ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ИНСТИТУТ РАДИОТЕХНИКИ,
ЭЛЕКТРОНИКИ И АВТОМАТИКИ (ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»

КАФЕДРА ТЕХНИЧЕСКОЙ МЕХАНИКИ

Курсовой проект

по теме

«Проектирование систем защиты РЭА от механических воздействий»

Выполнил
студент группы ВВ-2-06
Котомин Иван
(шифр ВВ-21-06/036)

Преподаватель
Крюкова И.В.

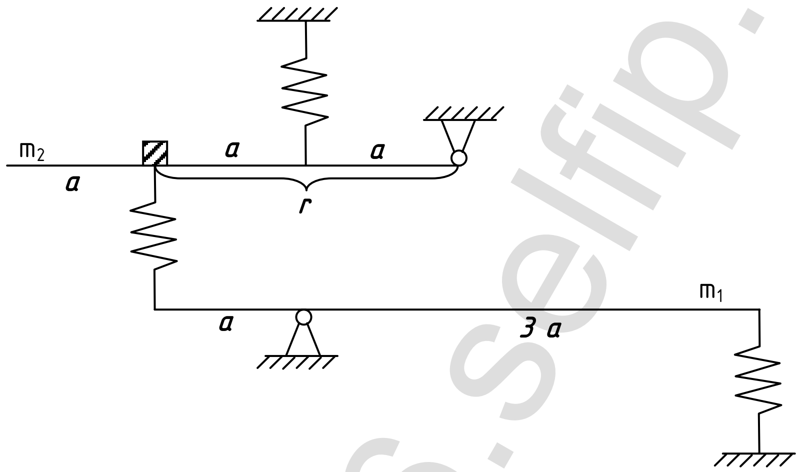
МОСКВА 2008

Содержание

Техническое задание

Для заданной системы амортизации подобрать жесткости пружин, снижающих нагрузку до допустимых пределов.

Сделать проверочный расчет, построить АЧХ.



Параметры системы:

a = 0,1 м
m_1 = 4 кг
m_2 = 0,2 кг
n_b = 10
$[n]$ = 4
r = 0,2 м
f_1 = 80 Гц
f_2 = 120 Гц

Введение

В настоящее время радиоэлектронная аппаратура имеет широчайшее распространение в системах управления и сбора информации на различных транспортных средствах. В таких условиях ее применение сопряжено с различными механическими воздействиями, связанными, к примеру, с движением транспорта или изменением режима движения (остановка, изменение направления и т.д.), а также работой двигателя. Такие воздействия, обычно носящие периодический характер, называют вибрациями.

Эти воздействия при определенных условиях могут стать причиной сбоев в работе оборудования или его выхода из строя. Поэтому важной задачей является разработка систем, снижающих внешние воздействия на аппаратуру до допустимых для нормальной работы пределов.

Все виды механических воздействий характеризуются *перегрузкой.* Перегрузка в любой момент времени не должна превышать допустимых значений.

Вибрационной перегрузкой называют отношение максимального ускорения, возникающего при вибрации, к ускорению свободного падения:

$$n = \frac{a}{g}$$

Амортизация – система упругих опор, на которые устанавливается объект для защиты от внешних динамических воздействий. Амортизация – наиболее распространенный метод защиты РЭА от механических воздействий.

Коэффициент динамичности – величина, равная отношению ускорения элемента к ускорению борта.

$$K_д = \frac{a_{эл}}{a_{борт}} = \frac{n_{эл}}{n_{борт}}$$

Допустимый коэффициент динамичности определяется как $\left[K_д\right] = \frac{\left[n\right]}{n_в}$. Для выполнения амортизации необходимо, чтобы $K_д < \left[K_д\right]$.

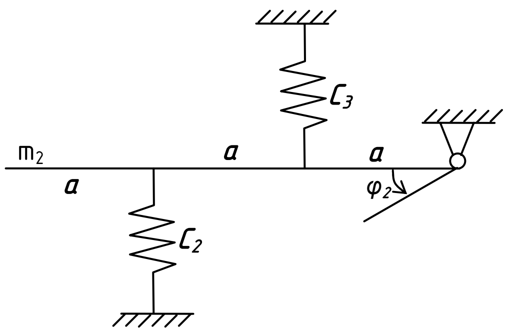
Используемый метод расчета – метод отстройки от собственных частот. Он заключается в выборе собственных частот таким образом, чтобы *n* была снижена до допустимых пределов. Затем эти частоты являются основой для расчета величин жесткости амортизаторов.

