

**Г. А. КРУТИКОВ, М. Г. СТРИЖАК, В. В. ГЕРАСИМЕНКО, І. В. ТИМЧЕНКО,
І. М. БЕЛИХ**

БАГАТОПОЗИЦІЙНИЙ ПНЕВМОПРИВОД З АДАПТИВНОЮ СИСТЕМОЮ РЕЛЕЙНОГО УПРАВЛІННЯ

У статті розглядається конструкція та принцип дії багатопозиційного пневматичного привода з триетапним керуванням, що забезпечує високу швидкість, точність позиціонування та можливість оперативного переналаштування точок позиціонування. Актуальність теми зумовлена потребою у підвищенні ефективності та гнучкості пневматичних систем в умовах автоматизованого виробництва. Запропонована конструкція приводного механізму дозволяє зменшити габаритні розміри обладнання, спростити його обслуговування та підвищити точність позиціонування. Порівняно із традиційними електрогідравлічними та електропневматичними слідкувальними приводами, запропоноване рішення є менш складним і більш економічно доцільним. У роботі детально проаналізовано робочі процеси, що відбуваються у багатопозиційному пневмоприводі, зокрема етапи подачі стисненого повітря, послідовність перемикання положень виконавчого органу, динаміку руху поршнів та клапанних елементів. Особливу увагу приділено опису схеми керування приводом, яка включає розташування та функції розподільників, пневматичних елементів логіки, а також розроблено алгоритм дії у залежності від заданих режимів роботи, який дозволяє досягти стабільності перехідного процесу, а отже стабільної та безперебійної роботи системи, реалізованої на базі стандартної пневмоапаратури. Представлене математичне моделювання підтверджує ефективність та надійність запропонованого рішення.

Ключові слова: пневмопривід, структурна схема, кореневий годограф, лінія перемикання, режим самонавчання, перехідний процес

G. KRUTIKOV, M. STRIZHAK, V. GERASYMENKO, I. TYMCHENKO I. BIELYKH

MULTI-POSITION PNEUMATIC ACTUATOR WITH ADAPTIVE RELAY CONTROL SYSTEM

The article discusses the design and operating principle of a multi-position pneumatic actuator with three-stage control, which ensures high speed, positioning accuracy, and the ability to quickly reconfigure positioning points. The relevance of the topic is driven by the need to improve the efficiency and flexibility of pneumatic systems in automated production environments. The proposed actuator design allows for a reduction in equipment dimensions, simplification of maintenance, and improved positioning accuracy. Compared to traditional electrohydraulic and electropneumatic follow-up actuators, the proposed solution is less complex and more cost-effective. The study provides a detailed analysis of the operational processes within the multi-position pneumatic actuator, including compressed air supply stages, the sequence of actuator position switching, piston and valve movement dynamics. Particular attention is given to the actuator control scheme, which includes the layout and functions of distributors, pneumatic logic elements, as well as a developed algorithm of operation depending on the specified operating modes. This algorithm ensures the stability of the transient process and, consequently, the stable and uninterrupted operation of the system based on standard pneumatic equipment. The presented mathematical modeling confirms the efficiency and reliability of the proposed solution.

Keywords: pneumatic drive, structural scheme, root hodograph, switching line, self-learning mode, transient process

Вступ. При роботі пневмопривода (ПП) в системі багатопозиційного керування потрібна висока швидкість, точність позиціонування та можливість оперативного переналаштування точок позиціонування. Традиційно для вирішення такого завдання використовується електрогідравлічний (або електропневматичний) слідкувальний привід. Однак, як відомо, при використанні цих систем вимоги високої точності та високої швидкодії є взаємовиключними і щоб задовольнити їм необхідний синтез коригувальних РС-ланцюгів [1, 2]. Такі системи досить дорогі і мають надмірні функціональні можливості, які повною мірою розкриваються тільки в системах контурного управління. До того ж, численні спроби побудувати багатопозиційний ПП на основі аналогового управління, подібно слідкуючому гідроприводу, зіткнулися з досить суттєвою перешкодою – відсутністю досить надійного серійного сервоклапану в номенклатурі більшості фірм-виробників пневмообладнання.

З іншого боку, постійно зростаючий рівень цифрової обчислювальної техніки, її постійне здешевлення зробили очевидним той факт, що використання мікропроцесорних засобів для управління ПП стало економічно

доцільним. При цьому через практично необмежені функціональні можливості мікропроцесорних засобів управління особливий інтерес викликають алгоритми з адаптивною системою управління, що дозволяють весь час стежити за помилкою позиціонування і відповідно змінювати умови включення керуючих розподільників.

Аналіз останніх досягнень і публікацій. Аналіз багатопозиційних пневматичних виконавчих механізмів і систем їх керування підкреслює актуальність питань енергоефективності та експлуатаційної гнучкості в сучасній автоматизації. Ряд досліджень [3, 4] зосереджено на розробці стратегій керування, що зменшують витрати стисненого повітря при збереженні високої точності позиціонування. Зокрема, ефективними виявилися методи двотискового живлення та дискретного перемикання.

