

## НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВИБРОИЗОЛЯТОРОВ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ

*Розглянута математична модель роботи динаміки віброізолятора з постійними магнітами. Наведені картини магнітного поля у 3D вигляді та розраховані перехідні процеси. Показано, що робота такої системи залежить від параметрів магнітів, ваги тіла, амплітуди, форми та частоти коливань. Показано, що в значній мірі робота системи залежить від значення демпфуючої сили, яка повинна бути досить значною. Показано, що віброізолятори, побудовані на базі постійних магнітів з радіальним намагнічуванням, потребують примусову стабілізацію в радіальному напрямку незалежно від їх кількості та просторового розміщення.*

*В статье рассмотрены особенности работы динамики виброизолятора с постоянными магнитами. Приведены картины магнитного поля в 3D виде и рассчитаны переходные процессы. Показано, что работа такой системы зависит от параметров магнитов, веса тела, амплитуды, формы и частоты колебаний. Показано, что в значительной мере работа системы зависит от значения демпфирующей силы, которая должна быть значительной. Показано, что виброизоляторы, построенные на базе постоянных магнитов с радиальным намагничиванием, требуют принудительной стабилизации в радиальном направлении независимо от их количества и пространственного размещения.*

В последние годы наблюдается существенный прогресс в разработке композитных постоянных магнитов. Один из таких композитов – NdFeB – обладает уникальными магнитными характеристиками. В этой связи, в литературе и Интернете появилось множество статей и конструкций, начиная от магнитных липучек и кончая "вечными" двигателями. В [1] рассмотрена возможность применения таких магнитов в качестве виброизолятора. Система представляет собой два коаксиальных полых цилиндра со встречной радиальной намагниченностью (рис. 1).

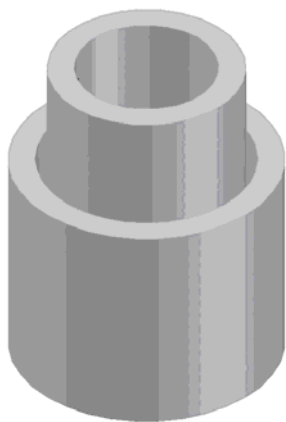


Рис. 1. Система коаксиальных цилиндрических магнитов

В работе [1] решена трехмерная задача по определению скалярного магнитного потенциала и рассчитаны осевые и радиальные силы при смещении внутреннего цилиндра.

Одним из результатов работы является положение, что "зі зміщенням внутрішнього магніту в радіальному напрямку відносно центрального положення, радіальна складова сили зростає". Причому, показано, що радіальна сила діє в напрямку протилежному сміщенню.

На основании этого следует вывод о стабильности подвеса: "При зміщенні магніту у вертикальному напрямку, значення магнітної сили (радіальної, прим. автора), що стабілізує його положення, зменшується". Т.е. стабілізуюча сила зменшується, але положення магнітів залишається стабільним.

Это утверждение несколько неточно. Известно, что для нахождения тела в состоянии равновесия необходимо (помимо равенства нулю суммарного вектора сил, действующих на тело) так же равенство нулю суммарного момента сил относительно любой выбранной оси, а вот моменты сил в статье [1] не определяются.

О появлении опрокидывающих моментов можно судить по виду изоповерхностей скалярного магнитного потенциала, показанных на рис. 2.

