

УДК 621.318

**МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ СИСТЕМИ МАГНІТНОГО ПІДВІСУ КЛАСИЧНОЇ ГЕОМЕТРІЇ****В. О. Некрасов, Р. М. Донченко**Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: d\_romka@ukr.net

Магнітна левітація є процесом левітації об'єкта за рахунок використання магнітного поля. Це знаходить все більш широкого застосування у різних галузях промисловості. Системи, що використовують електромагнітну силу притягання для утримання об'єкта в просторі, отримали назву систем магнітного підвісу.

Аналіз публікацій показав, що найбільша увага при дослідженні таких систем в основному приділяється створенню магнітних підшипників та систем керування для них. Проте проблема оптимального проектування геометрії магнітної системи магнітних підвісів у літературі висвітлена недостатньо. У таких системах, в основному, розробляється алгоритм керування, який є доволі складним, оскільки для гасіння збуджених коливань окрім абсолютного положення потрібно також враховувати швидкість його зміни та гістерезис магнітної системи, і також повинен швидко змінюватися струм. Однак останнє накладає певні вимоги й на параметри самого електромагніту: малий активний опір (менші втрати потужності, нагрівання), мала індуктивність електромагніту (можливість швидкої зміни сили струму), велика магнітна сила. Складність виконання всіх умов одночасно робить актуальним вирішення завдання оптимального проектування магнітної системи для таких систем.

Дана робота містить результати аналізу сучасного стану цієї проблеми, опис структури досліджуваної системи, аналіз впливу відстані до об'єкта на індуктивність котушки електромагніту, математичну модель класичної системи магнітного підвісу, її реалізацію та результати аналізу в програмному пакеті MatLab.

**Ключові слова:** магнітний підвіс, математична модель.

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ МАГНИТНОГО ПОДВЕСА****В. А. Некрасов, Р. Н. Донченко**Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: d\_romka@ukr.net

Магнитная левитация представляет собой процесс левитации объекта за счет использования магнитного поля, который находит все более широкое применение в различных отраслях промышленности. Системы, которые для удержания объекта в пространстве используют электромагнитную силу притяжения, получили название систем магнитного подвеса.

Анализ публикаций показал, что наибольшее внимание при исследовании таких систем в основном уделяется созданию магнитных подшипников и систем управления для них. Однако проблема оптимального проектирования геометрии магнитной системы магнитных подвесов в литературе освещена недостаточно. В таких системах, в основном, разрабатывается алгоритм управления, который является довольно сложным, поскольку для гашения возбужденных колебаний, кроме абсолютного положения объекта, необходимо также учитывать скорость его изменения и гистерезис магнитной системы, и также быстро должен меняться ток. Однако последнее накладывает определенные требования и на параметры самого электромагнита: малое сопротивление (меньшие потери мощности, нагрев), малая индуктивность электромагнита (возможность быстрой смены силы тока), большая магнитная сила. Сложность выполнения всех условий одновременно делает актуальным решение задачи оптимального проектирования магнитной системы для таких систем.

Данная работа содержит результаты анализа современного состояния этой проблемы, описание структуры исследуемой системы, анализ влияния расстояния до объекта на индуктивность катушки электромагнита, математическую модель классической системы магнитного подвеса, ее реализацию и результаты анализа в программном пакете MatLab.

**Ключевые слова:** магнитный подвес, математическая модель.

**АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ.** Раніше у спробах магнітної левітації брали за основу постійні магніти. Проте теорема Ірншоу (Samuel Earnshaw) математично доводить, що це неможливо [1] – не існує такої конфігурації статичних магнітів, які можуть стабільно підіймати об'єкт. Однак можливо обійти цю теорему, змінюючи початкові положення або параметри магнітів. Наступні умови вирішують заборону теорему Ірншоу [2]:

1) діаманетизм [3]: діаманетні матеріали намагнічуються проти зовнішнього магнітного поля й у сильних магнітних полях можуть левітувати;

2) ефект Мейснера (Meissner Effect) [4]: виникає в надпровідниках і пов'язується з явищем витіснення

магнітного поля;

3) змінне магнітне поле: левітація можлива за рахунок збудження вихрових струмів у провіднику;

4) обертання: використання гіроскопічного руху, щоб подолати левітаційну нестабільність;

5) зворотній зв'язок: залежно від положення об'єкта динамічно змінюють параметри магнітного поля.

Зворотній зв'язок часто застосовують разом з електромагнітами. Якщо при цьому використовується магнітна сила притягання, то такий процес називають магнітним підвісом (magnetic suspension), а якщо система працює за рахунок магнітного відштовхування – магнітна левітація (magnetic levitation).