У дослідженнях [5, 6] розглядаються модульні конструкції пневмоприводів, у яких виконавчі органи складаються з послідовно з'єднаних камер. Такі конфігурації дозволяють реалізувати кілька стабільних положень без постійного енергоспоживання, що особливо цінно для систем з рідкісним перемиканням. До того ж вони сприяють мініатюризації систем і зниженню потреб у техобслуговуванні.

У роботі [7] підкреслюється важливість динамічної реакції системи та затримок керування, особливо у випадках, коли кілька клапанів активуються послідовно. Вплив часу подачі керувальних сигналів і геометрії виконавчих елементів на ефективність роботи системи є ключовим для розробки таймерних схем і алгоритмів керування багатопозиційними приводами.

Подальші дослідження [8, 9] присвячені цифровій пневматиці та покроковим схемам керування, в яких переміщення між позиціями здійснюється шляхом логічного керування клапанами. Перевагами таких підходів є програмованість, інтеграція з ПЛК та спрощена діагностика. Проте складність пневматичних схем усе ще залишається викликом.

Нарешті, у дослідженнях [10, 11] наголошується, що моделювання є важливим етапом проєктування та оптимізації подібних систем. Багатодоменні моделі, які охоплюють пневматичні, механічні та керувальні аспекти, дають змогу проаналізувати перехідні процеси, втрати енергії та прогнозувати зношування компонентів.

Мета та постановка задачі. Розробити і дослідити багатопозиційний пневматичний привід із поетапним керуванням, який забезпечує високу швидкість та точність позиціонування без використання складних і дорогих електрогідравлічних систем, а також дозволяє ефективно вирішувати задачу багатопозиційного управління в умовах обмеженого функціонального ресурсу пневмообладнання.

Основні положення та результати досліджень. Найбільш переважним у випадку побудови пневматичного приводу на базі стандартної пневмоапаратури стає релейне керування, що характеризується стрибкоподібною зміною керуючого впливу у момент, коли сигнал неузгодженості проходить через деяке граничне значення. Застосовується такий тип керування в основному в циклових та позиційних ПП. Для отримання інформації про координати зображуючої точки у фазовій площині такі системи оснащені, як і аналогові слідкуючі системи, датчиком положення й мають контур зворотного зв'язку. Однак, застосовно до релейних приводів, замість аналогового сервоклапана, що реагує на величину й знак неузгодженості між вхідним впливом і положенням робочого органа (РО), такі системи мають пневморозподільник, що дискретно спрацьовує із яскраво вираженою релейною характеристикою й реагують тільки на знак функції неузгодженості U . Таким чином, межею у фазовій площині буде лінія $U = 0$. Причому, у цьому разі функція неузгодженості U має, зазвичай, складніший характер, ніж P -регулятор ($U = x_z - x$).

Типова (базова) схема релейного ПП наведена на рис. 1. Формування керуючих сигналів за допомогою поляризованого реле, яке виробляє однорідні дискретні сигнали залежно від знаку U , відбувається відповідно до схеми на рис. 2.

Вибір закону керування релейним пневмоприводом методом кореневого годографа

Незважаючи на наявність суттєво нелінійної релейної характеристики розподільника, деякі, найбільш фундаментальні висновки, пов'язані з вибором того чи іншого закону керування, можна зробити, спираючись на лінійну модель ПП.

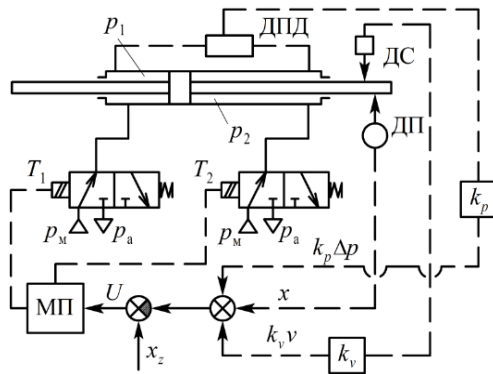


Рис. 1 – Типова схема пневмопривода з релейним керуванням

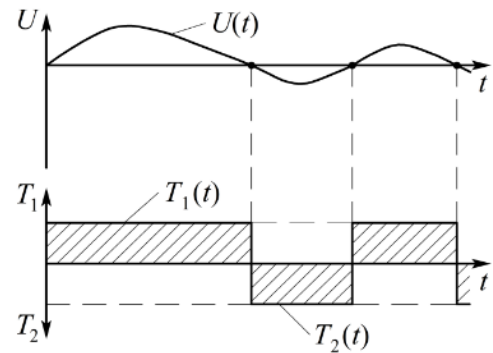


Рис. 2 – Формування дискретних керуючих сигналів

Для оцінки запізнення між зміною тиску на виході релейного розподільника та тиском у порожнинах циліндра у прямому ланцюгу після релейного елемента потрібно ввести аперіодичну ланку $1/(\tau_0 s + 1)$ (рис.4). Спробуємо описати роботу релейного елемента за допомогою лінійного аналога. Будемо умовно вважати, що характеристика дискретного розподільника при функції неузгодженості $U > 0$ описується деякою ламаною лінією OAB , причому кутовий коефіцієнт k_{OA} прямої при спрацьовуванні розподільника досить швидко змінюється від 0 до ∞ (рис.3). Аналогічно і при $U < 0$:

$$k_{OA} = (\operatorname{tg} \alpha)_{\alpha \rightarrow \frac{\pi}{2}} = \left(\frac{\Delta p_M}{U} \right)_{U \rightarrow 0}. \quad (1)$$

