

Министерство общего и профессионального образования Российской Федерации

УРАЛЬСКАЯ ГОСУДАРСТВЕННАЯ ЛЕСОТЕХНИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ

Кафедра Охраны труда

В.Н. Старжинский

А.В. Зинин

**ИССЛЕДОВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ ВИБРАЦИИ И
ЭФФЕКТИВНОСТИ ВИБРОИЗОЛЯЦИИ
Методическое руководство к лабораторной работе**

Екатеринбург 1998

ЦЕЛЬ РАБОТЫ:

- изучить причины возникновения вибрации;
- ознакомиться с основными принципами нормирования параметров вибрации;
- ознакомиться с методикой измерения и приборами для определения вибрации;
- ознакомиться с методикой борьбы с вибрацией; - оценить эффективность виброизоляции.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Вибрация представляет собой механические колебательные движения, причиной возникновения которых являются динамические силовые воздействия при работе машин и агрегатов.

Вибрация данной частоты f (Гц) характеризуется тремя основными параметрами: амплитудой смещения A (м), колебательной скоростью v (м/с) и колебательным ускорением w (м/с²).

В случае гармонических колебаний эти величины связаны между собой соотношениями:

$$v = 2 \pi f A \quad (1)$$

$$w = 4 \pi^2 f^2 A \quad (2)$$

здесь и далее $\pi=3,1415$

В общем случае физическая величина, характеризующая вибрацию (например, колебательная скорость), является некоторой функцией времени:

$$v = v(t)$$

Математическая теория показывает, что такой процесс можно представить в виде суммы бесконечно долго длящихся синусоидальных колебаний с различными периодами и амплитудами. В случае периодического процесса частоты этих составляющих кратны основной частоте процесса :

$$f_n = n f_1,$$

где $n = 1, 2, 3 \dots, f$ - основная частота процесса, а амплитуды гармоник определяются по известным формулам разложения в ряд Фурье. Если же процесс не имеет определенного периода (случайные и кратковременные одиночные процессы), то число таких синусоидальных составляющих становится бесконечно большим, а их частоты распределены непрерывным образом, при этом амплитуды определяются разложением по формуле интеграла Фурье.

Таким образом, спектр периодического или квазипериодического процесса является дискретным (рис.1а), а случайного или кратковременного одиночного процесса - сплошным (рис.1б).

Чаще всего в дискретном спектре наиболее ярко выражена основная часть колебаний, обычно обусловленная работой привода. Если процесс есть результат суммирования нескольких периодических и случайных процессов, спектр его является смешанным, т.е. изображается в виде непрерывного и дискретного спектров, наложенных друг на друга (рис.1в).

Изображение сплошного спектра обязательно требует оговорки о ширине df элементарных частотных полос, к которым относится изображение. Если f_n - нижняя граничная частота полосы, а f_v - верхняя граничная частота, то в качестве частоты, характеризующей полосу в целом, берется среднегеометрическая частота

