

УДК 681.5.015

## МОДЕЛЮВАННЯ РІДИННО-МАГНІТНОГО ДЕМПФЕРУ В СЕРЕДОВИЩІ SIMULINK З ВИКОРИСТАННЯМ БЛОКІВ ІМІТАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ SIMSCAPE

Галецький О.С., Бєліков К.О., Ночніченко І.В.

КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, Україна

**Анотація.** Робота присвячена математичному моделюванню принципово нового рідинно-магнітного демпфера для гасіння та поглинання механічних коливань в широкому діапазоні температур. Для перевірки функціональних можливостей демпфера, в даній роботі, розроблено математичну модель в середовищі Simulink з використанням прикладного пакету Simscape. Математична модель дозволила кількісно оцінити взаємозв'язок параметрів демпфера при взаємодії з середовищем експлуатації для виготовлення дослідного зразка та параметри елементів системи демпфера, що дадуть змогу досягти закладену робочу характеристику.

**Ключові слова:** демпфер, магнітно-гідравлічний, магнітно-рідинний, математична модель, протез колінного суглобу, Simulink, Simscape.

Розвиток технологій в області гасіння коливань, ставить все нові вимоги до сучасних демпферних пристроїв. На сьогоднішній день актуальним питанням при проектуванні гідравлічних демпферів є дослідження робочих процесів у робочих камерах. Характеристика гідравлічного демпфера в основному визначається в'язкістю робочої рідини, а також гідродинамічними процесами супроводжуються локальним підвищенням температури, порушенням суцільності потоку при певних режимах роботи і виникнення двофазного потоку робочої рідини [1-3]. Для поліпшення характеристик нових високоефективних демпферів застосовують нові конструкції гібридної структури. Такі як наприклад, магнітно-гідравлічні демпфери, що мають ряд переваг в порівнянні з іншими конструкціями, наприклад довговічність конструкції. Однак, цей симбіоз двох фізичних ефектів потребує поглибленої перевірки на етапі проектування та є недостатньо вивченим, що пов'язано зі складністю: гідродинамічних процесів, магнітної взаємодії, теоретичного опису так і постановки, і проведення експериментальних досліджень. Тому для дослідження робочих процесів і вибору їх раціональних параметрів, застосовують чисельне моделювання.

Для підтвердження ефективності роботи конструкції рідинно-магнітного демпферу (рис. 1) було розроблено математичну модель в середовищі Simulink з використанням прикладного пакету Simscape.

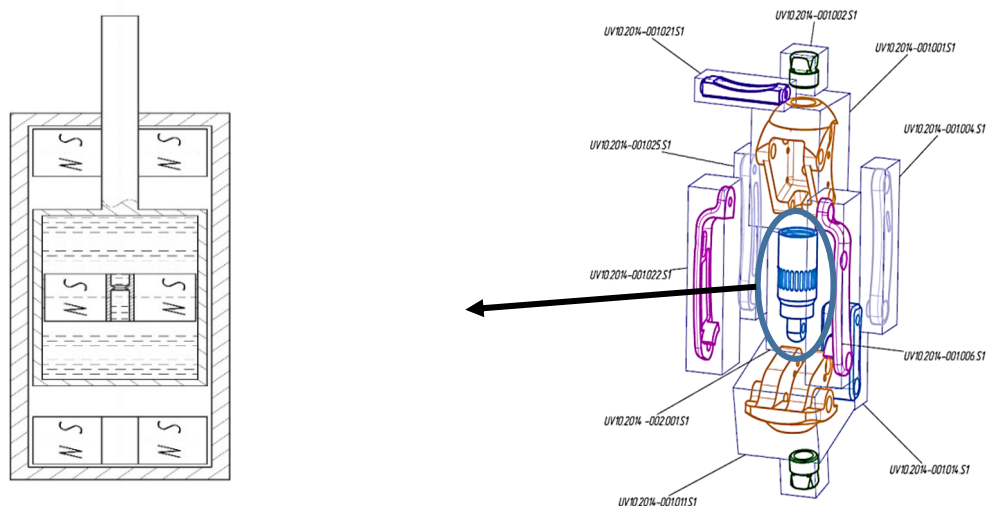


Рис. 1 – Конструктивна схема рідинно-магнітного демпфера

Математична модель описується системою рівнянь (1). Проведене тестування математичної моделі показало коректність роботи моделі і взаємодії компонентів. Так результати моделювання режиму "відбій" (рис. 2а) показують, що об'єм рідинної камери зменшується – це пояснюється дією інерційних і магнітних сил та сил в'язкого тертя на внутрішній поршень. Сумарний вектор сил спрямовано проти руху основного поршня.