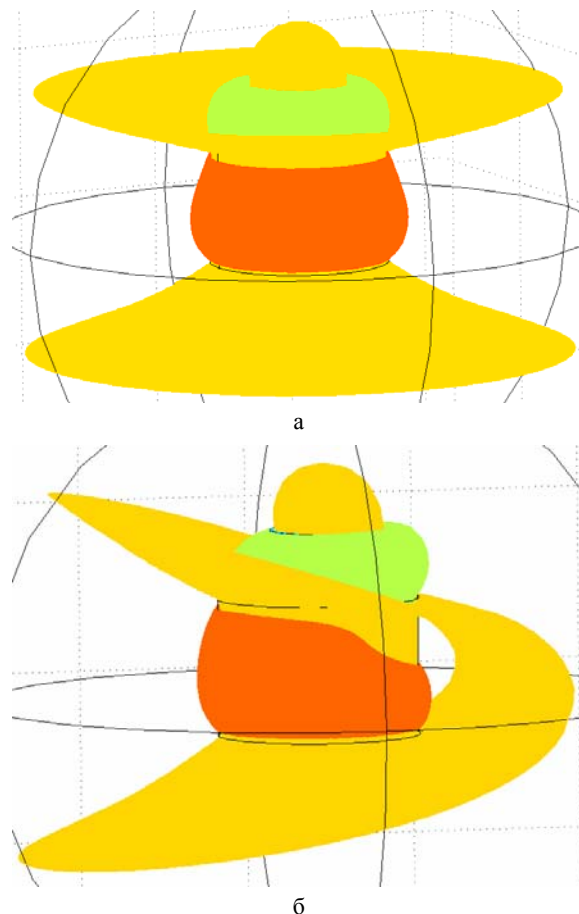


Рис. 2. Изоповерхности магнитного потенциала:  
а – магниты коаксиальны;  
б – смещение центрального магнита по радиусу

Как показывают расчеты, значения моментов, появляющихся даже при небольшом смещении центрального магнита, достаточно велико. При размерах магнитов, принятых в статье [1], моменты имеют порядок (в зависимости от расстояния смещения) 0,3 Н·м относительно осей  $x$  или  $y$  (это при размерах магнитов порядка спичечной коробки). Т.е. о стабильном подвесе в данном случае говорить не приходится, а радиальную стабилизацию необходимо осуществлять принудительно.

Работа такого подвеса в силу нелинейности характеристики, будет достаточно сложной. Кроме того, одним из важных факторов нормальной работы системы, является значение демпфирующей силы, которая должна обеспечивать колебания системы в установленном диапазоне.

Для подтверждения этого положения была решена задача по определению демпфирующих свойств такого подвеса.

На рис. 3 показана магнитная сила, которая была получена в [1], аппроксимированная сплайном.

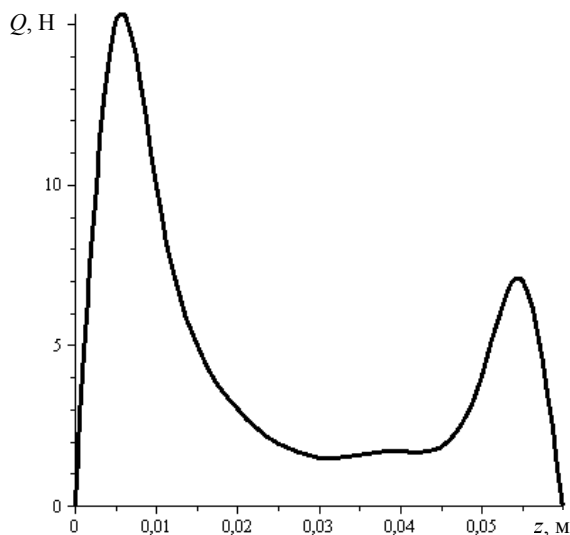


Рис. 3. Магнитная сила в функции высоты внутреннего магнита над опорной плоскостью

Так как рабочим участком характеристики является участок, на котором  $\frac{dQ}{dz} < 0$ , то при весе демпфируемого тела – 8 Н, амплитуда колебаний должна быть в диапазоне (8 – 30) мм, а сила – (1,5 – 15) Н без учета переходного механического процесса.

Расчет демпфера проводился в предположении, что: демпфер – цилиндр высотой 6 мм и диаметром 6 мм; поршень – высота 2,5 мм, радиус – 2,9 мм; демпфирующая среда – машинное масло при температуре 40 °С.

В этом случае для скоростей до 0,5 м/с сила сопротивления может быть определена как:

$$R = 300 \cdot v, \quad (1)$$

где  $R$  – сила сопротивления движению, Н;  $v$  – скорость движения поршня, м/с.