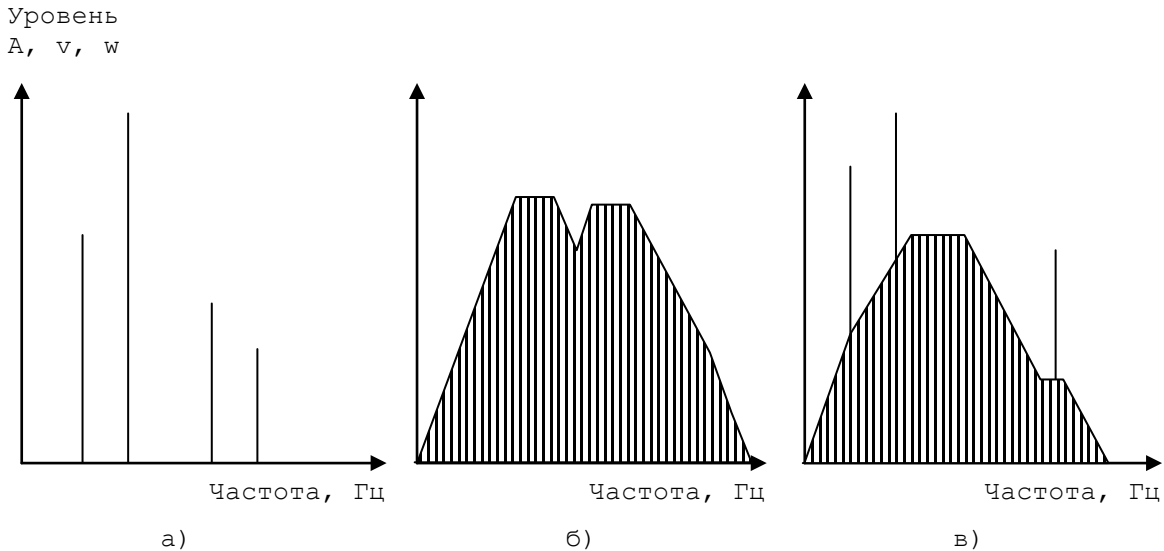


Рис.1. Спектры вибраций

а) дискретный; б) сплошной; в) смешанный

$$f_{cm} = \sqrt{f_n \cdot f_v}$$

В практике виброакустических исследований весь диапазон частот вибрации разбивается на октавные диапазоны (полосы). В октавном диапазоне верхняя граничная частота вдвое больше нижней

$$f_v/f_n = 2$$

Анализ вибрации может производиться также в третьоктавных полосах частот

$$f_v/f_n = \sqrt[3]{2}$$

Среднегеометрические частоты октавных полос стандартизированы и составляют: 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64, 125, 250, 500, 1000 Гц.

Вибрация оказывает вредное воздействие на организм человека. Наиболее чувствительны к вибрации нервная, сердечно-сосудистая системы и костно-суставной аппарат. Длительное воздействие интенсивных вибраций может привести к вибрационной болезни - стойкому нарушению различных функций организма, прежде всего, периферической и центральной нервной системы. Особенно опасны вибрации с частотой 3-30 Гц. В этом диапазоне частот лежат собственные частоты большинства внутренних органов, сердца, мозга.

Сильная вибрация мешает нормальной работе машин и механизмов: снижает точность работы станков, сокращает срок их службы, иногда вызывает разрушение машин и строительных конструкций. Особенно опасны резонансные вибрации, происходящие при совпадении частоты возмущающей силы и собственной частоты системы.

По способу передачи на человека вибрация подразделяется на:

- общую, передающуюся на тело сидящего или стоящего человека через опорные поверхности;
- локальную, передающуюся через руки человека.

Общая вибрация по источнику ее возникновения подразделяется на:

- транспортную, возникающую при движении транспорта при движении транспортных средств по дорогам;
- транспортно-технологическую, которая возникает при работе машин и транспортных средств и при перемещении их по специально подготовленной части производственного помещения, промышленной площадки;
- технологическую, которая возникает при работе стационарных машин или передающаяся на рабочие места, не имеющие источников вибрации.

По направлению действия вибрации подразделяются на вертикальную (вдоль оси Z ортогональной системы координат) и горизонтальную (вдоль осей X и Y).

2. ГИГИЕНИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И НОРМИРОВАНИЕ ВИБРАЦИИ

Гигиеническую оценку вибрации, воздействующей на человека в производственных условиях, производят одним из следующих методов:

- частотным (спектральным) анализом нормируемого параметра;
- интегральной оценкой нормируемого параметра;
- дозой вибрации.

При частотном (спектральном) анализе и интегральной оценке общей вибрации нормируемыми параметрами являются средние квадратичные значения виброскорости v (м/с) и логарифмические уровни виброскорости L_v в октавных полосах частот со среднегеометрическими частотами:

- для общей вибрации: 1, 2, 4, 8, 16, 31, 63 Гц;
- для локальной вибрации: 16, 31, 63, 125, 250, 500, 1000 Гц.

