

УДК 681.513

ENGINEERING ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF POSITIONING ACTUATOR CONTROL SYSTEMS IN LOCKING AND REGULATING SYSTEMS OF PRODUCT PIPES

S. Volodin, V. Myronchuk, K. Vasylykivskiy, O. Zaporozhets
National University of Food Technologies

Key words:

*Shut-off and control system
Positioning actuator
Mathematical modelling
Optimisation
Adaptive algorithm
Food industry*

Article history:

Received 13.01.2025
Received in revised form
28.01.2025
Accepted 10.02.2025

Corresponding author:

V. Myronchuk
E-mail:
mironchukvg@ukr.net

Citation: Володін С. О., Мирончук В. Г., Васильківський К. В., Запорожець О. В. (2025). Інженерний аналіз та оптимізація систем керування позиційними приводами в запірно-регулювальних системах продуктопроводів. *Наукові праці НУХТ*, 31(1), 120—130.
DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-10

ABSTRACT

One of the key factors in the efficient operation of food industry enterprises is the rational organization of technological communications, in particular, the correct selection and configuration of shut-off and control networks. The relevance of the study lies in the need to develop effective methods for optimizing the operation of shut-off and control devices with positioning electropneumatic control systems, which will increase energy efficiency, control accuracy and stability of equipment operation.

The priority area of research related to the implementation of shut-off and control devices is to substantiate the optimal type of control loop equipped with different types of valves and positioning electropneumatic control systems by means of a comparative analysis of proportional and discrete distributors. The aim of the study was to develop a mathematical and physical model of shut-off and control systems with positioning actuators used in the food industry for further optimization of their operation. To achieve this goal, the following were developed: a structural model of the shut-off and control device in a product pipeline system with proportional control actuators to study the dynamic characteristics of the systems, as well as a numerical model that takes into account nonlinearities and variable operating conditions. The rational design and configuration parameters of the systems were identified to ensure minimum response time, high positioning accuracy, and low vibration levels. A comparative analysis of different types of distributors and control signal shapes showed that proportional distributors and smooth control signals provide the highest quality control.

DOI: 10.24263/2225-2924-2025-31-1-10

ІНЖЕНЕРНИЙ АНАЛІЗ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ПОЗИЦІЙНИМИ ПРИВОДАМИ В ЗАПІРНО- РЕГУЛЮВАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ПРОДУКТОПРОВОДІВ

С. О. Володін, В. Г. Мирончук, К. В. Васильківський, О. В. Запорожець
Національний університет харчових технологій

Одним із ключових факторів ефективної експлуатації підприємств харчової галузі є раціональна організація технологічних комунікацій, зокрема правильний вибір і конфігурація запірно-регулювальних мереж. Актуальність дослідження полягає в необхідності розробки ефективних методів оптимізації роботи запірно-регулювальних пристроїв (ЗРП) з позиційними електропневматичними системами керування, що підвищить енергоефективність, точність регулювання та стабільність роботи обладнання.

Пріоритетним напрямком досліджень, пов'язаних з імплементацією ЗРП, є обґрунтування оптимального типу контуру керування, оснащеного різними видами запірної арматури та позиційними електропневматичними системами керування, шляхом порівняльного аналізу пропорційних і дискретних розподільників. Метою дослідження є розробка математичної та фізичної моделі запірно-регулювальних систем з позиційними приводами, що застосовуються в харчовій промисловості, для подальшої оптимізації їхньої роботи. Для досягнення поставленої мети були розроблені: структурна модель ЗРП в системі продуктопроводу з приводами пропорційного керування для дослідження динамічних характеристик систем, а також чисельна модель, яка враховує нелінійності та змінні умови експлуатації. В рамках дослідження було визначено раціональні параметри конструкції та налаштування систем, що забезпечують мінімальний час відгуку, високу точність позиціювання та низький рівень вібрацій. Порівняльний аналіз різних типів розподільників і форм сигналів керування показав, що пропорційні розподільники та плавні сигнали управління забезпечують найвищу якість регулювання.

Ключові слова: запірно-регулювальні системи, позиційні приводи, математичне моделювання, оптимізація, адаптивні алгоритми, харчова промисловість.

