УДК 62-8 DOI https://doi.org/10.35546/kntu2078-4481.2025.4.1.21

А. В. КАСЬЯН
аспірант кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0008-9820-658X

О. С. ГАЛЕЦЬКИЙ
кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри прикладної гідроаеромеханіки і механотроніки
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0001-5733-5846

РОЗРОБКА СТЕНДУ ДЛЯ ВИПРОБОВУВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОГО ПНЕВМАТИЧНОГО ПОЗИЦІЙНОГО ПРИВОДУ

В даній роботі представлено розробку стенду для дослідження енергоефективного пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневматичного циліндру. Також, проілюстровано приклади конкретних досліджень, що можливо проводити на даному обладнанні. Створення енергоефективного позиційного пневматичного приводу є актуальним через широкий спектр промислових завдань, де застосовуються пневмосистеми. У рамках цього дослідження основна увага приділена розробці та випробуванню реального експериментального стенду, що дозволяє оцінювати характеристики позиційного приводу та спрощувати його подальшу інтеграцію до різних технічних систем.

Методологія дослідження заснована на комплексному описі розробленого стенду для випробування пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. В рамках методології представлена пневматична схема стенду, а також структурна схема, що відображає взаємодію пневматичних елементів з електронними компонентами системи керування, що включає контролер ESP32, розподільні клапани та лазерний датчик переміщення.

Додатково сформульовані процедури проведення експериментів: калібрування датчика, статичні вимірювання положення, динамічні перехідні процеси та випробування під навантаженням. Описано методи реєстрації даних та принципи їх обробки з використанням програмних засобів на Python. Така методична основа забезпечує відтворюваність експериментів та коректність подальшого аналізу результатів.

Результатом виконаної роботи є функціональний експериментальний стенд для дослідження позиційного пневматичного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. Стенд забезпечує відтворювані умови для проведення статичних та динамічних випробувань, включаючи вимірювання переміщення з високою дискретністю, аналіз перехідних процесів та оцінку точності позиціонування за різних режимів подачі повітря.

Отримані експериментальні дані підтверджують можливість досягнення проміжних положень за рахунок регулювання тиску та часових параметрів роботи розподільчих клапанів. Розроблена система може використовуватися для тестування алгоритмів керування, налаштування приводів різних типорозмірів, а також попередньої оцінки характеристик пневматичних систем без необхідності застосування дорогого промислового обладнання.

Ключові слова: *пневматичний позиційний привід; позиціонування; енергоефективний привід; експериментальний стенд; безштоковий циліндр.*

A. V. KASIAN
Postgraduate Student at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
“Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”
ORCID: 0009-0008-9820-658X

© А. В. Касьян, О. С. Галецький, 2025
Стаття поширюється на умовах ліцензії CC BY 4.0

O. S. HALETSKII
Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Applied Hydroaeromechanics
and Mechatronics
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"
ORCID: 0000-0001-5733-5846

DESIGN OF A TEST BENCH FOR EXPERIMENTING WITH AN ENERGY-EFFICIENT PNEUMATIC POSITIONING ACTUATOR

This paper presents the development of a stand for researching an energy-efficient pneumatic position drive based on a rodless pneumatic cylinder. Also, examples of specific experiments that can be carried out on this equipment are illustrated. The creation of an energy-efficient positional pneumatic drive is relevant due to the wide range of industrial tasks where pneumatic systems are used. Within the framework of this research, the main attention is paid to the development and testing of a real experimental stand, which allows evaluating the characteristics of the positional drive and simplifying its further integration into various technical systems.

The research methodology is based on a comprehensive description of the developed stand for testing a pneumatic position drive based on a rodless pneumatic cylinder. The methodology presents a pneumatic diagram of the stand, as well as a structural diagram reflecting the interaction of pneumatic elements with electronic components of the control system, including the ESP32 controller, distribution valves and a laser displacement sensor.

Additionally, the procedures for conducting experiments are formulated: sensor calibration, static position measurements, dynamic transients and tests under load. The methods of data recording and the principles of their processing using Python software are described. Such a methodological basis ensures the reproducibility of experiments and the correctness of further analysis of the results.

