

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютерно-інтегрованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення віртуальної моделі пневматичних елементів автоматизованої

системи управління виробничою лінією

(тема)

Виконав:

здобувач 4 року навчання,

групи АКТАКІТ-21-3

Андрій ТАРАСОВ

(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 – Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології

(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та

комп'ютерно-інтегровані технології

(повна назва освітньої програми)

Керівник доц. Оксана СИЧОВА

(посада, власне ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри КІТАР

(підпис)

Ігор НЕВЛЮДОВ

(власне ім'я, прізвище)

20 25 р.

Я, Тарасов Андрій Андрійович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

"06" червня 2025 р.



Андрій ТАРАСОВ

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютерно-інтегрованих технологій

Кафедра Комп'ютерно-інтегровані технології, автоматизація та робототехніка

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри _____

(підпис)

«06» _____ червня 20__25 р.

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Тарасову Андрію Андрійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення віртуальної моделі пневматичних елементів автоматизованої системи управління виробничою лінією

Затверджена наказом університету від 19 травня 20__25р. № 390

2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 24 червня 20__25 р.

3. Вихідні дані: Пневматичний регулятор тиску прямої дії, пневматичний циліндр двосторонньої дії, пневматичний розподільник 5/2, фільтр-вологомасловідділювач витратою 60 л/хв та має дві позиції.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі: Вступ. Дослідження принципів роботи пневматичних систем та аналіз конструкції основних пневматичних елементів. Вибір програмного інструменту і середовища для створення віртуальних моделей пневматичних елементів. Розроблення динамічних моделей для візуалізації функціонування основних компонентів системи. Формування структурної схеми автоматизованої пневматичної системи керування виробничою лінією. Проведення експериментальних досліджень і тестування розробленої автоматизованої пневматичної системи. Аналіз і дослідження перехідних процесів у створеній системі. Вирішення питань охорони праці на виробництві. Висновки. Додатки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри)

Графічний матеріал у вигляді презентації у форматі pptx. (15 сторінок).

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Строк / терміни виконання етапів роботи	Примітка
1.	Аналіз публікацій та патентний пошук за темою роботи	28.04.2025 – 30.04.2025	Виконано
2	Обґрунтування актуальності роботи визначення мети, предмету та об'єкту розробки	01.05.2025 – 07.05.2025	виконано
3	Аналіз систем автоматизації виробничих процесів (переваги використання пневматики в автоматизованих системах)	08.05.2025 – 14.05.2025	виконано
4	Вибір інструментів та середовища розробки	15.05.2025 – 18.05.2025	виконано
5	Алгоритм роботи пневматичних елементів у системі	19.05.2025 – 24.05.2025	виконано
6	Реалізація моделей для візуалізації роботи пневматичних елементів	25.05.2025 – 31.05.2025	виконано
7	Оформлення пояснювальної записки	31.05.2025 – 04.06.2025	виконано
8	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом StrikePlagiarism	05.06.2025 – 10.06.2025	виконано
9	Подання роботи на рецензію	11.06.2025 – 16.06.2025	виконано
10	Подання роботи на підпис зав. кафедри	17.06.2025 – 21.06.2025	виконано
11	Подання роботи в ЕК	22.06.2025 – 26.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28 квітня 2025 р.

Здобувач _____ (підпис) Андрій ТАРАСОВ (посада, власне ім'я, прізвище)

Керівник роботи _____ (підпис) доц. Оксана СИЧОВА (посада, власне ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 87 с., 10 таб., 25 рис., 2 дод., 16 джерел.

3D-МОДЕЛЮВАННЯ, BLENDER, FLUIDSIM, ПНЕВМАТИЧНІ СИСТЕМИ, ПНЕВМОЦИЛІНДР, ПНЕВМОРОЗПОДІЛЬНИК, ВОЛОГО-МАСЛОВІДДІЛЮВАЧ, РЕГУЛЯТОР ТИСКУ, INDUSTRY 4.0, ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК, PID-РЕГУЛЯТОР-

Об'єкт розробки – процеси автоматизованого керування виробничими лініями з використанням пневматичних систем.

Предмет розробки – методи та засоби побудови віртуальних моделей пневматичних елементів для дослідження їх принципів роботи.

Метою даної роботи є підвищення ефективності навчання в галузі пневмоавтоматики шляхом впровадження в освітній процес віртуальної моделі пневматичних елементів автоматизованої системи управління виробничою лінією та візуалізації принципів їх роботи й аналізу функціонування основних компонентів.

У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено детальний аналіз сучасних систем автоматизації виробничих процесів, зокрема електричних, гідравлічних і пневматичних приводів. Розглянуто їхню будову, принципи роботи, сфери застосування, а також переваги й недоліки.

У другому розділі було здійснено розробку тривимірних моделей основних пневматичних елементів – циліндра, регулятора тиску, вологомасловідділювача та розподільника – у програмному середовищі Blender. Детально описано вибір інструментів моделювання, побудову геометрії, текстурування, налаштування матеріалів і реалізацію анімації, що відображає принципи роботи пристроїв.

Результатом стала серія візуалізацій, які дозволяють ефективно демонструвати функціонування пневматичних систем, що є цінним як для навчальних цілей, так і для технічного аналізу та презентацій у сфері автоматизації виробничих процесів.

У третьому розділі було здійснено повний цикл розробки автоматизованої пневматичної системи управління для виробничої лінії. Було побудовано структурну схему, яка охоплює всі основні елементи пневмоприводу, регуляторами тиску, пневморозподільниками та виконавчим циліндром. Особливу увагу приділено інтеграції ПІД-регулятора, для якого виконано математичне моделювання, розрахунок динамічних характеристик та порівняння ефективності системи з і без регулювання.

У четвертому розділі представлено експериментальні дослідження, зокрема візуалізацію роботи та тестування побудованої пневматичної автоматизованої системи у середовищі FluidSim. Проведено симуляційне моделювання повного робочого циклу – від запуску до повернення у вихідне положення – з урахуванням роботи всіх ключових компонентів. Завдяки впровадженню ПІД-регулятора досягнуто високої точності позиціонування, стабільної динаміки та усунення статичної похибки, що підтверджує ефективність запропонованих технічних рішень.

У результаті роботи розроблено віртуальні двійники пневматичних компонентів, таких як пневмоциліндр, пневморозподільник, регулятор тиску, вологомасловідділювач з використанням 3D-моделювання та програмного середовища FluidSim. На основі цих моделей створено електропневматичну систему з ПІД-регулюванням, яка пройшла симуляційне тестування. Результати показали стабільну роботу без коливань і пневмоударів, зменшення часу усталення на 64 %, обмеження перерегулювання та усунення статичної похибки. Створені моделі мають практичне значення для навчання, прототипування та впровадження в автоматизовані виробничі процеси.

ABSTRACT

Explanatory note: 87 p., 10 tables, 25 figures, 2 app., 16 sources.

3D MODELING, BLENDER, FLUIDSIM, PNEUMATIC SYSTEMS, PNEUMATIC CYLINDER, PNEUMATIC DISTRIBUTOR, AIR-OIL SEPARATOR, PRESSURE REGULATOR, INDUSTRY 4.0, DIGITAL TWIN, PID CONTROLLER.

Object of development – processes of automated control of production lines using pneumatic systems.

Subject of development – methods and tools for constructing virtual models of pneumatic elements to investigate their operating principles.

The goal of this work is to improve the effectiveness of training in the field of pneumatic automation by introducing virtual models of pneumatic elements of an automated production line control system into the educational process, as well as visualizing their operating principles and analyzing the performance of key components.

Chapter 1 provides a detailed analysis of modern industrial automation systems, particularly electric, hydraulic, and pneumatic drives. Their structure, operating principles, application areas, advantages, and disadvantages are considered.

Chapter 2 presents the development of 3D models of key pneumatic components – cylinder, pressure regulator, air-oil separator, and distributor – in Blender. The modeling tool selection, geometry construction, texturing, material setup, and animation illustrating device operation are described. The result is a set of visualizations that effectively demonstrate pneumatic system functions, valuable for both educational and technical analysis purposes.

Chapter 3 covers the full development cycle of an automated pneumatic control system for a production line. A structural diagram including all main pneumatic drive elements – dampers, pressure regulators, valves, and actuating cylinder – was built.

Special attention was given to the integration of a PID controller, with mathematical modeling, dynamic characteristic calculations, and a performance comparison with and without regulation.

Chapter 4 presents experimental research, including visualization and testing of the developed pneumatic automated system in FluidSim. A complete simulation of the operating cycle – from start to return to initial position – was conducted, accounting for all key components. The implementation of the PID controller achieved high positioning accuracy, stable dynamics, and elimination of steady-state error, confirming the effectiveness of the proposed technical solutions.

Conclusion: as a result of the work, digital twins of pneumatic components such as a pneumatic cylinder, directional control valve, pressure regulator, and air-oil separator were developed using 3D modeling and the FluidSim software environment. based on these models, an electro-pneumatic system with PID control was created and tested through simulation. the results showed stable operation without oscillations or water hammer, a 64% reduction in settling time, limited overshoot, and elimination of steady-state error. the developed models have practical value for education, prototyping, and implementation in automated production processes.

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	11
Вступ	12
1 Аналіз сучасних пневматичних елементів і технологій	14
1.1 Аналіз систем автоматизації виробничих процесів	14
1.2 Основні пневматичні елементи автоматизованої системи управління виробничою лінією	19
1.3 Аналіз конструкції і принципів роботи пневматичних елементів.....	28
2 Розробка моделей для візуалізації принципів роботи пневматичних елементів	36
2.1 Вибір інструментів та середовища розробки.....	36
2.2 Реалізація моделей для візуалізації роботи пневматичних елементів	44
2.2.1 Моделювання пневматичного циліндру	44
2.2.2 Моделювання пневматичного регулятора тиску	47
2.2.3 Моделювання вологомасловідділювача.....	49
2.2.4 Моделювання пневматичного розподільника	51
3 Розробка автоматизованої пневматичної системи управління виробничою лінією.....	55
3.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи	55
3.2 Розрахунок параметрів під-регулятора для автоматизованого керування ходом поршня пневмоциліндра	56
4 Експериментальні дослідження.....	64
4.1 Візуалізація роботи та тестування побудованої пневматичної автоматизованої системи.....	64
4.2 Моделювання перехідних характеристик	70
4.3 Охорона праці.....	73
Висновок	76
Перелік джерел посилання:.....	77

Додаток А Апробація результатів	80
Додаток Б Демонстраційний матеріал	86

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

ПЛК – програмований логічний контролер;
ПІД – пропорціонально-інтегрально-диференціальний регулятор;
ЧПК – числове програмне керування;
3D – тривимірний;
API – інтерфейс програмування застосунків;
AR – доповнена реальність;
CNC – Computer Numerical Control;
CPU – центральний процесор;
DCS – Distributed Control System;
FBX – формат обміну 3D-даними;
FPS – кадрів за секунду;
GPU – графічний процесор;
H.264 – стандарт кодування відео;
MP4 – формат контейнера;
NLA – нелінійна анімація;
NURBS – нерівномірні раціональні B-сплайни;
OBJ – формат обміну 3D-геометрією;
SCADA – Supervisory Control And Data Acquisition;
STL – стереолітографічний формат;
UV – координати текстурування;
VR – віртуальна реальність.

ВСТУП

Активний розвиток цифрових технологій у поєднанні з посиленням глобальної конкуренції зумовлює перехід провідних промислових підприємств від локальної механізації до комплексної автоматизації, що охоплює всі стадії життєвого циклу продукції. У цьому процесі пневматичні системи відіграють ключову роль, оскільки поєднують високу швидкість, конструкційну простоту, безпеку експлуатації та економічну доцільність. Актуальний вектор розвитку виробництва, зорієнтований на принципи Індустрії 4.0, підвищення енергоефективності та дотримання екологічних вимог, висуває нові умови до пневматики, стимулюючи впровадження інтелектуальних компонентів із підтримкою технологій інтернету, речей та рішень зі зниженим споживанням енергії.

Водночас усе більшого значення набувають методи цифрового моделювання, що дозволяють аналізувати роботу пневматичних елементів без втручання у реальне обладнання, скорочуючи часові й ресурсні витрати та підвищуючи точність інженерних розрахунків.

Зміщення акценту на віртуальне відтворення процесів відкриває нові можливості для поглибленого дослідження динаміки систем, їх оптимізації та інтеграції у гнучкі виробничі середовища.

Об'єкт розробки – процеси автоматизованого керування виробничими лініями з використанням пневматичних систем.

Предмет розробки – методи та засоби побудови віртуальних моделей пневматичних елементів для дослідження їх принципів роботи.

Метою даної роботи є підвищення ефективності навчання в галузі пневмоавтоматики шляхом впровадження в освітній процес віртуальної моделі пневматичних елементів автоматизованої системи управління виробничою лінією

та візуалізації принципів їх роботи й аналізу функціонування основних компонентів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз систем автоматизації виробничих процесів;
- дослідити принципи роботи пневматичних систем й будову пневматичних елементів;
- обрати програмний інструмент та середовище розробки віртуальних моделей пневматичних елементів;
- розробити динамічні моделі для візуалізації роботи основних пневматичних елементів;
- розробити структурну схему автоматизованої пневматичної системи управління виробничою лінією;
- провести експериментальні дослідження та тестування побудованої пневматичної автоматизованої системи;
- дослідити перехідні процеси в розробленій пневматичній системі;
- вирішити завдання з охорони праці на виробництві;
- підготувати та оформити кваліфікаційну роботу відповідно до вимог ДСТУ 3008:2015 [1] і методичних вказівок із підготовки та оформлення кваліфікаційних робіт здобувачів першого (бакалаврського) рівня спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [2].

1 АНАЛІЗ СУЧАСНИХ ПНЕВМАТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ І ТЕХНОЛОГІЙ

1.1 Аналіз систем автоматизації виробничих процесів

Сучасне промислове виробництво неможливе без застосування систем автоматизації, які підвищують ефективність, точність і безпеку технологічних процесів. Автоматизовані системи управління забезпечують контроль і виконання операцій без безпосереднього втручання людини, що особливо важливо при масовому випуску продукції зі стабільною якістю. До основних типів приводів у таких системах належать електричні, гідравлічні та пневматичні, кожен з яких має свої особливості та сферу оптимального застосування [3].

Електричні системи автоматизації ґрунтуються на використанні енергії електричного струму як рушійної сили для дії виконавчих механізмів. Основу таких систем становлять електродвигуни змінного або постійного струму, серводвигуни з високою точністю керування, а також крокові двигуни, що дозволяють реалізувати дискретні переміщення з фіксованим кроком. Окрім того, застосовуються електромагнітні соленоїди для лінійного руху, датчики положення для забезпечення зворотного зв'язку, а також програмовані логічні контролери (ПЛК), що координують дії системи згідно з заданим алгоритмом. В основі функціонування таких систем лежить принцип перетворення електричної енергії в механічну, зокрема через обертання вала електродвигуна або реалізацію поступального руху з використанням механічних передач.

Ці приводи використовуються в широкому спектрі галузей: від високотехнологічних виробництв, таких як робототехніка, до промислових автоматизованих ліній, зокрема верстатів з числовим програмним керуванням (ЧПК). На збиральних лініях у сфері автомобілебудування більшість роботизованих маніпуляторів обладнані електродвигунами, що дає змогу досягати

високої точності та стабільності траєкторій руху, що особливо важливо на етапах зварювання, фарбування і монтажу. Електроприводи, крім того, демонструють вражаючу масштабованість – від мікроприводів у мікромеханіці та медичних пристроях до потужних виконавчих систем, які здатні розвивати зусилля в десятки тонн. Така універсальність зумовлена гнучким програмним налаштуванням і високою керованістю, що забезпечує мінімальні похибки при повторенні рухів.

Ефективність сучасних електроприводів значною мірою визначається високою динамікою їхньої роботи: завдяки низькій інерційності ротора вдається досягти значних частот обертання, що прямо впливає на продуктивність технологічного процесу. Крім того, на відміну від гідравлічних систем, електричні не потребують робочої рідини, що виключає можливість витоків або забруднення середовища, роблячи їх оптимальними для чистих виробництв – наприклад, у фармацевтичній чи харчовій промисловості. Відсутність витрат на заміну рідин та фільтрацію також знижує експлуатаційні витрати та покращує екологічні характеристики систем.

Інтеграція електроприводів у системи керування сучасних промислових об'єктів реалізується через використання мережевих протоколів і можливостей зворотного зв'язку в реальному часі. Це відповідає концепціям Industry 4.0, у межах якої велике значення надається дистанційному моніторингу, діагностиці стану обладнання, а також реалізації предиктивного обслуговування для зменшення кількості аварійних ситуацій. До додаткових переваг таких систем можна віднести низький рівень шуму під час роботи, що є критично важливим для покращення умов праці порівняно з гідравлічними та пневматичними аналогами.