У системах магнітного підвісу, якщо об'єкт знаходиться занадто близько до електромагніту, струм в електромагніті зменшується, а якщо об'єкт опиняється занадто далеко – збільшується. Таким чином, положення вантажу визначає, яка сила струму буде подана на електромагніт. Такі системи також називають активними.

Перші приклади практичного використання активних магнітних підвісів (АМП) відносяться до 40-х років ХХ століття, а з 1960-х років активні магнітні підвіси стали застосовуватися в активних магнітних підшипниках обертових валів [5].

На території СНД перші суттєві практичні успіхи були досягнуті у Всесоюзному науково-дослідному інституті електромеханіки (Москва) при створенні електромеханічних комплексів для космічної техніки, що використовувались для управління орієнтацією орбітальних станцій «Салют» і «Мир» [6].

Серед зарубіжних розробників АМП особливо виділяють французьку фірму Societe de Mecanique Magnetique (S2M) – першу у світі комерційну фірму, що спеціалізується на випуску АМП для машин самого різного призначення.

Одними з перших розробників машин з АМП також є Г. Ліард, Р. Каттерлоер, Д. Лиман, Ф. Матсумура і К. Накагава, Г. Швайтцер і Х. Ульбріх [5].

На даний час розробкою та виробництвом АМП займається ціла низка фірм. Серед них:

- ПІК (Псковська інженерна компанія), Росія;
- Науково-дослідний інститут прикладної математики і кібернетики (НДІ ПМК), м. Нижній Новгород, Росія;
- MBI (Magnetic Bearings, Inc.), США;
- JMB (Japan Magnetic Bearings Co.), Японія;
- Mecos Traxler AG (Mechanics Control Systems), Швейцарія;
- AVCON (Advanced Controls Technology, Inc.), США;
- Center for Magnetic Bearings, University of Virginia, США;
- Revolve Technologies Inc., Канада;
- High Speed Technology, Фінляндія;
- GMN Bearings, Германія;
- інші.

Аналіз публікацій показує, що розвиток АМП йде в наступних напрямках:

- розширення сфер застосування АМП;
- методи управління АМП для гіроскопічних і гнучких роторів (оптимальне, адаптивне, нелінійне, цифрове та інші види управління);
- прецизійні АМП;
- гібридні АМП (з використанням постійних магнітів);
- дослідження динаміки роторів з АМП;
- ідентифікація параметрів систем з АМП;
- бездатчикові АМП;
- безпідшипникові електродвигуни (суміщення АМП з електричною машиною);
- мікроАМП;
- активні підвіси з надпровідниками;
- зменшення втрат потужності в АМП;

- удосконалення страхувальних підшипників.

Однак основна увага приділяється системам контролю й автоматики, конструкціям електромагнітних підшипників електричних машин, транспорту і практично відсутні публікації по розрахунку оптимальної конструкції електромагніту для левітаційних магнітних підвісів вантажу. У таких системах в основному розробляється алгоритм керування, який є доволі складним, оскільки для гасіння збуджених коливань потрібно, окрім абсолютного положення, також враховувати швидкість його зміни. При цьому так же швидко повинен змінюватися струм. Однак останнє накладає певні вимоги й на параметри самого електромагніту:

- малий активний опір (менші втрати потужності, нагрівання);
- мала індуктивність електромагніту (для можливості швидкої зміни сили струму в ньому);
- велика магнітна сила.

Ці умови вступають у протиріччя, тобто неможливо забезпечити їх виконання одночасно.

Отже, метою даної роботи є розробка математичної моделі системи магнітного підвісу для вирішення завдання її оптимального проектування.

#### МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ.

*Структура системи активного магнітного підвісу.*

Для розгляду вибрано систему активного магнітного підвісу (рис. 1), яка досить поширена за кордоном і використовується при створенні рекламних табличок, сувенірів, настільних статуток, а також як поширений об'єкт для вивчення різних систем і законів керування у закордонних університетах.



Рисунок 1 – Використання АМП

Особливість системи – її простота. Однак при цьому вона зберігає всі особливості систем активних магнітних підвісів.

Загальну структуру системи зображено на рис. 2.

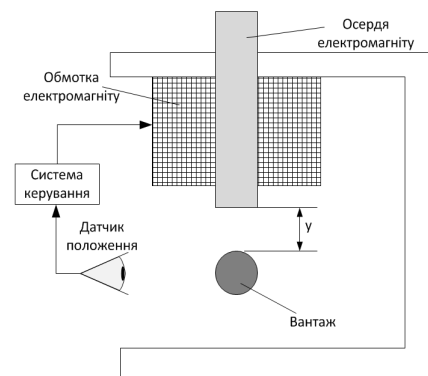


Рисунок 2 – Структура системи АМП

Для визначення положення об'єкту левітації для таких систем в основному використовують наступні способи (рис. 3).

