

**СОДЕРЖАНИЕ**

Общие замечания. Правила подготовки и выполнения лабораторных работ.....	5
Работа № 1. Исследование спектра собственных частот и форм колебаний рабочей лопатки (компрессора).....	6
Работа № 2. Исследование спектра собственных частот и форм колебаний диска, закрепленного в центре .....	14
Работа № 3. Исследование критических частот вращения однодискового ротора .....	22
Работа № 4. Исследование критических частот вращения ротора в системе "ротор-корпус" .....	27
Работа № 5. Исследование спектра собственных частот и форм колебаний цилиндрической оболочки .....	33

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ

---

КОНСТРУКЦИЯ И ПРОЧНОСТЬ АД  
КОНСТРУКЦИЯ И ПРОЧНОСТЬ ДВИГАТЕЛЕЙ

Студент (Ф.И.О.) \_\_\_\_\_

Факультет - курс - учебная группа - подгруппа \_\_\_\_\_

Номер зачетной книжки \_\_\_\_\_

*Журнал должен быть представлен  
на зачете и экзамене  
по дисциплинам “КиП АД” и “КиП Д”*

Отметка преподавателя о зачете  
лабораторных работ \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 201\_\_ г.

Москва - 201\_\_

## ОБЩИЕ ЗАМЕЧАНИЯ.

### ПРАВИЛА ПОДГОТОВКИ И ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При создании газотурбинных двигателей и в процессе их эксплуатации имеют место вибрационные разрушения их элементов вследствие резонансных колебаний и потери устойчивости. В ряде случаев эти разрушения влекут за собой тяжелые последствия, вплоть до нелокализованных разрушений двигателя. Предупреждение разрушений элементов двигателя, а также анализ причин их появления требуют проведения исследований, связанных с определением их динамических характеристик, а также разработкой конструктивных и технологических мероприятий по снижению вероятности работы элементов двигателей на критических режимах.

Данное пособие включает отчеты по лабораторным работам разделов курсов дисциплин "Конструкция и прочность АД" ("КиП АД"), "Конструкция и прочность двигателей": "Колебания и динамическая прочность элементов АД", "Критические частоты вращения роторов АД".

Лабораторные работы проводятся с целью закрепления теоретических знаний по разделам курсов дисциплин, изучения экспериментальных методов исследования вопросов соответствующих разделов курсов, изучения и практического освоения установок, приспособлений, средств измерения, используемых в исследованиях.

Лабораторная работа является самостоятельной индивидуальной работой студента. Для проведения экспериментальной части студенты разбиваются на бригады по 3-5 человек с дальнейшим обязательным прохождением полного цикла экспериментальной части работы при участии каждого члена бригады.

В процессе подготовки к лабораторным работам студент обязан изучить соответствующие методические указания, руководства и инструкции (на рабочем месте), разделы конспекта лекций и учебника.

Степень готовности студента к выполнению лабораторной работы устанавливается по результатам проведения контрольного опроса.

Студенты, показавшие неудовлетворительные результаты контрольного опроса, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

По результатам выполнения лабораторной работы студентом оформляется отчет, представляемый преподавателю в конце каждого занятия. Журнал должен быть представлен на зачете и экзамене.

Журнал должен заполняться чернилами.

Перед выполнением лабораторных работ студент должен пройти инструктаж по охране труда и неукоснительно соблюдать установленные требования. Особое внимание следует обращать на индивидуальные особенности лабораторных установок и требования к работе на конкретных рабочих мест.

**Работа № 1.****ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ РАБОЧЕЙ ЛОПАТКИ (КОМПРЕССОРА)**

1.1. Цель лабораторной работы

1.2. Расчетная схема лопатки

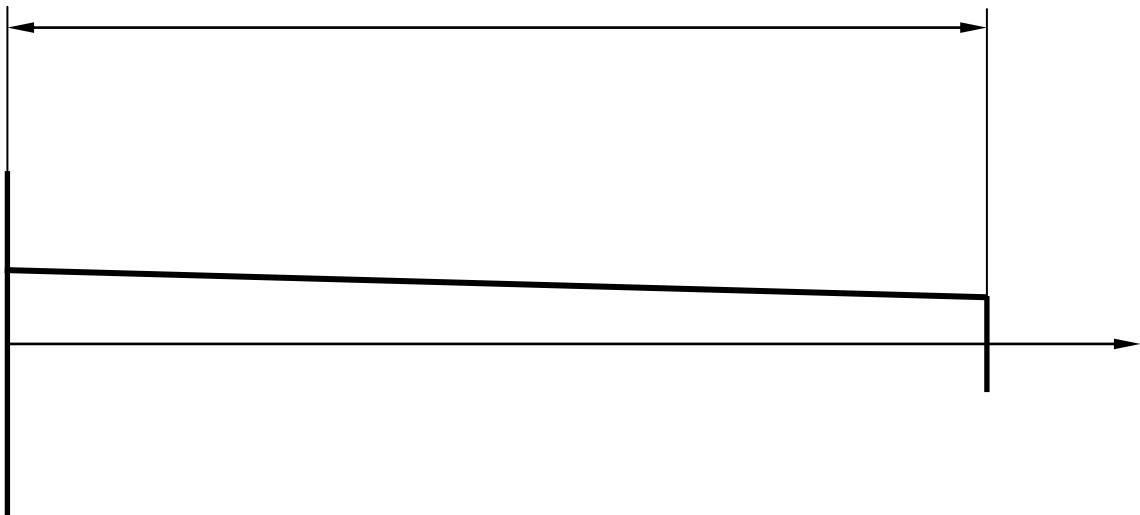


Рис.1.1. Расчетная схема лопатки

Таблица 1.1

Исходные данные расчета  $f_1$  (собственной частоты колебаний рабочей лопатки по первой изгибной форме)

$i$ (k)	1	2	3	4	5
характеристика					
$F_i * 10^{-4}, \text{ м}^2$					
$J_k * 10^{-8}, \text{ м}^4$					
$\ell, \text{ м}$	0.154				
$\rho, \text{ кг/м}^3$	7800				
$E, \text{ Па}$	$2 * 10^{11}$				

Таблица 1.2

Результаты расчета  $f_1$

$J_k * 10^{-8}, \text{ м}^4$							
$k$	1	2	3	4	$\sum \frac{(i-k)^2}{J_k}, \text{ м}^{-4}$	$F_i * 10^{-4}, \text{ м}^2$	$F_i * \sum \frac{(i-k)^2}{J_k}, \text{ м}^{-4}$
$i$							
5							
4							
3							
2							
$X_5, \text{ м}^{-2}$							
$f_1, \text{ с}^{-1}$							

$X_5 =$

$f_1 =$

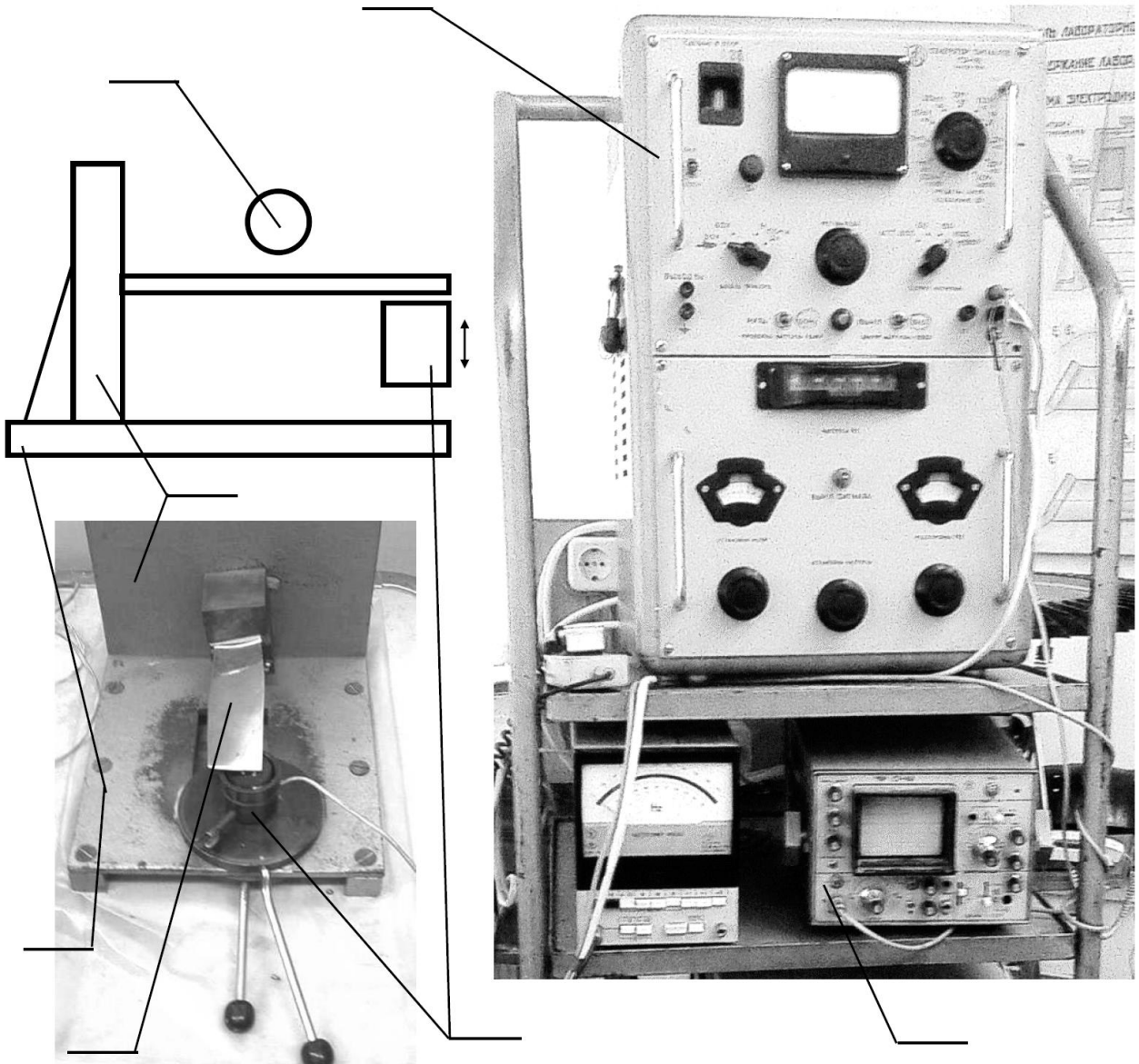


Рис.1.2. Схема лабораторной установки  
(обозначьте элементы установки и укажите связи между элементами)

