

ГАЖК «Ўзбекистон темир йўллари»  
Ташкентский институт инженеров железнодорожного транспорта

**«ПРОИЗВОДСТВЕННЫЕ ВИБРАЦИИ И  
МЕТОДЫ БОРЬБЫ С НИМИ»**

Учебно-методическое  
пособие

Ташкент-2010

УДК 629.468/2 (07)

В учебно-методическом пособии изложены вопросы исследования вибраций механизмов, машин и методы борьбы с ними.

Пособие предназначено для студентов, изучающих дисциплины: «Автоматизация производственных процессов», «Конструкция и динамика локомотивов».

Рис. 22, табл. 5, библиография 5 наим.

Авторы: С.А. Арустамян - к.т.н., доц. каф. «Локомотивы» -  
раздел I, II, III

Н.В. Жуленев - ст. преподаватель каф. «Локомотивы»  
раздел I, II.

Б.Т. Файзиев - к.т.н., доц. каф. «Локомотивы»  
раздел IV.

Рецензенты: 1. З.З. Исоков - Главный технолог УП  
«Узжелдорремаш»

2. Т. Абдусаттаров – доц. каф. «Локомотивы»

# I. «ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХОМЕТРА» (типа 7ТЭ)

**Цель работы:** Целью настоящей работы является ознакомление и изучение устройства тахометра 7ТЭ и порядка работы с ним.

## 1. Назначение тахометра

1.1. Тахометр электронный 7ТЭ (в дальнейшем – тахометр) предназначен для дистанционного измерения частоты вращения частей механизмов и машин, используемых в различных отраслях народного хозяйства, в частности, в обкаточно-тормозных испытательных станциях двигателей внутреннего сгорания, а также для контроля частот вращения сепараторов, турбин и т.п.

Тахометр состоит из (рис 1):

- 1) показывающего прибора (в дальнейшем – измеритель);
- 2) преобразователя первичного (в дальнейшем – преобразователь);

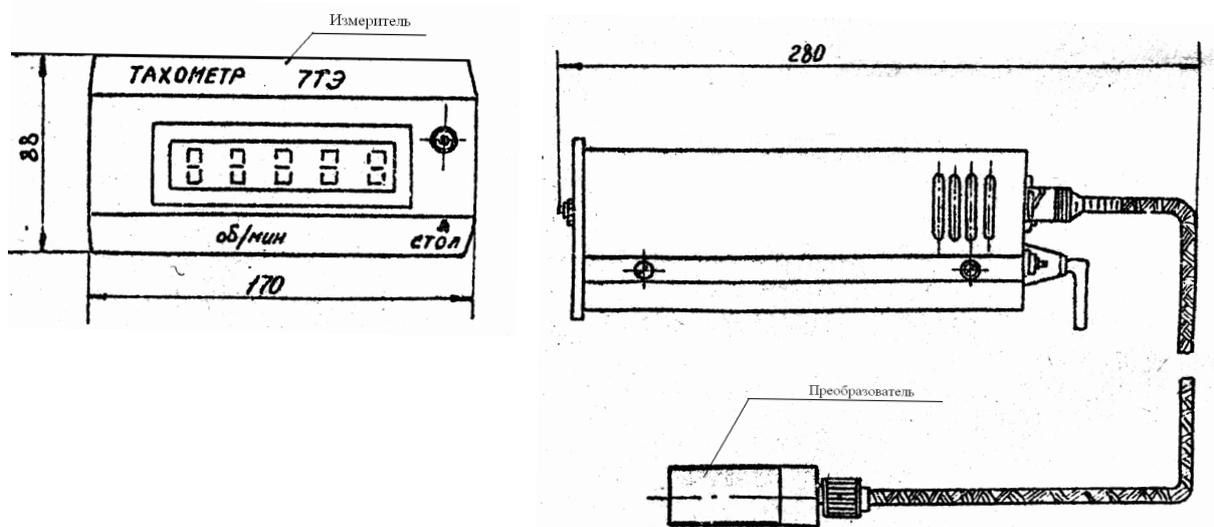


Рис.1.1. Общий вид тахометра

## 2. Технические характеристики

2.1. Предел допускаемой основной погрешности тахометра не более 0,02% от измеряемого значения.

2.2. Измеритель рассчитан на работу от сигнала отрицательной полярности любой формы или синусоидальной формы амплитудой от 2 до 50В.

2.3. Преобразователь обеспечивает на выходе контакта амплитуду сигнала отрицательной полярности не мене 2В.

2.4. Диапазон измерений тахометра должен быть от 2 до 9999 об/мин.

Диапазон измерений измерителя и соответствующие им времена измерений должны соответствовать таблице №1.

### Примечания:

1. Под временем измерения измерителя подразумевается время, в течение которого измеритель производит подсчет импульсов, поступающих на его вход.

2. Показания измерителя в об/мин численно равны значению подаваемой на вход частоты, умноженной на время измерения измерителя.

Таблица №1

Диапазон измерений		Время измерения, с	Показателя измерителя
Гц	Об/мин		
100-40000	10-1000	0,1	00010-04000
100-40000	20-8000	0,2	00020-08000
100-40000	30-12000	0,3	00030-12000
100-40000	50-20000	0,5	00050-20000
100-40000	60-24000	0,6	00060-24000
20-40000	20-40000	1,0	00020-40000
20-40000	40-80000	2,0	00040-80000
20-33333	60-99999	3,0	00060-90000
20-15000	100-75000	5,0	00100-75000
20-15000	120-90000	6,0	00120-90000
20-40000	2-4000	1,0	0002,0-4000

2.5. Преобразователь обеспечивает бесконтактное преобразование частоты вращения зубчатой детали из ферромагнитного материала (не входящей в комплект поставки),

закрепленной на контрольную раму, в последовательности импульсов, подаваемых на вход измерителя.

Выходная частота преобразователя не превышает 10000 Гц и определяется по формуле:

$$F = \frac{A \cdot K}{60},$$

где  $F$  – выходная частота преобразователя (Гц);

$A$  – частота вращения контролируемого вала (об/мин);

$K$  – число зубьев зубчатой детали.

Минимальная выходная частота преобразователя – 20 Гц.

Примечание: размеры зубьев должны быть не менее указанных на рис. 1.2а. Расстояние (зазор) между торцом наконечника и поверхностью зуба зубчатой детали в соответствии с рис. 1.2б должно быть не более 0,5 мм, при этом ось преобразователя должна быть направлена по радиусу к центру зубчатой детали. Удаление преобразователя от измерителя не более 10 м.

2.6. Индикация работоспособности тахометра осуществляется путем мигания знака «·» (точка), расположенного в правой части табло измерителя.

2.7. Для отделения десятичного разряда тахометр имеет возможность включения знака «·» (точка) перед последней индуцируемой на табло цифрой посредством распайки перемычки между 6 и 12 контактами разъема шифратор –  $Tx$ , расположенного на задней панели.

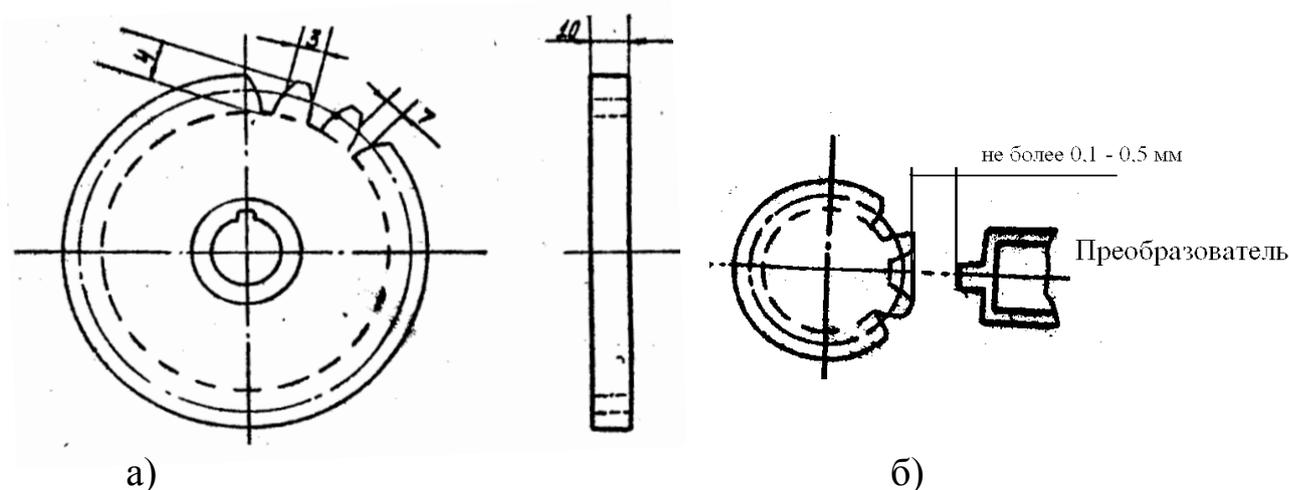


Рис.1.2. а) общий вид зубчатого колеса; б) расположение преобразователя

2.8. Тахометр обеспечивает фиксацию результата текущего измерения на время нажатия кнопки СТОП, расположенной на передней панели измерителя, либо дублирующей кнопки с нормально разомкнутыми контактами, не входящей в комплект поставки, подпаиваемой к контактам 12 и 8 разъема шифратор – Тх. Фиксация результата текущего измерения обеспечивается через время 4. Тизм.

2.9. Электрическое питание измерителя от сети переменного тока частотой  $50 \pm 1$  Гц напряжением  $220 \pm \frac{22}{33}$  В.

Электрическое питание преобразователя производится от схемы измерителя обеспечивающего напряжение минус 12В на контакте 1 относительно 3 разъема вход.

2.10. Чувствительность измерителя не более 2 В в диапазоне измерений от 20 до 40000 Гц.

2.11. Потребляемая мощность не более 12 В\*А.

2.12. Габаритные размеры, мм:

1) измерителя – 88\*170\*232

2) преобразователя Ø30\*80.

### 3. Устройство и принцип работы

3.1. Конструкция тахометра предусматривает возможность использования его в качестве как настольного, так и щитового прибора, который может быть установлен в щиты, стойки, шкафы приборные и т.д. Крепление тахометра в щите осуществляется с помощью резьбового гнезда, расположенного на задней панели измерителя.

3.2. Подключение преобразователя осуществляется со стороны задней панели измерителя к разъему ВХОД.

На задней панели расположены также:

1) Выключатель сетевого питания СЕТЬ;

2) Разъем шифратор – Тх для измерения времени от 0.1 до 6,0 с путем перепайки, а также для возможности поверки и измерений.

3.3. На лицевой панели измерителя расположены:

1) кнопка “СТОП” предназначенная для фиксации результатов измерений;

2) пятиразрядное табло для индикации результатов измерения.

3.4. Первичный преобразователь (см.рис.1.1) выполнен в виде магнитно-электрического преобразователя с усилителем переменного

тока. При вращении зубчатого диска, из ферромагнитного материала, укрепленного на валу контролируемого объекта, в обмотке первичного преобразователя наводится переменная Э.Д.С., которая усиливает встроенным в первичный преобразователь усилителем. Частота выходных импульсов пропорциональна частоте вращения зубчатого диска, следовательно, и частота вращения вала контролируемого объекта.

3.5. При выбранном времени измерения  $T_{изм.}$  и числе зубьев зубчатого диска  $K$  на цифровом пятизарядном табло индицируется результат измерения в об/мин.

При подаче напряжения минус 24 В в течение времени нажатия кнопки  $5B \ 3$  (кнопки СТОП, расположенной на передней панели измерителя) на вход СТ блока обработки сигналов, происходит запоминание результата текущего измерения с одновременным прекращением мигания знака «.» (точка). После отпускания кнопки СТОП начинается новый цикл измерений, и информация на табло изменяется в соответствии с измерениями.

#### **4. Подготовка к работе**

4.1. Разметка для крепления тахометра в щите и способ крепления приведены на рис.1.3.

4.2. Сетевой тумблер привести в выключенное положение.

4.3. Проверить наличие надежно подключенного к клемме провода заземления.

4.5. Подсоединить преобразователь к измерителю с помощью разъема ВХОД, расположенного на задней панели измерителя.

4.6. Включить сетевой кабель тахометра в сеть и перевести сетевой тумблер СЕТЬ в положение ВКЛ. При этом на табло должны индицироваться 00000, в правой части табло должен мигать знак «.» (точка).

Примечание: перед каждым переключением диапазонов измерения необходимо выключить тумблер СЕТЬ.

#### **5. Порядок работы**

5.1. Перед началом работы необходимо убедиться в работоспособности тахометра: свечение цифровых индикаторов включенного тахометра и мигание знака «.» (точка) в правой части табло с периодом  $2 * T_{изм.}$ , свидетельствует об исправности прибора.

5.2. При неподвижном контролируемом вале на цифровом табло измерителя, не позже чем через время, равное  $2 \cdot T_{изм}$ , после включения на цифровом табло должны индуцироваться нули (00000).

5.3. При вращении контролируемого вала на цифровом табло должно индицироваться число, соответствующее значению:

$$N = \frac{A \cdot K \cdot T_x}{60},$$

где: N – показание измерителя (об/мин);

A – частота вращения контролируемого вала (об/мин);

K – число зубьев зубчатой детали.

$T_x$  – время измерения (с), с учетом основной погрешности измерителя по п 2.1.

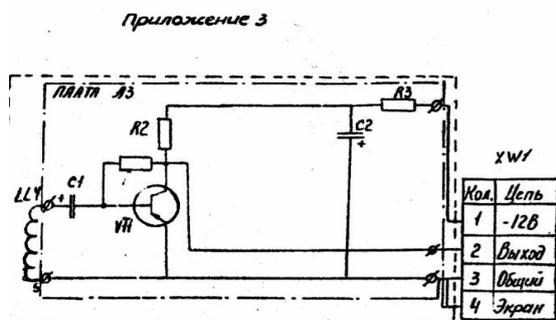


Рис 1.3.

преобразователь первичный  
Схема электрическая принципиальная.

Поз. обознач.	Наименование	Кол.	Примечание
Конденсаторы К50-16 ОЖО.464.НТУ			
C1	К50-16 16В-30 мкФ	1	
C2	К50-16 16В-10 мкФ	1	
LL	Катушка 435.760.078	1	
Резисторы ГОСТ 7113-72			
R1	МЛТ-0,125-100к ± 10%	1	
R2	МЛТ-0,125-5,6к ± 10%	1	
R3	МЛТ-0,125-300 Ом ± 10%	1	
VT1	Транзистор КТ3107А аМД.336.170ТУ	1	
XW	Вилка ОНЦ-РГ-09-414В13ГР0.364.082ТУ	1	

## 6. Содержание отчёта

Отчёт по работе должен содержать:

1. Схему тахометра с первичным преобразователем (рис.1.1, рис.1.2.).
2. Электрическую схему принципиальную (рис. 1.3).
3. Выводы и определения по результатам исследований.

## **II. «ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ВИБРОМЕТРА» (типа ВВМ-201)**

### **1. Цель работы**

Целью настоящей работы является ознакомление и изучение конструкции виброметра ВВМ-201 и преобразователя пьезоэлектрического виброизмерительного ДН-3-М1.

Виброметр ВВМ-201 – предназначен для измерения вибрации (виброскорости и виброускорения) работающего оборудования в лабораторных и производственных условиях. Используется в комплексе с преобразователем ДН-3-М1, с помощью которого производится счет информации с вибрируемых тел (агрегата, рамы, оборудования).

Виброметром ВВМ-201 поступающий сигнал с вибропреобразователя согласуется, усиливается, нормируется, фильтруется, интегрируется, преобразуется, измеряется и выводится на устройство индикации в виде числа измеряемого параметра.

Виброметр ВВМ-201 соединяется для совместной работы с преобразователем ДН-3-М1 соединительным кабелем по схеме электрической общей, показанной на рис 2.

### **2. Рабочие условия применения**

Температура окружающего воздуха от  $-10$  до  $+50^{\circ}\text{C}$ ;  
Относительная влажность окружающего воздуха 90% при  $+30^{\circ}\text{C}$ ;  
Атмосферное давление 86-106 кПа (650-800мм.рт.ст.);  
Частота вибрации не более 30Гц;  
Максимальное ускорение  $10\text{м/с}^2$ .

### **3. Технические характеристики**

Полоса частот измерения:  
виброускорения от 2 до 4000Гц;  
виброскорости от 2 до 2800Гц.  
Диапазон измерений:  
виброускорения от 0.1 до  $1000\text{м/с}^2$ ;

виброскорости от 0.5 до 1000мм/с.

Электропитание от химических источников тока: 2 элементов «Крона».

Время установления рабочего режима не более 1 мин.

Потребляемая мощность (при  $U_H = \pm 9В$ ) не превышает 180 мВ·А.