Логарифмические уровни виброскорости L_v в дБ определяются по формуле:

$$L_v = 20 \lg \frac{v}{v_0} \quad (3)$$

где v - среднее квадратическое значение виброскорости, м/с;
 $v_0 = 5 \cdot 10^{-8}$ - пороговое значение виброскорости, м/с.

Вибрация, воздействующая на человека, нормируется отдельно для каждого установленного направления в каждой октавной полосе частот по ГОСТ 12.1.012-78 "Вибрация. Общие требования безопасности" (табл.1).

Выписка из ГОСТ 12.1.012-78 "Вибрация. Общие требования безопасности"

Виды вибраций	Направления, по которым нормируется вибрация	Среднеквадратичные значения виброскорости, м/с 10^{-2} , не более (числитель)						
		Уровни виброскорости, дБ, в октавных полосах частот, Гц (знаменатель)						
		Для октавных полос со среднегеометрическими частотами, Гц						
ОБЩИЕ ВИБРАЦИИ		1	2	4	8	16	31,5	63
Транспортная	вертикальная (ось Z)	20 ----- 132	7,1 ----- 123	2,5 ----- 114	1,3 ----- 108	1,1 ----- 107	1,1 ----- 107	1,1 ----- 107
	горизонтальная (оси X и Y)	6,3 ----- 122	3,5 ----- 117	3,2 ----- 116	3,2 ----- 116	3,2 ----- 116	3,2 ----- 116	3,2 ----- 116
Транспортно-технологическая	вертикальная или горизонтальная	- ----- 117	3,5 ----- 108	1,3 ----- 102	0,63 ----- 101	0,56 ----- 101	0,56 ----- 101	0,56 ----- 101
Технологическая: на постоянных рабочих местах в производств. помещениях предприятий в производственных помещениях, где нет источников вибрации в заводоуправлениях, КБ и др. помещениях для работников умственного труда	вертикальная или горизонтальная	- ----- 108	1,3 ----- 99	0,45 ----- 93	0,22 ----- 92	0,2 ----- 92	0,2 ----- 92	0,2 ----- 92
		- ----- 100	0,65 ----- 91	0,18 ----- 85	0,089 ----- 84	0,079 ----- 84	0,079 ----- 84	0,079 ----- 84
		- ----- 91	0,18 ----- 82	0,063 ----- 76	0,032 ----- 75	0,028 ----- 75	0,028 ----- 75	0,028 ----- 75
ЛОКАЛЬНЫЕ ВИБРАЦИИ	на каждой из осей	Для октавных полос со среднегеометрическими частотами, Гц						
		16	31,5	63	125	250	500	1000
		5,0 ----- 120	3,5 ----- 117	2,5 ----- 114	1,8 ----- 111	1,3 ----- 108	0,9 ----- 105	0,65 ----- 102

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОБЕСПЕЧЕНИЮ ВИБРОБЕЗОПАСНЫХ УСЛОВИЙ ТРУДА

Основными методами борьбы с вибрацией машин и оборудования являются:

- снижение вибраций по средствам снижения или ликвидации возбуждающих сил в источнике возбуждения;
- отстройка от режима резонанса путем рационального выбора массы или жесткости колеблющейся системы;
- вибродемпфирование - увеличение механического сопротивления колеблющихся конструктивных элементов путем увеличения диссипативных сил при колебаниях с частотами, близкими к резонансным;
- динамическое гашение колебаний - присоединение к защищаемому объекту системы, реакции которой уменьшают размах вибрации объекта в точках присоединения системы;
- изменение конструктивных элементов машин и строительных конструкций.

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

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

Гашение колебаний предусматривает увеличение инерционного и упругого сопротивления колебательной системы, либо введение в механизмы специальных устройств - динамических гасителей.

В случаях, когда устранить или снизить вибрацию в машине не удастся, используется метод виброизоляции.