Расчетная часть

I. Выбор собственных частот

1. Парциальная схема

Рассмотрим парциальную схему – верхнюю часть системы.



Составим для системы уравнение движения (Лагранжа 2-го рода).

Рассматриваемое движение – плоскопараллельное.

Для составления уравнения Лагранжа, найдем кинетическую энергию:

$$T = \frac{m_2 v_2^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$$

$$\omega_2 = \dot{\varphi}_2;\; v_2 = \dot{\varphi}_2 \cdot \frac{3}{2}a;\; J_2 = \frac{ml^2}{12} = \frac{3}{4}m_2 a^2$$

$$T = \frac{1}{2}\cdot\left(\frac{9}{4}m_2 a^2 \dot{\varphi}_2^2 + \frac{3}{4}m_2 a^2 \dot{\varphi}_2^2\right) = \frac{1}{2}\cdot 3m_2 a^2 \dot{\varphi}_2^2$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = 3m_2 a^2 \dot{\varphi}_2;\; \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2}\right) = 3m_2 a^2 \ddot{\varphi}_2;\; \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = 0$$

Далее, найдем потенциальную энергию:

$$\Pi = \frac{1}{2}\lambda_2^2 C_2 + \frac{1}{2}\lambda_3^2 C_3$$

$\lambda_2 = -2a\cdot\varphi_2$, т.к. пружина сжимается

$\lambda_3 = a\cdot\varphi_2$, т.к. пружина растягивается.

Отсюда

$$\Pi = 2a^2\varphi_2^2 C_2 + \frac{1}{2}a^2\varphi_2^2 C_3$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = 4a^2\varphi_2 C_2 + a^2\varphi_2 C_3 = a^2\varphi_2\cdot\left(4C_2 + C_3\right)$$

Составим уравнение Лагранжа. В общем виде оно представимо как

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2}\right) - \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = 0$$

Имеем:

$$3m_2 a^2 \ddot{\varphi}_2 + \left(4C_2 + C_3\right) \cdot a^2 \varphi_2 = 0 \quad |: a^2$$
$$3m_2 \ddot{\varphi}_2 + \left(4C_2 + C_3\right) \cdot \varphi_2 = 0$$

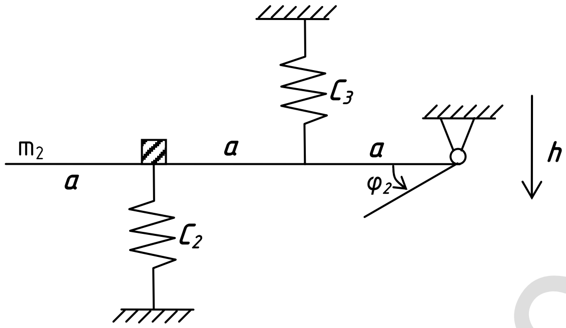
Решение ищем в виде $\varphi_2 = A_2 \sin kt;\ \ddot{\varphi}_2 = -A_2 k^2 \sin kt$.

Получим:

$$-A_2 k^2 \sin kt \cdot 3m_2 + A_2 \sin kt \cdot \left(4C_2 + C_3\right) = 0 \quad |: A_2 \sin kt$$
$$4C_2 + C_3 = 3m_2 k^2$$

2. Схема с кинематическим воздействием

Рассмотрим систему с внешним кинематическим воздействием $h = H \cdot \sin \omega t$.