По мірі того як зменшується абсолютна величина функції неузгодженості, кутовий коефіцієнт k_{OA} збільшується і при $U = 0$ $k_{OA} \rightarrow \infty$.

Спрощена лінійна модель ПП при такій апроксимації у вигляді структурної схеми наведена на рис. 4.

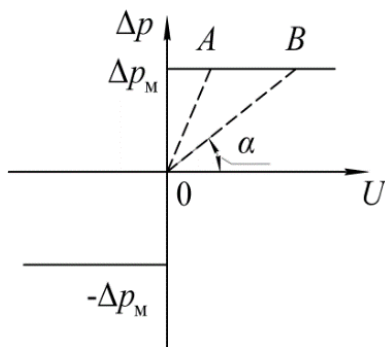


Рис. 3 – Лінійна інтерпретація процесу перемикавання релейного пневморозподільника

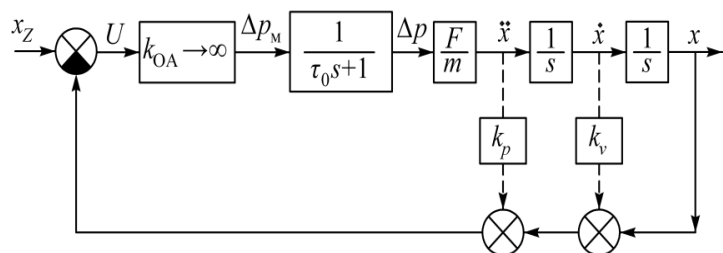


Рис. 4 – Спрощена структурна схема релейного пневмоприводу

У разі замикання ПП з дискретними розподільниками лише зворотним зв'язком за положенням робочого органу передавальна функція прямого ланцюга (рис. 4) має вигляд

$$W(s) = \frac{k_d}{s^2(1 + \tau_0 s)}, \quad (2)$$

де $k_d = \frac{F}{m} k_{OA}$ – коефіцієнт посилення прямого ланцюга приводу.

Для дослідження поведінки ПП при прагненні коефіцієнта $k_d = \frac{F}{m} k_{OA}$ до нескінченності дуже зручним є метод кореневого годографа. Траєкторії нулів та полюсів передавальної функції при зміні k_d від нуля до нескінченності дозволяють отримати при $k_d \rightarrow \infty$ нупольний портрет системи і зробити висновок про характер перехідного процесу при позиціюванні РО ПП.

При використанні одноконтурного регулятора (зворотний зв'язок за положенням РО) передатна функція розімкнутого РО ПП має вигляд

$$W_p(s) = \frac{k_d H}{s^2(1 + \tau_0 s)}, \quad (3)$$

де H – коефіцієнт передачі зворотного зв'язку за положенням РО.

При $k_d = 0$ подвійний полюс знаходиться на початку координат $s_{1,2} = 0$, а одинарний – на дійсній осі $s_3 = -1/\tau_0$ (тобто в полюсах передавальної функції розімкнутого ПП). Через те, що нулів немає, всі три полюси спрямовуються в нескінченність при $k_d \rightarrow \infty$. Число асимптот $n - m = 3 - 0 = 3$. Координата перетину асимптот з дійсною віссю визначається виразом

$$O_A = \left(\sum_{i=1}^3 s_i - \sum_{j=0}^0 s_j \right) / (n - m) = [0 + 0 - \frac{1}{\tau_0}] / 3 = -\frac{1}{3\tau_0}. \quad (4)$$

Кути асимптот розраховуються за формулою

$$\theta_{Ai} = (2i + 1) \frac{180^\circ}{n - m}; \quad \theta_{A1} = 60^\circ; \quad \theta_{A2} = 180^\circ; \quad \theta_{A3} = 300^\circ.$$

Нупольний портрет системи наведено на рис. 5, а.