- 1-
- 2-

Таблица 1.3

Результаты эксперимента (рисунки узловых линий и значения собственных частот колебаний)

m n	1	2	3	4
1	 $f_{\text{эксп}} = \Gamma_{\text{Ц}}, f_{\text{теор}} = \Gamma_{\text{Ц}}$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$
2	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$
3	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$	 $f_{\text{эксп}} =$

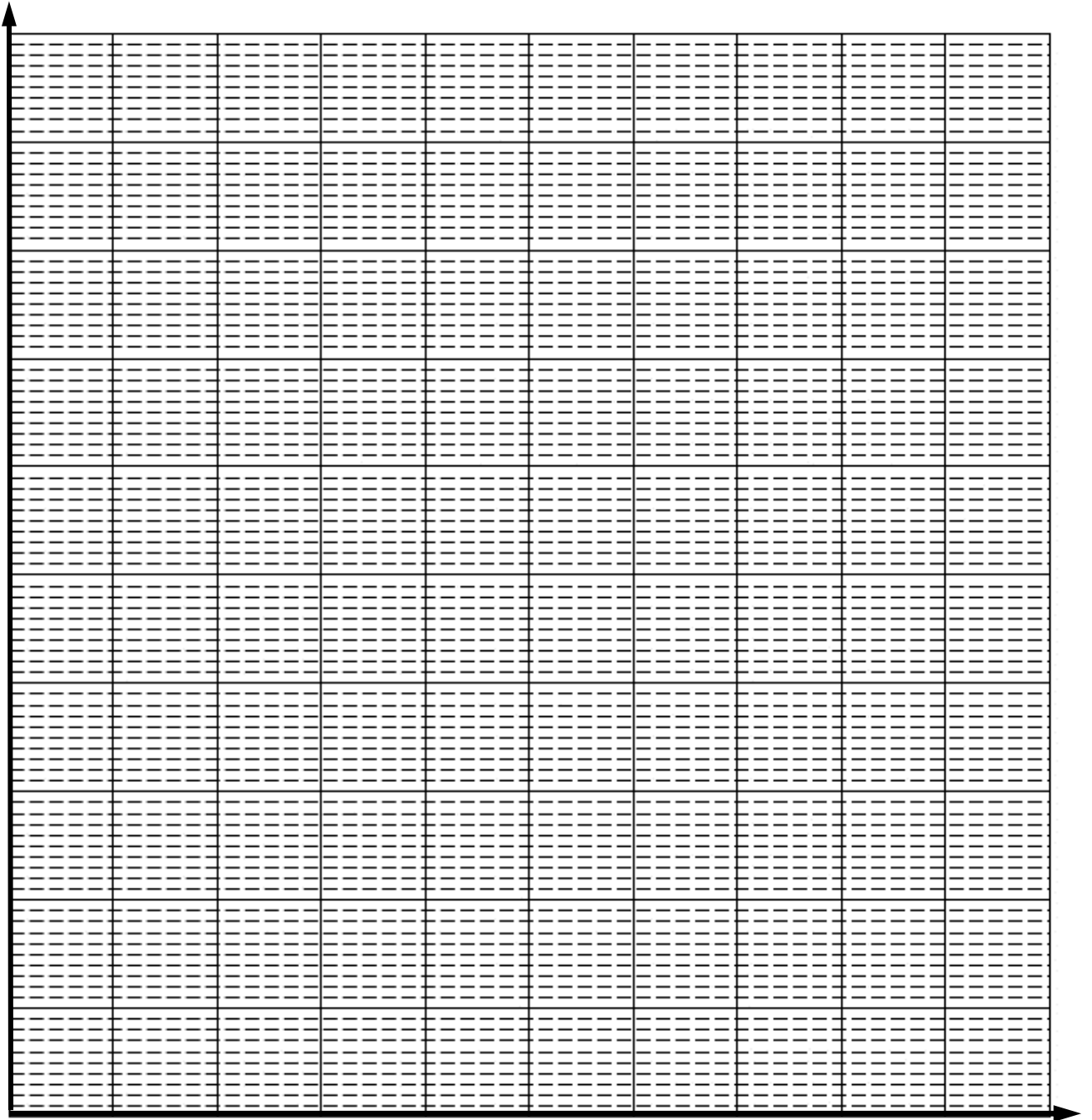


Рис.1.3. Частотные диаграммы

Комментарии :



1.3. Перечислите конструктивные и эксплуатационные мероприятия по снижению опасности возникновения и развития колебаний рабочих лопаток на примерах существующих образцов техники

(Подпишите названия конструктивных элементов и дайте комментарии по особенностям конструкции, связав их с темой лабораторной работы)

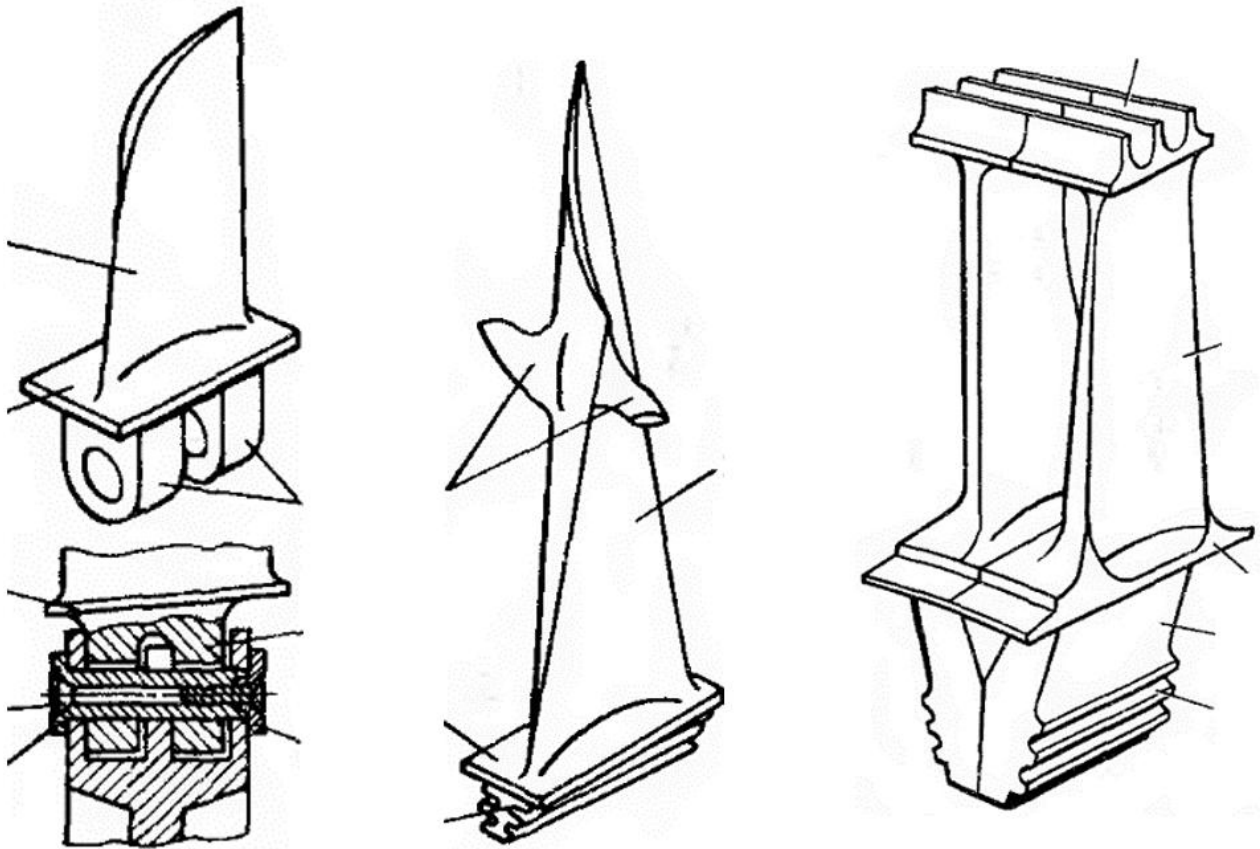


Рис.1.4. [3]