Найдем кинетическую энергию:

$$T = \frac{m_2 v_2'^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$$
$$\omega_2 = \dot{\varphi}_2;\ v_2' = \frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h};\ J_2 = \frac{3}{4} m_2 a^2$$
$$T = \frac{1}{2} \cdot \left(m_2 \cdot \left(\frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h} \right)^2 + \frac{3}{4} m_2 a^2 \dot{\varphi}_2^2 \right)$$
$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = \frac{3}{2} a \cdot m_2 \cdot \left(\frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h} \right) + \frac{3}{4} m_2 a^2 \dot{\varphi}_2 = 3m_2 a^2 \dot{\varphi}_2 + \frac{3}{2} m_2 a \dot{h};\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = 3m_2 a^2 \ddot{\varphi}_2 + \frac{3}{2} m_2 a \ddot{h}$$

Потенциальная энергия такая же, как и в предыдущем случае:

$$\Pi = 2a^2 \varphi_2^2 C_2 + \frac{1}{2} a^2 \varphi_2^2 C_3$$
$$\frac{\partial \Pi}{\partial \dot{\varphi}_2} = 4a^2 \varphi_2 C_2 + a^2 \varphi_2 C_3 = a^2 \varphi_2 \cdot \left(4C_2 + C_3\right)$$

Составим уравнение Лагранжа.

$$3m_2 a^2 \ddot{\varphi}_2 + \frac{3}{2} m_2 a \ddot{h} + a^2 \varphi_2 \cdot \left(4C_2 + C_3\right) = 0$$

С учетом того, что $\ddot{h} = -H\omega^2 \sin \omega t;\ \ 4C_2 + C_3 = 3m_2 k^2$, получим:

$$3m_2a^2\ddot{\varphi}_2 + 3m_2k^2 \cdot a^2\varphi_2 = \frac{3}{2}H\omega^2 am_2 \cdot \sin\omega t \quad |:3$$

$$m_2a^2\ddot{\varphi}_2 + m_2k^2 \cdot a^2\varphi_2 = \frac{1}{2}H\omega^2 am_2 \cdot \sin\omega t$$

Общее решение однородного уравнения: $A\sin kt$

Частные решения неоднородного уравнения ищем в виде

$$\varphi_2 = B_2\sin\omega t;\ \ddot{\varphi}_2 = -B_2\omega^2\sin\omega t.$$

$$-B_2\omega^2\sin\omega t \cdot m_2a^2 + B_2\sin\omega t \cdot m_2k^2 \cdot a^2 = \frac{1}{2}H\omega^2 am_2\sin\omega t \quad |:am_2\sin\omega t$$

$$k^2aB_2 - \omega^2 aB_2 = \frac{1}{2}H\omega^2$$

$$B_2a \cdot \left(k^2 - \omega^2\right) = \frac{H\omega^2}{2}$$

Получим:

$$\frac{B_2}{H} = \frac{\omega^2}{2a \cdot \left(k^2 - \omega^2\right)}$$

Так как элемент расположен на расстоянии r от опоры, то $a_{эл} = r \cdot \ddot{\varphi} + \ddot{h}$.

По определению, $K_д = \dfrac{a_{эл}}{a_{вибр}}$, и $a_{вибр} = \ddot{h}$. Получим

$$K_д = \frac{a_{эл}}{a_{вибр}} = \frac{r \cdot \ddot{\varphi} + \ddot{h}}{\ddot{h}} = \frac{r \cdot \ddot{\varphi}}{\ddot{h}} + 1 \ \Rightarrow$$

$$\Rightarrow K_д = \frac{r \cdot \ddot{\varphi}}{\ddot{h}} + 1 = \frac{B_2}{H} \cdot r + 1$$

Для амортизации необходимо выполнение $K_д < \left[K_д\right] = \dfrac{[n]}{n_в} = 0,4$.

Итак,

$$\left|\frac{\omega^2 r}{2a \cdot \left(k^2 - \omega^2\right)} + 1\right| < \left[K_д\right]$$

$$-\left[K_д\right] < 1 - \frac{\frac{r}{2a} \cdot \omega^2}{\omega^2 - k^2} < \left[K_д\right]$$

$$1 - \left[K_д\right] < \frac{\frac{r}{2a} \cdot \omega^2}{\omega^2 - k^2} < 1 + \left[K_д\right]$$