Виброизоляция - это уменьшение уровня вибрации защищаемого объекта путем уменьшения передачи колебаний этому объекту от источника колебаний. Виброизоляция осуществляется путем введения упругих элементов виброизоляторов, помещаемых между источником вибрации (машиной, механизмом) и фундаментом (и/или между фундаментом и работающим). Виброизоляторы можно выполнить в виде стальных пружин, рессор, прокладок из резины, резинометаллических конструкций и др.

Основным показателем, определяющим качество виброизоляции машины, установленной на виброизоляторы с жесткостью q и массой m , является коэффициент передачи КП. Он показывает, какая доля силы от общей динамической силы $F_{\text{маш}}$, действующей со стороны машины, передается виброизоляторами фундаменту ($F_{\text{осн}}$).

$$КП = \frac{F_{\text{осн}}}{F_{\text{маш}}} = \frac{1}{\left(\frac{f}{f_0}\right)^2 - 1} \quad (4)$$

где $f = \frac{\omega}{2\pi}$ - частота возмущающей силы, Гц;

f_0 - собственная частота системы (машины, установленной на виброизоляторах), Гц.

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{q}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{qg}{P}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{X_{cm}}} \quad (5)$$

где q - коэффициент жесткости виброизоляторов (сила, требующаяся для их деформации на единицу длины), Н/м;

g - ускорение свободного падения = 9,8 м/с²;

P - вес агрегата;

m - его масса, кг;

X_{cm} - статическая осадка виброизоляторов под действием собственного веса машины, м.

Чем ниже собственная частота по сравнению с частотой возмущающей силы, тем выше эффективность виброизоляции. При $f \ll f_0$ возмущающая сила действует как статическая и целиком передается основанию. При $f = f_0$ наступает резонанс, сопровождающийся резким возрастанием уровня вибрации.

При $f > 2f_0$ режим резонанса не осуществляется, значение КП равно единице, а при дальнейшем увеличении оно становится меньше единицы, так как система оказывает возбуждающей силе все большее инерционное сопротивление. Вследствие этого передача вибрации через виброизоляторы уменьшается.

Обычно эффективность виброизоляции оценивают в дБ:

$$ВИ = 20 \lg \frac{1}{КП} \quad (6)$$

Чем больше статическая осадка, тем ниже собственная частота и тем эффективнее виброизоляция. Однако это обстоятельство противоречит экономическим и в ряде случаев техническим требованиям, так как приводит к сложным и дорогостоящим конструкциям виброизоляторов с большими габаритами, а система на таких виброизоляторах приобретает слишком большую подвижность по отдельным степеням свободы. Поэтому необходимо искать компромисс между гигиеническими, техническими и экономическими требованиями. Поэтому существует оптимальное соотношение между частотой возбуждающей силы и собственной частотой системы:

$f/f_0 = 3 \dots 4$, что соответствует $КП = 1/8 \dots 1/15$.

4. ВИБРОИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

Вибрацию измеряют в соответствии с требованиями СТ СЭВ 1931-78 "Вибрации. Общие требования к проведению измерений", действующих санитарных норм, а также стандартов по ограничению вибраций отдельных видов технологического оборудования. Из многочисленных видов измерительных приборов следует отметить отечественную измерительную аппаратуру ИШВ-1 и ВШВ-003 (производства завода "Виброприбор" г. Таганрог) со стандартными октавными фильтрами, а также измерительный прибор ВИП-2 и виброизмерительную аппаратуру ВА-2 (того же завода). Из импортной аппаратуры широко используются прецизионные виброакустические тракты фирмы "Robotron" (RFT) производства ГДР, а также фирмы "Брюль и Кбер" (Дания).

Все эти приборы включают в себя: виброизмерительный преобразователь; измерительный усилитель; частотные фильтры; регистрирующие приборы. Принцип работы

приборов состоит в преобразовании колебаний подвижного элемента (машины) в электрический сигнал, который вырабатывается пьезоэлементом пропорционально ускорению вибрации и передается в выходное устройство. Виброизмерительные преобразователи имеют небольшие габариты и легко устанавливаются на исследуемый объект путем закрепления по средством штифта или магнита. Вибропреобразователи могут быть выполнены в виде датчиков амплитуды колебаний, датчиков виброскорости и датчиков виброускорения. Последние получили наибольшее распространение.