Однак, незважаючи на численні переваги, електричні системи автоматизації не позбавлені обмежень. Зокрема, висока вартість обладнання, особливо у випадку серводвигунів з розширеною функціональністю, створює суттєве навантаження на бюджети підприємств. Крім того, висока чутливість до зовнішніх факторів, таких як пил, волога або екстремальні температури, потребує спеціального захисту або

навіть вибухозахищеного виконання в окремих галузях. Не менш важливим є фактор обслуговування: у разі несправності потрібне втручання висококваліфікованих технічних спеціалістів, а самі збої можуть призвести до тривалих простоїв виробництва, що завдає додаткових збитків. Високі вимоги до якості електроживлення спонукають до використання резервних джерел живлення або систем аварійного завершення циклів.

Гідравлічні системи автоматизації реалізують передавання енергії через стиснуту рідину, найчастіше – гідравлічну оливу, що забезпечує рух виконавчих механізмів під впливом тиску. Основними складовими таких систем є гідравлічний насос, що нагнітає рідину з резервуара, гідролінії для її транспортування, розподільчі та регулюючі клапани, які управляють напрямом і інтенсивністю потоку, а також гідроциліндри або гідромотори, котрі перетворюють гідравлічну енергію на лінійний або обертальний рух.

Гідравліка вирізняється здатністю створювати величезні зусилля, що обумовлено роботою при високих тисках, часто в діапазоні 1–6,4 МПа. Це робить її незамінною в обладнанні, що потребує значного тиску: гідравлічні преси, металургійні комплекси, формувальні станції. Перевагою систем є практично нестислива рідина, яка забезпечує високий коефіцієнт жорсткості, дозволяючи зберігати точність переміщення навіть під значним навантаженням. Гідроакумулятори виступають буферами енергії, вирівнюючи пікові навантаження. Компактність насосно-клапанної апаратури сприяє мобільності системи та її встановленню в обмежених просторових умовах.

Проте гідравлічні приводи мають низку недоліків. По-перше, вони є джерелами забруднення через можливі витіки масла, що особливо критично в харчовій та медичній промисловості. По-друге, вони потребують регулярного технічного обслуговування, включаючи перевірку герметичності, заміну рідин і фільтрів. Додаткові ускладнення пов'язані з шумом, що виникає внаслідок роботи насосів і переміщення рідини трубопроводами. Через в'язкість рідини виникає

також інерційність, яка знижує динамічні характеристики системи, роблячи її менш придатною для високошвидкісних процесів.

Пневматичні системи, на відміну від гідравлічних, використовують як робоче середовище стиснене повітря, що значно полегшує конструкцію та знижує ризики екологічного забруднення. Вони складаються з компресора, ресивера, системи підготовки повітря, розподільчих клапанів і пневмоциліндрів. Основні переваги пневматики полягають у простоті конструкції, безпечності та високій швидкодії, що дозволяє використовувати ці системи на пакувальних, фармацевтичних та вибухобезпечних виробництвах.

У таблиці 1.1 зведено порівняння електричних, гідравлічних та пневматичних систем автоматизації за основними критеріями.

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика систем автоматизації за критеріями

Критерій	Електричні системи	Гідравлічні системи	Пневматичні системи
Енергетичне середовище	Електричний струм (електромагнітна енергія)	Стиснена рідина (гідравлічна олива або емульсія)	Стиснене повітря (газ)
Типові виконавчі пристрої	Електродвигуни (обертові, лінійні), соленоїди, електромеханічні приводи	Гідроциліндри, гідромотори, золотникові клапани	Пневмоциліндри, пневмодвигуни, пневмоклапани
Максимальна сила (навантаження)	Висока (залежить від потужності двигуна і передачі; масштабування до десятків тонн)	Найвища (оптимальні для дуже великих навантажень, сотні тонн)	Середня (обмежена тиском ~0,5–0,8 МПа; великі сили малоефективні)
Швидкість реакції (динаміка)	Висока (швидке електронне керування, мінімальна затримка)	Середня (обмежена інерцією рідини і масою компонентів)	Дуже висока (швидке наповнення/випуск циліндрів, мінімальна інерція)
Точність і плавність руху	Дуже висока точність, плавне регулювання швидкості та положення	Висока точність з сервоклапанами; без них – помірна, рух відносно плавний	Обмежена точність через стисливість; потрібні демпфери для плавності

Продовження таблиці 1.1

Критерій	Електричні системи	Гідравлічні системи	Пневматичні системи
Умови середовища, безпека	Потребує електроживлення; можливі іскри, потребує захисту у вибухонебезпечних зонах	Ризик витоку горючої оливи; небезпека пожежі при пошкодженнях; працює при високому тиску	Пожежо- та вибухобезпечна; робоче середовище нетоксичне, викид повітря не шкодить довкіллю
Технічне обслуговування	Складне (періодичний огляд, заміна щіток, охолодження)	Складне (контроль герметичності, заміна масла, фільтрація, ремонт насоса та клапанів)	Помірне (контроль компресора, фільтрів; мінімізація конденсату; зношення ущільнень)
Вартість та економічність	Висока початкова вартість; ефективність висока, якщо правильно спроектовано	Середня/висока вартість; ефективність добра при постійному навантаженні, втрати на витоках	Невисока початкова вартість; витрати на енергію залежать від режиму (компресор постійно споживає енергію)
Типові сфери застосування	Точне позиціонування, роботи, маніпулятори, транспортні системи, верстати, автоматизовані лінії складання електроніки	Важка техніка, пресове обладнання, металургія, будівництво, авіація (де потрібні великі зусилля)	Автоматизовані виробничі лінії, пневмоінструмент, системи подачі матеріалів, машини з циклічними операціями, клапани в трубопроводах

Таким чином згідно аналізу трьох основних типів приводів – електричних, гідравлічних і пневматичних – можна зробити висновок, що пневматичні системи мають низку важливих переваг, які роблять їх особливо зручними у певних сферах промисловості.

Пневматика використовує стиснене повітря, яке є безпечним, нетоксичним і не забруднює навколишнє середовище навіть у разі витоку. Це особливо важливо у харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості, де неприпустимі будь-які забруднення. Крім того, пневматичні системи прості у конструкції, легкі та надійні в роботі. Їхня головна перевага – це дуже швидка реакція на команди, що дозволяє ефективно використовувати їх у системах з частими й короткими циклами роботи, наприклад, у пакувальному обладнанні або на автоматизованих лініях.

Хоча пневматика не забезпечує такої сили чи точності, як гідравліка або електроприводи, у багатьох випадках цього просто не потрібно. У завданнях середньої складності, де важлива швидкість, безпека й надійність, пневматичні системи цілком задовольняють вимоги.

Порівняно з гідравлічними приводами, пневматичні не мають проблем із витокami масла, не потребують складного технічного обслуговування та краще працюють у чистих приміщеннях. А в порівнянні з електроприводами, вони є дешевшими у реалізації, хоч і менш точними.

Отже, пневматичні системи є найкращим вибором у випадках, коли важливі швидкодія, простота, безпечність і чистота процесу. Вони ідеально підходять для легких і середніх виробничих операцій, де не потрібно великої сили чи надвисокої точності.

1.2 Основні пневматичні елементи автоматизованої системи управління виробничою лінією

Пневматична система – це набір взаємопов'язаних компонентів, які використовують стиснене повітря для роботи автоматизованого обладнання. Приклади можна знайти в промисловому виробництві, домашньому гаражі чи кабінеті стоматолога. Ця робота виконується у вигляді лінійного або обертального руху. Стиснене повітря або газ під тиском зазвичай фільтрують і сушать, щоб захистити циліндри, приводи, інструменти та міхури, що виконують роботу. Для деяких застосувань потрібен пристрій для змашування, який додає масляний туман до закритої системи під тиском [4].

Пневматика – це використання енергії стислого газу для генерації, передачі та контролю механічної роботи. Зазвичай застосовують повітря, стискаючи його до тиску 0,4 – 0,8 МПа (4 – 8 бар).

На початкових етапах розвитку автоматизації основна увага приділялася нафтовій та хімічній промисловості. У цих галузях працювали з небезпечними речовинами, тому вимірювальні й контрольні системи мали бути максимально безпечними – зокрема, іскробезпечними. У такому середовищі пневматичні системи виявилися особливо ефективними. Після розробки системи заслінка/форсунка разом із пневматичним підсилювачем стало можливим точно фіксувати навіть незначні переміщення. Згодом з'явилися датчики для вимірювання температури, тиску, витрат, рівня та щільності. На основі цих технологій були створені пневматичні пристрої для реалізації функцій управління, а для керування виконавчими механізмами розробили пневмоциліндри та мембранні двигуни.

Пневматичні системи легко забезпечують іскробезпеку, тому їх широко застосовують для віддаленого розміщення датчиків і виконавчих механізмів. З появою електронних і цифрових приладів у багатьох випадках віддають перевагу новим рішенням, однак у найагресивніших виробничих середовищах пневматика залишається незамінною. Крім того, пневматичні компоненти безперервно інтегрують із комп'ютерними системами керування за допомогою перетворювачів P/I і P/E та технології Scanivalves [5].

Пневматичні системи мали додаткові переваги в тому, що встановлення не вимагало спеціальних навичок, обладнання чи матеріалів. Резервуари, які зазвичай призначені для згладжування пульсацій повітряного компресора, також зберігали значний об'єм стисненого повітря, який у разі відмови компресора зберігав достатню кількість енергії, щоб дозволити системі керування залишатися в роботі до тих пір, поки не буде реалізовано впорядковане відключення.

Робота пневматичної системи розпочинається з подачі атмосферного повітря через фільтр, що видаляє пил та забруднення, забезпечуючи чистоту подачі. Далі повітря втягує компресор, приводом від двигуна, і стискає його до необхідного робочого тиску. Стиснуте повітря проходить через охолоджувач для зниження

температури, після чого надходить у ресивер, де накопичується й забезпечує стабільну подачу. Реле контролює тиск у системі й спрацьовує при досягненні встановленого рівня, підтримуючи безпечні та оптимальні умови роботи. Далі повітря проходить через клапан, який задає напрямок руху, і потрапляє у виконавчий механізм – наприклад, у пневмоциліндр. Там енергія стисненого повітря перетворюється на механічний рух. Після завершення роботи відпрацьоване повітря виводиться в атмосферу, і система готова до наступного циклу.

Один із ключових виконавчих елементів пневматичної системи, що безпосередньо перетворює енергію стислого повітря на механічну роботу, є пневматичні циліндри. На рис. 1.1 наведені пневматичні циліндри: пневмоциліндр компанії Festo модель DSBC (рис. 1.1, а) [6] та пневмоциліндр компанії Camozzi серії 60 (рис. 1.1, б) [7]. Пневматичні циліндри – це механічні системи, які створюють силу за допомогою стисненого повітря. Як правило, ці циліндри складаються з поршня, поршневого штока і циліндричного корпусу. Коли повітря вводиться в один кінець циліндра, тиск усередині зростає, спонукаючи поршень рухатися в заданому напрямку. Цей рух потім передається штоком поршня до об'єкта, який потребує руху [8].



Рисунок 1.1 – Пневматичні циліндри компаній Festo (а) та Camozzi (б)

Робочою рідиною в пневматичних циліндрах є стиснене повітря, що робить ці циліндри чудовим вибором для застосувань, які потребують високої чистоти. У разі витoku навколишнє середовище залишається незабрудненим. Крім того, пневматичні циліндри працюють тихо і не вимагають великих резервуарів для зберігання робочого середовища.

Пневматичні циліндри є невід'ємною частиною оптимізації машин і промислових процесів, пропонуючи силу та рух для різних застосувань, таких як затискання, виштовхування, блокування та підйом. У виробничих умовах вони часто використовуються для повторюваних дій, таких як переміщення предметів до машин або частин обладнання та з них. Крім того, у системах трубопроводів пневматичні циліндри служать для ефективного керування роботою клапанів.

Основні вузли пневматичного циліндра:

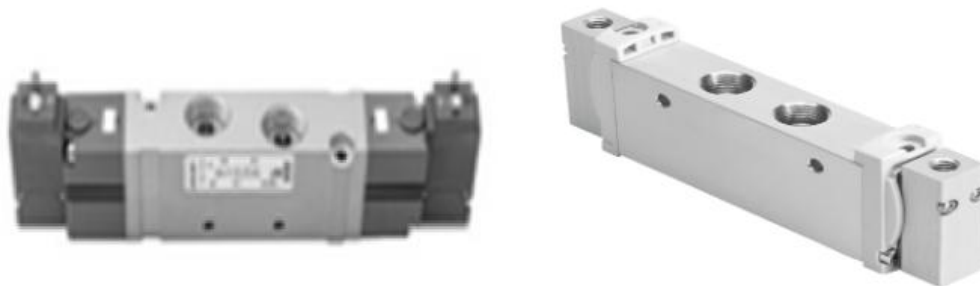
- корпус (циліндрична гільза). Металева труба, закрита передньою та задньою кришками. Кришки оснащені пневматичними портами, а між ними й корпусом установлюють ущільнювальні та амортизувальні елементи, щоб запобігти витокам і пом'якшити кінцеві удари;
- поршень. Рухома перегородка, що розділяє внутрішній об'єм на дві робочі камери. Сила, яку він розвиває, дорівнює добутку тиску повітря на площу поршня; діаметр гільзи визначає величину цієї площі;
- поршневий шток. З'єднаний із поршнем, передає зусилля на зовнішній механізм. Довжина його ходу відповідає максимальному зміщенню поршня;
- амортизатор кінцевого ходу. Гідропневматичний або пневматичний вузол, що плавно гасить швидкість поршнево–штокового блока біля кришок і зменшує шум та вібрацію;
- ущільнення. Комплект кілець: rod seal герметизує вихід штока, piston seal відокремлює робочі камери, а статичні прокладки між кришками й корпусом утримують стиснене повітря всередині;

– напрямні кільця. Встановлені у поршень і кришку, запобігають прямому контакту металу з металом, сприймають радіальне навантаження й знижують тертя; виготовляються з PTFE або поліаміду;

– датчики положення. Герконові чи датчики Холла фіксують лінійне переміщення поршня, що необхідно для програмного позиціонування;

– стяжні шпильки. Різьбові стрижні, які стягують кришки з корпусом по всій довжині циліндра, підвищуючи міцність вузла та захищаючи його від ударних навантажень;

Не менш важливим компонентом даної системи є пневматичний розподільник – пристрій, що забезпечує точний розподіл та спрямування стисненого повітря в промислових автоматизаційних системах. Пневматичні розподільники є важливими компонентами систем промислової автоматизації, відіграючи вирішальну роль у керуванні потоком стисненого повітря. На рис. 1.2 наведені пневматичні розподільники: пневморозподільник компанії Festo модель VUVS/VUVG (рис. 1.2, а) [6] та пневморозподільник компанії Camozzi серії Series 4 (рис. 1.2, б) [7].



а)

б)

Рисунок 1.2 – Пневматичні розподільники компаній Festo (а) та Camozzi (б)

Пневматичний розподільник – це клапан, який контролює потік стисненого повітря через різні його канали. Вони приводяться в дію різними способами, включаючи електричні соленоїди, стиснене повітря, механічно або вручну .

Пневморозподільники можна розділити за станом розташування:

– моностабільні – їх початковий стан – це стан, в якому клапан починає весь свій робочий цикл. Вони повертаються до нього після зникнення керуючого сигналу;

– бістабільні – зберігають своє положення після зникнення керуючого сигналу;

– нормально закритий (NC);

– нормально відкритий (NO).

Пневматичний розподільник 5/3 і пневморозподільник 5/2 є так званими п'ятиходовими пневматичними клапанами. Вони призначені для керування пневматичними циліндрами подвійної дії. Пневморозподільник 3/2 (триходовий пневматичний клапан) призначений для керування приводами простої дії. Для клапанів із функцією 3/2 можна отримати нормально відкриті (NO) або нормально закриті (NC) клапани. Пневморозподільник $\frac{1}{2}$, так званий трійник, відмінно підходить особливо в майстернях, коли немає додаткових пневматичних виходів [9].

Також важливий розмір клапана, тобто розмір з'єднувальної різьби, розташованої в корпусі клапана або іноді в з'єднувальних пластинах і елементах пневмоострова, що визначає пропускну здатність робочого середовища через розподільний клапан. У пневматиці найбільш поширена трубна різьба від G1/8 до G2, у випадку з малогабаритними клапанами – метрична різьба від M3 до M6. Для нестандартних елементів, що керують напрямком потоку робочого середовища, застосовують інші типи різьби .

Елементом, який відповідає за підготовку повітря, є вологомасловідділювач. На рис. 1.3 наведені вологомасловідділювачі: моделі серії MS від компанії Festo (рис. 1.3, а) [6] та серії MC від Camozzi (рис. 1.3, б) [7]. Їх основне призначення – очищення стисненого повітря від краплинної вологи та аерозольних частинок мастила, що потрапляють у мережу від компресора чи змащувальних систем. Такі пристрої встановлюють у пневматичних лініях перед вузлами, чутливими до забруднень, зокрема клапанами, пневмоциліндрами, дозаторами фарби та вимірювальними приладами, де навіть незначні домішки можуть викликати корозію, втрату точності або відмову в роботі.

