

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістр

Освітній рівень

Удосконалений метод керування дозатором рідини

Назва теми

КВРАКІТР.2023199.01.02.ПЗ

Рівень вищої освіти магістр

Галузь знань 17 «Електроніка, автоматизація та електронні комунікації»

Шифр, назва

Спеціальність 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Шифр, назва

Освітня програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Назва

Виконав:

студент II курсу, група АКІТРм-23-1


Підпис

Володимир КОЛЕЙКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник


Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Нормоконтролер


Підпис

Людмила КОРЕЦЬКА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

До захисту допускаю:
зав. кафедри АКІТтаР


Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

« 30 » грудня 2024 р.

Хмельницький 2024

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет *інформаційних технологій*

Кафедра *автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки*

Рівень вищої освіти *другий (магістерський)*

Галузь знань *17 – Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

Спеціальність *174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*

Освітня програма *Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри АКИТтаР

Валерій МАРТИНЮК

01 вересня 2024р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Колейку Володимиру Вячеславовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1 Тема роботи Удосконалений метод керування дозатором рідини

Керівник роботи Мартинюк Валерій Володимирович, д.т.н., професор

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, учене звання

Затверджено наказом ректора університету від 26.08.2024 р. №60

2 Строк подання студентом роботи на кафедру 02.12.2024р.

3 Вихідні дані до роботи

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування дозатором рідини

Предмет дослідження: удосконалений метод керування дозатором рідини


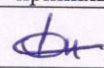

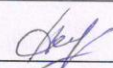
4 Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити)

Вступ. Огляд літературних джерел та патентних даних. Математична модель процесу керування дозатором рідини. Імітаційна модель удосконаленого методу керування дозатором рідини. Експериментальне дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини. Висновки.

5 Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень)

презентаційні матеріали (слайди)

6 Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Антиплагіат	Федула М.В., доцент кафедри АКИТтаР		
Нормоконтроль	Корецька Л.О., доцент кафедри АКИТтаР		

7 Дата видачі завдання 01 вересня 2024р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

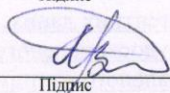
Назва розділу кваліфікаційної роботи	Строк виконання	Примітка
1. Вступ	10.09.2024р.	Виконано
2. Огляд літературних джерел та патентних даних	25.09.2024р.	Виконано
3. Математична модель процесу керування дозатором рідини	15.10.2024р.	Виконано
4. Імітаційна модель удосконаленого методу керування дозатором рідини	30.10.2024р.	Виконано
5. Експериментальне дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини	10.11.2024р.	Виконано
6. Висновки	15.11.2024р.	Виконано
7. Оформлення пояснювальної записки	20.11.2024р.	Виконано
8. Оформлення презентаційних матеріалів	1.12.2024р.	Виконано

Студент


Підпис

Володимир КОЛЕЙКО
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Валерій МАРТИНЮК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Удосконалений метод керування дозатором рідини».

Автор роботи: Колейко Володимир Вячеславович.

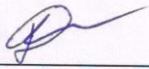
Керівник роботи: Мартинюк Валерій Володимирович.

Пояснювальна записка: 89 с., 68 рис., 8 табл., 1 дод., 80 джерел.

Графічна частина: 12 презентаційних слайдів.

**УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ,
ОПЕРАЦІЙНА СИСТЕМА РОБОТІВ, РОБОЧИЙ ПРОСТІР.**

Мета роботи: розробка удосконаленого методу керування дозатором рідини. Розроблено удосконалений метод керування дозатором рідини, особливістю якого є врахування впливу температури голки, рівня рідини в шприці, часу дозування, стисливості рідини, а також поведінки рідини на швидкість потоку.



Підпис студента

02.12.2024

Дата

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ	5
1.1 Особливості дозування рідини	5
1.2 Огляд методів дозування рідини	9
1.3 Висновки до першого розділу.....	21
2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОТОКУ РІДИНИ У ДОЗАТОРІ.....	22
2.1 Математична модель рідини для дозування.....	22
2.2 Моделювання процесів дозування з позитивним переміщенням	30
2.3 Висновки до другого розділу	42
3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ	43
3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу керування дозатором рідини	43
3.2 Імітаційна модель удосконаленого методу керування дозатором рідини	49
3.3 Висновки до третього розділу.....	62
4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ	64
4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини.....	64
4.2 Алгоритм та програмне забезпечення роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини.....	73
4.3 Висновки до четвертого розділу.....	79
ВИСНОВКИ.....	81
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	82
Додаток А Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»).....	89

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні вимоги до точності, ефективності та надійності дозування рідин зумовлюють необхідність удосконалення систем керування для забезпечення високої якості процесів.

