

ВЗАЄМОДІЯ ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ, ЕФЕКТИВНІСТЬ І МОДЕЛЮВАННЯ МАГНІТНОГО ПІДВІСУ

О. В. Броздняков^{1, а}, В. Ф. Пеклун^{1, б}, С. О. Воронов^{1, в}

¹ Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
Фізико-технічний інститут

Анотація

Ця стаття висвітлює актуальне питання про магнітні підвіси з постійних магнітів, які активно використовуються в сучасній техніці, підбір розмірів магнітів, який буде найдоцільнішим. Більш конкретно, вибір такої висоти нижнього магніту підвісу, при якій подальше збільшення висоти не матиме значного внеску, який міг би вплинути на результат, а також комп'ютерне моделювання цих взаємодій в різних програмних середовищах.

Ключові слова: постійний магніт, взаємодія, підвіс, ефективність

Вступ

Магнетизм—явище, яке було відоме у різних проявах, але пояснити це, застосовуючи принципи фізики, вийшло ще не так давно. З магнітів виділяють два ключових види: постійні—магніти, які ще з давніх часів цікавили людство своєю природою, так як магнітні прояви не залежали від того чи присутній струм і діяли самі по собі, а також електромагніти з серцевиною—в них магнітні поля створюються вже через струм, який іде по обмотці. Найсильніше їх магнітні властивості можна спостерігати біля кінців [1]. Важлива особливість цих властивостей в тому, що магніти можуть притягатись або відштовхуватись без контакту з ними, що є ефективним у застосуванні на практиці. Через відсутність контакту і наявність відштовхувальної сили виникає можливість застосування у вигляді підвісу, тобто застосувати магніти для амортизації певних приладів, механізмів або рівноважного утримання об'єкту на певній висоті без прямого контакту. Актуальними є питання, як можна розрахувати та зрозуміти, які розміри потрібні для кожного випадку, які комбінації будуть найефективнішими. Відповіді на ці запитання дадуть нам можливість чітко підбирати магніти для конкретних випадків, розуміти доцільність їх використання, а також економити на матеріалах.

1. Теоретичний розрахунок

Два циліндричних постійних магніти в нашому експерименті розташовані осесиметрично, як показано на рис. 1.

Метод магнітних моментів полягає в тому, що виділяємо дві складові [2]: осьову B_z і радіальну B_r ,

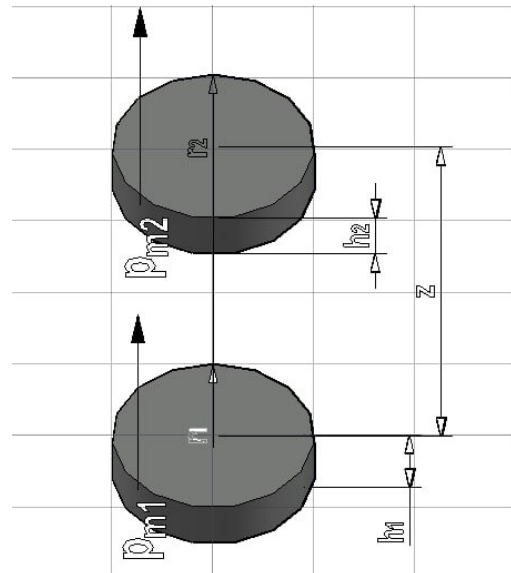


Рис. 1. Розташування постійних магнітів у підвісі перпендикулярну осей. Проекція сили:

$$F = -I_2 \cdot B_r \cdot l = -I_2 \cdot B_r \cdot 2\pi \cdot r_2 \quad (1)$$

Радіальна складова приводить до виникнення сил Ампера, які направлені вздовж осі магнітів, тобто притягання або відштовхування. Коли струми мають один напрям—магніти притягаються, а якщо протилежно напрямлені—відштовхуватимуться, так само з напрямками магнітних моментів P_m . Осьова складова:

$$B_z = \frac{\mu_0 P_{m1}}{2\pi z^3} \quad (2)$$

, де P_m магнітний момент магніту.

