

УДК 62-8

## Математична модель пневматичного позиційного приводу з безштоковим пневматичним циліндром

Касьян А.В., Галецький О.С.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ, Україна

В даній роботі описується розробка математичної моделі для позиційного пневматичного приводу на основі безштокового пневматичного циліндру. Створення енергоефективного позиційного пневматичного приводу є необхідним, так як в промисловості існує ряд задач, в яких саме треба використовувати пневматичні системи. Метою роботи є створити математичну модель для більш швидкої перевірки та впровадження позиційного приводу в інші системи. Основними методами для побудови математичної моделі є створення схеми, що складається з елементів, які показують взаємозв'язки між частинами приводу, кожен з елементів описується рівняннями, в результаті використовується система рівнянь для реалізації математичної моделі в середовищі Matlab Simulink. Результатом є математична модель пневматичного позиційного приводу, яку можна використовувати для попереднього дослідження різних типорозмірів пневматичних безштокових циліндрів. Математична модель показує, що в залежності від значення тиску та тривалості подачі стисненого повітря, поршень може зупинятися в певних, не кінцевих, положеннях. В подальшому, дана модель може бути використана для перевірки алгоритмів позиціонування, що дозволить прискорити та спростити створення систем на основі даного приводу.

Ключові слова: пневматичний позиційний привід; позиційний; енергоефективний привід; математична модель; безштоковий циліндр.

В промисловості є необхідність в системах позиційних приводів. Основними позиційними приводами є гідравлічні, сервоприводи та крокові двигуни, але існують задачі які потребують застосування пневматичних приводів і в цих задачах є ряд підзадачі, які вимагають позиційних приводів. Тому, зважаючи на затребуваність таких приводів, постала задача в розробці пневматичного енергоефективного позиційного приводу.

Пропонується в якості пневматичного позиційного приводу використовувати пневматичний безштоковий циліндр, принципова схема якого зображена на рис. 1.

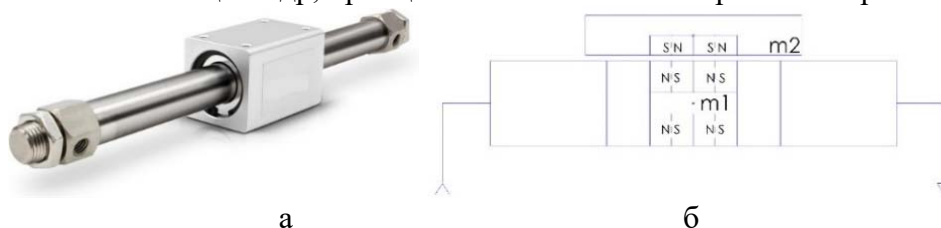


Рис. 1. Безштоковий пневмоциліндр: а – ілюстрація; б – принципова схема

Пневматичний безштоковий циліндр, зображений на рис. 1 працює наступним чином: при подачі повітря в ліву камеру поршень починає переміщатися вправо всередині циліндра. На поршні встановлено постійний магніт, полярність якого протилежна магніту на рухомий платформі зовні циліндра. Завдяки магнітній взаємодії платформа слідує за поршнем, виконуючи лінійний рух. Платформа рухається вздовж циліндра без механічного зв'язку, що забезпечує компактність та надійність системи.

Позиціонування приводу відбувається за рахунок знаходження необхідної кількості повітря, що треба подати для переміщення поршня в певну позицію, необхідний об'єм повітря знаходиться з рівняння [1]:

$$V_0 = \frac{(\frac{5680}{V_{mol}p_0} + 1)p_0\pi \cdot (\frac{D}{2})^2 \cdot L + \mu mgL}{(\frac{5680}{V_{mol}} + p_0) - \frac{p_0}{k-1} (1 - (\frac{p_0}{p_1})^{\frac{k-1}{k}})} \quad (1)$$

де  $p_1$  – тиск подачі повітря,  $p_0$  – атмосферний тиск,  $m$  – маса,  $L$  – хід,  $D$  – діаметр поршня,  $V_{mol}$  – молярний об’єм,  $\mu$  – коефіцієнт тертя,  $k$  – коефіцієнт питомої теплоємності.