Розробка удосконаленого методу керування дозволяє підвищити продуктивність дозаторів, покращити їхню інтеграцію в автоматизовані системи керування (наприклад, у складі розумних виробничих ліній) та забезпечити гнучкість у налаштуванні параметрів для роботи з різними рідинами.

Тому, розробка удосконаленого методу керування дозатором рідини, є дійсно актуальною задачею.

Метою роботи є розробка удосконаленого методу керування дозатором рідини.

Відповідно до поставленої мети необхідно вирішити **завдання:**

- виконати огляд літературних джерел та патентних даних про методи керування дозаторами рідин;
- розробити математичну модель процесу керування дозатором рідини;
- розробити алгоритм та програмну реалізацію удосконаленого методу керування дозатором рідини;
- розробити імітаційну модель удосконаленого методу керування дозатором рідини.

Об'єктом дослідження є процес керування дозатором рідини.

Предметом дослідження є удосконалений метод керування дозатором рідини.

Методи досліджень. При вирішенні поставлених завдань у роботі були використані методи математичного моделювання для опису динаміки рідин у системах дозування, створення моделей роботи дозатора, враховуючи гідродинамічні та термодинамічні властивості рідини; оптимізаційні методи для

підбору оптимальних параметрів роботи дозатора з метою підвищення точності та продуктивності.

Наукова новизна отриманих результатів:

У результаті проведеного дослідження розроблено удосконалений метод керування дозатором рідини.

1 ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ТА ПАТЕНТНИХ ДАНИХ

1.1 Особливості дозування рідини

Дозування рідини – це метод, за допомогою якого рідкі матеріали подаються точно контрольованим способом. Він широко використовується в таких сферах, як складання електроніки [1-3] та мікроелектромеханічних систем (англійською мовою Micro-Electro-Mechanical Systems MEMS) [4, 5].

Для таких систем необхідно точно дозувати малі об'єми рідин (наприклад, епоксидної смоли, клею, інкапсулянтів, гідрогелю тощо), які зазвичай варіюються від мікролітрів до нанолітрів.

Системи дозування рідин можна розділити на три категорії: з бар'єром і заповненням, з куполоподібним покриттям та із заповненням під основою, як показано на рисунку 1.1.

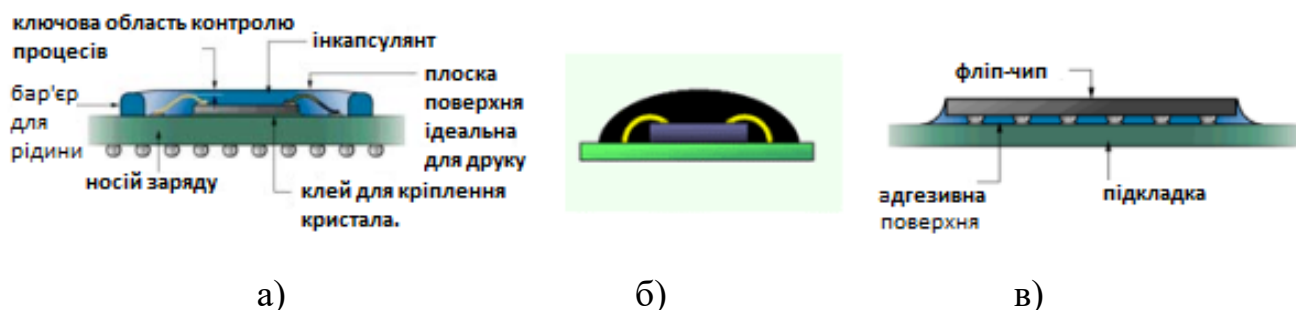


Рисунок 1.1 – Класифікація систем дозування рідин:

- а) дозування рідини з бар'єром і заповненням;
- б) дозування рідини з куполоподібним покриттям;
- в) дозування рідини із заповненням під основою

У системі дозування рідини з бар'єром і заповненням, який показано на рисунку 1.1 (а), матриця та провідники між матрицею і підкладкою повинні бути укладені в оболонку, щоб захистити їх від будь-якого впливу навколишнього середовища.

