

МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕЛІНІЙНОЇ КОЛИВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ІЗ МАГНІТНОЮ ПРУЖИНОЮ. ЧАСТИНА 1

Розглянуто пасивний магнітний віброізолятор (магнітну пружину) з циліндричними магнітами. Розроблено математичну модель для розрахунку магнітного поля та сили магнітної пружини. Проведено чисельний розрахунок магнітного поля віброізолятора методом скінчених елементів у тривимірній системі координат. Наведено результати експериментальних досліджень, що підтверджують достовірність розрахункових даних.

Рассмотрен пассивный магнитный виброизолятор (магнитная пружина) с цилиндрическими магнитами. Разработана математическая модель для расчета магнитного поля и силы магнитной пружины. Выполнен численный расчет магнитного поля виброизолятора методом конечных элементов в трехмерной системе координат. Приведены результаты экспериментальных исследований, которые подтверждают достоверность расчетных данных.

ВСТУП

Висока ефективність пасивних віброізоляторів або магнітних пружин з постійними магнітами зумовлена великим значенням магнітної сили та високою залишковою магнітною індукцією рідкоземельних магнітних матеріалів. Більшість магнітних віброізоляторів працюють в режимі, при якому полюси однієї полярності магнітів відштовхуються. Одна з найпростіших конфігурацій магнітної пружини показана на рис. 1,а і складається з двох постійних магнітів, які мають зустрічну намагніченість. Недоліком такої конфігурації є нестійкість системи в боковому напрямку.

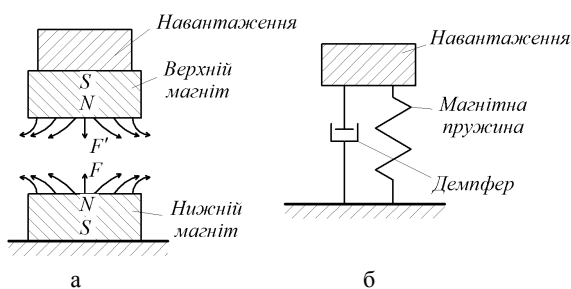


Рис. 1. Конфігурація найпростішої магнітної пружини

На сьогоднішній день, в конструкціях пасивних віброізоляторів, широко використовуються плоскі або циліндричні постійні магніти. Система де верхній постійний магніт підвішений на нижній, може бути представлена еквівалентною магнітною пружиною, як показано на рис. 1,б. Такі магнітні пружини, як правило, застосовується в системах підвіски транспортних засобів для поліпшення комфорту та безпеки пасажирів або полегшення вібраційного контролю силових машин на судах. Ізолятор з чотирма наборами прямокутних постійних магнітів, описаний в роботі [1], використовується для підвищення точності обладнання. В конструкціях магнітної підвіски ізолятора з одним ступенем свободи [2, 3] магнітні пружинні елементи поєднуються з механічними пружинами і збираються паралельно. Це забезпечує низьку динамічну жорсткість та високі статичні показники. В роботі [4] запропоновано тип магнітної пружини з чотирма парами циліндричних постійних магнітів, завдяки чому досягається обмеження горизонтальних переміщень навантаження.

Десять основних конфігурацій магнітних пружин з циліндричними постійними магнітами, відповідно до класифікації наведеної в [5] показані на рис. 2. Згі-

дно теорії коливань, ізолятори повинні бути досить м'якими, щоб мати низьку власну частоту, і знижувати передачу вібрації, та досить жорсткими, щоб гасити генерацію прямих збурень.

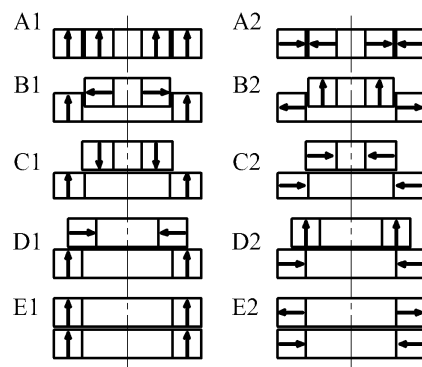


Рис. 2. Основні конфігурації магнітних пружин з постійними магнітами

Головною перевагою магнітної пружини над механічною є те, що енергія, яка розсіюється в її активних елементах, значно менша. Порівняння десятих основних конфігурацій з радіальною та осьювою намагніченістю свідчить, що циліндричні постійні магніти з радіальною намагніченістю мають відносно низьку жорсткість в осьовому (робочому) напрямку. Тому, в даній роботі, досліджується конфігурація А2, що використовується в якості віброізолятора.

