

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТА СИСТЕМИ МАГНІТНОГО ПІДВІШУВАННЯ

Теряєв В.І., доц.; Бурлака О.П., магістрант

кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Вступ. Відомо, що повне магнітне підвішування тіл, яке також називають левітацією у магнітному полі, неможливо здійснити, користуючись статичними (що не перебувають у русі) постійними магнітами або нерегульованими електромагнітами постійного струму. Подібна система завжди нестабільна, і ця нестабільність підсилюється при найменшому зовнішньому впливі. В ХІХ столітті цей факт був доведений у теоремі Ірншоу, згідно з якою система нерухомих тіл, взаємодіючих між собою із силою (притягування або відштовхування), обернено пропорційною квадрату відстані між ними, не може утворювати стійкої врівноваженої системи [1]. Стосовно магнітного підвішування теорему Ірншоу можна використовувати тільки для систем, які складаються з постійних магнітів або електромагнітів постійного струму, що перебувають у спокої.

Однак одержати стійкий повний магнітний підвіс (левітацію) все-таки можливо.

В останні роки розроблені динамічні системи підвішування на основі магнітів, що рухаються. Прикладом може бути левітрон, у якому забезпечується підвішування тіла, що обертається.

Електродинамічні підвіси використовують закон електромагнітної індукції. Якщо тіло, що містить контур зі струмом, переміщати над провідною смугою, то в смузі з'являться вихрові струми зі своїм власним електромагнітним полем. Це поле, взаємодіючи з первинним контуром, створює силу відштовхування, яка використовується в якості підйомної, а також гальмівну силу, що перешкоджає рухові. Із зростанням швидкості контуру зростає і підйомна сила, а гальмівна сила спочатку зростає і, досягши максимуму на деякій критичній швидкості, починає спадати як квадратний корінь зі швидкості левітуючого тіла. Таким чином електродинамічний підвіс реально може забезпечити підвішування тіла тільки після досягнення ним деякої граничної швидкості.

Електромагнітний підвіс заснований на властивості електромагніту притягатися до феромагнітного осердя. Щоб парировати нестійкість електромагнітного підвісу необхідне динамічне регулювання магнітного поля в залежності від зазору між левітуючим тілом і магнітами системи підвісу. В електромагнітних підвісах використовуються, як пасивні параметричні системи регулювання, засновані на резонансних властивостях спеціально налаштованих коливальних контурів, так і активні системи автоматичного управління. Особливістю електромагнітного підвісу є можливість підвішування тіл як у рухомому, так і нерухомому стані. При зазорах в 10 - 15 мм витрати потужності на підвішування становлять лише 1 - 3 кВт на 1 т ваги левітуючого тіла.

В активних системах електромагнітного підвішування, які мають промислове значення, використовуються регульовані електромагніти постійного струму з відповідною системою автоматичного регулювання робочого зазору. Для синтезу законів керування таких систем потрібно отримати докладну математичну модель електромагніта постійного струму.

Метою роботи є розробка уточненої математичної моделі електромагніта постійного струму, яка може бути використана для подальшого синтезу та дослідження систем електромагнітного підвішування.

Результати досліджень. При виводі рівнянь математичної моделі силового електромагніта вважаємо, що його магнітна система не насичена, поле в зазорі однорідне, вихрові струми в магнітному колі відсутні, потоками розсіювання можна знехтувати.

Напруга, прикладена до обмотки електромагніту (див. рис.1), є його вхідною змінною і врівноважується падінням напруги на активному опорі обмотки і ЕРС самоіндукції

$$U = rI + w \frac{d\Phi}{dt}, \quad (1)$$

де r – активний опір обмотки; I – струм обмотки; w – число витків обмотки; Φ – магнітний потік.

