

# **ВИБРОАКУСТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ:**

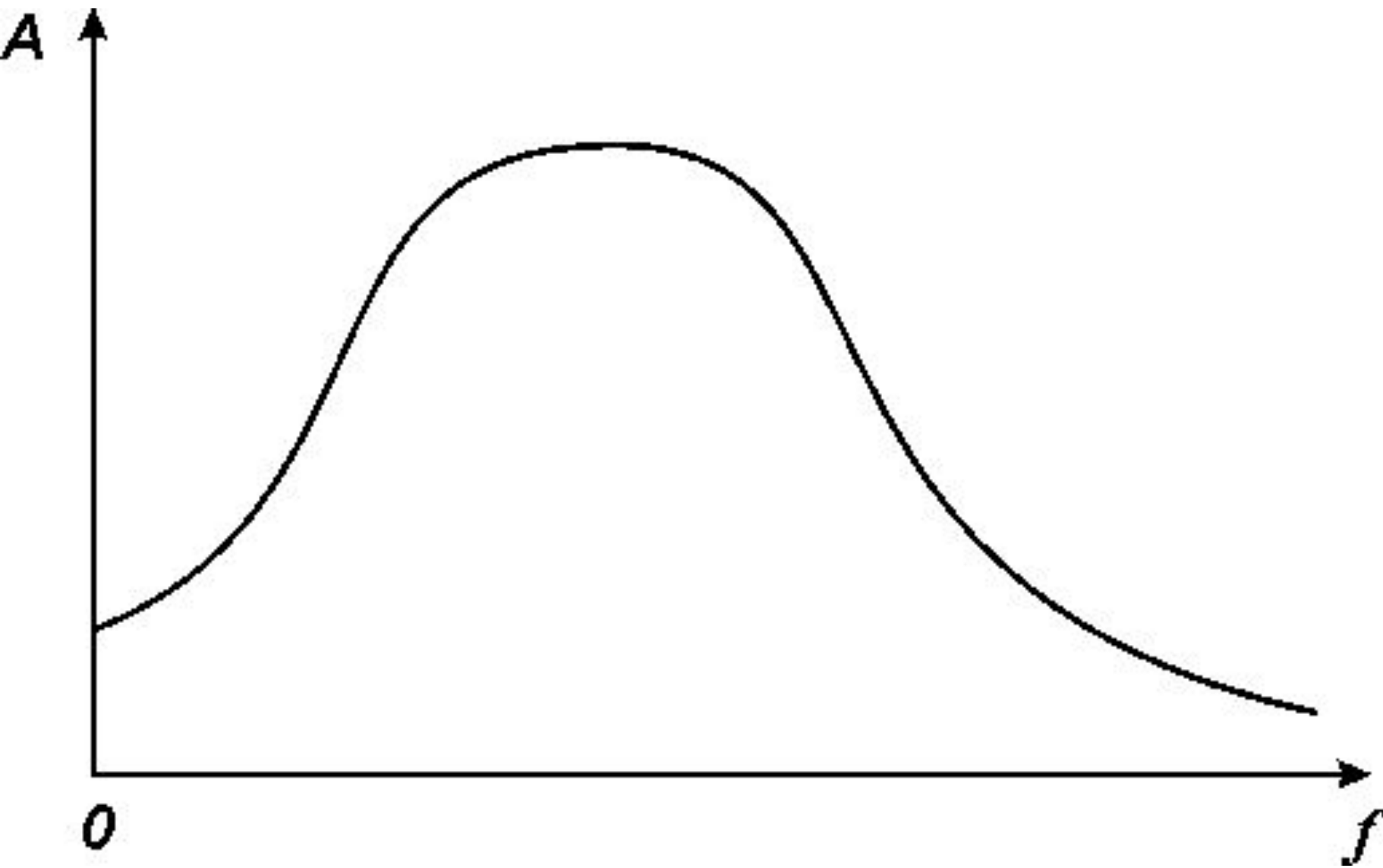
**1. Общие положения**

**2. Аппаратура для измерений вибраций и шумов**

**3. Датчики вибрации:**

- **пьезоэлектрические преобразователи,**
- **индукционные преобразователи вибрации,**
- **индуктивные датчики вибрации,**
- **емкостные датчики вибрации,**
- **тензорезистивные датчики вибрации.**

**4. Практические вопросы реализации электрических измерений.**



**Спектр случайного  
колебания.**

## УРОВЕНЬ ЗВУКОВОГО ДАВЛЕНИЯ (в дБ):

$$L_p = 10 * \lg \left( \frac{p^2}{p_0^2} \right)$$

где  $p$  — среднеквадратическое значение звукового давления;

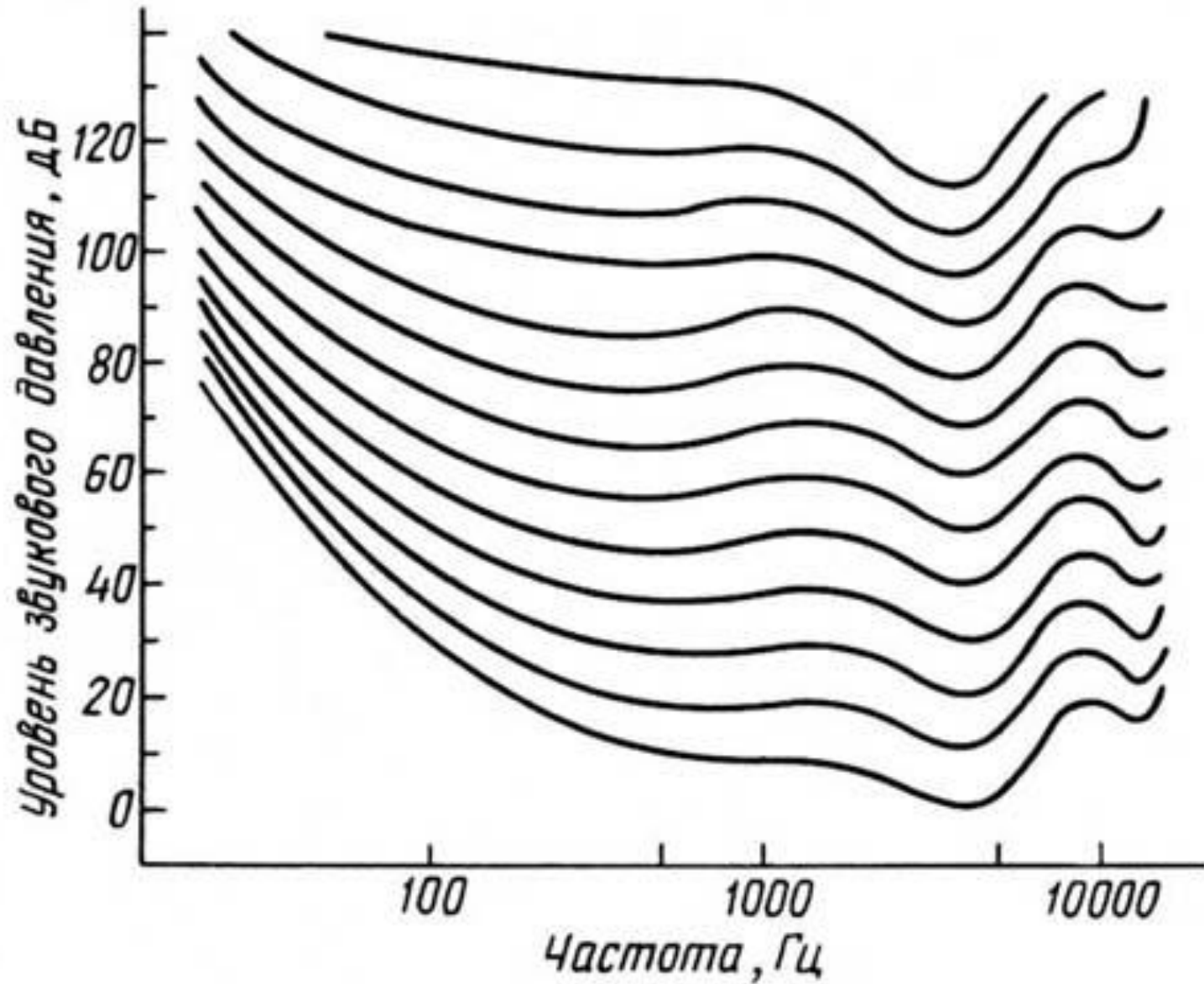
$p_0$  — среднеквадратическое значение опорного звукового давления,