5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Установка для исследования параметров вибрации и эффективности виброизоляции включает в себя следующие узлы:

- вибростенд, состоящий из плиты 1 с двигателем постоянного тока 2 с эксцентриком 3 (имитация рабочей машины), плиты 4 (имитация фундамента), резиновых виброизоляторов 5, устанавливаемых между "машиной" и "фундаментом" и датчика виброускорений 6, закрепленного на "фундаменте".
- задатчик частоты колебания "машины" (числа оборотов двигателя), состоящий из автотрансформатора, реостата, и контрольно-измерительных приборов: вольтметра и милливольтметра;
- измерительный прибор ВШВ-003 **или** комплект виброизмерительной аппаратуры ВА-2, состоящий из блока управления 7, коммутатора 8 с встроенным предусилителем и измерительного усилителя 9.

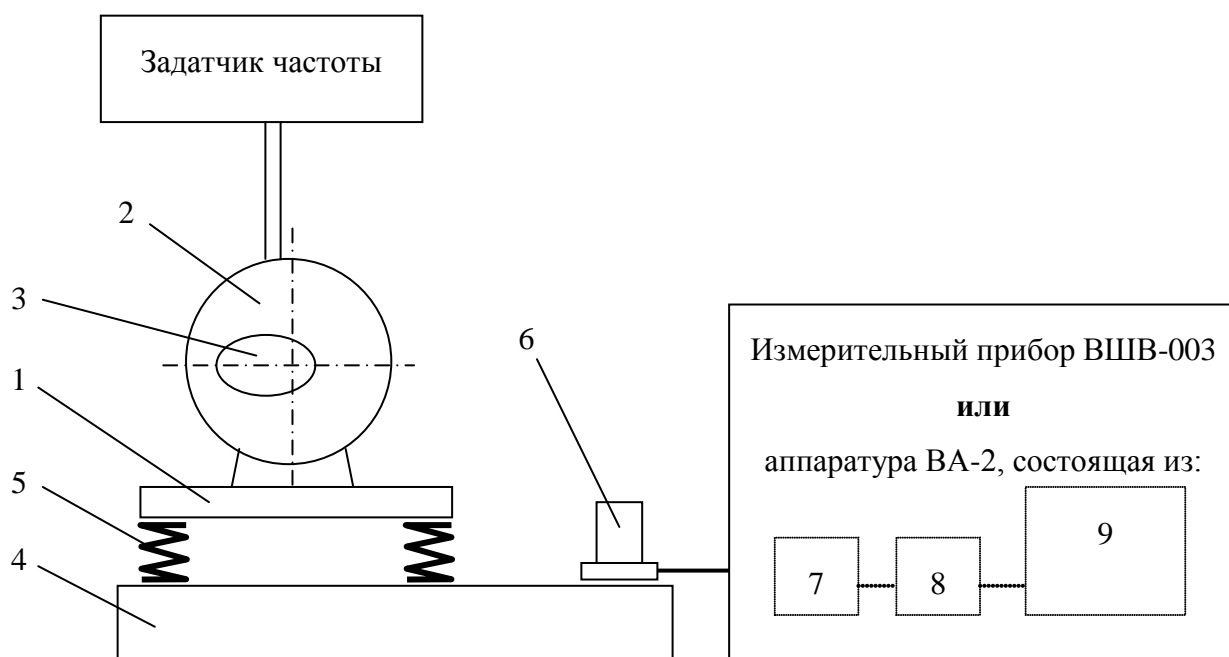


Рис.2 Схема экспериментальной установки

В зависимости от используемой в экспериментальной установке измерительной аппаратуры определение виброскорости следует производить в соответствии с п.5.1 (для шумовиброметра ВШВ-003) **или** в соответствии с п.5.2 (для комплекта виброизмерительной аппаратуры ВА-2), либо руководствоваться указаниями преподавателя

5.1. Определение виброскорости по виброшумомеру ВШВ-003.

