

УДК 534.01;62.4.01

И.И. Аникьев, М.И. Михайлова, А.Т. Забуга, Н.П. Плахтиенко,
Е.А. Сущенко**О КОЛЕБАНИЯХ ТВЕРДОГО ТЕЛА С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ
ДЕМПФЕРОМ В МЕХАНИЗМЕ СЕЙСМОИЗОЛЯЦИИ**

Введение. Со второй половины 20 столетия для защиты сооружений от землетрясений стали использоваться механизмы сейсмоизоляции (МС) [1–5]. Такие механизмы предназначены для уменьшения жесткости связи защищаемых объектов с грунтом и внесения дополнительных элементов диссипации энергии сейсмических возмущений. В последние десятилетия прошлого столетия стали развиваться подходы для сейсмозащиты сооружений, основанные на использовании в МС управляемых демпферов полуактивного типа.

Управляемое демпфирующее воздействие достаточно простой конструкции можно реализовать используя демпфирующие устройства, содержащие соленоиды с ферромагнитными сердечниками. В предлагаемой работе теоретико-экспериментальным способом устанавливается характеристика контактной силы взаимодействия сердечника соленоида с ферромагнитным телом и строится математическая модель вынужденных колебаний системы с управляемым электромагнитным фрикционным демпфером объекта с одной степенью свободы при двух различных законах управления током соленоида.

Расчетная схема и модель колебательной системы с электромагнитным фрикционным демпфером, управляемым по способу обратной связи. На рис. 1 изображена колебательная система, состоящая из твердого тела, имеющего сферические выемки радиуса R , установленного на сферические опорные элементы радиуса $r < R$, позволяющие вертикальные и горизонтальные перемещения несомого тела по горизонтальной ферромагнитной поверхности несущей платформы. Тело несет соленоид с ферромагнитным сердечником, свободно скользящим по вертикальной направляющей и контактирующим с шероховатой горизонтальной поверхностью.

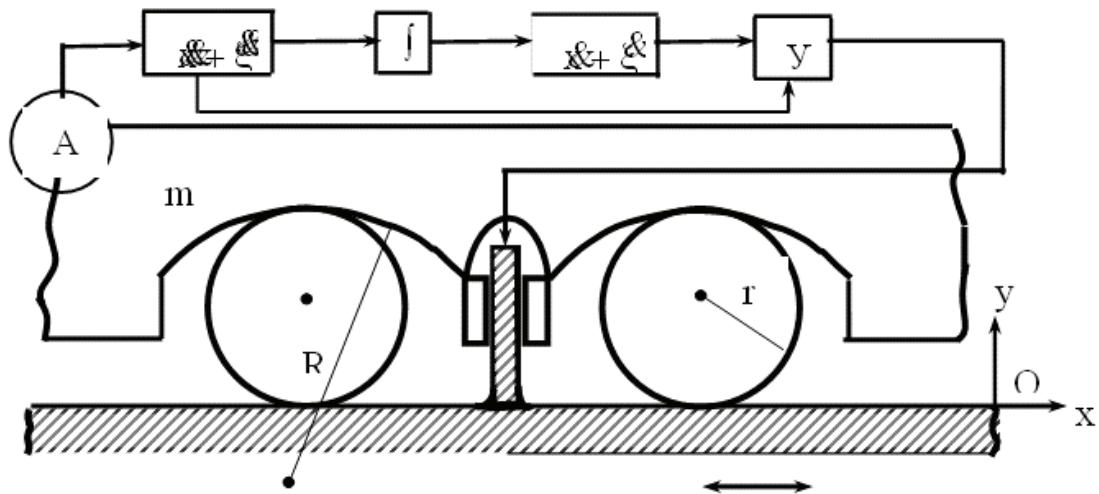


Рисунок 1

При наличии тока I в обмотке соленоида его башмак прижимается к плоскости скольжения с силой $N(I)$. В результате при движении массы возникает сила трения скольжения F_T , направленная против вектора горизонтальной скорости перемещения массы