Характеристикой интенсивности звука является громкость. Громкость измеряется в сонах. 1 сон - громкость тона 1 кГц при уровне 40 дБ. Звук, имеющий 2, 3, .. сона, Типичным слушателем воспринимается как вдвое, втрое, .. громкий звук, чем в 1 сон

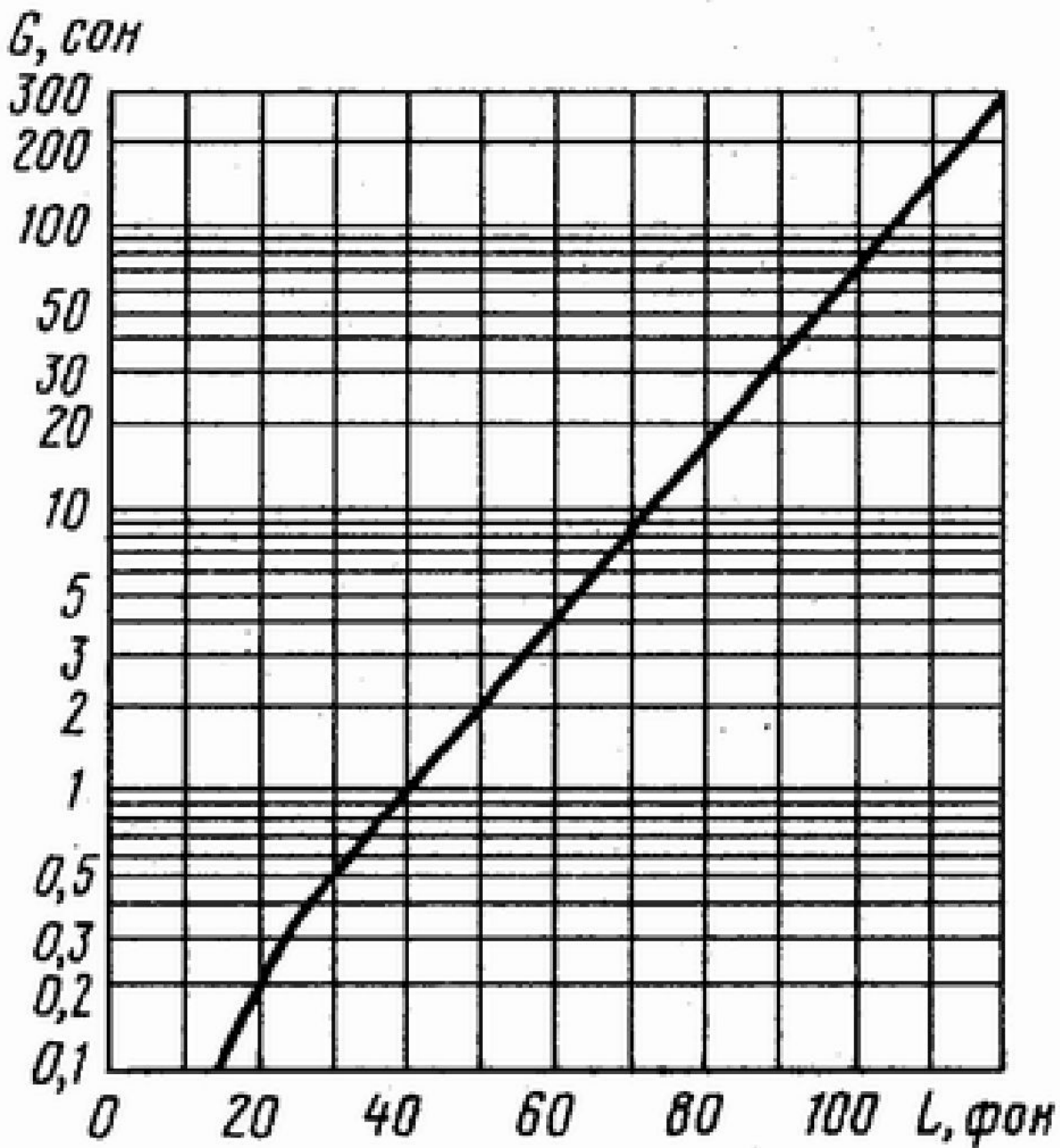
Вторая характеристика учитывает уровень звукового давления и частоту звука.

**Уровень громкости** -  $\Phi$  -  
уровень тона частотой  $\nu$  кГц,  
субъективно равного по громкости оцениваемому сигналу.  
Единица измерения - **фон**