The result of the work is a functional experimental stand for studying a positional pneumatic actuator based on a rodless pneumatic cylinder. The stand provides reproducible conditions for conducting static and dynamic tests, including high-resolution displacement measurements, transient analysis, and positioning accuracy assessment under different air supply conditions.

The experimental data obtained confirm the possibility of achieving intermediate positions by adjusting the pressure and time parameters of the distribution valves. The developed system can be used for testing control algorithms, tuning actuators of different sizes, and preliminary assessment of the characteristics of pneumatic systems without the need for expensive industrial equipment.

Key words: *pneumatic positioning actuator; positioning; energy-efficient actuator; experimental test bench; rodless cylinder.*

Постановка проблеми

У промисловості приводи широко застосовуються для автоматизації та точного позиціонування різних механізмів. Найбільш поширеними технологіями залишаються електричні та гідравлічні приводи, що мають високу точність та енергоефективність. Тим не менш, у ряді промислових завдань привабливим варіантом є пневматичний привід завдяки його простоті, надійності та здатності працювати у складних експлуатаційних умовах.

При цьому однією з ключових проблем для широкого впровадження пневматичних систем є труднощі з точним позиціонуванням і контролем руху, а також відносно низька енергоефективність. Ці обмеження пов'язані з нелінійністю пневматичних процесів, стисненням повітря, втратами на тертя та теплопередачу. Для вирішення цих проблем необхідні експериментальні дослідження, що дозволяють детально оцінити поведінку пневматичного приводу та розробити методи управління, що підвищують точність позиціонування та ефективність витрати енергії.

Розробка та випробування спеціалізованого стенду дозволяють проводити такі дослідження у лабораторних умовах, отримувати відтворювані дані та тестувати різні режими роботи приводу, що є важливим кроком для практичного впровадження енергоефективних пневматичних систем у автоматизовані виробничі процеси.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

Системи позиційного приводу займають ключове місце у промисловій автоматизації та залишаються об'єктом активних досліджень, спрямованих на розробку нових методів управління та конструктивних підходів [1]. В останні роки особлива увага приділяється пневматичним приводам, які розглядаються як економічно ефективний та надійний варіант вирішення завдань точного позиціонування [2]. Тим не менш, властиві таким системам нелінійність і складна динаміка суттєво ускладнюють процес управління, що робить необхідним застосування сучасних технологій для підвищення їх точності та стабільності роботи.

В одній із робіт був представлений та перевірений на лабораторному стенді алгоритм керування положенням пневматичного приводу [3]. Експериментальна установка включала подвійну дію циліндр, вимірювальні датчики

та систему реєстрації, що дозволило оцінити поведінку приводу в умовах, близьких до реальних. Результати показали, що запропонований метод здатний підвищувати точність позиціонування, однак автори відзначають обмежену стійкість до зміни навантаження, вплив мертвої зони та чутливість до похибок моделі. Отже, незважаючи на наявність ефективних підходів, існуючі рішення все ще потребують подальшого вдосконалення, особливо з точки зору стабільності та надійності у практичних умовах.

У низці досліджень [4] виконувались експерименти з позиціювання пневмоприводу, а також перевірялися практичні методи підвищення його енергоефективності. На лабораторному стенді використовували одиночний пневмоциліндр з буферним ресивером, швидкодіючими впускними та випускними клапанами, а також датчиками тиску та положення. Реалізовувалися стратегії дозованого подачі повітря та оптимізації моментів перемикання клапанів для більш ефективного використання енергії газу, що розширюється. Отримані результати показали зниження витрати повітря та покращення динаміки зупинки приводу, проте також виявили низку обмежень – чутливість до помилок моделі, вплив тертя, витоків та теплових ефектів, а також зниження ефективності при переході від лабораторних умов до реальних промислових систем.

Подібні стенди також застосовувалися в дослідженнях, присвячених керуванню пневмоприводами з використанням PWM-модуляції та нелінійних методів: пропонувалися гібридні схеми регуляторів [5] та методи ковзного модального керування з урахуванням дискретності клапанів [6]. Такі роботи підкреслюють важливість моделювання динаміки клапанів та оптимізації керуючих сигналів для забезпечення високої точності позиціювання.