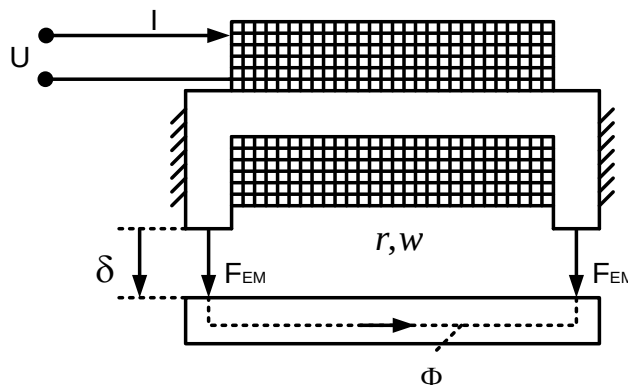


Рисунок 1 – Модель силового електромагніта

Магнітний потік в робочому зазорі електромагніта δ визначається виразом:

$$\Phi = IwG_{\delta} = Iw \frac{\mu_0 S_T}{2\delta}, \quad (2)$$

де G_{δ} – магнітна провідність повітряного зазору; Iw – намагнічувальна сила обмотки; μ_0 – абсолютна магнітна проникність вакууму; S_T – площа торця полюса магнітопроводу.

Сила тяги електромагніта при однорідному магнітному полі в зазорі визначається по формулі Максвелла

$$F_{EM} = \frac{\Phi^2}{\mu_0 S_T} \quad (3)$$

Розкладаючи нелінійну залежність (3) в ряд Тейлора в околі точки усталеного режиму і переходячи до приростів, отримуємо

$$\Delta F_{EM} = \frac{2\Phi_o}{\mu_o S_T} \Delta\Phi \quad (4)$$

Для зручності викладок величину Φ_o виражаємо через I_o і δ_o згідно з (2)

$$\Delta F_{EM} = \frac{I_o w}{\delta_o} \Delta\Phi, \quad (5)$$

де I_o , δ_o , Φ_o – величини, що відповідають точці усталеного режиму.

Після лінеаризації рівняння (1) може бути записане в приростах

$$\Delta U = r\Delta I + w \frac{d\Delta\Phi}{dt} \quad (6)$$

У зв'язку з тим, що струм електромагніта є функцією двох змінних – магнітного потоку і зазору, як це впливає з (2), отримуємо наступні вирази для приросту струму:

$$\Delta I = \left(\frac{\partial I}{\partial \Phi}\right)_o \Delta\Phi + \left(\frac{\partial I}{\partial \delta}\right)_o \Delta\delta \quad (7)$$

$$\Delta I = \frac{2\delta_o}{w\mu_o S_T} \Delta\Phi + \frac{2\Phi_o}{w\mu_o S_T} \Delta\delta \quad (8)$$

Скориставшись залежностями (5) і (8), виразимо похідну від приросту магнітного потоку через прирости струму і зазору електромагніта

$$\frac{d\Delta\Phi}{dt} = \frac{w\mu_o S_T}{2\delta_o} \frac{d\Delta I}{dt} + \frac{w\mu_o S_T I_o}{2\delta_o^2} \frac{d\Delta\delta}{dt} \quad (9)$$

Підставивши значення похідної від приросту магнітного потоку в (6), отримаємо:

$$\frac{w\mu_o S_T}{2\delta_o} \frac{d\Delta I}{dt} + r\Delta I = \Delta U + \frac{w\mu_o S_T I_o}{2\delta_o^2} \frac{d\Delta\delta}{dt} \quad (10)$$

або в операторній формі

$$r[T_{EM} p\Delta I(p) + \Delta I(p)] = \Delta U(p) + K_{EM} r p\Delta\delta(p), \quad (11)$$

де $T_{EM} = \frac{w^2 \mu_o S_T}{2r\delta_o}$ – електромагнітна стала часу;

$K_{EM} = \frac{w^2 \mu_o S_T I_o}{2r\delta_o^2}$ – коефіцієнт передачі.

Передаюча функція обмоткової частини електромагніта

$$W_{EM1}(p) = \frac{\Delta I(p)}{\Delta U(p) + K_{EM} r p} = \frac{K_{EM1}}{T_{EM} p + 1}, \quad (12)$$

де $K_{EMI} = 1/r$ – коефіцієнт передачі обмотки.