Постановка проблеми. Одним із перспективних напрямків досліджень у галузі автоматизації харчових виробництв є вдосконалення систем керування запірно-регулювальними мережами. Вдосконалення цих систем потребує не лише розробки нових математичних моделей і систем керування, але й оптимізації параметрів наявних рішень. Розробка комплексних підходів до конструювання й енергоефективної експлуатації ЗРП є нагальним науковим завданням, вирішення якого сприятиме підвищенню енергоефективності, точності регулювання та стабільності роботи технологічного обладнання.

Актуальність дослідження полягає в розробці науково обґрунтованих підходів до оптимізації роботи запірно-регулювальних пристроїв з позиційними електропневматичними системами керування. Оптимізація роботи запірно-регулювальних систем передбачає комплексний підхід, що включає розробку детальних мате-

матичних моделей, які адекватно відображають нелінійні динамічні характеристики системи та її взаємодію з іншими елементами технологічного процесу. Для забезпечення високої точності та швидкодії системи необхідно провести порівняльний аналіз різних типів розподільників, зокрема пропорційних і дискретних, з метою визначення їх впливу на ключові показники ефективності, такі як точність позиціонування, швидкість відгуку та енергоефективність. Валідація параметрів системи керування передбачає підбір оптимальних значень коефіцієнтів регулятора та налаштування контурів зворотного зв'язку з метою досягнення бажаних динамічних характеристик. Для забезпечення стійкої роботи системи в умовах змінних зовнішніх впливів необхідно розробити адаптивні алгоритми керування, здатні до самонастроювання. Експериментальна верифікація розроблених моделей та алгоритмів на лабораторних стендах або промислових об'єктах є необхідним етапом для підтвердження їх ефективності та готовності до практичного застосування.

Отримані наукові результати створюють теоретичну основу для розробки нових методів оптимізації технологічних процесів у харчовій промисловості, що підвищить енергоефективність виробництва, покращить якість продукції та забезпечить стабільну роботу обладнання.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Оптимізація роботи продуктопроводів у мережах харчового виробництва, де регулювання рідинних потоків здійснюється за допомогою пропорційних пневматичних приводів, є актуальним завданням. Різноманітність властивостей продуктів, що транспортуються, вимагає індивідуального підходу до конструювання та налаштування пневмосистем. Необхідність забезпечення оптимальних параметрів транспортування, таких як швидкість потоку, тиск і витрата, обумовлена специфікою кожної групи продуктів. Наявні на ринку пневмотранспортні системи часто не забезпечують необхідної ефективності при зміні характеристик продукту, що підкреслює важливість детального моделювання процесів, які відбуваються в таких системах. Це дасть змогу розробити універсальні й адаптивні рішення, здатні забезпечити стабільну роботу продуктопроводів за різних умов (Carneiro, & Almeida, 2012). Застосування клапанних систем з індивідуальним приводом і мікропроцесорним керуванням у сучасних машинах для пакування харчових продуктів сприятиме досягненню високої точності дозування та гнучкості налаштування технологічних параметрів. (Гавва, & Кривошляс-Володіна, 2023). Емпіричні підходи до розрахунку систем пневмотранспорту не дають змоги адекватно оцінити динамічну поведінку двофазного потоку при різних режимах роботи запірно-регулювальних елементів (Jones, & Williams, 2008). Нелінійний характер процесів пневмотранспорту, відображений у системі диференціальних рівнянь, ускладнює застосування універсальних методів аналізу. Відсутність точних аналітичних розв'язків для опису взаємодій частинок підкреслює важливість фізичного моделювання для розробки ефективних систем керування рухом робочих органів технологічних машин. (Ismail, & Kuang, Yu, 2021). У праці (Peng, & Doroodchi, 2020) розроблено математичну модель процесу пневмотранспорту зерна, що дає змогу прогнозувати знос обладнання за різних режимів роботи. На основі результатів моделювання запропоновано алгоритми керування, які забезпечують оптимальну роботу приводів позиціонування в зерноочисних комплексах. Дослідження (Željko, & Grbavčić, 2006) виявило суттєві розбіжності між теоретичними моделями керування запірно-регулювальними