$$F_T = f N(I) \text{sign} \dot{x}, \quad (1.1)$$

где f – коэффициент трения скольжения, $N(I) = N(-I)$ – непрерывная четная функция аргумента I , $\dot{x} = \frac{dx}{dt}$ – горизонтальная составляющая скорости перемещения тела. С помощью системы управления с контуром обратной связи [3], содержащем акселерометр, интегратор и усилитель, величина тока в обмотке соленоида может быть сделана пропорциональной абсолютному ускорению или скорости. Для получения прозрачных результатов будем считать его апериодическим звеном первого порядка [3] и содержащим один идеальный интегратор. В этом случае связь между током в соленоиде и измеряемым параметром движения твердого тела представима в виде

$$T \frac{dI}{dt} + I = \begin{cases} K_v \frac{d}{dt} (x + \xi(t)), \\ K_a \frac{d^2}{dt^2} (x + \xi(t)), \end{cases} \quad (1.2)$$

где $T, K_a(K_v)$ – постоянные времени и коэффициент усиления сигнала акселерометра (велосиметра) контура системы управления током, $\xi(t)$ – известный закон переносного движения несущей платформы. Первое соотношение (1.2) отвечает управлению по скорости, второе – по ускорению. Дополним соотношения (1.2) контура управления дифференциальным уравнением горизонтального движения системы тел

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + f N(I) \operatorname{sign} \frac{dx}{dt} + cx = -m \frac{d^2\xi}{dt^2}, \quad (1.3)$$

где m – приведенная к горизонтальной оси масса всех подвижных элементов системы, $c = \frac{gm_0}{4(R-r)}$, m_0 – масса твердого тела, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$. Эта формула следует из [5].

Система уравнений (1.2), (1.3) при $T \neq 0$ может быть численно проинтегрирована при функции $N(I)$, удовлетворяющей условию Липшица.

Таким образом, для расчета колебаний тела, согласно уравнений (1.2), (1.3), необходимо выбрать характеристику силы $N(I)$ контактного взаимодействия соленоида с поверхностью несущей платформы.

Экспериментальное определение силы притяжения соленоида к ферромагнитному телу. Для магнитов и соленоидов произвольной формы никаких простых зависимостей силовых характеристик от магнитной проницаемости магнетика и индукции указать нельзя [4]. Это положение прежде всего касается силы притяжения соленоидом ферромагнитных тел. Поэтому определение сил взаимодействия соленоидов с ферромагнитными конструктивными элементами может быть выполнено исключительно экспериментально только для объектов заданной геометрической формы. Для иллюстрации описанной ситуации построим экспериментально характеристику $N(I)$ силы притяжения конкретным соленоидом ферромагнитных тел в зависимости от протекающего в нем тока. Схема опытов приведена на рис. 2.

