deformation 1
 - Total Deformation 2
 - Total Deformation 3
 - Total Deformation 4
 - Total Deformation 5
 - Total Deformation 6
- Modal 2 (E5)
 - Pre-Stress (None)
 - Analysis Settings
 - Fixed Support
 - Frictionless Support
 - Solution (E5)
 - Solution Information
 - Total Deformation 1
 - Total Deformation 2
 - Total Deformation 3
 - Total Deformation 4
 - Total Deformation 5
 - Total Deformation 6

Details of "Total Deformation"

Scope

Scoping Method: Geometry Selection

Geometry: All Bodies

Definition

Type: Total Deformation

Mode: 1

Identifier:

Results

Minimum: 0, mm

Maximum: 44,05 mm

Minimum Occurs On: диск компрессора

Maximum Occurs On: планетка целая

Information

Section Planes

Section Plane 1

Section Plane 2

E: Modal (ANSYS)

Total Deformation

Type: Total Deformation

Frequency: 105,16 Hz

Unit: mm

Times: 105,16

28.10.2014 13:43

44,05 Max

39,155

34,261

29,366

24,472

19,578

14,683

9,7888

4,8944

0 Min

Geometry [Print Preview] Report Preview

Graph

Animation

10 Frames

2 Sec (Auto)

442,7

300

200

100

0

1 2 3 4 5 6

Tabular Data

Mode	Frequency [Hz]
1	105,16
2	120,3
3	120,34
4	126,23
5	442,54
6	442,7

Press F1 for Help

1 Message

No Selection

Metric (mm, kg, N, s, mV, mA) Degrees rad/s Celsius

13:43