-Величина акустического шума с уровнем звукового давления 100дБ в полосе частот 125÷8000Гц, не влияющая на нормальную работу виброметра.



Рис. 2.1. Виброметр ВВМ-201. Общий вид.

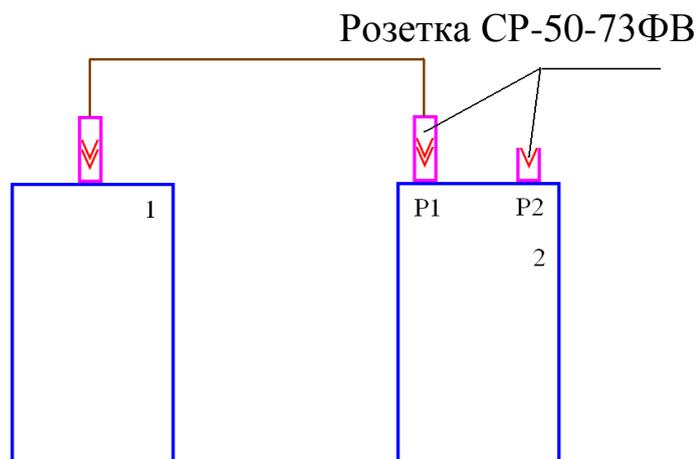


Рис. 2.2. Виброметр ВВМ-201. Схема электрическая структурная.

- 1- преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1;
- 2- прибор измерительный ВВМ-201.

Воздействие внешнего магнитного поля напряженностью 80А/м частотой 50Гц – не более 0.05% Ахм<sup>-1</sup>.

Время наработки на отказ с учетом ГО-15000ч.

#### 4. Устройство

Корпус измерительного прибора имеет форму параллелепипеда (Рис. 2.1), изготовленного из пластика АБС-2020-32 темно-серого цвета с передней панелью управления прибором. Корпус прибора разделен на 3 отсека. В первом отсеке расположены печатные платы устройства: усилительного, управления и индикации. Во втором отсеке (закрывающемся крышкой) расположены: вибропреобразователь, запасные части, принадлежности. В третьем батарейном отсеке, закрываемом отдельной крышкой, размещаются элементы питания. Имеется ремень, закрепленный на корпусе для переноски и работы с виброметром в производственных условиях.

На передней панели прибора расположены (Рис. 2.1): индикатор цифровой жидкокристаллический;

переключатели “ВКЛ”; 

“режим” а/v; τ, s 1/10;

кнопка “Диапазон” “< >”.

На задней панели расположены:

розетки 

кнопка КЛБ.

На левой боковой панели выведена ось калибровочного резистора с обозначением на верхней панели знака « Δ ».

#### 5. Подготовка к работе

Подготовка к работе производится в следующей последовательности:

распаковать прибор, проверить его целостность;

выдержать прибор в течении 24 часов при температуре 20±5<sup>0</sup>С, если он длительное время находится под воздействием отрицательных температур;

сместить вверх подвижную крышку, закрывающую переднюю панель прибора;

проверить механическую исправность элементов управления и разъемов;

открыть отсек питания и подключить элементы питания с соблюдением полярности контактов;

вынуть из отсека, расположенного на верхней панели прибора вибропреобразователь и соединить его через шнур (кабель) с розеткой, обозначенной знаком “” на верхней панели прибора;

включить прибор кнопкой “ВКЛ”;

включить режим контроля напряжения питания с помощью кнопки, обозначенной знаком “” при этом загорается цифровой индикатор показания которого должно быть не менее 07.60В;

при показании меньше 07.60В необходимо заменить элементы питания прибора, т.к. батареи разрядились;

после замены элементов питания необходимо вновь проверить напряжение питания, каждое должно быть не менее 07.60В.

**Примечание:** Подготовка к работе производится предварительно проверенного прибора, который подвергается периодической проверки органами ведомственного прибора не реже 1 раза в год.

## 6. Порядок работы

После подготовки проверенного прибора к работе (см. выше) следует:

### **Произвести электрическую калибровку виброметра, для чего:**

Кнопку “Режим a/v “ установить в положение “a”(ускорение), т.е. кнопку “отжать”;

Кнопку  $\tau$ , s 1/10 установить в положение I (“отжать”) кнопку;

Кнопками ДИАПАЗОН “< >” установить диапазон 10, что соответствует положению точки во втором разряде индикатора;

Кнопку КЛБ на задней панели привода нажать и установить резистором “ $\Delta$ ” показание цифрового индикатора 7.4 (или 7.74 - указанное в п.11.3 паспорта прибора с.28) с учетом входящего в комплект вибропреобразователя ДН-3-М1 за N6731.

## 7. Измерение виброускорения

Вибропреобразователь ДН-3-М1 устанавливается на исследуемый объект (тело) с помощью магнитной присоски после установки и достаточного крепления вибропреобразователя на объекте;

Манипулируя кнопками ДИАПАЗОН “< >”, установить требуемый диапазон измерения и произвести отсчёт (снятие показания) с индикатора с учетом положения светящейся точки. При индикации одновременно четырех точек или высвечивании единицы в первом (старшем) разряде и отсутствии индикации в остальных трех разрядах необходимо перейти на менее чувствительный предел измерения.

**Примечание:** На виброметре имеется 4 предела измерения: 1000, 100, 10, 1. При включении питания прибора автоматически включается наибольший предел измерения “1000”, что индицируется точкой в крайнем правом разряде индикатора.

Для перехода на другие пределы измерения необходимо нажать в течении определенного времени кнопки ДИАПАЗОН “< >”. В зависимости от времени нажатия кнопки автоматически происходит переход к меньшим пределам диапазона измерения, что индицируется точкой в соответствующих разрядах индикатора.

При подобранном пределе измерений считывается и записывается показание индикатора в таблицу измерений виброускорений с указанием адреса точки, в которой производится измерение виброускорения.

После окончания измерений кнопкой ВКЛ выключить прибор.

## 8. Измерение виброскорости

Вибропреобразователь ДН-3-М1 устанавливается на исследуемый объект (тело) одним из возможных способов в соответствии с требованиями паспорта на вибропреобразователь (см. краткое описание вибропреобразователя ДН-3-М1 ниже в настоящем приложении).

После установки и убеждения в достаточном креплении вибропреобразователя на объекте:

Кнопку РЕЖИМ a/v установить в положение «V», т.е. нажать на нее;

Манипулируя кнопками ДИАПАЗОН “< >” установить требуемый диапазон измерения и произвести отсчёт (снятие

показания) с индикатора с учетом положения светящейся точки. При индикации одновременно четырех точек или высвечивании единицы в первом (старшем) разряде и отсутствии индикации в остальных трех разрядах необходимо перейти на менее чувствительный предел измерения;

При измерении уровней вибраций с частотными составляющими менее 10Гц включить постоянную времени 10 нажатием кнопки  $\tau$ ,  $s$  1/10;

При подобранном пределе измерений считывается и записывается показание индикатора в таблицу измерений виброскоростей с указанием адреса точки, в которой производится измерение виброскорости;

После окончания измерений кнопкой ВКЛ выключить прибор.

## **9. Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1**

### **9.1. Назначение**

Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3-М1 (в дальнейшем изложении – вибропреобразователь, сокращенно ВП) предназначен для преобразования механических колебаний в электрические сигналы, пропорциональные ускорению и скорости колеблющегося исследуемого объекта (тела).

ВП используется совместно с виброметром ВВМ-201 для измерения параметров вибрации в полосе частот до 4800Гц в заводских, производственных и лабораторных условиях.

ВП относится к невосстанавливаемым изделиям, ремонту не подлежит, а потому требует очень бережного, осторожного и внимательного отношения к его сохранности при проведении исследований. Особенно при креплении его к исследуемым объектам, при замере параметров горизонтальных колебаний с использованием способов его крепления и установки предлагаемых в паспорте ВП, а также магнитной присоски, не предусмотренной паспортом.

### **9.2. Подготовка ВП к работе и установка его на исследуемый объект.**

Магнитная присоска (МП) представляет собой цельный металлический цилиндр с впрессованным в него кольцевым магнитом, который с помощью имеющегося в его основании винта

M5 вворачивается в резьбовое отверстие основания ВП и в таком виде устанавливается на исследуемый объект.

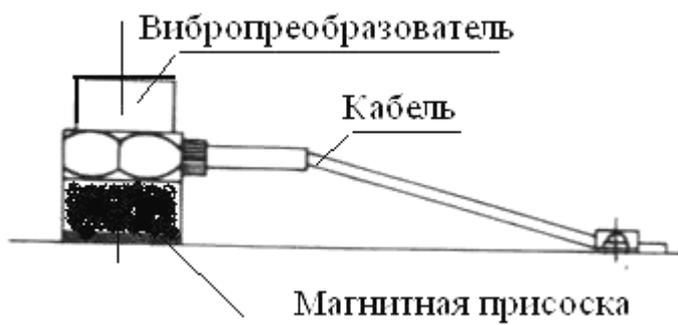


Рис. 2.3. Установка вибропреобразователя на магнитной присоске.

До проведения измерений в намеченных (методикой) точках поверхность тела тщательно очищается от налипшей пыли (грязи), масла. Протирается ветошью. Зачищается наждачной бумагой и вновь тщательно протирается ветошью со стиранием возможного остатка слоя масла, в целях увеличения сил трения между основанием ВП и исследуемым объектом (телом).

### 9.3. Пьезоэлектрические датчики — пьезоэлектрические преобразователи

Работа пьезоэлектрического преобразователя - датчика основана на использовании прямого и обратного пьезоэффекта. Прямой пьезоэффект заключается в том, что некоторые вещества с кристаллической структурой при действии механических сил могут электрически поляризоваться. Пьезоэффект присущ кристаллам с ионными решетками. При механических воздействиях происходит деформация элементарных ячеек кристалла и смещение положительных и отрицательных ионов относительно друг друга, что ведёт к изменению электрических моментов и к поляризации кристалла в целом. С изменением деформации сжатия на деформацию растяжения направление поляризации меняется на противоположное.

Пьезоэффект присущ многим веществам. Он выражен наиболее сильно у кварца  $\text{SiO}_2$ , сегнетовой соли  $\text{MgK}_2\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$  (сокращённо обозначается KNT), титанита бария  $\text{BaTiO}_3$  и т.д. Широкое распространение находят искусственные текстуры и керамика, состоящие из указанных веществ и различных присадок к ним.

Для качественной оценки пьезоэффекта учитываются следующие величины: напряжённость электрического поля  $E$ , поляризация  $P$  с упругим напряжением  $\sigma$  и величиной деформации  $h$ .

Из кристаллических тел, обладающих пьезоэффектом, наибольшим постоянством эффекта, мало зависящим от внешних условий, обладает кварц.

Например, с повышением температуры до  $300^{\circ}\text{C}$  чувствительность пьезоэффекта не превышает нескольких процентов. Полное исчезновение пьезоэффекта происходит при  $575^{\circ}\text{C}$ , а плавится кварц только при температуре около  $1700^{\circ}\text{C}$ . Кварц почти не растворим в воде, поэтому на него не действует и влажность окружающей среды.

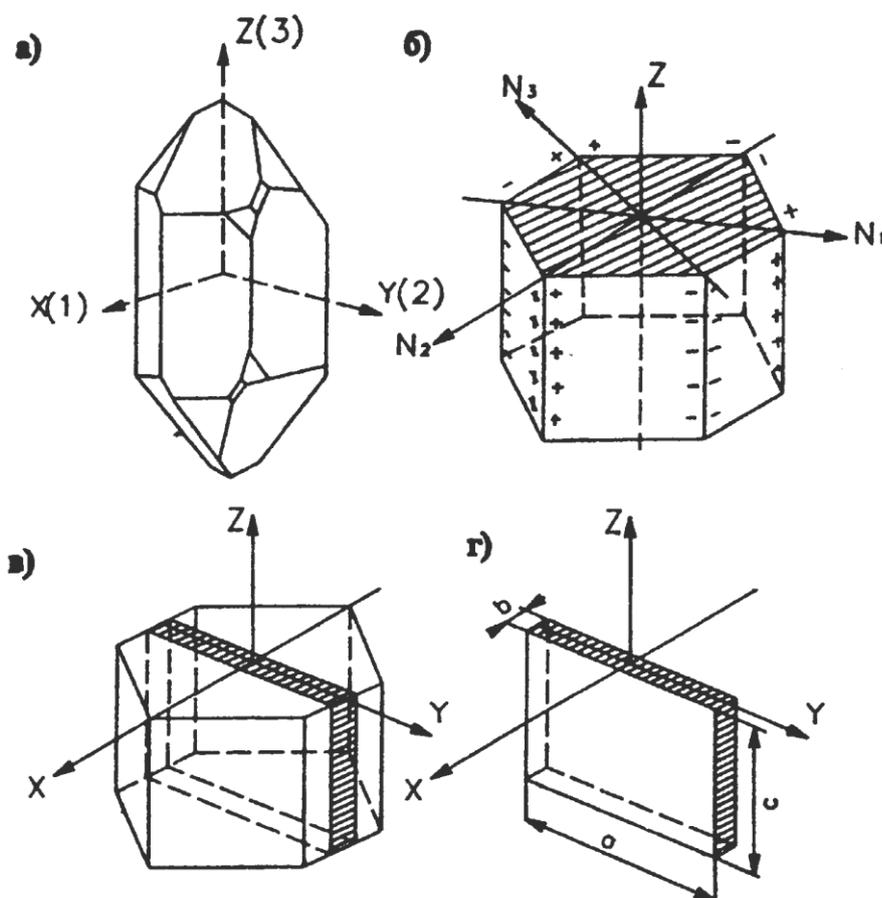


Рис. 2.4. Кристаллический кварц:

- а) естественная огранка;
- б) нормальное сечение кристалла:  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$  - электрические оси;
- в) образование X-среза;
- г) вырезанная пластинка

На рис. 2.4, а показан кристалл кварца  $\text{SiO}_2$  с естественной огранкой, представляющий собой шестигранную призму. При сжатии такого кристалла в направлении любой из трёх прямых  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $N_3$ , соединяющих в нормальном сечении пару противоположных вершин шестиугольника (электрические оси кристалла кварца), происходит электризация граней (рис. 2.4, б). С изменением сжатия на растяжение электрические заряды меняют знаки на обратные (рис. 2.4). Для практических целей из естественного кристалла вырезается пластинка в форме прямоугольного параллелипипеда (рис. 2.4, в,г). Ось  $X$ , перпендикулярная к плоскости пластинки, совпадает с любой из электрических осей  $N_1$ ,  $N_2$  или  $N_3$ ; ось  $Z$  совпадает с продольной осью кристалла, проходящей через вершины (оптическая или нейтральная ось); ось  $Y$  проходит перпендикулярно двум противоположным граням призмы так, что вместе с осями  $X$  и  $Z$  образуется правая прямоугольная система координат.

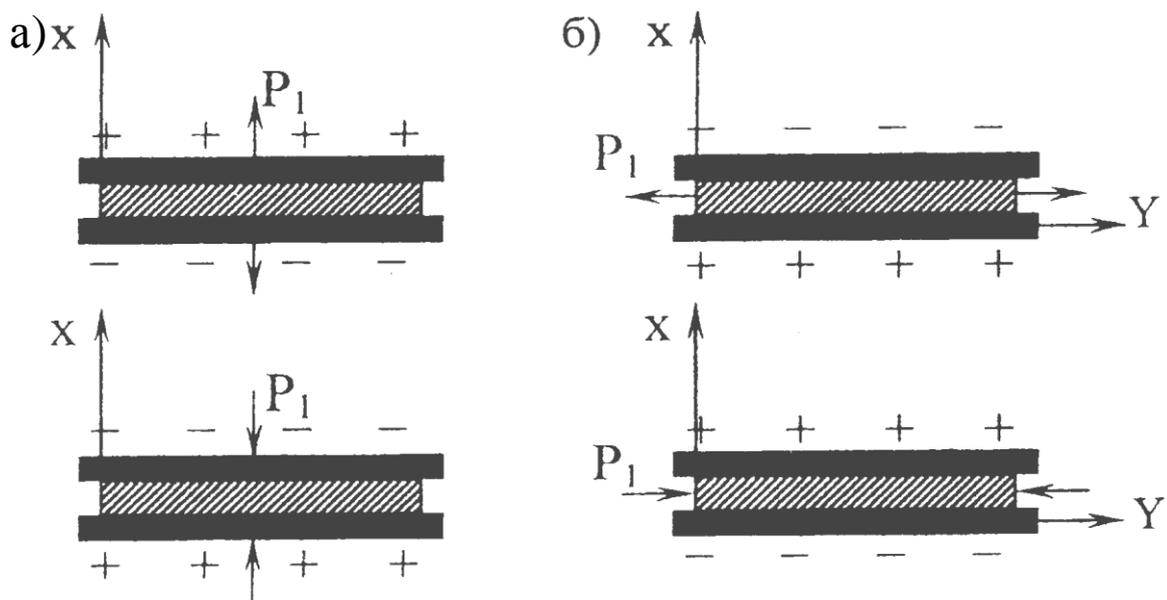


Рис. 2.5. Электризация пластинки при действии силы:  
а) вдоль оси  $X$ ; б) вдоль оси  $Y$

При действии на пластинку  $X$ -среза кварца растягивающей силы (рис 2.5)  $P_1$ , направленной вдоль оси  $X$ , на перпендикулярных к этой оси гранях параллелепипеда появляются равные и противоположные по знаку заряды  $+q_1$  и  $-q_1$ , причём их абсолютная величина прямо пропорциональна действующей силе и не зависит от размеров (площади и толщины) вырезанной пластинки:

$$q_1 = d_{11} \cdot P_1 \quad (1)$$

где  $d_{11}$  — пьезомодуль и другие пьезоэлектрические величины.