Корпус апарата має вхідний канал, розташований під кутом, який запускає потік по спіральній траєкторії; відцентрова сила відкидає важчі краплі води й масла до стінок, де вони стікають у нижній відстійник. Далі потік проходить через коалесцентний фільтрувальний елемент: дрібні аерозольні частинки збиваються у більші, осідають і теж виводяться через дренажний клапан. На виході користувач отримує осушене й знесмолене повітря з мінімальним перепадом тиску та стабільними параметрами чистоти.



Рисунок 1.3 – Вологомасловідділювач компаній Festo (а) та Camozzi (б)

Етапи та компоненти фільтрації.

Стиснений конденсат із компресора під тиском надходить у сепаратор і спершу проходить через попередній олеофільний фільтр із поліпропіленових волокон.

Матеріал вибірково адсорбує краплі мастила, залишаючи воду непорушеною, а вентиляційний отвір скидає надлишковий тиск, зменшує турбулентність і сприяє гравітаційному відокремленню вільних олив. Далі конденсат потрапляє до сорбційного модуля з картриджами активованого вугілля або органічної глини, які поглинають залишкові вуглеводні та доводять стік до нормативних показників. Залежно від конструкції сепаратора застосовують одну чи дві такі касети послідовно.

Після завершення процесів очищення та зневоднення повітря йде етап регулювання тиску, який забезпечує стабільність і безпеку роботи пневматичної системи. Одним з пристроїв, що використовується на цьому етапі є пневматичний регулятор тиску.

Пневматичний регулятор тиску (редуктор тиску) складається з декількох основних частин: корпусу з каналами для входу і виходу повітря, пружного елемента (пружини), чутливого елемента (мембрани або поршня) та клапанного вузла (запірного елемента). Зазвичай вхідний отвір регулятора з'єднаний з магістраллю стисненого повітря високого тиску, а вихідний – з пневматичною системою або пристроєм, що потребує зниженого стабільного тиску. На верхній частині корпусу розташований гвинт регулювання з накрученою на нього пружиною.

Нижній кінець пружини тисне на мембрану. Знизу під мембраною знаходиться шток з клапаном, який перекриває канал між вхідною і вихідною камерами. Коли пружина не стиснута, клапан залишається закритим під тиском пружини знизу. При закручуванні регулювального гвинта пружина стискається і

тисне на мембрану, яка передає зусилля на клапан, відчиняючи його. Через це повітря починає надходити з входу на вихід.

Далі, поки тиск на виході не досягне встановленого значення, клапан залишається частково відкритим. Як тільки вихідний тиск зростає до заданого рівня, сила від підвищеного тиску під мембраною урівноважує силу пружини, і клапан прикривається, встановлюючи рівновагу [10].

Таким чином, регулятор автоматично підтримує встановлений тиск на виході: коли споживання повітря зростає і тиск падає – клапан знову відкривається під дією пружини, а коли тиск перевищує налаштування – клапан закривається під дією сили від мембрани.

Основні технічні характеристики регулятора представлені у таблиці 1.2

Таблиця 1.2 – Основні технічні характеристики пневматичного регулятора тиску

Характеристика	Значення
Тип конструкції	Одноступінчатий мембранний, самоскидний
Максимальний тиск на вході	10 бар
Діапазон вихідного тиску	0,5 – 8,0 бар
Максимальна витрата повітря	2500 л/хв (при $\Delta P \leq 1$ бар)
Точність підтримки тиску	$\pm 0,1$ бар

Як видно з таблиці, регулятор має типові показники для середньорозмірного пристрою, здатного забезпечити стабільний вихідний тиск та ефективну роботу в умовах змінних навантажень.

На рис. 1.4 наведені моделі пневматичних регуляторів тиску: регулятор тиску компанії Festo серії N (рис. 1.4, а) [6] та регулятор тиску компанії Camozzi серії MS (рис. 1.4, б) [7].

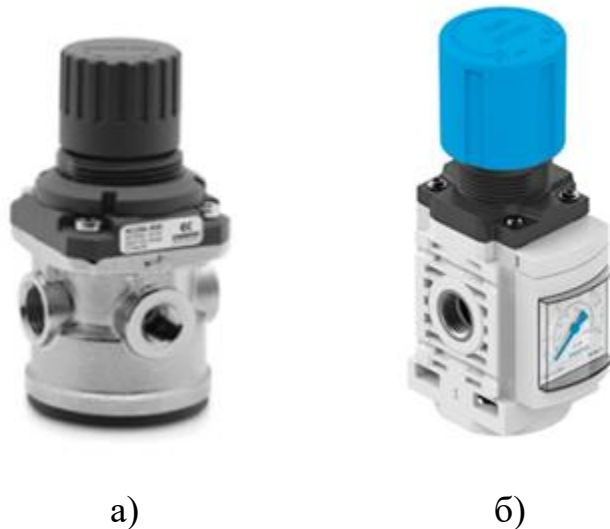


Рисунок 1.4 – Регулятор тиску пневматичний компаній Festo (а) та Camozzi (б)

1.3 Аналіз конструкції і принципів роботи пневматичних елементів

В автоматизованих системах керування виробничими процесами важливу роль відіграють різні пневматичні елементи. До них належать пневмоциліндри, регулятори тиску, вологомасловідділювачі та розподільники повітря.

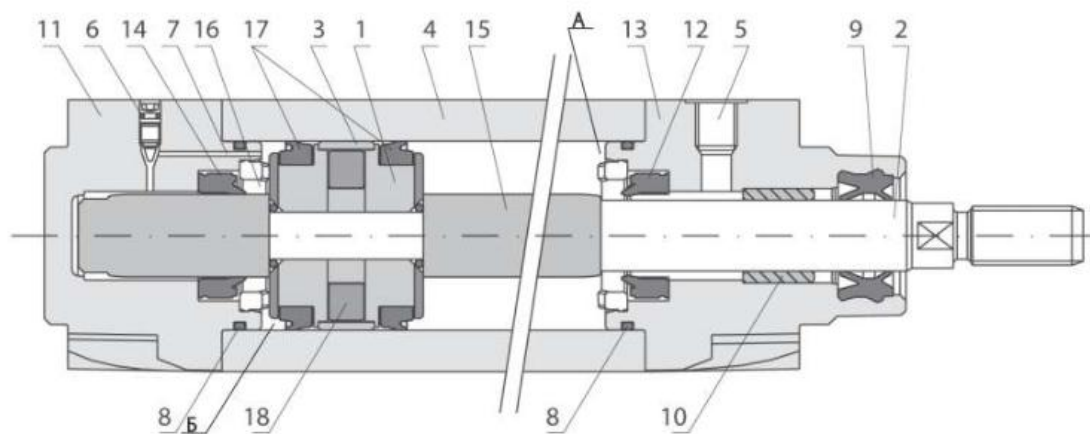
Пневматичні циліндри функціонують завдяки енергії стисненого повітря, яке подається у вхідні отвори пристрою. Це змушує поршень рухатися поступально. Зазвичай процес починається з подачі повітря, внаслідок чого поршень зміщується в певному напрямку. Щоб повернути його у вихідне положення, повітря подають на протилежну сторону. Напрямок і швидкість руху регулюються за допомогою спеціальних клапанів. Пневмоциліндри широко застосовуються в автоматизованому обладнанні, де важлива точність лінійного переміщення [11].

Залежно від конструкції та принципу дії, пневматичні циліндри поділяються на два основних типи: односторонньої та двосторонньої дії.

У циліндрах односторонньої дії поршень разом зі штоком переміщується під дією тиску стисненого повітря тільки в одному напрямку. Повернення у вихідну

позицію відбувається механічним шляхом. Такі пристрої мають обмеження ходу, яке зазвичай становить від одного до двох з половиною діаметрів поршня.

У пневмоциліндрах двосторонньої дії рух поршня в обидві сторони забезпечується за рахунок поетапної подачі стисненого повітря в обидві порожнини циліндра. Хід таких циліндрів може досягати кількох метрів. Конструкція пневмоциліндра двосторонньої дії наведена на рисунку 1.5.



- 1 – поршень; 2 – шток; 3 – антифрикційне кільце; 4 – гільза; 5 – вихід;
 6 – регулюючий демпферний гвинт; 7 – демпферуючий канал;
 8 – гумові кільця; 9 – штокова манжета; 10 – направляюча втулка;
 11, 13 – кришки; 12, 14 – демпферна манжета;
 15 – втулка для гальмування; 16 – демпферна пластина;
 17 – манжети поршня; 18 – магніт

Рисунок 1.5 – Конструкція циліндру двосторонньої дії

Усередині гільзи 4, яка з обох боків закрита кришками 11 і 13, розташований поршень 1, закріплений на штоку 2. Кришки фіксуються за допомогою шпильок. У них передбачені різьбові отвори 5 для приєднання фітингів.

У передню кришку 13 вмонтовано направляючу втулку 10 для штока, а також встановлено манжетні ущільнення 9, які забезпечують герметизацію штокової

порожнини та захищають її від потрапляння забруднень ззовні. Нерухоме з'єднання між кришкою і гільзою ущільнюється гумовими кільцями 8 круглого перерізу. З'єднання поршня з гільзою герметизується манжетами V-подібного перерізу, розташованими зустрічно.

Щоб поршень залишався в правильному положенні під час руху, застосовується кільце 3 з антифрикційного матеріалу. У більшості сучасних пневмоциліндрів також передбачені вбудовані демпферні пристрої, які забезпечують плавну та безударну зупинку поршня в кінці ходу .

Ефективна робота пневматичних виконавчих механізмів забезпечується завдяки точному регулюванню потоків стисненого повітря, що здійснюється пневматичними розподільниками. Вони координують подачу повітря між компресором і виконавчими пристроями, такими як циліндри або пневмодвигуни.

Активация розподільників відбувається вручну, електрично або пневматично, залежно від сигналів системи управління. Перемикання клапанів дозволяє змінювати напрям потоку повітря та контролювати робочий процес. Після виконання операції пристрій повертається у вихідний стан, готовий до наступного циклу.

Обсяг подачі та напрямок повітря визначаються налаштуваннями розподільника, що забезпечує гнучке керування технологічним процесом. Такі пристрої застосовуються для пуску, зупинки, зміни напрямку руху повітря та відведення відпрацьованого повітря в атмосферу. Конструкцію пневморозподільника серії 4 наведено на рисунку 1.6.

Залежно від способу керування розподільники бувають ручними, механічними, електричними, пневматичними та електропневматичними. За принципом дії розрізняють одностороннє та двостороннє керування.

При односторонньому керуванні перемикання виконується в одному напрямку, а повернення – за допомогою пружини. Для двостороннього – потрібні два сигнали, що забезпечують перемикання в обидва напрямки.

За кількістю зовнішніх ліній розподільники поділяють на дво-, три-, чотири- та п'ятилінійні, серед яких найпоширеніші – три- та п'ятилінійні.

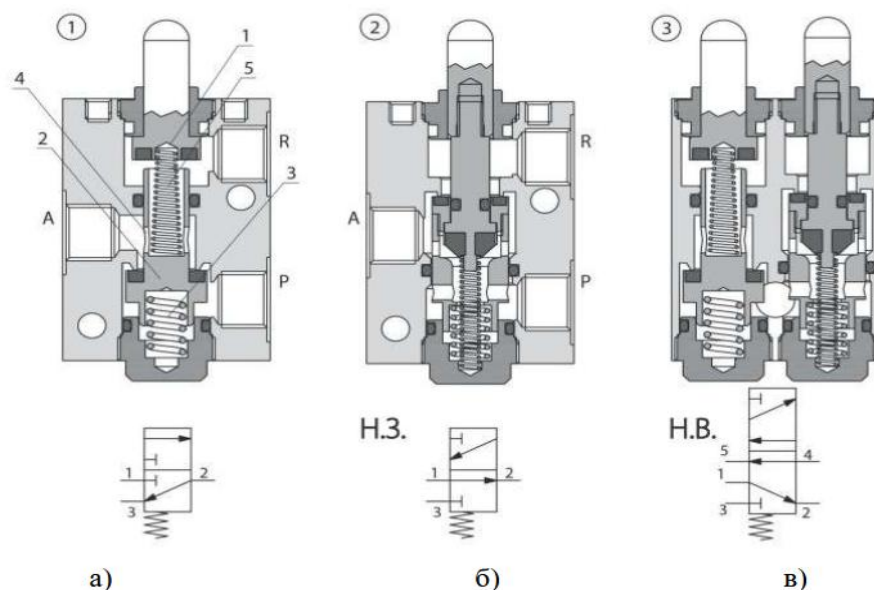
Трилінійний двопозиційний нормально закритий розподільник складається з корпусу, клапана, сідла, двох пружин різної жорсткості та плунжера. У стані спокою клапан перекриває вихід, з'єднаний з атмосферою. При натисканні на плунжер спочатку стискається м'якша пружина, перекриваючи атмосферний канал, потім – жорсткіша, що відкриває подачу стисненого повітря на вихід А.

У нормально відкритому розподільнику в стані спокою вихід А постійно з'єднаний із джерелом повітря. При натисканні плунжера подача перекривається, а вихід А сполучається з атмосферою для розвантаження системи.

П'ятилінійний двопозиційний розподільник має складнішу конструкцію: два входи для подачі повітря, два виходи на виконавчі механізми та один канал для відведення відпрацьованого повітря. Золотниковий або клапанний елемент змінює положення, керуючи напрямком потоку. Такий розподільник забезпечує прямий і зворотний хід поршня в пневмоциліндрах, що робить його універсальним для двосторонніх приводів. Приклад зображено на рисунку 1.6.

Вологомасловідділювач призначений для очищення стисненого повітря від залишків вологи та мастила. Зазвичай його встановлюють між компресором і пневматичним обладнанням. Коли повітря проходить через цей пристрій, воно змінює напрямок руху, утворюючи циклонний ефект. Завдяки відцентровій силі краплі вологи та мастила осідають на стінках, а вбудовані фільтри додатково затримують дрібні домішки. Конденсат накопичується в спеціальному резервуарі, звідки видаляється вручну або автоматично через дренаж .

На вході повітря спочатку потрапляє на перегородку, що сприяє відділенню більших крапель вологи та мастила. Далі потік закручується за допомогою дефлектора, створюючи потужний циклонний ефект. У результаті краплі рідини та тверді частинки відкидаються на стінки фільтра і конденсуються.



Отвір P – підведення стисненого повітря; отвір A – вихід до споживача;
отвір R – вихід в атмосферу

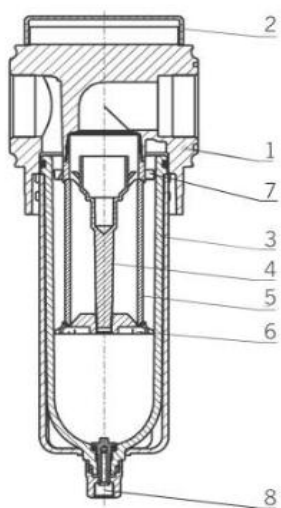
- а) трилінійний двопозиційний нормально закритий розподільник;
- б) трилінійний двопозиційний нормально відкритий розподільник;
- в) п'ятилінійний двопозиційний розподільник.

Рисунок 1.6 – Конструкція пневморозподільників клапанного типу

Зібрані забруднення стікають у нижню частину корпусу, де розташований клапан зливу конденсату. Залежно від типу конструкції, це може бути напівавтоматичний або автоматичний клапан. Напівавтоматичний спрацьовує, коли тиск у системі падає, наприклад, після зупинки компресора. Автоматичний самостійно скидає конденсат при досягненні певного рівня. Приклад конструкції фільтра з напівавтоматичним клапаном наведено на рисунку 1.7.

У верхній частині фільтра знаходиться турбулентна зона, де активно відділяються волога і частинки пилу. Нижче розташований стабілізатор потоку, під яким утворюється ламінарна зона, що запобігає поверненню забруднень у пневмомережу.

Після відділення вологи повітря додатково очищується за допомогою фільтруючого елемента, який затримує залишкові тверді частинки. Такі елементи можуть мати форму конуса або циліндра й виготовляються з пористих матеріалів. Ступінь очищення залежить від розміру пор фільтра, який може становити від 25 мкм до 0,003 мкм. Ефективність затримки частинок при цьому досягає від 99,9% до 99,999%.