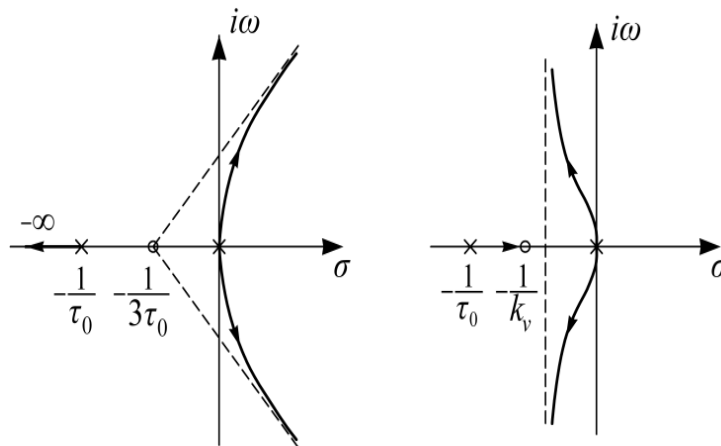


Рис. 5 – Нупольні портрети при використанні одноконтурного (а) і двоконтурного регуляторів (б)

Система нестійка. Для стабілізації роботи ПП використовуємо закономірність, яка проявляється у прагненні полюсів передавальної функції або до нескінченності, або до нулів передавальної функції розімкнутого ПП при $k_d \rightarrow \infty$. Метод стабілізації дискретного ПП ґрунтується на перетягуванні коренів характеристичного полінома з правої в ліву частину s -площини шляхом введення в ліву частину s -площини нулів.

Введемо до контуру керування додатковий вплив за швидкістю:

$$U = x_z - x - k_v v. \quad (5)$$

Тоді

$$H = 1 + k_v s. \quad (6)$$

У лівій напівплощині, таким чином, з'являється дійсний нуль:

$$W_p(s) = H(s)W(s) = \frac{k_d(1 + k_v s)}{s^2(1 + \tau_0 s)}. \quad (7)$$

Вихідне положення полюсів при $k_d = 0$ те саме ($s_{1,2} = 0$; $s_3 = -1/\tau_0$). Кількість асимптот $n - m = 3 - 1 = 2$. Координата перетину асимптот з дійсною віссю визначається як

$$\sigma_A = \left(\sum_{i=1}^3 s_i - \sum_{j=0}^0 s_j \right) / (n - m) = \left(-\frac{1}{\tau_0} + \frac{1}{k_v} \right) / 2. \quad (8)$$

Кути асимптот дорівнюють

$$\theta_{Ai} = (2i + 1) \frac{180^\circ}{n - m}; \quad \theta_{A1} = 90^\circ; \quad \theta_{A2} = 270^\circ.$$

Умову сталої роботи ПП можна отримати з виразу (8).

$$\text{ПП стійкий при } \left| \frac{1}{\tau_0} \right| > \left| \frac{1}{k_v} \right|.$$

За цієї умови кореневий годограф наведений на рис. 5, б.

Введення до закону керування лінійного впливу за першою похідною на фазовій площині може бути відображено лінією перемикання у вигляді похилої прямої, що проходить через точку позиціонування (рис. 6) [4].

Причому кут нахилу цієї лінії, що характеризується коефіцієнтом k_v , визначає демпфуючі властивості релейної системи. Чим більша полого лінія, тобто чим вище k_v , тим більш демпфована система.

Напруги T_1 і T_2 , що подаються на електромагніти розподільників (рис. 1), при реалізації ПД-регулятора формуються за наступним алгоритмом:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_n \frac{1 - \text{sign}(U)}{2} = T_n \frac{1 - \text{sign}(x_z - x - k_v \cdot v)}{2}; \\ T_2 &= T_n \frac{1 + \text{sign}(U)}{2} = T_n \frac{1 + \text{sign}(x_z - x - k_v \cdot v)}{2}. \end{aligned} \quad (9)$$

де T_n – номінальна напруга.