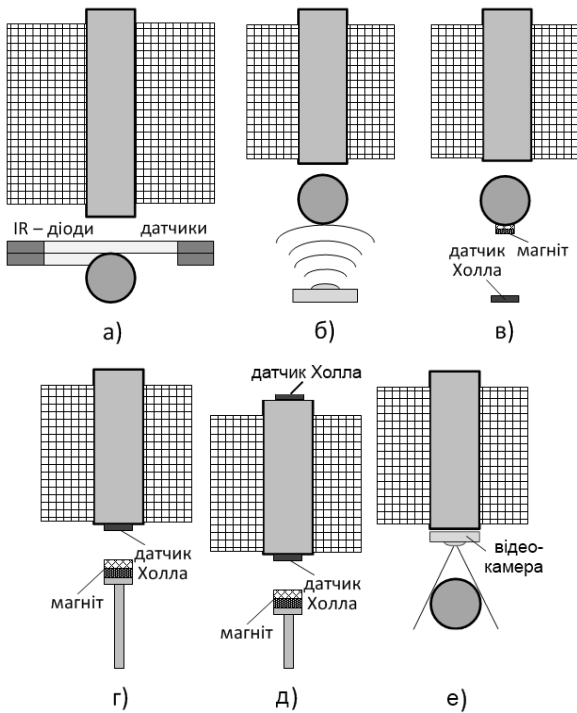


Рисунок 3 – Способи контролю положення

1. *Оптичний, на основі пари з інфрачервоного випромінювача (IR-діода) і детектора, розташованих по лінії* (рис. 3,а). Детектор налаштований так, що об'єкт у заданому положенні буде блокувати тільки певну частину світла. Якщо інфрачервоне випромінювання повністю блоковане, об'єкт знаходиться дуже близько, якщо не блокується зовсім – занадто далеко, а якщо тільки половина блокована – об'єкт у заданому положенні. Перевагою такої системи є простота, а недоліком – необхідність використовувати кілька датчиків одразу, обмеження по точності регулювання, необхідність розташовувати датчики в просторі по сторонам від об'єкта, засвічування датчиків сторонніми джерелами світла.

2. *Оптичний, на основі пари з інфрачервоного випромінювача й детектора, розташованих під кутом*. Інфрачервоне світло відбивається від поверхні об'єкта й потрапляє на детектор тільки при певному положенні об'єкта. Порівняно з попереднім способом датчики можливо приховати, але інші недоліки залишаються, до того ж робота системи залежить від відбиваючої характеристики об'єкта.

3. *Ультразвуковий* (рис. 3,б), *на основі випромінювача й приймача*. Перевагами є відсутність «засвічування», але до недоліків слід віднести високу ціну й малу роздільну здатність.

4. *На основі ефекту Холла, з положенням датчика нижче об'єкта левітації* (рис. 3,в). Перевагами є висока чутливість, визначення відстані не є дискретним, можливість створювати системи керування із збудженням різних коливань об'єкта при регулю-

ваній висоті підвісу. Недолік – мала висота підвісу над нижньою підставкою, обумовлена максимальною відстанню фіксування магнітного поля датчиком (у загальному випадку не перевищує 1 см).

5. *На основі ефекту Холла, з положенням датчика між електромагнітом і об'єктом левітації* (рис. 3,г). Перевагою, окрім зазначених для попереднього способу, є те, що у системі відсутній будь-які датчики у просторі левітації об'єкта. Недолік – складність конвертації сигналу датчика в сигнал положення, пов'язана із впливом магнітного поля електромагніту.

6. *На основі ефекту Холла з використанням двох датчиків, по одному на кожен кінець осердя електромагніту* (рис. 3,д). При відсутності поруч постійного магніту, незалежно від електромагніту, диференціальний сигнал двох датчиків майже не змінюється. Коли магніт наближається до нижнього датчика, то різниця між цими двома сигналами починає збільшуватися. Спосіб запатентований у США [9]. Система має переваги попередніх і вільна від більшості їх недоліків, хоча потребує врахування форми кінців осердя й положення об'єкта левітації, оскільки при зміні положення феромагнітного об'єкта буде змінюватися й частка магнітного потоку з боків осердя електромагніту, яка не враховується датчиками.

7. *На основі використання відеокамери для фіксування положення об'єкта у просторі* (рис. 3,е). За умови, якщо об'єкт може бути вдало розпізнаний у всьому діапазоні зміни висоти підвісу, майже не має недоліків. Однак для забезпечення високої швидкості реагування системи потребує потужних обчислювальних ресурсів, що у наш час не є надто критичним.

