УДК 621.01/.03

С.Л. Букин, к.т.н., доцент,
М.В. Чашко, к.т.н., доцент.
Донецкий национальный технический университет, Украина
Phone: +38 (062) 301-07-47, *E-mail: S.Bukin08@gmail.com*

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ В УПРУГИХ ЭЛЕМЕНТАХ ОСНОВНОЙ СВЯЗИ ПОДВИЖНЫХ МАСС МНОГОМАССОВЫХ ВИБРОМАШИН С НАПРАВЛЕННЫМИ КОЛЕБАНИЯМИ

Рассматривается взаимодействие двух и трех постоянных магнитов при изменении зазора между ними. Получены аналитические выражения для определения силы упругости и коэффициента жесткости. Установлена существенная нелинейность этих параметров при относительно небольших зазорах между магнитами. Перспективно использование новых конструкций упругих элементов основной связи подвижных масс в многомассовых инерционных вибромашинах.
Ключевые слова: *вибромашина, упругий элемент, основная связь, постоянный магнит, упругая сила, жесткость, зазор, нелинейность*

1. Введение

По назначению упругие элементы, применяемые в вибрационных машинах, разделяются на две основные группы [1]:

- основные элементы, усиливающие или возбуждающие основные колебания, передаваемые рабочему органу от вибровозбудителя, в свою очередь которые можно разделить на упругие элементы основной связи подвижных масс, естественно многомассовых вибромашин, и приводные упругие элементы, например, в кривошипно-шатунных или эксцентриковых вибровозбудителях;
- виброизоляторы, воспринимающие вес вибрационной машины и снижающие динамические нагрузки, передаваемые при работе машины на элементы конструкции здания или сооружения.

Несмотря на общие требования, предъявляемые к основным упругим элементам и виброизоляторам, таким как надежность, долговечность, простота конструкции, стоимость и т.д., требования к некоторым другим техническим показателям зачастую имеют диаметрально противоположный характер. Прежде всего, виброизоляторы должны обеспечивать минимальную жесткость для минимизации передаваемых на фундамент или основание динамических нагрузок, а упругие элементы основной связи, должны иметь относительно большу́ю жесткость для обеспечения работы в резонансном и межрезонансном режимах. Учитывая, что упругие элементы работают в тяжелых условиях знакопеременных динамических нагрузок, обеспечить одновременное выполнение указанных выше требований весьма затруднительно. Эта проблема во многом сдерживает развитие высокоэффективных многомассовых вибрационных машин с резонансным или антирезонансным режимом работы, с реализацией гармонических или полигармонических законов колебаний.

В вибрационных машинах в качестве упругих элементов основной связи главным образом применяют цилиндрические стальные пружины; резиновые элементы цилиндрической формы или в виде параллелепипеда; нелинейные элементы (буфера); пластинчатые рессоры из стали, стеклопластика, специальных материалов; стальные

торсионы; резино-металлические блок-шарниры и пр. [2, 3]. В ряде случаев обеспечение требуемой долговечности и жесткости упругого элемента достигалось усложнением конструкции как непосредственно элемента, так и технологической оснастки, предназначенной для их изготовления [4].

Однако в настоящее время, несмотря на значительную номенклатуру производимых упругих элементов, практически полностью отсутствует возможность синтеза нелинейных упругих элементов с заданными параметрами для использования, например, в вибромашинах с полигармоническим режимом колебаний [5].

Поэтому, поиск новых направлений разработки и создания упругих элементов, позволяющих синтезировать требуемую характеристику жесткости отличной от линейной, является актуальной задачей. Изучение и анализ литературных источников позволил авторам заострить внимание на использование магнитных свойств постоянных магнитов. Упругие магнитные опоры, амортизаторы, муфты и т.д. в последние годы получают все большее применение в различных областях промышленности в связи с резким снижением стоимости постоянных высокоэнергетических магнитов на основе сплавов типа NdFeB (неодим-железо-бор) магнитов [6].

Ц е л ь р а б о т ы – определение сил взаимодействия, обусловленных магнитным полем постоянных магнитов, как функций их пространственных координат.

Рассмотрены задачи определения указанных параметров в ситуациях: 1 - два плоских магнита; 2 - больше двух магнитов; 3 - два криволинейных магнита.