- 1 – корпус (алюміній); 2 – кришка (поліацеталь);
 3 – стакан з полімерним покриттям (полікарбонат/поліамід);
 4 – вісь фільтроелемента (поліацеталь); 5 – фільтруючий елемент (поліетілен); 6 – гайка-стабілізатор (поліацеталь); 7 – дефлектор (крильчатка) (поліацеталь); 8 – клапан зливу конденсату (латунь з технополімером)

Рисунок 1.7 – Фільтр з напівавтоматичним клапаном

Регулятор тиску встановлюють між джерелом стисненого повітря та споживачем. Спочатку його під'єднують до компресора через вхідний порт, а вихід з'єднують із пневмосистемою. Необхідний тиск задається за допомогою гвинта або регулювальної ручки, а рівень тиску контролюється за показаннями манометра. Якщо тиск перевищує встановлене значення, регулятор обмежує подачу повітря, а

при його зниженні – відкриває клапан, щоб відновити баланс. Більшість сучасних моделей оснащені захисними механізмами, зокрема перепускними клапанами, які запобігають перенавантаженню системи [12].

Приклад конструкції регулятора наведено на рисунку 1.8.

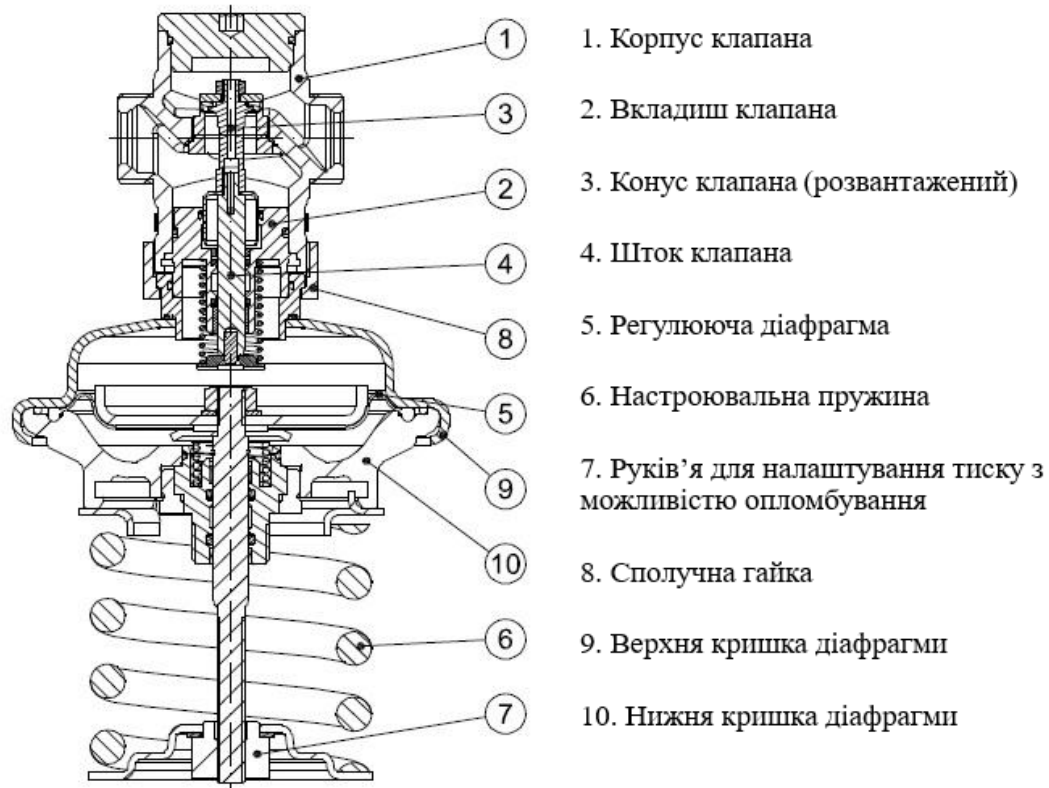


Рисунок 1.8 – Конструктивна схема регулятора тиску

Коли повітря надходить у регулятор, воно спочатку проходить через вхідну перегородку, яка рівномірно розподіляє потік і зменшує турбулентність. Далі повітря очищується сітчастим фільтром, який затримує великі частинки та захищає мембрану й сідло клапана від пошкоджень.

Основним робочим елементом регулятора є еластична мембрана, з'єднана з регулювальною пружиною. Обертанням гвинта змінюють стискання пружини, що

впливає на тиск під мембраною. Баланс між силою пружини й тиском повітря визначає наскільки відкритий головний клапан і який тиск забезпечується на виході.

Регулятори бувають двох типів: прямої дії, де пружина безпосередньо впливає на клапан, і пілотні – в них допоміжний клапан керує основним. Пілотні моделі забезпечують більш стабільний тиск навіть при різких змінах витрати повітря.

Щоб підвищити точність роботи, виробники використовують тефлонові сідла, армовані мембрани та двоступеневу вентиляцію. У високоточних регуляторах також застосовують компенсаційні канали, які швидко вирівнюють тиск над і під мембраною, що дозволяє системі оперативно реагувати на зміни.

Регулятор зазвичай монтують у вертикальному положенні, щоб уникнути накопичення конденсату в порожнинах. Перед ним рекомендується встановлювати відсікач конденсату, а після – тонкий фільтр, особливо якщо обладнання чутливе до залишкових домішок.

Обслуговування регулятора полягає у періодичній перевірці стану мембрани, очищенні вхідного фільтра та перевірці перепускного клапана. Якщо спостерігається нестабільний тиск, варто оглянути пружину на втрату еластичності та перевірити герметичність ущільнень.

Таким чином, розглянувши конструкцію і принцип роботи пневматичних компонентів, таких як пневмоциліндр, розподілювач, регулятор тиску, маслорозділювач, можна розробити їх віртуальні двійники у вигляді динамічних 3D-моделей.

2 РОЗРОБКА МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ПРИНЦИПІВ РОБОТИ ПНЕВМАТИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ

2.1 Вибір інструментів та середовища розробки

Актуальність програм для 3D моделювання зростає у зв'язку з багатьма факторами, такими як розвиток технологій, зростання попиту на візуальні рішення у різних галузях, а також інтеграція 3D-технологій у щоденне життя. Основними причинами, чому ці програми залишаються актуальними є [13]:

- зростаючий попит на 3D-візуалізацію. Архітектура та дизайн: 3D-моделювання використовується для створення візуалізацій будинків, інтер'єрів, ландшафтного дизайну. Графіка та анімація: створення анімацій для фільмів, ігор та реклами;

- розвиток технологій. Віртуальна та доповнена реальність: 3D-моделі використовуються у VR та AR-застосунках, що вимагає високоякісного моделювання та рендерингу. 3D-друк: моделі, створені в програмах для 3D-моделювання, можуть бути адаптовані для 3D-друку, відкриваючи нові можливості у виробництві;

- сфера освіти. Навчання та дослідження: університети та школи використовують 3D-програмування для навчання студентів в інженерії, дизайні та мистецтві. Онлайн-курси: зростає кількість онлайн-курсів з навчання 3D-моделювання, що робить цю технологію доступнішою;

- доступність програм. Безкоштовні та відкриті рішення: програми, як Blender і FreeCAD, роблять 3D-моделювання доступним для широкого кола користувачів, від професіоналів до аматорів. Платформи для співпраці: з'являються онлайн-сервіси, які дозволяють спільно працювати над 3D-проектами;

– адаптація до нових галузей. Здоров'я та медицина: моделювання анатомії для навчання та планування хірургічних операцій. Інженерія: створення складних частин та механізмів для промислового виробництва.

Програми для 3D моделювання залишаються актуальними завдяки їхньому застосуванню в різних сферах, що розвиваються, і новим технологіям, які з'являються на ринку. Вони відкривають нові можливості для творчості, інновацій та технічних досягнень. У таблиці 2.1 наведено опис кількох найбільш популярних програм для 3D моделювання.

Таблиця 2.1 – Опис програм для 3D моделювання

№	Назва	Тип	Переваги	Недоліки
1	Blender	Безкоштовна, з відкритим кодом	Потужний набір інструментів для моделювання, анімації, рендерингу та композитингу. Активна спільнота та безліч ресурсів навчання. Підтримка плагінів.	Велика тривалість навчання.
2	SketchUp	Безкоштовна версія та платні версії (Pro)	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, зручний для новачків. Широко використовується в архітектурі та дизайні інтер'єру.	Обмежені можливості для створення складних моделей у безкоштовній версії. Може бути недостатньо потужним для 3D анімації.

Продовження таблиці 2.1

№	Назва	Тип	Переваги	Недоліки
3	Autodesk 3ds Max	Платна (з безкоштовним пробним періодом)	Потужні можливості для анімації та рендерингу. Ідеально підходить для графіки, ігор та візуалізації.	Висока вартість, тривале навчання.
4	Maya	Платна (з безкоштовним пробним періодом)	Найкращі інструменти для анімації та моделювання персонажів. Використовується в індустрії ігор і кіно.	Дорога ліцензія.
5	FreeCAD	Безкоштовна, з відкритим кодом	Ідеально підходить для інженерного та механічного моделювання. Гнучка архітектура плагінів дозволяє розширювати функціональність.	Не так зручно для художнього моделювання.

Blender, SketchUp та FreeCAD є популярними безкоштовними програмами для 3D моделювання. SketchUp відома простотою використання та підходить для широкого кола користувачів, включаючи архітекторів та дизайнерів. Для візуалізації інтер'єру, 3ds Max з V-Ray, Lumion та SketchUp Pro з V-Ray також є лідерами. Blender також згадується як в безкоштовних програмах, так і в контексті візуалізації.

Blender належить до числа найбільш розповсюджених програмних засобів для тривимірного моделювання. Багатофункціональність цього пакету сприяє опануванню базових методів створення 3D-графіки.

Blender 3D – безкоштовний програмний продукт, призначений для створення та редагування тривимірної графіки. Програма розповсюджена на всіх популярних платформах, має відкритий вихідний код і доступна безкоштовно.

Ці особливості зробили її вкрай популярною як серед користувачів-початківців, так і серед справжніх професіоналів моделювання. Софт нерідко вибирається як основний робочий інструмент для великих і серйозних проектів.

За своїм функціоналом графічний редактор та кількість доступних інструментів, практично не поступається платним додаткам для роботи з 3D графікою.

Програма містить майже всі опції професійних збірок. У ній простежуються елементи різних 3D-додатків, водночас збережено власну самобутність та унікальність.

Blender прийнято позиціонувати як багатофункціональний інструмент для роботи з тривимірною графікою, анімацією або створенням комп'ютерних ігор. Ураховуючи зазначений функціонал, передбачається значне навантаження на обчислювальні ресурси.

Розмір дистрибутиву становить 70 Мбайт, що при повноцінному наборі інструментів є дуже компактним. Водночас усі компоненти пакету функціонують на повну потужність із високою продуктивністю .

Професійна команда розробників регулярно допрацьовує систему, роблячи її ще більш універсальною, стабільною та швидкою. Програму відрізняє сучасний програмований інтерфейс та зручна файлова система, інтегрована безпосередньо в софт.

Програма доступна на різних операційних системах без прив'язки до розрядності. Нею зможуть скористатися користувачі Windows, GNU/Linux і Mac OS.

Нижче наведено основні функції програми.

3D моделювання. Користувачеві доступна величезна кількість інструментів для створення та редагування 3D моделей різних рівнів складності. Причому моделювати об'єкти можна за допомогою доступних примітивів, полігонів, NURBS-кривих та кривих Безьє. Додатково передбачено функціонал для формування метасфер та управління формою за допомогою булевих операцій. Слід також враховувати технології Subdivision Surface та інтуїтивно зрозумілі інструменти для створення скульптур. Згідно з аналогами з професійними збірками, тут передбачені модифікатори для зміни форми моделей.

Створення анімації. Хоча програмне забезпечення орієнтоване передусім на моделювання, його анімаційні можливості реалізовані на високому рівні. Можна використовувати традиційну скелетну анімацію або ригінг, інверсну кінематику, різні обмежувачі та багато іншого. Усі коефіцієнти та параметри налаштовуються за допомогою вбудованих інструментів. Додатково представлена динаміка тіл різної твердості та формування анімації дрібних частинок.

Текстура. Можна накладати відразу кілька текстур на той самий об'єкт. Є безліч інструментів для текстурування, у тому числі UV-мапінг та функція часткового настроювання. Значно полегшує роботу налаштування шейдерів.

Малювання. Є багато вбудованих засобів для створення малюнка пензлями прямо у вікні програми. Наразі ця функція використовується для зручнішого формування двовимірної анімації.

Інструменти візуалізації. Є відразу кілька попередньо встановлених засобів для показу результату роботи, а також передбачена сумісність зі сторонніми рендерами від різних розробників.

Відеоредактор. У складі пакета передбачено відеоредактор із широким набором інструментів.

Ігровий двигун. Останні версії програми оснащуються власним ігровим двигуном, за допомогою якого можна створювати програми з інтерактивними функціями. Інтерфейс Python API забезпечує можливість модифікації гри.

Приклад інтерфейсу програми можна побачити на рисунку 2.1.

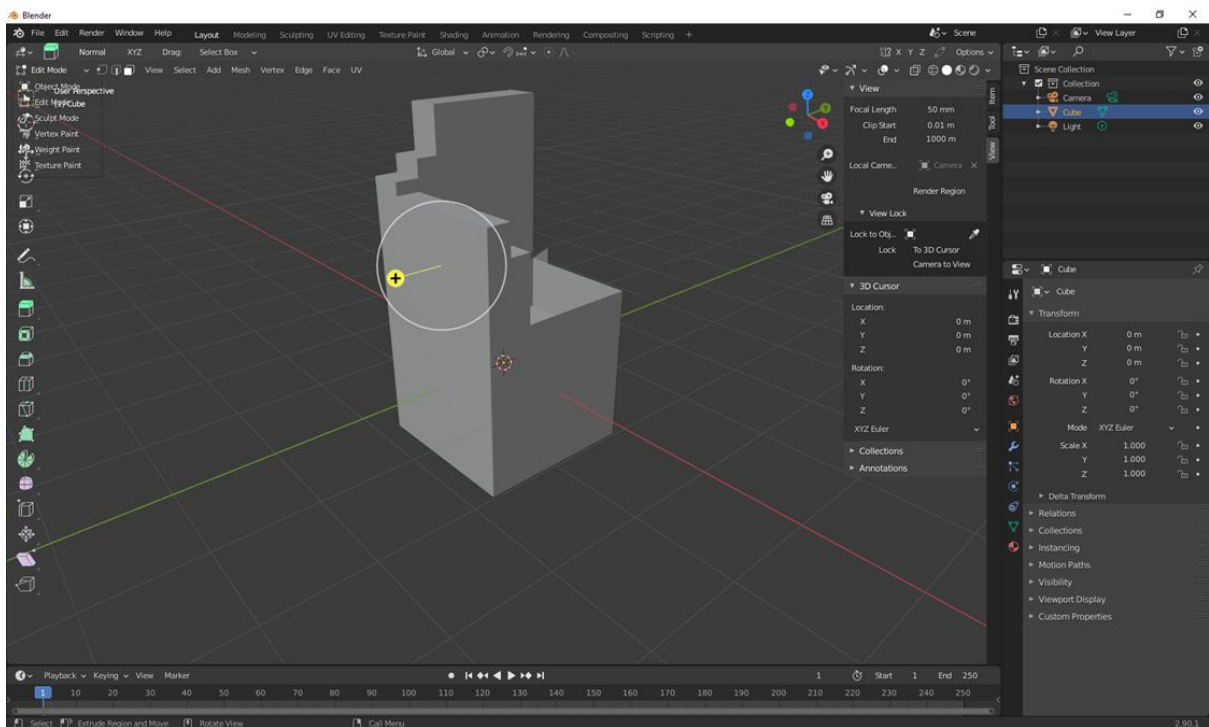


Рисунок 2.1 – Інтерфейс програми Blender

Програма Blender вирізняється інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом та доступністю для опанування, що сприяє швидкому засвоєнню базових можливостей.

Існує широкий спектр навчальних матеріалів і цифрових ресурсів для ознайомлення з основними функціями програмного забезпечення.

Доступні численні відеоматеріали, що включають базові уроки для первинного ознайомлення з програмою та спеціалізовані приклади для вирішення конкретних завдань.

З моменту виходу до сьогодні Blender зазнав численних оновлень і розширень функціональності, що сприяло зростанню кола користувачів та високій оцінці його інструментарію.

До основних переваг програмного забезпечення Blender користувачі зазвичай відносять високу швидкодію. Додаток запускається значно швидше порівняно з аналогічними програмами та демонструє оперативну реакцію на команди навіть за умов обмежених апаратних ресурсів. Така невибагливість до технічного забезпечення часто є визначальним чинником при виборі Blender, оскільки використання більш ресурсомістких систем на слабких конфігураціях втрачає доцільність.

Наступною суттєвою перевагою є розширена функціональність. Blender об'єднує в собі всі необхідні інструменти для реалізації широкого спектра завдань, що вигідно вирізняє його серед інших подібних рішень.