Радіальна складова:

$$B_r = -\frac{r_2 \Delta B_z}{2 \Delta z} = \frac{3\mu_0 P_{m1}}{4\pi z^4 \cdot r_2} \quad (3)$$

^аbrozdniakov@gmail.com

^бunlkt@ukr.net

^вs.voronov@kpi.ua

Сила відштовхування між магнітами залежить від співвідношення $\frac{\Delta B_z}{\Delta z}$. Тепер для визначення сили нам треба підсумувати ці вирази:

$$F = \sum \Delta F_k = \sum \Delta I \Delta l_k \cdot B = I \cdot \sum \Delta l_k \cdot B = 0 \quad (4)$$

Щоб отримати остаточну формулу для сили відштовхування, підставимо вираз для радіальної складової поля:

$$F = \frac{3\mu_0 p_{m1} p_{m2}}{2\pi z^4} \quad (5)$$

Де p_{m2} —магнітний момент другого магніту. Два магніти однакові, тому кінцева формула для сили:

$$F = \frac{3\mu_0 \pi J^2 h^2 r^4}{2z^4} \quad (6)$$

З неї розрахуємо значення і побудуємо графік для різних відстаней 2.

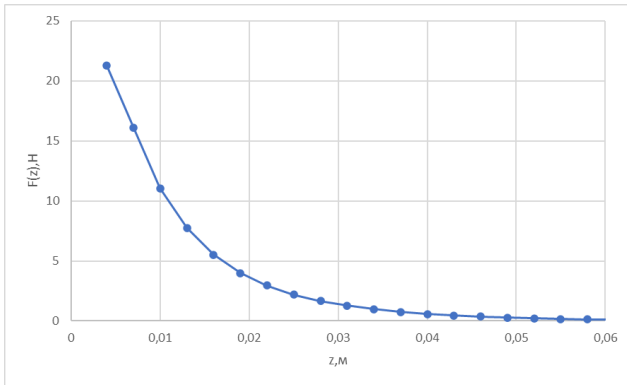


Рис. 2. Графік залежності сили відштовхування від відстані між магнітами при використанні методу магнітних моментів

Тепер розглянемо метод еквівалентного соленоїда. Для даного методу ми застосовуємо наближення, що циліндричний постійний магніт поводить себе у зовнішньому полі другого магніту як соленоїд з дуже тонкою намоткою. В цьому соленоїді виділяємо дуже малий шматочок провідника, визначаємо для нього закони, потім інтегруємо. Для цього розглядаємо магнітний потік у наступному вигляді:

$$\Phi = n_m \pi b^2 \int B_z(z) dz \quad (7)$$

Вираз для магнітної індукції в цьому випадку: $B = \frac{\mu_0 n I}{2} \left(\frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} - \frac{z-L}{\sqrt{z-L^2 + a^2}} \right)$

Підставивши у вираз для потоку отримуємо: $\Phi = \frac{\mu_0 \pi b^2 n_m n_s I_s}{2} \left(\int \frac{(z+h_2/2) dz}{(z+h_2/2)^2 + r^2} - \int \frac{(z-h_2/2) dz}{(z-h_2/2)^2 + r^2} \right)$,

Вираз для сили:

$$F = I_s I_m \frac{d\Phi}{dz} = I_m \cdot \frac{d\Phi}{dz} \quad (8)$$

Підставляючи попереднє рівняння, маємо остаточно:

$$F = \frac{3\mu_0 B r^2 \pi r^2}{2} \cdot \left(\frac{z+h_2/2+h_1/2}{\sqrt{(z+h_2/2+h_1/2)^2 + r^2}} - \frac{z+h_2/2-h_1/2}{\sqrt{(z+h_2/2-h_1/2)^2 + r^2}} - \frac{z-h_2/2+h_1/2}{\sqrt{(z-h_2/2+h_1/2)^2 + r^2}} + \frac{z-h_2/2-h_1/2}{\sqrt{(z-h_2/2-h_1/2)^2 + r^2}} \right) \quad (9)$$

Будуємо відповідний графік 3: Також побудуємо

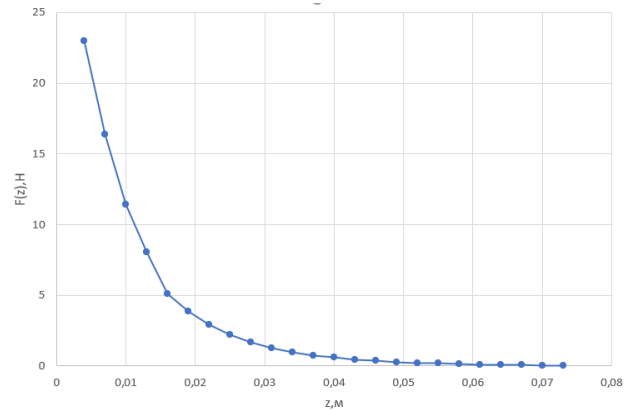


Рис. 3. Графік залежності сили відштовхування від відстані між магнітами, при використанні методу еквівалентного соленоїда