2. Основное содержание и результаты работы

Знание формы и намагниченности постоянного магнита позволяет для расчетов заменить его эквивалентной системой электрических токов намагничивания [7, 8]. Такая замена возможна как при расчете характеристик магнитного поля, так и при расчетах сил, действующих на магнит со стороны внешнего поля.

Д в а п л о с к и х м а г н и т а .

Анализируемая модель состоит из двух плоских магнитов, расположенных в параллельных плоскостях (рис. 1, а) и обращенных одноименными полюсами друг к другу.

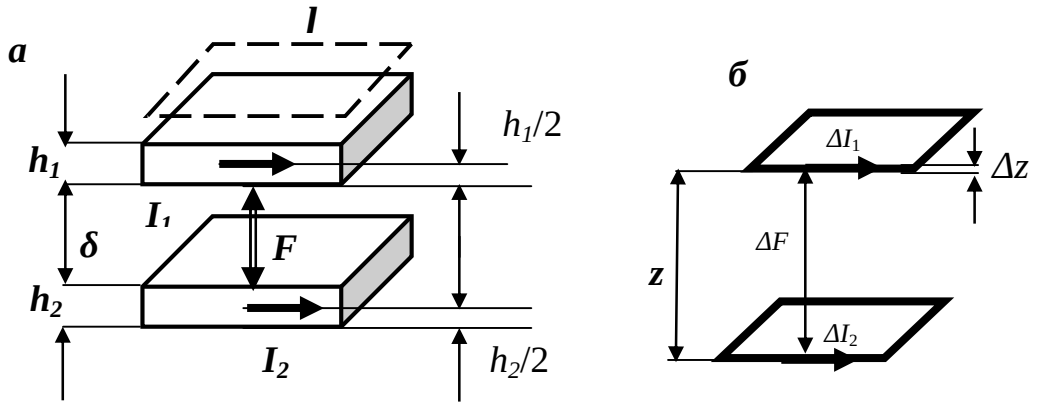

Рис. 1. Модель для анализа силы и упругости двух магнитов: а – магниты; б – эквивалентные токи

Между магнитами существует сила, стремящаяся их развести. Предметом анализа является зависимость этой силы от параметров магнитов и их взаимного расположения.

Существующие анализы указанного взаимодействия выполнены для условия, что расстояния между магнитами существенно больше размеров магнитов. Но при использовании магнитов в вибромашине, где требуется достаточно большая сила расталкивания, дело обстоит как раз наоборот: расстояния между магнитами существенно меньше размеров магнитов, так что этими размерами недопустимо пренебрегать, так как они оказывают существенное влияние на силу расталкивания.

Исходное уравнение для силы, действующей на участок проводника, [9]:

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

где F – сила, обусловленная магнитными полями токов, Н;

μ_0 – магнитная постоянная, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Вс/Ам;

$I_{1,2}$ – 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

$$I = H_C h,$$

где H_C – коэрцитивная сила магнита, А/м;

h – толщина магнита, м.

При малом, по сравнению с толщиной магнитов расстоянии между магнитами, сила взаимодействия определяется как сумма сил от элементарных токов.

Элементарный ток $\Delta I = \Delta z \cdot H_C$. Тогда модуль элементарной силы (рис. 1, б) равен

$$\Delta F = 2 \cdot 10^{-7} l \quad \frac{2}{C} \quad {}^{2} \Big/ \ ,$$

а модуль суммарной силы можно определить как

$$F = 2 \cdot 10^{-7} l \quad \frac{2}{C} \int_{\delta}^{\delta+h2} \left(\int_{\delta}^{\delta+h1} \frac{dz}{z} \right) . \qquad (1)$$

Выражение (1), получившееся в результате интегрирования, достаточно сложно и может быть использовано при уточняющих расчетах, поэтому ниже для анализа используется модель, при которой токи проходят посередине толщины магнита, как на рис. 1, а. Тогда

$$F = 2 \cdot 10^{-7} I_1 I_2 \frac{l}{z}, \quad I_1 = H_C h_1, \quad I_2 = H_C h_2 \ \rightarrow \ F = 4 \cdot 10^{-7} H_C^2 \frac{h_1 h_2}{2\delta + h_1 + h_2} l.$$

Максимальное значение силы имеет место при отсутствии зазора между магнитами, т.е. при δ = 0:

$$F_{\max} = 4 \cdot 10^{-7} H_C^2 \frac{h_1 h_2}{h_1 + h_2} l.$$

Если толщины магнитов одинаковы $h_1=h_2=h$, то $F^*_{\max} = 2\cdot10^{-7} H_C^2 hl$, а относительная сила упругости равна

$$\tilde{F} = F \Big/ F^*_{\max} = h \Big/ (\delta + h) = 1 \Big/ \left(\tilde{\delta} + 1\right),$$

где $\tilde{\delta} = \delta / h$ - относительный зазор между магнитами.

