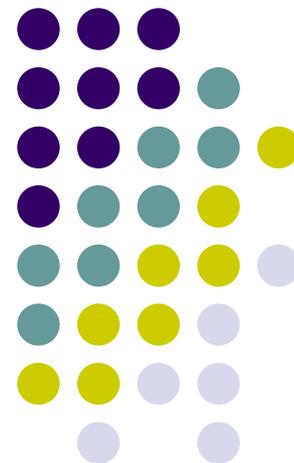


# Основы проектирования электронных средств

Лекция №8

Защита РЭС

от внешних механических воздействий



# Внешние механические воздействия



В процессе эксплуатации, транспортировки и хранения изделия могут испытывать механические воздействия, характеризуемые:

- диапазоном частот колебаний,
- амплитудой,
- ускорением,
- временем действия.

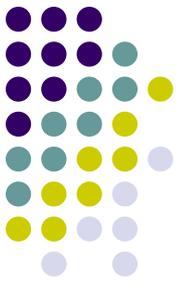
Причинами механических воздействий могут быть:

- вибрации движущихся частей двигателя,
- перегрузки при маневрировании,
- стартовые перегрузки,
- воздействие окружающей среды (ветер, волны, снежные лавины, землетрясения, обвалы и т. д.),
- взрывные воздействия (в том числе, атомные),
- небрежность обслуживающего персонала (падение аппаратуры) и т.д.

# Виды механических воздействий



Воздействия	Уровень требований			
	1960 г.	1965 г.	1970 г.	1995 г.
<b>Вибрации:</b>				
частота, Гц	5...60	5...1000	5...2500	5...5000
ускорение, g	7,5	10	15	40
Линейное ускорение, g	25	75	150	500
Одиночные удары, g	75	150	500	1000
Многократные удары, g	40	75	150	150
Акустические шумы, дБ	—	—	—	165



# Перегрузки

- При вибрации:

$$n_{\text{вибр}} = 4\pi^2 f^2 A / g,$$

где  $A$  – амплитуда вибраций, м;  $f$  – частота вибраций, Гц;  $n_{\text{вибр}}$  – перегрузка при вибрации,  $g$ .

- При ударе:

$$n_{\text{уд}} = 0.5 \cdot 10^{-3} v_{\text{уд}}^2 / S,$$

где  $S$  – перемещение соударяющихся тел с учетом амортизации, см;  $v_{\text{уд}}$  – МГНОВЕННАЯ скорость в момент удара, см/с.

- При вращении:

$$n_{\text{вр}} = 4\pi^2 f_{\text{вр}}^2 R / g,$$

- где  $R$  - радиус вращения, м;  $f_{\text{вр}}$  - частота вращения, Гц.

# Свойства конструкций



**Вибропрочность** – свойство конструкции противостоять разрушающему действию вибрации в заданном диапазоне частот и ускорений и продолжать выполнять свои функции после окончания воздействия вибрации. Для этого не должно происходить силовых и усталостных разрушений, соударений частей конструкции.

**Виброустойчивость** – свойство конструкции выполнять функции при воздействии вибрации и ударов в заданных диапазонах частот и ускорений.

**Ударостойкость** – способность противостоять возникающим при ударах силам и после их многократного воздействия сохранять тактико-технические характеристики в пределах нормы.

**Удар** – кратковременный процесс воздействия, длительность которого равна двойному времени распространения ударной волны через объект.

Как правило, обеспечение вибростойкости, виброустойчивости и ударостойкости связано с отсутствием резонанса и люфтов.

# Методы защиты



Методы защиты от внешних механических воздействий:

- виброизоляция аппаратуры с помощью амортизаторов;
- обеспечение механической жесткости и прочности конструкции.

При виброизоляции на пути распространения волновой энергии механических колебаний располагается дополнительное приспособление, отражающее или поглощающее определенную часть этой энергии. Возникают ограничения по массе, размерам, прочности и т.д.

При воздействии на амортизированный объект вибраций (ударов), спектр частот которых лежит выше частоты собственных колебаний системы, амортизатор работает как линейный фильтр нижних частот.