Зіставлення результатів щодо позиціювання та енергоефективності показує, що об'єднання експериментальних напрацювань стендових досліджень із сучасними алгоритмами управління (адаптивні/предиктивні схеми, компенсація мертвих зон та шумів) дає реальну перспективу створення пневматичного позиційного приводу з високою енергоефективністю; при цьому залишається завдання підвищення стійкості методів до варіацій навантаження та практичних втрат – саме це і пропонується вирішити у цій роботі.

Формулювання мети дослідження

Метою цього дослідження є розробка та експериментальна перевірка енергоефективного пневматичного позиційного приводу на базі безштокового пневмоциліндра. Дослідження передбачає створення лабораторного стенду, що дозволяє реалізувати та оцінити ефективність алгоритмів керування, спрямованих на оптимізацію витрат стисненого повітря при збереженні високої точності позиціювання.

Викладення основного матеріалу дослідження

Було розроблемно схему експериментального стенду для дослідження функціональних можливостей пневматичного позиційного приводу (рис. 1).

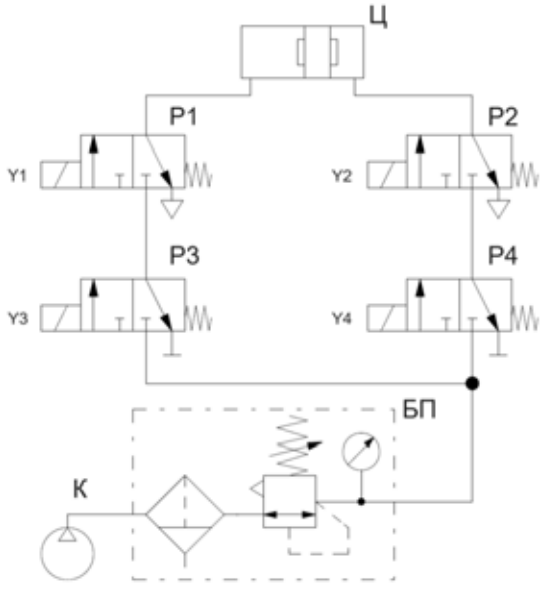

Рис. 1. Пневматична схема стенда для дослідження позиційного пневматичного приводу

Пневматична схема (рис. 1) складається з безштокового пневматичного циліндру Ц, чотирьох трилінійних двопозиційних клапанів з електромагнітним керуванням, блоку підготовки повітря та компресору. Рух циліндру відбувається за рахунок подачі стисненого повітря від компресору К через блок підготовки повітря БП. Тиск в системі регулюється за допомогою клапанів блоці підготовки повітря. Подача та відводу повітря до лівої, реалізовано за допомогою розподільників Р1 та Р3, що послідовно з'єднані. Подача та відвід повітря в праву камеру

виконується за рахунок розподільників Р2 та Р4. Розподільники Р1 та Р2 з'єднані з атмосферою, а Р3 та Р4 для можливості руху вправо та вліво, і зупинки проміжному положенні, за рахунок перекриття подачі повітря та/або замкнення повітря в камерах циліндру.