Програмне забезпечення також характеризується універсальністю: воно дозволяє створювати графічні об'єкти для комп'ютерних ігор, анімаційних стрічок і повнометражного кіно. Крім того, передбачені широкі можливості для створення та редагування анімації на професійному рівні.

Серед технічних особливостей варто виокремити вбудований рендерер Cycles, який ефективно функціонує як із графічними процесорами, так і з центральними. Цей компонент було реалізовано в Blender задовго до того, як подібна технологія стала галузевим стандартом.

Окрему роль відіграє рушій EEVEE, який забезпечує відображення текстур та візуальних ефектів у режимі реального часу, що значно полегшує процес розробки.

Ще однією конкурентною перевагою є інтерфейс користувача, що поєднує сучасний дизайн із високим рівнем ергономічності. На відміну від багатьох альтернатив, які зберігають застарілий інтерфейс через консервативний підхід розробників, Blender постійно вдосконалюється та адаптується до потреб користувачів.

До потенційних недоліків програмного забезпечення Blender належить обмежена ефективність окремих інструментів у специфічних контекстах професійної діяльності. Така ситуація, як правило, обумовлена недостатньою обізнаністю користувачів з алгоритмами коректного використання зазначених функцій. Зважаючи на високу гнучкість програмного інтерфейсу та можливість адаптації до конкретних виробничих задач, за умови належної оптимізації робочих процесів, вказані обмеження можуть бути суттєво мінімізовані.

Крім того, суттєвим фактором, що впливає на стабільність використання програмного середовища, є частота його оновлень. Незважаючи на те, що регулярні оновлення забезпечують актуальність функціоналу та сприяють розширенню інструментарію, вони також можуть спричиняти зміни у користувацькому інтерфейсі та алгоритмах взаємодії. Це, у свою чергу, ускладнює процес навігації, порушує усталені виробничі підходи та потребує постійного оновлення навчально-методичної бази.

У цілому Blender становить високопродуктивне середовище для тривимірного моделювання з відкритим вихідним кодом, що гарантує повний доступ до всіх функціональних можливостей. Активна участь спільноти розробників та користувачів у процесі вдосконалення програмного продукту створює передумови для його сталого розвитку в межах відкритої екосистеми.

2.2 Реалізація моделей для візуалізації роботи пневматичних елементів

Розробка 3D-моделей пневматичних елементів є важливим етапом у вивченні принципів роботи пневматичних систем та візуалізації технічних рішень. За допомогою тривимірного моделювання можна детально дослідити конструктивні особливості об'єктів, принципи їх функціонування та взаємодії окремих компонентів. Такий підхід дозволяє ефективно демонструвати робочі процеси, оптимізувати конструкції та підготувати матеріали для подальшого використання в освітніх, проєктних і виробничих цілях.

2.2.1 Моделювання пневматичного циліндру

На початковому етапі моделювання в програмному середовищі Blender було здійснено вивчення технічної документації та референсних матеріалів з метою визначення основних геометричних параметрів, таких як діаметр і довжина корпусу, товщина стінок, розташування вхідних і вихідних отворів, а також параметри кришок і штока.

Основна геометрія моделі була побудована за допомогою базових примітивів. Для формування корпусу використано стандартний циліндр із заданими розрахунковими параметрами. Далі було змодельовано верхню та нижню кришки, які забезпечують герметичність конструкції та містять отвори для кріплення і підведення стисненого повітря. Шток і поршень було створено як окремі елементи. Шток, розташований уздовж центральної осі циліндра, виконує функцію передавання зусиль від поршня до зовнішніх механізмів. Поршень моделювався з урахуванням конструктивних особливостей ущільнювальних елементів, що забезпечують герметизацію камер та ефективність роботи пристрою [14].

Особливу увагу було приділено формуванню вхідних і вихідних отворів. Для цього застосовано допоміжні циліндричні об'єкти та інструмент Boolean Modifier,

який дозволив точно вирізати отвори у відповідності до технічних вимог. Коректне розташування отворів є важливим фактором, що безпосередньо впливає на ефективність подачі та відведення повітря, а отже – і на продуктивність пневматичної системи.

Після побудови основних конструктивних елементів було додано допоміжні деталі, такі як ущільнення, монтажні отвори та елементи кріплення. Для створення симетричних компонентів застосовано модифікатор Mirror Modifier, що дозволило оптимізувати процес моделювання та скоротити час виконання роботи.

На завершальному етапі було проведено текстурування моделі та налаштування матеріалів для досягнення реалістичності зовнішнього вигляду. У вікні Material Properties призначено відповідні матеріали для металевих поверхонь корпусу, штока та кришок. За допомогою UV-розгортки виконано накладання текстур, які імітують фактуру металу та характерні ознаки експлуатаційного зношення.

Окремим етапом було здійснено візуалізацію процесу роботи пневматичного циліндра. Для цього створено просту кінематичну схему за допомогою анімаційних інструментів Blender. Було налаштовано ключові кадри переміщення штока та поршня, що імітують робочий цикл пристрою. На початку циклу поршень перебував у вихідному положенні (шток втягнутий), а в кінці – в крайньому робочому положенні (шток висунутий).

Рух поршня було реалізовано через об'єкт керування (Empty), що спрощує регулювання довжини ходу. Для забезпечення рівномірної швидкості переміщення застосовано лінійну інтерполяцію, а для безперервного повторення робочого циклу використано циклічний модифікатор.

Також налаштовано прості візуальні ефекти для демонстрації напрямків подачі та випуску повітря, що дозволяє краще ілюструвати принцип роботи пристрою. Готову анімацію було візуалізовано із застосуванням ефекту Motion Blur для досягнення більшої реалістичності під час швидкого руху штока. Підсумкове

відео підготовлено у форматі H.264 для подальшого використання в демонстраційних і навчальних матеріалах.

Фінальним етапом стало налаштування сцени для візуалізації. Було оптимізовано параметри освітлення з метою підвищення реалістичності зображення, після чого виконано рендеринг із урахуванням встановлених характеристик матеріалів і світла. Готову модель експортовано у формати STL, OBJ та FBX для подальшого використання у технічній документації, презентаційних матеріалах або для виготовлення прототипів за допомогою технологій тривимірного друку.

Результат моделювання пневматичного циліндра в Blender наведено на рис. 2.2 та 2.3.

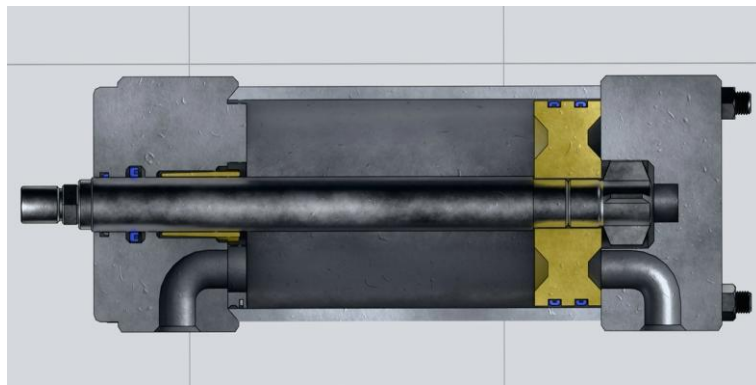


Рисунок 2.2 – Результат моделювання пневматичного циліндра в Blender

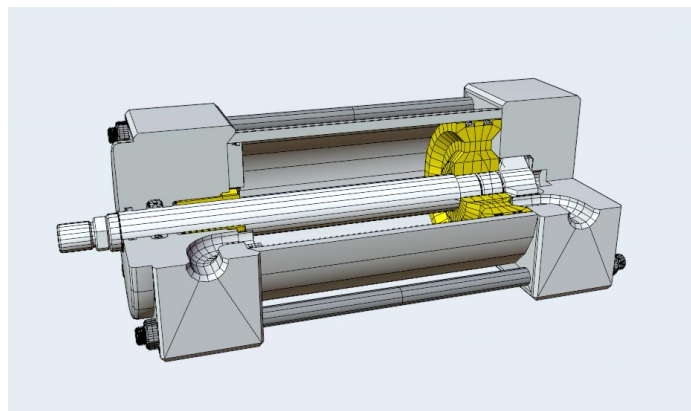


Рисунок 2.3 – Результат моделювання пневматичного циліндра в Blender

2.2.2 Моделювання пневматичного регулятора тиску

Геометричну основу конструкції сформовано з використанням простих тривимірних об'єктів. Для побудови корпусу застосовано стандартний циліндр, параметри якого були одразу встановлені згідно з технічними вимогами. Верхня та нижня кришки створені як окремі елементи, що забезпечують герметичність та містять отвори для підключення трубопроводів. Регулювальні компоненти змодельовано окремо, з урахуванням необхідної форми та функціонального призначення. Для забезпечення симетричності моделі та мінімізації ручного редагування було використано модифікатор Mirror [15].

Отвори для підведення та відведення повітря було сформовано за допомогою допоміжних циліндричних об'єктів і модифікатора Boolean, що дозволило точно вирізати необхідні отвори відповідно до технічних вимог. При цьому було враховано оптимальне розташування отворів для підвищення ефективності роботи пристрою та зменшення втрат тиску в системі.

Після створення основних компонентів було додано допоміжні деталі, серед яких ущільнювальні елементи, засоби кріплення та монтажні отвори. Геометрію моделі було оптимізовано з урахуванням подальшого процесу текстурування та рендерингу.

На наступному етапі було виконано текстурування моделі. В параметрах матеріалів окремим елементам конструкції було призначено матеріали, що імітують металеві поверхні та інші характерні конструктивні елементи. За допомогою UV-розгортки було виконано нанесення текстур, які підкреслюють властивості матеріалів і імітують ознаки експлуатаційного зношення.

Окремо було реалізовано візуалізацію функціонування пристрою. З цією метою було створено кінематичну модель, що демонструє роботу регулятора тиску. Рух поршня та регулювальних елементів було анімовано за допомогою ключових кадрів: початкове положення відповідало стану нульового тиску, а в кінцевому кадрі поршень займав крайнє робоче положення. Переміщення було реалізовано

через контрольний об'єкт, що спростило налаштування параметрів анімації. Для досягнення плавності руху було застосовано лінійну інтерполяцію, а циклічний модифікатор забезпечив безперервне відтворення робочого циклу.

Додатково було налаштовано візуальні ефекти для демонстрації напрямків повітряних потоків через відповідні канали, що дозволило наочно показати принцип роботи пристрою в динаміці. Анімацію було доповнено ефектом Motion Blur, що підвищило реалістичність при зображенні швидкого руху елементів. Підсумкове відео було підготовлено у форматі H.264 для подальшого використання в презентаційних та навчальних матеріалах.

Завершальним етапом стало налаштування сцени для фінальної візуалізації. Було оптимізовано параметри освітлення й камер з урахуванням матеріальних властивостей об'єктів і особливостей сцени. Готову модель було експортовано у формати STL, OBJ та FBX, що забезпечує можливість її подальшого використання в технічній документації, презентаціях або для виготовлення прототипів із застосуванням технологій тривимірного друку.

Результат моделювання регулятора тиску в Blender наведено на рисунку 2.4.

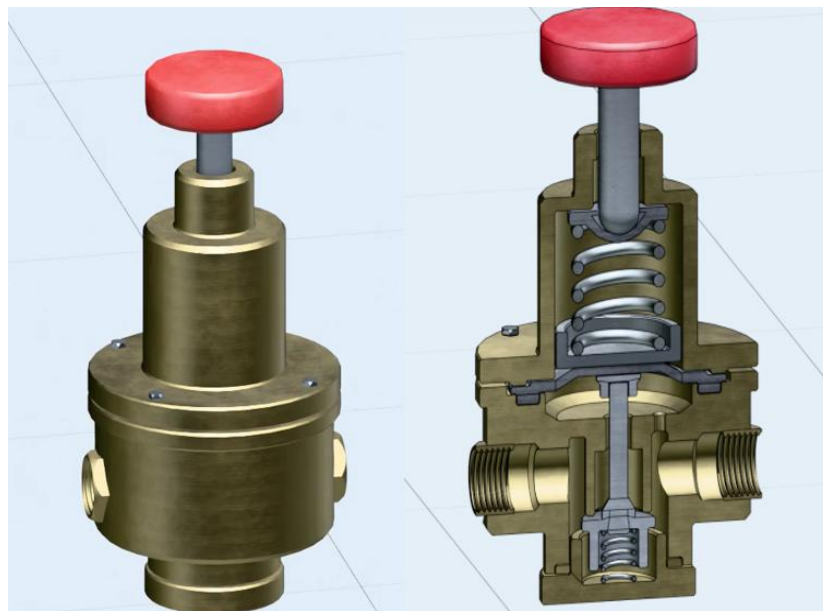


Рисунок 2.4 – Результат моделювання регулятора тиску в Blender

2.2.3 Моделювання вологомасловідділювача

У новій сцені створено базовий циліндр із меню Mesh, який став основою конструкції. Після налаштування діаметра й висоти згідно з технічними вимогами були додані два допоміжні циліндри для моделювання кришок. Їх копіювали через Shift + D та редагували за допомогою інструментів Scale і Move в режимі редагування.

Для відтворення елементів кріплення створено малі циліндри, які імітували притискачі. Отвори для виходу повітря змодельовано малими циліндричними елементами, розташованими у відповідних місцях на основному циліндрі. Скидний клапан було побудовано шляхом комбінування простих примітивів у вигляді змієподібної форми, що відтворює його характерну конструкцію.

Далі було виконано текстурування та застосування матеріалів. У вкладці Material Properties було створено новий матеріал з налаштуванням властивостей для імітації металевих або пластикових поверхонь. Для рівномірного нанесення текстур було використано UV-розгортку.

Після завершення моделювання було налаштовано освітлення сцени та виконано рендеринг. У Render Properties було обрано необхідні параметри, а фінальне зображення отримано за допомогою команди F12. Завершальним етапом став експорт моделі у формати STL, OBJ або FBX.

Для створення анімації моделі після побудови було налаштовано ієрархію об'єктів за допомогою ригінгу та встановлено батьківські зв'язки, що забезпечило синхронізований рух елементів. Основний об'єкт і кришки було пов'язано через команду Ctrl + P з опцією Object (Keep Transform). Для реалізації складніших сценаріїв було застосовано обмеження Constraints. Далі було створено контролери та встановлено ключові кадри шляхом увімкнення Auto Keying або вручного додавання ключів трансформації за допомогою команди I → Location/Rotation/Scale. Для налаштування анімації було використано редактори

Dope Sheet і Graph Editor, що дозволило оптимізувати таймінг і забезпечити плавність рухів.

Анімацію деталей реалізовано через ключові кадри для руху клапана та притискачів у крайніх положеннях. Для симуляції крапель створено домен з високою в'язкістю, після чого проведено випікання через Bake Data і Bake Mesh. Анімацію камери виконано шляхом встановлення контрольних точок і фіксації погляду на модель за допомогою Constraints. Освітлення анімовано зміною інтенсивності та кольору світла через ключові кадри.

Фінальні налаштування рендерингу включали вибір роздільної здатності, частоти кадрів і формату вихідного відео. Було виконано експорт анімації у форматі MP4 або як послідовності зображень для подальшої обробки у Video Sequencer. Завдяки виконаним діям було створено якісну та професійну анімацію моделі вологомасловідділювача.

Результат моделювання вологомасловідділювача в Blender наведено на рисунку 2.5.



Рисунок 2.5 – Результат моделювання вологомасловідділювача в Blender

2.2.4 Моделювання пневматичного розподільника

Під час моделювання пневматичного розподільника в Blender було створено нову сцену та сформовано базову геометрію шляхом додавання й налаштування циліндра відповідно до технічних параметрів.

Наступним етапом було виконано моделювання деталей. Основну структуру було створено за допомогою циліндрів. У режимі редагування (Tab) було застосовано інструменти Scale (S) і Move (G) для корекції форми. Було додано додаткові циліндри для виходів, які було розміщено на боковій частині основного циліндра. Для створення отворів було використано модифікатор Boolean. Циліндри-вирізи було додано, і за допомогою модифікатора вирізано відповідні отвори. Також було додано функціональні елементи, зокрема деталі клапанів, які було спроектовано за допомогою циліндрів і призм. Для створення ручок було застосовано вузькі циліндри.

Після цього було виконано текстурування та налаштування матеріалів. У вкладці Material Properties було створено новий матеріал і налаштовано його властивості для надання реалістичного вигляду. Для коректного розташування текстур було використано UV-розгортку (вкладка UV Editing).

Далі було здійснено налаштування освітлення та рендеринг. Було додано джерела світла (Area light або Point light) для якісного освітлення моделі. У вкладці Render Properties було обрано відповідні параметри рендеру. Після цього було натиснуто F12 для отримання фінального зображення моделі.

Після завершення моделювання було виконано експорт моделі через File → Export у необхідних форматах (STL, OBJ, FBX тощо). Таким чином, етап моделювання пневматичних елементів у Blender було завершено. Наступним кроком стала розробка автоматизованої пневматичної системи управління виробничою лінією.