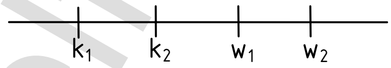
$$\frac{\frac{r}{2a}}{1+\left[K_{\partial}\right]} < \frac{\omega^2 - k^2}{\omega^2} < \frac{\frac{r}{2a}}{1-\left[K_{\partial}\right]}$$

$$\frac{\frac{r}{2a}}{1-\left[K_{\partial}\right]} < 1 - \frac{k^2}{\omega^2} < \frac{\frac{r}{2a}}{1+\left[K_{\partial}\right]}$$

$$1 - \frac{\frac{r}{2a}}{1-\left[K_{\partial}\right]} < \frac{k^2}{\omega^2} < 1 - \frac{\frac{r}{2a}}{1+\left[K_{\partial}\right]}$$

Левая часть неравенства выполняется всегда, т.к. она меньше 0.

$$k_2^2 < \omega_1^2 \cdot \left(1 - \frac{\frac{r}{2a}}{1+\left[K_{\partial}\right]}\right)$$



$$k_2 < \omega_1 \cdot \sqrt{1 - \frac{\frac{r}{2a}}{1+\left[K_{\partial}\right]}}$$

Получим:

$$k_2 = 260 \frac{рад}{с}$$

Эмпирически $k_1 = \frac{k_2}{2}$. Тогда $k_1 = 130 \frac{рад}{с}$.

Итак, $k_1 = 130 \frac{рад}{с}$, $k_2 = 260 \frac{рад}{с}$.

II. Определение жесткостей амортизаторов

Определим необходимые величины для составления уравнения Лагранжа.

Найдем кинетическую энергию:

$$T=\frac{m_1v_1^2}{2}+\frac{J_1\omega_1^2}{2}+\frac{m_2v_2^2}{2}+\frac{J_2\omega_2^2}{2}$$

$$\omega_1=\dot{\varphi}_1;\ \omega_2=\dot{\varphi}_2;$$

$$v_1=\dot{\varphi}_1 a;\ J_1=\frac{ml^2}{12}=\frac{m_2(4a)^2}{12}=\frac{4}{3}m_1a^2$$

$$v_2=\frac{3}{2}a\dot{\varphi}_2;\ J_2=\frac{ml^2}{12}=\frac{m_2(3a)^2}{12}=\frac{3}{4}m_2a^2$$

$$T=\frac{1}{2}\cdot\left(m_1a^2\dot{\varphi}_1^2+\frac{4}{3}m_1a^2\dot{\varphi}_1^2+\frac{9}{4}m_2a^2\dot{\varphi}_2^2+\frac{3}{4}m_2a^2\dot{\varphi}_2^2\right)=\frac{1}{2}a^2\left(\frac{7}{3}m_1\dot{\varphi}_1^2+3m_2\dot{\varphi}_2^2\right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}_1}=\frac{7}{3}m_1a^2\dot{\varphi}_1,\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}_1}\right)=\frac{7}{3}m_1a^2\ddot{\varphi}_1;$$

$$\frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}_2}=3m_2a^2\dot{\varphi}_2,\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial\dot{\varphi}_2}\right)=3m_2a^2\ddot{\varphi}_2;$$

$$\frac{\partial T}{\partial\varphi_1}=\frac{\partial T}{\partial\varphi_2}=0$$

Найдем потенциальную энергию:

$$\Pi=\frac{1}{2}\lambda_1^2C_1+\frac{1}{2}\lambda_2^2C_2+\frac{1}{2}\lambda_3^2C_3$$

Удлинения пружин:

$$\lambda_1=3a\cdot\varphi_1,$$
$$\lambda_2=a\cdot\varphi_1-2a\cdot\varphi_2,$$
$$\lambda_3=a\cdot\varphi_2.$$

Получим

$$\Pi=\frac{1}{2}\left[C_1\varphi_1^2\cdot 9a^2+C_2\cdot\left(\varphi_1a-2\varphi_2a\right)^2+C_3a^2\varphi_2^2\right]$$

$$\frac{\partial\Pi}{\partial\varphi_1}=\varphi_1a^2\left(9C_1+C_2\right)+\varphi_2a^2\left(-2C_2\right)$$

$$\frac{\partial\Pi}{\partial\varphi_2}=\varphi_1a^2\left(-2C_2\right)+\varphi_2a^2\left(4C_2+C_3\right)$$