графік залежності сили відштовхування від товщини нижнього магніту при фіксованій відстані між магнітами 0,01м. Отримуємо графік залежності зображений на рис. 4.

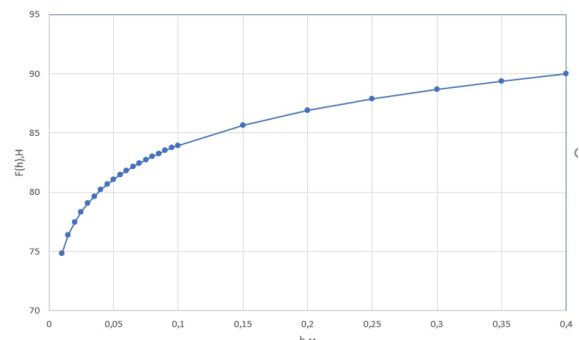


Рис. 4. Залежність сили від товщини нижнього магніту при відстані 0,01м.

З даного графіку ми можемо зробити висновок про ефективність використання магнітів. Починаючи з певної товщини, залежність стрімко прямує до паралельної до осі прямої, і з цього ми розуміємо, що сила зростає зі збільшенням товщини нижнього магніту і в певний момент це збільшення стає зовсім незначним [3] і тому подальше потовщення магнітів стає недоцільним.

2. Експеримент

Експеримент полягав в тому, що ми зафіксували один з циліндричних магнітів на вагах, а інший переміщували вертикально, змінюючи відстань і фіксуючи значення, які показують ваги. За отриманими даними ми побудували експериментальний графік 5: Апроксимували і порівняли з теоретичними графіками для кожного методу розрахунку.

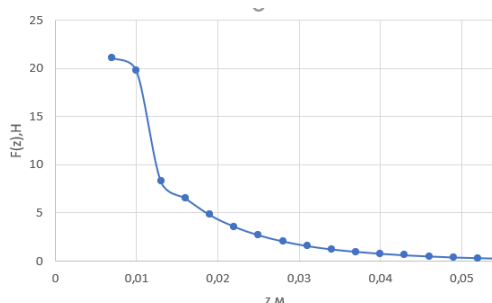


Рис. 5. Експериментальний графік залежності сили від штовхування від відстані між магнітами

Висновки

Скориставшись двома методами розрахунку сили взаємодії між магнітами і порівнявши з експериментальними значеннями, можна зробити висновок, що при відстанях, які менші товщини магнітів, метод магнітних моментів дає менш точні значення ніж ме-

тод еквівалентного соленоїда. Тому можна вважати наближення еквівалентного соленоїда з надтонкою намоткою близьким і точним. Також побудувавши залежності і проаналізувавши графік для товщини нижнього магніту, ми зрозуміли, що легко можемо визначити, починаючи з якої товщини не варто збільшувати товщину нижнього магніту, так як це майже взагалі не вплине на силу з якою працюватиме підвіс. Також ми можемо побачити, що в певному проміжку сила зростає стрімко і має найкращу для застосування ефективність, що може допомогти влучно вибрати розміри магнітів, досягти найкращого ефекту. А завдяки моделюванню ми можемо максимально все автоматизувати і прослідкувати за всіма процесами, силами і лініями поля [4].

Перелік використаних джерел

1. Perez-Loya J. J., Lundin U. Perez: Simple method to calculate the force between thin walled solenoids. — 2016.
2. Olbert N. Derby S. // Phys. Rev. Lett. 78, 229-235. — 2010.
3. Corson P. Lorrain D. R. Electromagnetic Field and Waves // Nature Physics. — 1970. — Vol. 5. — P. 2nd ed.
4. D. Vokoun M. Beleggia L. Helle P. Sittner. Magnetostatic interactions and forces between cylindrical permanent magnets. — 2009.