

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО АМОРТИЗАТОРУ

Рожков П. П.¹, Рожкова С. Е.²¹Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова,²Харківський національний автомобільно-дорожній університет

Побудована математична модель електромагнітного амортизатору на базі циліндричної лінійної машини.

Постановка проблеми. Адаптивна підвіска сучасного автомобіля потребує амортизаторів, які спроможні змінювати свій коефіцієнт опору в широкому діапазоні у відповідності до алгоритму керування та забезпечувати нормовану плавність ходу. Поряд з цим, кінетична енергія коливань, що перетворюється амортизатором на тепло, втрачається безповоротно. Виникає проблема рекуперації кінетичної енергії коливань автомобіля в бортову електричну мережу з додержанням нормованої плавності ходу.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

Останні теоретичні і експериментальні дослідження, відображені в публікаціях, свідчать про великий інтерес до створення амортизаторів, що мають регульований коефіцієнт опору. Найбільш перспективними вважають амортизатори, що використовують електромагнітний принцип дії і побудовані на базі циліндричної лінійної машини [1]. Важливим аспектом вважається можливість вибору такої конструкції амортизатора, яка б дозволяла виконувати рекуперацію кінетичної енергії коливань автомобіля [2].

Мета статті. Метою статті є побудова математичної моделі електромагнітного амортизатору (ЕМА), яку можна використовувати для визначення електричних та силових параметрів пристрою та режимів його роботи.

Основні матеріали дослідження. Розглянемо ЕМА як симетричну трифазну електричну машину з симетричним навантаженням, тоді еквівалентну електричну схему можна представити для однієї фази (рис. 1) [3].

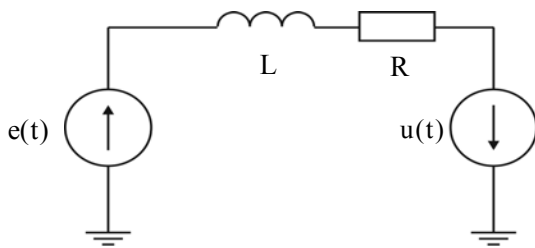


Рисунок 1 - Еквівалентна схема фази ЕМА

Запишемо диференціальне рівняння

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = e(t) + u(t), \quad (1)$$

де $i(t)$ – струм у контурі;
 L – індуктивність контуру;
 R – активний опір контуру;
 $e(t)$ – ЕРС індукції;

$u(t) = k_{ЕРС} e(t)$ – прикладена до обмоток напруга, пропорційна ЕРС індукції;

$k_{ЕРС}$ – коефіцієнт підсилення ЕРС індукції.

Розглянемо випадок, коли система працює у режимі без використання зовнішнього джерела напруги, тобто $k_{ЕРС} = 0$, а ЕРС індукції виникає в контурі завдяки ефекту Фарадея від магнітної зборки Холбаха.

Індукцію магнітної зборки Холбаха, що змінюється у часі, в загальному вигляді можна записати

$$B(t) = B_0 \cos\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (2)$$

де B_0 – амплітуда магнітної індукції;

ω – частота зміни магнітної індукції;

n – коефіцієнт зсуву фаз трифазної системи.

Магнітний потік буде функцією часу та матиме вигляд [4]

$$\Phi(t) = SB_0 \cos\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (3)$$

де S – площа, яку перетинає магнітний потік.

Виходячи з закону електромагнітної індукції Фарадея, запишемо

$$e(t) = -k \frac{d\Phi(t)}{dt}, \quad (4)$$

де k – конструктивний коефіцієнт електричної машини (знак "-" вказує, що ЕРС самоіндукції створює струм, магнітне поле якого заважає росту магнітного потоку через контур).

Підставимо (3) до (4) та знайдемо похідну по часу

$$e(t) = -kSB_0 \left[-\sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right) \right] \omega.$$

Тоді вираз для $e(t)$ буде мати вигляд

$$e(t) = E_m \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (5)$$

де $E_m = kSB_0\omega$.