Пьезоэффект у кварца очень слабый, и это ограничивает практические возможности его применения. Кварцевые пьезоэлементы применяются для измерения больших ускорений и в эталонных устройствах.

Особый интерес представляют пьезоэлементы из титанита бария  $BaTiO_3$ , исследованной и внедрённой в практику в значительной мере благодаря трудам советских и российских учёных.

Так как выращивание крупных кристаллов титанита бария представляет большие трудности, то обычно используется керамика, получающаяся спеканием мелких кристаллов с цементирующим веществом. Образцы подвергаются предварительной поляризации в постоянной электрическом поле напряжённостью несколько киловольт на сантиметр. Electrodes наносятся вжиганием серебра при изготовлении керамики.

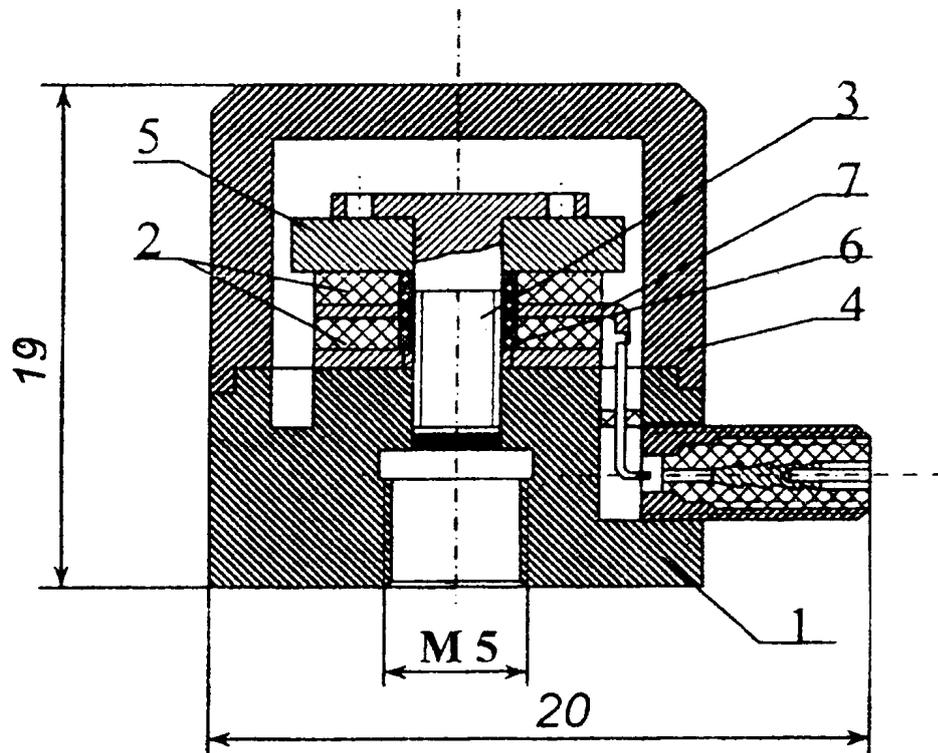


Рис. 2.6. Вибропреобразователь ДН-4-М1:  
1- основание; 2 - пьезоэлемент; 3 - винт; 4 - крышка;  
5 - инерционная масса; 6 - втулка; 7 - контакт

Рассмотрим устройство стандартного пьезодатчика (рис. 2.6 и 2.7).

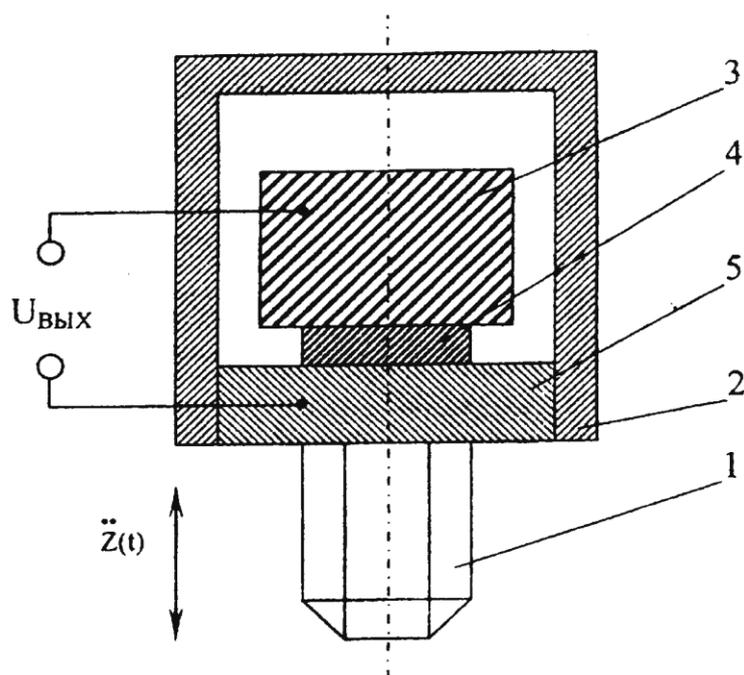


Рис. 2.7. Схема пьезоэлектрического датчика.

Различные добавки к титаниту бария, например,  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{U}_2\text{O}_3$ ,  $\text{PbTiO}_3$  и др., образуют составы (композиции) керамики с повышенным пьезоэффектом и большой устойчивостью физических свойств к различным внешним воздействиям (например, при больших перепадах температуры).

Удовлетворительные физические свойства, а также простота и дешевизна изготовления способствовали тому, что для целей измерения параметров вибрационных процессов машин различные по химическому составу керамики титанита бария за последние годы полностью вытеснили все остальные пьезоматериалы для изготовления пьезодатчиков (рис. 2.6).

На рис. 2.7 основание 5 присоединяется к исследуемому объекту при помощи шпильки 1. На пьезоэлемент 4, имеющий форму диска, крепится инерционная масса 3, датчик закрывается крышкой 2. При вибрациях в вертикальном направлении на обкладках пьезокристалла появляется электрическое напряжение  $U_{\text{ВЫХ}}$ , пропорциональное ускорению  $z(t)$ .

Возникшая разность потенциалов, таким образом, пропорциональна величине ускорения, так что  $U_{\text{ВЫХ}} = K \cdot Z(t)$ , где  $K$  -

коэффициент чувствительности пьезодатчика, поэтому пьезодатчики не должны превышать собственные частоты пьезокристалла. Так как жёсткость пьезоэлемента достаточно велика, то собственные частоты его имеют величину порядка десятков килогерц. В таблице 1.1 приведены данные некоторых наиболее распространённых датчиков этого типа.

Технические данные датчиков

Таблица 2.1

Характеристика датчика	Типы датчиков			
	ИС-312	ПД-2	Ч313	ДН-4М1
Чувствительность, мВ/g	0,5-1,5	30-50	60	1
Частотный диапазон, Гц	50-40000	до 10000	до 70000	до 12600
Собственная частота, кГц	100	15	60	42
Вес, г	65	31	13	20

### III. «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ»

**Цель работы:** изучить вибрационные характеристики машин и механизмов, определить параметры вибраций и эффективность виброизоляции.

#### Общие сведения

Вибрациями называются колебания (механические), при которых кинетическая энергия переходит в упругую, а упругая в кинетическую, протекающие с сравнительно большой частотой.

Механическим колебанием тела (детали, узла, агрегата, дизеля, корпуса компрессора и т.д.) называют повторяющееся прохождение его через одно и то же положение.

Колебательные процессы в физике и технике подразделяются на два класса.

1. Периодические;
2. Непериодические;

Периодическим называют такой процесс, при котором в любой момент времени, через определённый отрезок времени  $T$  имеет то же значение. Математически периодическая функция  $f(t)$  с периодом  $T$  при любом значении  $t$  имеет вид:

$$f(t + T) = f(t)$$

Непериодическая же функция, та, которая не удовлетворяет этому условию.

Периодическая функция (полигармоническая) может иметь вид, см. рис 3.1.

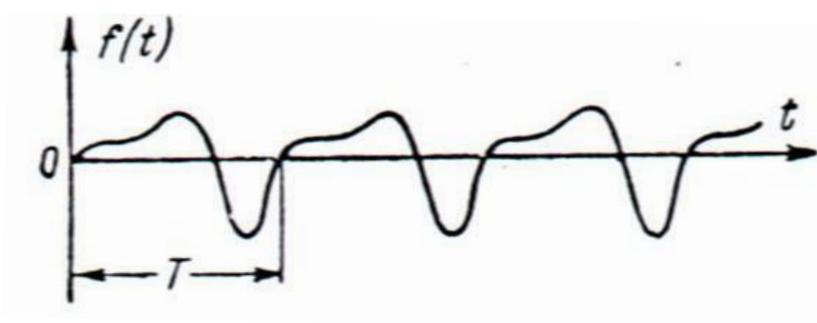


Рис. 3.1.

Непериодические функции могут быть представлены, см. рис. 3.2, 3.3.

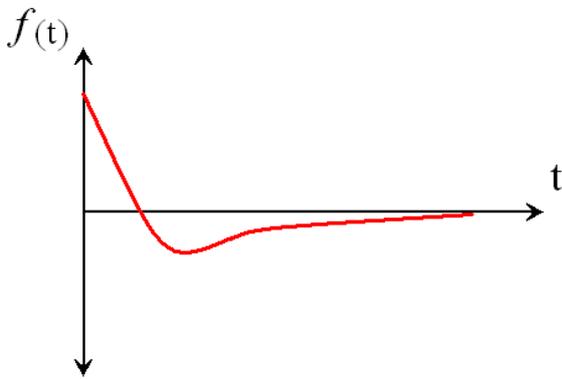


Рис. 3.2.

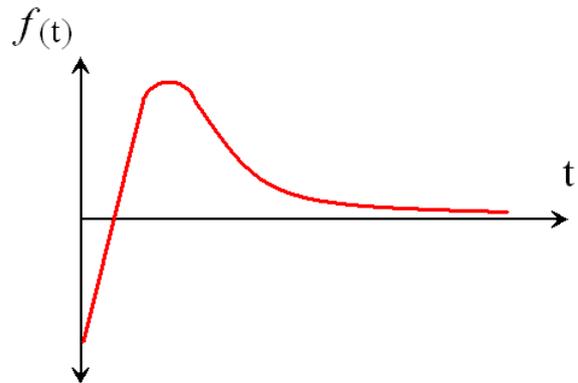


Рис. 3.3.

В представленной функции (рис. 3.1) форма через одинаковое время  $T$  повторяется бесконечно.

Интервал  $T$  называется периодом такого колебания, а число таких периодов в течении 1с – основной частоты  $f$ .

$$f = \frac{1}{T}, \text{ с}^{-1}$$

где  $f$  также называют циклической частотой, Гц.

В отличие от частоты  $f = \frac{2\pi}{T}$  различают круговую частоту:

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi n}{60} = \frac{\pi n}{30}, \text{ рад/с}$$

где  $n$  – частота вращения вала, об/мин.

Другими важными характеристиками колебаний являются: амплитуда колебаний  $A$ , представляющей собой величину наибольшего отклонения от колебания равновесия; смещение  $X$ , мм (или скорость  $V$ , мм/с, и ускорение  $a$ , мм/с<sup>2</sup>).

Амплитуда смещения используется в качестве критерия, для ограничения вибрации агрегатов и фундаментов; амплитуда колебательной скорости поверхности характеризует уровень

возникающего шума; амплитуда ускорения определяет действующие динамические силы.

Математическим методом доказывается, что периодические колебания сложной формы (рис. 3.1) всегда можно представить в виде суммы периодических (гармонических) колебаний – синусоид или косинусоид с периодами  $T$ ,  $T/2$ ,  $T/3$  и т.д., то есть с частотами кратными основной частоте  $f$ ,  $f_2$ ,  $f_3$ .

Эти составляющие называются гармоническими, нумеруются в порядке возрастания частоты: первая с основной частотой колебания  $f$ , вторая – с удвоенной частотой  $2f$ , третья -  $3f$  и т.д.

Таким образом, периодические полигармонические колебания можно отождествлять с суммой синусоидальных или косинусоидальных колебаний:

$$f(t) = A_0 + A_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + A_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots,$$

где  $A_1, A_2, A_3 \dots$  – амплитуды первой, второй, третий гармоник и т.д.;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$  - их начальные фазы;  $\omega = 2\pi f$  - основная частота, выраженная в радианах в секунду;

$A_0$  – постоянная составляющая, например, тока или напряжения, в отсутствии  $A_0$  принимают её равной нулю.

Разложение периодической полигармонической функции (рис.3.1) на составляющие гармоники в виде функции (1) называют рядом Фурье. Для упрощения записи ряда Фурье функцию (1) представляют:

$$f(t) = \sum_{k=0}^{\infty} A_k \cdot \sin(k\omega t + \varphi_k) \quad (2)$$

Знак  $\infty$  - показывает, что этот ряд продолжается до бесконечности.

Теоретически для точного отображения любого периодического колебания необходимо учитывать любую его гармонику со сколь угодно высокой частотой.

Однако на практике не существует электрических цепей, которые могли бы формировать или пропускать электрические колебания без ослабления энергии в области достаточно высоких частот.

Поэтому реальный сигнал можно описать с помощью конечного числа гармоник, скажем до  $m$ .

Для чёткого осмысления разложения периодических (полигармонических) колебаний сложной формы рассмотрим пример, см.рис.3.4 а, б, в, г, д, где представлены: график сложной формы (3.4. а) и всего три гармоники (б, в, г), сумма которых (д) удовлетворительно совпадает с заданным колебанием (а).

Из этого рисунка видно, что пренебрежение высшими гармониками приводит к сглаживанию изломов в наиболее заострённых участках формы сложного колебания см. рис. 3.4 д.

Совокупность значений амплитуд гармоник ( $A_1, A_2, A_3 \dots$ ) называется амплитудно–частотным спектром данного колебания, а совокупность значений начальных фаз ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$ ) – фазочастотным спектром. Сигналы различной формы имеют разные спектры, т.е. не одинаковые значения амплитуд и фаз гармоник.

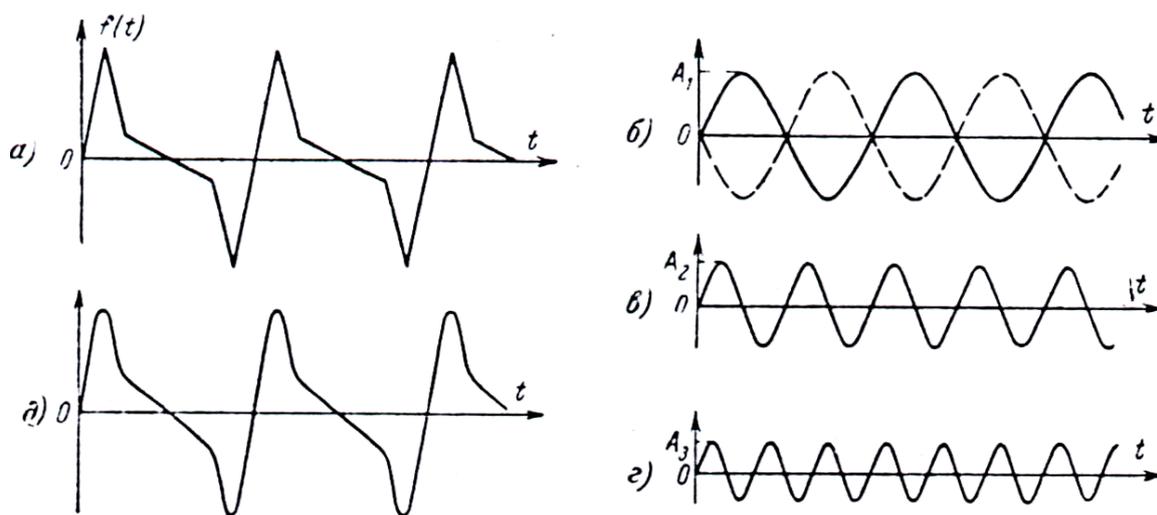


Рис. 3.4

Представление периодического сигнала (а) в виде набора гармонических составляющих (б, в, г) и сумма первых трёх гармоник (д)

Из этого рисунка видно, что пренебрежение высшими гармониками приводит к сглаживанию изломов в наиболее заострённых участках формы сложного колебания см. рис. 3.4 д.