Таким чином використовується лише необхідна кількість енергії, що необхідна для переміщення, що значно підвищує енергоефективність.

Так як, запропоноване рішення не є повністю дослідженим, то для спрощення аналізу, було розроблено математичну модель пневматичного позиційного приводу на базі пневматичного безштокового циліндру. Математична модель побудована на основі циклічно-модульного підходу [2]. Це дозволить зменшити час на реалізацію даного проекту та пришвидшить перевірку певних припущень щодо реалізації та можливостей системи. Математична модель необхідна для підбору раціональних параметрів системи приводу. Також, ця модель може бути застосована в методиці проектування різних типорозмірів схожих приводів.

Схема на рис.2 деталізує роботу пневматичної частини пориводу. Елемент 1 реалізує подачу вхідного сигналу, що прямує далі до елементу 2, в якому створюється потік стисненого повітря, який проходить через елемент 3 та надходить в елементи 4 та 5, в елементі 4 відбувається наповнення камери пневмоциліндру, а елемент 5 перетворює пневматичну енергію на механічну.

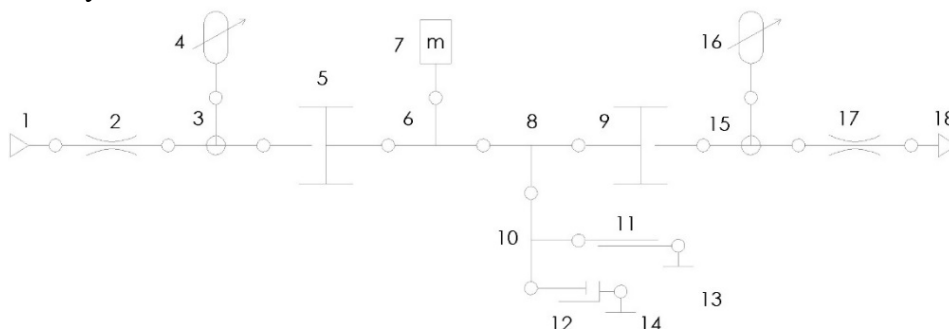


Рис. 2. Схема будови моделі пневматичного безштокового циліндру

Механічна енергія надходить в елементи 6, 8, 9, 10. Ця енергія використовується для переміщення рухомих мас (елемент) 7, елемент 11 реалізує в’язке тертя, а елемент 12 реалізує кінцеву позицію поршня. Елементи 13 та 14 виконують роль статичних опор. Елемент 9 перетворює механічну енергію в пневматичну. Далі пневматична енергія надходить в елемент 15, звідки розподіляється між елементами 16 і 17. Елемент 16 реалізує спорожнення камери пневмоциліндру. Далі пневматична енергія в елементі 17 перетворюється на потік стисненого повітря. Елемент 18 реалізує вихід енергії з системи. Вихідними параметрами є швидкість, переміщення, витрата та зусилля, що розвиває поршень.

На основі схеми моделі (рис.2) сформульована система рівнянь (3.1) і (3.2), що описує дану систему.

Дана модель була інтерпретована в Matlab Simulink. Кожен елемент зі схеми на рис.2 був представлений у вигляді підсистеми, яка має входи та виходи. На вхід передавалися значення для параметрів, що необхідні для функцій, які описують даний елемент в математичному вигляді.