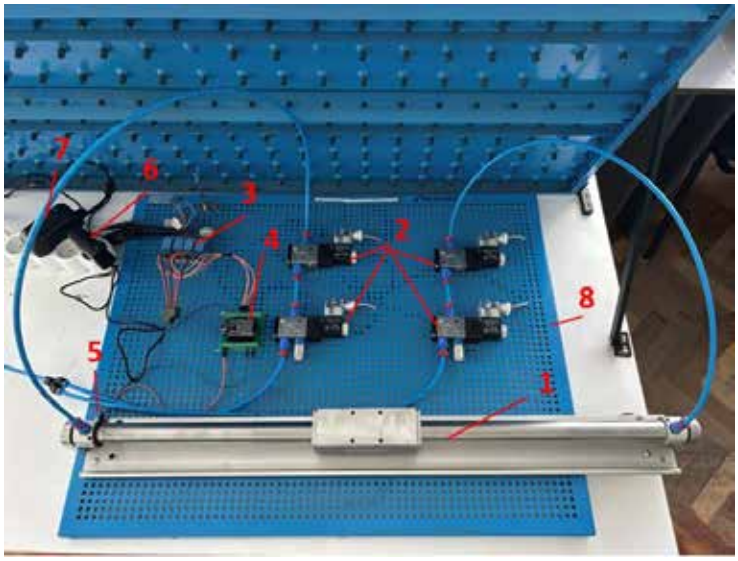

Рис. 2. Стенд для дослідження пневматичного позиційного приводу

На стенді, показаному на рис. 2, розміщено безштоковий пневматичний циліндр (1), під'єднаний до пневматичного розподільника 3/2 з електромагнітним керуванням (2). Для комутації використовується блок релейних модулів на 3.3 В (3), керування якими здійснює мікроконтролер ESP32 (4). Вимірювання переміщення рухомої частини виконується лазерним датчиком відстані VL53L0X (5), результати зчитування з якого передаються безпосередньо до мікроконтролера. Живлення релейних модулів і допоміжної електроніки забезпечує джерело на 3 В, 3 Вт (6), а електромагніти пневморозподільника отримують напругу від окремого блока живлення на 12 В, 36 Вт (7). Усі елементи змонтовані на монтажній плиті (8), а циліндр додатково закріплено гвинтами до столу, щоб унеможливити його зміщення під дією інерційних сил. Релейні модулі, спрацьовуючи, подають напругу на електромагніти розподільника, забезпечуючи зміну напрямку подачі повітря, тоді як програмне забезпечення на Python не лише керує комутацією, а й відображає поточне положення каретки у графічному інтерфейсі.

Для фіксації додаткової маси (рис. 3) використовуються отвори М5 на каретці циліндру, тарована вага притискається болтами.

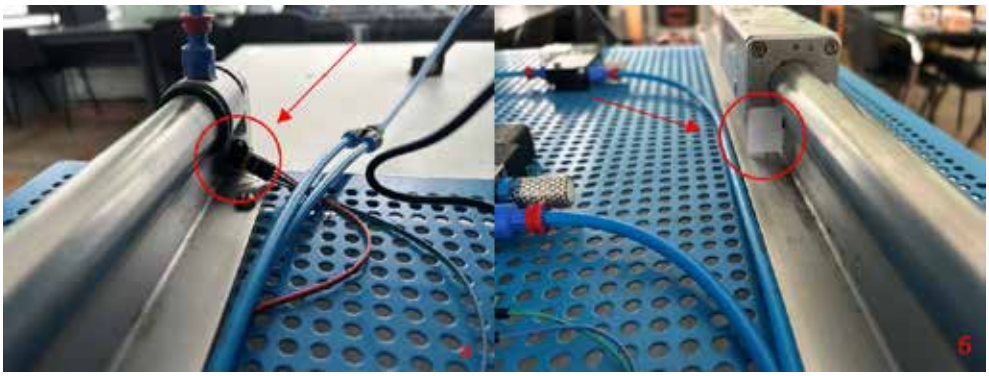

Рис. 3. Кріплення лазерного датчику відстані

На рис. 3 (а) зображено яким чином забезпечується закріплення датчика відстані. Датчик фіксується на корпусі за допомогою клейкої монтажної стрічки, та дроти від датчика зафіксовані на монтажній платформі проволокою, для надійної фіксації та запобіганню зміни позиції датчика, що може вплинути на точність отриманих даних. Для того щоб підвищити точність, поверхня від якої буде відбиватися випромінювання з датчика має бути білою та матовою, тому на каретці було закріплено лист з білого паперу (рис. 3 (б)).

Було проведено підбір та налаштування обладнання.

1. Пневматичнйи безштоковий циліндр FESTO 8715 DF0-25-600 PPV-A

З доступних в наявності циліндрів, було обрано саме цей, тому що він має великій хід, і це є вагомою характеристикою, бо для дослідження позиційного приводу на основі розширення стисненого газу, необхідно мати великій хід, особливо при дослідженні з великим тиском в системі (до 5 бар). Також, для спрощення математичної моделі і можливості реалізації позиціонування з початковим поданням рівного тиску в обидві порожнини – наявність симетричної конструкції значно спрощує реалізацію. Окрім цього, для дослідів з додатковою масою, каретка циліндру має велику кількість отворів з різьбою, це дозволяє легко фіксувати додаткову масу. Циліндр розрахований на 6 бар, має хід 600мм та діаметр 25мм.