# КРИВЫЕ РАВНОЙ ГРОМКОСТИ

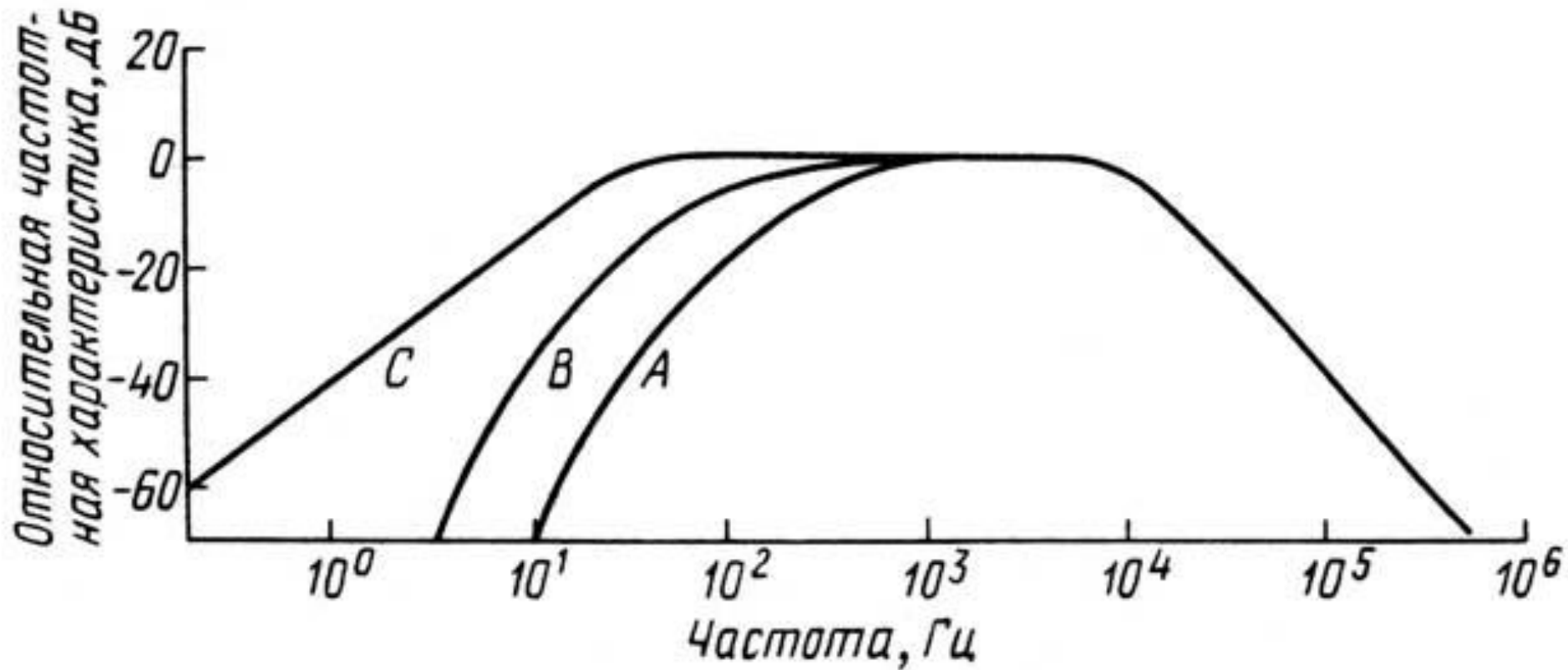


Связь  
между  
уровнем  
громкости  
и  
громкостью



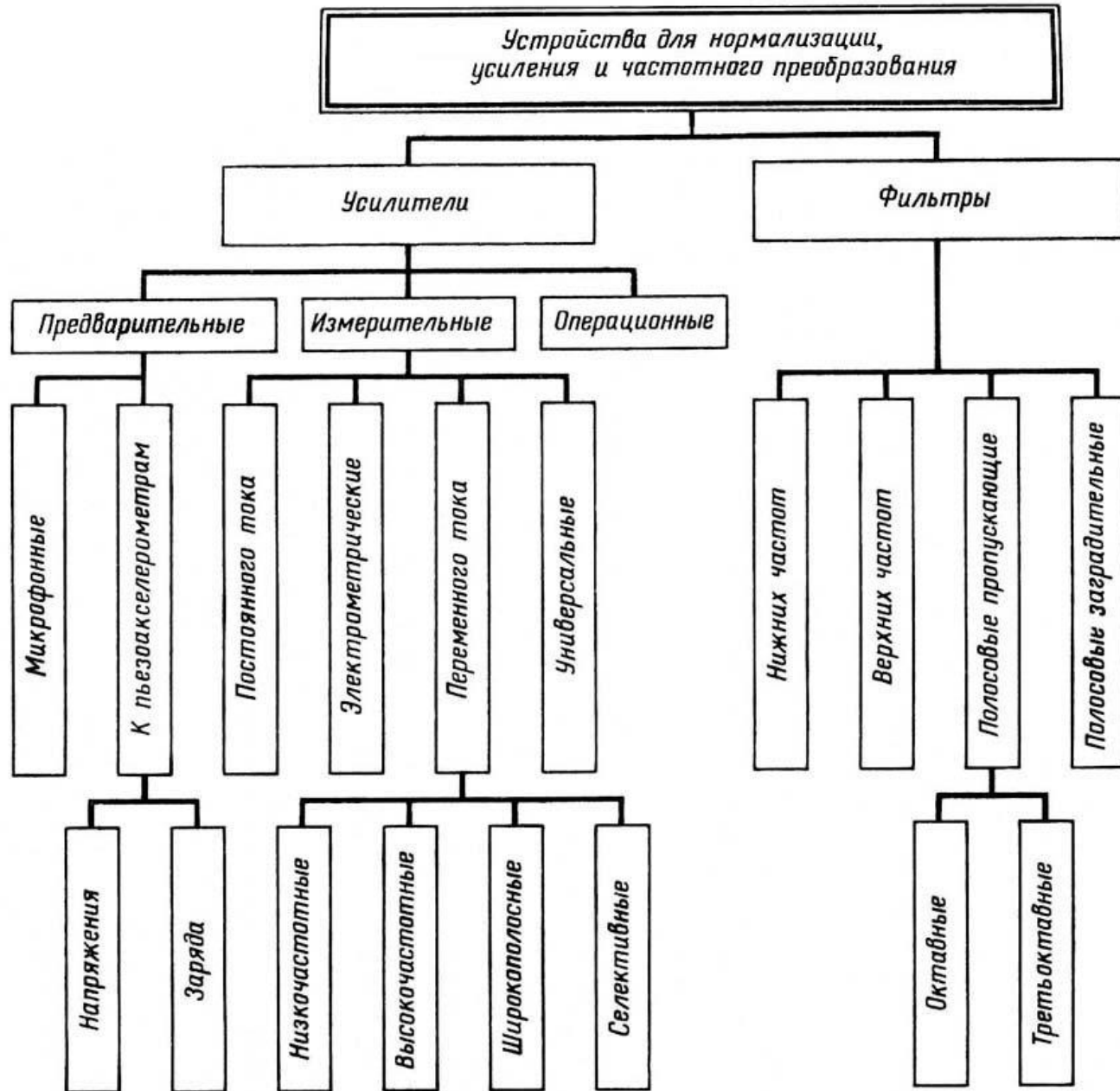
$G$  (

$$\left( \frac{L(\text{фон}) - 40}{10} \right)^6$$

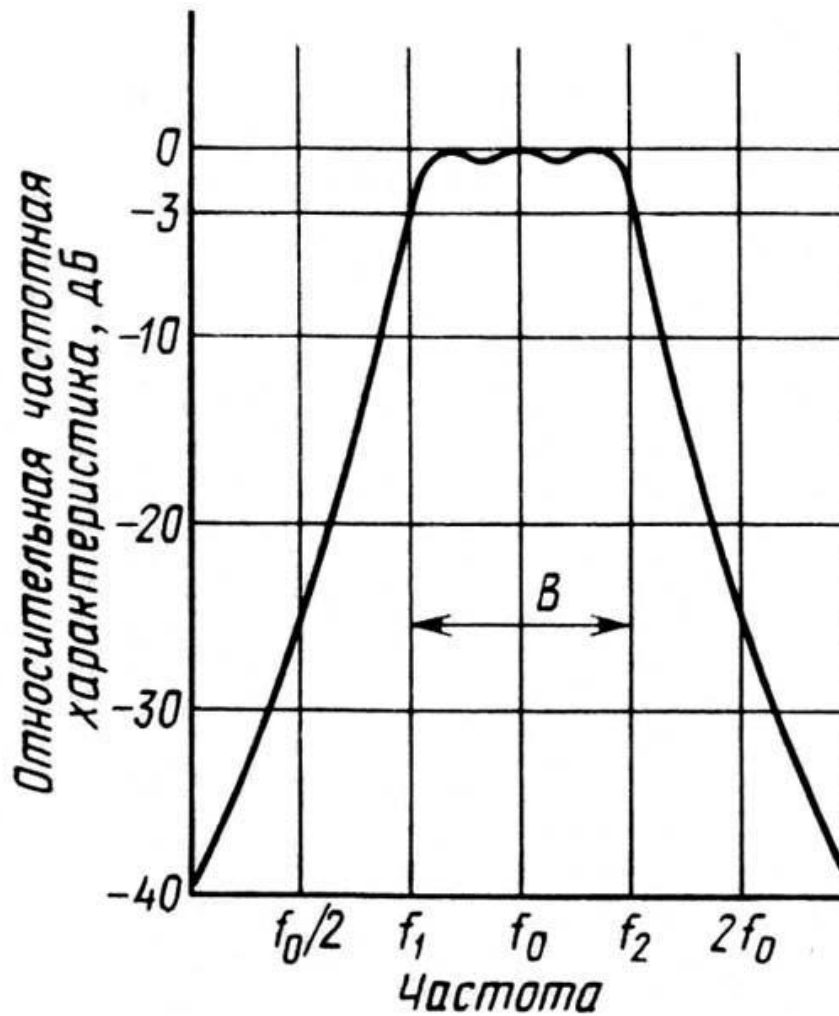


**Кривые равной громкости.**

## 4.2. Средства измерения вибраций и шумов.







**Передаточная характеристика полосового фильтра.**

**В системах измерения шума и вибраций принято использовать так называемые *октавные* и *третьоктавные* фильтры**

**Полоса пропускания  $B$  таких фильтров определяется из условия:**

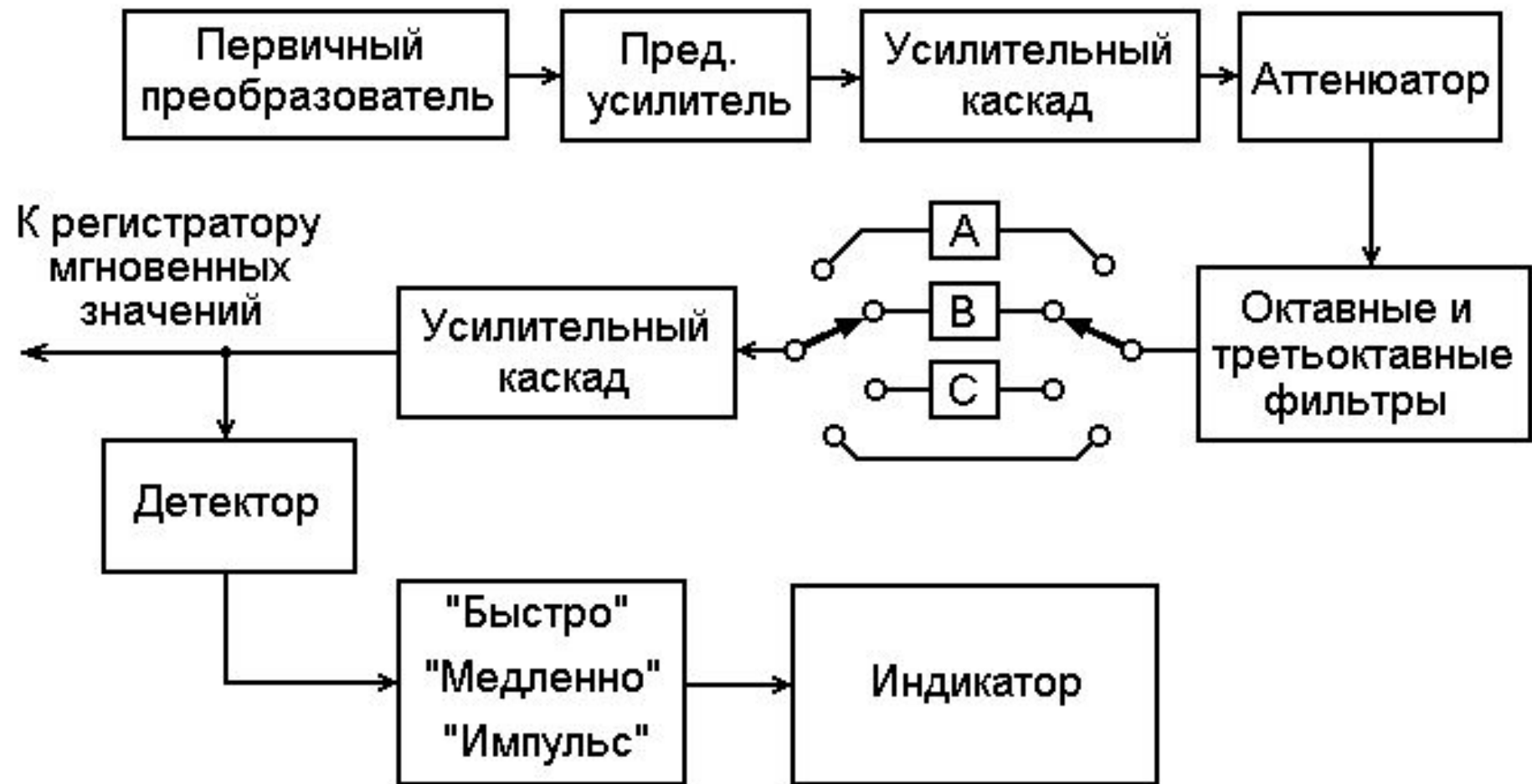
$$f_2 = 2^a f_1$$