$$\begin{cases}
 p_1 = p(t), \\
 q_{3,1} = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1 \cdot \sqrt{\sigma^k - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, \text{ при } \sigma = \frac{p_{2,2}}{p_1} < 1 \\
 q_{3,1} = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_1, \text{ при } \sigma = \frac{p_{2,2}}{p_1} > 1 \\
 q_{3,2} = q_{3,1} - q_{3,3}, \\
 \frac{dp_{2,2}}{dt} = \frac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{3,2} - k \cdot p \cdot (V_0 + \Delta V)}{V_0 + \Delta V}, \\
 q_{3,3} = \frac{v}{S}, \\
 q_{15,2} = q_{3,3} - q_{18} \\
 \frac{dp_{16,2}}{dt} = \frac{k \cdot R \cdot T_M \cdot q_{15,2} - k \cdot p \cdot (V_0 + V_{\max} - \Delta V)}{V_0 + V_{\max} - \Delta V}, \\
 q_{18} = 0.0899 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{16,2} \cdot \sqrt{\sigma^k - \sigma^{\frac{k+1}{k}}}, \text{ при } \sigma = \frac{p_{18}}{p_{16,2}} < 1 \\
 q_{18} = 0.02326 \cdot \mu \cdot f \cdot p_{16,2}, \text{ при } \sigma = \frac{p_{18}}{p_{16,2}} > 1 \\
 p_{18} = p_a
 \end{cases}
 \quad (3.1)$$

$$\begin{cases}
 F_{6,1} = p_{2,2} \cdot S, \\
 F_{6,2} = F_{6,1} - F_{6,3}, \\
 \frac{dv}{dt} = \frac{F_{6,2}}{m}, \\
 F_{6,3} = F_{8,2} + F_{8,3} \\
 F_{8,2} = b \cdot v, \\
 F_{8,3} = p_{15,1} \cdot S \\
 v = 0, h = 0, \text{ при } h \geq h_{\max}
 \end{cases}
 \quad (3.2)$$

В свою чергу, в підсистемі використовувалися Matlab functions для реалізації рівнянь, що описують функцію системи, тобто рівняння представлені у вигляді програмного коду. Для побудови логіки використовувався функціональний підхід [3]. Для більш складних рівнянь, де використовується інтеграція, використовувався блок Integrator з бібліотеки Simulink комбінації з Matlab function. Блоки, що відповідають елементам схеми з'єднуються між собою за допомогою вхідних та вихідних параметрів.

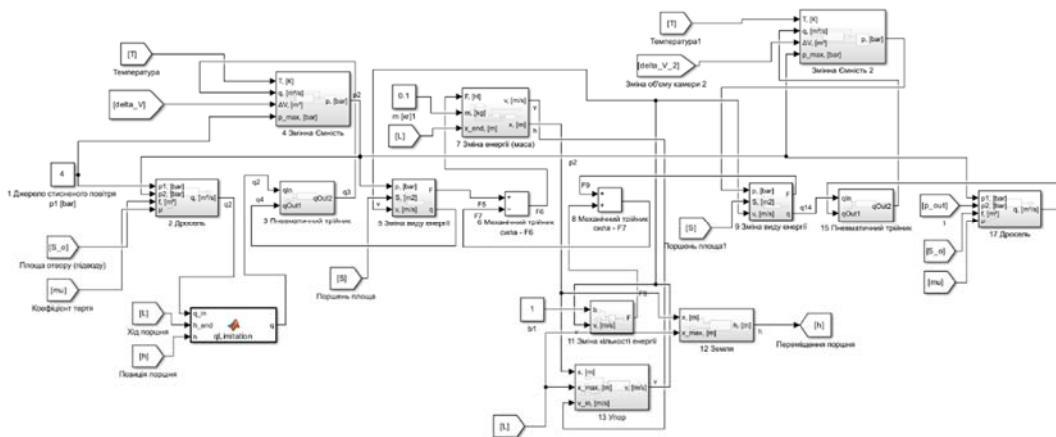


Рис. 3. Математична модель пневматичного безштокового циліндру в середовищі Matlab Simulink

Так як це модель позиційного приводу, то основною властивістю, яку треба дослідити – це зупинка поршня в певній, не кінцевій, позиції. Тобто, позиція, в якій зупиняється поршень, має залежати від значення тиску та тривалості подачі вхідного сигналу.