Составим уравнения Лагранжа:

$$\begin{cases}\frac{7}{3}m_1a^2\ddot{\varphi}_1+\varphi_1a^2\left(9C_1+C_2\right)+\varphi_2a^2\left(-2C_2\right)=0 & |:a^2\\ 3m_2a^2\ddot{\varphi}_2+\varphi_1a^2\left(-2C_2\right)+\varphi_2a^2\left(4C_2+C_3\right)=0 & |:a^2\end{cases}$$

$$\begin{cases}\frac{7}{3}m_1\ddot{\varphi}_1+\varphi_1\left(9C_1+C_2\right)+\varphi_2\left(-2C_2\right)=0\\ 3m_2\ddot{\varphi}_2+\varphi_1\left(-2C_2\right)+\varphi_2\left(4C_2+C_3\right)=0\end{cases}$$

Ищем решения в виде

$$\varphi_1 = A_1 \sin kt,\ \ddot{\varphi}_1 = -A_1 k^2 \sin kt;$$
$$\varphi_2 = A_2 \sin kt,\ \ddot{\varphi}_2 = -A_2 k^2 \sin kt.$$

Подставляем в систему и делим оба уравнения на $\sin kt$.

$$\begin{cases} A_1\left[-\frac{7}{3}m_1k^2 + 9C_1 + C_2\right] + A_2\left[-2C_2\right] = 0 \\ A_1\left[-2C_2\right] + A_2\left[-3m_2k^2 + 4C_2 + C_3\right] = 0 \end{cases}$$

Для существования ненулевого решения необходимо, чтобы определитель был равен 0.

$$\left(-\frac{7}{3}m_1k^2 + 9C_1 + C_2\right)\left(-3m_2k^2 + 4C_2 + C_3\right) - 4C_2^2 = 0$$

$$k^4\left[7m_1m_2\right] - k^2\left[\frac{7}{3}m_1\left(4C_2 + C_3\right) + 3m_2\left(9C_1 + C_2\right)\right] + \left(4C_2 + C_3\right)\left(9C_1 + C_2\right) - 4C_2^2 = 0$$

Учитывая, что $\left(4C_2 + C_3\right)\left(9C_1 + C_2\right) - 4C_2^2 = 36C_1C_2 + C_3\left(9C_1 + C_2\right)$, выпишем применение условий теоремы Виета для квадратного уравнения в данном случае:

$$\begin{cases} 7m_1m_2\left(k_1^2 + k_2^2\right) = \frac{7}{3}m_1\left(4C_2 + C_3\right) + 3m_2\left(9C_1 + C_2\right) \\ 7m_1m_2 \cdot k_1^2k_2^2 = 36C_1C_2 + C_3\left(9C_1 + C_2\right) \end{cases}$$

Получена система с тремя неизвестными (C_1, C_2, C_3) и двумя уравнениями. Не нарушая общности решения задачи, примем $C_1 = \alpha C_2$.

С учетом того, что $k_2 = 2k_1$, имеем:

$$\begin{cases} 7m_1m_2 \cdot 5k_1^2 = \frac{7}{3}m_1\left(4C_2 + C_3\right) + 3m_2\left(9C_1 + C_2\right) & (1) \\ 7m_1m_2 \cdot 4k_1^4 = 36C_1C_2 + C_3\left(9C_1 + C_2\right) & (2) \end{cases}$$

Из (1) выразим C_3 :

$$3 \cdot 5m_2k_1^2 = \left(4C_2 + C_3\right) + \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}\left(9C_1 + C_2\right)$$

$$C_3 = 15m_2k_1^2 - 4C_2 - \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}\left(9C_1 + C_2\right)$$

Подставим полученное выражение для C_3 в (2).

$$28m_1m_2k_1^4 = 36\alpha C_2^2 + C_2(1 + 9\alpha)\left(15m_2k_1^2 - 4C_2 - \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}C_2(1 + 9\alpha)\right)$$

Примем $z = 1 + 9\alpha$, тогда $\alpha = \dfrac{z-1}{9}$.