Готовий робочий процес анімації пневматичного розподільника включав сім основних етапів: планування дій, побудову технічного ріга та драйверів, створення

і керування ключовими кадрами, організацію дій у редакторі Non-Linear Animation, симуляцію жорстких тіл і повітряного потоку, налаштування кінематографії та рендеру послідовності кадрів, а також експорт у необхідний формат.

На етапі планування анімації було визначено сценарій та розраховано таймінг рухів: обертання ручок клапанів, відкриття та закриття портів, переміщення поршнів. У панелі Timeline було встановлено частоту кадрів 25 FPS (європейський стандарт) і тривалість сцени відповідно до циклу роботи. Для полегшення монтажу було додано маркери (M), які позначали логічні фази (відкриття клапана, пауза, закриття).

Запис ключових кадрів було здійснено через виділення кістки та натискання $I \rightarrow$ Location/Rotation. Ключові кадри було збережено в Dopesheet. У Graph Editor було налаштовано криві руху за допомогою Interpolation Mode \rightarrow Linear для рівномірного руху або Ease In/Out для плавного закриття клапанів.

У редакторі NLA кожену групу ключів було перетворено на Action і засташовано (Push Down). Для плавного переходу між фазами відкриття та закриття клапана було додано Transition Strip.

На етапі симуляції було активовано Rigid Body World \rightarrow Cache, встановлено Sub-Steps = 10 для досягнення реалістичної взаємодії поршнів. Імітацію повітряного потоку було виконано через Fluid \rightarrow Gas-домен із коротким життєвим циклом та прив'язкою щільності до відкриття порту за допомогою драйверів.

Далі було виконано налаштування камери. Було створено камеру, активовано Depth of Field для фокусування на портах. За потреби було застосовано Motion Path (Object \rightarrow Constraints \rightarrow Follow Path) для реалізації об'льоту сцени.

Рендер анімації було здійснено з використанням рендер-движків EEVEE (для попереднього перегляду) та Cycles Path-Tracing (для фінального рендеру). У Render Properties було встановлено Frame Step = 1, обрано PNG-послідовність кадрів для подальшого монтажу у Video Sequencer. Для швидкої перевірки сцени було використано Viewport Render Animation.

На етапі експорту було виконано File → Export → FBX з активованими опціями Apply Transform і Bake Animation (Sampling = All Actions) для збереження анімаційних циклів. Для CAD-систем було експортовано статичні FBX-фрейми або серії у форматі OBJ.

Завершальним етапом стала перевірка та оптимізація сцени. У Viewport Overlay було активовано відображення Statistics для контролю продуктивності. При зниженні FPS було зменшено полігональність дрібних деталей або обмежено відбиття у Cycles. Сцену було прокручено кілька разів (Alt + A) для перевірки синхронізації драйверів, кривих і симуляцій. При виявленні розсинхронізації було виправлено позиції кліпів у редакторі NLA.

Результат моделювання пневматичного розподільника в Blender наведено на рисунку 2.6.

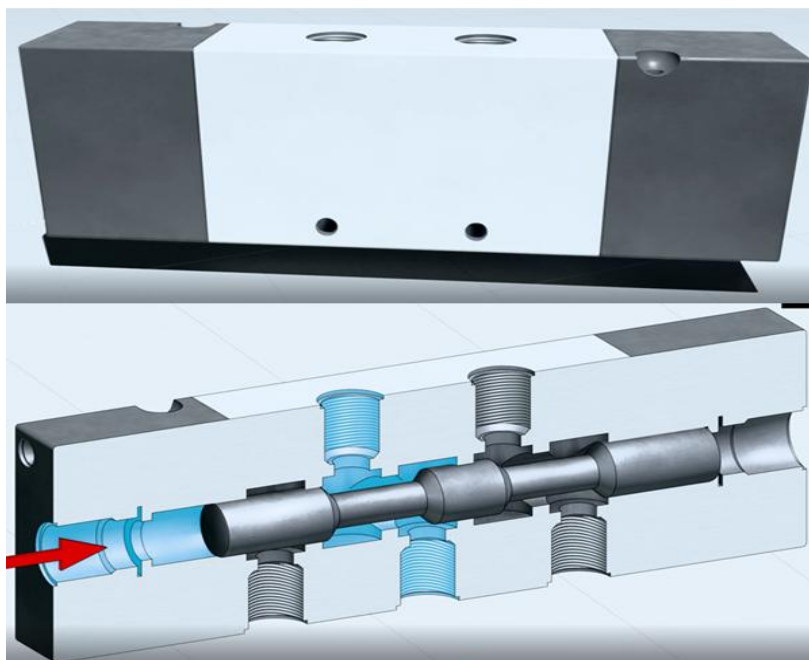


Рисунок 2.6 – Результат моделювання пневматичного розподільника

Таким чином, в даному розділі було створено 3D-моделі пневматичних елементів за допомогою програми Blender. Такі віртуальні двійники допоможуть

вивчити їхню будову та принцип роботи. Такий підхід допомагає краще зрозуміти, як працюють окремі частини пристрою, і дозволяє створювати наочні матеріали для навчання або презентацій. Пневматичні компоненти, що розроблялись, використовуються в автоматизованих системах управління різноманітних виробничих ліній.

3 РОЗРОБКА АВТОМАТИЗОВАНОЇ ПНЕВМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЧОЮ ЛІНІЄЮ

3.1 Розробка структурної схеми автоматизованої системи

На основі створених моделей побудовано структурну схему автоматизованої електропневматичної системи управління, призначеної для керування виконавчим пневматичним циліндром на виробничій лінії (рис. 3.1).

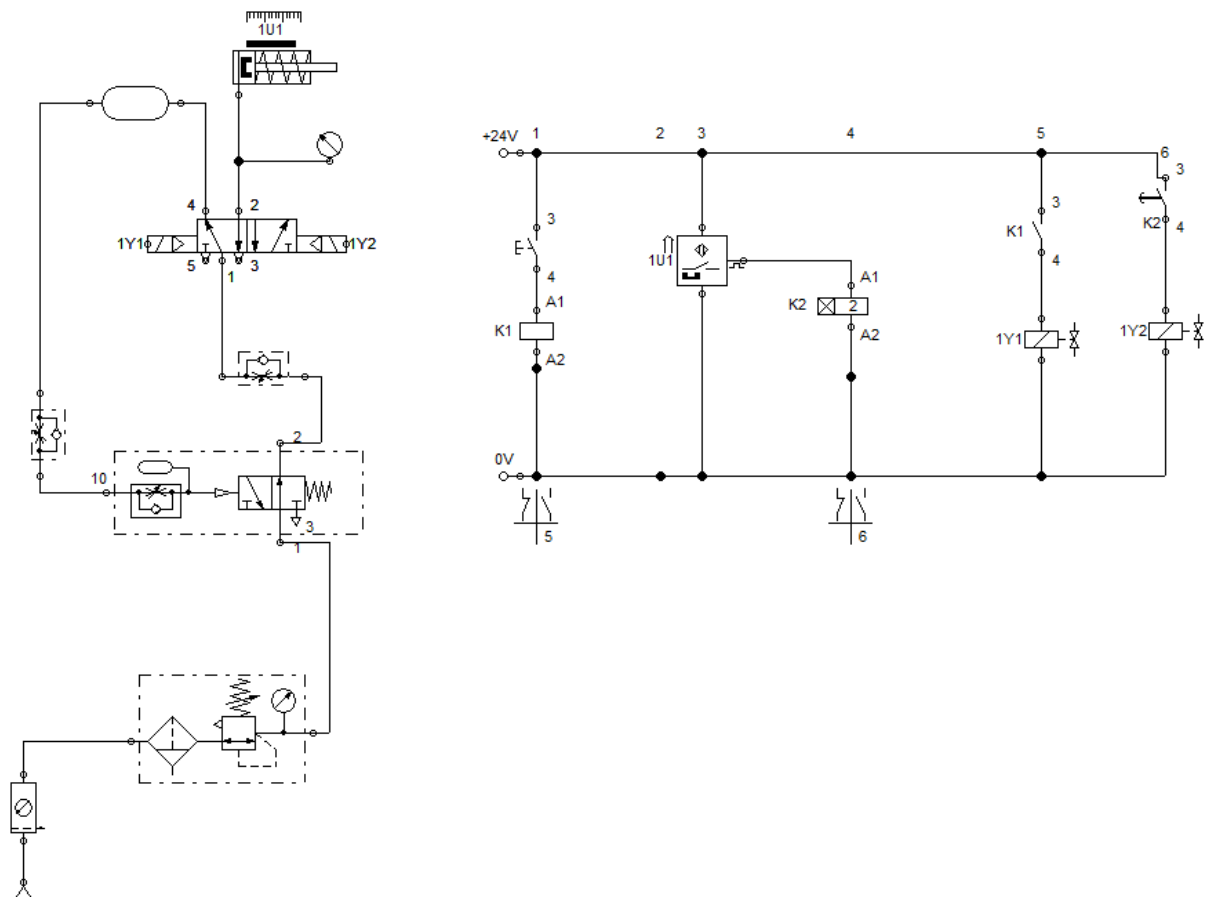


Рисунок 3.1 – Схема автоматизованої електропневматичної системи управління призначеної для керування виконавчим пневматичним циліндром на виробничій лінії.

Загальна структура цієї системи поєднує пневматичні та електричні елементи, що взаємодіють між собою для забезпечення чіткої та послідовної роботи виконавчого механізму. Схема включає ряд ключових компонентів, а саме: пневматичний циліндр, двопозиційний розподільник з електромагнітним керуванням, електромагніти 1Y1 та 1Y2, реле часу 1U1, проміжні реле K1 і K2, кнопку запуску S1, кінцеві вимикачі для контролю положення штока, а також дроселі й логічні клапани, які забезпечують регулювання повітряного потоку. Пневматична частина відповідає за безпосереднє переміщення штока, тоді як електрична частина реалізує логіку керування, встановлюючи необхідну послідовність і тривалість дій.

Натискання кнопки S1 запускає реле K1, що активує електромагніт 1Y1, подаючи стиснене повітря до циліндра. Після виконання робочого ходу реле часу 1U1 з певною затримкою вмикає реле K2, яке через електромагніт 1Y2 повертає шток у вихідне положення. Завершення циклу підтверджується спрацюванням кінцевого вимикача. Такі електропневматичні системи широко застосовуються в промисловості – зокрема у машинобудуванні, харчовій, фармацевтичній та пакувальній галузях. Вони забезпечують високу точність, надійність і повторюваність операцій, що є критично важливим у серійному виробництві з високими вимогами до автоматизації та швидкодії.

3.2 Розрахунок параметрів ПД-регулятора для автоматизованого керування ходом поршня пневмоциліндра

Регулятор впроваджується з урахуванням основних критеріїв якості керування, а саме мінімізації перерегулювання, скорочення часу встановлення та зменшення статичної похибки системи. Підбір налаштувань регулятора здійснюється з метою досягнення оптимальних динамічних характеристик автоматизованої пневматичної системи.

Схематичне зображення автоматизованої пневматичної системи з використанням ПІД-регулятора наведено на рис. 3.2.

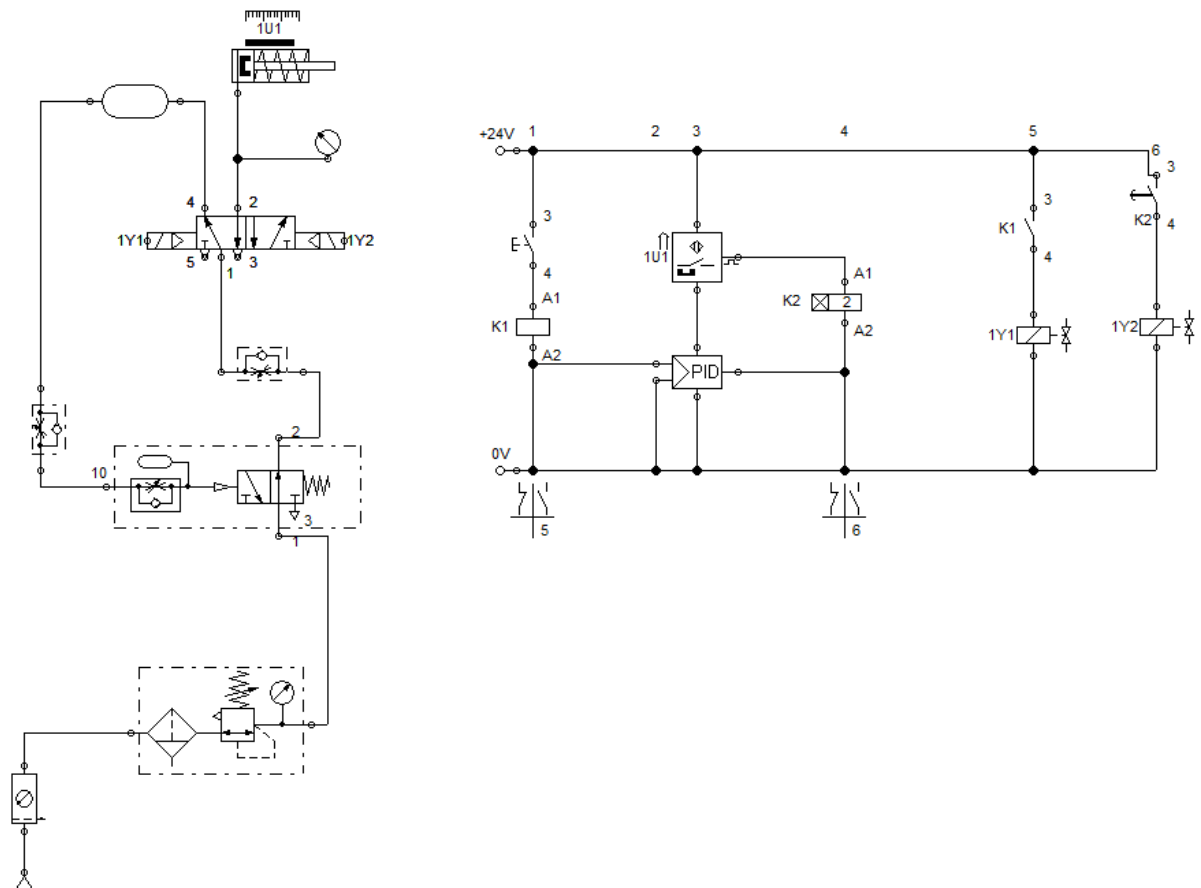


Рисунок 3.2 – Схема автоматизованої пневматичної системи управління з ПІД-регулятором, призначеної для керування виконавчим пневматичним циліндром на виробничій лінії.

Основне рівняння PID-регулятора:

Для опису функціонування PID-регулятора в часовій області використовуємо рівняння (3.1), яке визначає вихідний сигнал регулятора на основі похибки системи:

$$A(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (3.1)$$

де $A(t)$ – вихідний сигнал регулятора у момент часу t , який є керуючим впливом на об'єкт, пневмозвено, виражений у умовних одиницях;

$e(t)$ – похибка, різниця між заданим значенням, бажаним станом системи, і фактичним значенням, отриманим із датчика, у момент часу t ;

$K_p e(t)$ – пропорційна складова, яка залежить від поточної величини похибки та коефіцієнта підсилення K_p , що визначає швидкість реакції системи на відхилення;

$K_i \int e(t) dt$ – інтегральна складова, яка враховує накопичену похибку за весь час роботи системи, помножену на коефіцієнт K_i , що дозволяє усунути сталу похибку;

$K_d \frac{de(t)}{dt}$ – диференціальна складова, яка залежить від швидкості зміни похибки та коефіцієнта K_d , що сприяє зменшенню коливань і підвищенню стабільності системи.

Математичний опис пневмозвена.

Для моделювання динаміки пневмозвена як аперіодичного елемента першого порядку використовуємо передаточну функцію у частотній області (3.2). Це дозволяє описати поведінку об'єкта керування під впливом вхідного сигналу:

$$G_p(s) = \frac{K}{\tau s + 1}, \quad (3.2)$$

де $G_p(s)$ – передаточна функція пневмозвена, яка описує співвідношення між вхідним сигналом (тиском) і вихідним сигналом (переміщенням штока) у частотній області;

K – статичне підсилення, що визначає відношення вихідного сигналу до вхідного у сталому режимі, мм ходу штока на 1 бар зміни тиску;

τ – постійна часу, що характеризує швидкість реакції системи на зміну вхідного сигналу (у секундах);

s – комплексна змінна Лапласа, яка використовується для аналізу системи у частотній області.

Оцінка перехідних характеристик без регулятора.

Час встановлення.