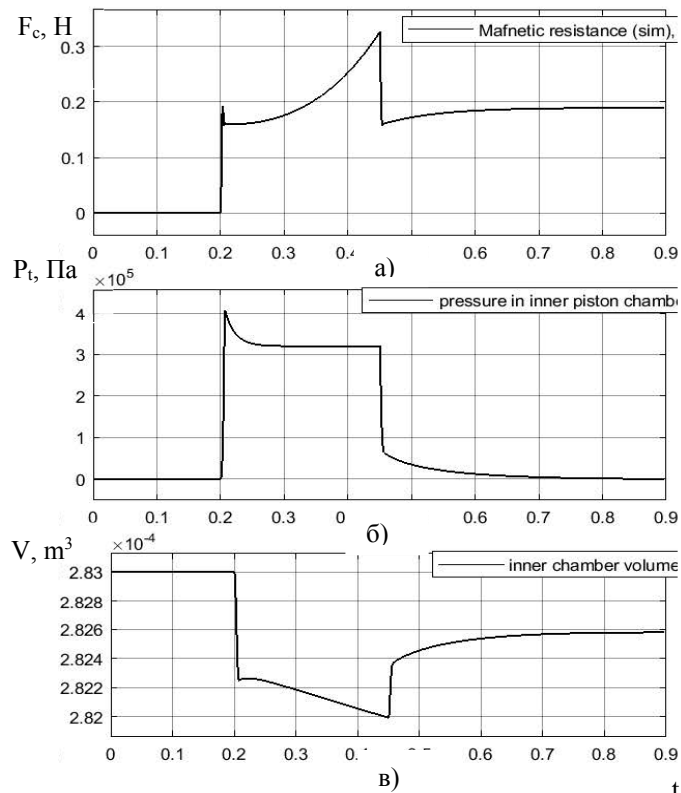
При моделюванні режиму "стиснення" спостерігається наявність коливальних процесів, меншої тривалості, ніж в режимі "відбій". Після зняття сили, яка діє на основний поршень, накопичена реактивна сила повертає основний поршень у початкове положення. При цьому спостерігається перехідний процес пікове значення, якого не перевищує 10% від загальної амплітуди.

$$\left\{ \begin{array}{l} F = m \frac{dv}{dt} \\ F_{tr} = \sqrt{2}e(F_{brk} - F_c) \cdot \exp\left(-\left(\frac{v}{v_{st}}\right)^2\right) \cdot \frac{v}{v_{st}} + F_c \cdot \tanh\left(\frac{v}{v_{Coul}}\right) + fv \\ v_{st} = v_{brk}\sqrt{2} \\ v_{Coul} = v_{brk}/10 \\ v = v_R - v_c \\ F_1 = \begin{cases} K_p \cdot (x - g_p) + D_p \cdot v & \text{for } x \geq g_p \\ 0 & \text{for } g_n < x < g_p \\ K_n \cdot (x - g_n) + D_n \cdot v & \text{for } x \leq g_n \end{cases} \\ v = \frac{dx}{dt} \\ E = E_1 \frac{1 + \alpha \left(\frac{p_a}{p_a + p}\right)^{1/n}}{1 + \alpha \frac{p_a^{1/n}}{n \cdot (p_a + p)^{\frac{n+1}{n}}} E_1} \\ q = \frac{V_0 + A(x_0 + x \cdot or)}{E} \cdot \frac{dp}{dt} \\ F = \varepsilon \cdot p \cdot A \\ q = C_D \cdot A \sqrt{\frac{2}{\rho}} \cdot \frac{p_r}{(p_r^2 + p_{cr}^2)^{1/4}} \end{array} \right. \quad (1)$$