$$28m_1m_2k_1^4 = C_2 z\left(15m_2k_1^2 - 4C_2 - \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}C_2 z\right) + 36\alpha C_2^2$$

$$C_2^2\left(-4z - \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}z^2 + (4z-4)\right) + C_2\left(15m_2k_1^2 z\right) - 28m_1m_2k_1^4 = 0$$

$$C_2^2\left(\frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}z^2 + 4\right) + C_2\left(-15m_2k_1^2 z\right) + 28m_1m_2k_1^4 = 0$$

Необходимо, чтобы дискриминант был больше 0:

$$D = \left(-15m_2k_1^2 z\right)^2 - 4\cdot 28m_1m_2k_1^4\left(\frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}z^2 + 4\right)$$

$$D = 225m_2^2k_1^4z^2 - 144m_2^2k_1^4z^2 - 448m_1m_2k_1^4 \ge 0$$

$$81m_2^2z^2k_1^4 \ge 448m_1m_2k_1^4 \quad |:81m_2^2k_1^4$$

$$z^2 \ge \frac{49}{9}\frac{m_1}{m_2} \Rightarrow z \ge \sqrt{\frac{49}{9}\frac{m_1}{m_2}} \approx 10,435$$

$$\alpha \ge \frac{\sqrt{\frac{49}{9}\frac{m_1}{m_2}} - 1}{9} \approx 1,048$$

Выпишем выражение для корней уравнения.

$$C_{2_{1,2}} = \frac{15k_1^2m_2z \pm k_1^2\sqrt{81m_2^2z^2 - 448m_1m_2}}{2\left(\frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}z^2 + 4\right)}$$

Итоговое выражение для C_3:

$$C_3 = 15m_2k_1^2 - 4C_2 - \frac{9}{7}\frac{m_2}{m_1}C_2(1+9\alpha)$$

Рассчитаем жесткости при $\alpha = 50$:

1.

$C_1 = 69919,7\ \dfrac{Н}{м}$

$C_2 = 1398,4\ \dfrac{Н}{м}$

$C_3 = 4563,0\ \dfrac{Н}{м}$

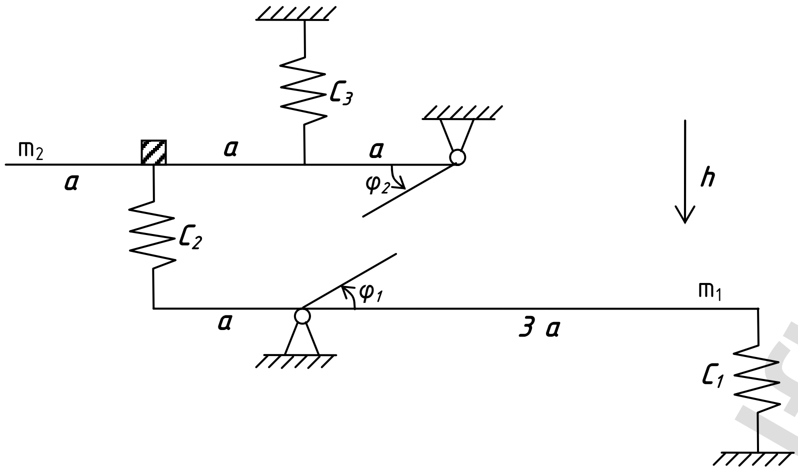
2.

$C_1 = 17488,8\ \dfrac{Н}{м}$

$C_2 = 349,8\ \dfrac{Н}{м}$

$C_3 = 39159,9\ \dfrac{Н}{м}$

III. Проверочный расчет



Рассмотрим систему, добавив в нее внешнее кинематическое воздействие $h = H \cdot \sin \omega t$.

Найдем кинетическую энергию:

$$T = \frac{m_1 v_1'^2}{2} + \frac{J_1 \omega_1^2}{2} + \frac{m_2 v_2'^2}{2} + \frac{J_2 \omega_2^2}{2}$$

$$\omega_1 = \dot{\varphi}_1;\ \omega_2 = \dot{\varphi}_2;$$

$$v_1' = \dot{\varphi}_1 a - \dot{h};\ J_1 = \frac{4}{3} m_1 a^2$$

$$v_2' = \frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h};\ J_2 = \frac{3}{4} m_2 a^2$$