8. *На основі застосування індуктивних датчиків*. Спосіб ґрунтується на вимірі зміни індуктивності додаткової вимірювальної або основної робочої обмотки. Перевагою такого способу є практична відсутність датчика в просторі левітації об'єкта. Однак при цьому на значення індуктивності електромагніту чинять вплив наступні ефекти: магнітний гістерезис, навколишня температура (за умови стабілізації напруги, а не струму), сторонні магнітні поля. Складність урахування цих ефектів є суттєвим недоліком даного способу.

*Функціональна схема системи керування положенням*. У системах АМП для фіксування об'єкта на певній висоті потрібна можливість швидко керувати струмом електромагніту залежно від положення об'єкта. Система управління повинна постійно відстежувати стан об'єкта та відповідно регулювати струм електромагніту. Тобто система керування повинна мати «замкнений контур» («зворотній зв'язок») (рис. 4).



Рисунок 4 – Функціональна схема керування положенням об'єкта

Метою цієї системи є те, щоб досягти на виході значення, максимально близького до опорного значення положення на вході максимально швидко й не змінювати його, навіть якщо цей процес порушується зовнішніми силами.

Вхідний сигнал називається опорним. Сигнал зворотного зв'язку є поданням процесу виходу із системи й використовується для порівняння. Найчастіше сигнал зворотного зв'язку проходить через перетворювач і підсилювач сигналу, щоб його можна було безпосередньо порівнювати з опорним сигналом. Компаратор просто віднімає сигнал зворотного зв'язку від вхідного сигналу, щоб створити сигнал помилки (диференціальний сигнал). Підсилювач перетворює сигнал помилки у струм чи напругу, що подається на електромагніт. Структура підсилювача безпосередньо впливає на швидкість і якість стабілізації.

Оскільки сигнал зворотного зв'язку дозволяє постійно відстежувати положення об'єкта, причому постійно відбувається порівняння з базовим входом, система може постійно коригувати свої параметри для утримання об'єкта на заданому положенні.

Математична модель системи активного магнітного підвісу. Функціональну схему системи активного магнітного підвісу показано на рис. 5.

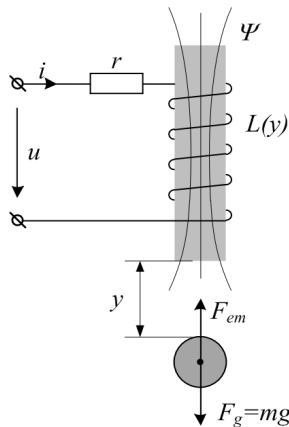


Рисунок 5 – Функціональна схема АМП

Феромагнітний об'єкт (інколи замінюється постійним магнітом) масою  $m$  повинен утримуватися на відстані  $d$  від полюса електромагніту. Актуальне (миттєве) значення відстані  $y(t)$  між об'єктом і полюсом електромагніту

$$y(t) = \delta - y'(t), \quad (1)$$

де  $y'(t)$  – зміщення об'єкта із заданого положення.

На об'єкт (у загальному випадку – металевий шар) діють дві сили:

сила гравітації  $F_g = mg$  (постійна);

електромагнітна сила притягання  $F_{em}$ , створена магнітною системою (змінюється у процесі керування електромагнітом).

До обмотки електромагніту, яка має  $N$  витків, опір  $r$  і струм  $i$ , прикладено напругу  $u$ . Струм  $i$  ви-

кликає магнітний потік  $\Psi$ , тому потокозчеплення обмотки  $\Psi = N\Phi$ .

Як і будь-яка електромеханічна система, АМП описується рівняннями електромагнітної та механічної рівноваги.

Механічний рух об'єкта за другим законом Ньютона описується диференціальним рівнянням

$$m d^2 y(t) / dt^2 = F_{em} - F_g. \quad (2)$$

Магнітна сила  $F_{em}$  може бути отримана при аналізі електромагнітних процесів. Згідно з другим законом Кірхгофа, ці процеси описуються диференціальним рівнянням

$$d\Psi / dt + ri = u. \quad (3)$$

Якщо знехтувати вихровими струмами та гістерезисом, то між струмом і потокозчепленням  $\Psi$  для кожного значення координати  $y(t)$  є однозначна залежність, що надається діаграмою намагнічування  $\Psi-i$  [5].

Це означає, що для опису електромагнітних процесів можна використовувати або пару змінних  $y$  та  $\Psi$ , або пару  $y$  та  $i$ .