Совокупность значений амплитуд гармоник ( $A_1, A_2, A_3 \dots$ ) называется амплитудно–частотным спектром данного колебания, а совокупность значений начальных фаз ( $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$ ) – фазочастотным спектром. Сигналы различной формы имеют разные спектры, т.е. не одинаковые значения амплитуд и фаз гармоник.

Частотные спектры могут быть представлены линейными диаграммами спектров, см.рис. 3.5 а, б, здесь каждая линия (рис. 3.5 а)

обозначает гармонику с частотой, указанной на оси абсцисс, длина линии на диаграмме определяет амплитуду  $A_k$  соответствующих гармоник.

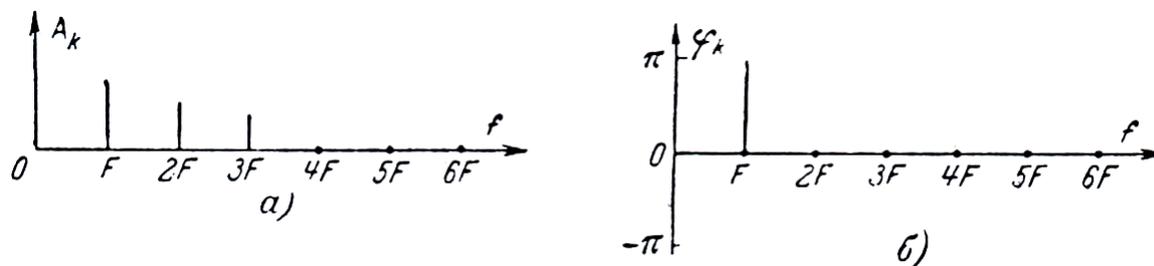


Рис. 3.5

Зависимость амплитуд (а) и фаз (б)

На рис.3.5 б – представлен фазочастотный спектр колебания. По степени сложности систем колебания различаются:

1. Колебания в системах с одной степенью свободы;
2. Колебания в системах со многими степенями свободы.

Вибрационные процессы можно классифицировать, как детерминированные и недетерминированные (случайные).

Для изучения детерминированных процессов (вибраций) достаточно применить классические методы математической физики. К таким процессам относятся, например, колебания несбалансированных масс вращающихся агрегатов локомотива: двигателей, компрессоров электродвигателей и т.д.

К недетерминированным процессам относятся процессы, которые при неоднократном воспроизведении не дают идентичных результатов. Эти процессы нельзя воспроизвести при заданных условиях, а течение их во времени заранее предсказать нельзя. К ним относятся вибрационные процессы, вызываемые взаимодействием пути и подвижного состава; колебания неподрессоренных частей тележек, осей колёсных пар, букс, колебания кузова локомотива.

Детерминированные процессы можно разделить на периодические и непериодические.

Периодические процессы, в свою очередь, делятся на гармонические и полигармонические, а непериодические на квазипериодические и переходные.

Гармонические процессы могут быть описаны следующим выражением:

$$f(t) = A_0 \cdot (\sin \cdot 2\pi ft + \varphi)$$

где  $A_0$  – амплитуда;

$\varphi$  – начальная фаза;

$f(t)$  – мгновенное значение функции.

Полигармонические процессы можно представить рядом Фурье

$$f(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \cos \cdot (2\pi f_k t + \varphi_k),$$

где -  $A_0 = \frac{a_0}{2}$ ;  $A_k = \sqrt{a_k^2 + b_k^2}$ ;  $\varphi_k = \arctg \cdot \frac{b_k}{a_k}$ ;  $k = 1, 2, 3 \dots$

## 2. Типы колебаний

Колебания разделяются на четыре типа

- 1). собственные колебания;
- 2). вынужденные колебания;
- 3). параметрические колебания;
- 4). автоколебания.

1. **Собственные колебания** происходят в изолированной системе после внешнего толчка (возмущения). Характер колебательного процесса в основном определяется только внутренними силами системы, зависящей от физического строения системы.

Необходимая энергия доставляется извне при возбуждении колебаний.

2. **Вынужденные колебания** происходят под действием заданных внешних периодических сил, которые действуют независимо от колебаний в системе.

Характер процесса определяется не только свойствами системы, но и существенно зависит от внешней силы. Энергия колебания доставляется источником, дающим внешнюю силу.

3. **Параметрические колебания** отличаются от вынужденных родом внешнего воздействия.

При вынужденных колебаниях извне задана сила или какая-либо другая величина, совершающая колебания, а параметры самой системы остаются постоянными.

*Параметрические колебания вызываются периодическим изменением какого - либо физического параметра системы (например, массы).*

4. **Автоколебания** – периодические движения, которые возникают в системе в отсутствии внешнего периодического воздействия.

Характер колебаний определяется устройством системы.

Источник энергии, покрывающей потери энергии на тепло при колебаниях, обычно составляет неотъемлемую часть системы.

Колебания подразделяются на:

1. Линейные системы – колебания совершаются в линейных системах, в которых основной закон колебаний выражается линейным дифференциальным уравнением;

2. Нелинейные системы.

*Анализ нелинейных колебаний системы очень усложняется отсутствием регулярных методов решения нелинейных дифференциальных уравнений. В отличие от нелинейных систем, при анализе колебаний линейных систем по частым процессам можно сделать вполне определенные заключения о всех возможных в данной системе процессах, а для процессов в нелинейных системах этого сделать нельзя.*

*Все автоколебательные системы являются нелинейными.*

### **3. Источники вибрации**

Технические устройства и процессы, генерирующие колебательную энергию в виде механических колебаний и ударов, называют источниками вибрации.

Так, например, источниками вибрации на тепловозе являются: силовая установка – дизель, вспомогательное оборудование – тормозной компрессор, вентиляторы холодильника, редукторы, электрические машины и т.д.

Интенсивность колебаний каждого из источников зависит от особенностей конструкции, технологии изготовления, технического состояния, свойств соответствующих устройств и режима работы. К источникам вибрации также относится промышленное оборудование

– станки, технологические агрегаты, используемые на локомотиворемонтных и вагоноремонтных предприятиях железнодорожного транспорта.

Сильные вибрации мешают нормальной работе машин и механизмов, снижают точность станков и агрегатов, сокращают срок их службы, ухудшают качество обработки, иногда вызывают их разрушение.

Таким образом, борьба с вибрациями на производстве является важной технической, а также санитарно – гигиенической задачей.

#### **4. Вибрации и их влияние на организм человека**

Различают общие и локальные вибрации. Общие вибрации вызывают колебания всего организма, а локальные лишь отдельных его частей (например, рук при работе с ручным механизированным инструментом).

Наиболее чувствительны к воздействию вибрации нервная и сердечно-сосудистая система, а также костно-суставный аппарат.

Длительное воздействие вибрации может привести к трудно излечимой вибрационной болезни – стойкому нарушению физиологических функций организма.

Особенно опасны общие вибрации с частотой 3...30 Гц. В этом диапазоне частот лежат собственные частоты большинства внутренних органов, головы и конечностей человека.

При совпадении их с частотой возмущающей силы колебания происходят в резонансном режиме. Такие частоты называются **резонансными**. Санитарные нормы общей и локальной вибрации на рабочих местах в РУз изложены в работе «СанПиН №0122-01», действующая с 29.10.2001г. Однако, эти санитарные нормы и правила не распространяются на железнодорожный, водный и авиационный транспорт.

Наряду с санитарно – гигиеническими нормами существуют технические нормы вибрации.

Нормативы виброконтроля узлов локомотивов устанавливаются заводом-изготовителем. Так, например, по данным Луганского тепловозостроительного завода (Нормы ЛН-403) при реостатных испытаниях тепловозов типа ТЭ10 и номинальной мощности (15 –я позиция контроллера) нормы вибрации не должны превышать следующих значений:

- на середине пола кабины машиниста (вертикально) и на грузе массы 50 кг – не более 0,4мм;
- на сидении машиниста (вертикально) не более 0,15мм;
- на лапе тягового генератора (вертикально, горизонтально) - не более 0,3мм;
- на турбокомпрессоре (вертикально, горизонтально – не более 0,45мм);

Аналогичные нормы устанавливаются для электровозов типа ВЛ-80 (Руководство по эксплуатации ВЭЛ-НИИ, НЭВ 3. М Транспорт, 1990г, с. 206, 366). Вибрация мотор-вентиляторов МВ1...МВ4 (в точках близких к подшипникам) не должна превышать 0,08 мм.

Условия эксплуатации электрооборудования, установленного на подвижном составе определяется по ГОСТ 17516-72.

Допускаемая величина вибрационной нагрузки в кузовах и под кузовами магистральных тепловозов, электровозов, электропоездов в диапазоне частот 1...100 Гц должна иметь максимальное ускорение не более 1g. Продолжительность единичных ударов с ускорением не более 3g (только в горизонтальном направлении) не должна превышать 40...60с.

Физический процесс колебаний при вибрации узлов локомотивов имеет периодический характер.

$$T = \frac{2\pi}{\omega}, \text{ с}$$

Вибрация в определённом месте крепления датчика ускорения (к наружным деталям корпуса) выглядит как (было отмечено ранее) наложение многих вертикальных колебаний, частоты которых являются целыми кратными от самой низкой (основной) частоты

$$\omega = \frac{\pi n}{30}, \text{ рад/с}$$

$$a(t) = \frac{A_0}{2} + A_1 \sin(\omega t \pm \varphi_1) + A_2 \sin(2\omega t \pm \varphi_2) + \dots + A_k \sin(K\omega t \pm \varphi_k) \dots, \quad (1)$$

где  $t$  – текущее время, с;

$A_0, A_1, A_2 \dots$  - амплитуды виброскоростей, м/с<sup>2</sup>;

$\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3 \dots$  - углы сдвига фаз, рад;

$K=1, 2, 3 \dots$  - номер гармоники.

Нормы допускаемой вибрации оценивают по величине действующего среднеквадратичного значения виброускорения.

$$A = \sqrt{A_0^2 + \sum_{i=1}^{m_1} \frac{A_i^2}{2}}, \quad (2)$$

или

$$A = \sqrt{A_0^2 + A_{1Д}^2 + A_{2Д}^2 + \dots},$$

где  $A_{iД}$  – действующее значение  $i$  – й гармоники;  
 $A_0$  – постоянная составляющая;  
 $m$  – измеряемое число гармоник

Действующее значение определяется суммой квадратов её гармоник и постоянной составляющей, но не зависит от начальных углов  $\varphi$  гармоник. Такой выбор измеряемой результирующей вибрации упрощает оценку вибрационного состояния узла локомотива на практике.

Без постоянной составляющей ( $A_0 = 0$ ) формула (2) примет вид:

$$A = \sqrt{\sum_{i=1}^{m_1} \frac{A_k^2}{2}}, \text{ м/с} \quad (3)$$

Однако, нормы допускаемых уровней действующих значений в Правилах ремонта указаны для виброперемещений.

Однократное интегрирование без учёта знака «-» ряда (1) даст характер изменения виброскорости при  $A_0=0$ ,

$$V(t) = \frac{1}{\omega} \cdot [A_1 \cos(\omega t \pm \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega t \pm \varphi_2) + \dots + A_K \cos(K\omega t \pm \varphi_K) + \dots +], \text{ м/с} \quad (4)$$

Однократное интегрирование функции  $V(t)$  даёт результат изменения виброперемещения.

$$S(t) = \frac{1}{\omega^2} \cdot [A_1 \cos(\omega t \pm \varphi_1) + A_2 \cos(2\omega t \pm \varphi_2) + \dots + A_K \cos(K\omega t \pm \varphi_K) + \dots +], \text{ м} \quad (5)$$

Тогда действующие значения виброскоростей  $V$  и виброперемещений  $S$  определяются формулами:

$$V = 10^3 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m_1} \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_{K_i}}{\omega_K}\right)^2}, \text{ мм/с} \quad (6)$$

$$S = 10^3 \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^{m_1} \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{A_{K_i}}{\omega_K}\right)^2}, \text{ мм} \quad (7)$$

Для вычисления по формулам (3), (6), (7) величины действующих (среднеквадратичных) значений  $A$ ,  $V$ ,  $S$  применяются специальные программы с использованием быстродействующей программной электронно-вычислительной машины ПЭВМ. Для этого необходимо знать основную частоту  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ , рад/с. Величину  $T$  можно определить по осциллограмме фактического и периодического изменения виброускорения  $a(t)$  или непосредственным измерением частоты вращения, например вала дизеля.

Вибрации часто оценивают по уровню вибрации, измеренному в логарифмических единицах-децибелах:

$$L_v = 20 \lg q \frac{V}{V_o}; \quad (8)$$

$$L_A = 20 \lg q \frac{a}{a_o}, \quad (9)$$

где  $V$  и  $a$  – действующие или эффективные значения скорости и ускорения, измеряются с использованием электронных виброметров;

$V_o = 5 \cdot 10^{-5}$  мм/с и  $a_o = 3 \cdot 10$  мм/с<sup>2</sup> – пороговые значения (приняты международными соглашениями).

На практике чаще приходится иметь дело со сплошными вибрациями – несколькими или неотъемлемыми простыми колебаниями различной амплитуды и частоты. Для того, чтобы эффективно вести борьбу с вибрациями, необходимо знать частотный состав колебательного процесса. Изображение колебательного процесса или отдельных его составляющих в функции времени называется осциллограммой процесса, см. рис. 3.6.а.

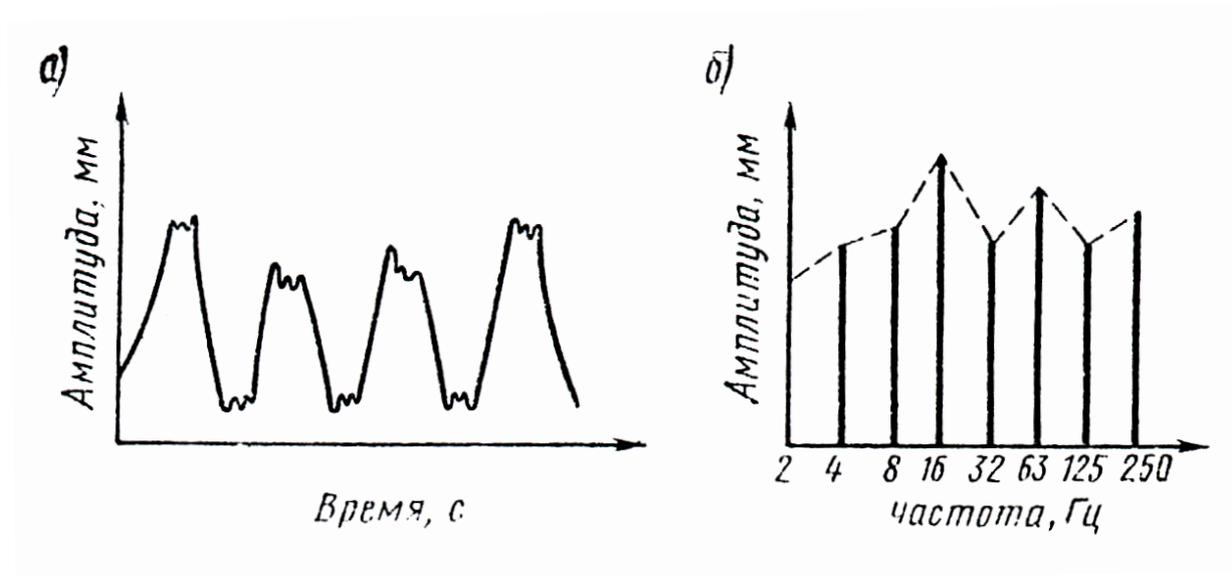


Рис. 3.6

Осциллограмма (а) и спектрограмма колебательного процесса (б).

Чаще используется спектрограмма процесса, см. рис 3.6. б – изображение соответствующих вибраций в функции частоты.

Для измерения вибраций существует ряд методов. В основном они могут быть объединены в две группы:

а) механические (непосредственные) методы измерения амплитуд;

б) электрические и электронные.

Анализ частотного состава сложных вибраций проводится анализаторами, которые вырезают в исследуемом диапазоне каждую частоту или определённую полосу частот. Чаще анализ ведётся в октавных, а также в треть - октавных полосах частот. В октавной полосе  $f_2/f_1=2$ , где  $f_2$  и  $f_1$  верхняя и нижняя граничные частоты полосы.

В треть – октавных полосах  $\frac{f_2}{f_1} = \sqrt[3]{2}$ .

