

**УПРУГОСТЬ МАГНИТНОГО ПОЛЯ**

Работа посвящена использованию магнитного поля постоянных магнитов для создания упругости в механических передачах. Актуальность работы обусловлена свойствами элементов, применяемых для создания упругости между частями машин – для снижения динамических нагрузок или стабилизации потребления мощности от источника энергии. Упругими элементами традиционно являются стальная пружина или резиновая деталь. В процессе работы резина может нагреться до расплавленного состояния, а пружина из-за усталости металла теряет упругие свойства.

В качестве упругого элемента может быть применено магнитное поле, созданное магнитами – постоянными или электромагнитами – обращенными одноименными полюсами один к другому. При этом отсутствует нагревание или усталость, но появляется существенная нелинейность зависимости упругости от расстояния между магнитами, которая может обусловить явления, отсутствующие в традиционных упругих элементах.

Цель работы – представить особенности динамических процессов при использовании магнитного поля в качестве упругости.

Модель, для которой выполнен анализ, состоит из двух плоских магнитов, расположенных в параллельных плоскостях (рис. 1, а), обращенных одноименными полюсами друг к другу. Между магнитами существует сила, стремящаяся их развести. Предметом анализа является зависимость этой силы от параметров магнитов и их взаимного расположения.

Знание формы и намагниченности постоянного магнита позволяет для расчетов заменить его эквивалентной системой намагничивающих токов [1, с. 265], (рис. 1,б).

Исходное уравнение для силы, действующей на участок проводника, [2, с. 436]:

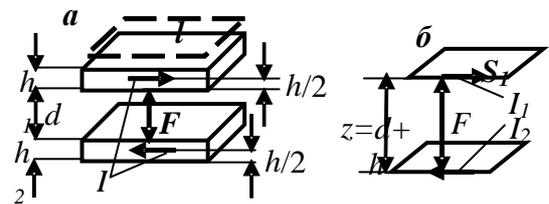


Рис. 1 – Модель анализа силы и упругости магнитов.

а – магниты, б – эквивалентные токи.

$$F = 2 \frac{\mu_0}{4\pi} I_1 I_2 \frac{l}{z}, \tag{1}$$

где  $F$  – сила, обусловленная магнитными полями, Н;  $\mu_0$  – магнитная постоянная,  $\mu_0=4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;  $I_{1,2}$  – токи, между которыми происходит взаимодействие, А;  $l$  – длина проводников с токами, м;  $z$  – расстояние между токами, м.

Токи определяются как намагничивающая сила постоянного магнита, умноженная на его толщину

$$I = H_C h, \tag{2}$$

где  $H_C$  – коэрцитивная сила магнита, А/м;  $h$  – толщина магнита, м.

Принято, что токи проходят посередине толщины магнита, как на рис. 1, а; магниты имеют одинаковую толщину ( $h_1=h_2=h$ ). Тогда, после выполнения алгебраических преобразований,

$$F = 2 \cdot 10^{-7} H_C^2 l \frac{h^2}{d+h}. \tag{3}$$

Максимальное значение силы имеет место при отсутствии зазора между магнитами,  $d = 0$ , ( $z = h$ ):

$$F_{\max} = 2 \cdot 10^{-7} H_C^2 h l. \tag{4}$$

В относительных единицах  $\bar{F} = F / F_{\max}$ ;  $\bar{d} = d / h$

$$\bar{F} = (\bar{d} + 1)^{-1}. \tag{7}$$

Упругость

$$c = \frac{dF}{dd} = 2 \cdot 10^{-7} H_C^2 l \frac{h^2}{(d+h)^2}. \tag{8}$$

Максимальное значение упругости при  $d = 0$ :

$$c_{\max} = 2 \cdot 10^{-7} H_C^2 l, \tag{9}$$

В относительных единицах:

$$\bar{c} = \frac{c}{c_{\max}} = \frac{1}{(\bar{d} + 1)^2}. \tag{10}$$

Графически зависимости представлены на рис. 2. Из графика видно, что сила и упругость существенно зависят от зазора, если он менее трех толщин магнитов.

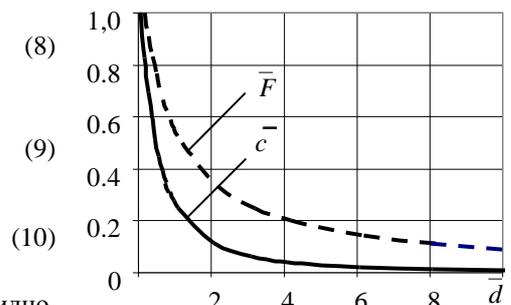


Рис. 2 Зависимость силы и упругости от расстояния между магнитами.