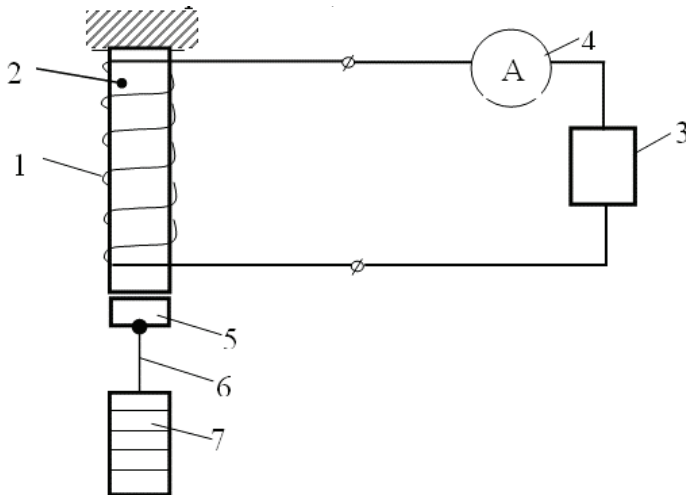


Рисунок 2

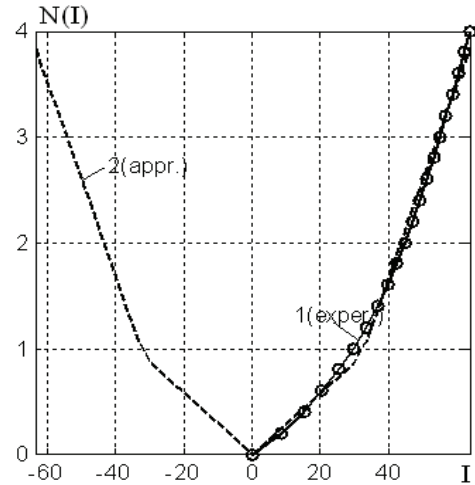


Рисунок 3

Электромагнит (соленоид), состоящий из катушки (1) и магнитомягкого стального сердечника (2) фиксировался в неподвижном держателе в вертикальном положении. Катушка подключалась к источнику питания постоянного тока Б5-47 (3), сила тока в цепи катушки измерялась с помощью цифрового прибора Щ 4313 (4). Вес соленоида составлял 1 Н.

К начальному грузу в виде стального диска, непосредственно контактирующему с сердечником соленоида (5), с помощью нити (6) крепились пробные грузы (7). Вес грузов составлял 0,5, 1,0, 1,5, 2,0, 3,0, 4,0 Н.

В начале каждого опыта по катушке пропускается ток, при котором заданный груз заведомо удерживался в контакте с сердечником соленоида. Затем ток постепенно снижался до значения, при котором происходило падение груза. Ниже в таблице представлены результаты средних измерений по 7 опытам веса N от тока I в катушке.

Таблица 1.

N , Н	0	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	4,0
I , мА	0	18,2	31,1	36,8	43,8	57,1	63,5

Об аппроксимации зависимости от тока контактной силы притяжения соленоида

Зависимость контактной силы притяжения соленоида с магнитомягким сердечником ферромагнитных тел может быть также выражена кусочно-линейной функцией, обладающей свойством

четности. В качестве координатных функций для кусочно-линейной аппроксимации зависимости контактной силы притяжения $N(I)$ используем четные периодические с периодом $4\sqrt{2}$ ромбические гармоники кратного аргумента [4].

$$\text{cor}\sigma = \begin{cases} 1 - |\bar{\sigma}|/q & \text{при } |\bar{\sigma}| \leq 2, \\ |\bar{\sigma}|/q - 3 & \text{при } 2q < |\bar{\sigma}| \leq 4q; \end{cases} \quad (3.1)$$

$q = \sqrt{2}$, $\bar{\sigma} = \sigma - E(\sigma/4/q)4q$, $E(x)$ – целая часть числа x , σ – действительное число. Аппроксимативную формулу метода наименьших квадратов для искомой зависимости $N(I)$ представим в форме

$$N(I) = \sum_{\ell=1}^n b_{\ell} (1 - \text{cor}\ell\sigma(I)), \quad \sigma(I) = 2qI/I_{\max}, \quad (3.2)$$

обращающейся в ноль при $I = 0$, что отвечает физическому содержанию задачи.

Для кривой знакопостоянной кривизны типа параболы в этой формуле можно ограничиться двумя членами ряда, содержащим b_1, b_2 . Такую аппроксимацию экспериментальных данных назовем биромбопараболоидальной. На рис. 3 представлена биромбопараболоидальная аппроксимация контактной силы, полученная при $I_{\max} = 63,5$ мА. В этом случае $b_1 = 1,9$; $b_2 = -0,5$. Имеющаяся здесь точка излома характеризует начало интенсивной ориентации молекулярных токов сердечника соленоида по его вектору магнитной напряженности.

Численным интегрированием нелинейных уравнений (1.2), (1.3) вычислим коэффициент динамичности по ускорению

$$\mu = \max_t |\ddot{x}(t) + \ddot{\xi}(t)| / \max_t |\ddot{\xi}(t)|,$$

характеризующий усиление переносного ускорения колебательной системой. Переносное ускорение представим в виде суперпозиции затухающих гармоник

$$\ddot{\xi}(t) = - \sum_{k=1}^M a_k e^{-\lambda_k t} [\lambda_k \cos(v_k t + \alpha_k) + v_k \sin(v_k t + \alpha_k)].$$

