

**Роговий А.С., д-р техн. наук, професор**

ORCID 0000-0002-6057-4845

**Стрижак М.Г., доцент**

ORCID 0000-0003-3335-4086

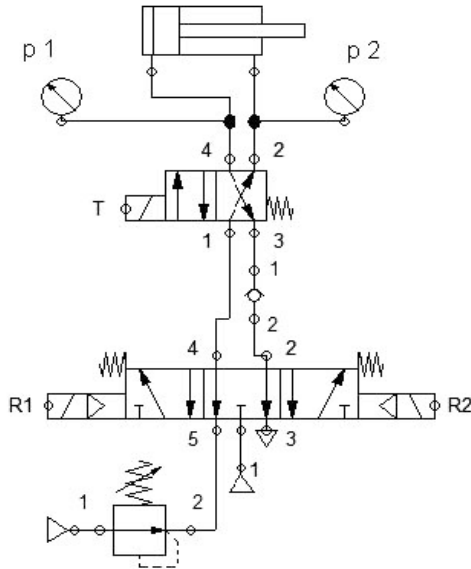
Національний технічний університет  
«Харківський політехнічний інститут»

## **ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ПНЕВМОПРИВОДА**

Пневматичні приводи відіграють ключову роль у сучасних системах автоматизації виробничих процесів, забезпечуючи високу швидкодію, гарну керованість, простоту обслуговування та надійність роботи в умовах забрудненого середовища. Разом із тим, їхнім основним недоліком залишається низький загальний ККД (близько 30%), що зумовлено значними енергетичними втратами під час стискування, транспортування, регулювання та відведення повітря [1]. За даними промислових аудиторських звітів, на забезпечення роботи систем стисненого повітря у виробництві витрачається до 10% загального енергоспоживання, а потенціал енергозбереження є значним і в окремих випадках сягає 80% спожитого повітря, що свідчить про актуальність обраного напрямку досліджень [1, 2].

Одним із найбільш перспективних напрямів енергозбереження є використання змінних комутаційних режимів з рекуперацією відпрацьованого повітря до мережі [2]. Дослідження показують, що локальне обмеження робочого тиску, двоступеневе живлення та адаптивні схеми керування дозволяють зменшити витрати енергії до 40–80%, в залежності від режиму роботи.

У роботі розглянуто пневмопривод зі змінними комутаційними ситуаціями [3, 4, 5], побудований на основі поєднання двох розподільників та редуційного і зворотного клапанів (рисунок 1). Така структура забезпечує не лише можливість керування фазами руху, але й повернення частини стисненого повітря в мережу, що дозволяє зменшити загальне енергоспоживання.



*Рисунок 1 – Схема пневмосистеми з можливістю реалізації режиму рекуперації енергії*

Метою роботи є підвищення енергоефективності пневмопривода шляхом збільшення тривалості режиму рекуперації та вибору оптимального діаметра виконавчого механізму.

Для досягнення поставленої мети були визначені наступні завдання:

- розробити математичну модель робочого процесу;
- визначити недоліки базового режиму роботи привода;
- сформулювати оптимізаційну задачу і знайти її розв’язання за допомогою метаевристичного алгоритму;
- створити та верифікувати CFD-модель пневмопривода у ANSYS;
- оцінити енергетичні показники системи за отриманими перехідними процесами.

В результаті вирішення поставлених завдань була отримана математична модель, що описує стиснене повітря у камерах циліндра як тіло змінної маси, використовуючи припущення про ізотермічність процесів та ідеальність газу. Перехід між докритичним і надкритичним режимами враховано за допомогою введення витратної функції,

що дає можливість точно описати роботу дроселюючих елементів. Отримано алгоритм зміни фаз руху, за яким методом Рунге-Кутта розраховано перехідні процеси за тисками у робочій та вихлопній камерах, швидкістю та переміщенням поршня.

Аналіз перехідних характеристик базового режиму показав, що тривалість процесу рекуперації становить лише 6,5% робочого напівциклу; тиск у робочій камері вирівнюється з тиском редукційного клапана значно раніше, ніж завершується гальмування, що свідчить про неповне використання потенційної енергії повітря; присутня неточність позиціонування.

З метою усунення зазначених недоліків задачу оптимізації сформульовано як мінімізацію спеціальної цільової функції, що поєднує критерій максимізації тривалості процесу рекуперації та термінальні умови досягнення кінцевої точки ходу. Для пошуку глобального мінімуму використано багатоагентний алгоритм VCT-PSO. Оптимальні координати гальмування дозволили збільшити тривалість рекуперації у 2,8 рази – до 18,1% тривалості циклу – без зміни загального часу спрацювання. При цьому кінцева швидкість поршня стала наближено нульовою, а задана фінальна позиція досягнута з високою точністю.

Побудовано CFD-модель пневмоциліндра у ANSYS Fluent, на основі якої отримано перехідні характеристики за тисками і температурою у камерах циліндра із врахуванням тепло масообміну та стисливості робочого середовища, які добре узгоджуються з експериментом. Дані, визначені на основі CFD-аналізу, дозволили точно розрахувати температуру, тиск та масову витрату повітря у камерах циліндра, що забезпечило точний розрахунок енергетичного балансу привода.

За отриманими з CFD-моделі перехідними процесами визначено спожиту та рекуперовану енергію, корисну роботу, зміну внутрішньої енергії повітря та ексергійні втрати. Під час оптимізованого циклу частка рекуперованої енергії зросла суттєво, а загальний ККД робочого циклу досяг 67%, що більш ніж удвічі перевищує типовий рівень для промислових пневмоприводів. Отриманий результат підтверджує переваги CFD-аналізу пневмосистем на етапі проєктування.

**Висновки.** Запропоновано комплексну методику оптимізації пневмопривода, що поєднує одномірне моделювання та CFD-аналіз, що дозволило точно описати нестационарні термодинамічні процеси у камерах циліндра.

Оптимізація координат гальмування збільшила тривалість рекуперації у 2,8 рази, забезпечила плавне гальмування та досягнення кінцевої точки ходу поршня.

CFD-модель дала змогу визначити реальний тиск у камерах циліндра та масові витрати робочого середовища, значення яких неможливо отримати з одномірних моделей. Це, в свою чергу, дозволило точніше розрахувати кількість рекуперованого в мережу повітря та ККД пневмопривода.

Підвищення частки рекуперації енергії у загальному балансі енергоспоживання забезпечило збільшення ККД циклу до 67%, що підтверджує високу енергоефективність запропонованої стратегії керування та конструкції привода.

### **Список використаних джерел**

1. Radgen, P., & Blaustein, E., «Compressed Air Systems in the European Union: Energy, Emissions, Savings Potential and Policy Actions», Stuttgart: Fraunhofer Institute for Systems Technology and Innovation», 2001.

2. Festo AG & Co. KG, «Energy Efficiency in Production in the Drive and Handling Technology Field (EnEffAH)», Final Report No. 0327484A–E, 2012.

3. Krytikov G., Stryzhak M., Stryzhak V., «The synthesis of structure and parameters of energy efficient pneumatic actuator», Eastern–European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 1/7(85), p. 38–47, 2017.

4. Krutikov, G., Stryzhak, M., «Assessment of the Influence of Design Parameters of a Pneumatic Drive on the Energy Efficiency of the Working Process», Problems of the Regional Energetics, Vol. 2–66, p. 190–204, 2025.

5. Strizhak, M., Rogovyi, A., Iglin, S., «Optimization of Braking Phase Coordinates for Energy-Efficient Operation of Pneumatic Systems», Problems of the Regional Energetics, Vol. 3–67, p. 125–140, 2025.