Перед включением прибора переключатели установить в следующие положения
 делитель "ДВІ" – 80;
 делитель "ДВІІ" – 50;
 фильтры – "ЛИН";
 кнопка "V" – нажата.

Включение прибора производится переводом переключателя "РОД РАБОТЫ" в положение в положение "S".

При таком положении переключателей светодиод (лампочка) будет гореть против цифры 10^4 на линейке измерения виброскорости, обозначенной " $mm \cdot S^{-1}$ ".

Переключением делителей ДВІ и ДВІІ добиться установки стрелки прибора в средней части шкалы. Отсчет виброскорости следует производить по шкале "0...10" или "0...3" в зависимости от того, против какой цифры на линейке " $mm \cdot S^{-1}$ " горит светодиод. Если эта цифра кратна 10, то отсчет следует производить по шкале " $0...10$ ", а если кратна 3, то по шкале " $0...3$ ".

Наибольшее показание (вся шкала) равна указанной цифре на линейке " $mm \cdot S^{-1}$ ". Поэтому показание стрелки следует умножить на цифру на линейке " $mm \cdot S^{-1}$ ", против которой горит светодиод, и разделить на наибольшее значение на соответствующей шкале прибора.

$$\text{Виброскорость} = \text{отсчет по шкале} \frac{\text{Цифра на шкале } "mm \cdot S^{-1}"}{\text{Максимальный отсчет по шкале}}, \text{ мм/с}$$

Например, светодиод горит против цифры 30 на шкале " $mm \cdot S^{-1}$ ", поэтому отсчет производим по шкале "0...3". Пусть отсчет = 1,7.

$$\text{Виброскорость} = 1,7 \frac{30}{3} = 17 \text{ мм/с.}$$

5.2. Определение виброскорости по комплекту виброаппаратуры ВА-2

Включить комплект измерительной аппаратуры ВА-2 для прогрева в течение 3-5 минут.

Предварительно органы управления поставить в следующие положения:

- 1) тумблер блока управления (9) в положение 1/0дБ;
- 2) переключатель "Коммутация датчиков" в положение "1" (или то, на какой вход включен датчик).

Органы управления измерительного усилителя поставить в положения:

- 1) переключатель "Род работы" в положение "10-3 м/с"
- 2) переключатель "Фильтр" в положение "25 Гц"
- 3) переключатель "Делитель 1" - " $10^3/60\text{дБ}$ "
- 4) переключатель "Делитель 2" - " $10^2/40\text{дБ}$ "

Включить прибор переключателем "Род измерений" в положение "Действ., Быстро".

Переключая сначала "Делитель 1", а затем "Делитель 2" установить стрелку прибора в пределы отградуированной части шкалы (желательно в правую часть шкалы), и произвести отсчет.

Отсчет следует производить по шкале, которая кратна коэффициенту, на который установлен "Делитель 2".

Для определения величины виброскорости необходимо отсчет по стрелочному прибору перемножить:

на 10^{-3} , указанной переключателем "Род работы",

на коэффициенты, соответствующие положениям переключателей "Делитель 1" и "Делитель 2", деленные на максимальный отсчет соответствующей шкалы.

Пример. При измерениях виброскорости ручки переключателя оказались в следующих положениях:

"Род работы" 10^{-3} м/с; (всегда)

"Делитель 1" $10^2/40$ дБ;

"Делитель 2" **30/30**дБ, поэтому отсчет производим по шкале **0...3** м/с.

(Допустим, что он равен 1.6)

Виброскорость = $1.6 \cdot 10^{-3} \cdot 10^2/1 \cdot 30/3 = 3$ м/с,

6. ПОРЯДОК ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

6.1. Первоначально "машину" жестко установить на "фундамент" (без резиновых виброизоляторов) и закрепить при помощи гаек или болтов. Делать это нужно аккуратно, чтобы не повредить датчик, установленный на "фундаменте".

