

Равлюк В.Г.¹, завідувач кафедри інженерії
вагонів та якості продукції, д.т.н., проф.
Дерев'янчук Я.В.¹, аспірант кафедри інженерії
вагонів та якості продукції

Дерев'янчук О.В.², доц. кафедри професійної
та технологічної освіти і загальної фізики, к.фіз.-мат.н., доц.

¹Український державний університет залізничного транспорту (м. Харків)

²Чернівецький національний університет імені Юрія Федьковича (м. Чернівці)

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ У ПНЕВМОЦИЛІНДРІ ЕЛЕКТРОПНЕВМАТИЧНОГО ГАЛЬМА ПАСАЖИРСЬКОГО РУХОМОГО СКЛАДУ

Вступ. Забезпечення ефективної та безпечної роботи пасажирського рухомого складу залізничного транспорту є одним із ключових завдань сучасної транспортної галузі. Важливу роль у цьому відіграють електропневматичні гальма, які забезпечують регулювання швидкості руху поїзда та його зупинку в різних умовах експлуатації. Надійність функціонування гальмової системи значною мірою залежить від ефективності роботи пневмоциліндра. Для підвищення ефективності дослідження робочих процесів у гальмових системах доцільним є використання математичного моделювання, яке дозволяє аналізувати динаміку процесів, прогнозувати поведінку системи та оптимізувати її параметри без проведення високовартісних експериментальних досліджень.

Викладення основного матеріалу. Головною умовою безпеки руху на АТ «Укрзалізниця» є забезпечення довговічності й надійності гальмового обладнання пасажирських поїздів, як одного з найбільш відповідальних вузлів. Для підвищення надійності гальм сучасного рухомого складу необхідно встановити режими роботи пневмоциліндра (рис. 1) при справних елементах гальмового обладнання.

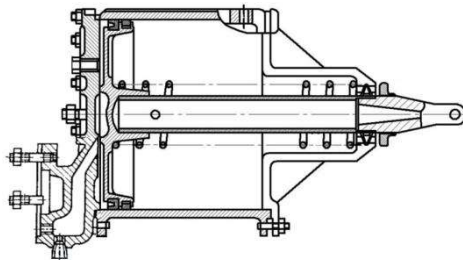


Рис. 1. Вид пневмоциліндра пасажирського вагона

Під час гальмування стиснене повітря подається в порожнину нагнітання та діє на поршень, що переміщується, стискає зворотну пружину та підвищує тиск у порожнині з її боку, що з'єднана з атмосферою. Сила зі штока передається через важільну передачу пасажирського вагона до колодок.

Під час розроблення математичної моделі пневмоциліндра електропневматичних гальм прийнято ряд припущень, зокрема: квазістаціонарність газодинамічних процесів, ізотермічний характер течії газу в трубопроводах, незмінність параметрів повітря в магістралі, а також нехтування витоками та теплообміном у порожнинах пневмоциліндра.

Математичну модель пневмоциліндра представлено системою диференціальних рівнянь, яка включає:

- рівняння руху виконавчого органу (поршня);
- рівняння зміни тиску в порожнині нагнітання;
- рівняння зміни тиску у порожнині з боку пружини.

Рівняння зміни тиску в порожнині нагнітання отримано на підставі першого закону термодинаміки з урахуванням підведеної енергії, зміни внутрішньої енергії газу та виконаної роботи. При цьому використано залежності, що описують ентальпію газу, витрату повітря, а також рівняння стану ідеального газу. Важливим є врахування змінного об'єму робочої порожнини, який залежить від координати переміщення поршня x .

$$\left. \begin{aligned} M \frac{d^2 x}{dt^2} &= P_1 F_1 - P_2 F_2 - P_A (F_1 - F_2) - N, \\ \frac{dp_1}{dt} &= \frac{k f \sqrt{R T_M}}{F_1 (x + x_{01}) \sqrt{\zeta_1}} \sqrt{P_M^2 - P_1^2} - \frac{k p_1}{x + x_{01}} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{dP_2}{dt} &= \frac{k f_2 \sqrt{R T_M}}{F_2 (S - x + x_{02}) \sqrt{\zeta_2}} \left(\frac{P_2}{P_M} \right)^{\frac{k-1}{k}} \sqrt{P_2^2 - P_A^2} + \frac{k P_2}{(S - x + x_{02})} \frac{dx}{dt}, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = x = 0, \text{ якщо } x \leq 0, \\ \frac{d^2 x}{dt^2} &= \frac{dx}{dt} = 0, \text{ якщо } x \geq S. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