Коэффициент жесткости определяется как

$$c = \frac{dF}{d\delta} = 2\cdot10^{-7} H_C^2 l \frac{h}{(\delta + h)^2}.$$

Максимальное значение жесткости будет при $\delta = 0$:

$$c_{\max} = 2\cdot10^{-7} H_C^2 l / h.$$

Тогда относительная жесткость равна

$$\tilde{c} = c / c_{\max} = 1 \Big/ \left(\tilde{\delta} + 1\right)^2.$$

На рис. 2 эти зависимости представлены графически.

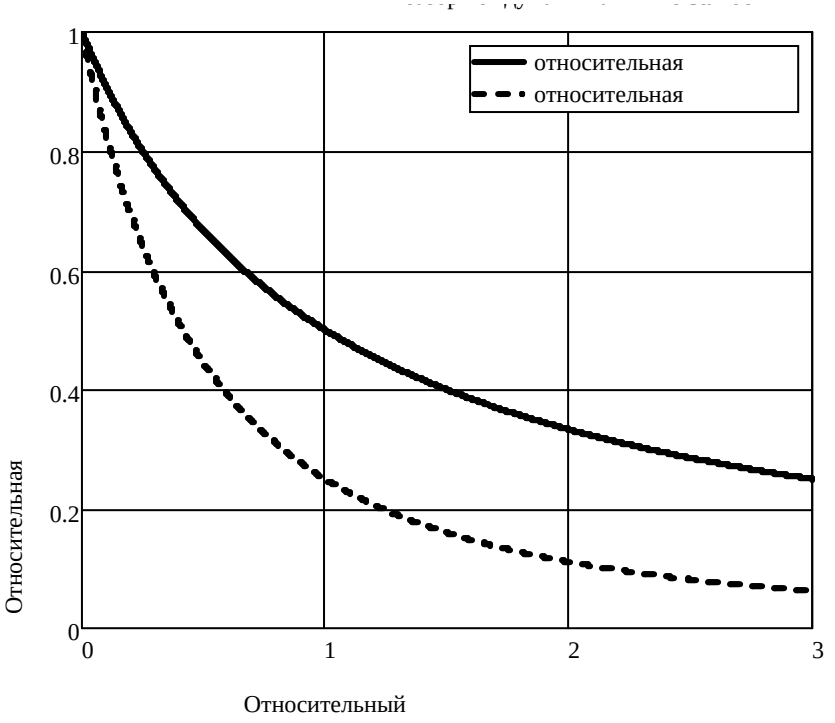

Рис. 2. Зависимость относительных силы упругости и жесткости от относительного зазора между магнитами при взаимодействии двух магнитов

Из графика видно, что сила упругости и жесткость при взаимодействии двух однополюсных магнитов нелинейно зависят от зазора между ними. Причем при

относительном зазоре менее единицы сила взаимодействия магнитов составляет более 0,5 от максимальной силы.

Три плоских магнита.

Модель состоит из трех плоских магнитов, расположенных в параллельных плоскостях (рис. 3), обращенных одноименными полюсами друг к другу.

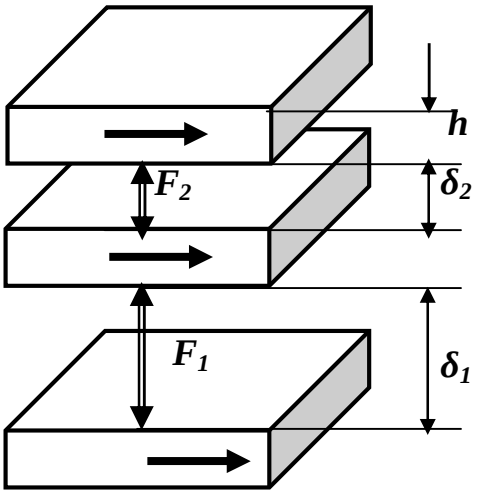

Рис. 3. Модель для анализа силы и упругости совокупности магнитов

Между средним и крайними магнитами существуют расталкивающие силы. Предметом анализа является зависимость суммы этих сил от параметров магнитов и расположения среднего магнита. Использованы зависимости, полученные выше при $h_1=h_2=h_3=h$.