Висока ефективність роботи таких пристроїв суттєво залежить від правильно підібраних головних розмірів та конструкції магнітної пружини. Отже, є актуальним створення відповідних розрахункових моделей, що дозволяють визначити відповідні статичні та динамічні характеристики. З цією метою, в першій частині даної роботи розроблено математичну модель для розрахунку статичних характеристик магнітної пружини з тим, щоб в подальшому використати отримані дані для моделювання динамічних характеристик коливної системи.

КОНСТРУКЦІЯ ДОСЛІДНОЇ МАГНІТНОЇ ПРУЖИНИ

Магнітна пружина з постійними магнітами, яка показана на рис. 3, має зовнішній та внутрішній циліндричні магніти, які мають зустрічну намагніченість. Це створює вертикальну силу, що намагається вишто-

вхнути внутрішній магніт. Крім того, за рахунок бокової сили, що стабілізує останній у центральному положенні, підвищується стійкість щодо бокових зміщень. Навантаження пружини кріпиться до внутрішнього магніту, а зовнішній магніт закріплюється на нерухомій основі.

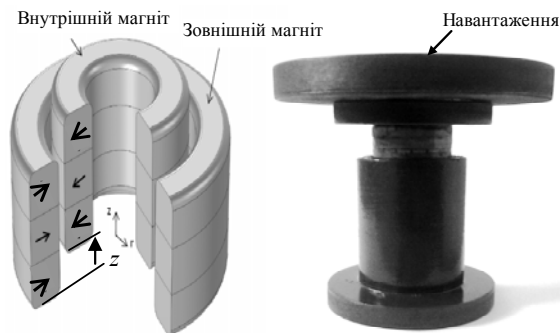


Рис. 3. Конструкція пружини з двома циліндричними постійними магнітами

Основні розміри магнітів та їх характеристики наведені у табл. 1.

Таблиця 1

Параметри постійних магнітів

Внутрішній магніт	Внутрішній діаметр	32 мм
	Зовнішній діаметр	37 мм
	Висота	60 мм
Зовнішній магніт	Внутрішній діаметр	41 мм
	Зовнішній діаметр	46 мм
	Висота	60 мм
Постійні магніти	NdFeB	
	μ_r	1,06
	B_r	1,2 Тл

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ МАГНІТНОГО ПОЛЯ ТА СИЛИ МАГНІТНОЇ ПРУЖИНИ

Розподіл магнітного поля в системі з постійними магнітами за відсутності електричних струмів, описується системою рівнянь Максвелла в магнітостатичному наближенні:

$$\nabla \times \mathbf{H} = 0 \Rightarrow \mathbf{H} = -\nabla \varphi_m, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

де \mathbf{B} – вектор магнітної індукції; \mathbf{H} – вектор напруженості магнітного поля; φ_m – скалярний магнітний потенціал.

Будемо використовувати рівняння стану для постійного магніту у вигляді

$$\mathbf{B} = \mu_0 \mu_r \mathbf{H} + \mathbf{B}_r, \quad (3)$$

де μ_0 – магнітна проникність вакууму; μ_r – відносне значення магнітної проникності матеріалу магніту, \mathbf{B}_r – залишкова магнітна індукція.

На рис. 4 показано тривимірну модель магнітного пружини.

З виразів (1-3) після перетворень одержимо наступне диференціальне рівняння для розрахунку розподілу скалярного магнітного потенціалу в тривимірній області:

$$\nabla \cdot (\mu_0 \mu_r \nabla \varphi_m - \mathbf{B}_r) = 0. \quad (4)$$

Тоді, розподіл напруженості магнітного поля \mathbf{H} визначається з використанням виразу (1), а магнітної індукції \mathbf{B} відповідно до формули (3). Для розрахунку значення магнітної сили, що діє на рухому частину магнітної пружини, використовувався тензор тяжіння Максвелла.