З цією метою процес дозування рідини з бар'єром і заповненням складається з двох етапів.

1. Спочатку навколо краю порожнини або матриці наноситься інкапсулянт з високою в'язкістю для формування бар'єру.

2. Наноситься інкапсулянт з меншою в'язкістю для заповнення простору або порожнини, обмеженого матеріалом бар'єру.

Обидва етапи є критично важливими для отримання кінцевої висоти форми і плоскості поверхні.

Система дозування рідини з куполоподібним покриттям використовується для захисту кристалу та з'єднань без необхідності використання процесу запечатування.

Система дозування рідини з куполоподібним покриттям використовується для безпосереднього прикріплення корпусів, таких як мікросхеми на платах і корпусів на стрічкових носіях.

У системах дозування рідини з куполоподібним покриттям інкапсулянт наноситься на верхню частину компонентів або матриць, покриваючи і захищаючи з'єднання.

Через відсутність процесу ущільнення, контроль кількості матеріалу, що дозується, відіграє важливу роль у формуванні кінцевої форми та якості упаковки. Кількість повинна бути достатньою, щоб покрити обрану область інкапсуляції, і не надмірною, щоб не забруднити інші компоненти на друкованій платі (англійською мовою Printed Circuit Board PCB). Тому кількість матеріалу необхідно точно контролювати саме в цьому випадку.

У виробництві електроніки розмір компонентів постійно зменшується для більш ефективного використання ресурсів, а також для того, щоб вони були більш зручними для споживачів.

Прикладами, які відображають ці тенденції, є кремнієвий чіп, який колись містив сотні транзисторів, а тепер – мільйони, а також комп'ютери розміром з долоню порівняно з комп'ютерами розміром зі склад сорок років тому. Зі зменшенням розміру мікросхеми та збільшенням кількості входів/виходів

(вводів/виводів) стає складніше застосовувати технологію дротяного з'єднання для пакування.

Одним з рішень є використання технології фліп-чипів, яка показана на рисунку 1.2.

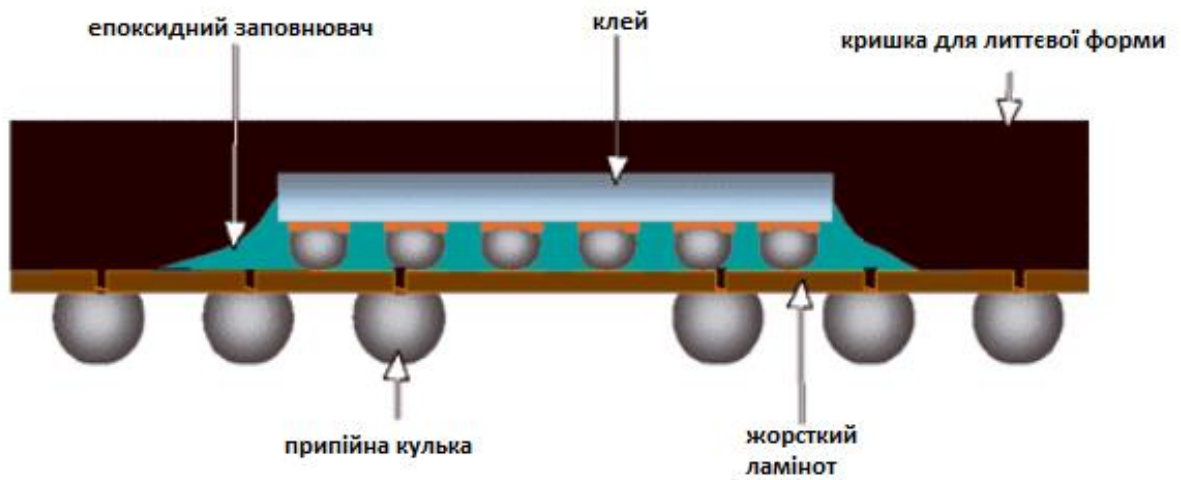


Рисунок 1.2 – Технологія фліп-чипів

У технології фліп-чипів матриця з'єднується з підкладкою за допомогою струмопровідних виступів, які можна побачити на рисунку 1.3.