пристроями та реальними процесами пневмотранспорту, пов'язані з неврахуванням критичних швидкостей потоку в вертикальних ділянках трубопроводів. Це актуалізує необхідність розробки нових, більш адекватних моделей для оптимізації роботи систем керування запірно-регулювальними комплексами. Дослідження (Yan, & Cheng, 2024) присвячено оптимізації процесу пневматичного транспортування за допомогою обертового потоку, створеного запірно-регулювальним елементом. Експериментально доведено, що застосування обертальної лопатки ЗРП перед входом частинок знижує енергоспоживання системи на 9,8% при одночасному підвищенні ефективності транспортування. Аналіз спектрів потужності та автокореляційних функцій пульсацій швидкості підтвердив стабілізацію руху дисперсної фази в умовах обертового потоку. Однак масштабування отриманих результатів на промислові установки потребує додаткових досліджень, оскільки геометричні характеристики та режимні параметри реальних систем можуть суттєво відрізнятися від лабораторних умов. Обмеженість запропонованого методу може призвести до неперевіраних результатів при оцінці продуктивності, споживання стисненого повітря та стабільності подачі продукту внаслідок неврахування низки суттєвих факторів. (Ji, & Nao, 2022).

У (Gan, & Yu, 2016) запропоновано математичну модель, що описує поведінку двофазного потоку сипкого матеріалу в пневмосистемі з урахуванням геометричних змін трубопроводу. Модель базується на визначенні гідравлічних опорів різних конструктивних елементів та дає змогу оцінити вплив звужень, проте не враховує впливу таких факторів, як абразивність матеріалу, електростатичні ефекти та вплив системи керування на процес транспортування, так само, як і в дослідженні (Pan, & Liu, 2021). Проведені чисельні експерименти з використанням розробленої моделі дали змогу отримати характерні профілі швидкості й тиску вздовж траєкторії руху частинок (Rallabandi, & Apparao, 2023). Однак у запропонованій моделі частинка розглядалася як матеріальна точка, що не дає змоги врахувати вплив змін фізико-хімічних властивостей середовища на траєкторію руху та взаємодію частинок між собою під час тестування різних режимів керування ЗРП (Li, & Tang, 2023).

Запропонована пропорційна система керування в новому прототипі дозатора ліків дає змогу досягти високої точності дозування із забезпеченням зміни необхідної дози продукту (Ahadani, & De Silva, 2012). Описаний підхід (Liu, & Shao, 2023) розкриває динаміку роботи пропорційного клапана методом моделювання із впливом робочого тиску на рух золотника і подальшу турбулізацію робочого середовища. Однак модель не враховує впливу нелінійності системи керування, як і методика керування, розроблена в (Saha, & Gangopadhyay, 2014).

Результати проведених досліджень щодо оптимізації режимів роботи продуктопроводів і регулювання потоку продукції ЗРП не дають змоги сформулювати чіткі рекомендації для створення нових зразків ЗРП із пропорційними системами керування. Отримані дані підтвердили необхідність проведення додаткових досліджень для розробки ефективних мехатронних систем керування потоком сипких харчових продуктів із використанням нових структурних елементів системи керування ЗРП.

Метою дослідження є розробка фізико-математичної моделі для обґрунтування роботи позиційних приводів у системах керування потоком продуктів для подальшого аналізу їх динамічних характеристик і визначення оптимальних параметрів керування ЗРП.

Матеріали і методи. Матеріалами дослідження обрано ЗРП технологічного мехатронного модуля в системі продуктопроводу. Предметом дослідження є процеси в системі програмно керованого в робочому продуктопроводі ЗРП та його математичні моделі на основі компонентів, реалізованих у програмі Simulink за допомогою блоків та макроблоків. Пропорційно керовані запірно-регулювальні пристрої в системі продуктопроводу - це спеціальні механізми, які призначені для точного регулювання потоку речовини (рідини, газу, сипучих матеріалів) всередині трубопроводів (Amirante, & Lippolis, 2006). Їхньою основною функцією є забезпечення плавного та пропорційного змінення прохідного перерізу трубопроводу відповідно до заданого сигналу керування.

Використані методи дослідження спираються на досягнення в галузі гідродинаміки систем керування, зокрема на праці (Amirante, & Tamburrano, 2014; Amirante, & Catalano, 2007). Також застосовано математичний апарат звичайних диференціальних рівнянь, адаптований до ПП Matlab.