Модуль суммарной силы, действующей на средний магнит, равен

$$F = F_1 - F_2 = 4\cdot 10^{-7} H_C^2 lh^2 \left(\frac{1}{\delta_1 + h} - \frac{1}{\delta_2 + h} \right),$$

Примем теперь $\delta_1 + \delta_2 = 2\delta \to \delta_2 = 2\delta - \delta_1$. Тогда сила взаимодействия равна

$$F = 4\cdot 10^{-7} H_C^2 lh \left(\frac{1}{\tilde{\delta}_1 + 1} - \frac{1}{2\tilde{\delta} - \tilde{\delta}_1 + 1} \right),$$

а коэффициент жесткости определяется из выражения

$$c = \frac{dF}{d\delta_1} = 4\cdot 10^{-7} H_C^2 lh \left[\frac{1}{(\tilde{\delta}_1 + 1)^2} + \frac{1}{(2\tilde{\delta} - \tilde{\delta}_1 + 1)^2} \right],$$

где $\tilde{\delta} = \delta / h$, $\tilde{\delta}_1 = \delta_1 / h$.

Значит при $\tilde{\delta}_1 = 0$

$$F_{\max} = 4\cdot 10^{-7} H_C^2 lh \frac{\tilde{\delta}}{2\tilde{\delta}+1} \text{ и } c_{\max} = 8\cdot 10^{-7} H_c^2 lh \frac{2\tilde{\delta}^2+2\tilde{\delta}+1}{\left(2\tilde{\delta}+1\right)^2},$$

Относительно максимума суммарная сила, действующая на средний магнит, и относительный коэффициент жесткости равна

$$\tilde{F} = \frac{F}{F_{\max}} = \frac{2\left(\tilde{\delta}-\tilde{\delta}_1\right)\left(2\tilde{\delta}+1\right)}{\tilde{\delta}\left(\tilde{\delta}_1+1\right)\left(2\tilde{\delta}-\tilde{\delta}_1+1\right)},\ \tilde{c} = \frac{\left(2\tilde{\delta}^2-2\tilde{\delta}\tilde{\delta}_1+2\tilde{\delta}+\tilde{\delta}_1^2+1\right)\left(2\tilde{\delta}+1\right)^2}{\left(\tilde{\delta}_1+1\right)^2\left(2\tilde{\delta}-\tilde{\delta}_1+1\right)^2\left(2\tilde{\delta}^2+2\tilde{\delta}+1\right)}.$$

О в а л ь н ы е м а г н и т ы .

Модель, для которой выполнен анализ, состоит из двух магнитов, обладающих кривизной, расположенных так, что их противолежащие плоскости, параллельны (рис. 4). Магниты обращены одноименными полюсами друг к другу.

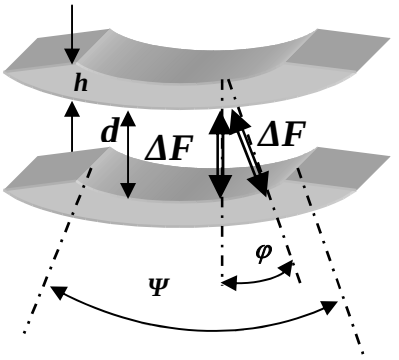

Рис. 4. Модель для анализа взаимодействия магнитов, обладающих кривизной

На основании выкладок, приведенных выше, зависимость силы притяжения от геометрии магнитов

$$\Delta F_N = \Delta F \cos\varphi = 2\cdot 10^{-7} H_C^2 l \frac{h}{d+h}\cos\varphi,$$

$$F_N = 2\cdot 10^{-7} H_C^2 l \frac{h}{d+h}\int_{-\Psi}^{\Psi}\cos\varphi d\varphi = 4\cdot 10^{-7} H_C^2 l \frac{h}{d+h}\sin\Psi.$$

Максимальное значение эта сила имеет при Ψ=π/2, относительное значение силы

$$\tilde{F}_N = \frac{F_N}{F_{N\max}} = \sin\Psi.$$

3. Выводы.