**где  $f_1$  и  $f_2$  – нижняя и верхняя границы полосы пропускания,  $a = 1$  для октавных фильтров и  $a = 1/3$  для третьоктавных**

**Центральная частота для полосовых фильтров определяется соотношением:**

$$f_0 = \sqrt{f_1 f_2}$$

<b>Центральные частоты <math>f_0</math> октавных фильтров, Гц</b>	<b>16; 31,5; 63; 125; 250; 500; 1000; 2000; 4000; 8000; 16000</b>
<b>Центральные частоты <math>f_0</math> третьоктавных фильтров, Гц</b>	<b>16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80; 100; 125; 160; 200; 250; 315; 400; 500; 630; 800; 1000; 1250; 1600; 2000; 2500; 3150; 4000; 5000; 6300; 8000; 10000; 12500; 16000; 20000</b>



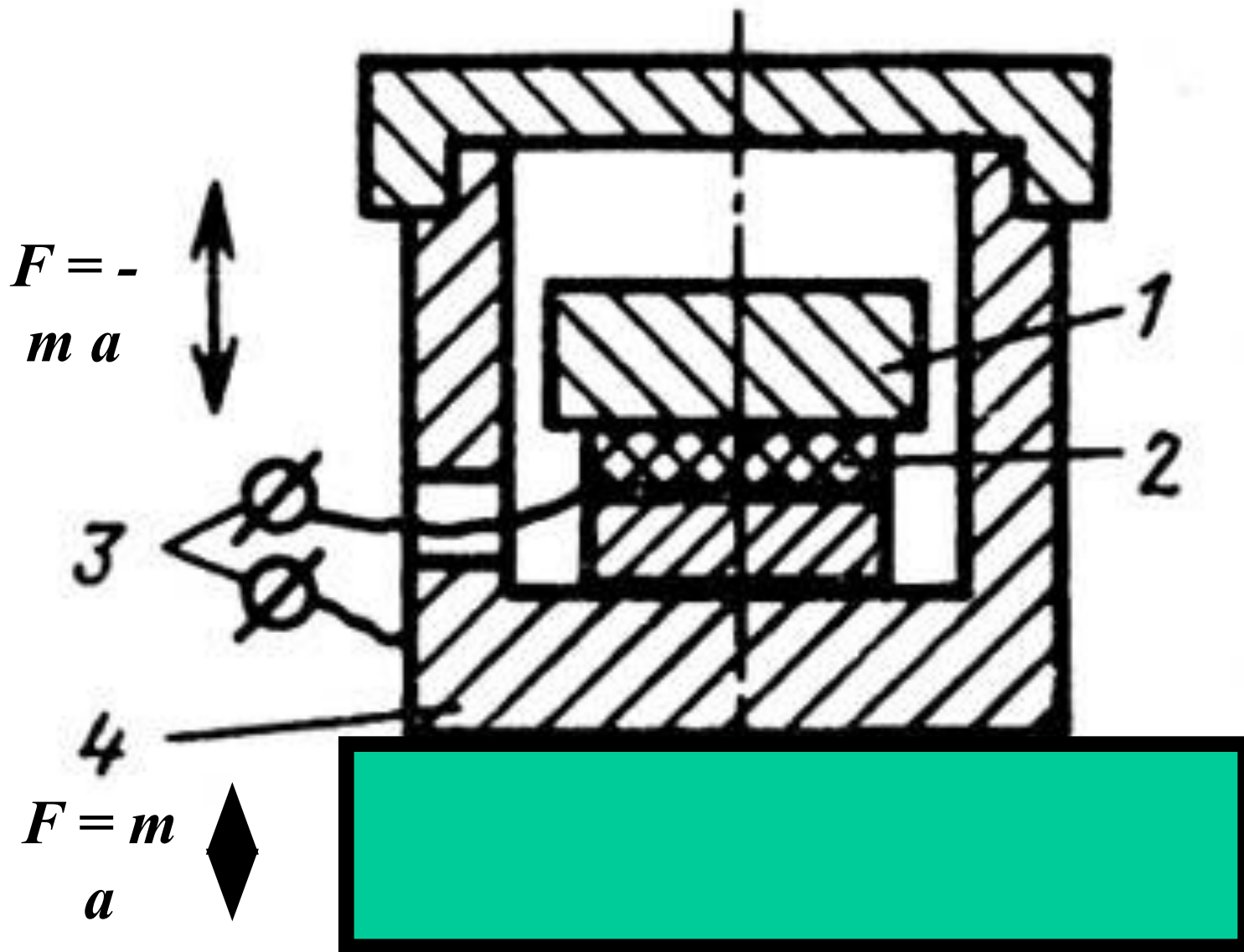
**Структурная схема измерителя параметров шума и вибраций**