Під час дослідження, з метою оптимізації процесу дозування, було проведено детальний аналіз статичних і динамічних характеристик мехатронного модуля, включаючи дослідження таких параметрів, як час відгуку, точність позиціонування та стабільність за методикою (Yang, & Hu, 2011). Для моделювання динамічної поведінки пропорційно регулювальних клапанів у системах продуктопроводу враховано нелінійну залежність часу затримки від положення золотника клапана. Використання програмного комплексу MATLAB/Simulink дало змогу провести детальний аналіз впливу різних факторів на динаміку системи. Порівняння результатів моделювання з експериментальними даними показало високу точність запропонованої моделі.

Отримані результати можуть бути використані для розробки адаптивних систем керування, які забезпечують оптимальну роботу клапана в широкому діапазоні умов (Bram, & Yang, 2020). Оптимізація конструктивних параметрів модуля ЗРП дала змогу досягти значного покращення метрологічних характеристик системи.

Основними припущеннями під час моделювання (Choudhury, & Shah, 2005) є: рідка харчова продукція за фізико-механічними властивостями наближена до ньютонівських; режими керування сформовані на базі зміни тиску з різними законами; струмове навантаження $I_{min}...I_{max}=4...20$ мА, частота подачі повітря 0,1...1 Гц. Теоретичне дослідження ЗРП в структурі продуктопроводу підкріплено математичним моделюванням у середовищі Simulink, ґрунтуючись на принципах газодинаміки, гідравліки, теорії систем.

Викладення основних результатів дослідження. Для дослідження продуктопроводу підведення рідких харчових продуктів до системи живильника дозувально-фасувальної машини було розроблено модульні системи управління, що реалізують різноманітні алгоритми керування (рис. 1). З метою підвищення точно-

сті та швидкодії систем керування ЗРП розроблено комплекс математичних моделей, які відображають нелінійні динамічні процеси в запірно-регулювальних системах різного типу. Оптимізація динамічних характеристик технологічних процесів тісно пов'язана з точністю та стабільністю роботи запірно-регулювальних пристроїв (ЗРП).

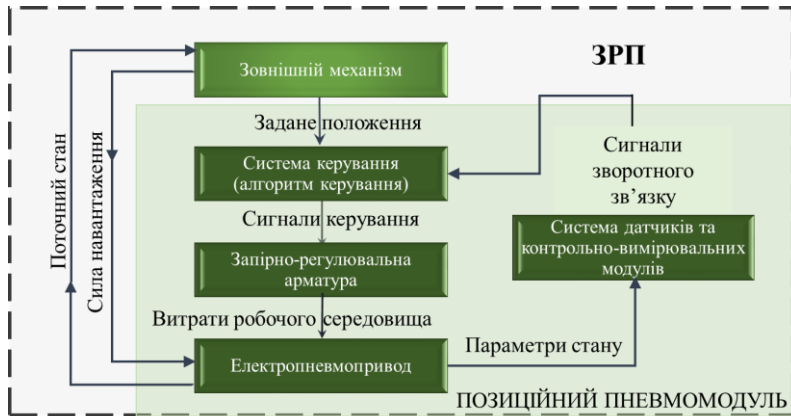


Рис. 1. Схема компонентування пневматичного модуля керування та зовнішнього механізму запірно-регулювального пристрою

Проте ефективність таких систем значною мірою залежить від конструктивних особливостей використаного розподільника, який безпосередньо впливає на динаміку процесу закриття запірної арматури. Зокрема, час спрацювання дискових заслінок, як ключового елемента ЗРП, суттєво впливає на витратні характеристики робочих середовищ.

Нестабільність цього параметра може призводити до неконтрольованих коливань у технологічних контурах, негативно впливаючи на якість продукції. Для розв'язування цієї проблеми широко застосовують позиційні електропневматичні приводи, що забезпечують плавне регулювання положення запірної арматури (рис. 1).

За допомогою розробленого програмного комплексу проведено деталізоване чисельне моделювання роботи запірно-регулювального пристрою продуктопроводу, що оптимізувало режими його керування. Типовий приклад такого пристрою наведено на рис. 2.

Дослідна модель позиційного приводу ЗРП складається з комп'ютерної моделі та реального модуля (на базі дискової заслінки), змонтованого в структурі продуктопроводу (рис. 3). Модель, реалізована програмно, забезпечує гнучке керування процесом дозування шляхом зміни параметрів електромагнітних клапанів. Для підвищення точності дозування враховані статичні та динамічні характеристики системи. Розроблені схеми та алгоритми дають змогу реалізувати різні закони зміни тиску в системі, що забезпечує можливість регулювання дози продукту.