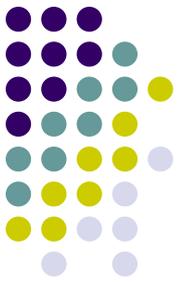
# Амортизация



**Амортизация** - система упругих опор, на которые устанавливается объект с целью защиты его от внешних динамических воздействий.

Основное свойство таких опор (амортизаторов) – колебания несущей конструкции, возникающие в результате действия внешних вибраций и ударов, передаются аппаратуре через упругий элемент.

**Демпфирование** – поглощение энергии, обусловленное рассеянием энергии в результате трения в материале амортизатора (резина), в сочленениях (сухой демпфер), в среде (воздушный или жидкостный демпфер).



# Жесткость конструкции

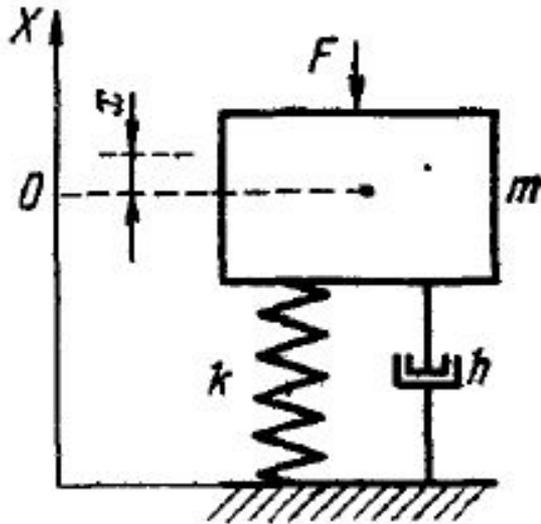
**Жесткость конструкций** – отношение силы к деформации, вызванной этой силой.

Критерий высокой жесткости – обеспечение собственной резонансной частоты конструкции в три раза большей частоты воздействующих колебаний.

Пример:

Резонансная частота отрезка многожильного провода длиной 10 мм составляет 1000-2000 Гц, а элементов диаметром 0,6...1 мм (масса 0,3...12 г) и общей длиной с учетом проволочных выводов, равной 30 мм – 200-450 Гц, то воздействующая частота не должна превышать 70 Гц.

# Линейная система с одной степенью свободы



Допущения:

- динамическое воздействие на амортизируемый объект совершается только прямолинейно и вдоль одной из осей координат;
  - масса основания существенно больше массы амортизируемого объекта;
  - массой упругого элемента пренебрегаем;
  - пренебрегаем деформациями основания и амортизируемого объекта;
- 
- масса амортизируемого объекта, коэффициент жесткости и коэффициент демпфирования упругого элемента являются постоянными величинами;
  - сила упругости пропорциональна деформации амортизатора;
  - сила сопротивления амортизатора пропорциональна первой степени скорости смещения амортизируемого объекта.

# Свободные колебания без демпфирования



Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x = -kx,$$

Решение уравнения:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t),$$

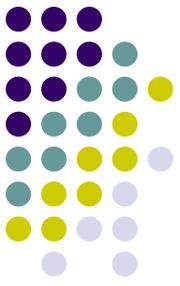
где  $C_1$  и  $C_2$  – постоянные интегрирования, определяемые из начальных условий;  $\omega_0$  – угловая частота свободных колебаний:

$$\omega_0 = \sqrt{k/m}, \text{ или:}$$

$$x = A_0 \sin(\omega_0 t + \varphi_0),$$

$$A_0 = \sqrt{C_1^2 + C_2^2} = \sqrt{v^2/\omega_0^2 + x_0^2},$$

$$\varphi_0 = \arctg(C_1/C_2) = \arctg(x_0\omega_0/v_0).$$



# Свободные колебания с демпфированием

Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x + h + kx = 0,$$

Решение уравнения зависит от  $h$  и  $h_{кр}$ ,  $h_{\epsilon\delta} = 2\sqrt{km} = 2m\omega_0$ ,  
или относительного коэффициента затухания  $\xi = h/h_{\epsilon\delta}$ ,  
в случае  $\xi < 1$ :

$$x = e^{-ht/2m} \left( C_1 \sin(\omega_h t) + C_2 \cos(\omega_h t) \right),$$

где

$$C_1 = \left( v_0 + \frac{h}{2m} x_0 \right) / \omega_h, \quad C_2 = x_0,$$

или:

$$x = A_0 e^{-ht/2m} \sin(\omega_h t + \varphi_0).$$

Частота собственных колебаний системы:

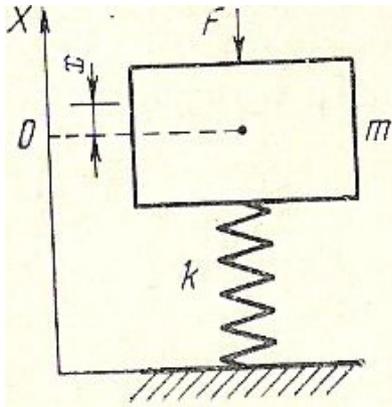
$$\omega_h = \omega_0 \sqrt{1 - \xi^2} = \sqrt{\omega_0^2 - h^2/4m^2}.$$

В случае  $h = h_{кр}$  колебания не возникают.

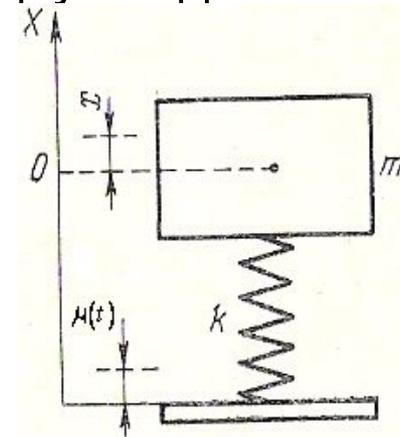
# Вынужденные колебания



Вынужденные колебания в системе возникают в результате внешних механических воздействий двух видов:



Силовое возмущение – возникает при воздействии внешней силы.



Кинематическое возмущение – задано движение отдельных точек системы.

При совпадении частоты внешнего воздействия и собственной частоты системы возникает явление **резонанса** – существенное увеличение амплитуды колебаний при незначительном внешнем воздействии.

# Вынужденные колебания без демпфирования. Силовое возмущение



Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x + kx = F \sin(\Omega t),$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t) + A \sin(\Omega t),$$

В реальных системах собственные колебания быстро затухают, а установившиеся вынужденные примут вид:

$$x = A \sin(\Omega t),$$

где  $A = F/k|1 - \eta^2|$ ,  $\eta = \Omega/\omega_0$  – коэффициент расстройки.

Коэффициент динамичности системы – отношение статической упругой силы к амплитуде силы вызывающих колебаний:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{F_{\tilde{n}\dot{o}}}{F} = |1 - \eta^2|^{-1}.$$

В случае  $\Omega \rightarrow \omega_0$ ,  $1/\gamma \rightarrow \infty$ .

# Вынужденные колебания без демпфирования. Кинематическое возмущение



Установившееся движение основания:  $\mu(t) = \mu \sin(\Omega t)$ .

Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x = -k[x - \mu(t)].$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = C_1 \sin(\omega_0 t) + C_2 \cos(\omega_0 t) + A \sin(\Omega t),$$

Амплитуда вынужденных колебаний:

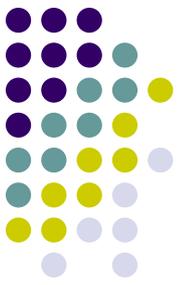
$$A = \mu / |1 - \eta^2|.$$

Коэффициент динамичности системы :

$$1/\gamma = A/\mu = |1 - \eta^2|^{-1}.$$

Вывод: коэффициенты динамичности системы с одной степенью свободы без демпфирования по силе и перемещению численно равны.