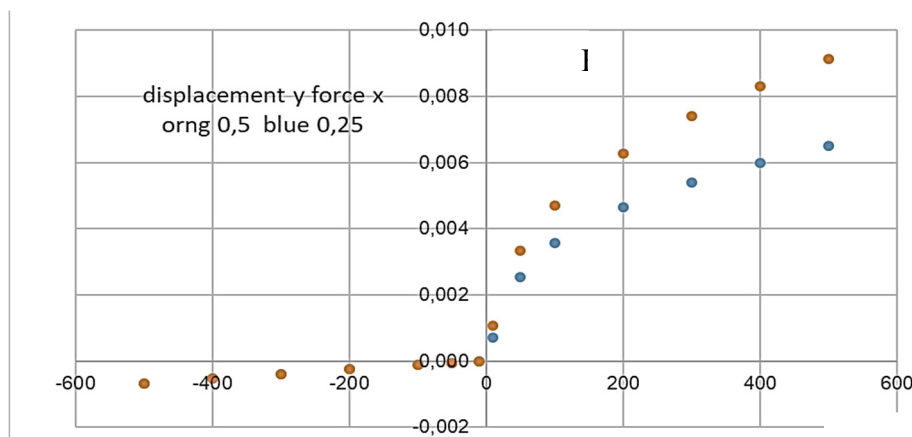
де  $F_{tr}$  – сила тертя;  $F_c$  – тертя ковзання;  $F_{brk}$  – сила тертя зсуву;  $v_{brk}$  – швидкість зсуву;  $v_{st}$  – гранична швидкість за Штрибеком;  $v_{Coul}$  – гранична швидкість для тертя ковзання;  $v_R$ ,  $v_c$  – швидкості переміщення поверхонь (сигнали на каналах елемента);  $v$  – відносна швидкість;  $f$  – коефіцієнт в'язкого тертя;  $F_l$  – сила взаємодії між рухомою і нерухомою ланками;  $g_p$  – початкове значення зазору між координатою рухомої ланки та верхньою межею переміщення;  $g_n$  – початкове значення зазору між координатою рухомої ланки та нижньою межею переміщення;  $x$  – поточна координата рухомої ланки;  $K_p$  – контактна жорсткість верхньої межі;  $K_n$  – контактна жорсткість нижньої межі;  $D_p$  – коефіцієнт амортизації верхньої межі;  $D_n$  – коефіцієнт амортизації нижньої межі;  $v$  – швидкість рухомої ланки;  $E_1$  – модуль пружності чистої рідини (рідинної частини);  $p_a$  – атмосферний тиск;  $\alpha$  – відносна частка розчиненого газу (повітря) в рідині при атмосферному тиску;  $n$  – коефіцієнт політропи для газу;  $q$  – об'ємна витрата через дросель;  $p$  – перепад тиску на дроселі;  $p_r$  – втрати тиску на дроселі;  $C_D$  – коефіцієнт витрати;  $A$  – площа поперечного перерізу дроселя;  $\rho$  – густина рідини;  $p_{cr}$  – критичний тиск турбулентного режиму.

Як видно з результатів моделювання режиму "відбій", об'єм рідинної камери зменшується, що пояснюється дією інерційних і магнітних сил та сил в'язкого тертя на внутрішній поршень. Сумарний вектор сил спрямовано проти руху основного поршня.

Узагальнені результати моделювання (рис. 3) показують залежність характеристики роботи демпфера в режимах "стиснення" і "відбій" при різній тривалості прикладення навантаження.



**Рис. 2. Графіки робочих процесів в камерах рідинного демпфера режим «стиснення» (а-характеристика зміни «жорсткості» магнітної пружини; б-характеристика зміни різниці тисків на дроселі внутрішнього поршня; в-зміна об'єму гідравлічної камери при переміщенні внутрішнього поршня)**



**Рис. 3. Залежність максимального переміщення поршня від зусилля опору за результатами моделювання при ширині імпульсу сили 1) – 0,25 с; 2) – 0,5 с**

В режимі «стиснення» тривалість прикладення навантаження майже не впливає на величину переміщення основного поршня, в той час як в режимі «відбій» переміщення поршня на пряму пов'язане з тривалістю дії навантаження.

**Висновки.** Розроблена математична модель дозволяє додатково враховувати умови експлуатації рідинного-магнітного демпфера і вплив його параметрів на процес демпфування. Це, в свою чергу, дозволить забезпечити вибір раціональних конструктивних параметрів в залежності від змінних умов експлуатації.

#### Список літератури

1. *K. 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. *Дербаремдикер А.Д.* Гидравлические амортизаторы автомобиля. - М.: Машиностроение, 1986. –216 с.
  3. *Ночніченко І.В.* Гідравлічний амортизатор з автоматичною стабілізацією характеристик в змінних умовах експлуатації // І.В. Ночніченко / Вісник Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук, 2014. – № 3 (86). – С. 117-124.
-