При этом полоса частот характеризуется среднегеометрическим значением  $f_{cp} = \sqrt{f_2 \cdot f_1}$

## 5. Методы борьбы с вибрацией

Существуют несколько путей борьбы с вибрацией: уменьшение вибрации в источнике её возникновения; демпфирование вибраций; динамическое гашение вибраций; виброизоляция.

Устранение причин возникновения вибраций в машинах и механизмах конструктивными и технологическими методами являются наиболее радикальной мерой. Примером борьбы с вибрацией в источнике её возникновения является устранение небаланса вращающихся масс, люфтов, зазоров в машинах, замена кривошипно-шатунных механизмов кулачковыми, шарикоподшипников – подшипниками скольжения.

Демпфированное уменьшение амплитуды колебаний деталей машин достигается их изготовлением из материалов с большим внутренним трением или применением покрытий на вибрирующих поверхностях из материалов с большим внутренним трением или вязкостью.

Гашение колебаний предусматривает увеличение инерционного и упругого сопротивления колебательных систем, либо введение в механизмы специальных устройств – динамических гасителей.

В случаях, когда устранить или снизить вибрацию в машине не удаётся, используется метод виброизоляции – уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путём уменьшения передачи колебаний этому объекту от источника колебаний

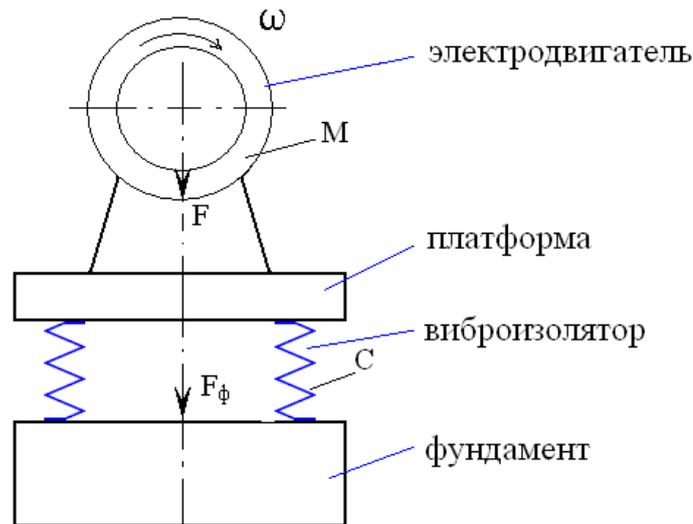


Рис. 3.7  
Схема виброизоляции агрегата

В данной работе определяются параметры вибрации и исследуется эффективность ослабления вибрации от машины к фундаменту в случае использования виброизоляции.

**Ослабление вибрации в этом случае достигается путём введения упругих элементов (виброизоляторов), помещаемых между источниками вибрации (машиной, механизмом, электродвигателем) и фундаментом.**

**Виброизоляторы можно выполнить в виде стальных пружин, рессор, прокладок из резины, резино - металлических конструкций и др.**

Основным показателем, определяющим качество виброизоляции машины, установленной на виброизоляторы с жесткостью  $C$  и массой  $M$ , см. рис. 3.7, является коэффициент передачи (или коэффициент виброизоляции КП).

**Он показывает, какая доля динамической силы  $F_\phi$  или ускорения  $a_\phi$  от общей силы  $F$  или ускорения  $a$ , действующих со стороны машины, передаётся виброизоляторами фундаменту:**

$$КП = \frac{F_{cp}}{F} = \frac{a_{cp}}{a} = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1}$$

где  $f = \frac{\omega}{2\pi}$  - частота возмущений силы; в случае неуравновешенности ротора машины (электродвигателя, вентилятора, турбины и т.д.)

$$f = \frac{nm}{60}, \text{ Гц}$$

где  $n$  - частота вращения, об/мин;  $m$  - номера гармоник ( $m=1, 2, 3...$ ). Если причиной источников колебаний не является неуравновешенность ротора, имеют место другие частоты возмущающих сил.

Частота собственных колебаний (Гц) машины

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{M_d}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{cm}}},$$

где  $\delta_{cm} = \frac{Mg}{c}$  - статическая осадка виброизолятора под действием собственного веса машины, см. рис. 3.7.

Зависимость коэффициента передачи от частоты возмущающей силы показана на рис. 3.8. Из рисунка видно, что амортизаторы начинают приносить эффект ( $KП \ll 1$ ) лишь при частоте возмущения  $f_{эф} > f = f_0 \sqrt{2}$ .

При  $f \leq f_0 \sqrt{2}$  виброизоляторы полностью передают вибрации фундаменту ( $KП = 1$ ) или даже усиливают их ( $KП > 1$ ). Эффект виброизоляции тем выше, чем больше отношение  $\frac{f}{f_0}$ . Следовательно, для лучшей виброизоляции фундамента от вибрации машин при известной частоте возмущающей силы  $f$  необходимо уменьшить частоту собственных колебаний машины на виброизоляторах  $f_0$  для получения больших отношений  $\frac{f}{f_0}$ , что достигается либо увеличением веса машины  $Mg$ , либо снижением жесткости виброизоляции  $c$ . При известной же собственной частоте  $f_0$  - эффект виброизоляции будет тем выше, чем больше возмущающая частота  $f$

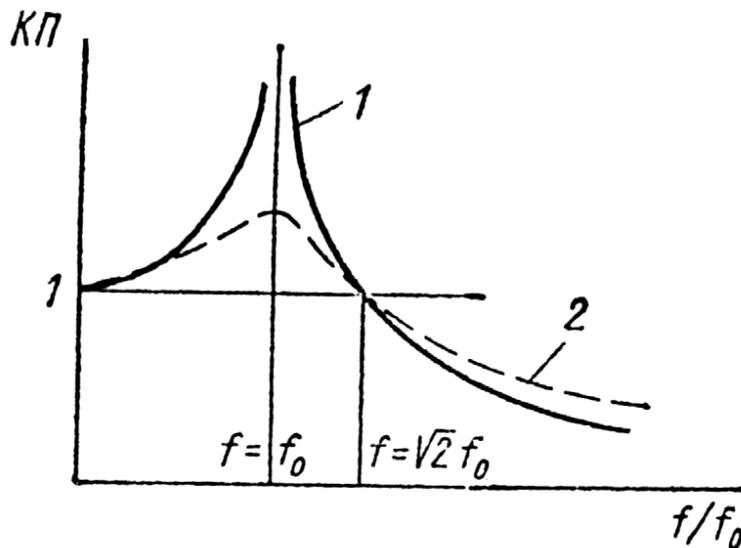


Рис. 3.8. Зависимость коэффициента передачи (КП) от частоты возбуждения:  
1 – без учёта затухания (трения в виброизоляторах); 2 – с учётом затухания

по сравнению с частотой  $f_0$ . Ослабление передачи вибраций на фундамент обычно характеризуется величиной виброизоляции (ВИ). Величина виброизоляции на данной частоте (дБ):

$$ВИ = L_{u1} - L_{u2} = 20 \cdot Ig \frac{u_1}{u_0} - 20 \cdot Ig \frac{u_2}{u_0} = 20 \cdot Ig \frac{u_2}{u_1};$$

$$ВИ = 20 \cdot Ig \frac{F}{F_\phi} = \frac{1}{КП} = 20 \cdot Ig \left[ \left( \frac{f}{f_0} \right)^2 - 1 \right],$$

где –  $L_{u1}$  и  $u_1$  – уровень вибраций и виброскорость машины или фундамента при отсутствии виброизоляторов между машиной и фундаментом;  $L_{u2}$  и  $u_2$  уровень вибраций и виброскорость фундамента при наличии виброизоляторов между машиной и фундаментом.

## 6. Устройство стенда

Структурная схема стенда и расположение элементов изображена на рис. 3.9 и 3.9а.

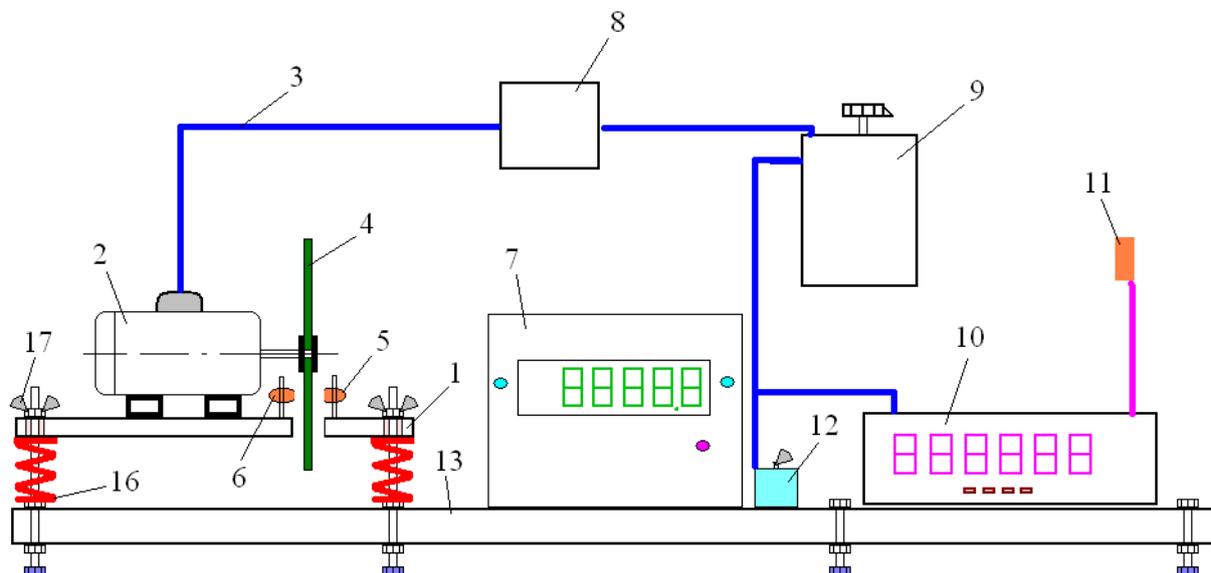


Рис. 3.9. Структурная схема стенда

1. Платформа; 2. Электродвигатель постоянного тока; 3. Кабель питания электродвигателя; 4. Диск с отверстиями (60 отверстий); 5. Фотодиод; 6. Лампа накаливания; 7. Тахометр электронный; 8. Выпрямительный мост; 9. Автотрансформатор; 10. Виброметр электронный; 11. Пьезодатчик; 12. Тумблер; 13. Фундамент; 14, 15. Грузик; 16. Пружины (виброизоляция); 17. Прижимной винт; 18. Отверстия (60 шт).

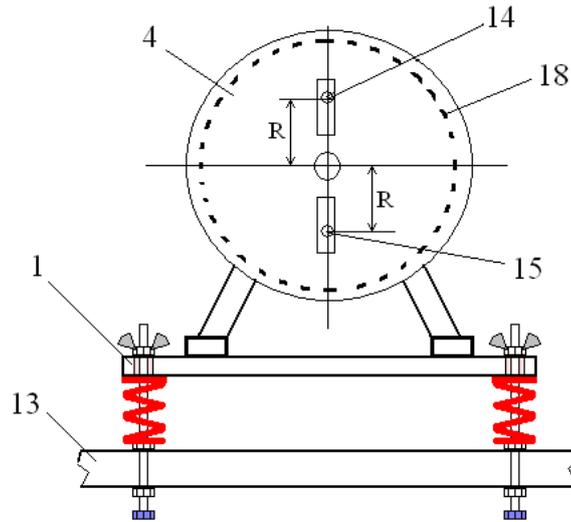


Рис. 3.9а. Вид со стороны диска (справа)

## 7. Описание электрической схемы стенда

Электрическая схема стенда представлена на рис. 3.10.

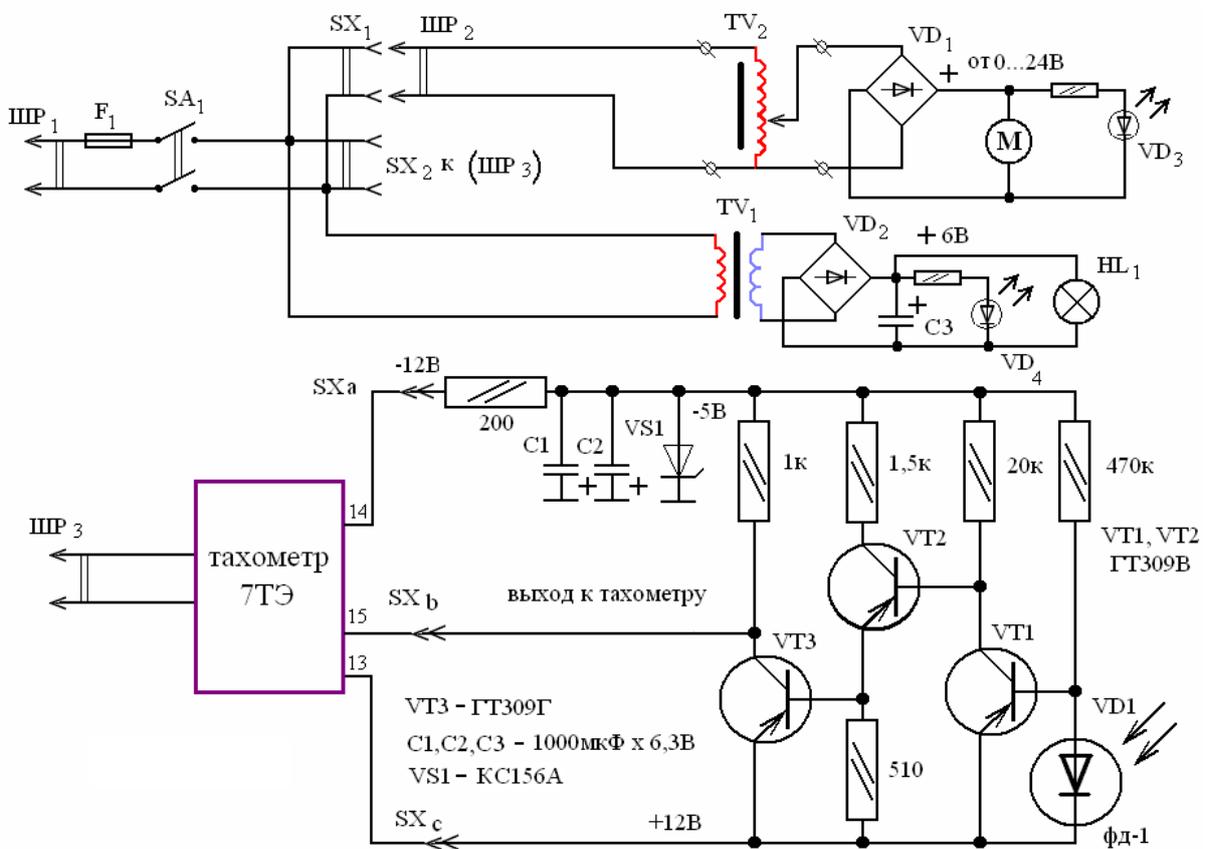


Рис. 3.10. Принципиальная электрическая схема

При включении штепсельного разъёма ШР1 (вилка с розеткой) создаётся цепь питания.

Предохранитель плавкий F1, выключатель (типа тумблер) SA1, обмотка трансформатора TV1, SX1, SX2 (разъёмы ШР2, ШР3) обмотка трансформатора TV2, выпрямитель VD1 (подвижный контакт), обмотка якоря электродвигателя М постоянного тока с включённым параллельно индикатором напряжения VD3.

Со вторичной обмотки трансформатора TV1 напряжение подаётся на выпрямитель VD2. С выпрямителя VD2 напряжение подаётся на конденсатор С3, с которым параллельно включены лампы накаливания HL1 и индикатор наличия питания сети.

Питание тахометра 7ТЭ осуществляется через разъёмы SX2 и ШР3.

На транзисторах TV1 - TV2 собран преобразователь первичный, служащий для преобразования и усиления сигнала от фотодиода VD1, для нормальной работы тахометра 7ТЭ.