В електромеханіці зі змінними  $y$  та  $\Psi$  пов'язують поняття магнітної енергії:

$$W_{em}(y, \Psi) = \int i(y, \Psi) d\Psi, \quad (4)$$

а зі змінними  $y$  та  $i$  – поняття коенергії [5]:

$$W(y, i) = \int \Psi(y, i) di. \quad (5)$$

Магнітна енергія та коенергія взаємопов'язані:

$$W_{em} = W + \Psi i. \quad (6)$$

Для знаходження сили  $F_{em}$  помножимо обидві частини рівняння (3) на  $idt$ :

$$uidt = ri^2 dt + id\Psi. \quad (7)$$

Ліва частина рівняння є енергією, отриманою з джерела за час  $dt$ , а у правій частині  $ri^2 dt$  – енергія, що йде на нагрів обмотки,  $id\Psi$  – енергія, що йде на механічну роботу сили  $F_{em}$  на елементарному переміщенні  $dy$  і на приріст магнітної енергії  $dW_{em}$ :

$$id\Psi = F_{em} dy + dW_{em}. \quad (8)$$

Використовуючи (6) та (8), для сили маємо

$$F_{em} = -\partial W_{em} / \partial y = \partial W / \partial y. \quad (9)$$

Насичення в магнітному колі АМП відсутнє, тому потокозчеплення і струм пов'язані лінійною залежністю

$$\Psi = L(y)i, \quad (10)$$

де  $L(y)$  – індуктивність електромагніту.

Для систем, подібних до зображеної на рис. 5, у літературі індуктивність виражають різними нелінійними функціями [5, 7, 8]:

$$L(y) = L_0 + L_1 e^{-(y/y_0)^2}; \quad (11)$$

$$L(y) = L_0 + 2K/y; \quad (12)$$

$$L(y) = L_0 + L_1 / (1 + y/a), \quad (13)$$

де  $L_0$  – індуктивність котушки при відсутньому об’єкті левітації;  $L_1$  – приріст індуктивності котушки при максимально близькому положенні об’єкта;  $y_0$ ,  $K$ ,  $a$  – конструктивні коефіцієнти.

Для з’ясування ступеня адекватності наведених виразів було створено тестову модель магнітного підвісу у системі «ANSOFT Maxwell 2D» та за допомогою метода скінченних елементів для заданої відстані розраховано індуктивність котушки. Отриману модель із сіткою елементів показано на рис. 6, картину ліній векторного магнітного потенціалу для одного з результатів розрахунку – на рис. 7. Графік залежності індуктивності електромагніту від висоти підвісу зображено на рис. 8.