# **МЕТОДЫ ОБРАБОТКИ (АКУСТИЧЕСКИХ) СИГНАЛОВ**

- **Визуальный анализ временного наполнения и динамики сигналов**
- **Выделение медленных трендов и быстроизменяющихся составляющих сигналов**
- **Анализ спектрального состава сигнала и аналогичные методы анализа (амплитудно-частотные характеристики, спектры, фильтрация – аппаратная и цифровая)**
- **Анализ динамики спектрального сигнала с использованием окон фильтрации, вейвлет-анализа и т.д.**
- **Анализ псевдо-хаотического и хаотического сигнала, идентификация возникновения и прекращения событий, анализ фрактальности и проведение R/S анализа.**
- **Сжатие сигнала (проблема редукции и методы ее решения)**

## Датчики вибрации:

- **пьезоэлектрические преобразователи вибрации (акселерометры),**
- **индукционные преобразователи вибрации (датчики скорости),**
- **индуктивные датчики вибрации (измерители скорости),**
- **емкостные датчики (перемещения) вибрации,**
- **тензорезистивные датчики виброускорений.**

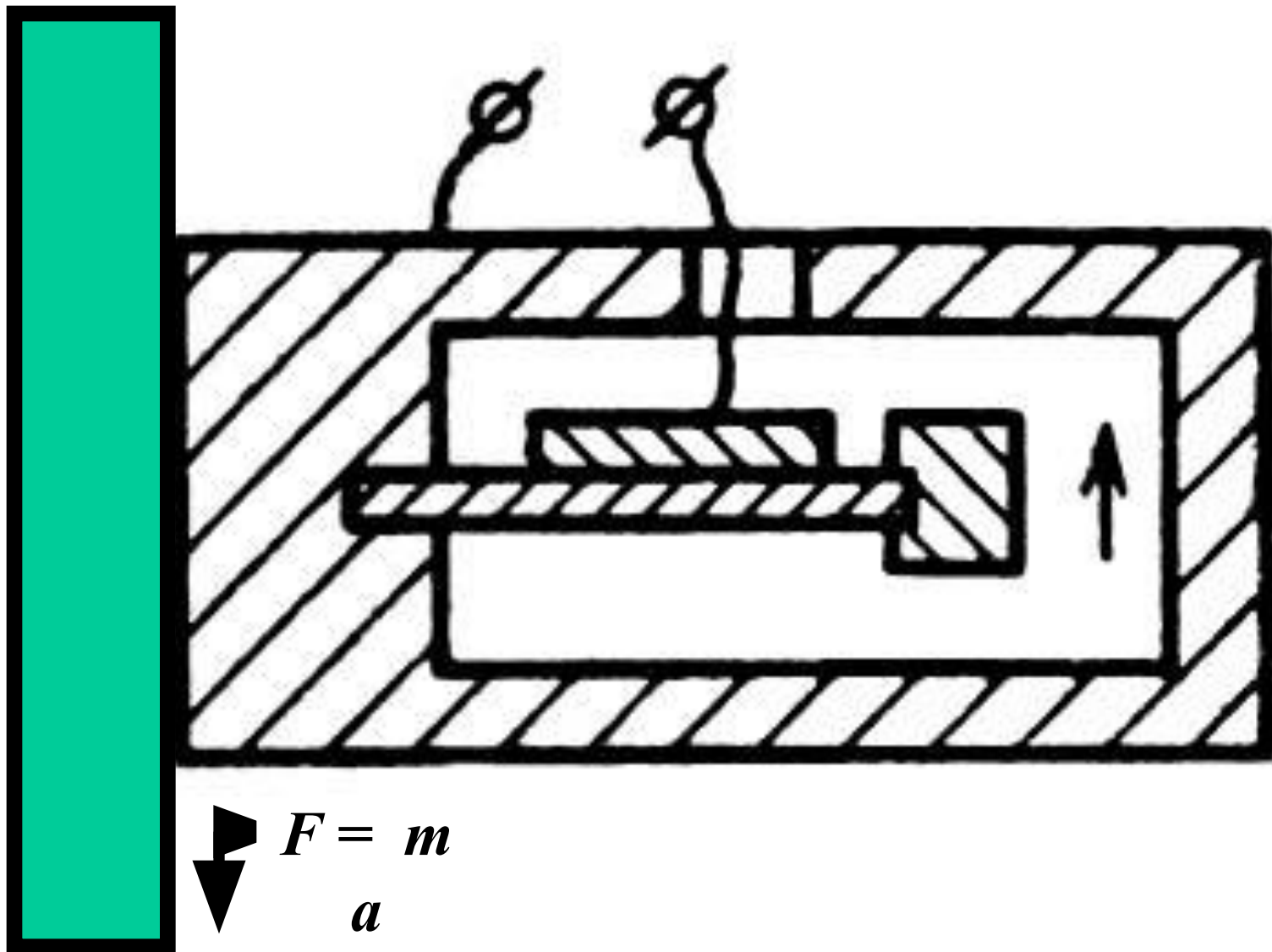


Конструкция простейшего пьезоэлектрического преобразователя ускорения (акселерометра).

## Для повышения чувствительности преобразователей

- увеличивают инерционную массу,
- применяют пьезокерамику, обладающую высоким пьезомодулем (титанат бария и родственные материалы),
- используют изгибные деформации пьезоэлемента.

**В качестве примера высокочувствительных акселерометрами, построенных с использованием принципа изгибных деформаций, можно привести отечественные акселерометры Д19, ИС-598 и ИС-598А. Их принцип пояснен на слайде ниже.**



$$F = -ma$$

### 4.3. Конструкция высокочувствительного акселерометра



## **Основные достоинства пьезоакселерометров:**

- Высокая чувствительность датчика,
- широкий диапазон рабочих частот,
- малая чувствительность к магнитным полям,
- большая вибрационная и ударная прочность,
- возможность создания преобразователей с малыми размерами и массой.

Для снижения нижней границы частотного диапазона в качестве предварительных усилителей применяют усилители заряда, а увеличение верхней граничной частоты достигается снижением массы датчика и качественным креплением его к объекту (например, с помощью резьбового соединения).

Для повышения ударной прочности применяют дополнительное поджатие инерционной массы к пьезоэлементу, как это сделано в акселерометрах типа 1ПА-6 и 1ПА-7.