Преподаватель устанавливает рабочую частоту вращения "машины".

Произвести измерение виброскорости v_1 .

6.2. Остановить вибростенд. Между "машиной" и "фундаментом" установить виброизолирующие прокладки.

Перед установкой виброизоляторов произвести измерение их статической осадки $X_{ст}$. Для этого следует произвести измерение высоты виброизоляторов в свободном положении и в сжатом - под действием веса "машины" и взять разность между этими величинами. Для получения более точного результата (как в свободном состоянии, так и в сжатом) можно измерить высоту каждого из 4-х виброизоляторов и вычислить среднее арифметическое значение. За величину статической осадки, в этом случае, принять разность средних значений в свободном и сжатом состояниях.

Запустив вибростенд, произвести измерения виброскорости v_2 при той же частоте вращения, что и в первом случае.

7. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ И ВЫВОДЫ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты измерений виброскорости v_1 и v_2 , а также рассчитанные по формуле 3 величины уровней виброскорости L_{v1} и L_{v2} , заносятся в табл.2. В эту же таблицу вносятся нормативные значения виброскорости и уровней виброскорости для октавной полосы, соответствующей частоте, при которой проводились измерения.

По результатам замеров делается вывод о соответствии или несоответствии параметров вибрации при наличии виброизоляции и без нее требованиям ГОСТ 12.1.012-78 "Вибрация. Общие требования безопасности".

Результаты измерений и расчета параметров виброизоляции по формулам 4, 5, 6 заносятся в табл. 3 и дается заключение по эффективности виброизоляции.

Таблица 2

№ п/п	n _э , об/мин	f = n _э /60	v ₁ , м/с	$Lv_1 = 20 \lg \frac{v_1}{5 \cdot 10^{-8}}$	v ₂ , м/с	$Lv_2 = 20 \lg \frac{v_2}{5 \cdot 10^{-8}}$	Нормы		
							f, Гц	v, м/с	L, дБ

Таблица 3

Эффективность виброизоляции

№ п/п	f, Гц	X _{ст} , м	$f_o = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{X_{ст}}}$	$KП = \frac{1}{(f/f_o)^2 - 1}$	$ВИ = 20 \lg \frac{1}{KП}$	$ВИ_{эксп} = Lv_1 - Lv_2$

8. ОТЧЕТ ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ

Отчет о лабораторной работе должен содержать:

1. Наименование работы;
2. Цель работы;
3. Схему экспериментальной установки.
4. Таблицы с результатами измерений и расчетов (табл.2,3)
5. Заключение о соответствии параметров вибрации нормативным значениям и вывод об эффективности виброизоляции.

ИСПОЛЬЗОВАННЫЕ ИСТОЧНИКИ

1. Охрана труда в машиностроении. Под ред. Е.Я. Юдина - 2-е изд., перераб и доп. М.: Машиностроение, 1985, 432 с., ил.
2. ГОСТ 12.1.012-78.ССБ. Вибрация. Общие требования безопасности.