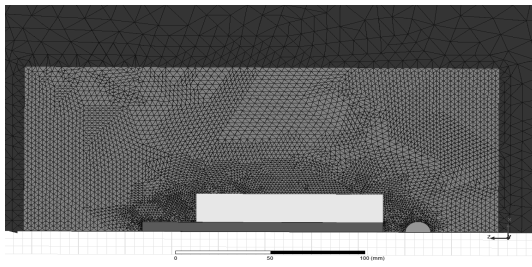


Рисунок 6 – Модель магнітного підвісу

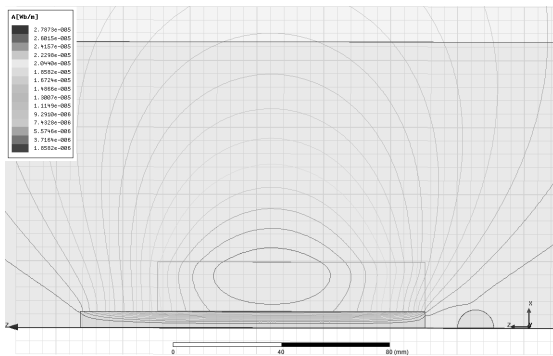


Рисунок 7 – Картина ліній векторного магнітного потенціалу

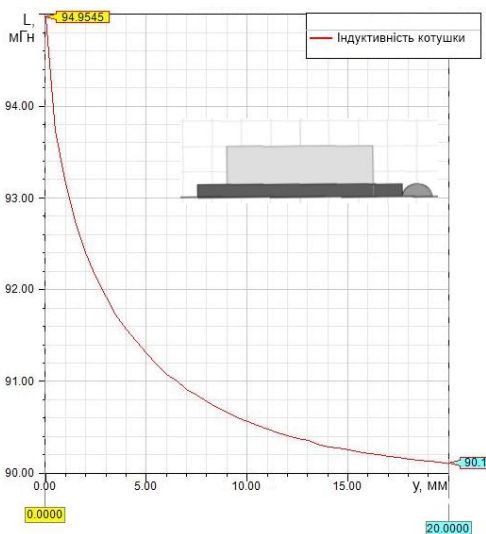
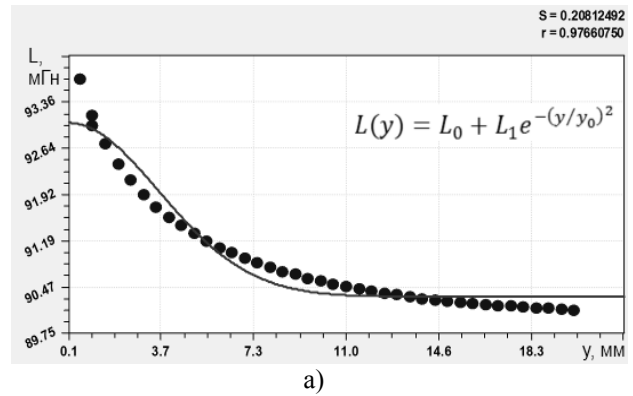
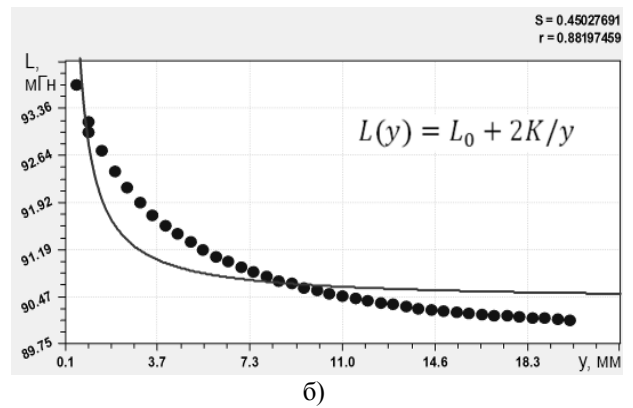


Рисунок 8 – Графік залежності індуктивності електромагніту від висоти утримування об’єкта

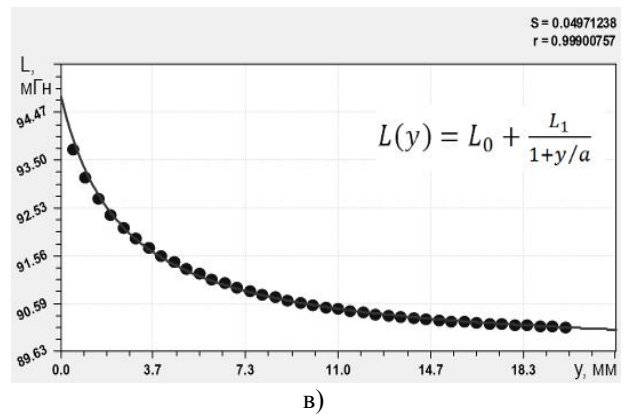
Для перевірки достовірності виразів (11)–(13) по ним виконана апроксимація отриманих у результаті моделювання даних. Результати апроксимації показано на рис. 9.



а)



б)



в)

Рисунок 9 – Результати апроксимації

Як видно з рисунків, найбільш точно описує зміну індуктивності вираз (13) (рис. 9,в).

З урахуванням (10) і (13), рівняння (4) і (5) приймуть вигляд:

$$W_{em} = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{L(y)} = \frac{1}{2} \frac{\Psi^2}{L_0 + L_1/(1 + y/a)}; \quad (14)$$

$$W = \frac{1}{2} L(y) i^2 = \frac{1}{2} i^2 [L_0 + L_1/(1 + y/a)]. \quad (15)$$

Із (9) маємо рівняння для сили:

$$F_{em} = -\frac{\partial W_{em}}{\partial y} = \frac{\Psi^2}{2aL_1 \left[ 1 + \frac{L_0}{L_1}(1 + y/a) \right]^2}; \quad (16)$$

$$F_{em} = \frac{\partial W}{\partial y} = \frac{L_1 a}{2} \frac{i^2}{(a + y)^2}. \quad (17)$$

Якщо використати змінні  $y$  та  $i$ , то математична модель системи «електромагніт-рухомий об'єкт» матиме вигляд:

$$\begin{cases} m \frac{d^2 y(t)}{dt^2} = \frac{L_1 a}{2} \frac{i^2}{(a + y)^2} - mg; \\ \left( L_0 + \frac{L_1}{1 + y/a} \right) \frac{di}{dt} + \left( \frac{i L_1 a}{(a + y)^2} \right) \frac{dy}{dt} + ri = u. \end{cases} \quad (18)$$

Система рівнянь (18) є нелінійною. Перше рівняння описує механічний рух і містить у собі магнітну силу, залежну від квадрату струму, а друге рівняння описує електромагнітні процеси й містить змінні величини переміщення та швидкості рухомого елемента.