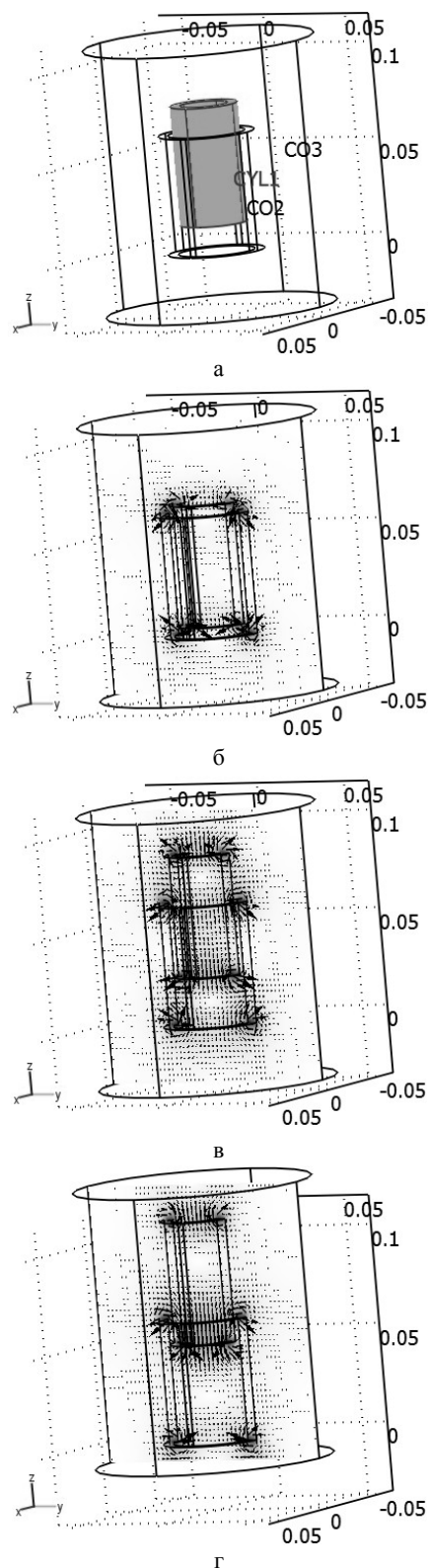


Рис. 4. Розподіл магнітного поля пружини: а – розрахункова область; б, в, г – розподіл магнітної індукції в пружині при різних положеннях внутрішнього магніту

Чисельний розрахунок магнітного поля пружини виконувався методом скінченних елементів за допомогою програми Comsol. Тривимірна постановка задачі дозволяє крім осьової, обчислити також бокову горизонтальну силу, що діє на внутрішній магніт при його зміщенні від центрального положення.

РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИЛИ ПРУЖИНИ

За результатами розрахунку магнітного поля була визначена магнітна сила, що діє на внутрішній магніт, в залежності від його положення по висоті (в наведеній моделі вздовж осі z). Результати для осьової компоненти сили наведені на рис. 5, де показано також експериментальні дані отримані за допомогою дослідної моделі.

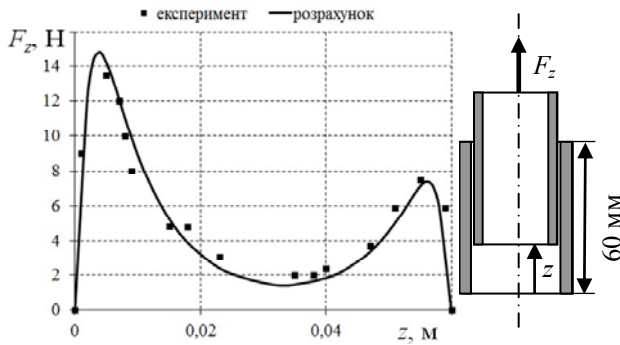


Рис. 5. Залежність осьової складової магнітної сили F_z від положення внутрішнього магніту x

Як видно з рисунку, залежність магнітної сили є суттєво нелінійною.

Стабільна робота магнітної пружини залежить від значення радіальної складової магнітної сили, яка зумовлює розміщення внутрішнього магніту по центру системи. Для розрахунку цієї компоненти сили розглядалась польова задача у тривимірній постановці при зміщенні внутрішнього магніту у радіальному напрямку. Результати розрахунку цієї сили в залежності від відстані між осями магнітів при різному їх зміщенні по вертикалі (по осі z), наведені на рис. 6.