$$T = \frac{1}{2} \cdot \left[m_1 \left(\dot{\varphi}_1 a - \dot{h} \right)^2 + \frac{4}{3} m_1 a^2 \dot{\varphi}_1^2 + m_2 \left(\frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h} \right)^2 + \frac{3}{4} m_2 a^2 \dot{\varphi}_2^2 \right]$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} = m_1 a \left(\dot{\varphi}_1 a - \dot{h} \right) + \frac{4}{3} m_1 a^2 \dot{\varphi}_1 = \frac{7}{3} m_1 a^2 \dot{\varphi}_1 - m_1 a \dot{h},\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_1} \right) = \frac{7}{3} m_1 a^2 \ddot{\varphi}_1 - m_1 a \ddot{h};$$

$$\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} = \frac{3}{2} a m_2 \left(\frac{3}{2} a \dot{\varphi}_2 + \dot{h} \right) + \frac{3}{4} m_2 a^2 \dot{\varphi}_2 = 3 m_2 a^2 \dot{\varphi}_2 + \frac{3}{2} a m_2 \dot{h},\ \frac{d}{dt}\left(\frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}_2} \right) = 3 m_2 a^2 \ddot{\varphi}_2 + \frac{3}{2} a m_2 \ddot{h};$$

$$\frac{\partial T}{\partial \varphi_1} = \frac{\partial T}{\partial \varphi_2} = 0$$

Потенциальная энергия такая же, как и в предыдущем случае:

$$\Pi = \frac{1}{2}\left[C_1 \varphi_1^2 \cdot 9a^2 + C_2 \cdot \left(\varphi_1 a - 2\varphi_2 a \right)^2 + C_3 a^2 \varphi_2^2 \right]$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_1} = \varphi_1 a^2 \left(9C_1 + C_2 \right) + \varphi_2 a^2 \left(-2C_2 \right)$$

$$\frac{\partial \Pi}{\partial \varphi_2} = \varphi_1 a^2 \left(-2C_2 \right) + \varphi_2 a^2 \left(4C_2 + C_3 \right)$$

Составим уравнения Лагранжа:

$$\begin{cases} \dfrac{7}{3}m_1a^2\ddot{\varphi}_1 + \varphi_1 a^2\left(9C_1 + C_2\right) + \varphi_2 a^2\left(-2C_2\right) = m_1 a\ddot{h} \\ 3m_2a^2\ddot{\varphi}_2 + \varphi_1 a^2\left(-2C_2\right) + \varphi_2 a^2\left(4C_2 + C_3\right) = -\dfrac{3}{2}am_2\ddot{h} \end{cases}$$

Ищем решения в виде

$$\varphi_1 = B_1\sin\omega t,\ \ddot{\varphi}_1 = -B_1\omega^2\sin\omega t;$$
$$\varphi_2 = B_2\sin\omega t,\ \ddot{\varphi}_2 = -B_2\omega^2\sin\omega t.$$

Подставляем в систему, учитывая $\ddot{h} = -H\omega^2\sin\omega t$, и делим оба уравнения на $Ha^2\sin\omega t$.

$$\begin{cases} \dfrac{B_1}{H}\left[-\dfrac{7}{3}m_1\omega^2 + 9C_1 + C_2\right] + \dfrac{B_2}{H}\left[-2C_2\right] = -\dfrac{m_1\omega^2}{a} \\ \dfrac{B_1}{H}\left[-2C_2\right] + \dfrac{B_2}{H}\left[-3m_2\omega^2 + 4C_2 + C_3\right] = \dfrac{3}{2}\cdot\dfrac{m_2\omega^2}{a} \end{cases}$$

Отсюда, по правилу Крамера:

$$\frac{B_2}{H} = \frac{\dfrac{3}{2}\cdot\dfrac{m_2\omega^2}{a}\left(-\dfrac{7}{3}m_1\omega^2 + 9C_1 + C_2\right) - 2C_2\dfrac{m_1\omega^2}{a}}{\left(-\dfrac{7}{3}m_1\omega^2 + 9C_1 + C_2\right)\cdot\left(-3m_2\omega^2 + 4C_2 + C_3\right) - 4C_2^2}$$

Из п. I.2 $K_д = \dfrac{B_2}{H}r + 1$

В прил. 1, 2 находятся графики зависимости $K_д$ от циклической частоты в заданном диапазоне частот.