На основі отриманої системи рівнянь створено модель системи магнітного підвісу в програмному середовищі MatLab Simulink. Загальну модель системи керування показано на рис. 10, а модель саме магнітного підвісу – на рис. 11. Результати моделювання зображено на рис. 12.

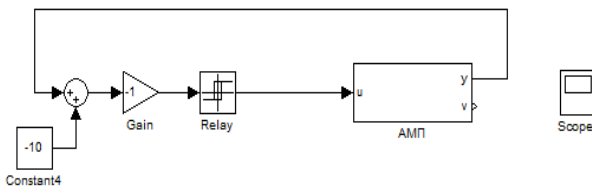


Рисунок 10 – Модель системи керування

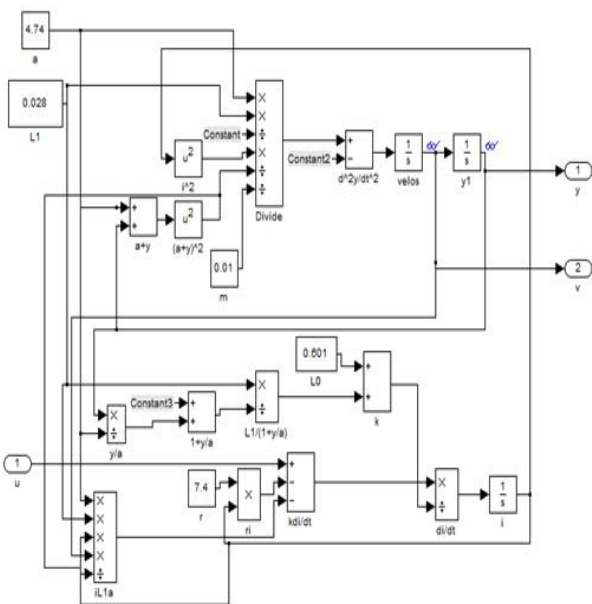


Рисунок 11 – Модель магнітного підвісу

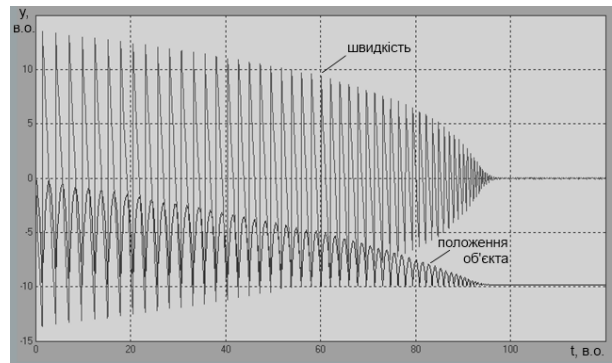


Рисунок 12 – Результати моделювання

Напрямок подальших досліджень. Для визначення оптимальних параметрів електромагніту планується виконати наступне:

- 1) використовуючи відомі методики, розрахувати параметри й розміри електромагніту для забезпечення левітації об'єкта (металевого шару) вагою 10 г на відстані 10 мм від полюсу електромагніту;
- 2) змодельовати розрахований електромагніт у програмному пакеті по розрахунку магнітних систем методом скінченних елементів;
- 3) за допомогою створеної моделі магнітної системи визначити, як впливає зміна розмірів електромагніту (довжина і ширина котушки, довжина і радіус осердя, розміри виступаючих кінців осердя, розміри полюсного наконечника), його електричних параметрів (сила струму, кількість витків) і матеріалу осердя (електротехнічна чи конструктивна сталь, повітря) на значення індуктивності котушки й магнітної сили електромагніту;
- 4) виготовити дослідний стенд і експериментально дослідити характеристики магнітної системи;
- 5) проаналізувати отримані дані й розробити рекомендації щодо проектування електромагнітів із мінімальною індуктивністю й максимальною силою для систем магнітного підвісу.

Результати зазначених досліджень будуть надані в окремій роботі.

ВИСНОВКИ. У ході проведених досліджень отримано наступні результати.

1. Проведено аналіз публікацій стосовно використання та розрахунку активних магнітних підвісів.
2. Методом чисельного експерименту досліджено залежність індуктивності електромагніту системи АМП від відстані до об'єкту левітації.
3. Отримано математичну модель системи АМП.
4. Створено реалізацію математичної моделі в програмному середовищі MatLab Simulink.
5. Сформовано напрям подальших досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Earnshaw S. On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether // *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*. – 1842. – Iss. 7. – PP. 97–112.
2. Gibbs Philip, Geim Andre. Is Magnetic Levitation Possible? [Електронний ресурс] – Режим

доступу: <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/Levitation/levitation.html>.