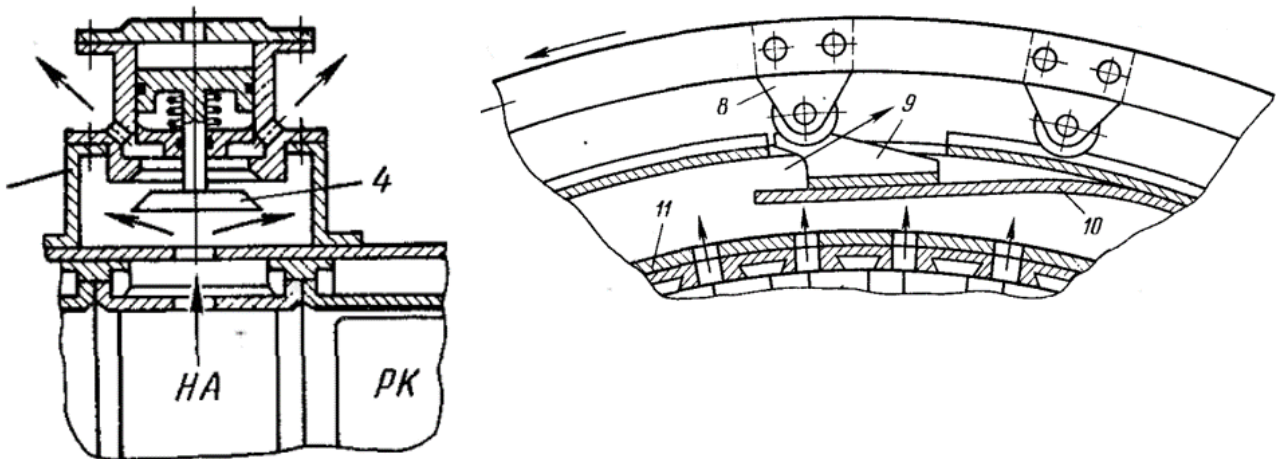


Рис.1.5. [3]

1.4. Оцените влияние основных конструктивных характеристик лопатки на собственные частоты колебаний

1.5. Оцените влияние материала лопатки на собственные частоты колебаний

1.6. Выводы

Работа выполнена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Работа зачтена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

## Работа № 2.

## ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ДИСКА, ЗАКРЕПЛЕННОГО В ЦЕНТРЕ

### 2.1. Цель лабораторной работы

### 2.2.

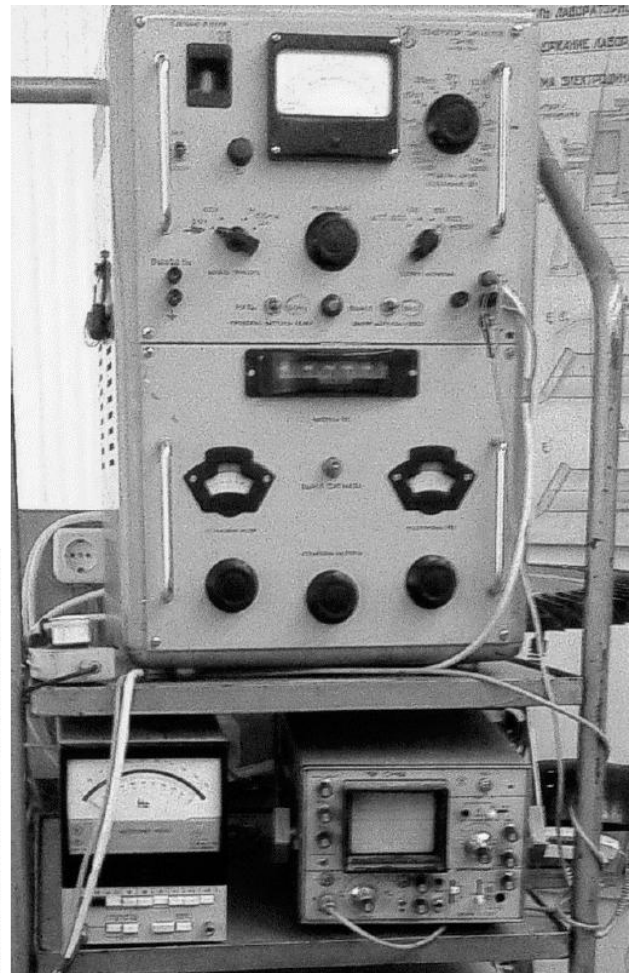
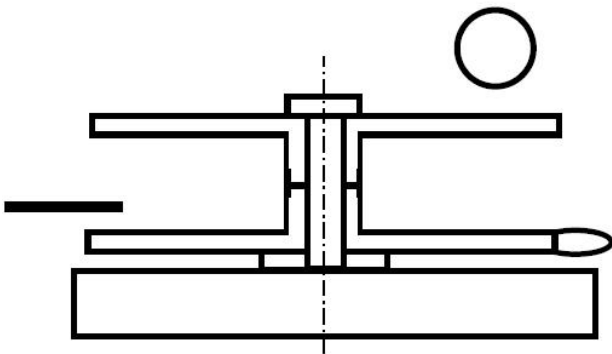


Рис. 2.1. Схема лабораторной установки  
(обозначьте элементы установки и укажите связи между элементами)

- 1-
- 2-

2.3. Исходные данные расчета значений собственных частот колебаний  
(параметры объекта исследования - диска)

Радиус	R=	м.
Толщина	h=	м.
Модуль упругости материала	E=	Па.
Коэффициент Пуассона	$\mu$ =	.
Плотность материала	$\rho$ =	кг/м <sup>3</sup> .

2.4. Для записей, вычислений

(перечислите источники возбуждения колебаний дисков в двигателях,  
приведите аппарат оценки значений собственных частот колебаний дисков)

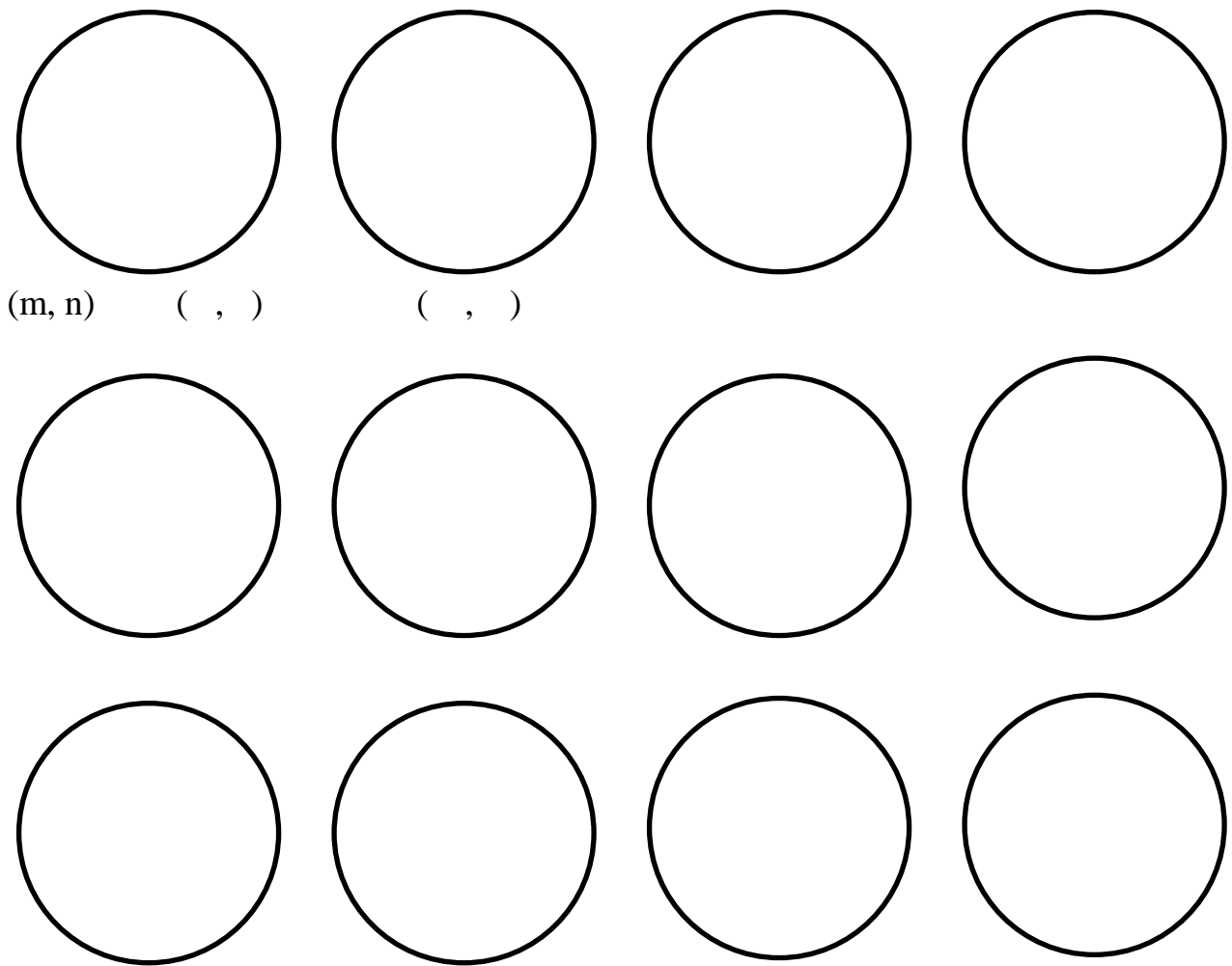


Рис.2.2. Узловые линии при различных формах колебаний

Комментарии:



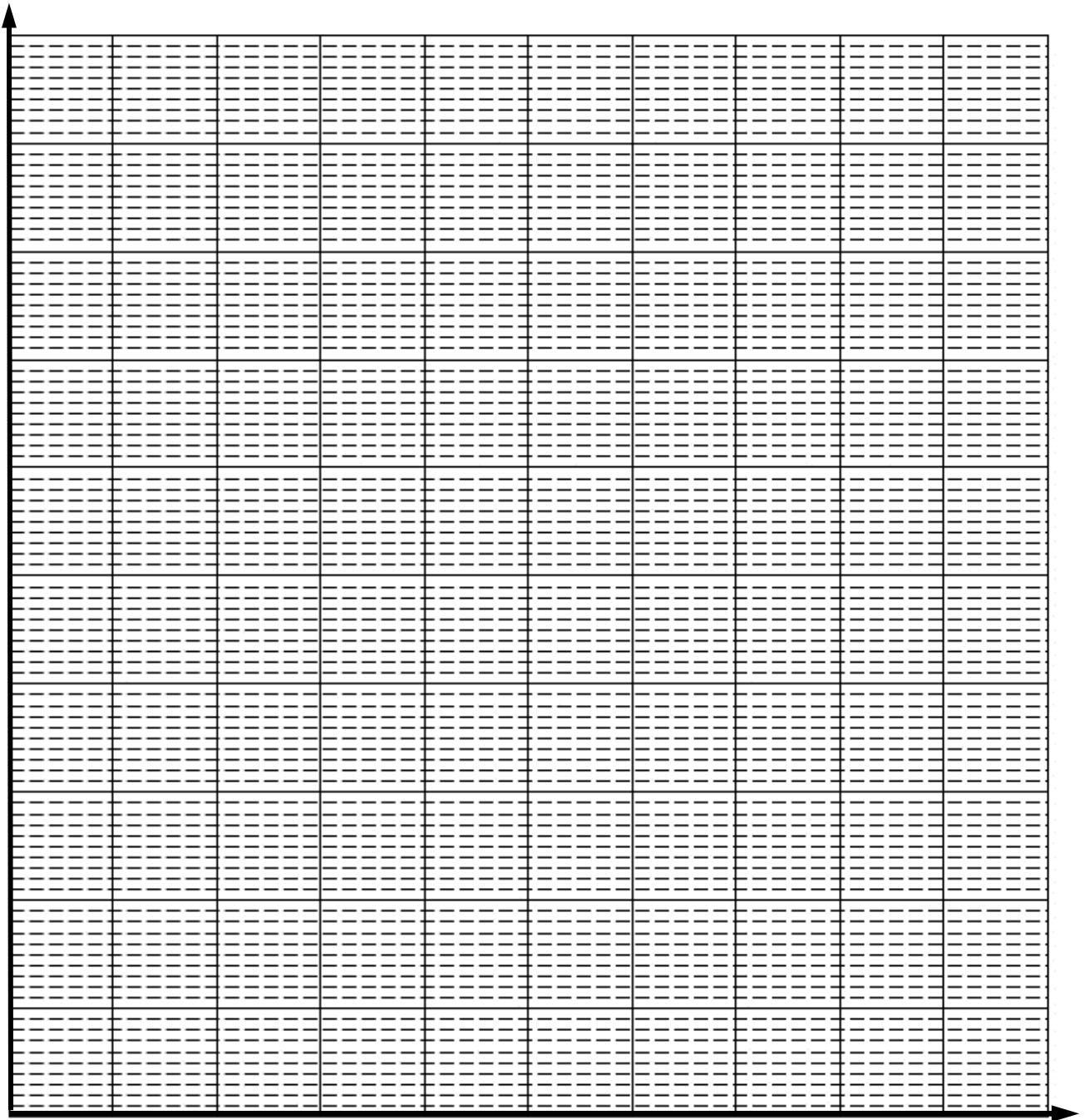


Рис.2.3. Частотные диаграммы

Комментарии :



2.5. Перечислите конструктивные и эксплуатационные мероприятия по снижению опасности возникновения и развития колебаний дисков на примерах существующих образцов техники

(Подпишите названия конструктивных элементов и дайте комментарии по особенностям конструкции, связав их с темой лабораторной работы)

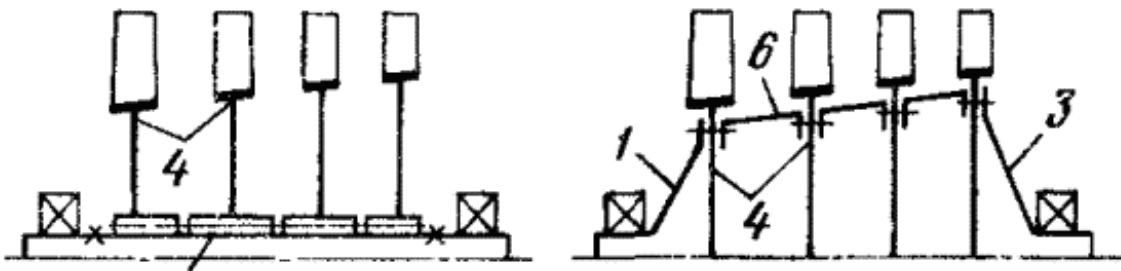


Рис.2.4. [3]

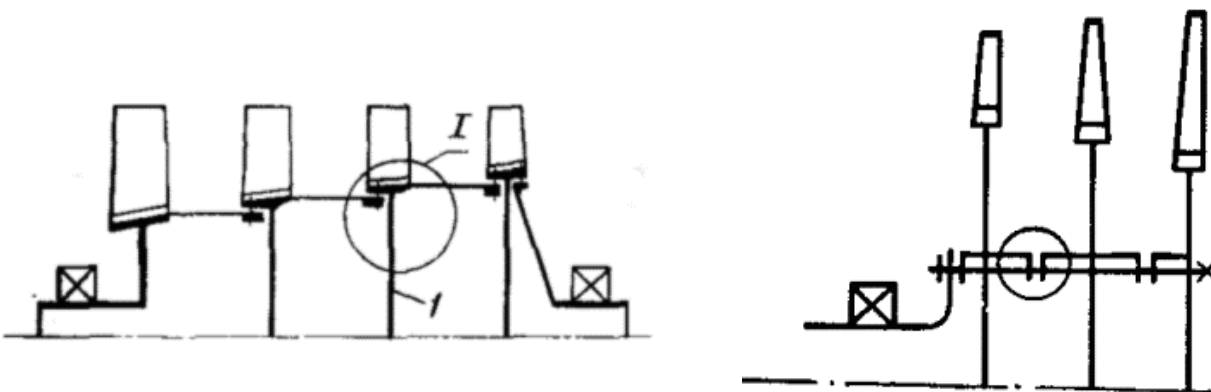


Рис.2.5. [3]

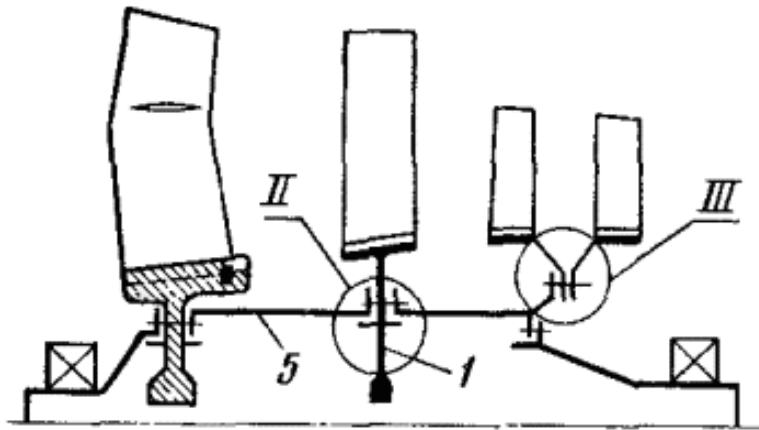


Рис.2.6. [3]

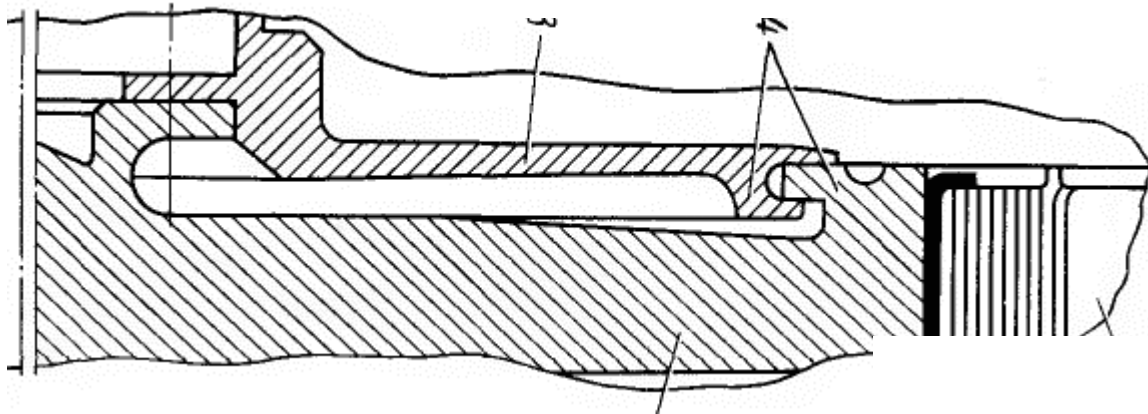


Рис.2.7. [3]

2.6. Оцените влияние основных конструктивных характеристик дисков на собственные частоты колебаний

2.7. Оцените влияние материала лопатки на собственные частоты колебаний

2.8. Выводы

Работа выполнена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Работа зачтена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

**Работа № 3.****ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ  
ОДНОДИСКОВОГО РОТОРА**

## 3.1. Цель лабораторной работы

3.2. Исходные данные расчета значений критических частот  
(параметры объекта исследования)Масса диска ротора  $m_d =$  кг.Длина вала между опорами  $l =$  м.Модуль упругости материала вала  $E =$  Па.