Далее анализируется упругий элемент, имеющий симметричную характеристику (рис. 3). Он состоит из трех магнитов, расположенных в параллельных плоскостях, обращенных одноименными полюсами друг к другу. На средний магнит действуют силы отталкивания от магнитов крайних. При перемещении его вдоль оси, перпендикулярной плоскости магнитов, одна из этих сил уменьшается, другая увеличивается обратно пропорционально расстояниям между эквивалентными токами. Так что сила, действующая на средний магнит,

$$F = F_1 - F_2 = 16 \frac{\mu_0}{4\pi} H_C^2 l h^2 \frac{x}{(d+2h)^2 - 4x^2}. \quad (11)$$

Тут  $x$  – координата, отклонение среднего магнита от среднего между крайними магнитами положения.

Соответственно, упругость

$$c = \frac{dF}{dx} = 16 \frac{\mu_0}{4\pi} H_C^2 l h^2 \frac{(d+2h)^2 + 4x^2}{[(d+2h)^2 - 4x^2]^2}. \quad (12)$$

Для общности зависимость упругости от координаты магнита представлена в относительных единицах  $\bar{x} = x/d$ ;  $\bar{h} = h/d$ .

$$\bar{c}(\bar{x}) = \frac{c}{16 \frac{\mu_0}{4\pi} H_C^2 l} = \bar{h}^2 \frac{(1+2\bar{h})^2 + 4\bar{x}^2}{[(1+2\bar{h})^2 - 4\bar{x}^2]^2}, \quad (13)$$

Графически эта зависимость представлена на рис. 4. Из графиков видно, что с увеличением  $d$  – расстояния между крайними магнитами – упругость уменьшается и становится существенно нелинейной.

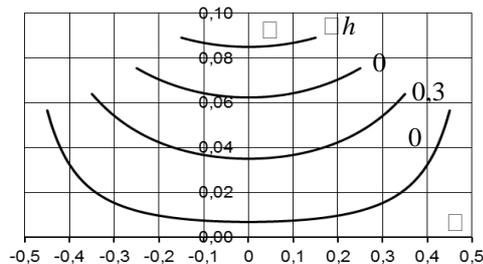


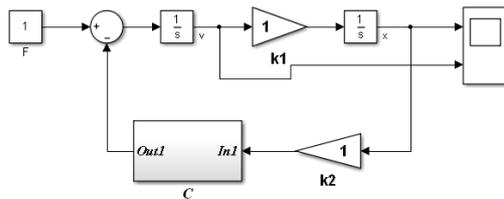
Рис. 4 Зависимость упругости от координаты при разных расстояниях между магнитами.

Нелинейность в передаче может обусловить колебание приводимой массы. Например, движение рабочего органа, на который усилие передается через магнитное поле, описывается уравнением

$$\ddot{x} + k_1 \dot{x} + k_2 \bar{c}(\bar{x})x = 0, \quad (14)$$

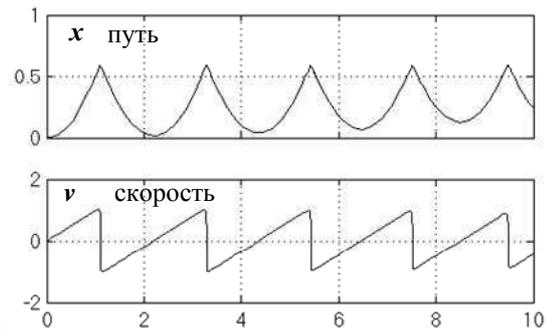
где  $k_1 = \eta/m$ ;  $k_2 = (1,6 \cdot 10^{-6} H_C^2 l m)^{-1}$ .

Это уравнение смоделировано в Simulink, на рис. 5 представлены модель и осциллограмма.



а)

Рис. 5 Движение рабочего органа, на который усилие передается через магнитное поле: а – модель уравнения движения; б – осциллограмма.



б)

Из осциллограммы видно, что приводимая через магнитное поле масса движется с нелинейными колебаниями. Период и амплитуда колебаний, как выяснилось в процессе исследования, зависят от приложенного усилия  $F$ , расстояния между магнитами  $d$  и значения магнитного поля.

**ВЫВОДЫ.**

Магнитное поле постоянных магнитов может обеспечить упругость при передаче усилия на элементы механических систем. В зависимости от зазора между магнитами упругость инвариантна к координате или нелинейно зависит от нее. При нелинейной зависимости возникают колебания в приводимом элементе.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. Р.Фейнман, Р.Лейтон, М.Сэндс Фейнмановские лекции по физике, М., «Мир»;1966, т.5.
2. Яворский Б. М., Детлаф А. А. Справочник по физике. М., «Наука», 1968 г., 940 стр. с илл..