Численные значения параметров выбираем такими:

$$f/m = 0,5, \quad a_k = a = 1, \quad \alpha_k = \frac{2\pi}{M}(k-1), \quad \lambda_k = \lambda = 0,05, \quad v_k = \frac{\omega}{M}k, \quad (k = \overline{1, M}), \quad M = 4,$$

$$K_v \in [0,5 \quad 1,5], \quad T = \frac{2\pi}{\omega} \rho, \quad \rho \in [0,1 \quad 1].$$

Начальные условия примем нулевыми $x(0) = 0$; $\dot{x}(0) = 0$; $I(0) = 0$. На рис. 4 представлена поверхность $\mu_v = \mu(K_v, \rho)$. Как видим, с увеличением коэффициента усиления K_v и уменьшением постоянной времени $T(\rho)$ коэффициент μ уменьшается.

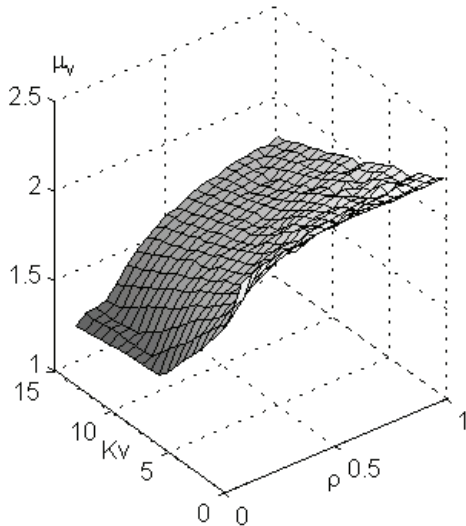


Рисунок 4

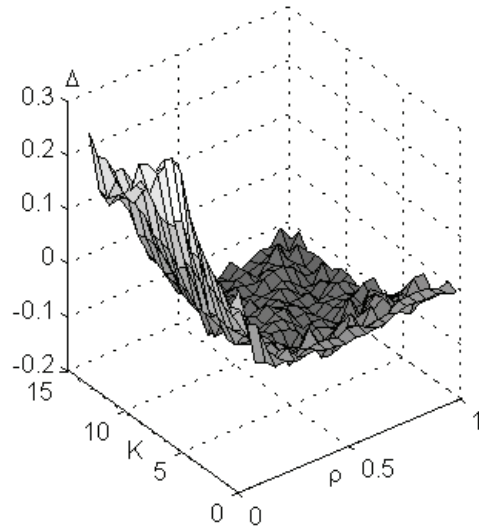


Рисунок. 5

Вычислим функцию $\mu = \mu_a(K_a, \rho)$ при управлении демпфером по ускорению для тех же значений ρ и $K_a = K_v = K$ и составим разность $\mu_v(K_v, \rho) - \mu_a(K_a, \rho) = \Delta(K, \rho)$.

На рис. 5 представлена поверхность $\Delta(K, \rho)$, характеризующая количественное различие влияния законов управления (1.2) на гашение вынужденных колебаний рассматриваемой системы. Из рис. 5 видно, что разность Δ является знакопеременной величиной. Это означает, что при малой постоянной времени более эффективным является управление по скорости. Наоборот, с увеличением постоянной T контура обратной связи управление по ускорению становится предпочтительнее.

ЛИТЕРАТУРА

1. Назин В.В. Новые сейсмостойкие конструкции и железобетонные механизмы сейсмоизоляции зданий и сооружений. – М.: Стройиздат, 1993. – 133 с.
2. Плахтієнко М.П. Ромбічні функції: початки теорії та прикладні задачі. Київ. – 2005. – 132 с.
3. Теория автоматического управления. / Под ред. Пугачева В.С. М.: Физматгиз. – 1963. 646 с.

4. Фриш С.Ф., Тиморева А.В. Курс общей физики. М.: Физматгиз. – 1962. 514 с.
5. Plakhtienko N.P. Nonlinear One-Dimensional Seismodynamic Model of a Solid with Shock Absorbing Support // Int. Appl.Mech. – 2003. – 41, N 3. – P. 336–345.

Получено 03.05.2008 г.