Для оцінки часу, необхідного системі без регулятора для досягнення 98% від сталого значення вихідного сигналу, використовуємо наближену формулу (3.3) для аперіодичного елемента першого порядку:

$$t_{2\%}^{OL} \approx 4\tau, \quad (3.3)$$

де $t_{2\%}^{OL}$ – час встановлення у контурі без ПД регулятора, тобто час, за який вихідний сигнал досягає 98% від сталого значення (у секундах);

τ – постійна часу пневмозвена, яка визначає швидкість реакції системи.

Результат: $t_{2\%}^{OL} \approx 4\tau = 4 \text{ с}$, що є базовим значенням для порівняння з системою з регулятором.

Статична похибка:

Для оцінки наявності сталої похибки у системі без регулятора використовуємо умовне рівняння (3.4), яке відображає неможливість усунення відхилення без зворотного зв'язку:

$$e_{ss}^{OL} \neq 0, \quad (3.4)$$

де e_{ss}^{OL} – статична похибка у контурі без ПІД регулятора, тобто різниця між заданим і фактичним значенням у сталому режимі;

значення $\neq 0$ вказує на те, що без інтегральної дії регулятора система не здатна повністю усунути похибку, що є недоліком відсутності регулятора.

Передаточна функція PID-регулятора

Для аналізу роботи PID-регулятора у частотній області використовуємо передаточну функцію, яка дозволяє описати його вплив на систему у термінах Лапласа. Це необхідно для подальшого моделювання замкнутої системи:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s = \frac{K_d s^2 + K_p s + K_i}{s}, \quad (3.5)$$

де $C(s)$ – передаточна функція PID-регулятора у частотній області;

K_p – коефіцієнт пропорційної складової, що відповідає за миттєву реакцію на похибку;

$\frac{K_i}{s}$ – інтегральна складова, яка враховує накопичену похибку;

$K_d s$ – диференціальна складова, яка залежить від швидкості зміни похибки.

Передаточна функція замкнутої системи.

Для моделювання поведінки системи з PID-регулятором у замкнутому контурі використовуємо передаточну функцію (3.6), яка враховує зворотний зв'язок. Це дозволяє проаналізувати динамічні характеристики системи:

$$T(s) = \frac{C(s)G_p(s)}{1+C(s)G_p(s)}, \quad (3.6)$$

де $T(s)$ – передаточна функція системи, яка описує співвідношення між вхідним і вихідним сигналами;

$C(s)G_p(s)$ – добуток передаточних функцій регулятора та об'єкта, що відображає вплив регулятора на пневмозвено;

$1 + C(s)G_p(s)$ – знаменник, який враховує зворотний зв'язок у системі.

Оцінка динамічних параметрів системи.

Натуральна частота.

Для оцінки натуральної частоти коливань системи з PID-регулятором використовуємо наближену формулу (3.7), яка дозволяє визначити швидкість реакції системи:

$$\omega_n \approx \sqrt{K_i(1 + K_d)}, \quad (3.7)$$

де ω_n – натуральна частота системи (у рад/с), що характеризує швидкість її реакції;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової.

Коефіцієнт згасання

Для оцінки характеру перехідного процесу (коливальний чи аперіодичний) було використано формулу коефіцієнта згасання (3.8):

$$\zeta \approx \frac{1+K_p}{2\sqrt{(1+K_d)K_i}}, \quad (3.8)$$

де ζ – коефіцієнт згасання, який визначає, чи буде перехідний процес коливальним ($\zeta < 1$) чи аперіодичним ($\zeta > 1$);

K_p – коефіцієнт пропорційної складової;

K_d – коефіцієнт диференціальної складової;

K_i – коефіцієнт інтегральної складової.

Перерегулювання.

Для оцінки рівня перерегулювання системи після впровадження PID-регулятора використовуємо формулу (3.9), яка залежить від коефіцієнта згасання:

$$M_p \approx \exp\left(-\frac{\pi\zeta}{\sqrt{1-\zeta^2}}\right), \quad (3.9)$$

де M_p – перерегулювання, виражене у відсотках, що характеризує перевищення вихідного сигналу над сталим значенням;

ζ – коефіцієнт згасання.

Статична похибка у замкнутому контурі.

Для перевірки наявності сталої похибки у системі з PID-регулятором використовуємо граничний аналіз передаточної функції (3.10):

$$e_{ss}^{CL} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{1}{1+C(s)G_p(s)}, \quad (3.10)$$

де e_{ss}^{CL} – статична похибка у замкнутому контурі;

$C(s)G_p(s)$ – добуток передаточних функцій регулятора та об'єкта.

Оскільки $C(s)$ містить інтегральну складову $\frac{K_i}{s}$, значення $1 + C(s)G_p(s)$ при $s \rightarrow 0$ прямує до нескінченності, тому $e_{ss}^{CL} = 0$, що підтверджує усунення похибки.

Різниця у часі встановлення

Для оцінки ефективності PID-регулятора розраховуємо відсоткове зменшення часу встановлення у порівнянні з відкритим контуром (3.11):

$$\text{Різниця, \%} = \frac{t_{2\%}^{OL} - t_{2\%}^{CL}}{t_{2\%}^{OL}} \times 100\%, \quad (3.11)$$

де $\Delta t_{2\%}$ – відсоткове зменшення часу встановлення завдяки регулятору;

$t_{2\%}^{OL} = 4$, с – час встановлення у контурі без ПІД регулятора;

$t_{2\%}^{CL} = 1.45$, с – час встановлення у замкнутому контурі (з роботи).

Різниця, $\% = \frac{4 - 1.45}{4} \times 100\% = 63.75\%$, що свідчить про значне покращення динаміки.

Порівняння результатів у схемах з ПІД регулятором та без наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняння результатів у схемах з ПІД регулятором та без

Показник	Без ПІД	З ПІД	Різниця
Час встановлення, с	4,00	1,45	-63,8 %
Перерегулювання, %	0	0,4	мінімальне
Статична похибка	$\neq 0$	0	усунена повністю

Проведене порівняння показало, що PID-регулятор суттєво покращує характеристики пневматичної системи. У режимі без регулятора система працює повільно, з тривалим часом усталення і помітною сталою похибкою, яку неможливо усунути без інтегрування. Такий підхід є недостатньо ефективним для задач, що потребують точності та стабільності.

Після впровадження PID-регулятора динаміка системи помітно змінюється: час реакції зменшується, система швидше виходить на усталене значення, зникає статична похибка, а перерегулювання залишається в межах допустимого. Це дозволяє системі не лише швидко адаптуватися до змін, але й підтримувати задані параметри з високою точністю.

Таким чином, використання PID-регулятора значно підвищує ефективність і надійність пневматичної системи, роблячи її більш стабільною, точною та готовою до роботи в умовах виробничого середовища.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

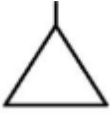
4.1 Візуалізація роботи та тестування побудованої пневматичної автоматизованої системи

На основі проведеного аналізу та підтвердженої ефективності ПІД-регулятора, наступним етапом дослідження є практична реалізація та візуалізація роботи пневматичної автоматизованої системи. У цьому розглядається побудова та функціонування системи, а також дослідження перехідних процесів у модельованих умовах.

Зазвичай пневматичні системи поділяють на дві основні частини: робочу та керуючу. Робоча частина включає всі пневматичні елементи, які безпосередньо виконують механічну дію. Натомість керуюча частина відповідає за передачу пневматичних керуючих сигналів до цих пристроїв.

У таблицях 4.1 – 4.6 представлено ключові технічні характеристики робочої частини системи, як пневморозподільник, двосторонній пневмоциліндр, блок подачі повітря, вологомасловідділювач, регулятор тиску і зворотній клапан.

Таблиця 4.1 – Характеристики блоку подачі стисненого повітря

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Робочий тиск	0...2	0,6	МПа	
Обсяг	0,01...1000	0,1	м ³	
Мінімальна швидкість потоку	0...5000	1000	л/хв	

Таблиця 4.2 – Характеристики пневматичного циліндру

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Діаметр поршня	0,001...2	0,02	м	
Діаметр штоку поршня	0...1	0,008	м	
Максимальний хід	0,001...0,2	0,1	м	
Положення поршня	0...5	0	м	
Кут кріплення	0...360	0		

Таблиця 4.3 – Характеристики зворотнього клапану дросельної заслінки

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Стандартна номінальна витрата	0,1...5000	85	л/хв	
Рівень відкриття	0...100	100	%	

Таблиця 4.4 – Характеристики вологомасловідділювача

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Стандартна номінальна витрата	0,1...5000	750	л/хв	
Номінальний тиск	0...2	0,6	МПа	

Таблиця 4.5 – Характеристики пневматичного розподільника повітря

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Стандартна номінальна витрата	0,1...5000	60	л/хв	
Позиція	0...4	2		

Таблиця 4.6 – Характеристики регулятора тиску

Позначення	Діапазон	Значення	Одиниця	Символ
Діапазон регулювання тиску на виході	0.04 – 0.7	0.07	МПа	
Максимальний тиск на вході	1	0.07	МПа	

Після аналізу конструктивних особливостей та технічних характеристик пневматичної системи, наступним кроком є симуляційне моделювання її роботи. Це дозволяє дослідити функціональність системи у змодельованих умовах, оцінити перехідні процеси та виявити можливі недоліки до фактичної реалізації.

У початковому стані вся система перебуває в режимі очікування. Пневмоциліндр утягнутий, електромагніти розподільника неактивні, а подача стисненого повітря здійснюється через блок підготовки, що включає фільтр, регулятор тиску та манометр. Такий стан дозволяє системі бути готовою до роботи, зберігаючи енергію і водночас не створюючи небажаного руху.

Приклад початкового стану можна побачити на рисунку 4.1

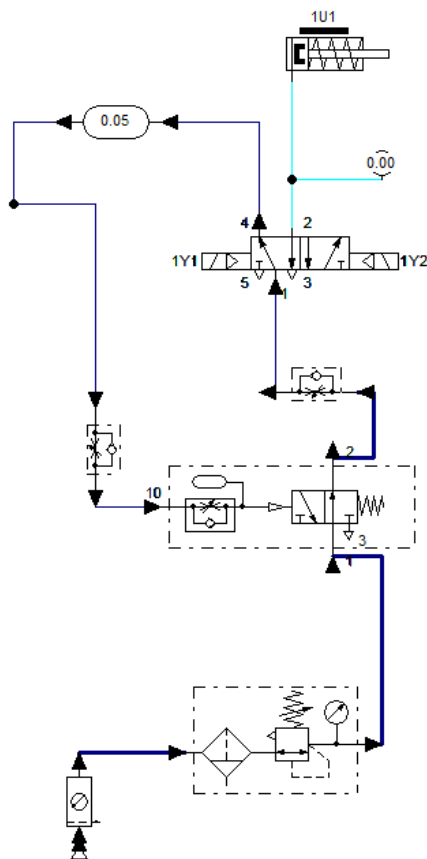


Рисунок 4.1 – Початковий стан схеми у FluidSim

Після натискання кнопки «Старт» електричний сигнал надходить на реле часу 1U1, яке замикає ланцюг і подає живлення на котушку електричного реле K2. Потім сигнал проходить через ПІД-регулятор, який керує роботою котушки K2 відповідно до заданих параметрів регулювання. У результаті активується електромагніт 1Y2, що перемикає пневморозподільник у робоче положення. Це забезпечує подачу стисненого повітря до поршневої порожнини циліндра, і циліндр починає рух. На схемі (рис. 4.2) червоним кольором позначено шлях електричного сигналу під час запуску процесу та активації котушки K2.

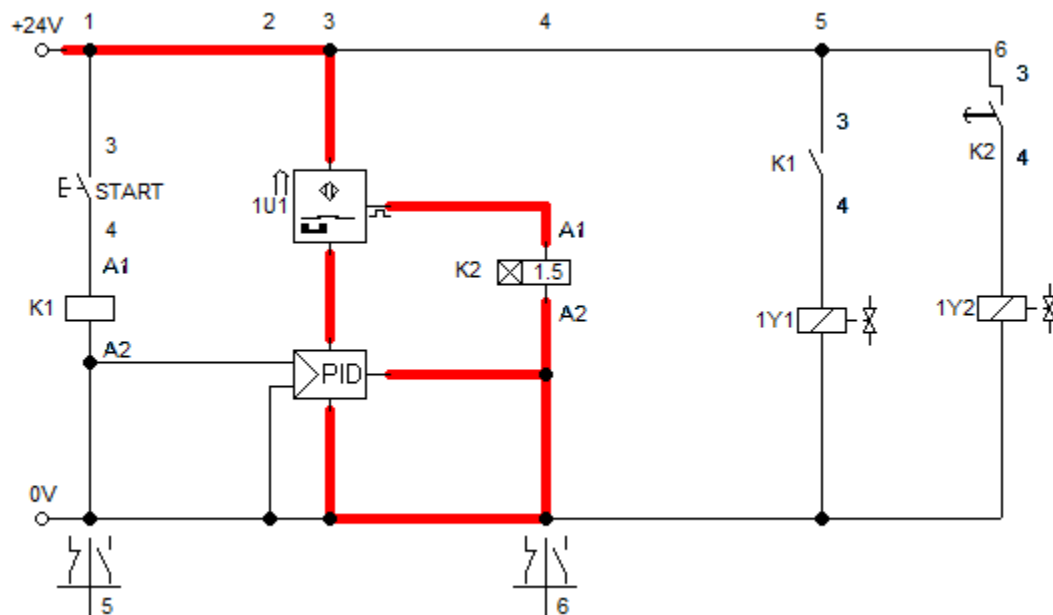


Рисунок 4.2 – Натискання кнопки «Старт», подача сигналу на реле K2

Під тиском повітря шток починає поступово рухатися вперед. Швидкість і плавність цього руху контролюється дросельними клапанами. Це дозволяє уникнути ривків і забезпечити точність у позиціонуванні. Як тільки циліндр досягає крайнього положення, автоматично спрацьовує кінцевий вимикач (наприклад, 1LS_R), що фіксує досягнення мети. Ілюстрація цього етапу представлена на рисунку 4.3.

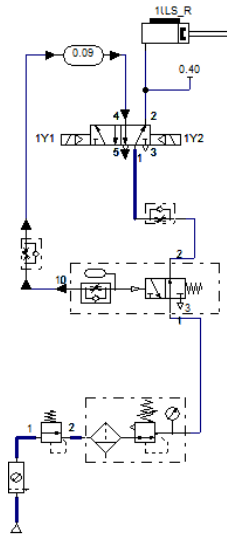


Рисунок 4.3 – Висування штока циліндра, спрацювання кінцевого вимикача

Після досягнення крайньої точки шток затримується у висунутому положенні на певний проміжок часу. Це реалізується за допомогою реле часу (наприклад, 1U1), яке керує затримкою. Протягом цього інтервалу система підтримує активний стан, дозволяючи виконати заплановану дію (наприклад, фіксацію або обробку). Процес затримки демонструється на рисунку 4.4.

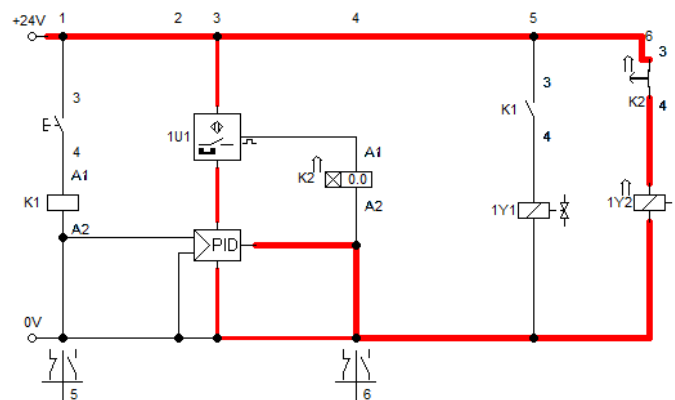


Рисунок 4.4 – Затримка у крайньому положенні, активний таймер

По завершенню затримки таймер автоматично подає сигнал на котушку К1, що вмикає електромагніт 1Y1. Пневморозподільник перемикається у зворотне положення. Шток починає рух у зворотному напрямку, повертаючись у початкове положення. Повернення штока назад показано на зображенні 4.5.

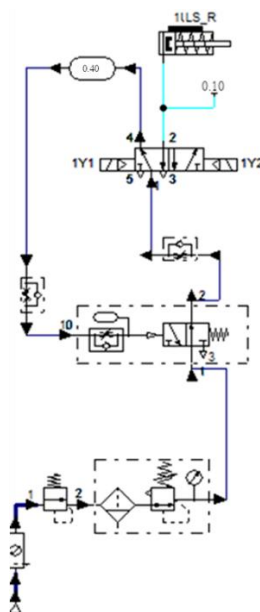


Рисунок 4.5 – Повернення циліндра у вихідне положення

Коли циліндр повністю повертається, система повертається до режиму очікування, готова до нового циклу. За потреби оператор може знову натиснути кнопку «Старт» і повторити процес. Завдяки інтегрованому ПД-регулятору досягається висока точність позиціонування, зменшується час стабілізації і усувається статична похибка – усе це було підтверджено під час симуляційного моделювання.