Модел ль	Чувствитель ность мВ·с <sup>2</sup> /м	$f_p$ , кГц	Предельно е ускорение, м/с <sup>2</sup>	Мас са, г	Габари ты, мм
<b>Отечественные</b>					
ИС-3 12	0,05 – 0,15	80	2000	22	-
1ПА- 6	3,0 – 4,0	25	10 000	48	Ø20×30
1ПА- 7	0,5	48	15 000	30	Ø20×24
Д-14	2,5	28	10 000	27	Ø16×29
Д-19	20	-	-	100	Ø42,5×4 3,5
<b>«Брюль и Кьер»</b>					
4349	0,6 – 1,2	40 – 50	20 000	18	-
4332	6	25	1000	30	Ø17×22
4335	2	35	2000	18	Ø14×20

$$f_v = 0,3 f_p$$

# Методы измерения для пьезоакселерометров

## 1. Использование прямого пьезоэффекта.

Измеряется электрический заряд или напряжение при действии ускорения.

Недостаток:

- измерение только быстроизменяющихся процессов.

## 2. Использование резонансного метода измерения.

Деформация кристалла пропорциональна ускорению.

Кристалл кварца или сегнетокерамики включается в резонансный контур эл. генератора. При этом частота генерируемых эл. колебаний зависит от внешнего действующего ускорения.

Измеряется частота колебаний генератора, что позволяет измерять низкочастотные ускорения.

## Индукционные преобразователи

Принцип действия индукционных преобразователей основан на явлении электромагнитной индукции, т.е. на возникновении электродвижущей силы (ЭДС) в электрической катушке при изменении магнитного поля. Таким образом, в них измеряется виброскорость, так как именно она вызывает изменение магнитного поля в датчике. Поэтому чувствительность таких датчиков характеризуется величиной напряжение/виброскорости, ( $V/(m/c)$ ).

Индукционный преобразователь состоит из корпуса, сейсмической массы на маятниковой или осевой подвеске и индукционного элемента. При колебаниях сейсмической массы происходит относительное перемещение катушки и постоянного магнита специальной формы, в результате чего в катушке наводится ЭДС. Для повышения чувствительности преобразователя увеличивают число витков катушки. Но увеличение числа витков приводит к уменьшению частотного диапазона измерения со стороны высоких частот.

# Индукционные преобразователи виброскорости

Модель ИП	Коэффициент электро-механической связи, Вч/м	Габаритные Размеры, мм	Масса, кг
И001	12	135×75×75	1,5
И002	0,8	185×172×160	4
ВИБ-А	10 – 30	340×160×145	10,6
СТКД	3 – 4	700×380×300	30
СВКД	2 – 3		40
ДС-В	400	856×366×422	70
ВДК	–	Ø52×110	0,47

**ОСНОВНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА**  
**ИНДУКЦИОННЫХ**  
**преобразователей виброскорости:**

- простота конструкции,
- надежность,
- высокая чувствительность

**НЕДОСТАТКИ:**

- ограниченный частотный диапазон  
( от 6 - 8 Гц до 500 - 1500 Гц).

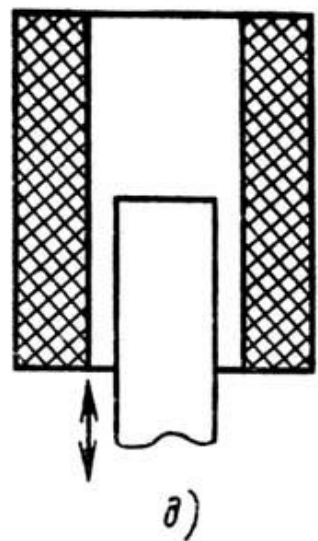
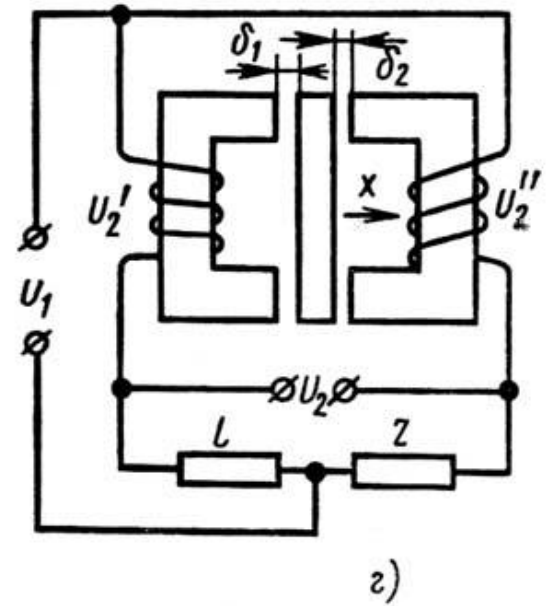
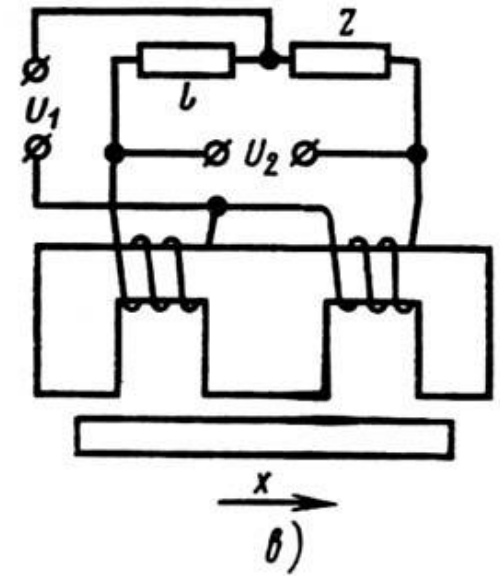
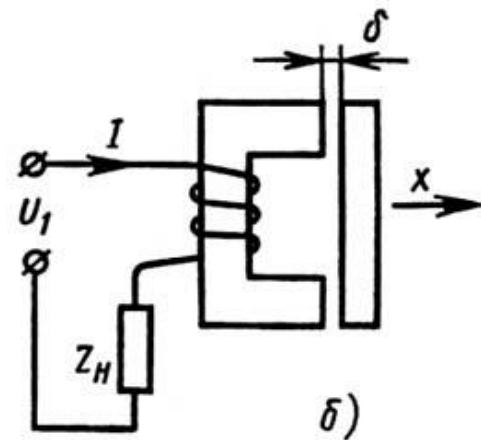
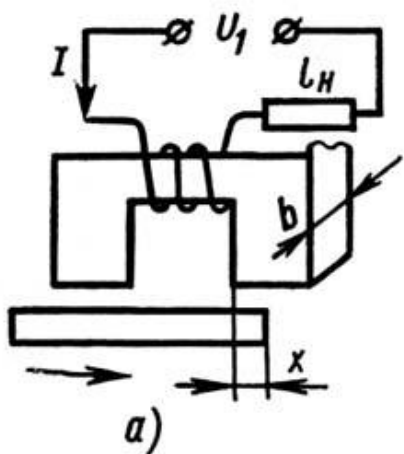
# **Индуктивные преобразователи виброперемещений**

Индуктивный преобразователь является параметрическим - перемещение одного из его элементов при вибрации вызывает изменение индуктивности системы и ее сопротивления переменному току.

**На рисунке ниже показаны основные схемы построения индуктивных преобразователей:**

- с переменной площадью зазора (а, в),**
- с переменной длиной зазора (б, г),**
- с подвижным цилиндрическим сердечником (д, е).**

Для всех вариантов обычно используется дифференциальная мостовая схема включения.





# Схемы индуктивных преобразователей виброперемещений:

*a* – с переменной площадью зазора;

*б* – с переменной длиной зазора;

*в* – дифференциальный с переменной площадью зазора;

*г* - дифференциальный с переменной длиной зазора;

*д* – с подвижным сердечником;

*е* – дифференциальный с подвижным сердечником.