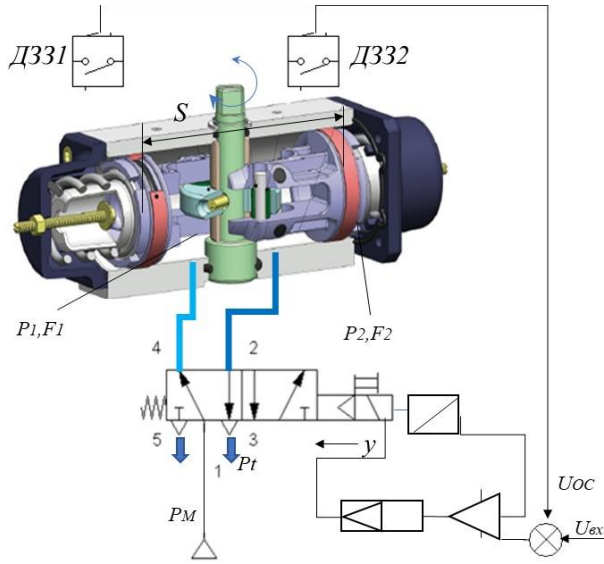


Рис. 2. Принципова структура керування ЗРП на основі пропорційного електропневматичного розподільника та поворотного кулачкового приводу: РМ — тиск підвідної пневматичної мережі; P1 — тиск магістральний поршневої камери; Pt — тиск відвідної пневматичної мережі (вихлоп); $U_{вх}$ — керуючий вхідний сигнал; U_{oc} — сигнал для зворотного зв'язку; ДЗЗ — датчик зворотного зв'язку (пропорційний); ДЗЗ1 і ДЗЗ2 — датчики зворотного зв'язку дискретні

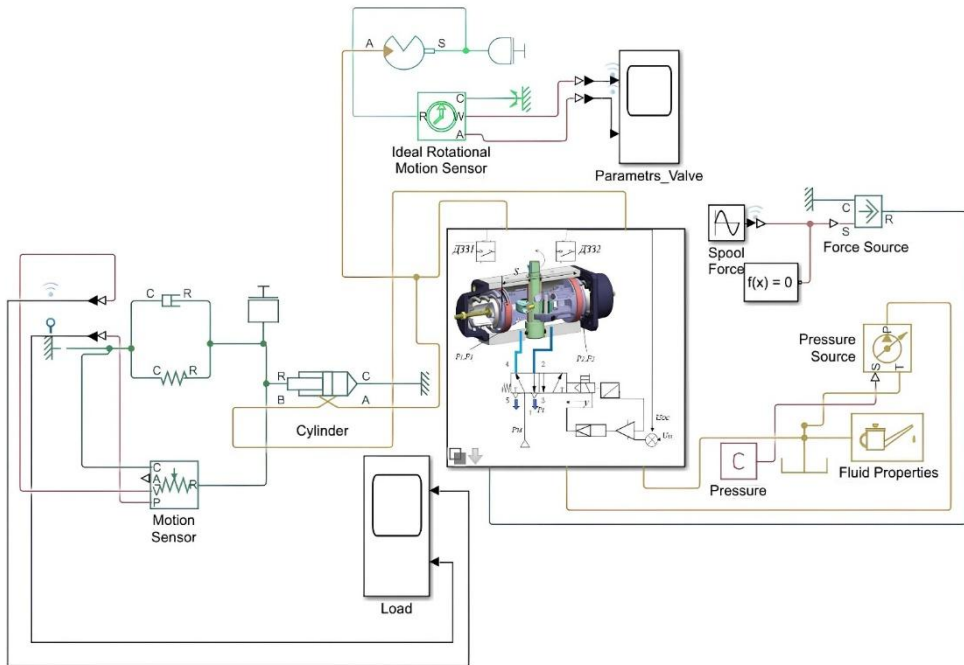


Рис. 3. Модель дослідження динаміки ЗРП в ПП Simulink (Simscape)