В качестве начальных условий было выбрано начальное положение магнита – 55 мм и нулевая начальная скорость. Причем, вибрация задавалась как сила, изменяющаяся по синусоидальному закону

с частотой 1,5 Гц (закон изменения силы и частота могут задаваться любыми и выбираются для каждого конкретного случая).

На рис. 4 показано предельное устойчивое состояние виброгасителя при предельной амплитуде силы вибрации (подвес в устойчивом состоянии).

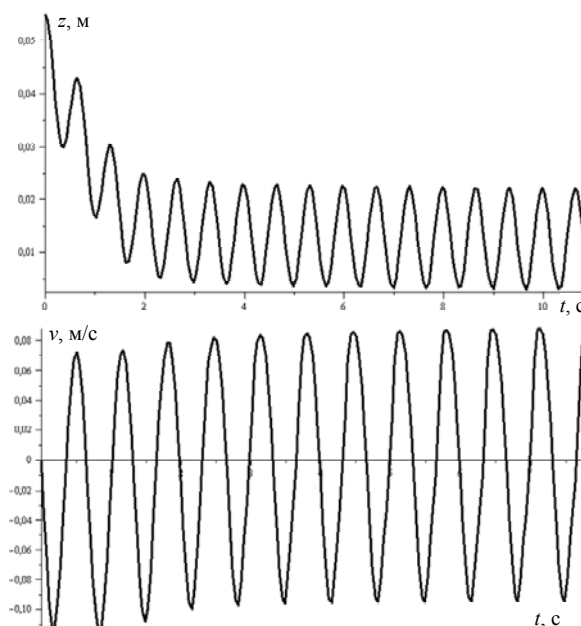


Рис. 4. Предельные значения амплитуды и скорости виброгасителя

Магнитная сила (осевая) при этом изменяется по закону, показанном на рис. 5.

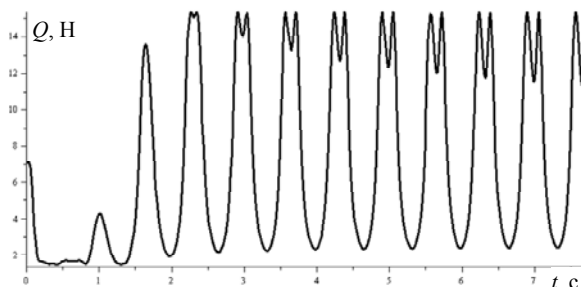


Рис. 5. Предельная электромагнитная сила

Необходимо отметить, что термин "предельная сила" может употребляться только при определенной демпфирующей силе. Так для того же демпфера, но с температурой масла 20 °С, сила будет определяться:

$$R = 1100 \cdot v. \quad (2)$$

В этом случае, графики амплитуды и скорости для той же внешней силы колебания показаны на рис. 6, 7.

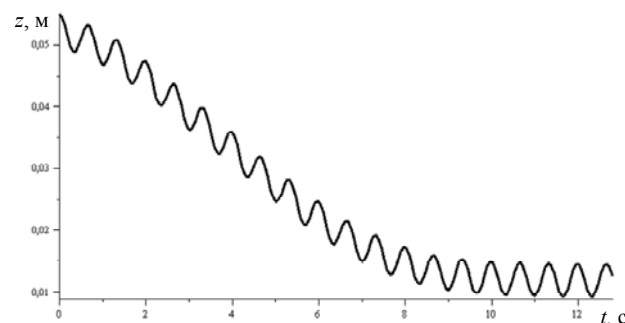


Рис. 6. Амплитуда колебаний

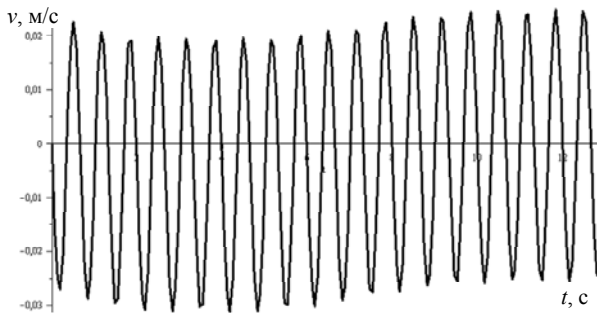


Рис. 7. Скорость колебаний

При этом магнитная сила будет иметь вид, показанный на рис. 8.