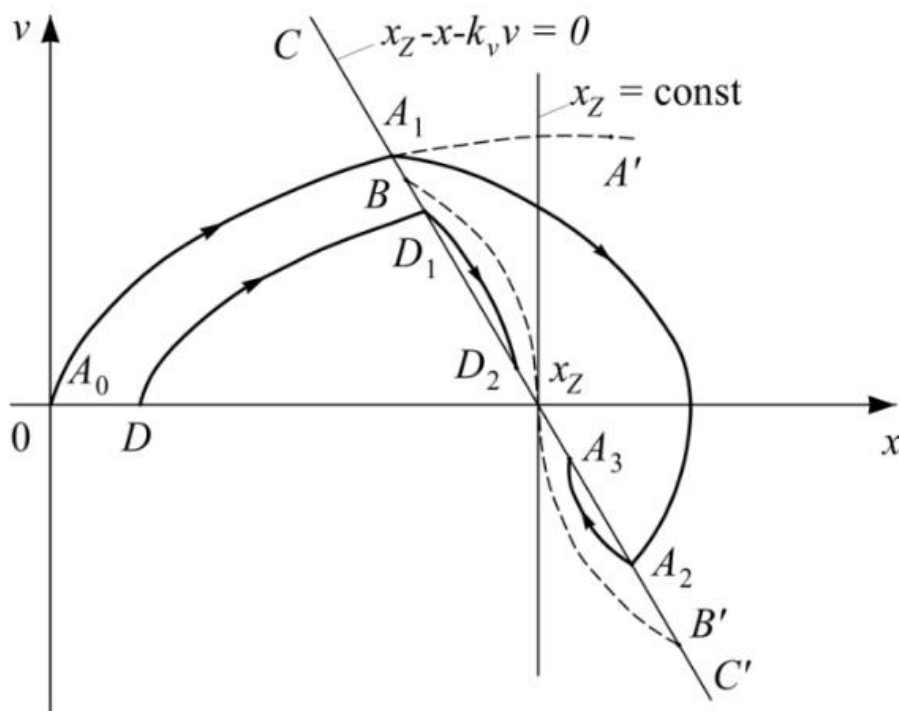


Рис. 6 – Рух РО ПП уздовж лінії перемикавання у фазовій площині

Такий алгоритм ідентичний реалізації пропорційно–диференційного зворотного зв'язку (ПД – регулятора) при наявності релейного елемента (розподільника) у прямому ланцюзі. Якщо функція неузгодженості має вигляд $U = x_z - x - k_v \cdot v$, а релейний елемент (розподільник) реагує тільки на знак функції неузгодженості, то це й забезпечить рух РО уздовж лінії перемикавання, що задається рівнянням $x_z - x - k_v \cdot v$, до заданої точки позиціонування x_z (рис. 6).

Аналіз результатів досліджень.

Процес постійного відстеження лінії перемикавання є нераціональним, виходячи з вимоги високої швидкодії. Найбільш перспективним з точки зору підвищення швидкодії є такий режим руху РО, при якому більшу частину відстані між координатами позиціонування ПП проходить, залишаючись розімкненим

Найбільш раціональним для подібного ПП представляється 3-х етапний режим позиціонування, при якому перші два етапи: розгін і радикальне ("грубе") гальмування аж до першої зупинки РВ здійснюються при розімкненому ПП (траєкторія 0-1-2 на рис. 7), а третій етап являє собою відстеження лінії перемикавання, коли один із розподільників (реверсивний) перемикається залежно від знака функції неузгодженості $U = x_z - x - k_v \cdot v$ (траєкторія 2-3- x_z).

Подібний режим позиціонування дозволяє реалізувати стратегію управління, засновану на самонавченні (рис. 7), суть якої полягає в тому, що в режимі тестування нова координата грубого гальмування залежить від різниці, визначеної в результаті попередньої ітерації:

$$x_T^i = x_T^{i-1} - \frac{x_v^{i-1} - x_z}{r}, \quad (10)$$

де x_T^{i-1} , x_v^{i-1} – координати гальмування і першої зупинки на попередній ітерації.

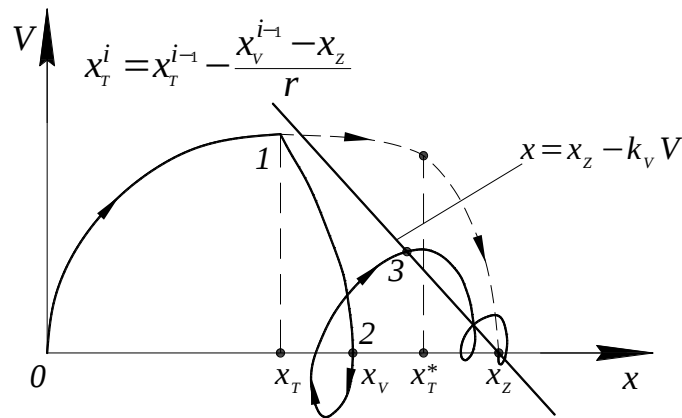


Рис. 7 – Процес позиціонування у фазовій площині

Якщо в результаті тестування на i -му кроці після чергового коригування відповідно до формули (10) $|x_Z - x_V^i| \leq \varepsilon$, то оптимальна координата «грубого» гальмування запам'ятовується ($x_T^* = x_T^i$). Таким чином, отриманий режим позиціонування буде вважатися оптимальним, тобто таким, при якому в результаті тільки одного перемикання гальмівного розподільника забезпечується позиціонування із заданою точністю, а третя фаза руху взагалі відсутня.

Перехід до третього етапу позиціонування в експлуатаційному режимі можливий у випадку, коли умови функціонування зміняться настільки, що координата позиціонування внаслідок гальмування вийде за межі заданої точності. Наявність третього етапу буде не тільки здійснювати «страховку», тобто безумовне відпрацювання заданої координати позиціонування за умов функціонування, що змінюються, а й змінювати координати початку гальмування x_T^* . Останню властивість можна з повною підставою вважати реалізацією *режиму адаптації*.

До пневматичної схеми керування має пред'являтися одна істотна вимога – забезпечити можливість відділення фази «грубого» гальмування, коли в основному гаситься кінетична енергія рухомих частин, від фази стеження за лінією перемикання, коли необхідний набагато більш делікатний режим розгону і гальмування, щоб уникнути «розгойдування» системи.