Модель (рис. 3) є деталізованим зображенням мехатронного модуля в структурі графічного представлення фізичної системи. Розроблена модель ЗРП забезпечує моделювання та аналіз поведінки привода і регульованого рідинного продукту (40-відсотковий розчин сахарози при температурі 40 °С, абсолютна в'язкість 3,26 сП) за допомогою математичних рівнянь. Модель ЗРП, інтегрована в середовищі MATLAB/Simulink, надає компоненти для дослідження та розробки пропорційних систем керування, які моделюються від простих механічних до складних електромеханічних, електропневмогідравлічних. Під час тестування моделі отримані параметри динамічного регулювання потоку рідини в продуктопроводі. Система керування, реалізована у вигляді струмової петлі 4—20 мА, забезпечує точне дозування шляхом використання зворотного зв'язку за тиском і витратою. Основні компоненти та їх функції: електромагнітний клапан, який під дією електричного сигналу керує потоком стисненого повітря до виконавчого механізму; поворотний кулачковий привід, що перетворює рух клапана на обертальний рух заслінки, змінюючи таким чином прохідний переріз трубопроводу; датчик тиску, який вимірює тиск у системі й передає сигнал зворотного зв'язку на контролер; витратомір, який вимірює витрату рідини, що протікає через трубопровід; контролер, який приймає сигнали від датчиків, порівнює їх із заданим значенням і генерує сигнал керування для електромагнітного клапана. Сигнал зворотного зв'язку від датчиків тиску та витрати порівнюється із заданим значенням у контролері (рис. 4).

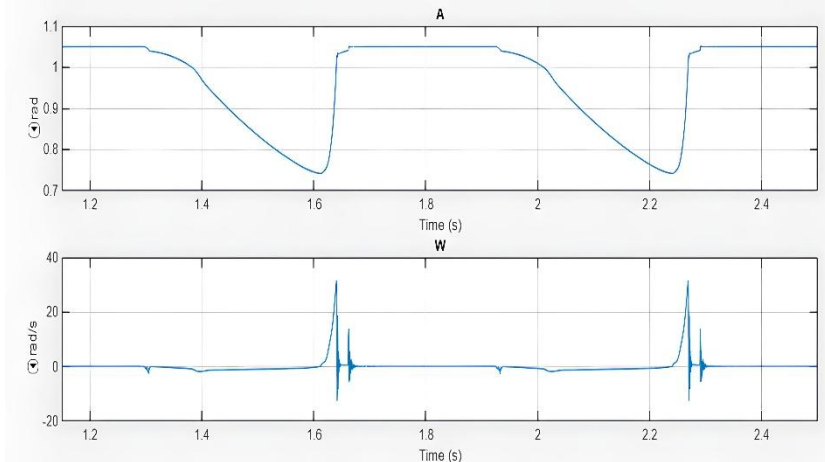


Рис. 4. Характеристика зміни кінематичних параметрів запірної елемента (дискової заслінки) в структурі ЗРП

Відхилення між фактичним і заданим значеннями використовується для корекції сигналу керування електромагнітним клапаном. Це дає змогу підтримувати необхідний рівень тиску та витрати в системі. Модель враховує динамічні характеристики системи, такі як інерційність виконавчих механізмів та затримки в передачі сигналів, забезпечуючи високу точність регулювання завдяки використанню зворотного зв'язку. Модель дає змогу змінювати параметри системи та реалізувати різні закони регулювання. Для підвищення точності дозування в моделі вра-

ховані статичні та динамічні характеристики системи. Розроблені схеми й алгоритми сприяють реалізації різних законів зміни тиску в системі, що забезпечує можливість регулювання потоку продукту в межах зміни кута від 0 до 1,57 радіана. На рис. 4 наведено один із можливих етапів зміни кута повороту диска ЗРП від 42 град до 60 град, із зміною значення кутової швидкості від 59 рад/с на етапі запуску (розгону), до 29 рад/с під час усталеного режиму роботи ЗРП.

Під час моделювання роботи сідельного клапана (рис. 5) отримані характеристики показали хід штока P , зв'язаного із запірним елементом (сідлом), а також характеристику зміни швидкості V перемикання сідла в умовах зовнішнього навантаження опорної поверхні.