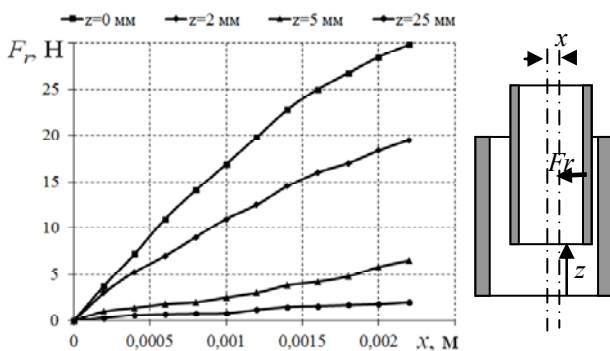


Рис. 6. Залежність радіальної сили F_r , що діє на постійні магніти від відстані між осями магнітів x

З даного рисунку видно, що зі зміщенням внутрішнього магніту в радіальному напрямку відносно центрального положення (вздовж осі x), радіальна складова сили зростає. Але при зміщенні магніту у вертикальному напрямку (вздовж осі z), значення магнітної сили, що стабілізує його положення по центру, зменшується. Тому, з точки зору стабільності роботи пружини, відстань між торцями магнітів не повинна перевищувати 20 мм.

ВИСНОВКИ

В роботі розроблено математичну модель магнітної пружини, побудованої на основі двох постійних магнітів циліндричного типу. Проведено розрахунок

магнітного поля в такій пружині чисельним методом скінчених елементів.

Розраховано механічну характеристику магнітної пружини (залежність осьової магнітної сили від відстані між магнітами) та силу бокового тяжіння. Показано, що механічна характеристика магнітної пружини є суттєво нелінійною. Визначено, що робочою ділянкою механічної характеристики пружини (при зазначених розмірах) є ділянка від 5 мм до 20 мм.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ (REFERENCES)

1. Choi K.B. Stabilization of one degree of freedom control type levitation table with magnet repulsive forces. *J. Mechatronics*, 2003, v.13, no.6, pp.587-603.
2. Bonisoli E. Passive effects of rare-earth permanent magnets on flexible conductive structure. *J. Mech. Res. Commun.*, 2007, v.37, no.4.
3. Carrella A. On the design of a high-startic-low dynamic stiffness isolator. *J. Sound Vib.*, 2008, v.315, no.3.
4. Puppin E., Fratello V. Vibration isolation with magnet springs. *J. Rev. Sci. Instrum.*, 2002, v.73, no.11, pp. 4034-4036.
5. Yonnet J.P. Permanent magnet bearing and coupling. *IEEE Mag.*, 1981, v.17, no.1.

Надійшла (received) 22.09.2013

Бондар Роман Петрович¹, к.т.н.,
 Чеботарун Інга Сергіївна¹, магістр,
 Подольцев Олександр Дмитрович², д.т.н., проф., гол.н.с.,
¹Київський національний університет будівництва і архітектури,
 03680, Київ, пр. Повітрофлотський, 31,
 тел/phone +38 044 2415510, e-mail: rpbondar@gmail.com,
²Інститут електродинаміки НАН України,
 03657, Київ, пр. Перемоги, 56,
 тел/phone +38 044 4542568

R.P. Bondar¹, I.S. Chebotarun¹, A.D. Podoltsev²
¹Kyiv National University of Construction and Architecture
 31, Povitroflotsky Avenue, Kyiv-37, 03680 Ukraine
²Institute of Electrodynamics of NAS Ukraine, Kyiv, Ukraine
 56, Peremogy Avenue, Kyiv-57, 03680, Ukraine

Modeling of dynamic characteristics of a nonlinear oscillatory system with a magnetic spring. Part 1.

A passive magnetic vibration isolator (a magnetic spring) with cylindrical magnets is considered. A mathematical model is developed to calculate magnetic spring magnetic field and force. Numerical calculation of the vibration isolator magnetic field via a 3-D finite element method is performed. Experimental results presented prove adequacy of the computational data.

Key words – finite element method, permanent magnet, vibration isolator.