Універсальна пневматична схема, що реалізує всі необхідні комутаційні ситуації для всіх фаз руху наведена на рис. 8. Тут ПК – програмований контролер; ДП – датчик положення; БЖ1 – блок живлення інтерфейсної магістралі; БЖ2 – блок живлення вільнокомпонованих модулів контролера; МП – мікропроцесорний модуль; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; МВ – модуль виведення дискретних (цифрових) сигналів; ІМО – інтерфейсна магістраль; Ф – механічний фіксатор; F , R , T_1 , T_2 , T_3 – дискретні електричні сигнали керування пневморозподільників.

Особливістю представленого на рис. 8 пневматичного модуля є можливість реалізації цілого ряду комутаційних ситуацій для кожної фази руху робочого органа. Один з найбільш раціональних алгоритмів управління представлений в таблиці на рис. 9.

На рис. 10 наведений розрахунковий перехідний процес, отриманий на ЕОМ, під час роботи ПП зі схемою на рис. 8 за алгоритмом керування, викладеним у табл. 9. Перехідний процес відповідає початковому варіанту тестування, коли координата гальмування вибирається

рівною: $x_T = \frac{(x_0 - x_Z)}{2}$, де x_0 – початкова координата позиціонування. Абсолютна стійкість

процесу відпрацювання лінії перемикання у третій фазі руху РО, який починається після його першої зупинки, дозволяє досить ефективно провести тестування та визначити оптимальну координату "грубого" гальмування (рис. 11). Як видно, в результаті п'яти дослідів контролер автоматично визначає координату радикального гальмування x_T^* , домагаючись оптимізації

перехідного процесу як за швидкодією, так і за точністю (час спрацювання скоротився з 2,96 до 1,27 с.).

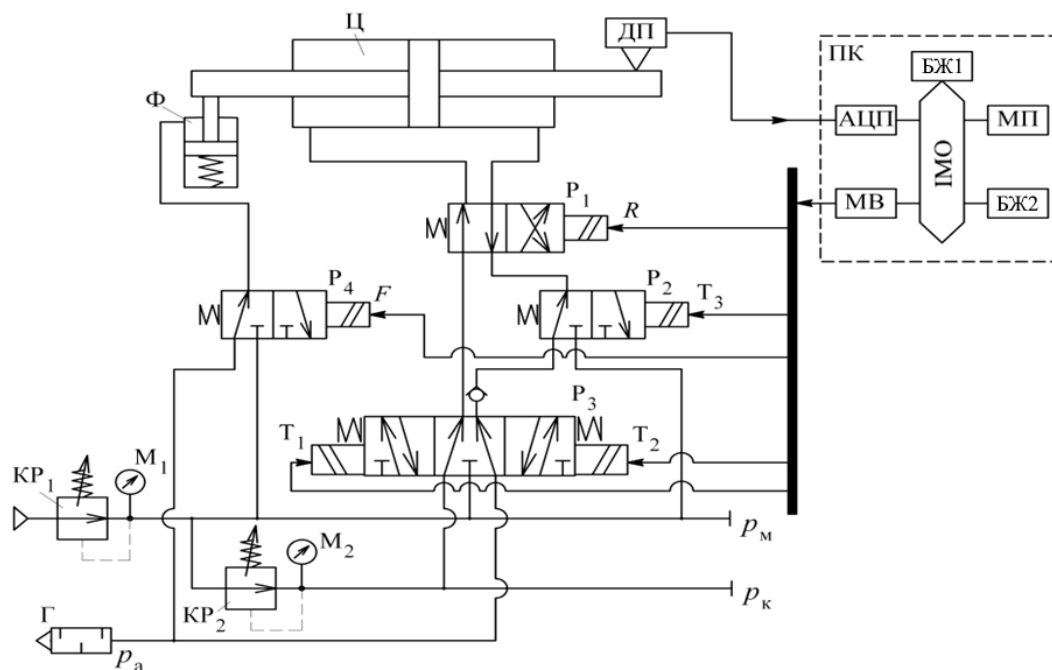


Рис. 8 – Універсальний пневматичний модуль для триетапного позиціонування на базі п'ятилінійного трипозиційного розподільника.

Таблиця 1 – Алгоритм керування пневморозподільниками при відпрацюванні заданої координати позиціонування

Фази руху	T_1	T_2	T_3	R
розгін	1	0	0	0
грубе гальмування	0	1	1	0
відстеження лінії перемикавання	0	1	1	$\frac{1 - \text{sign} U}{2}$
фіксація	1	0	1	0