4.2 Моделювання перехідних характеристик

Проведено моделювання перехідних характеристик автоматизованої пневматичної системи з ПД-регулятором та без нього. Для оцінки динаміки побудовано ключові графіки: імпульсну та ступінчасту характеристики, реакцію на синусоїдальний сигнал, частотну характеристику, вплив параметрів регулятора й реакцію на зовнішнє збурення.

Імпульсна характеристика використовується для аналізу реакції системи на короткочасний імпульсний вплив. Вона дозволяє оцінити швидкість реакції, здатність до демпфування та повернення до рівноважного стану після раптових змін. Такий аналіз є важливим для розуміння стійкості та адаптивності системи до зовнішніх збурень.

На рисунку 4.6 можна побачити імпульсну характеристику системи з ПД-регулятором та без ПД-регулятора.

З графіка видно, що система з ПД-регулятором реагує швидше та стабільніше – амплітуда відгуку швидко зменшується, і система оперативно повертається до сталого стану. Натомість система без регулятора демонструє повільніше затухання, що свідчить про вищу інерційність і гіршу стійкість.

Наступним кроком аналізу є ступінчаста характеристика, яка демонструє реакцію системи на різку зміну вхідного сигналу. Цей графік дозволяє оцінити такі параметри, як час встановлення, перерегулювання та залишкову похибку – ключові показники динамічної точності регулювання.

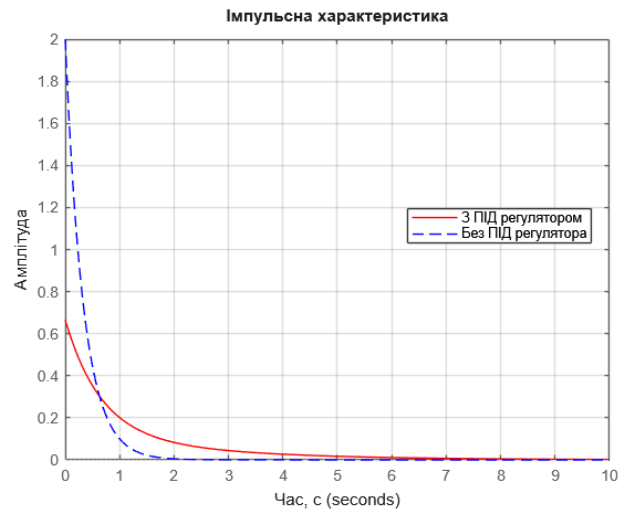


Рисунок 4.6 – Імпульсна характеристика системи.

На рисунку 4.7 можна побачити ступінчасту характеристику системи з ПІД-регулятором та без ПІД-регулятора.

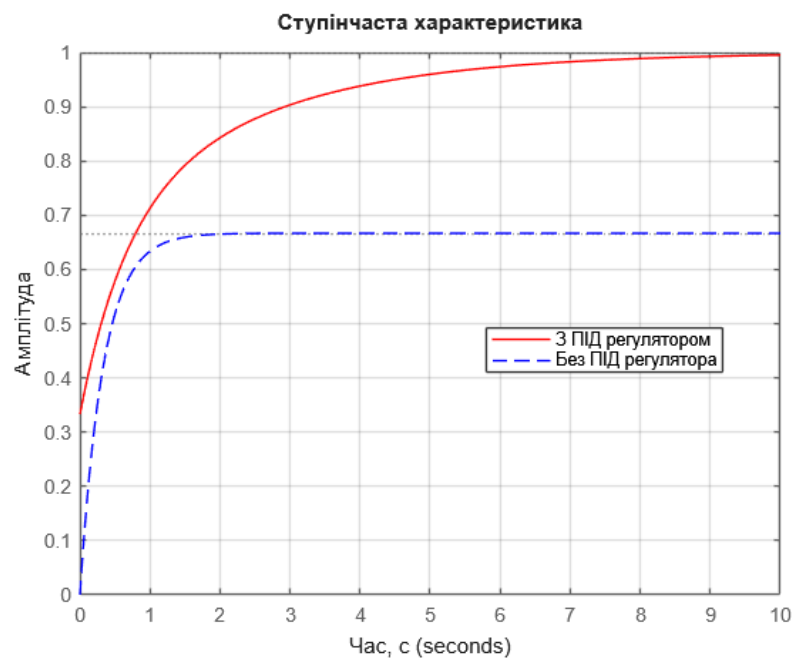


Рисунок 4.7 – Ступінчаста характеристика системи.

З графіка (4.7) видно, що система з регулятором швидко досягає необхідного значення сигналу з амплітудою, що дорівнює 1, тоді як без нього система

стабілізується на нижчому рівні, близько 0.67 з помітною статичною похибкою. Це доводить перевагу ПІД-регулятора у забезпеченні точності та швидкості встановлення сигналу.

Реакція системи на гармонійний сигнал дозволяє оцінити її здатність точно повторювати змінні сигнали, що є критично важливим у задачах з коливальним навантаженням.

На рисунку 4.8 можна побачити реакцію системи на синусоїдальний вхід з ПІД-регулятором та без ПІД-регулятора.

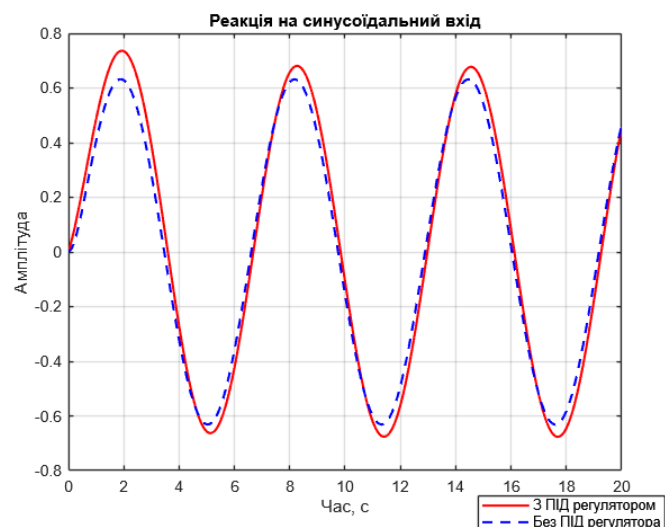


Рисунок 4.8 – Реакція системи на синусоїдальний вхід.

Графік (4.8) показує, що система з регулятором краще повторює форму вхідного сигналу з мінімальною фазовою затримкою, тоді як без регулятора відставання більше, а амплітуда нижча. Це свідчить про вищу точність відтворення і стабільнішу роботу з ПІД-регулюванням.

Для глибшого аналізу частотної поведінки системи побудовано Bode-діаграму, яка дозволяє оцінити амплітудні та фазові характеристики при різних частотах вхідного сигналу.

У верхній частині графіка (4.9) зображено залежність амплітуди (Magnitude, dB) від частоти. Видно, що система з ПІД-регулятором краще зберігає стабільність при високих частотах. Нижня частина графіка демонструє менший фазовий зсув, що вказує на кращу узгодженість між вхідним та вихідним сигналом.

На рисунку 4.9 можна побачити амплітудно-фазову характеристику системи з ПІД-регулятором та без ПІД-регулятора.

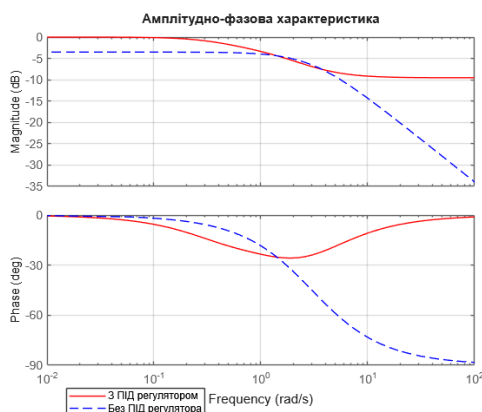


Рисунок 4.9 – Амплітудно-фазова характеристика системи.

Проведений аналіз підтверджує переваги використання ПІД-регулятора. Його застосування покращує швидкість і точність реакції системи, зменшує похибки та підвищує стійкість до збурень, забезпечуючи вищу ефективність автоматизованої пневматичної системи.

4.3 Охорона праці

Охорона праці та безпека життєдіяльності є важливою складовою під час проектування технічних систем. Робочі умови повинні бути безпечними, комфортними й відповідати чинним нормативам [16]. Праця інженера-проектувальника повинна організовуватись так, щоб кожен фахівець мав закріплене робоче місце, своєчасно був ознайомлений із функціональними

обов'язками та мав доступ до справного обладнання й інструментів. Основна увага приділяється створенню сприятливого мікроклімату, достатньому освітленню та зниженню дії шкідливих і небезпечних виробничих чинників.

До основних фізичних чинників, які можуть негативно впливати на працівника, належать відхилення показників мікроклімату, недостатній рівень освітленості, підвищений рівень шуму, іонізуючого випромінювання та електромагнітних полів. Також вплив мають розумова напруга, перенавантаження зорового аналізатора та нервово-емоційні перевантаження. Потенційно небезпечними вважаються ураження електричним струмом та пожежі, що можуть виникнути через несправності обладнання або нехтування технікою безпеки.

Робоче місце інженера має відповідати санітарно-гігієнічним вимогам щодо мікроклімату. Температурний режим у приміщенні в холодну пору року повинен бути в межах від 19 до 21 °С, при відносній вологості 55–62 % і швидкості руху повітря менше 0,1 м/с. Для забезпечення стабільного мікроклімату використовуються системи вентиляції, кондиціонування та опалення. Особливу увагу слід приділяти рівню освітлення. Робоче приміщення має бути оснащено загальним рівномірним освітленням, без різких тіней та відблисків, з постійною інтенсивністю світла. Для цього використовують світлодіодні лампи, що поєднують енергоефективність із хорошими світлотехнічними характеристиками. Освітленість має відповідати нормам – для офісних приміщень з ЕОМ вона становить близько 400 лк з урахуванням коефіцієнта запасу. У приміщенні, де інтенсивно використовується комп'ютерна техніка, рівень шуму не повинен перевищувати 50 дБА. Джерелами шуму є дроселі ламп, вентилятори комп'ютерів і кондиціонери. У проаналізованому приміщенні рівень шуму становить 40–45 дБА, що відповідає встановленим нормам і не потребує додаткових заходів із шумозахисту.

З техніки безпеки важливим є запобігання ураженню електричним струмом. Приміщення, де працює інженер, не відноситься до категорій із підвищеною або

особливою небезпекою. Тут відсутні струмопровідний пил, вологість понад 75 %, струмопровідні підлоги та інші несприятливі умови. Електрообладнання працює на напрузі до 1000 В, тому слідкувати за його справністю необхідно постійно. Перед початком роботи працівник повинен переконатися в цілісності проводки, заземлення та робочому стані пристроїв. Забороняється торкатися екранів або корпусів під напругою, користуватись несправними пристроями, класти на техніку сторонні предмети, а також очищати її від пилу у ввімкненому стані. У разі виявлення несправностей робота зупиняється, обладнання вимикається, і відповідальна особа повідомляється про проблему.

Щодо безпеки в надзвичайних ситуаціях, основним ризиком є пожежа. Приміщення належить до категорії Д, оскільки містить переважно негорючі матеріали у холодному стані. Вибухонебезпечні речовини, горючий пил або волокна тут відсутні. Найпоширенішими причинами пожежі є коротке замикання, неправильне користування нагрівальними приладами, несправність вентиляції або необережне поводження з вогнем. Щоб мінімізувати ризики, у приміщенні встановлена система пожежної сигналізації, яка своєчасно сповіщає про загрозу. Передбачено евакуаційний план, вивішений у доступному місці. Встановлено порошкові та вуглекислотні вогнегасники, які безпечні для електроніки та легко застосовуються в разі займання. Після використання вогнегасника приміщення провітрюється.

ВИСНОВКИ

У процесі виконання кваліфікаційної роботи було створено віртуальні моделі основних пневматичних компонентів – пневмоциліндра, розподільника, регулятора тиску та вологомасловідділювача – за допомогою інструментів 3D-моделювання (Blender) та симуляційного середовища FluidSim. На базі цих моделей реалізовано електропневматичну систему з PID-регулюванням, що забезпечила стабільну роботу без коливань і гідроударів, зменшення часу перехідного процесу на 64%, обмеження перерегулювання та повне усунення статичної похибки.

Проведені дослідження підтвердили доцільність використання віртуальних моделей як у навчальному процесі, так і на етапі прототипування сучасних автоматизованих виробничих систем. Візуалізація роботи пневматичних елементів і моделювання PID-регулятора сприяють кращому розумінню їхньої дії та дозволяють аналізувати поведінку системи за різних умов.

Отримані результати мають практичну цінність для підготовки спеціалістів у сфері пневмоавтоматики, а також можуть бути застосовані для швидкого створення прототипів і впровадження інновацій у виробництво згідно з принципами Industry 4.0. Запропонований підхід до створення цифрових двійників і симуляції роботи пневмосистем за допомогою сучасного програмного забезпечення підвищує ефективність навчання, скорочує витрати часу й ресурсів, а також сприяє цифровізації промислових процесів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ:

1. ДСТУ 3008:2015. Інформація та документація. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення. К.: ДП «УкрНДІЦД». 2016. 30 с.
2. Навчальний посібник з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для здобувачів вищої освіти денної і заочної форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»: Навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, О. І. Філіпенко, О. В. Токарева, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : Видавництво Іванченка І. С., 2023. – 151 с. ISBN 978-617-8059-94-1; DOI: 10.30837/978-617-8059-94-18.
3. Гончаренко Б. М., Осадчий С. І., Віхрова Л. Г., Каліч В. М., Дідик О. К. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. – Кіровоград : Видавець – Лисенко В. Ф., 2016. – 352 с.
4. Електропневмоавтоматичні приводи в автоматизованих системах керування: навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. П. Новоселов, О. В. Сичова ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2021. – 292 с. – ISBN 978-966-659-332-3; DOI: 10.30837/978-966-659-332-3
5. Hydraulic vs Pneumatic vs Electric Linear Actuators: Pros and Cons. – URL: <https://www.progressiveautomations.com/blogs/products/pros-cons-of-hydraulic-pneumatic-and-electric-linear-actuators>
6. Офіційний сайт Festo Україна // Festo Україна. – URL: <https://www.festo.com/ua/uk/>
7. Офіційний сайт Camozzi Group // Camozzi Group. – URL: <https://www.camozzi.ua/>

8. Пневматичне управління і пневмосистеми: що це – HYDROMARKET . – URL: <https://hydromarket.com.ua/ua/a462012-pnevmaticheskoe-upravlenie-pnevmosistemy.html>

9. Пневматичні пристрої та засоби автоматизації мехатронних систем : навч. посіб. / І. Ш. Невлюдов, Л. О. Кривопляс-Володіна, С. П. Новоселов, О. В. Сичова. – Харків : нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : Панов А. М. [вид], 2020. – 255 с. – ISBN 978-617-7859-58-0; DOI: 10.30837/978-617-7859-58-0

10. Richer E. A High Performance Pneumatic Force Actuator System: Part I–Nonlinear Mathematical Model / E. Richer, Y. Hurmuzlu . – URL: https://www.researchgate.net/publication/245373177_A_High_Performance_Pneumatic_Force_Actuator_System_Part_I-Nonlinear_Mathematical_Model

11. Żmuda M., Jackowski J. The Review of Selected Non-Pneumatic Tires Properties–Load Carrying Mechanism, Structure of Non-Pneumatic Tires // Materials. – 2025. – № 18. – P. 1566

12. Державна система промислових приладів і засобів автоматизації // Вікіпедія. – URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Державна_система_промислових_приладів_і_засобів_автоматизації

13. Методи сучасної теорії управління: Навч. посіб. / А. П. Ладанюк, В. Д. Кишенько, Н. М. Луцька, В. В. Іващук, Л. О. Влаченко. К.: Видавництво Ліра-К, 2019. – 368 с.

14. Тарасов А. А. Комп'ютерне моделювання принципів роботи пневматичного циліндра : тези доп. / А. А. Тарасов // Радіоелектроніка та молодь у XXI столітті : матеріали 29-го Міжнар. молодіж. форуму (Харків, 24–25 квіт. 2025 р.). – Т. 2. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – С. 11–12. – ISBN 978-966-659-406-1.

15. Тарасов А. А. Розроблення 3D-моделі пневматичного регулятора тиску / А. А. Тарасов // Автоматизація та приладобудування = Automation and Development

of Electronic Devices [Електрон. ресурс] : зб. студент. наук. статей. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1 (ADED-2025). – С. 13–17. – 262 с.

16. Методичні вказівки до лаб. робіт з дисципліни «Основи охорони праці» для студентів усіх напрямів та форм навчання. / Упоряд.: Т.Є. Стиценко, В.А. Айвазов, О.В. Мамонтов. – Харків: ХНУРЕ, 2018.– 120 с.