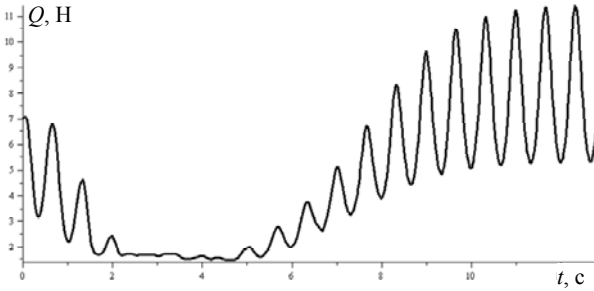


Рис. 8. Изменение магнитной силы

Наличие в спектре колебаний третьих и высших гармоник значительно влияет на характер колебаний. Необходимо отметить, что с увеличением частоты колебаний, система может устойчиво работать при больших значениях внешней силы.

Один из вопросов, который возникает в процессе работы с такого рода устройствами: если невозможно равновесие двух магнитов, то можно ли добиться равновесия системы магнитов? Для этого была рассмотрена система, в которой магниты располагались в вершинах правильного треугольника (рис. 9).

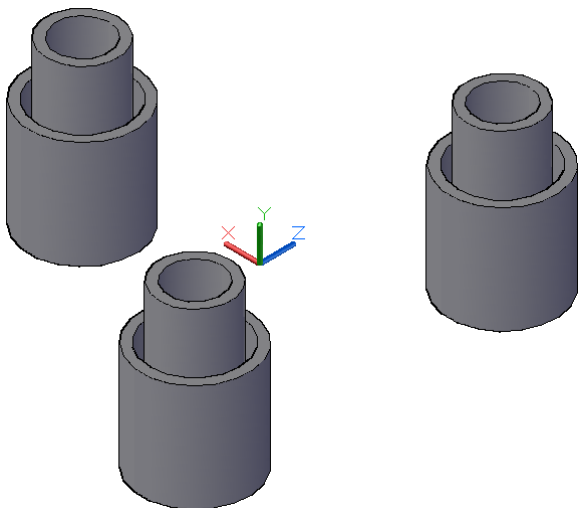


Рис. 9. Система радиально намагниченных магнитов

Все три внутренних магнита являются одним телом (программное задание), что дает возможность рассчитать суммарный момент. Такие расчеты были проведены.

На рис. 10 показаны поверхности одинакового уровня магнитного потенциала для системы с концен-

трическими магнитами и смещенными внутренними магнитами по оси  $x$  с видом на плоскость  $xy$ .

Расчет показывает, что значения вращающих моментов не равны нулю даже при концентрическом положении внутренних магнитов:  $M_x \approx -0,06$  Н·м,  $M_y \approx -0,15$  Н·м,  $M_z \approx 0$ .