2. Пневматичний розподільник 3/2 ANKUK VALVE 3V210-06

Має широкий діапазон робочого тиску 1.5-8 бар, що підходить до характеристик циліндру та дозволяє провести досліди з різними тисками в діапазоні від 1.5 до 5.5 бар. Має різьбу G1/8", що відповідає іншому доступному обладнанню в лабораторії. Магнітна котушка має наступні характеристики:

– Напруга живлення в DC 12V
– Діапазон робочої напруги DC 7.2V – 14.6V
– Потужність: 5W
– Ступінь захисту: IP65
– 100%ED – означає, що клапан може бути постійно увімкнений (режим безперервної роботи)

Можливість безперервної роботи важлива для даної установки, це дозволить безпечно проводити всі заплановані досліди.

3. Блок живлення YS-134 12В 3А 5.5x2.1мм

Для забезпечення живлення 4 магнітів на 12V 5W розрахуємо необхідне значення сили струму

$$I = \frac{P}{U}$$

Домножимо на кількість магнітів

$$I = 4 \cdot \frac{P}{U} = 4 \cdot \frac{5}{12} \approx 1.7A$$

Тож, даного блоку живленян має вистачити з великим запасом по струму і потужності.

4. Розгалужувач живлення Atis L4 (A_DC_L4) 5.5x2.1мм

Для зручного підключення 4 магнітів від одного блоку живлення, було прийнято рішення використати розгалуджувач від одного на чотири виходи.

5. Мікроконтроллер ESP32

Було обрано, так як він має порівняно невелику вартість з подібними аналогами такими як Arduino чи STM, при цьому настільки ж легко для нього писати скрипти, як і під Arduino, використовуючи Arduino IDE, та має в рази кращі характеристики:

– 2 ядра 240 МГц
– RAM 520 КБ
– Пам’ять 4 МБ
– Велика кількість пінів (30 GPIO)
– До 18 аналогових пінів
– 2 набори I2C
– Має вбудований WiFi та Bluetooth модулі

Це дозволяє виділити один процесор на роботу з датчиками, інший – на інтерфейс. Має можливість підключення великої кількості реле та датчиків, це надає можливість легкого масштабування системи за необхідності. Здатний швидко обробляти сигнали, що важливо для точності позиціонування.

6. Модуль реле 3.3V

Для керування 4 магнітами було обрано відповідну кількість релейних модулів на 3.3 вольти, тому що логіка ESP32 працює саме на цій напрузі. Також, треба враховувати важливий нюанс, реле при подачі живлення, якщо сигнал має низький рівень, то воно перемикається. Тобто треба робити інверсію сигналу. Найпростіше робити це програмно. Бо у вимкненому стані, реле мають бути нормально відкриті. Споживає приблизно 70 мА при 3 вольтах. Час спрацювання 10 мс, час відпускання 5 мс.

7. Блок живлення 3V 1A

Для живлення 4 релейних модулів більш надійно та безпечно використовувати окреме джерело живлення замість плати. Розрахуємо необхідне значення струму для блоку живлення:

$$I = 4 \cdot 70 = 280мА$$

Отже, маємо великий запас по струму.

8. Лазерний далекомір TOF400C VL53L1X I2C

Для того щоб отримувати біль точні результати, та швидше їх обробляти, було прийнято рішення використовувати лазерний далекомір TOF400C VL53L1X I2C. Та спершу його треба зафіксувати в правильній позиції, щоб отримувати коректні заміри. Для цього програмним чином, його було налаштовано на довгу відстань, так як хід в циліндру 600мм. Наступним кроком, була його фіксація, в такій позиції, щоб в початковій, та кінцевій позиції значення відстані співпадали з замірами виконаними вручну міліметровою рулеткою. Також, він працює від 3.3 вольти, що є зручним для підключення до ESP32.

9. Плата розширення для ESP32, термінальний адаптер, 30 контактів

Для зручного та надійного підключення дротів до плати, було використано плату розширення, що дозволяє надійно прикрутити та зафіксувати дроти без пайки. Що є важливим для стенду, бо часто буває таке, що треба змінювати схему.