Индуктивные преобразователи имеют гораздо меньшую массу, чем индукционные, тем не менее, область их применения ограничена измерением низкочастотных вибраций.

Это связано с тем, что частота тока питания (несущего сигнала) не может превышать 3 – 5 кГц из-за возникновения вихревых магнитных потоков в сердечнике и значительных паразитных емкостей и индуктивностей соединительных проводов.

При этом для надежной работы преобразователя необходимо, чтобы частота измеряемого процесса была в 5 – 10 раз ниже частоты несущего сигнала.

### **Основные достоинства индуктивных преобразователей виброперемещений:**

- их простота,
- возможность применения при повышенных температурах
- высокая чувствительность.

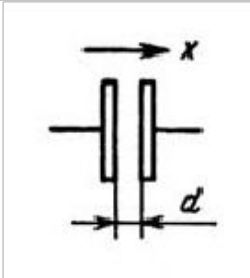
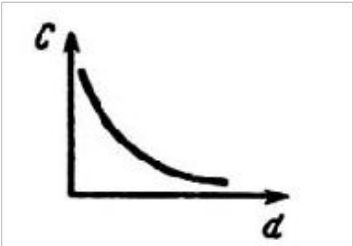
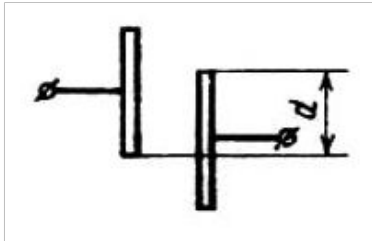
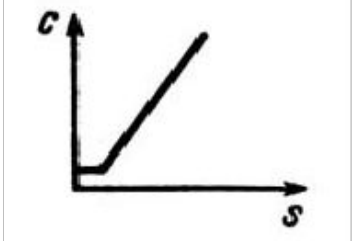
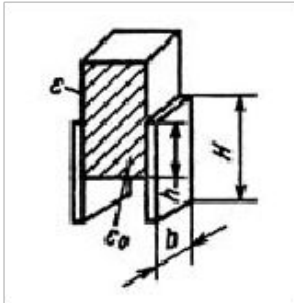
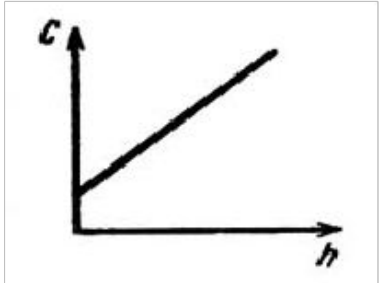
# Емкостные преобразователи виброперемещения

$$C = 0,866 \frac{\varepsilon \cdot S}{d} \quad [\text{пФ}],$$

$\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость среды;

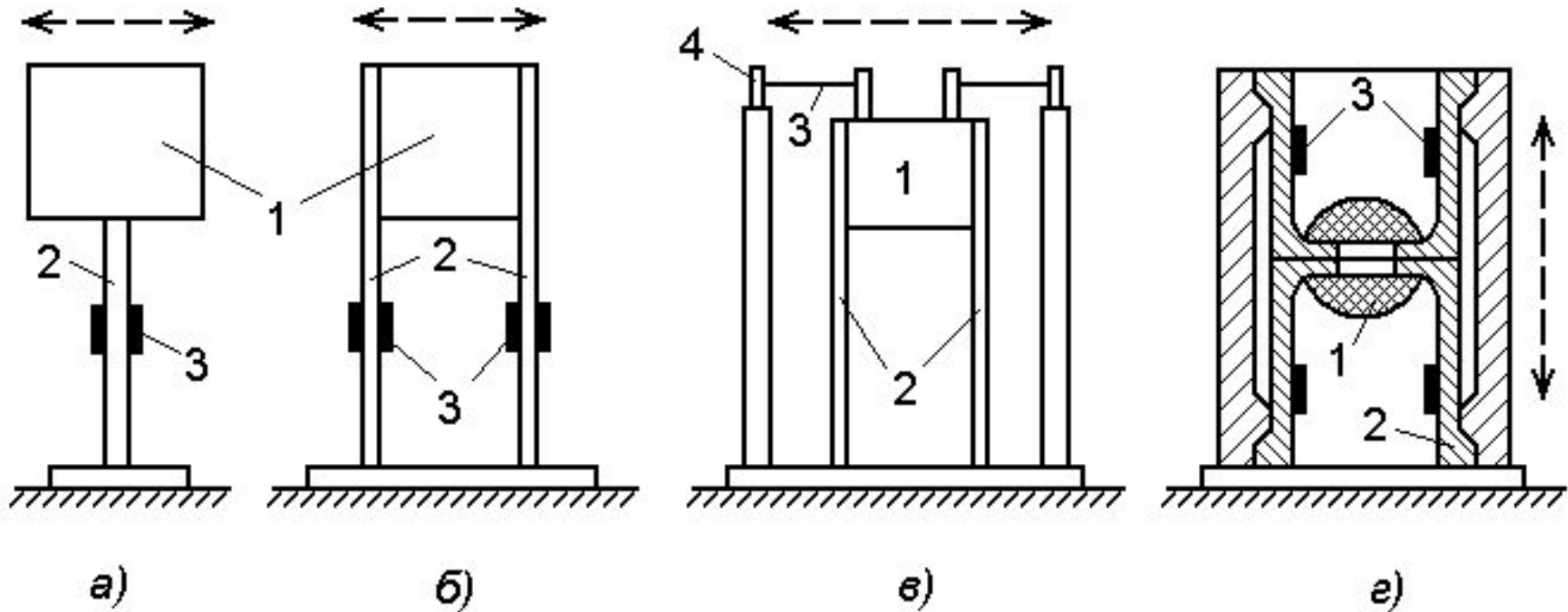
$S$  – площадь перекрытия плоскопараллельных пластин преобразователя;

$d$  – толщина пластин.