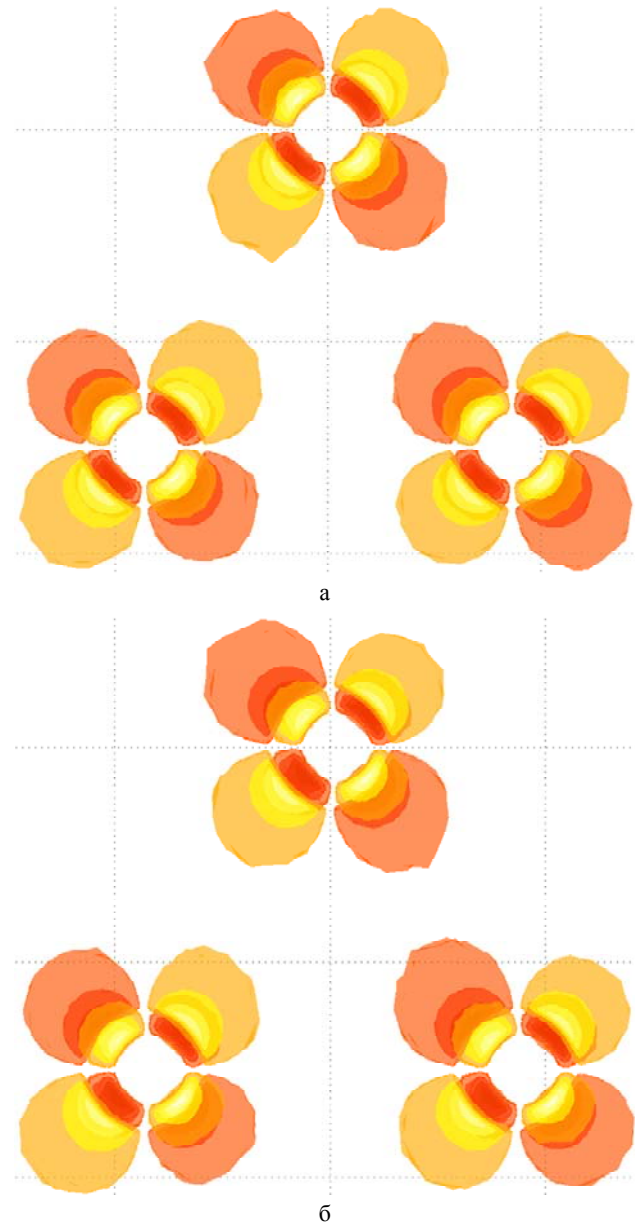


Рис. 10. Эквипотенциали магнитного потенциала системы магнитов: а – концентрических; б – смещенных по оси  $x$

В случае смещения центральных магнитов в положительном направлении оси  $x$ :  $M_x \approx -0,22$  Н·м,  $M_y \approx 0,22$  Н·м,  $M_z \approx -0,11$  Н·м. Т.е., при смещении значения моментов существенно возрастают.

Невозможность стабилизации положения центрального магнита видна из рис. 11, на котором показано распределение давления тензора Максвелла по границам магнита, смещенного по оси  $x$ .