Вывод

В ходе работы были рассчитаны жесткости амортизаторов, а также вычислены собственные частоты системы.

Рассчитанные жесткости позволяют снизить нагрузку на заданном диапазоне частот до допустимых пределов, причем наилучшее снижение происходит при значениях жесткости $C_1 = 69919,7\ \dfrac{Н}{м}$, $C_2 = 1398,4\ \dfrac{Н}{м}$, $C_3 = 4563,0\ \dfrac{Н}{м}$. В этом случае на заданном диапазоне частот предельный коэффициент динамичности по модулю не превышает 0,1 ($-0,095 < K_д < -0,039$), в то время как заданное предельное значение составляет 0,4.

Рассчитанная система достаточно хорошо снимает нагрузку на РЭА на требуемом диапазоне частот.

Литература

1. Ю.Н. Емельянов, О.Н. Окунькова, В.А. Титов. Проектирование систем защиты РЭА от механических воздействий. – М.: МИРЭА, 1992.

2. Тарг С.М. Краткий курс теоретической механики. – М.: Высш. шк., 1986.

Приложение 1

Расчет Кд для первого набора жесткостей

$a := 0.1 \quad r := 0.2 \quad k1 := 130$

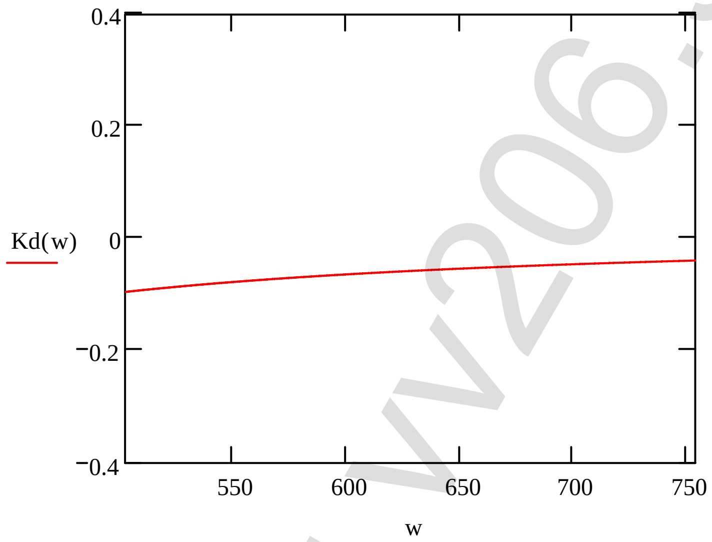
$m1 := 4 \quad f1 := 80 \quad k2 := 260$

$m2 := 0.2 \quad f2 := 120$

$C1 := 69919.7 \quad C2 := 1398.4 \quad C3 := 4563.0$

$$B2h(w) := \frac{\frac{3m2\cdot w^2}{2a}\left(\frac{-7}{3}m1\cdot w^2 + 9C1 + C2\right) - 2C2\cdot\frac{m1\cdot w^2}{a}}{\left(\frac{-7}{3}m1\cdot w^2 + 9C1 + C2\right)\cdot\left(-3m2\cdot w^2 + 4C2 + C3\right) - 4C2^2}$$

$Kd(w) := B2h(w)\cdot r + 1$



Приложение 2

Расчет Кд для второго набора жесткостей

$a := 0.1$ $\quad m1 := 4$ $\quad m2 := 0.2$

$r := 0.2$ $\quad f1 := 80$ $\quad f2 := 120$

$k1 := 130$ $\quad k2 := 260$

$C1 := 17488.8 \qquad C2 := 349.8 \qquad C3 := 39159.9$

$$B2h(w) := \frac{\frac{3m2\cdot w^2}{2a}\left(\frac{-7}{3}m1\cdot w^2 + 9C1 + C2\right) - 2C2\cdot\frac{m1\cdot w^2}{a}}{\left(\frac{-7}{3}m1\cdot w^2 + 9C1 + C2\right)\cdot\left(-3m2\cdot w^2 + 4C2 + C3\right) - 4C2^2}$$

$Kd(w) := B2h(w)\cdot r + 1$