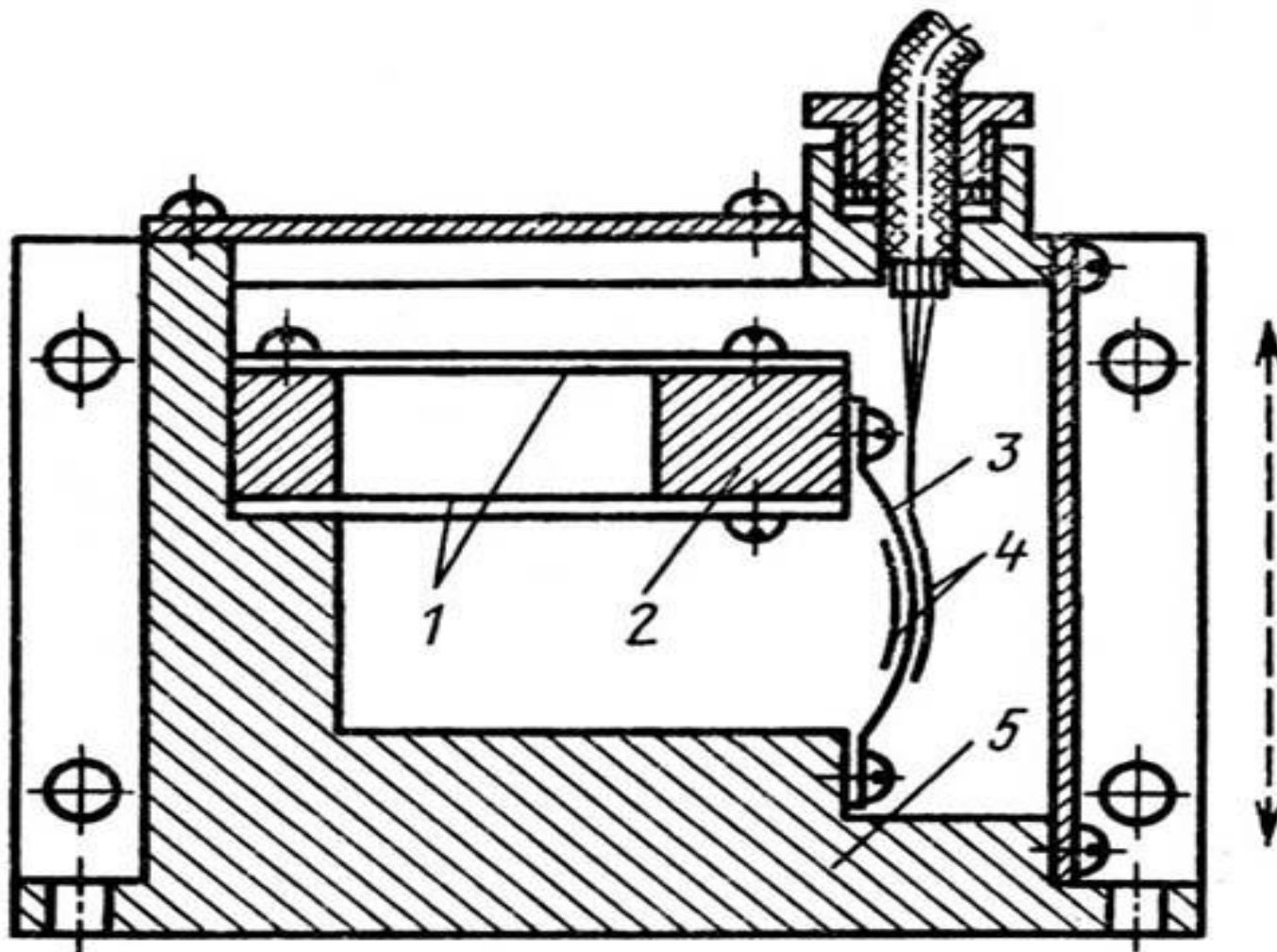
Тип конструкции	Схема конструкции	Закон изменения емкости
С переменным расстоянием между пластинами		
С переменной площадью перекрытия пластин		
С переменной диэлектрической проницаемостью среды		

Тип	Назначение	Диапазон измеряемых перемеще- ний, мм	Частотный диапазон, кГц
MM000 4 «Брюль и Кьер»	Измерение виб- роперемещений	10% с- стояния до вибрирую- щей поверх- ности	0,2 – 200
51 Д05	Контактный дат- чик смещения	0 – 10 0 – 70	0 – 100
51 Д11	Бесконтактный датчик вибрации	0,1 – 1000 мкм	0 – 1000
Д21 51 Д07	Сейсмический датчик крутиль- ных колебаний	±2 ±5	0,018 – 1,5

# Тензорезисторные преобразователи виброускорения



Основные схемы измерителей ускорения



**Тензорезисторный измеритель ускорений АП-02:**

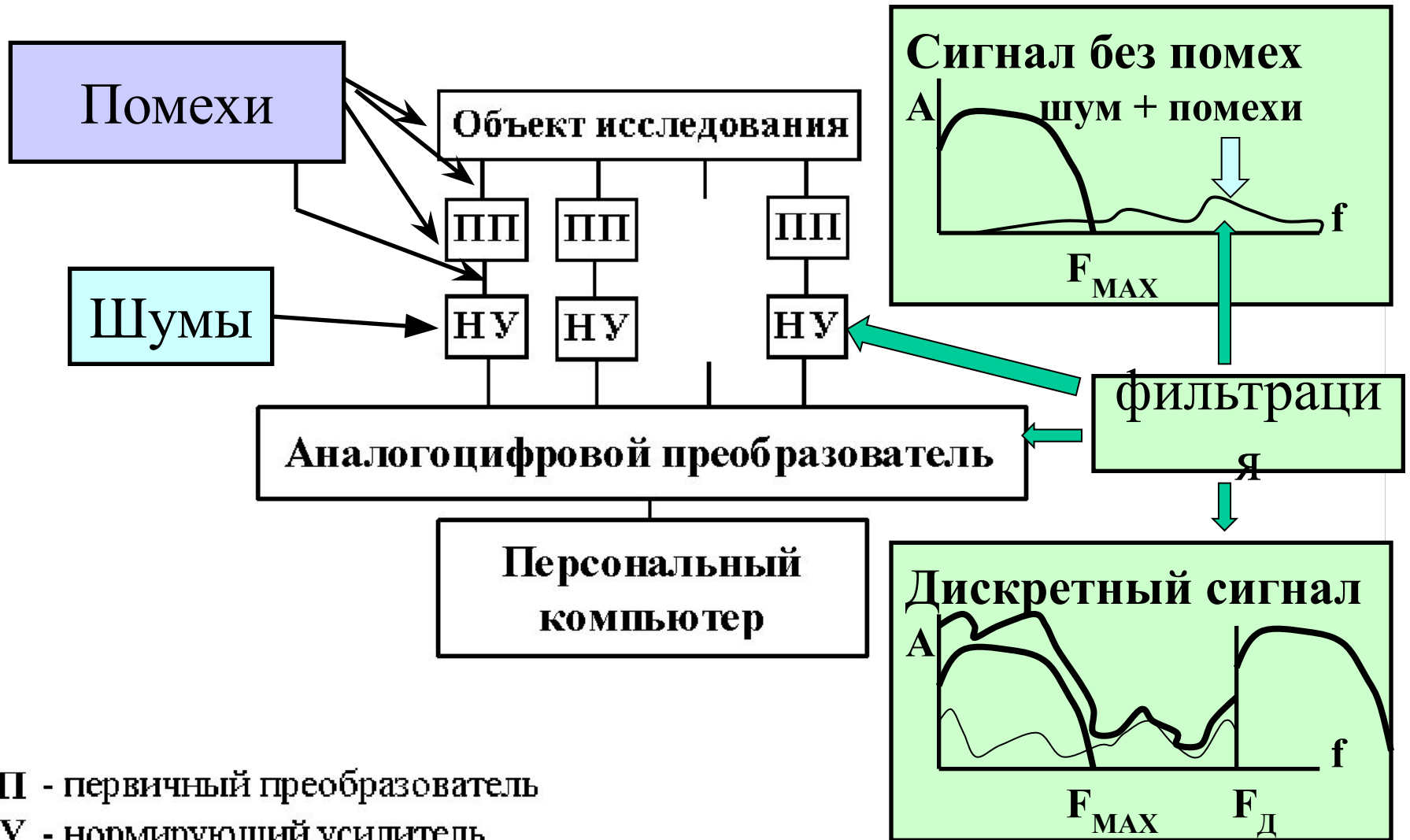
**1 – плоские пружины; 2 – инерционная масса; 5 – корпус,  
3 – чувствительный элемент; 4 – тензорезисторы;**

## **4. Практические вопросы реализации электрических измерений**

- 1. Блок – схема измерительного канала с АЦП и РС.**
- 2. Свойства измеряемой величины объекта, согласование требований с датчиком и усилителем.**
- 3. Помехи и шумы, их влияние на параметры сигнала.**
- 4. АЦП и дискретизация сигнала, свойства дискретизованного сигнала.**
- 5. Введение аппаратной фильтрации в блок-схему.**



# Оптимальная структура современной ИИС



ПП - первичный преобразователь

НУ - нормирующий усилитель

Теорема Котельникова - частота дискретизации  $F_D = 2$

$F_{MAX}$