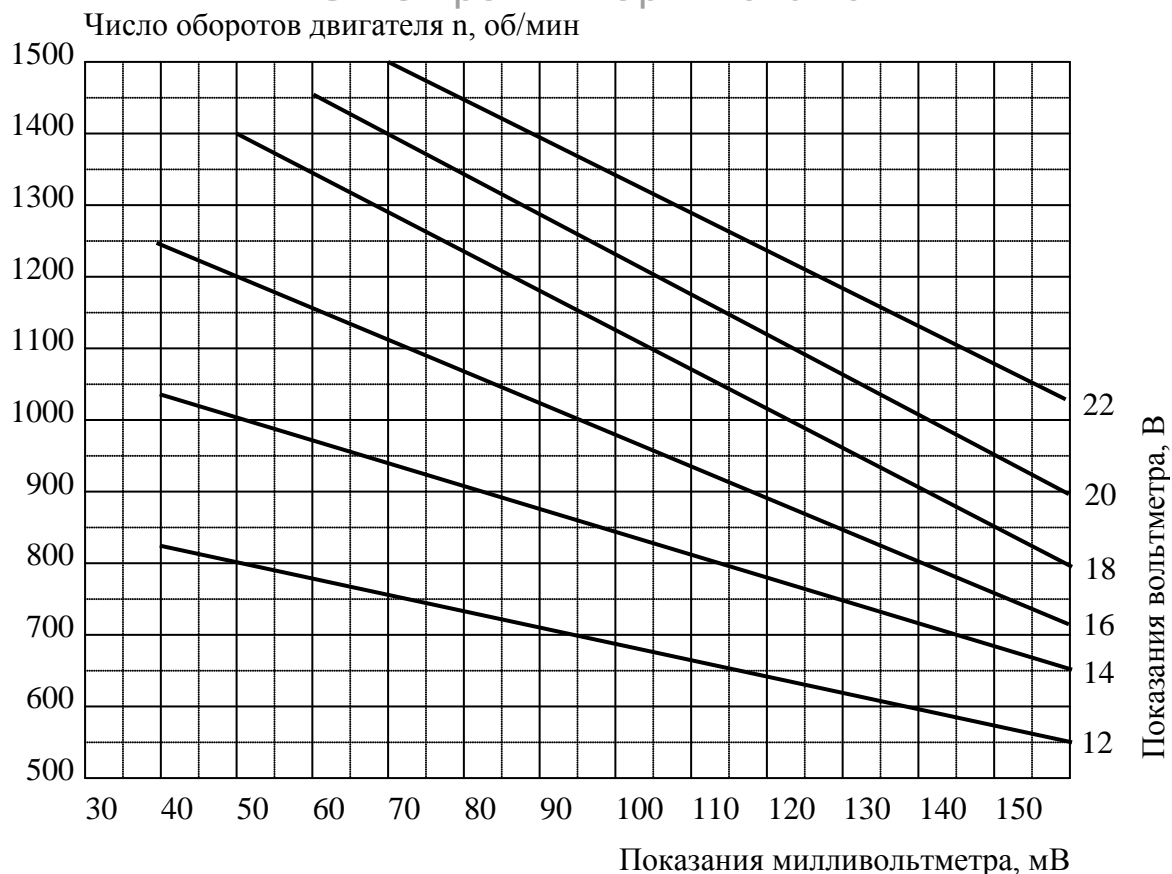


Рис.3 Торировочные кривые для определения числа оборотов двигателя вибростенда

КАЛЬКУЛЯТОР

v * → (м/с)	Логарифмические уровни виброскорости, дБ			
	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²
1.6	50	70	90	110
1.8	51	71	91	111
2.0	52	72	92	112
2.2	53	73	93	113
2.5	54	74	94	114
2.8	55	75	95	115
3.2	56	76	96	116
3.5	57	77	97	117
4.0	58	78	98	118
4.5	59	79	99	119
5.0	60	80	100	120
5.6	61	81	101	121
6.3	62	82	102	122
7.1	63	83	103	123
7.9	64	84	104	124
8.9	65	85	105	125
10.0	66	86	106	126
11.2	67	87	107	127
12.6	68	88	108	128
14.1	69	89	109	129
15.8	70	90	110	130

кп*→	ВИ, дБ	
	Г	10 ⁻¹
1.00	0	20
0.89	1	21
0.79	2	22
0.71	3	23
0.63	4	24
0.56	5	25
0.50	6	26
0.45	7	27
0.40	8	28
0.35	9	29
0.32	10	30
0.28	11	31
0.25	12	32
0.22	13	33
0.20	14	34
0.18	15	35
0.16	16	36
0.14	17	37
0.13	18	38
0.11	19	39
0.10	20	40