Запишемо (1) з урахуванням (5)

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = E_m \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right).$$

Розв'язання диференційного рівняння отримаємо в наступному виді

$$i(t) = \frac{E_m}{Z} \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3} - \varphi\right), \quad (6)$$

$$\text{де } Z = \sqrt{R^2 + \omega^2 L^2};$$

$$\varphi = \arctg \frac{\omega L}{R}.$$

Запишемо вираз сили Ампера для n -ї фази

$$f_n(t) = i(t) B(t) l \sin \alpha, \quad (7)$$

де α – кут між вектором індукції та контуром;
 l – довжина обмотки, яку перетинає вектор індукції.

Підставимо (2) та (6) до (7) та отримаємо

$$f_n(t) = F_0 \sin\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \cdot \cos\left(\omega t + n \frac{2\pi}{3}\right), \quad (8)$$

$$\text{де } F_0 = \frac{E_m}{Z} B_0 l \sin \alpha.$$

Сила Ампера, що утворює спротив руху магнітної системи вздовж обмоточної частини, є змінною у часі величиною, тому загальна сила опору має бути визначена як сума трьох змінних сил з урахуванням кута зсуву між фазами електричної машини.

Коефіцієнт зсуву фаз трифазної системи n буде дорівнювати: $n = 0$ для фази А; $n = 1$ для фази В; $n = -1$ для фази С.

Запишемо вирази сили Ампера для кожної з фаз

$$f_A(t) = F_0 \sin(\omega t - \varphi) \cdot \cos(\omega t),$$

$$f_B(t) = F_0 \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \cdot \cos\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right),$$

$$f_C(t) = F_0 \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3} - \varphi\right) \cdot \cos\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right).$$

Просумуємо сили та отримаємо загальну силу на штоку

$$f(t) = F_0 \left(-\frac{3}{2}\right) \sin \varphi, \quad (9)$$

де знак "-" означає, що сила направлена проти руху магнітної частини.

Як можна побачити з (9), сила на штоку прямо пропорційна значенню синусу кута зсуву фаз між струмом та напругою φ . Для збільшення значення $\sin \varphi$ внесемо у коло додаткову індуктивність $L_{\text{доп}}$.

Для випадку, коли $k_{\text{ЕРС}} > 0$, у рівнянні (9) треба врахувати вплив додаткового джерела напруги, що буде забезпечувати підвищення сили на штоку ЕМА. Відповідно до принципу накладення, струм в обмотці буде визначатися не тільки складовою ЕРС індукції, а й величиною прикладеної напруги. Тому загальна сила на штоку буде складатись з сили, що виникає завдяки ЕРС індукції, та сили, що виникає завдяки прикладеній напрузі.

Висновки. Математична модель електромагнітного амортизатору показує ступінь залежності сили на штоку амортизатору від конструктивних параметрів електричної машини, параметрів електричного кола та магнітної індукції, яку створює зборка Халбаха.

За допомогою отриманої математичної моделі з'являється можливість визначити силу на штоку, яку потребує забезпечення нормованої плавності ходу.

Список використаних джерел

1. К. J. Meessen. Analysis and design of a slotless tubular permanent magnet actuator for high acceleration applications / K. J. Meessen, J. J. H. Paulides, E. A. Lomonova // Journal of applied physics. Vol. 105. – 2009 – pp. 07F110-1 - 07F110-3.
2. Бажинов О. В. Вибір конструкції актуатора для використання у електромагнітній підвісці автомобіля / О. В. Бажинов, С. П. Рожков, С. Е. Рожкова // Вісник СевНТУ: збірник наукових праць. – 2013. – №142. – С. 142 – 144.
3. Л. А. Бессонов. Теоретические основы электротехники / Л. А. Бессонов – М.: Высшая школа, 1996. – 638 с.
4. Зильберман Г. Е. Электричество и магнетизм / Зильберман Г. Е. – М: Наука, 1970 г. – 384 с.

Аннотация

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО АМОРТИЗАТОРА

Рожков П. П., Рожкова С. Э.

Построена математическая модель электромагнитного амортизатора на базе цилиндрической линейной машины.

Abstract

MATHEMATICAL MODEL OF ELECTROMAGNETIC SHOCK ABSORBER

P. Rozhkov, S. Rozhkova

The mathematical model of electromagnetic shock absorber on the base of cylindrical linear machine is built.