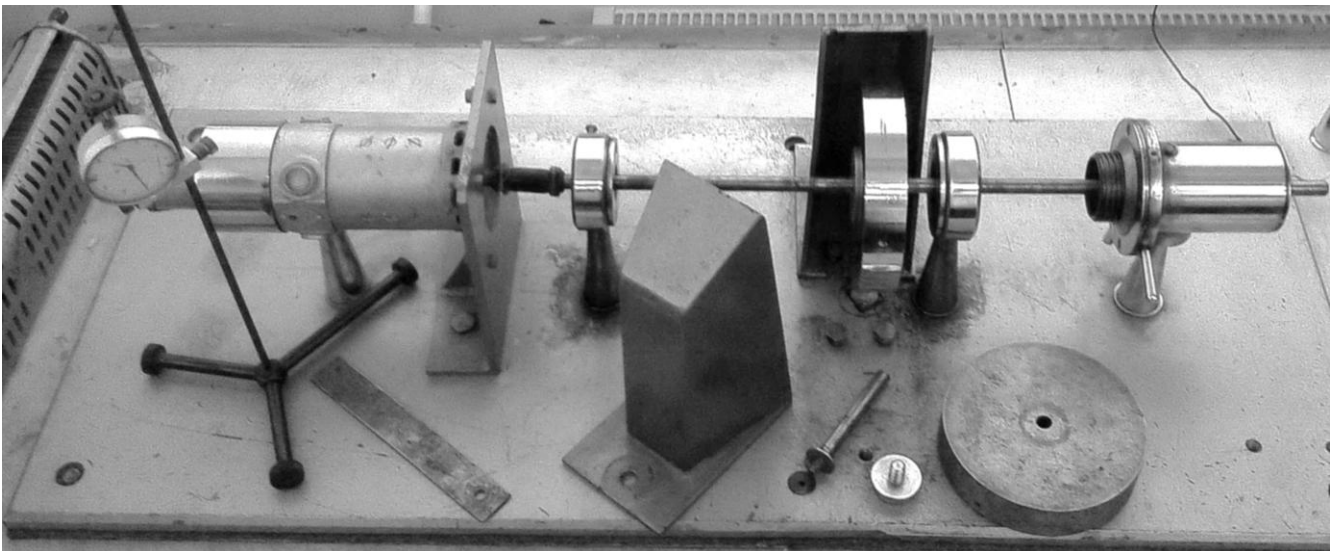
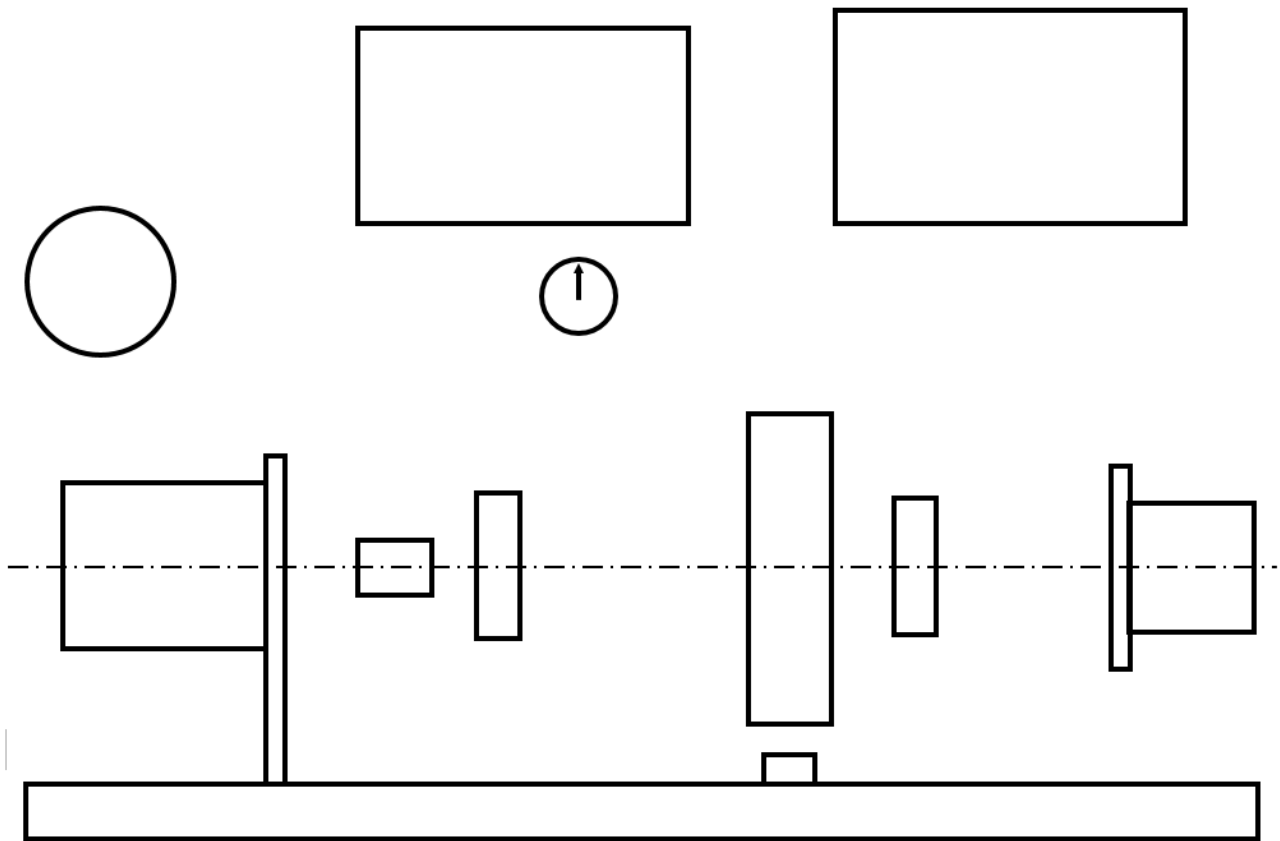


Рис.3.1. Схема лабораторной установки

- 1-
- 2-

### 3.3. Определение критической частоты вращения ротора $n_{кр}$

#### 3.3.1. Теоретическое определение $n_{кр}$

#### 3.3.2. Определение $n_{кр}$ по частоте собственных колебаний

#### 3.3.3. Экспериментальное определение $n_{кр}$ по статическому прогибу

Таблица 3.1

К экспериментальному определению  $n_{кр}$  по статическому прогибу

Масса груза, кг	Показания индикатора $Y \cdot 10^{-5}$ , м			Коэффициент жесткости $C \cdot 10^{-4}$ , Н/м	Средний коэффициент жесткости $C_{ср} \cdot 10^{-4}$ , Н/м
	при нагружении $Y_H$	при разгрузке $Y_p$	среднее $Y_{ср}$		

$n_{кр} =$

3.4. Экспериментальное определение критической частоты вращения ротора (по вибрационному критерию)

$n_{кр} =$

3.5. Понятие жесткого и гибкого ротора. Способы снижения опасности критических частот (конструктивные и в эксплуатации)

## 3.6. Выводы

Работа выполнена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Работа зачтена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)



**Работа № 4.****ИССЛЕДОВАНИЕ КРИТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ ВРАЩЕНИЯ  
РОТОРА В СИСТЕМЕ "РОТОР-КОРПУС"**

## 4.1. Цель лабораторной работы

## 4.2. Параметры лабораторной установки

Модуль упругости материала вала и шпилек	$E_B = E_{\text{шп}} =$	Па.
Диаметр вала	$d_1 =$	м.
Диаметр шпилек	$d_{\text{шп}} =$	м.
Число шпилек	$i =$	.
Расстояние между опорами	$l =$	м.
Расстояние от жесткой опоры до точки крепления диска	$l_1 =$	м.

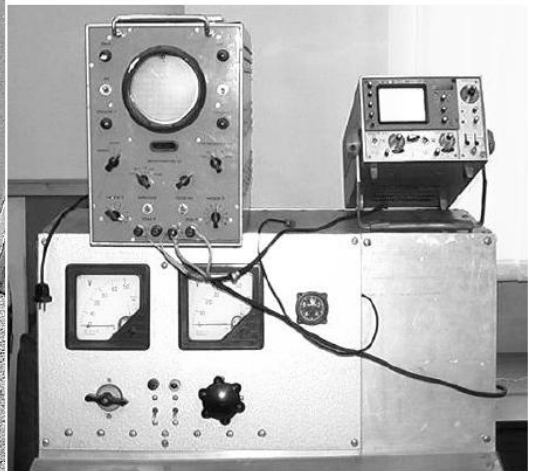
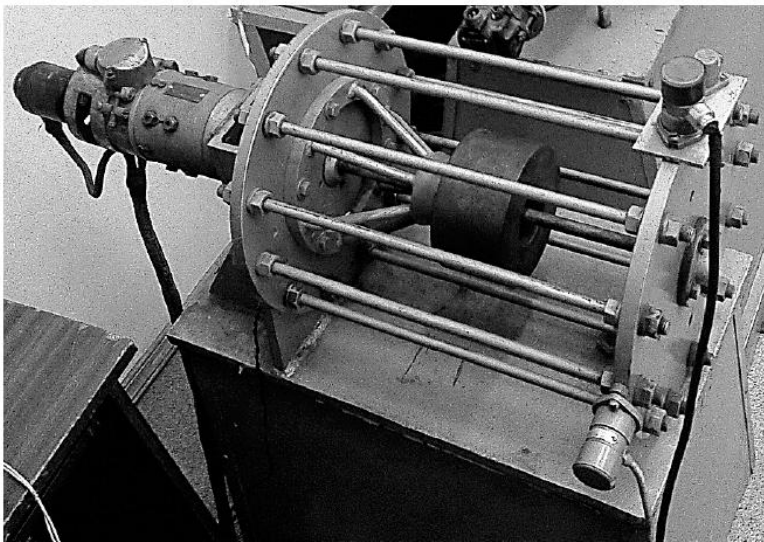
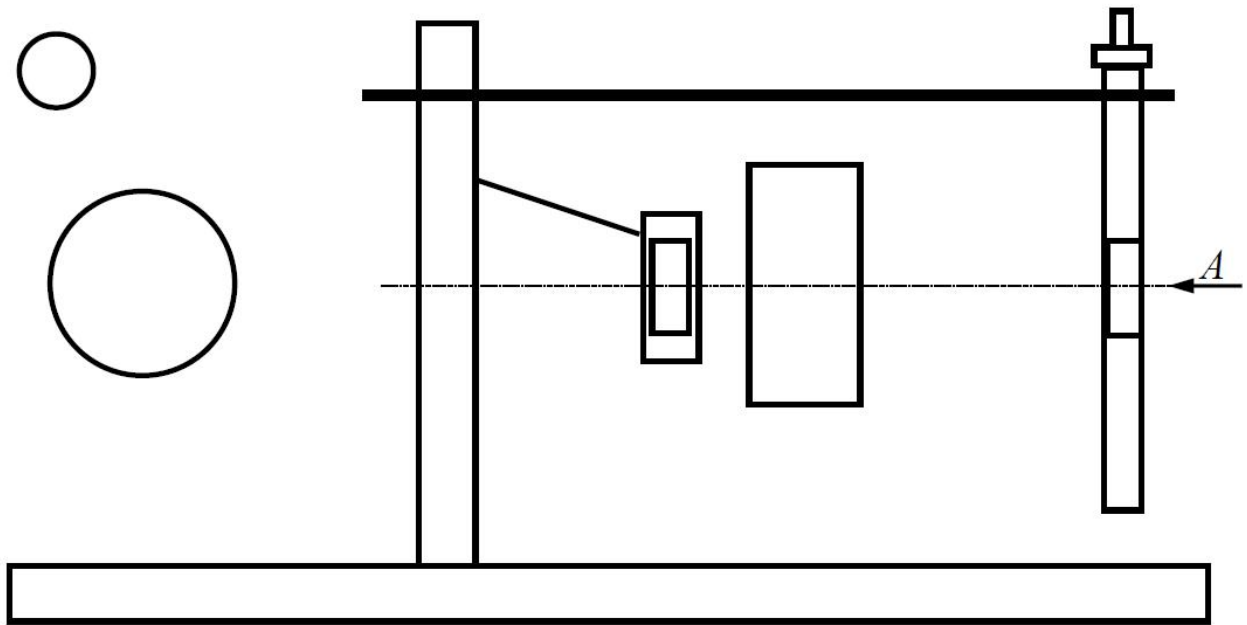