Наступним кроком є перевірка математичної моделі на достовірність. Коректність роботи була перевірена наступним чином: при зміні часу перемикання клапану, тобто часу подачі стисненого повітря в камеру циліндру, змінювалося переміщення поршня (рис.4).

З рис.4 видно, що при збільшенні часу перемикання розподільника, збільшується переміщення поршня. Також, при збільшенні тиску, зростає значення переміщення. Симуляція проводилась для циліндру діаметром поршня 25мм, хід 700мм. За результатами дослідження можна зробити висновок, що модель працює адекватно, отже можна надалі її використовувати для проведення модельних досліджень.

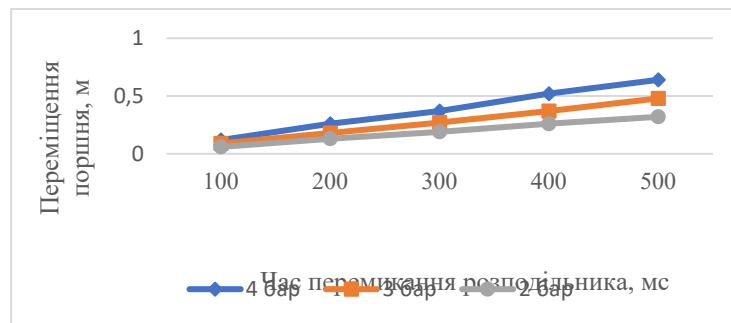


Рис. 4. Залежність переміщення поршня від часу перемикання розподільника

**Висновки.** Пневматичний позиційний привод має значний потенціал для застосування в різних галузях промисловості, а запропоноване рішення відрізняється простотою конструкції, високою енергоефективністю та можливістю точного позиціонування. Подальші дослідження в цьому напрямку дозволять створити конкурентоспроможні пневматичні приводи для широкого спектра задач при цьому застосування розробленої математичної моделі дозволить ефективніше реалізувати систему керування позиційним приводом за рахунок попереднього прогнозування кінцевої позиції робочого органу.

#### Список літератури

1. Jiang Z, Xiong W, Du H, Wang Z, Wang L. Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. J.Eng. 2021; 2021: 241–251. – Режим доступу до ресурсу: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1049/tje2.12000>
2. Ayman A. Aly, Aly S. Abo El-Lail, Kamel A. Shoush and Farhan A. Salem —Intelligent PI Fuzzy Control of An Electro-Hydraulic Manipulator I.J. Intelligent Systems and Applications, 7, 43-49, 2012
3. Michał Płachta. Grokking Functional Programming. Manning Publications, 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.manning.com/books/grokking-functional-programming>
4. Beucher, Olivier, and Labiche, Michel. Control Systems with MATLAB and Simulink. Springer, 2020. – Режим доступу до ресурсу: <https://www.springer.com/gp/book/9783030456962>

### Mathematical model of a pneumatic positioning actuator with a rodless pneumatic cylinder

**Kasian Andrii; Haletskiy Oleksandr**

*This paper describes the development of a mathematical model for a positional pneumatic actuator based on a rodless pneumatic cylinder. Creating an energy-efficient positional pneumatic actuator is necessary, since there are a number of tasks in industry in which pneumatic systems must be used. The purpose of the work is to create a mathematical model for faster verification and implementation of the positional actuator in other systems. The main methods for building a mathematical model are to create a diagram consisting of elements that show the relationships between the parts of the actuator, each of the elements is described by equations, as a result, a system of equations is used to implement the mathematical model in the Matlab Simulink environment. The result is a mathematical model of a pneumatic positional actuator, which can be used for preliminary research of various sizes of pneumatic rodless cylinders. The mathematical model shows that depending on the pressure value and the duration of compressed air supply, the piston can stop in certain, non-final, positions. In the future, this model can be used to test positioning algorithms, which will speed up and simplify the creation of systems based on this drive.*

**Keywords:** pneumatic positioning actuator; positioning; energy-efficient actuator; mathematical model; rodless cylinder