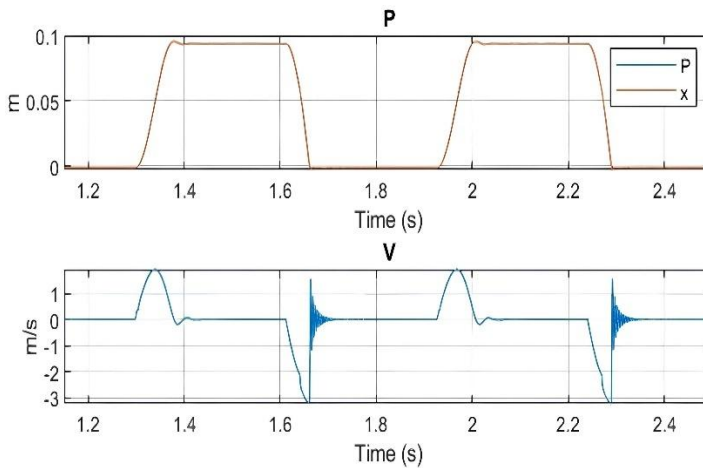


Рис. 5. Характеристика зміни тиску P у перехідній частині сідельного клапана та зміни швидкості V перемикання запірного елемента (поршня) в структурі ЗРП

Розроблена (рис. 3) в Simulink модель дає змогу проводити віртуальні експерименти, оптимізувати параметри системи (рис. 4, 5) та сформувати нові алгоритми керування без необхідності проведення дорогих і тривалих фізичних експериментів. Розроблена модель може бути використана для проектування та оптимізації систем пневмотранспорту, розробки систем автоматичного керування технологічними процесами, навчання студентів та інженерів. Модель запірно-регулювального пристрою дискової поворотної заслінки, реалізована в Simulink, є ефективним інструментом для дослідження та розробки систем автоматичного керування пневматичними приводами. Завдяки своїй гнучкості та точності вона може бути використана для вирішення широкого кола завдань у різних галузях промисловості. Можливі напрямки подальших досліджень: розширення функціональності моделі, додавання нових датчиків, виконавчих механізмів та алгоритмів керування; аналіз стійкості системи, дослідження впливу різних факторів на стійкість роботи системи; оптимізація параметрів системи, підбір оптимальних значень параметрів для досягнення максимальної точності й швидкодії. Ця модель є важливим кроком у розвитку технологій автоматизації та підвищення ефективності виробничих процесів.

Висновки

1. Розроблено чисельну експериментальну модель ЗРП із позиційним приводом у запірно-регулювальних системах продуктопроводу для дослідження режимів керування в структурі ПП Simulink для дослідження фізико-механічних характеристик запірного елемента в структурі продуктопроводу.

2. За допомогою програми бібліотеки операторів Simscape описано модель з урахуванням нелінійності процесу керування ЗРП під впливом зовнішніх збурень на кінематику і динаміку запірних елементів.

3. Опрацьовано математичну модель, яка описує динаміку процесу регулювання запірною арматурою (диск, поршень) у трубопроводах для транспортування рідких харчових продуктів. Модель у структурі Simscape базується на системі диференціальних рівнянь, що враховують комплексні гідродинамічні процеси, взаємодію запірних елементів з рідиною та вплив зовнішніх збурень. Особливу увагу приділено моделюванню поведінки пропорційних елементів приводу, що забезпечують точне налаштування системи. Встановлено оптимальні параметри системи, які гарантують ефективне керування процесом транспортування та відповідають вимогам технічного регламенту.

4. Аналіз результатів моделювання довів високу ефективність запропонованого підходу до чисельного моделювання роботи запірно-регулювальних систем у харчовій промисловості. Порівняльний аналіз різних типів розподільників показав перевагу пропорційних розподільників і плавних сигналів керування, які забезпечують найвищу якість регулювання. Запропонований метод синтезу систем автоматичного керування запірно-регулювальними пристроями передбачає використання адаптивних алгоритмів, дає змогу забезпечити стійку роботу системи в умовах змінних зовнішніх впливів та підвищити загальну ефективність виробництва.

Література

Гавва, О. О., Кривошляк-Володіна, Л. О. (2023). Обґрунтування режимів роботи адаптронних функціональних модулів дозування рідкої продукції ваговим способом. *Наукові праці НУХТ*, 29(5), 66—76. doi:10.24263/2225-2924-2023-29-5-7.