- Постоянные магниты могут быть использованы в многомассовых вибромашинах в качестве нелинейных упругих элементов основной связи подвижных масс.
- Зависимость жесткости от зазора, обеспечиваемая магнитами, может изменяться от инвариантности к зазору до значений, стремящихся к бесконечности.
- Наиболее эффективно применение постоянных магнитов при соотношении зазора и толщины магнита менее 2.

- Разработка конструкции конкретного упругого элемента с неодимовыми супермагнитами требует дальнейших исследований.

Список литературы:

1. Вибрации в технике: справочник. В 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей (пред.). – М.: Машиностроение, 1981. – Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под ред. Э.Э. Лавендела. 1981. 509 с.

2. Потураев В.Н. Резиновые и резино-металлические детали машин / В.Н. Потураев. – М.: Машиностроение. 1966. 300 с.

3. Быховский И.И. Упругие элементы вибромашин / И.И. Быховский. – М.: Машиностроение. 1971. 82 с.

4. Букин, С.Л. Теоретические предпосылки совершенствования цилиндрических упругих элементов инерционных вибромашин / С.Л. Букин, А.Я. Жислин, С.Г. Маслов // В сб.: Наукові праці Донецького національного технічного університету. Випуск 15 (131), серія гірничо-електромеханічна. – Донецьк: ДонНТУ, 2008. – С. 78-85.

5. Belovodskiy V.N. Nonlinear Antiresonance Vibrating Screen / V.N. Belovodskiy, S.L. Bukin, M.Y. Sukhorukov // Advances in Mechanisms Design. Proceedings of TMM 2012. Mechanisms and Machine Science. – Springer, 2012. – Vol. 8 – pp. 167-173.

6. Цивилицин В.Ю. Современные магнитотвердые материалы на основе РЗМ / В.Ю. Цивилицын Ю.В. Мильман, И.Б. Бондар // Журн. функцион. материалов. -2008. - 2, №2. –С. 42-47.

7. Цивилицин В.Ю. Применение спеченных высокоэнергетических постоянных магнитов при разработке «магнитных пружин» / В.Ю. Цивилицын, Ю.В. Мильман, В.А. Гончарук, И.Б. Бондар // Доповіді Національної академії наук України, 2010. №9. С. 78-84. ISSN 1025-6415.

8. Фейнман Р. Фейнмановские лекции по физике. Том 5 / Р. Фейнман, Р. Лейтон, М. Сэндс. – М.: Мир. 1966.

9. Яворский Б. М. Справочник по физике / Б.М. Яворский, А.А. Детлаф. - М.: Наука, 1968. 940 с.

S.L. Bukin, M.V. Chashko

ABOUT POSSIBILITY OF THE USE OF PERMANENT MAGNETS IN RESILIENT ELEMENTS OF BASIC CONNECTION OF MOBILE THE MASSES OF MULTIMASS VIBROMACHINES WITH THE DIRECTED VIBRATIONS

Co-operation is examined two and three permanent magnets at the change of gap between them. Analytical expressions are got for determination of force of resiliency and coefficient of inflexibility. Essential non-linearity of these parameters is set at relatively small gaps between magnets. The use of new constructions of resilient elements of basic connection of mobile the masses is perspective in multimass inertia vibromachines.

Keywords: *vibromachine, resilient element, basic connection, permanent magnet, resilient force, gap, non-linearity.*

С.Л. Букін, М.В. Чашко

ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ В ПРУЖНИХ ЕЛЕМЕНТАХ ОСНОВНОГО ЗВ'ЯЗКУ РУХЛИВИХ МАС БАГАТОМАСОВИХ ВІБРОМАШИН З НАПРАВЛЕНИМИ КОЛИВАННЯМИ

Розглядається взаємодія два і трьох постійних магнітів при зміні зазору між ними. Отримані аналітичні вирази для визначення сили пружності і коефіцієнта жорсткості. Встановлена істотна нелінійність цих параметрів при відносно невеликих зазорах між магнітами. Перспективне використання нових конструкцій пружних елементів основного зв'язку рухливих мас в багатомасових інерційних вібромашинах.

Ключові слова: *вібромашина, пружний елемент, основний зв'язок, постійний магніт, пружна сила, жорсткість, зазор, нелінійність.*

Надійшла до редколегії 14.06.2013 р.