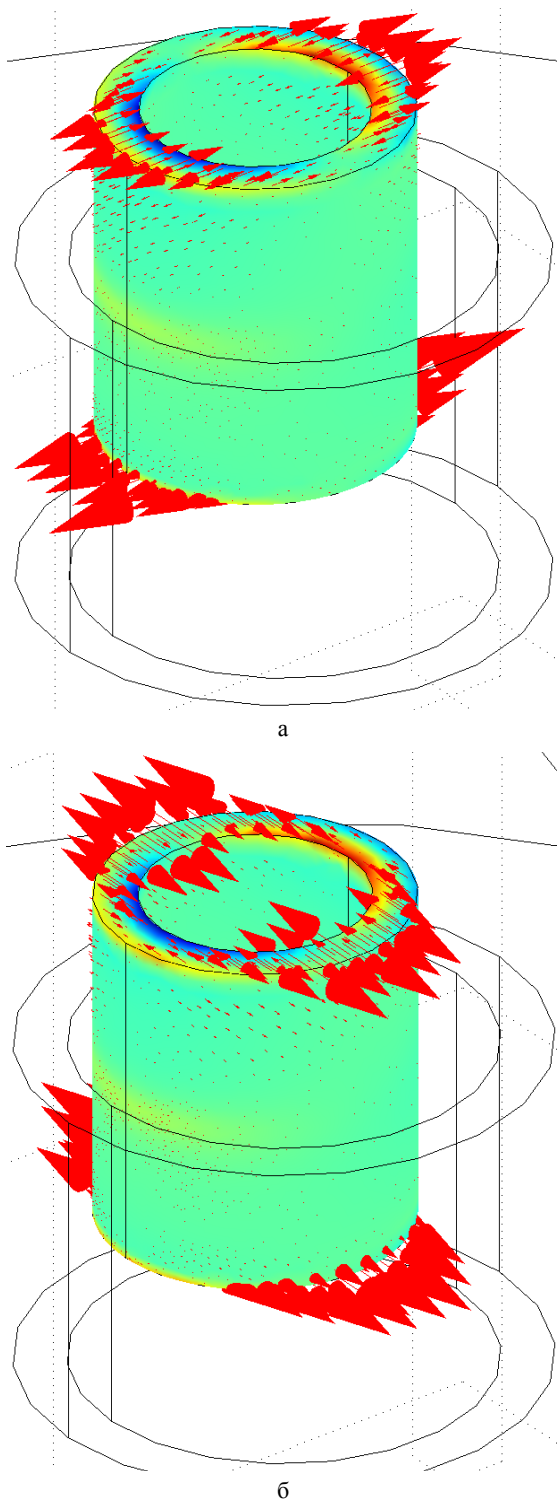


Рис. 11. Распределения давления тензора Максвелла по осям  $x$  (а) и  $y$  (б)

Как следует из рис. 11, опрокидывающие силы сосредоточены на торцах магнита. Причем, в направлении оси  $x$  суммарные силы на торцах имеют одно направление, но отличаются по величине, а в направлении  $y$  отличаются как по величине, так и по знаку.

Из рис. 11 видно, что распределение сил сосредоточено в основном на торцах магнитов и их распределение имеет сложный характер (необходимость определения равнодействующей силы).

Такое распределение сил существенно влияет на точность расчетов (вычитание величин одного порядка). Поэтому такой расчет требует достаточно мелкого шага расчетной сетки, что, в свою очередь, требует значительных вычислительных ресурсов.

#### Выводы.

1. Необходима принудительная стабилизация внутренних магнитов в радиальном направлении.

2. Ввиду нелинейной магнитной противодействующей силы, стабилизация в осевом ( $z$ ) направлении существенно зависит от амплитуды внешней силы, ее частоты и формы, демпфирующей силы.

3. Подобрать размещение системы магнитов, обеспечивающее радиальную стабилизацию, вряд ли удастся (теорема Ирншоу).

4. Цена магнитов NdFeB достаточно велика, а радиальное намагничивание нетехнологично.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бондар Р.П., Чеботарун І.С., Подольцев О.Д. Моделирование динамических характеристик нелинейной колебательной системы с магнитной пружиной. Часть 1 // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2014. – №2. – С. 18-20.

**REFERENCES:** 1. Bondar R.P., Chebotarun I.S., Podoltsev A.D. Modeling of dynamic characteristics of a nonlinear oscillatory system with a magnetic spring. Part 1. *Elektrotekhnik i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2014, no.2, pp. 18-20.

*Поступила (received) 08.09.2014.*

*Байда Евгений Иванович, к.т.н., доц.,  
Национальный технический университет  
"Харьковский политехнический институт",  
61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21,  
тел/phone +38 057 7076976, e-mail: baida\_kpi@mail.ru*

*E.I. Baida  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
21, Frunze Str., Kharkiv, 61002, Ukraine*

#### **Some features of dynamic characteristics of bumpers with permanent magnets.**

This article describes the features of the dynamics of the bumper with permanent magnets. Pictures of the magnetic field in 3D are presented, transients are calculated. It is shown that operation of this system depends on the parameters of the magnets, body weight, amplitude, shape and frequency of oscillations. It is shown that operation of the system mainly depends on the damping force, which must be considerable. It is shown that the bumpers, built on the basis of permanent magnets with radial magnetization, require forced stabilization in the radial direction regardless of their number and spatial distribution.

**Key words – dynamics of the bumper with permanent magnets, magnets with radial magnetization.**