Amirante, R., Del Vescovo, G., & Lippolis, A. (2006). Flow forces analysis of an open center hydraulic directional control valve sliding spool. *Energy Conversion and Management*, 47(1), 114—131. doi: 10.1016/j.enconman.2005.03.010 1.

Amirante, R., & Tamburrano, P. (2014). Experimental and numerical analysis of cavitation in hydraulic proportional directional valves. *Energy Conversion and Management*, 87, 208—219. doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.031.

Amirante, R., & Catalano, L. A. (2007). Evaluation of the flow forces on a direct (single stage) proportional valve by means of a computational fluid dynamic 1 analysis. *Energy Conversion and Management*, 48(3), 942—953. doi: 10.1016/j.enconman.2006.08.024.

Ahadani, M. A., De Silva, L. C. (2012). Low Cost Robotic Medicine Dispenser. *Procedia Engineering*, 41, 202—209. doi: 10.1016/j.proeng.2012.07.163 1.

Bram, M. V., & Yang, Z. (2020). Analysis and Modeling of State-Dependent Delay in Control Valves. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 5777—5782. doi: 10.1016/j.ifacol.2020.12.1613.

Carneiro, J. F., & Almeida, F. G. (2012). A macromicro motion servopneumatic device. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: *Journal of Systems and Control Engineering*, 226(6). doi: 10.1177/0959651812439261.

- Choudhury, M., & Shah, S. (2005). Modelling valve stiction. *Control Engineering Practice*, 13(5), 641—658. doi: 10.1016/j.conengprac.2004.05.005.
- Mark, J., & Kenneth, W. (2008). Predicting the mode of flow in pneumatic conveying systems. A review. *Particology*, 6. doi:10.1016/j.partic.2008.05.003.
- Ismail, N. I., Kuang, S., Yu, A. (2021). CFD-DEM study of particle-fluid flow and retention performance of sand screen. *Powder Technology*, 378, A, 410—420. doi:10.1016/j.powtec.2020.10.012.
- He, Z., Li, T., Huang, Z., Kuang, S., Yu, A. (2018). Investigation on vertical plug formation of coarse particles in a non-mechanical feeder by CFD-DEM coupling method. *Powder Technology*, 332, 79—89. doi:10.1016/j.powtec.2018.03.055.
- Peng, Z., Doroodchi, E. (2020). Heat transfer modelling in Discrete Element Method (DEM)-based simulations of thermal processes: Theory and model development 1. *Progress in Energy and Combustion Science*, 79, 100. doi:10.1016/j.peccs.2020.100847.1.
- Ji, Y., Hao, Y. (2022). Particle flow regime in a swirling pneumatic conveying system. *Powder Technology*, 401, 117. doi: 10.1016/j.powtec.2022.117328.
- Pan, T., & Liu, P. (2021). Multi-scale analysis on particle dynamic of vertical curved 90° bend in a horizontal-vertical pneumatic conveying system. *Advanced Powder Technology*, 32(8), 313—314. doi: 10.1016/j.apt.2021.07.002.
- Rallabandi, I. R., & Apparao, D. (2023). Development of a color-code sorting machine operating with a pneumatic and programmable logic control. *Materials Today: Proceedings*. doi: 10.1016/j.matpr.2023.05.150.
- Liu, F., & Shao, M. (2023). Transient flow analysis on opening process of pneumatic gas proportional valve with two-solenoid valve. *Flow Measurement and Instrumentation*, 89, 282—291. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2022.102291.
- Saha, B. K., & Gangopadhyay, T. (2014). Dynamic simulation of a pressure regulating and shut-off valve. *Computers & Fluids*, 101, 233—240. <https://doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.06.011>.
- Yan, F., Cheng, S. (2024) Particle motion characteristics on the rotational flow pneumatic conveying of horizontal-vertical pipeline. *Chemical Engineering Research and Design*, 210, 452—468.
- Yang, Q., & Hu, J. (2011). Numerical Simulation of Fluid Flow inside the Valve. *Procedia Engineering*, 23, 543—550. doi: 10.1016/j.proeng.2011.11.2545.
- Željko, B. Grbavčić, Radmila, V. (2006) Arsenijević, Prediction of the choking velocity and voidage in vertical pneumatic conveying of coarse particles. *Powder Technology*, 161(1), 1—9. doi: 10.1016/j.powtec.2005.08.013.