Наявність в правій частині рівняння (10) складової, що містить похідну від зазору, вказує на існування внутрішнього зворотного зв'язку за швидкістю зміни зазору з передатною функцією

$$W_{331}(p) = \frac{\Delta U_{33}(p)}{\Delta\delta(p)} = K_{331}(p) = K_{EM} r p \quad (13)$$

Фізична сутність цього зворотного зв'язку – проти-ЕРС руху, що виникає в обмотці при зміні робочого зазору.

Передатну функцію силової частини електромагніта, що пов'язує прирости сили тяги та струму, отримуємо з рівняння (9), записаного в операторній формі

$$\frac{2\delta_o^2}{w^2\mu_o S_T I_o} \Delta F_{EM}(p) = \Delta I(p) - \frac{I_o}{\delta_o} \Delta \delta(p), \quad (14)$$

звідки

$$W_{EM2}(p) = \frac{\Delta F_{EM}(p)}{\Delta I(p) - \frac{I_o \Delta \delta(p)}{\delta_o}} = K_{EM2}, \quad (15)$$

де $K_{EM2} = K_{EM} r$.

Присутність в правій частині рівняння (14) складової, що залежить від вихідної величини – зазору, вказує на існування в структурній схемі електромагніта ще одного природного зворотного зв'язку за зазором з передатною функцією

$$W_{332}(p) = \frac{\Delta I_{33}(p)}{\Delta \delta(p)} = K_{332}(p) = I_o / \delta_o, \quad (16)$$

де $\Delta I_{oc}(p)$ – зображення приросту струму зворотного зв'язку.

Даний зворотний зв'язок враховує додаткове збільшення зусилля електромагніту при зменшенні робочого зазору за рахунок зміни магнітної провідності.

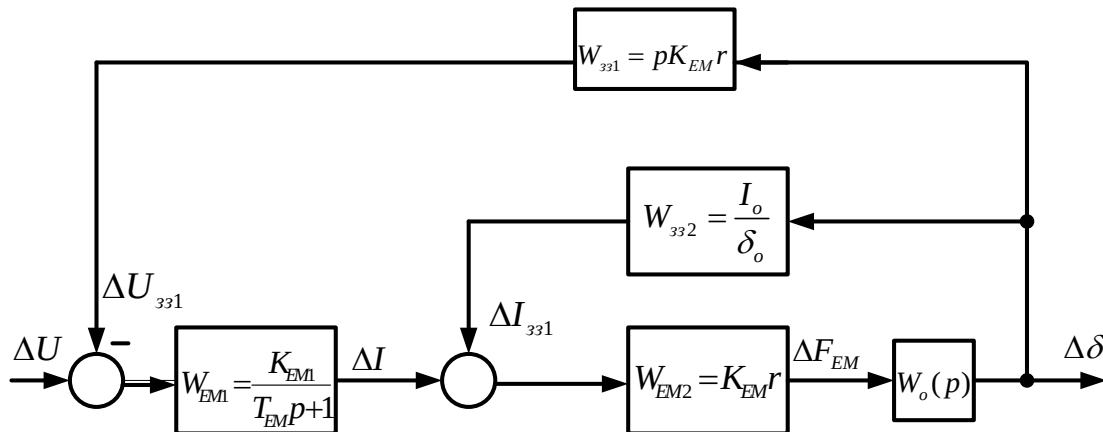


Рисунок 2 – Структурна схема лінеаризованої моделі силового електромагніта

Висновок. Наявність додатного зворотного зв'язку по зазору свідчить про те, що нерегульований електромагніт постійного струму є структурно нестійкою ланкою. Це підтверджує справедливність висновків теореми Ірншоу відносно електромагнітів постійного струму. Для досягнення стійкого магнітного підвішування необхідно використовувати замкнене керування по регульованій координаті та інші методи автоматичного управління.

Перелік посилань

1. Кацнельсон О.Г., Эдельштейн А.С. Автоматические измерительные приборы с магнитной подвеской. М: Энергия, 1970. – 216 с.