# Вынужденные колебания с вязким демпфированием. Силовое возмущение



Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x + \dot{h}x + kx = F \sin(\Omega t).$$

Решение уравнения в общем виде:

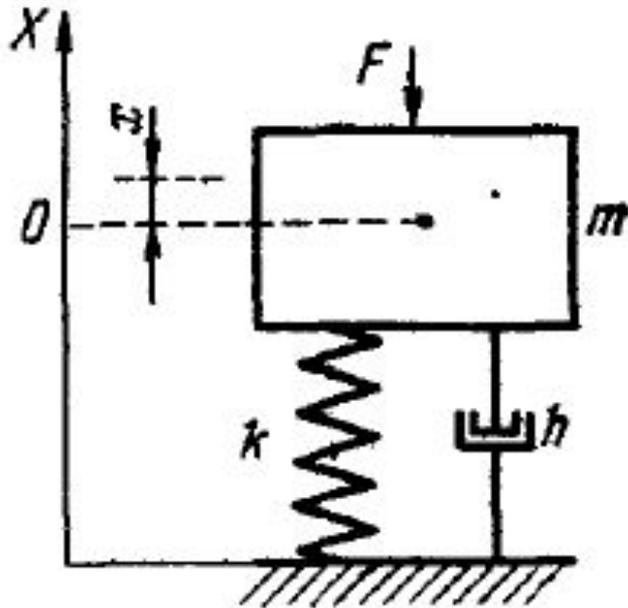
$$x = A_0 e^{-ht/2m} \sin(\omega_h t + \varphi_0) + A \sin(\Omega t - \psi).$$

Амплитуда установившегося колебания:

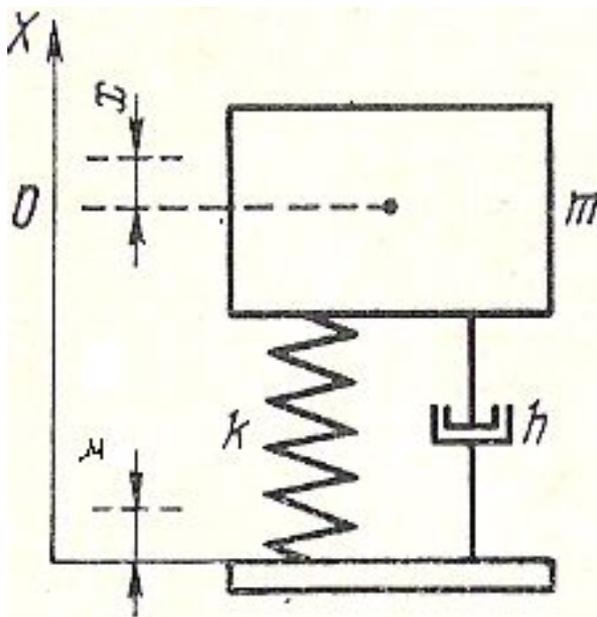
$$A = \frac{F}{k \sqrt{(1 - \eta^2)^2 + (2\xi\eta)^2}}.$$

Фазовый угол:

$$\psi = \operatorname{arctg} \frac{2\xi\eta}{1 - \eta^2}.$$



# Вынужденные колебания с вязким демпфированием. Кинематическое возмущение



Уравнение состояния:

$$\ddot{m}x + h[x - \dot{\mu}(t)] + k[x - \mu(t)] = 0.$$

Решение уравнения в общем виде:

$$x = (1/\gamma) \xi \sin(\Omega t - \psi).$$

Коэффициент динамичности:

$$\frac{1}{\gamma} = \sqrt{\frac{1 + \varepsilon^2 \eta^2}{(1 - \eta^2)^2 + \varepsilon^2 \eta^2}},$$

где  $\varepsilon = h/\sqrt{km} = 2\vartheta_0/\omega_0 = 2h/h_{\varepsilon\delta} = 2\xi$  – показатель затухания.

Фазовый угол:

$$\psi = \arctg \frac{2\xi\eta^2}{1 - \eta^2 + 4\xi^2\eta^2}.$$

# Амплитудно- и фазо-частотные характеристики системы с вязким демпфированием