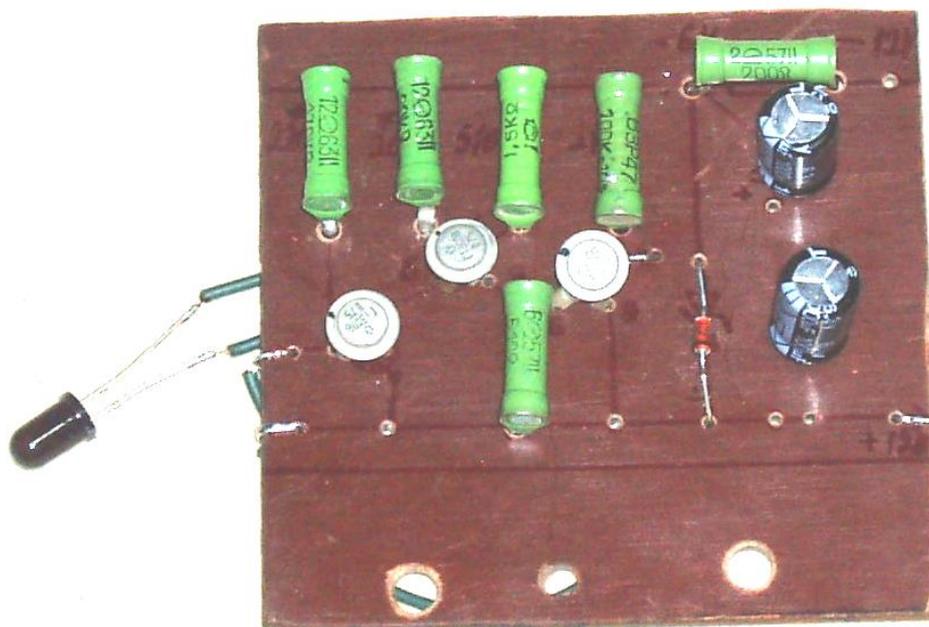


Рис 3.11. Внешний вид первичного преобразователя

Преобразователь первичный представляет собой усилитель постоянного тока и работает он следующим образом. При попадании света на фотодиод VD1 его сопротивление резко уменьшается, в результате чего транзистор TV1 закрывается (состояние при затемнённом фотодиоде VD1 у него открытое), транзистор TV2

открываясь, подаёт усиленный по напряжению сигнал смещения на базу транзистора TV3, (TV3 усиливает сигнал по току), с коллектора которого снимается усиленный по напряжению и току сигнал. Последний подаётся на вход тахометра 7ТЭ.

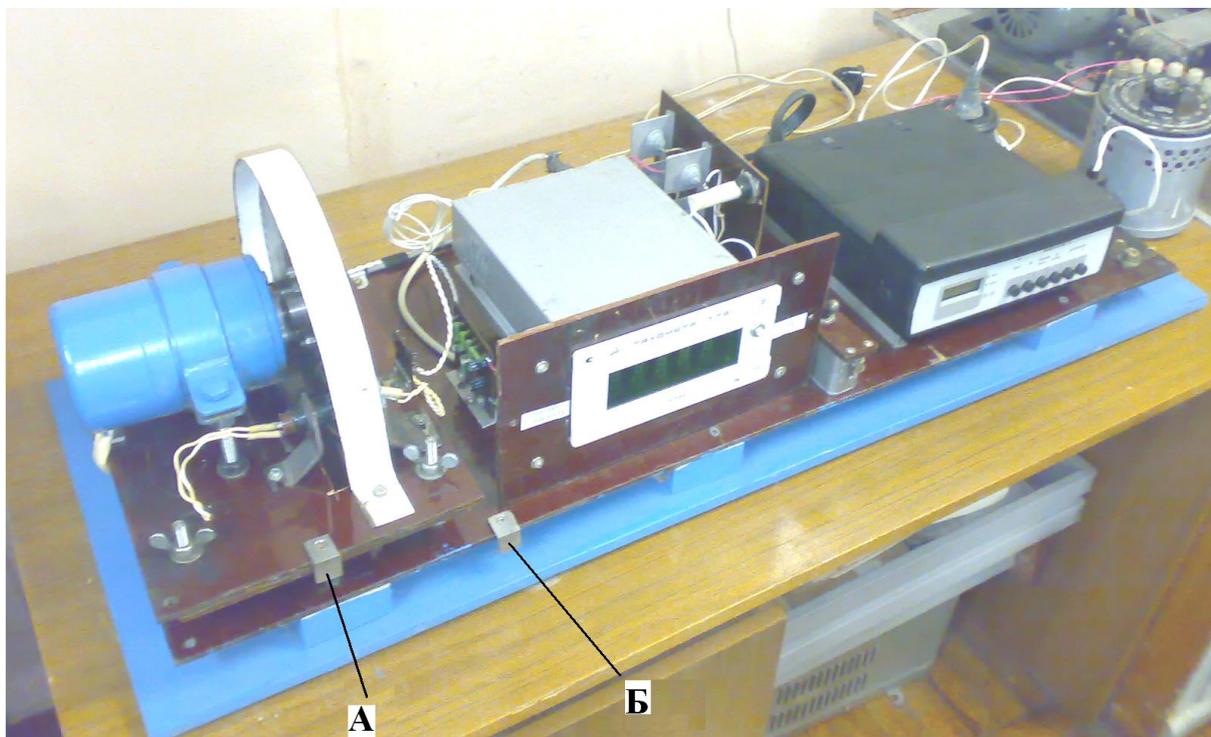


Рис 3.12 Общий вид стенда

## 8. Меры безопасности при работе на стенде.

К работе с аппаратурой допускаются студенты, прошедшие инструктаж по технике безопасности и ознакомленные с данными методическими указаниями.

Проверка аппаратуры одним лицом в помещении строго воспрещается.

Аппаратура и оборудование стенда должны быть тщательно заземлены.

При ремонтных работах аппаратура должна быть отключена от сети.

## 9. Порядок выполнения работы

1. При работе от сети необходимо убедиться, что напряжение в сети соответствует напряжению 220В.

2. С помощью соединительной вилки включить питание приборов стенда – тахометра, автотрансформатора, выпрямителя, электродвигателя (см. рис 3.9). Электронный виброметр имеет автономное питание от химического источника 9В.

**Задание №1** Определение резонансной частоты вращения вала электродвигателя при включённой виброизоляции (крепление платформы с закреплённым на ней двигателем к фундаменту – мягкое).

1. Для этого необходимо определить частоту собственных колебаний электродвигателя с платформой и диском по формуле:

$$f_o = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{c}{M}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\delta_{cm}}},$$

где С – жесткость виброизоляции (пружин), кгс/мм;  
М – масса электродвигателя с платформой и диском;

$\delta_{cm} = \frac{c}{M \cdot g}$  - статическая осадка, мм;

g – ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>.

Частота собственных колебаний платформы с двигателем данной установки составляет 7 Гц.

2. Резонансный режим наступает при равенстве частоты вынужденных колебаний  $f$  с частотой собственных колебаний  $f_o$ .

Частота вынужденных колебаний определяется из выражения

$f = \frac{\omega_d}{2\pi}$ , где  $\omega_d$  - угловая скорость вращения вала двигателя с

закреплённым диском с отверстиями  $\omega_d = \frac{n_d}{30}$ , рад/с,  $n_d$  – скорость вращения вала двигателя, об/мин.

3. При этом с целью создания небаланса на диске один из грузиков (см. рис. 3.9) смещается (на одно отверстие) по радиусу к периферии, т.е. радиус центра массы его увеличивается.

4. При включении тумблера 12 питания двигателя необходимо с помощью автотрансформатора плавно повысить скорость движения

вала двигателя до момента начала резкого его колебания – «подпрыгивания».

5. Замерив скорость вращения вала двигателя  $n_d$  – электронным тахометром определяется соответствующая резонансная частота  $f$  вынужденных колебаний.

**Задание 2.** Исследование параметров вибрации рабочего места  $f_p$  локомотивной бригады.

Согласно ГОСТ 12.2.056 «Электропоезда и тепловозы колёси 1520 мм требования безопасности», допустимые значения виброускорений на рабочих местах локомотивной бригады представлены виброускорениями в вертикальной  $a_v$  и горизонтальной  $a_z$  направлениях для 1/3 октавной полосы при соответствующих среднегеометрических частотах см. таблицу 1 (Приложение).

При исследовании параметров вибрации фундамента (пола) для их сопоставления с данными таблицы 1 необходимо определить скорости вращения вала электродвигателя, соответствующим данной среднегеометрической частоте  $f_i$  1/3 октавных полос.

Среднегеометрическая частота  $f$  для трети октавы определяется по формуле:

$$f = \sqrt[3]{2fn} = 1,13fn,$$

где  $f_n$  – нижняя граничная частота, Гц.

Например, скорость вращения вала двигателя  $n_d$  для среднегеометрической частоты, равной единице см. таблицу 1 может быть определён из следующих преобразований.  $f = 1,13fn$ ;  $1 = 1,13fn$ ;

$fn = \frac{1}{1,13} = 0,88$  Гц. Угловая скорость вращения вала  $n_d$  при этой

частоте  $f_n$  определяется  $\omega_d = 2\pi f_n$ , откуда  $fn = \frac{\omega_d}{2\pi} = 0,88$ .

С другой стороны угловая скорость вала  $n_d$  определяется

$$\omega_d = \frac{\pi n_d}{30} = 2\pi f_n;$$

или

$$n_d = 60 \cdot 0,88 = 52 \text{ об/мин}$$

Аналогичные преобразования выполняются для следующего значения среднегеометрической частоты, равной 2 и так далее...

Полученные данные вносим в таблицу 2 (см. Приложение).

При выполнении задания №2 студент исследует параметры вибрации при частоте вращения вала двигателя  $n_d$  в пределах от 660 до 1668 об/мин.

В результате измерений параметров вибраций  $a_v$  и  $v_r$  и их сопротивления с допустимыми нормами, студент должен дать оценку и при их отклонении предложить методы и средства по их устранению.

**Задание №3.** Определение величины коэффициента виброизоляции фундамента, возбуждения и его зависимость от частоты.

Для этого необходимо:

1. С помощью прижимных винтов 17 (рис. 3.9) платформу 1 жестко закрепить (гайками - барашками) с фундаментом 13, т.е. виброизоляцию «выключить».

2. Установить ручку регулятора напряжения автотрансформатора на отметку "0", т.е. выходное напряжение равно нулю.

3. Установить тумблер 12 (рис. 3.9) в положении "вкл" и убедиться в наличии питания, см. загорание лампы "Сеть".

4. Ручкой автотрансформатора медленным повышением напряжения питания электродвигателя установить по электронному тахометру частоту вращения вала  $n_d=500$  об/мин, для наличия питания двигателя служит лампа "Питание двигателя".

5. Установить вертикально пьезоэлектрический преобразователь (см. рис. 3.9) электронного виброметра на "уголок" «А» закрепленного на платформе и аналогично на фундаменте «Б», см. рис. 3.12.

6. Замерить величину виброускорения платформы или фундамента (виброизоляция отсутствует), полученные данные занести в таблицу 3.

7. Затяжку прижимных винтов отпустить, т.е. "включить" виброизоляцию, после чего при частоте 500 об/мин двигателя сделать замеры ускорения платформы и фундамента и занести их в таблицу 3.

8. Аналогичные замеры необходимо повторить при скоростных режимах двигателя  $n_d=1000, 1500, 2000$  об/мин.

9. Определить частоту возбуждения, как отношение возмущающей частоты  $f$  к частоте свободных колебаний  $f/f_0$  при скоростях вращения вала  $n_d=500, 1000, 1500, 2000$  об/мин.

Полученные данные занести в табл. 3.4 (см. приложение).

10. Анализируя данные таблиц 3 и 4, необходимо дать заключение об эффективности виброизоляции при различных скоростных режимах работы машины.

## 10. Содержание отчёта

Отчёт студента должен содержать:

1. Схему лабораторного макета (рис. 3.9, рис. 3.9а.)
2. Электрическую схему управления (рис. 3.10)
3. Заполненные опытными данными таблицы 3.3, 3.4.
4. Выводы и определения по результатам исследований.

## 11. Контрольные вопросы

1. Что называется механическим колебанием, основные характеристики колебательного процесса?
2. Что такое полигармонические колебания?
3. Как определяется резонансная частота колебания?
4. Что такое виброизоляция фундамента машины, как определяется передаточный коэффициент КП?
5. Как определяются собственная  $f_0$  и вынужденная  $f$  частота вибрации?

## IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ЧАСТОТ КОЛЕБАНИЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА

### 1. Цель работы

Целью настоящей работы является ознакомление с методикой и средствами определения напряженного состояния деталей.

### 2. Схема и описание работы

При проведении исследований напряженного состояния деталей подвижного состава и их испытаний на прочность широко применяется специальная измерительная аппаратура. В комплект такой аппаратуры чаще всего включаются:

- а) датчики для измерения напряжений или деформаций;
- б) усилители, осуществляющие усиление электрических сигналов датчиков по мощности;
- в) Регистрирующие приборы: осциллографы или самописцы, записывающие усиленные сигналы датчиков на осциллографную пленку (бумагу) или бумажную ленту.

Из большого количества различных типов датчиков в настоящее время наиболее распространены проволочные тензометры (проволочные тензорезисторы).

Принцип действия проволочного тензометра основан на способности металлического проводника изменять свое омическое сопротивление при деформации. В измерительной практике наиболее широкое распространение получили тензорезисторы на бумажной основе, применяющиеся для измерения деформаций при нормальной и умеренно повышенной температуре до 100-150°C. Эти тензорезисторы наклеивают на поверхности испытываемых деталей по различным схемам в зависимости от типа измеряемого напряжения.

При измерении напряжений изгиба, например, от действия усилия  $P$  на балку 1 (см.рис.4.1) рабочий  $P$  и компенсационный  $K^*$  тензорезисторы наклеиваются в одном и том же сечении, но на поверхностях, одновременно воспринимающих равные напряжения противоположного направления: растяжения  $\epsilon_p$  и сжатия  $\epsilon_{сж}$ . В этом случае будет иметь место одновременное увеличение сопротивления

на  $\Delta R$  в верхнем сжатом тензорезисторе  $P$  и уменьшение сопротивления на  $\Delta R$  у нижнего тензорезистора  $K^*$ . Электрическая схема включения тензорезисторов  $P$  и  $K^*$  в этом случае идентична с рис. 1,6. При действии на вал крутящих моментов  $M_k$  (рис.4.2,а) его сечения воспринимают напряжения кручения. Схема наклейки тензорезисторов в данном случае показана на развертке поверхности вала (рис.2,б). Такая схема применяется для устранения влияния напряжений изгиба на величины напряжений кручения, а сама наклейка чаще всего осуществляется с помощью специальных шаблонов. В этом случае два тензорезистора 2 и 4 при действии крутящего момента  $M_k$  оказываются сжатыми и их сопротивление увеличено на  $+\Delta R$ , Ом. Два других 1 и 3 растянуты и их сопротивление уменьшено на  $-\Delta R$ . Изменения сопротивлений от изгиба вала на  $\pm\Delta R$  у тензорезисторов, центры которых расположены в диаметральных сечениях АА и ББ, оказываются взаимно скомпенсированными, благодаря включению тензорезисторов 1,4 и 3,2 в одно и то же плечо полумоста. В одном плече такого полумоста из тензорезисторов 2 и 3 при действии крутящего момента  $M_k$  сопротивление увеличится на  $2\Delta R$ , а в другом из датчиков 1,4 - уменьшится на  $2\Delta R$ .

Принципиальная схема измерения напряжений с помощью проволочных тензорезисторов показана на рис.4.3. Рабочий и компенсационный тензорезисторы, соединенные по полумостовой схеме, подключаются к клеммам 3,1,2 усилителя. В усилителе смонтированы резисторы  $K_1$  и  $K_2$  и устройство, позволяющее в небольших пределах менять активное и емкостное сопротивление этих резисторов. Резисторы  $K_1$  и  $K_2$  после соединения с тензорезисторами  $P$  и  $K$  образуют четырехплечный мост. К двум точкам 1 и 4 этого моста от генератора несущей частоты ГНЧ подается напряжение переменного тока  $U_{\sim}$  (1-6)В с частотой от (2,5-35)кГц. Перед проведением измерений мост с помощью изменения сопротивления резисторов  $K_1$  и  $K_2$  приводится на баланс, когда напряжение между точками 2 и 3 оказывается равным нулю. При изменении напряжений рабочего тензорезистора  $P$  и его сопротивления на  $\pm\Delta R$  между точками 2 и 3 возникает разность потенциалов  $\Delta U_{32}$ , которая усиливается в блоке БУ усилителя, выпрямляется (фильтруется от несущей частоты) в блоке БВ и подводится к выходным клеммам  $U_1$  и  $U_2$  усилителя.

Усиленное электрическое напряжение  $\Delta U$ , пропорциональное изменению сопротивления  $\pm\Delta R$ , а следовательно, и напряжению  $\pm\epsilon$ ,

подводится к входным клеммам 01 и 02 магнитоэлектрического осциллографа.