Рис.4.1. Схема лабораторной установки

1-  
2-

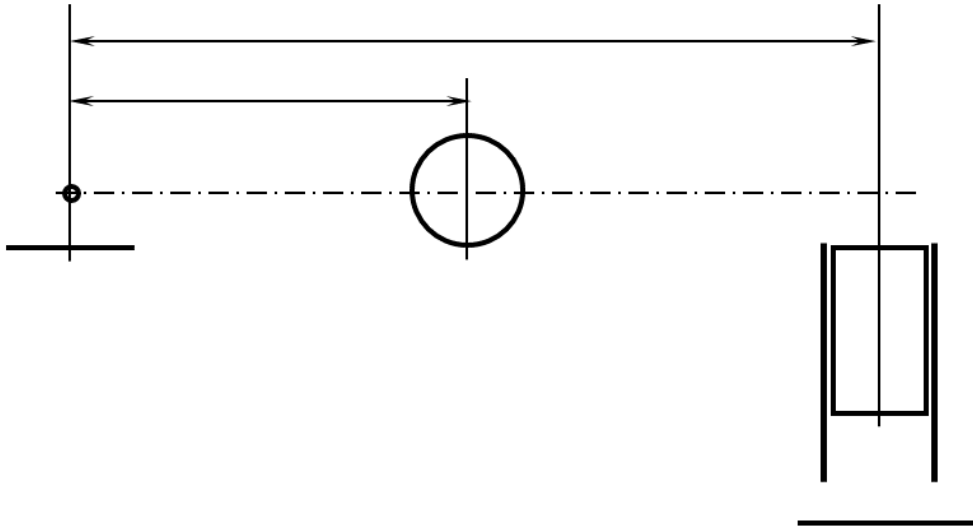


Рис.4.2. Схема эквивалентной системы

#### 4.3. Параметры эквивалентной системы

Приведенная масса ротора  $m_1 =$  кг.

Приведенная масса податливой опоры  $m_2 =$  кг.

( см.также параметры установки )

#### 4.4. Понятие динамической жесткости

#### 4.5. Теоретическое определение критических частот вращения

$$n^{\text{теор}}_1 =$$

$$n^{\text{теор}}_2 =$$

#### 4.6. Экспериментальное определение критических частот вращения

$$n^{\text{эксп}}_1 =$$

$$n^{\text{эксп}}_2 =$$

4.7. Перечислите конструктивные и эксплуатационные мероприятия по снижению опасности критических частот вращения роторов на примерах образцов техники:

Опишите связь критических частот вращения с вибрационным состоянием двигателя и контролем уровня вибрации двигателя в эксплуатации:

(Подпишите названия конструктивных элементов и дайте комментарии по особенностям конструкции, связав их с темой лабораторной работы)

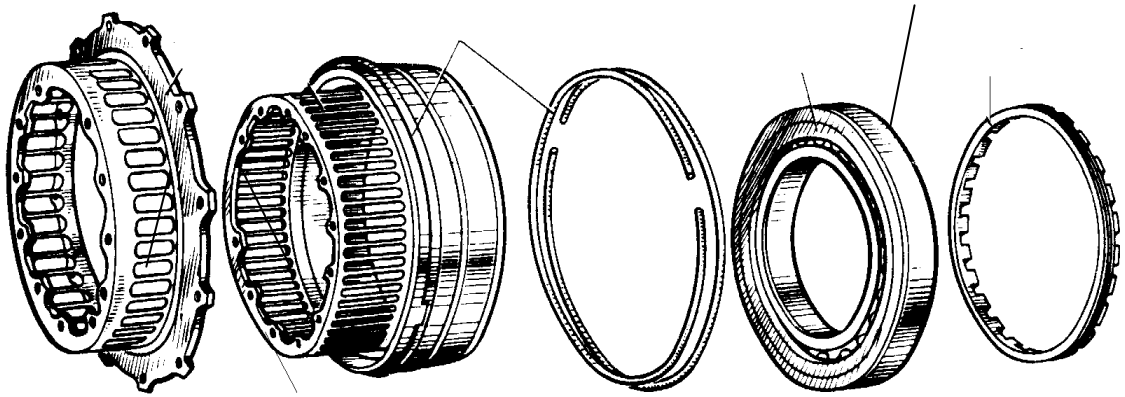


Рис.4.3. [7]

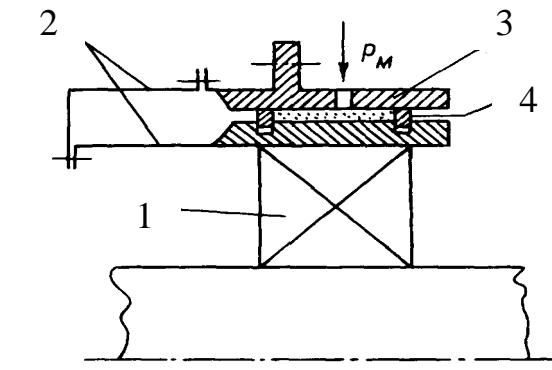


Рис.4.4. [7]

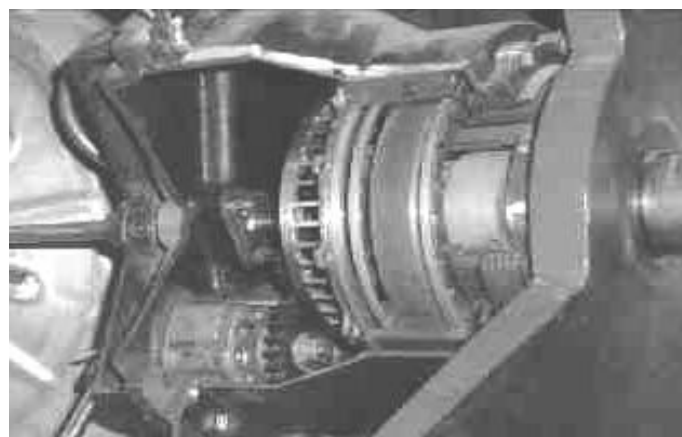


Рис.4.5.

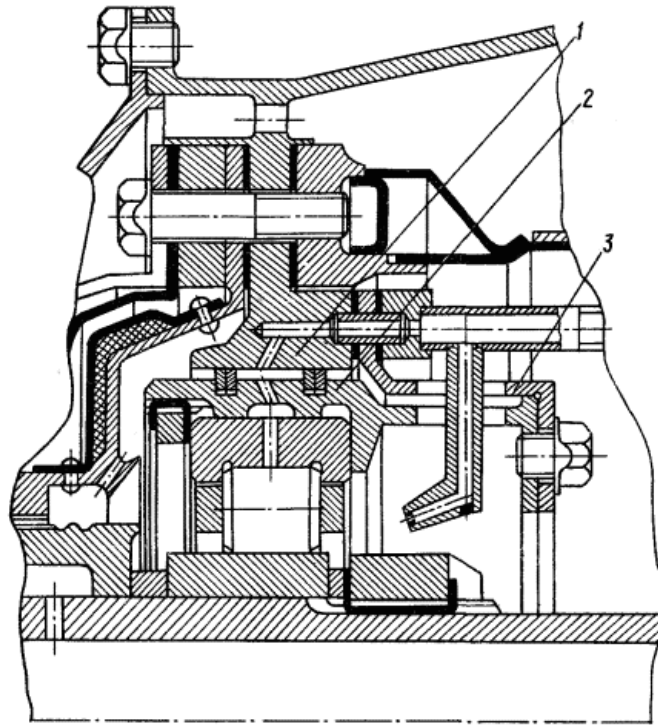


Рис.4.6. [3]

#### 4.7. ВЫВОДЫ

Работа выполнена " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Работа зачтена " \_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

**Работа № 5.****ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРА СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКИ**

5.1. Цель лабораторной работы

5.2.