де S – максимальне переміщення поршня, м; x – координата положення поршня від 0 до S , м; x_{01} – координата, що характеризує обсяг шкідливого простору з боку порожнини нагнітання, м; x_{02} – координата, що характеризує обсяг шкідливого простору порожнини з боку пружини, м; N – сила опору переміщенню поршня, Н; k – показник адиабати (коефіцієнт Пуассона); R – постійна газова, Дж/(кг·К); ρ – густина газу, кг/м³; T – абсолютна температура газу, К; P_1 – тиск у порожнині нагнітання, Па; P_2 – тиск у порожнині з боку пружини, Па; P_A – тиск на виході, Па; P_M – тиск живлення, Па; G – масова витрата газу, кг/с; f – площа проходного перерізу, м²; ζ – коефіцієнт опору лінії, дроселів; M – маса рухомих частин, кг; F_1 – площа поршня у порожнині нагнітання, м²; F_2 – площа поршня у порожнині з боку пружини, м².

Аналогічно отримано рівняння зміни тиску у порожнині з боку пружини, яке враховує процес витікання газу, зміну внутрішньої енергії та роботу стискання. При цьому процеси в порожнині розглядаються як наближено ізотермічні або адиабатичні залежно від умов роботи.

На підставі розробленої математичної моделі створено програмну реалізацію у середовищі Mathcad, що дозволяє досліджувати перехідні процеси в пневмоприводі (рис. 2).

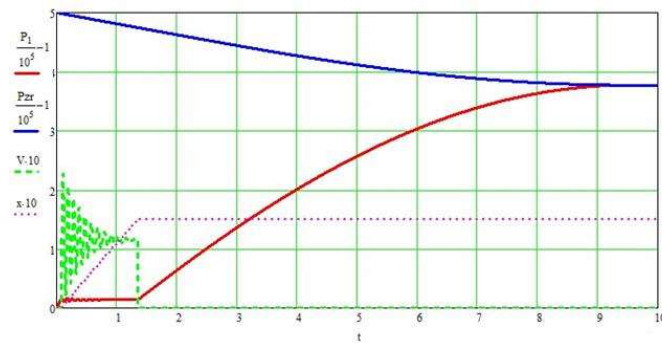


Рис. 2. Робота програми з розрахунку роботи пневмоциліндра при гальмуванні

Результати моделювання показують характер зміни тисків у пневмоциліндрі P_1 та запасному резервуарі P_2 , а також динаміку переміщення поршня V під час гальмування. Особливістю побудованої математичної моделі є врахування реальних обмежень руху поршня пневмоциліндра. Введено логічні умови, які обмежують координату переміщення поршня границями його ходу, що забезпечує фізичну адекватність моделі. Також враховано вплив сил опору, які включають корисне навантаження, сили тертя та демпфування.

Висновки. У результаті виконаних досліджень розроблено математичну модель пневмоциліндра електропневматичних гальм пасажирського рухомого складу, яка описує динаміку руху виконавчого органу та зміну параметрів робочого середовища в порожнинах приводу. Встановлено, що використання диференціальних рівнянь, отриманих на основі законів термодинаміки та газодинаміки, дозволяє адекватно відобразити фізичні процеси, що відбуваються у пневмоциліндрі. Врахування змінного об'єму порожнин, витрати газу та обмежень руху поршня забезпечує підвищення точності моделювання.

Розроблена модель може бути використана для дослідження режимів роботи гальмових систем, оцінювання їх ефективності, а також для вдосконалення конструкцій пневматичних елементів і алгоритмів керування електропневматичними гальмами.

Список використаної літератури:

1. Інструкція з експлуатації гальм рухомого складу на залізницях України: ЦТ-ЦВ-ЦЛ-0015: Затв. нак. Укрзалізничі від 28.10.1997. № 264-Ц. Київ : 2004. 146 с.
2. Вагони вантажні. Система технічного обслуговування та ремонту за технічним станом: СТП 04 – 010:2018: затв. нак. АТ «Укрзалізниця» від 08.08.2019 р. №519. 2018. 25 с.