3. Simon M.D., Heflinger L.O., Geim A.K. Diamagnetically stabilized magnet levitation // *American Journal of Physics*. – 2001. – Iss. 69. – № 6. – PP. 702–713.

4. Meissner W., Ochsenfeld R. Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit // *Die Naturwissenschaften*. – 1933. – Iss. 21. – № 44. – PP. 787–788.

5. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: Теория, расчет, применение. – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.

6. Вейнберг Д.М., Верещагин В.П., Данилов-Нитусов Н.Н. Системы магнитного подвеса в испо-

лнительных органах управления ориентацией космических аппаратов. // *Изв. АН СССР. МТТ*. – 1981. – № 3. – С. 152–157.

7. Shiao Y.S. Design and Implementation of a Controller for a Magnetic Levitation System // *Proc. Natl. Sci. Council*. – 2001. – Iss. 11. – № 2. – PP. 88–94.

8. Dolga Valer, Dolga Lia. Modelling and simulation of a magnetic levitation system. Fascicle of Management and Technological Engineering // *Annals of the Oradea University*. – 2007. – Vol. VI (XVI). – PP. 1118–1124.

9. Patent of USA 4910633. Magnetic levitation apparatus and method / Quinn Louis P. – Application № 241482; filed on 07.09.1988.

## MATHEMATICAL MODEL OF MAGNETIC SUSPENSION SYSTEMS

**V. Nekrasov, R. Donchenko**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskiy National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: d\_romka@ukr.net

Magnetic levitation is the process of levitating an object by using a magnetic field, which is becoming more widely used in various areas. Systems for holding an object in space using electromagnetic force of attraction are called magnetic suspension systems.

Publications analysis showed that the greatest attention during the study of these systems is mainly paid to the creation of magnetic bearings and control systems for them. However, the problem of the magnetic suspension system optimal design geometry is not covered enough in the literature. Generally in such systems the control algorithm is designed which is rather complicated, since the excited vibration damping requires the absolute position of the object in addition to the speed changes and the magnetic hysteresis of the system to be taken into account as well as the fast current change requirements. However, the latter imposes certain requirements on the parameters of the electromagnet: a low resistance (less power and heat loss), low inductance of the electromagnet (the ability of the fast current changes), and a high magnetic force. The complexity of all the conditions simultaneously makes the optimal magnetic system design problem of the high priority.

This article contains the current state of the systems analysis, the system structure description, the effect of the distance to the object on the coil inductance of the electromagnet, a mathematical model of classical magnetic suspension system, its implementation and result analysis in Matlab.

**Key words:** magnetic suspension, mathematical model.

### REFERENCES

1. Earnshaw, S. (1842), “On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether”, *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*, Vol. 7, pp. 97–112.

2. Gibbs, P. and Geim, A. (1997), “Is Magnetic Levitation Possible?”, available at: <http://math.ucr.edu/home/baez/physics/General/Levitation/levitation.html> (accessed December 20, 2013).

3. Simon, M.D., Heflinger, L.O. and Geim, A.K. (2001), “Diamagnetically stabilized magnet levitation”, *American Journal of Physics*, Vol. 69, no. 6, pp. 702–713.

4. Meissner, W. and Ochsenfeld, R. (1933), “Ein neuer Effekt bei Eintritt der Supraleitfähigkeit”, *Die Naturwissenschaften*, Vol. 21, no. 44, pp. 787–788.

5. Zhuravlev, Yu.N. (2003), *Aktyvniye magnytniye podshypnyky: Teoriya, raschet, pryemenenye* [Active Magnetic Bearings: Theory, computation, application], Polytechnika, St. Petersburg, Russia. (in Russian)

6. Veinberg, D.M., Vereshchagin, V.P. and Danylov-Nytusov, N.N. (1981), “Magnetic suspension system in the executive units of the attitude control of spacecraft”, *Yzvestiya AN SSSR. MTT*, Vol 3, pp. 152–157. (in Russian)

7. Shiao, Y.S. (2001), “Design and Implementation of a Controller for a Magnetic Levitation System”, *Proceedings of the National Science Council*, Vol. 11, no. 2, pp. 88–94.

8. Dolga, V. and Dolga, L. (2007), “Modelling and simulation of a magnetic levitation system”, *Fascicle of Management and Technological Engineering. Annals of the Oradea University*, Vol. 6 (16), pp. 1118–1124.

9. Quinn, L.P. (1988), *Magnetic levitation apparatus and method*, US Patent 4910633.

Стаття надійшла 30.11.2013.