10. Розгалужувач 2 на 12 для з'єднання монтажу проводів

Для підключення живлення від блоку на 3 вольти до всіх реле, було використано розгалуджувач, який дозволяє спростити та пришвидшити підключення дротів без використання пайки. Також, його було використано щоб з’єднати землю блоку живлення і плати для коректної роботи релейних модулів при використанні зовнішнього живлення.

11. Клемник 2 важелі PCT-212

Червоний дріт живлення до магнітів проходить через реле, що дозволяє керувати магнітом за допомогою плати. А синій дріт, для швидкого монтажу, було з’єднано з магнітом через клемник.

12. Монтажна плита FESTO

Для фіксації елементів системи було використано монтажну плиту, яка дозволила сховати дроти, та надійно зафіксувати пневматичну і електричну частини стенду.

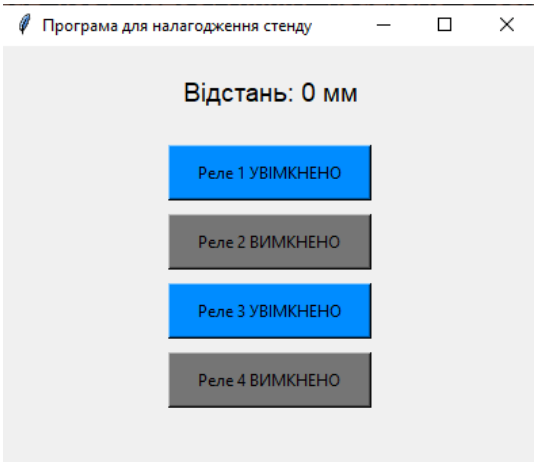

Рис. 4. Програма для налагоджування стенду

Для перевірки роботи стенду та налаштування датчика була створена програма на Python із графічним інтерфейсом та відповідний скрипт для керування мікроконтролером. На рис. 4 показано інтерфейс цієї програми: у верхній частині відображається виміряна відстань, а під нею розташовані кнопки керування кожним реле. У вимкненому стані кнопки сірі та позначені “ВИМКНЕНО”, у ввімкненому – сині з написом “УВІМКНЕНО”. Натиснення кнопки змінює стан відповідного реле та негайно відображається в інтерфейсі, а команди передаються на мікроконтролер через послідовний порт. Дані про відстань, навпаки, надходять від плати до комп’ютера тим самим каналом. Програма використовується для первинного налагодження: перевірки правильності підключення, працездатності елементів та точного позиціонування датчика, зокрема визначення відлікової точки, що відповідає 0 мм.

Додатково було розроблено комп’ютерні програми на Python для проведення дослідів. Декілька прикладів з можливих дослідів: визначення залежності переміщення поршня від часу подачі повітря при різних вхідних тисках; визначення залежності переміщення поршня від часу стравлювання повітря при різних вхідних тисках; визначення точності позиціонування залежно від вхідного тиску. Ці досліди дають змогу оцінити адекватність роботи позиційного приводу та визначити, чи може цей стенд надалі використовуватися для досліджень, пов’язаних із пневматичним позиційним приводом.

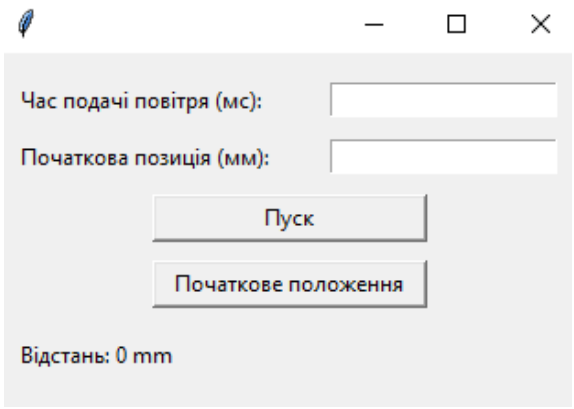

Рис. 5. Програма для проведення досліджень на позиційному пневматичному приводі

Розроблена програма (рис. 5) на Python забезпечує керування стендом і виконання різних експериментів із пневматичним приводом. У графічному інтерфейсі передбачено поле для введення початкового значення датчика, що відповідає нульовому положенню циліндра, а також поле для задання часу подачі або стравлювання повітря залежно від обраного режиму роботи. Поточна відстань, виміряна лазерним датчиком, безперервно відображається у нижній частині вікна програми.