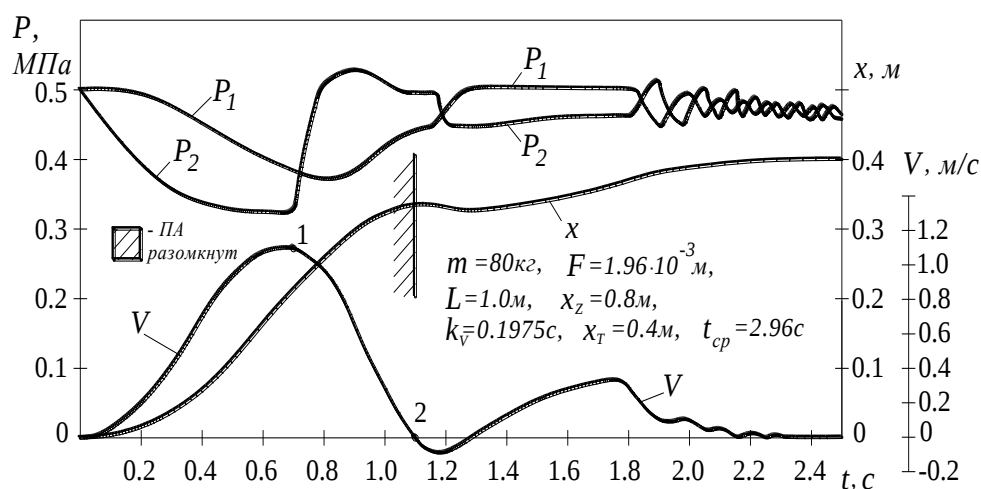


Рис. 9 – Перехідний процес для ПП з алгоритмом I.3.в при початковому процесі позиціонування

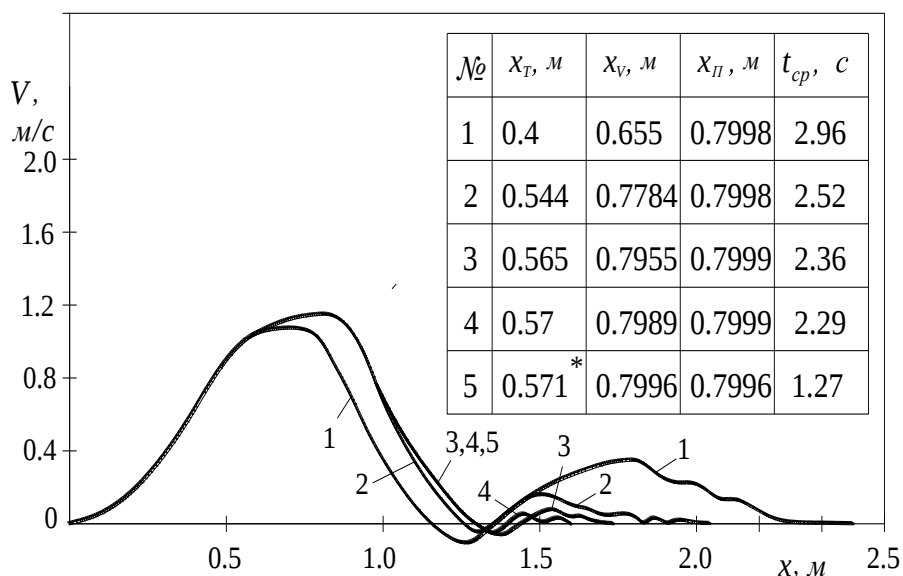


Рис. 10 – Процес самонавчання ПП при триетапному процесі позиціонування

Висновки.

Запропоновано нову конструкцію багатопозиційного пневмопривода з триетапним керуванням, яка дозволяє значно збільшити кількість фіксованих положень при збереженні компактності. Розглянута в роботі стратегія релейного управління ПП, а також апаратна реалізація запропонованого методу позиціонування РО ПП може бути використана при автоматизації гнучких виробничих процесів. Економічно доцільним є поєднання дешевої стандартної пневмоапаратури з доступними в даний час програмованими засобами управління, що робить такі способи дискретного керування ПП все більш затребуваними

Список літератури:

1. Лукінюк, М. Технічні засоби автоматизації. Математичні операції на пневматичних елементах та їх використання в системах керування [Текст] / М. Лукінюк // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2018. – № 3. – С. 58–63.
2. Кривинський, П. Конструкторсько-технологічне забезпечення підвищення точності функціональних розмірів внутрішніх ланок приводних роликів ланцюгів [Текст] / П. Кривинський, П. Кривий // Тези доповідей конференції «Сучасні напрямки розвитку машинобудування та транспорту». – Тернопіль: ТНТУ, 2020. – С. 112–114.
3. Al-Dakkan, K. A. Dynamic Constraint Based Energy Saving Control of Pneumatic Servo Systems [Text] / M. Goldfarb, K. A. Al-Dakkan, E. J. Barth // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – Volume 128. – 2015. – P. 655 - 662.
4. Linnet, J. A. An accurate low-friction pneumatic position control system [Text] / J.A. Linnet, M.C. Smith // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1996. – Vol. 20. – P. 203-208.
5. Fuchsluger, T. Multichamber Actuators for Stepwise Positioning [Text] / T. Fuchsluger, B. Gattringer // Mechatronics. – 2019. – Vol. 59. – P. 55-62.
6. Barth, E. J. Energy-Conscious Control of Pneumatic Actuators [Text] / E.J. Barth, M. Goldfarb // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2008. – Vol. 13, № 3. – P. 418–426.
7. Kim, J. H. Precision Control of Pneumatic Systems Using Dual Valves [Text] / J.H. Kim, D.Y. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26. – P. 2637–2644.
8. Khalil, M. Intelligent Step Control of Pneumatic Drives [Text] / M. Khalil, A. Shukla // Automation in Manufacturing. – 2020. – Vol. 44. – P. 102–110.
9. Rydell, J. Digital Pneumatics for Industry 4.0 Applications [Text] / J. Rydell // Pneumatics Today. – 2021. – Vol. 34. – P. 14–20.
10. Nguyen, T. V. Modeling and Simulation of Pneumatic Actuation Systems [Text] / T.V. Nguyen, L. Smith // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2018. – Vol. 84. – P. 95–108.
11. Ohnishi, K. Hybrid Simulation for Design of Pneumatic Logic Systems [Text] / K. Ohnishi // International Journal of Fluid Power. – 2017. – Vol. 18, № 1. – P. 45–53.