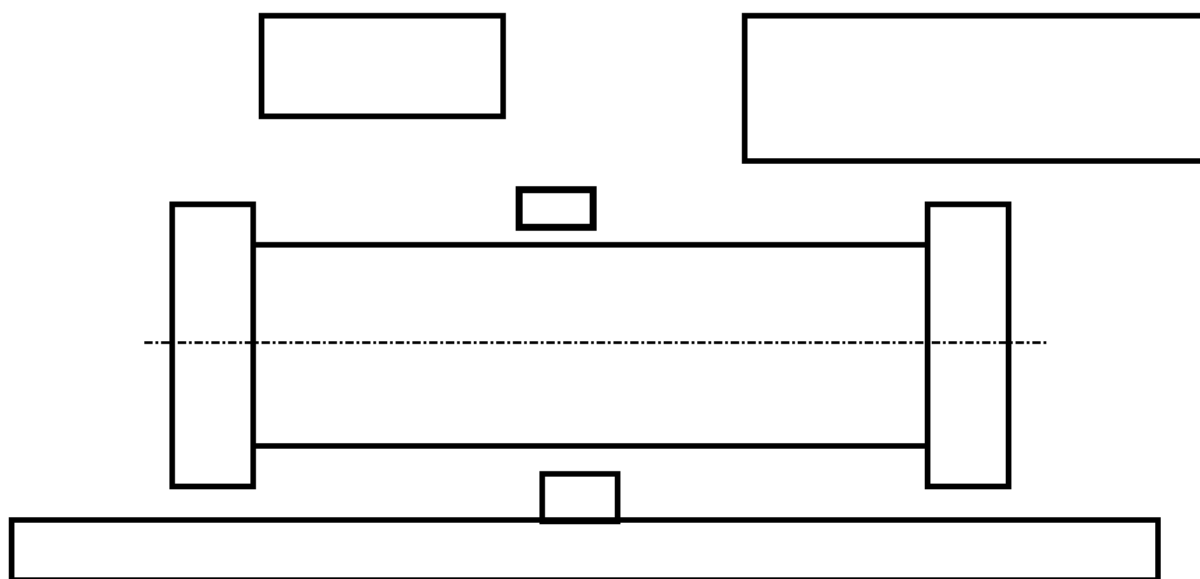


Рис.5.1,а. Схема лабораторной установки

1-  
2-

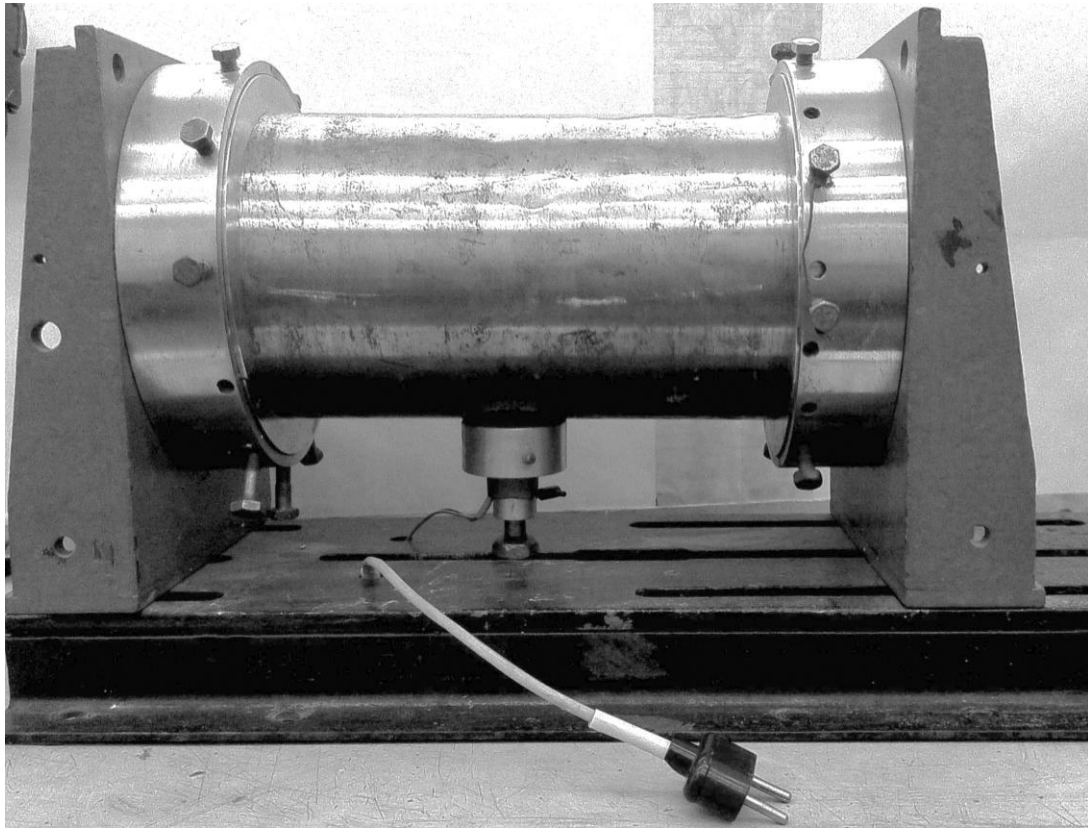


Рис.5.1,б.

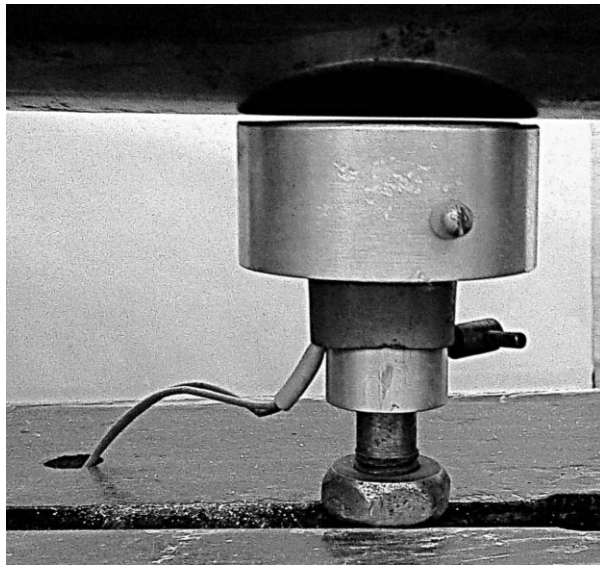


Рис.5.1,в.



## 5.3. Формы осесимметричных колебаний цилиндрической оболочки

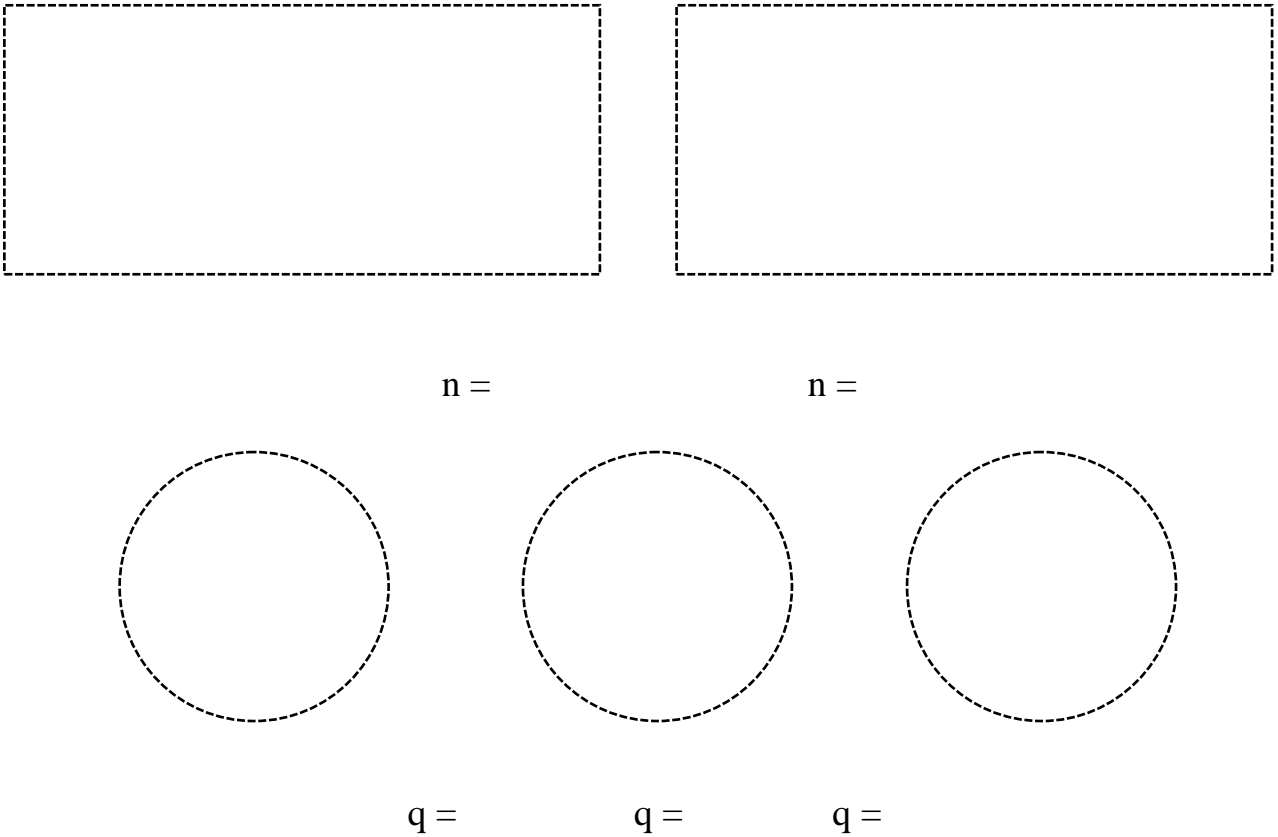


Рис. 5.2. Положение срединной поверхности при некоторых формах радиальных колебаний

Комментарии:

5.4. Исходные данные для расчета значений собственных частот  
(параметры объекта исследования)

Толщина оболочки	$\delta =$	м.
Радиус оболочки	$r =$	м.
Длина оболочки	$\ell =$	м.
Плотность материала оболочки	$\rho =$	кг/м <sup>3</sup> .
Модуль упругости материала оболочки	$E =$	Па.
Коэффициент Пуассона	$\mu =$	.