Для керування процесом передбачено дві основні кнопки. Кнопка «Пуск» запускає виконання досліду за встановленими параметрами, надсилаючи на мікроконтролер команди для перемикання електромагнітних клапанів і запуску руху циліндра. Подача повітря припиняється автоматично через заданий час. Кнопка «Початкове положення» використовується для повернення циліндра у вихідну точку, що дає змогу швидко відновити початковий стан перед наступним експериментом, при необхідності. Програма автоматично обмінюється даними з мікроконтролером через послідовний інтерфейс, отримує поточні покази датчика та керує станами виконавчих елементів. Така функціональність дозволяє використовувати одну програму для різних типів досліджень, включаючи позиціонування, аналіз руху під час подачі та стравлювання повітря.

Висновки

Розроблено та побудовано лабораторний стенд на базі безштокового пневмоциліндра для досліджень енергоефективного пневматичного позиційного приводу.

Стенд дозволяє виконувати експерименти, що оцінюють ефективність алгоритмів керування та точність позиціювання при різних режимах подачі та стравлювання повітря.

Використання стенду дає змогу порівнювати експериментальні результати з математичними моделями, перевіряти їх адекватність та сприяє подальшій оптимізації алгоритмів управління пневматичними приводами.

Список використаної літератури

1. Rivin D. E. Design of precision pneumatic drives // Precision Engineering. 1995. Vol. 17, No. 1. P. 25–34. [in English].
2. Al-Mahmoud A., Zaier A. Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller // arXiv preprint. 2023. arXiv:2306.10832. [in English].
3. Qi, H., Bone, G. M., & Zhang, Y. (2019). Position Control of Pneumatic Actuators Using Three-Mode Discrete-Valued Model Predictive Control. Actuators, 8(3), 56. DOI: 10.3390/act8030056
4. Deng, L., Li, Z., Liu, X., & Lu, R. (2022). Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. The Journal of Engineering, 2022, tje2.12000. DOI: 10.1049/tje2.12000
5. Mazare, M.; Taghizadeh, M.; Kazemi, M.G. (2018). Optimal hybrid scheme of dynamic neural network and PID controller based on harmony search algorithm to control a PWM-driven pneumatic actuator position. J. Vib. Control, 24, 3538–3554.
6. Hodgson, S.; Tavakoli, M.; Pham, M.T.; Leleve, A. (2015). Nonlinear discontinuous dynamics averaging and PWM-based sliding mode control of solenoid-valve pneumatic actuators. IEEE/ASME Trans. Mechatron., 20, 876–888.

References

1. Rivin, D. E. (1995). Design of precision pneumatic drives. Precision Engineering, 17(1), 25–34.
2. Al-Mahmoud, A., & Zaier, A. (2023). Pneumatic bellows actuated parallel platform control with adjustable stiffness using a hybrid feed-forward and variable gain I-controller. arXiv preprint arXiv:2306.10832.

3. Qi, H., Bone, G. M., & Zhang, Y. (2019). Position Control of Pneumatic Actuators Using Three-Mode Discrete-Valued Model Predictive Control. Actuators, 8(3), 56. DOI: 10.3390/act8030056

4. Deng, L., Li, Z., Liu, X., & Lu, R. (2022). Energy-saving methods in pneumatic actuator stroke using compressed air. The Journal of Engineering, 2022, tje2.12000. DOI: 10.1049/tje2.12000

5. Mazare, M.; Taghizadeh, M.; Kazemi, M.G. (2018). Optimal hybrid scheme of dynamic neural network and PID controller based on harmony search algorithm to control a PWM-driven pneumatic actuator position. J. Vib. Control, 24, 3538–3554.

6. Hodgson, S.; Tavakoli, M.; Pham, M.T.; Leleve, A. (2015). Nonlinear discontinuous dynamics averaging and PWM-based sliding mode control of solenoid-valve pneumatic actuators. IEEE/ASME Trans. Mechatron., 20, 876–888.

Дата першого надходження рукопису до видання: 27.11.2025
Дата прийнятого до друку рукопису після рецензування: 12.12.2025
Дата публікації: 31.12.2025