References (transliterated)

1. Lukiniuk, M. Tekhnichni zasoby avtomatyzatsii. Matematychni operatsii na pnevmatychnykh elementakh ta yikh vykorystannia v systemakh keruvannia [Text] / M. Lukiniuk // Visnyk Vinnytskoho politekhnichnoho instytutu. – 2018. – No. 3. – P. 58–63.
2. Kryvynskyi, P. Konstruktorsko-tekhnologichne zabezpechennia pidvyshchennia tochnosti funktsionalnykh rozmiriv vnutrishnikh lanok pryvodnykh rolykovykh lantsiuhoiv [Text] / P. Kryvynskyi, P. Kryvyi // Tezy dopovidei konferentsii «Suchasni napriamky rozvytku mashynobuduvannia ta transportu». – Ternopil: TNTU, 2020. – P. 112–114.
3. Al-Dakkan, K. A. Dynamic Constraint Based Energy Saving Control of Pneumatic Servo Systems [Text] / M. Goldfarb, K. A. Al-Dakkan, E. J. Barth // Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control. – Volume 128. – 2015. – P. 655–662.
4. Linnet, J. A. An accurate low-friction pneumatic position control system [Text] / J.A. Linnet, M.C. Smith // Proc. Inst. Mech. Eng. – 1996. – Vol. 20. – P. 203–208.
5. Fuchsluger, T. Multichamber Actuators for Stepwise Positioning [Text] / T. Fuchsluger, B. Gattringer // Mechatronics. – 2019. – Vol. 59. – P. 55–62.
6. Barth, E. J. Energy-Conscious Control of Pneumatic Actuators [Text] / E.J. Barth, M. Goldfarb // IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. – 2008. – Vol. 13, № 3. – P. 418–426.
7. Kim, J. H. Precision Control of Pneumatic Systems Using Dual Valves [Text] / J.H. Kim, D.Y. Lee // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2012. – Vol. 26. – P. 2637–2644.
8. Khalil, M. Intelligent Step Control of Pneumatic Drives [Text] / M. Khalil, A. Shukla // Automation in Manufacturing. – 2020. – Vol. 44. – P. 102–110.
9. Rydell, J. Digital Pneumatics for Industry 4.0 Applications [Text] / J. Rydell // Pneumatics Today. – 2021. – Vol. 34. – P. 14–20.
10. Nguyen, T. V. Modeling and Simulation of Pneumatic Actuation Systems [Text] / T.V. Nguyen, L. Smith // Simulation Modelling Practice and Theory. – 2018. – Vol. 84. – P. 95–108.
11. Ohnishi, K. Hybrid Simulation for Design of Pneumatic Logic Systems [Text] / K. Ohnishi // International Journal of Fluid Power. – 2017. – Vol. 18, № 1. – P. 45–53.

Надійшла (received) 15.05.2025 р.

Відомості про авторів / About the Authors

Крутіков Геннадій Анатолійович (Hennadii Krutikov) – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри деталей машин і гідропневмосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8695-1605>; e-mail: hennadii.krutikov@khp.edu.ua

Стрижак Мар'яна Георгіївна (Mariana Stryzhak) – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцентка кафедри деталей машин і гідропневмосистем, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3335-4086>; e-mail: mariana.stryzhak@khp.edu.ua

Герасименко Володимир Віталійович (Volodymyr Gerasymenko) кандидат технічних наук, доцент, «Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова», в.о. зав. кафедри цифрового моделювання та графіки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7874-1322>; e-mail: Volodymyr.Gerasymenko@kname.edu.ua

Тимченко Ірина Вікторівна (Iryna Tymchenko) – старший викладач, «Харківський національний університет міського господарства імені О.М. Бекетова», старший викладач кафедри цифрового моделювання та графіки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0003-2131-8165>; e-mail: iryna.tymchenko2@kname.edu.ua

Бєлих Ірина Михайлівна (Iryna Bielykh) – «Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова», старший викладач кафедри цифрового моделювання та графіки, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-9232-9683>, e-mail: Iryna.Bielykh@kname.edu.ua