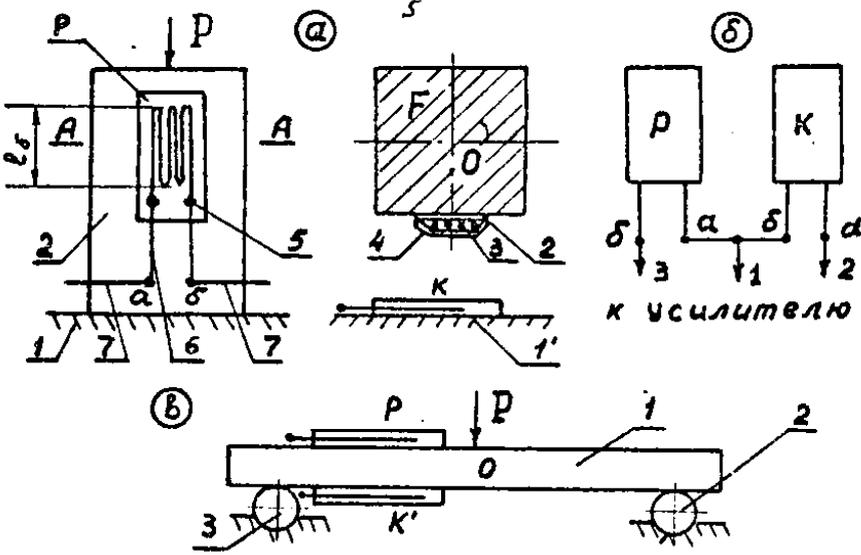


Рис. 4.1. Схемы наклейки тензорезисторов для оценки растяжения (сжатия) –а и изгиба – в деталей

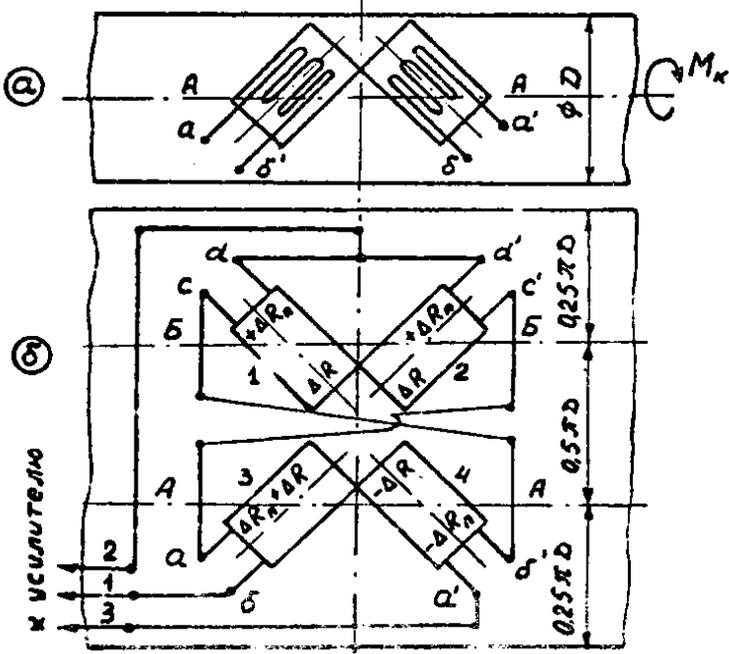


Рис. 4.2. Схема наклейки тензорезисторов для оценки кручения деталей

В этом осциллографе установлены гальванометры. Гальванометр состоит из двух растяжек P1 и P2, катушки КГ, зеркала ЗГ.

Вся эта система растянута между точками АБ, размещенными в специальной колбе гальванометра, заполненной прозрачным вазелиновым маслом с загустителями или без них. Колба гальванометра установлена в магнитном поле ( N S ), создаваемом постоянными магнитами.

При протекании усиленного электрического тока  $\Delta J = \Delta U / r_r$  ( $r_r$  - активное сопротивление катушки КГ гальванометра) катушка КГ поворачивается на угол  $\Delta \phi$  в магнитном поле NS, что приводит также к угловым поворотам зеркала ЗГ. На это зеркало от лампочки Л и через фокусирующий экран Э попадает луч света Л1, который отражаясь от зеркала ЗГ проектируется в виде луча Л2 и освещает некоторую точку М на движущейся со скоростью  $V_6$  ленте Б, выполненной из светочувствительной бумаги. Ведущая катушка БК, вращающаяся с угловой скоростью  $\omega_k$  от специального приводного двигателя, наматывает бумагу Б, одновременно сматывая ее с ведомой катушки БК.

При колебаниях  $\Delta R$ , усиленного напряжения  $\Delta V$  и тока  $\Delta I$  в катушке гальванометра ЗГ на бумаге Б получают запись в виде кривой NM. Параметры магнитной и механической систем осциллографа и усилителя подбирают таким образом, чтобы обеспечить линейную зависимость между изменениями  $\Delta R$ , пропорциональными  $\Delta b$  и поперечными перемещениями  $\Delta X$  точки М луча Л2 на бумаге Б относительно линии NL, соответствующей  $\Delta b = 0$ .

Прежде чем определить действительное значение напряжений в каком либо из элементов испытываемой конструкции, производят тарировку всего комплекта измерительной аппаратуры, составленного из проволочных тензорезисторов, усилителя и осциллографа. Основная цель такой тарировки – получение графической зависимости между величинами напряжений растяжения или кручения  $b$  (или  $\tau$ ) в детали и перемещениями  $\Delta x$  точки М проекции луча Л2 на бумаге или световом экране (последние перемещения равны друг другу).

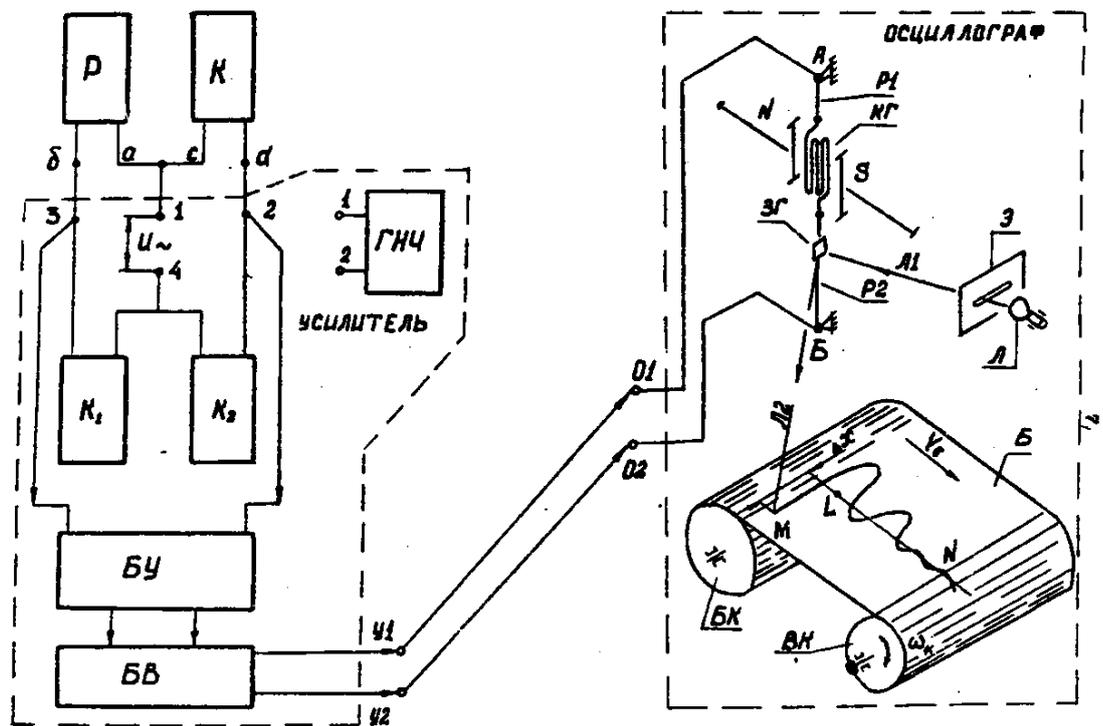


Рис. 4.3. Принципиальная схема измерения напряжений с помощью проволочных тензорезисторов

### 3. Порядок выполнения работы по определению напряжений растяжения в коренном листе рессоры

1. Собрать полумостовую схему из рабочего РТ1 и компенсационного К1 тензорезисторов; подключить схему к 1 каналу усилителя.

2. Включить усилитель и осуществить настройку канала на баланс. Включить осциллограф.

3. Меняя груз  $G_T$  ступенями, зарегистрировать отклонения  $\Delta x$  гальванометра по шкале на экране наблюдения осциллографа. Результаты измерений записать в таблицу тарировок.

4. Повторить операции (1-3) для тензорезисторов РТ2 и РТ3.

5. На миллиметровой бумаге построить тарировочный график. Для его построения измерить величины  $L_T$ ,  $h_T$ ,  $v_T$ , рассчитать  $W_{хТ}$  и  $бр$ , соответствующие изгибающим моментам  $G_T-L$ .

6. Осуществить подключение рабочего тензорезистора Р1 на коренном листе рессоры 1 (см.рис.4.4.) к компенсационному К1;

полумост из тензорезисторов Р1 и К1 подключить к каналу усилителя и, нагружая рессору усилием  $P=500, 1000, 1500$  кгс, регистрируемым индикатором 6 динамометра 5 от пресса, зарегистрировать отклонения  $\Delta X$  гальванометра осциллографа. Опыт повторить дважды. Результаты измерений занести в таблицу опытов.

7. Подключить тензорезисторы Р2 и Р3 к компенсационным К2, К3 и выполнить все операции п.6.

8. С помощью тарировочных графиков определить напряжения  $\sigma_{p1}, \sigma_{p2}, \sigma_{p3}$  растяжения в датчиках при различных  $I= 500, 1000, 1500$  кгс. Определить, какой из датчиков воспринимает большие напряжения. Построить графики напряжений  $\sigma_{p1}(P), \sigma_{p2}(P), \sigma_{p3}(P)$ .

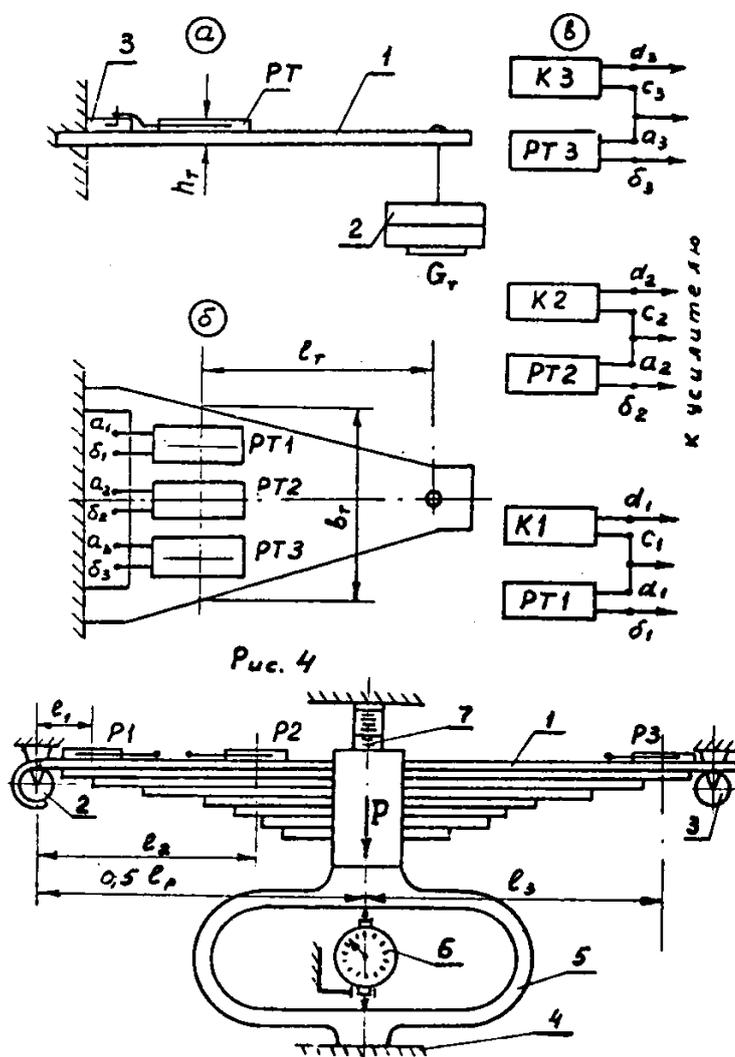


Рис. 4.4. Схема определения напряжений в листовой рессоре.

#### **4. Содержание отчёта**

Результаты работы оформляются отчетом, в котором необходимо описать цель, содержание работы, вычертить схему стенда для определения напряжений растяжения.

Оформленный и подписанный отчёт предъявляется преподавателю для проверки и защиты.

#### **5. Контрольные вопросы**

- 4.1. Перечислите типы датчиков.
- 4.2. Как устроен и работает тензорезистор?
- 4.3. Какие параметры характеризуют тензорезистор?

## 6. Определение частоты собственных колебаний механизма привода к вспомогательному оборудованию тепловоза

### 7. Цель работы

Лабораторная работа по определению частот собственных колебаний механизмов привода к вспомогательному оборудованию тепловоза приводится на стендовой установке с передним раздаточным редуктором тепловоза (рис. 4.5).

От вала главного генератора через две муфты с резиновыми втулками шлицевый карданный вал приводит во вращение ведущий вал 13 переднего редуктора, от которого через шестерни вращения передаётся на два ведомых вала. Один из этих валов 8 через муфты и карданный вал соединен с валом двухмашинного агрегата. Другой вал 16 служит для вращения вентилятора и охлаждения тягового электродвигателя (ТЭД) передней тележки и тахогенератора.

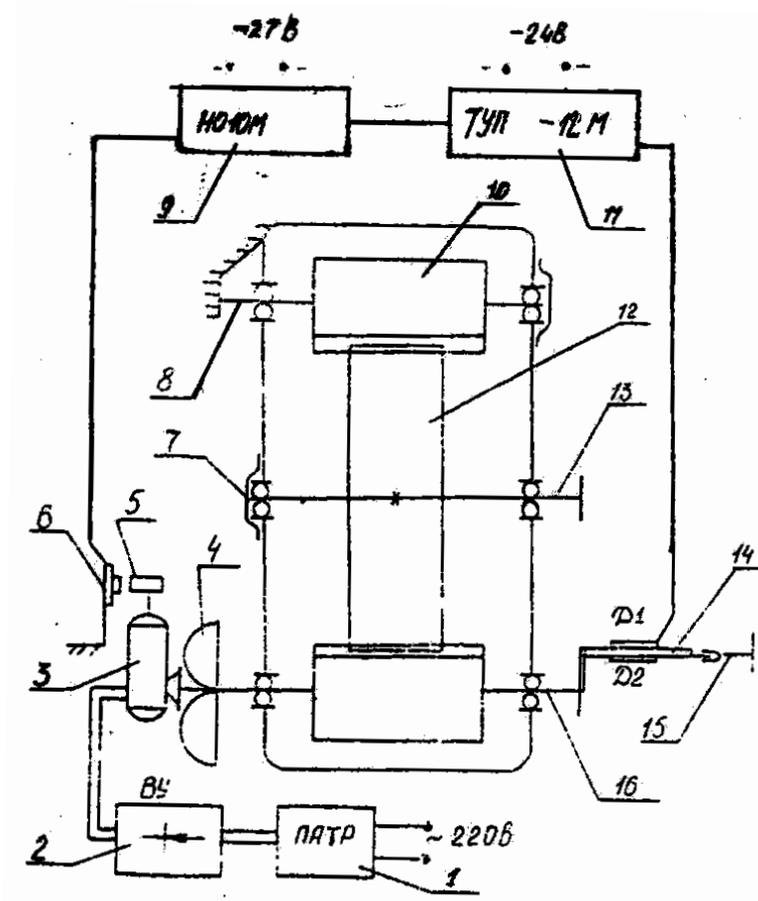


Рис. 4.5. Схема стендовой установки с передним раздаточным редуктором тепловоза.

Передний редуктор состоит из картера, в котором на шарико подшипниках установлены три вышеуказанных вала на шлицах ведущего вала 13 установлена шестерня 12. В средней части ведомых валов нарезаны зубчатые венцы 10, находящиеся в постоянном зацеплении с ведущей шестерней 12. От просачивания масла, заполняющего картер редуктора, в местах выхода валов, предохраняют крышки 7 или лабиринтные крышки с лабиринтными кольцами. К крыльчатке вентилятора 4, установленного на ведомом валу 16 переднего раздаточного редуктора, закреплен специальный вибратор – электродвигатель постоянного тока 3. Клеммы электродвигателя подключены к выпрямителю 2, напряжение которого можно плавно регулировать в необходимых пределах с помощью линейного автоматического трансформатора (ЛАТР-1). На вале электродвигателя 3 закреплена масса 5, эксцентрично расположенная относительно оси вращения этого вала. Во время вращения электродвигателя на детали редуктора передается крутящий момент, содержащий периодическую составляющую с круговой частотой, равной угловой скорости вала электродвигателя. Регистрация угловых колебаний вентилятора 4 в плоскостях, перпендикулярных к оси его вращения, осуществляется специальным измерителем 14.