5.5. Формула для расчета значений собственных частот колебаний  
цилиндрической оболочки (в обозначениях пп. 5.4)

Таблица 5.1

Результаты определения значений собственных  
частот колебаний оболочки

n =

q	$f_{\text{теор}}, \text{Гц}$	$f_{\text{эксп}}, \text{Гц}$	$\Delta f, \%$
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			

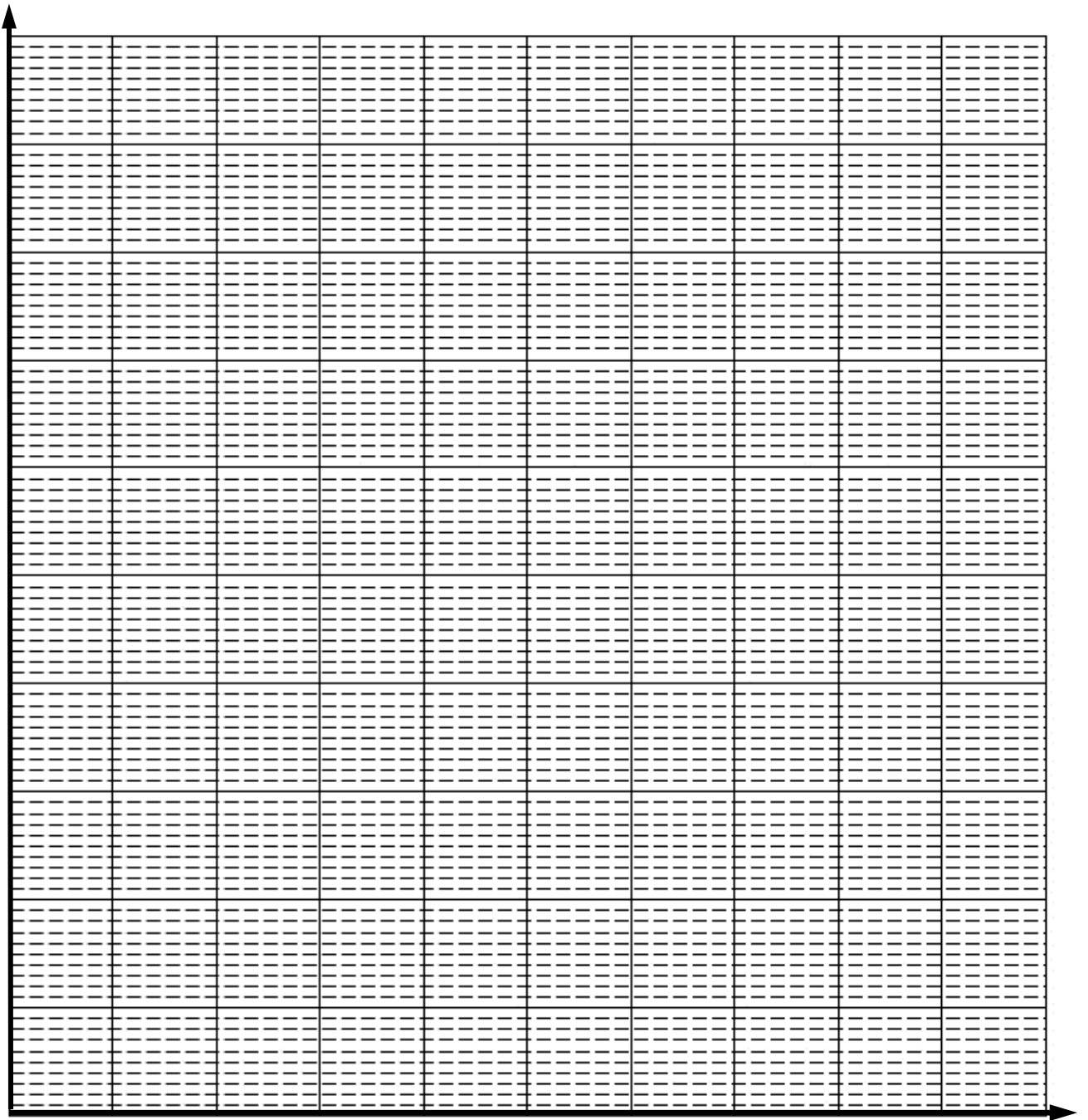


Рис.5.3. Частотные диаграммы

Комментарии :

5.6. Перечислите конструктивные и эксплуатационные мероприятия по снижению опасности возникновения и развития критических частот колебаний оболочек на примерах конкретных образцов техники:

(Подпишите названия конструктивных элементов и дайте комментарии по особенностям конструкции, связав их с темой лабораторной работы)

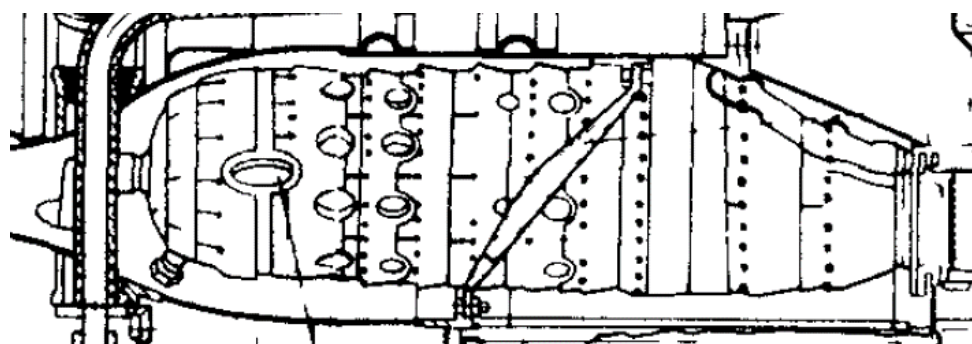


Рис.5.4. [3]

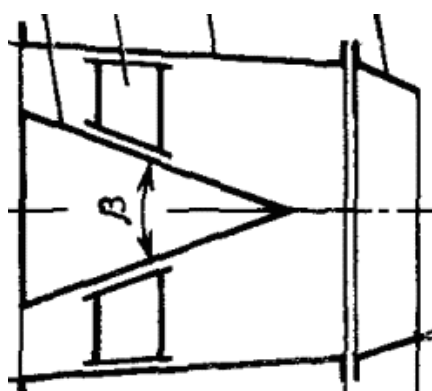


Рис.5.5. [3]

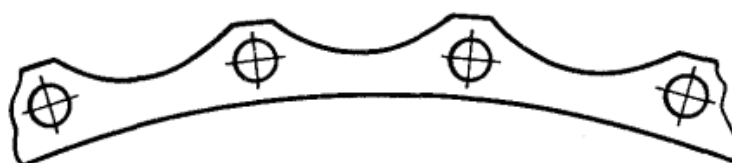


Рис.5.6.  
5.7. ВЫВОДЫ

Работа выполнена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

Работа зачтена " \_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 201\_\_ \_\_\_\_\_  
(подпись)

## РЕКОМЕНДУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

### Основная

1. Умушкин Б.П., Москаленко Л.В. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Конструкция и прочность авиационных двигателей” для студентов специальности 1610.-М.: МГТУ ГА, 2007.

2. Чичков Б.А. Конструкция и прочность авиационных двигателей. Конструкция и прочность двигателей. Основы конструкции и прочности летательных аппаратов и двигателей. Основы конструкции авиационных двигателей: пособие по выполнению лабораторных работ.-М.: МГТУ ГА, 2013.

### Дополнительная

3. Конструкция и прочность авиационных двигателей. Под редакцией Л.П. Лозицкого. М.: "Воздушный транспорт", 1992.

4. Умушкин Б.П., Иванов В.П., Чичков Б.А. Методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине “Конструкция и прочность авиационных двигателей” для студентов специальности 13.03.- М.: МГТУ ГА, 1996.

5. Скубачевский Г.С. Авиационные газотурбинные двигатели. Конструкция и расчет деталей.-М.: Машиностроение,1981.

6. Хронин Д.В. Колебания в двигателях летательных аппаратов.-М.: Машиностроение, 1980.

7. Авиационные двухконтурные двигатели Д-30КУ и Д-30КП (конструкция, надежность и опыт эксплуатации) / Л.П.Лозицкий, М.Д.Авдошко, В.Ф.Березлев и др.- М.: Машиностроение, 1988.

8. Чичков Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД. Часть 1. Эксплуатационная повреждаемость рабочих лопаток. Пособие для студентов 5 и 4 курсов специальности 130300 всех форм обучения.-М.: МГТУ ГА, 2000.

9. Чичков Б.А. Рабочие лопатки авиационных ГТД (эксплуатация). Часть 2,3. Контроль работоспособности РЛ. Ремонт и замена рабочих лопаток в эксплуатации. Пособие для студентов 5 и 4 курсов специальности 130300 всех форм обучения; для аэродромной практики и дипломного проектирования. - М.: МГТУ ГА, 2002.