Этот измеритель представляет собой пластину из пружинной стали. На боковые поверхности пластины наклеены два проволочных тензорезистора Д1 и Д2, которые при включенном вибраторе воспринимают деформации изгиба пластинки. Тензорезисторы измерителя соединены в полумост и подключены к одному из концов проводникового усилителя ГУП-12 М. Один конец пластины измерителя с одной стороны крепится к выходному валу редуктора, а на другой стороне к пластине припаяна игла, которая вводится в специальную валку 15, закрепленную к корпусу редуктора.

Регистрация усиленных электрических сигналов измерителя осуществляется с использованием осциллографа НО10М.

Во время проведения работы угловая скорость вращения вала электродвигателя вибратора плавно увеличивается от 0 до  $\omega_{в}=850$  рад/с и осуществляется непрерывная запись осциллограммы от тензорезисторов измерителя. На осциллограмме точно просматриваются область возбуждения крутильных колебаний, соответствующая равенству  $\omega_{в}$  частотам собственных колебаний редуктора. Угловая скорость вращения вала электродвигателя вибратора фиксируется с помощью магнитоэлектрического отметчика

оборотов изготовленного из наушника головного телефона ТОН-2, катушка которого подключена непосредственно к одному из гальванометров осциллографа НО10М.

Осциллограмму необходимо записывать при протяжке бумаги 16 мм/с с включением отметчика времени в таком виде, как это показано на рисунке 4.6. На этой осциллограмме видны отметки времени с интервалом 0.1с и записаны кривые:

Г1- 4 базовые линии:

Г2- угловых колебаний выходного вала:

Г3- отсчёт частоты вращения вала электродвигателя.

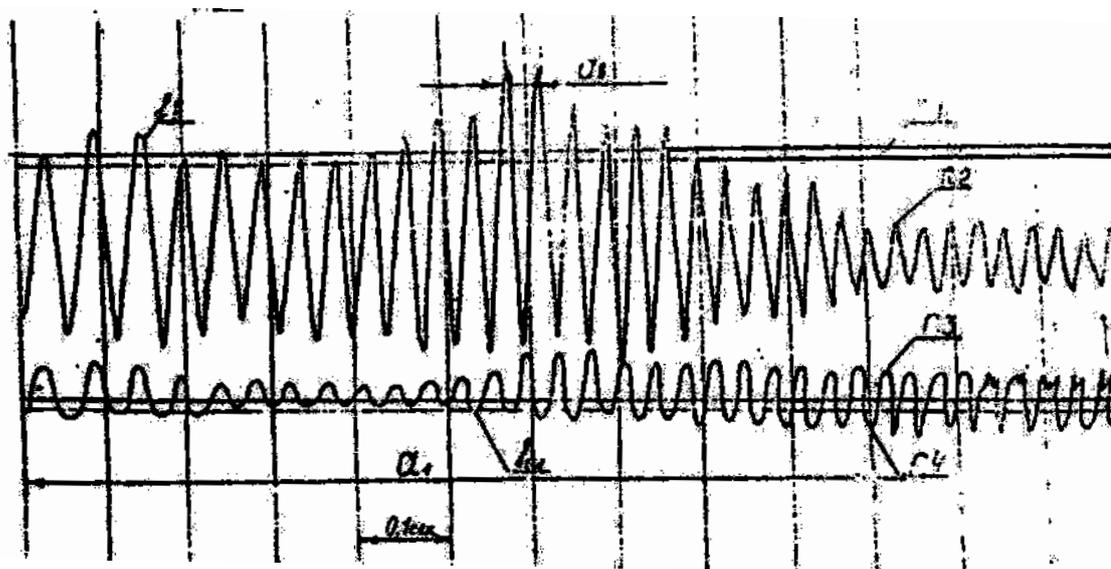


Рис.4.6. Осциллограмма крутильных колебаний системы

Для расшифровки осциллограммы необходимо выполнить следующие операции. На записанных осциллограммах найти область возбуждения крутильных колебаний, соответствующих равенству  $W$  в одной из частот собственных колебаний исследуемой системы. На этом отрезке выделить участок длиной  $a_1$ , соответствующий времени  $t_c$ . В пределах этого отрезка на кривой Г<sub>2</sub> определить количество полных периодов колебаний  $n_2$  (с точностью до 0.3 доли периода), а затем рассчитать круговую частоту собственных резонансных колебаний  $W_e = \frac{2\pi n_2}{60}$ , рад/с привода. (1)

Для оценки точности экспериментального определения частоты собственных колебаний исследуемой системы необходимо

полученные результаты сопоставить с расчётными значениями частот.

Для этого составим динамическую расчётную схему исследуемой системы: уточненную (рис 4,7а) и упрощённую (рис 4,7б).

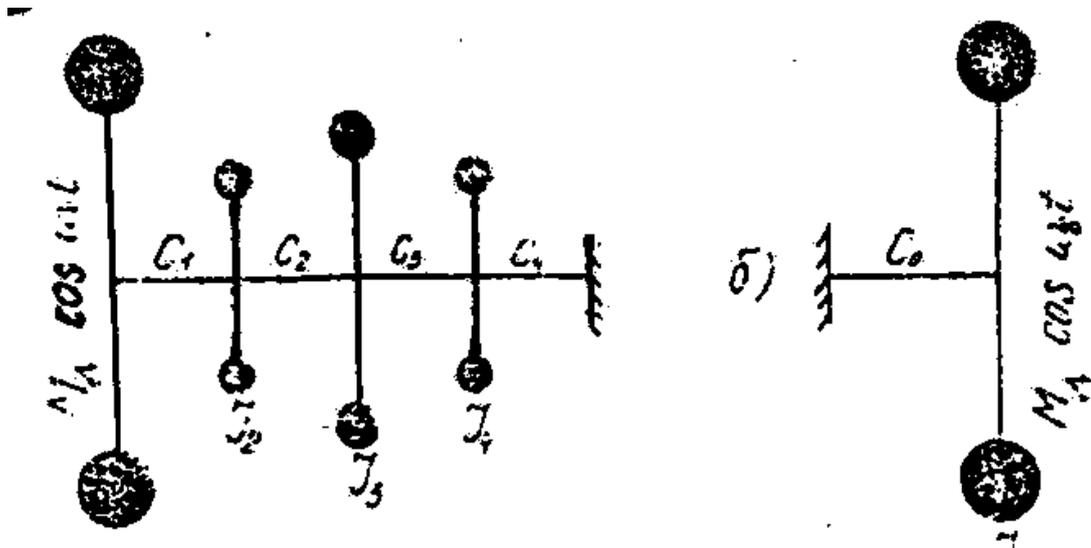


Рис 4,7. Расчетная схема исследуемой системы.

Составление и упрощение динамической расчётной схемы базировалось на следующем:

использование справочных данных и основных положений теории колебаний для составления и упрощения расчётных схем упругосвязанных механических систем.

приведение расчетной схемы к ведомому валу редуктора с учетом передаточного числа.

сведения путем редукции реальных разветвленных расчетных схем (рис. 4,7а) к одномассовой системе (4,7б).

Для составления дифференциального управления крутильных колебаний исследуемой системы воспользуемся принципом Д'аламбера. На основании этого имеем:

$$J_0 \ddot{\varphi}_0 + C_0 = M_0 \cos \omega_0 L \quad (4.2)$$

Где  $J_0$  - массовый момент инерции системы;

$C_0$  - приведенная жесткость упругих связей между ведущим и ведомым валом.

Величины  $J_0$ ,  $C_0$  определяем экспериментально.

Для этого уравнения условия резонанса будет таково:

$$W_{sp} = \sqrt{\frac{C_0}{J_0}} \quad (4.3)$$

## 8. Последовательность проведения работы

1. Осуществить измерение жесткости  $C_0$ , для чего к ведомому валу с помощью нагружающего рычага приложить три ступенчато увеличивающиеся значения крутящего момента:  $M_1$ ,  $M_2$ ,  $M_3$ , при заземленном ведущем вале.

Для каждого значения  $M$  определить угловые повороты  $\varphi_i = \Delta i / l_i$  ведомого вала относительно корпуса переднего редуктора, для чего использовать показания индикатора часового типа  $\Delta i$ , установленного на специальном кронштейне и фиксированном на расстоянии  $l_i$ , от оси ведомого вала перемещения нагружающего рычага.

Величину усредненной жесткости определить по формуле

$$C_0 = \frac{C_1}{3} \left( \frac{M_1}{\Delta_1} + \frac{M_2}{\Delta_2} + \frac{M_3}{\Delta_3} \right) \quad (4.4)$$

Величину  $J_0$  для расчетов  $W_{sp}$  по формуле (3) приняты равной 0,03 кг/мс.

2. Проверить все токоподводящие провода и соединения к аппаратуре.

3. Включить электрическое питание осциллографа и усилителя и прогреть их в течении 10 мин.

4. Зарядить кассету осциллографной бумагой и установить на осциллограф.

5. Включить тумблеры «мотор» привода протяжки бумаги и «отметчик течения времени», установить напряжение на лампочке осветителя гальванометров «10 В».

6. Плавно увеличивать напряжение, подводимое к клеммам электровибратора  $V$ , от 0 до  $U_{max}$  в течении 7-10 секунд и одновременно включить тумблер «кассета» осциллографа на запись.

7. Запись производить в течении 7-10 секунд.

8. Выключить тумблер «мотор, кассета» и «отметчик времени» осциллографа и плавно уменьшить напряжение электродвигателя вибратора до 0.

9. Выключить питание аппаратуры.

10. Проявить осциллограмму и высушить.
11. Расшифровать осциллограмму и определить  $W_{\epsilon}$  по формуле (1).
12. Определить ошибку расчетного  $W_{dh}$  относительно  $W_{\epsilon}$  по формуле:

$$100 \cdot \frac{W_{\epsilon} - W_{\epsilon p}}{W_{\epsilon}}$$

## 9. Содержание отчёта

Результаты работы оформляются отчетом, в котором необходимо описать цель, содержание работы, вычертить схему стенда для определения частоты собственных колебаний механизма привода к вспомогательному оборудованию тепловоза .

Оформленный и подписанный отчёт предъявляется преподавателю для проверки и защиты.

## 10. Контрольные вопросы

- 4.1. Какие Вы знаете механизмы привода?
- 4.2. Как устроен и работает механизм привода?
- 4.3. Как определяется частота собственных колебаний механизма привода к вспомогательному оборудованию тепловоза?

## ПРИЛОЖЕНИЯ

Таблица 3.1

№ п/п	Среднегеометрическая частота $f$ , Гц	Ускорение $a$ , $m/s^2$	
		По вертикали $a_v$	По горизонтали $a_z$
		По норме	По норме
1	1	0,63	0,23
2	1,25	0,56	0,23
3	1,6	0,50	0,23
4	2	0,45	0,23
5	1,2	0,40	0,28
6	3,15	0,36	0,36
7	4	0,32	0,45
8	5	0,32	0,56
9	6,3	0,32	0,71
10	8	0,32	0,90
11	10	0,36	0,70
12	12,5	0,40	0,50
13	16	0,45	0,40
14	20	0,50	0,36
15	25	0,56	0,40
16	31,5	0,63	0,45

Таблица 3.2

№ п/п	Скорость вращения вала $n_d$ , об/мин	Циклическая частота $f$ , Гц	Средне- геометрическая частота $f$ , Гц	Ускорение $a$ , $m/s^2$			
				По вертикали $a_v$		По горизонтали $a_z$	
				Замерен- ное	По норме	Замерен- ное	По норме
1	52	0,88	1		0,63		0,23
2	66	1,1	1,25		0,56		0,23
3	84,6	1,41	1,6		0,50		0,23
4	106,8	1,78	2		0,45		0,23
5	136	2,21	1,2		0,40		0,28
6	172	2,88	3,15		0,36		0,36
7	211	3,52	4		0,32		0,45
8	265	4,43	5		0,32		0,56
9	336	5,6	6,3		0,32		0,71
10	426	7,1	8		0,32		0,90
11	531	8,85	10		0,36		0,70
12	660	11	12,5		0,40		0,50
13	846	14,1	16		0,45		0,40
14	1038	17,3	20		0,50		0,36
15	1326	22,1	25		0,56		0,40
16	1668	2,78	31,5		0,63		0,45

Таблица 3.3

№ п/п	Частота вращения $n_d$ , об/мин	Виброускорения $\text{мм/с}^2$		
		На платформе A	На фундаменте $a_\phi$	$\frac{a_\phi}{a}$
		Виброизоляция отключена		
1.	500			
2.	1000			
3.	1500			
4.	2000			
		Виброизоляция включена		
1.	500			
2.	1000			
3.	1500			
4.	2000			

Таблица 3.4

№ п/п	Частота вращения $n_d$ , об/мин	Угловая скорость $\omega$ рад/с.	Возмущающая частота $f$ , Гц	Собственная частота $f_o$ , Гц	$f/f_o$ .
1.	500			7	
2.	1000				
3.	1500				
4.	2000				

## ЛИТЕРАТУРА

1. Санитарные нормы общей и локальной вибрации на рабочих местах. СанПиН № 0122-01 НИИ санитарии, гигиены и профзаболеваний МЗ РУз, 2001г.
2. Нормы ЛН-403 Луганского тепловозоремонтного завода.
3. Способы защиты от шума и вибрации железнодорожного подвижного состава. Под редакцией Г.В. Бутакова. М. «Транспорт», 1978. 230с. Авторы: И.И. Болтер, А.М. Березовский, Г.В. Бутаков и др.
4. Вибрации в технике. Том. 5. Под редакцией д.т.н. проф. М.Д.Генкина. М. «Машиностроение», 1981. 496с. Авторы: В.В.Алексенко, А.С.Больших, М.Д.Генкин и др.
5. Исследование вибрационных процессов одноступенчатого зубчатого редуктора с разработкой методики по определению параметров вибрации с помощью ЭВМ З.Г.Гиоев, Ростов-на-Дону 2004 (РГУПС).
6. «Тепловозы» Панов Н.И. М., Транспорт, 1982г., 467с
7. «Тепловозы, конструкция, теория и расчет» (под. ред. Иванова) М., Транспорт, 1974г., 336с.
8. «Тепловозы, основы теории и конструкция» изд, 2-е перераб. (под. ред Кузьмича В.Д.) – М., Транспорт – 1991, 352с.
9. Пойда А.А.» Хуторянский Н.М Кононов В.В, Тепловозы. механические оборудование, устройство и ремонт, м: Транспорт, 1988. 320с.
10. Раевский Р К.П. Датчики механических параметров машин.- М., Изд. АН СССР. 1959.
11. Маслов Г.С. Расчёты колебаний валов. М: Машиностроение., 1968.
12. Бабаков И.М. Теория колебаний. М.: Наука, 1986.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>I. «ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ТАХОМЕТРА» (типа 7ТЭ)</b>	
1. Назначение тахометра	3
2. Технические характеристики	4
3. Устройство и принцип работы	6
4. Подготовка к работе	7
5. Порядок работы	7
6. Содержание отчёта	8
<b>II. «ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОГО ВИБРОМЕТРА» (типа ВВМ-201)</b>	
1. Цель работы	9
2. Рабочие условия применения	9
3. Технические характеристики	9
4. Устройство	11
5. Подготовка к работе	11
6. Порядок работы	12
7. Измерение виброускорения	13
8. Измерение виброскорости	13
9. Преобразователь пьезоэлектрический виброизмерительный ДН-3- М1	14
10. Назначение	14
11. Подготовка ВП к работе и установка его на исследуемый объект	14
12. Пьезоэлектрические датчики — пьезоэлектрические преобразователи	15
<b>III. «ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ВИБРАЦИЙ МАШИН И МЕХАНИЗМОВ»</b>	
1. Цель работы	21
2. Общие сведения	21
3. Типы колебаний	26
4. Источники вибрации	27
5. Вибрации и их влияние на организм человека	28
6. Методы борьбы с вибрацией	33
7. Структурная схема стенда	36
8. Описание электрической схемы стенда	37
9. Меры безопасности при работе на стенде	39
10. Порядок выполнения работы	39
11. Содержание отчёта	43
12. Контрольные вопросы	43
<b>IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕНИЙ И ЧАСТОТ</b>	

<b>КОЛЕБАНИЙ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА</b>		
1.	Цель работы	44
2.	Схема и описание работы	44
3.	Порядок выполнения работы по определению напряжений растяжения в коренном листе рессоры	48
4.	Содержание отчёта	50
5.	Контрольные вопросы	50
6.	Определение частоты собственных колебаний механизма привода к вспомогательному оборудованию тепловоза	51
7.	Цель работы	51
8.	Последовательность проведения работы	55
9.	Содержание отчёта	56
10.	Контрольные вопросы	56
	<b>ПРИЛОЖЕНИЯ</b>	<b>57</b>
	<b>ЛИТЕРАТУРА</b>	<b>59</b>