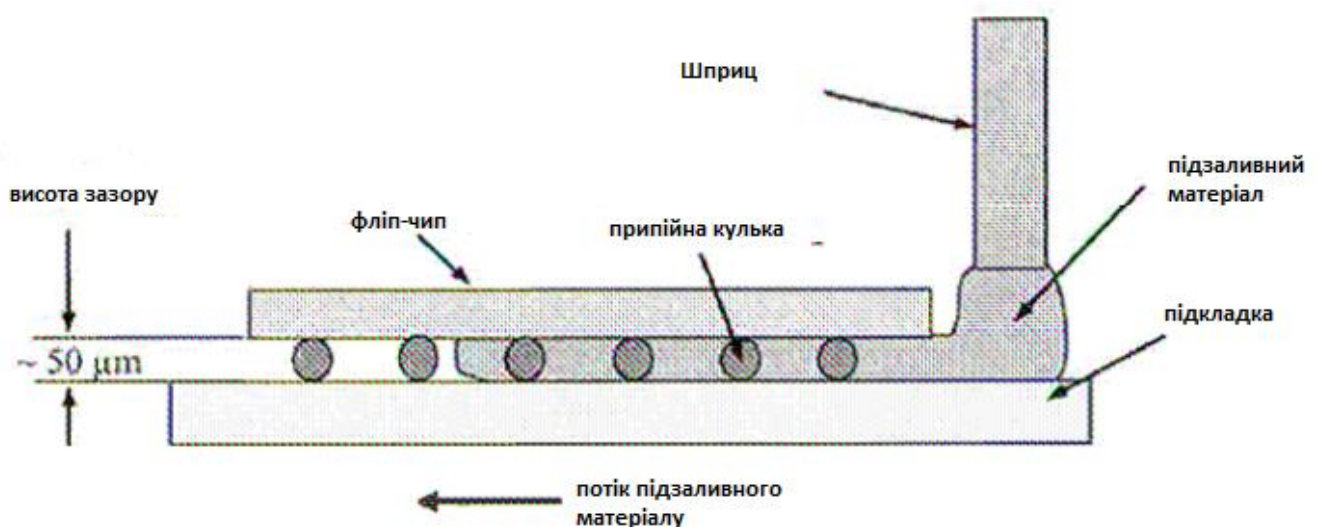


Рисунок 1.3 – Процес заповнення під основою у технології фліп-чипів

Для того, щоб зменшити напруження теплового розширення, викликане різницею в коефіцієнті теплового розширення (КТР) між матрицею та підкладкою, зазор (зазвичай 50 мкм) [6] між ними потрібно заповнити інкапсулятором.

Цей процес називається заповненням під основою. На рисунку 1.3 схематично показано процес дозування інкапсулянта для процесу заповнення під основою. Капсула подається з одного боку матриці, а потім втягується капілярними силами, заповнюючи проміжок між чіпом і підкладкою.

Одним з потенційних дефектів процесу заповнення під основою є порожнечі, які утворюються між матрицею та підкладкою [7]. Однією з можливих причин дефекту є те, що кількість інкапсулянта, що дозується, може бути меншою, ніж очікується.

Це особливо актуально для випадків, коли зазор для заповнення вузький, діаметр горбиків припою малий, а кількість горбиків велика. Щоб вирішити цю проблему, необхідно добре контролювати кількість інкапсуляту, що дозується.

З наведеного вище видно, що точне дозування є ключовим кроком у пакувальній індустрії електроніки. Зі зменшенням розміру компонентів, технології дозування повинні відповідно вдосконалюватися, щоб підвищити якість кінцевого пакування.

На прикладі технології поверхневого монтажу (англійською мовою surface mount technology SMT), коли розмір компонента зменшується, зменшується і зазор між выводами. Тому необхідно, щоб розмір клейової точки зменшувався в тій же мірі, щоб гарантувати якісну упаковку.

Сучасні технології дозволяють виробляти краплі клею для поверхневого монтажу діаметром приблизно 0,5 мм і об'ємом приблизно 0,03-0,04 мл. У зв'язку з постійною тенденцією до зменшення розмірів компонентів, очікується, що будуть потрібні точки в діапазоні діаметрів 0,15-0,25 мм [8].

1.2 Огляд методів дозування рідини

Для систем герметизації мікроелектронних компонентів відомі різноманітні методи дозування рідини [2, 9-11]. Методи дозування рідини можна класифікувати з точки зору приводного механізму на три категорії.

1. Метод дозування за допомогою часу і тиску.
2. Метод дозування за допомогою обертового гвинта.
3. Метод дозування із позитивним переміщенням.

На рисунку 1.4 зображені методи дозування рідини.

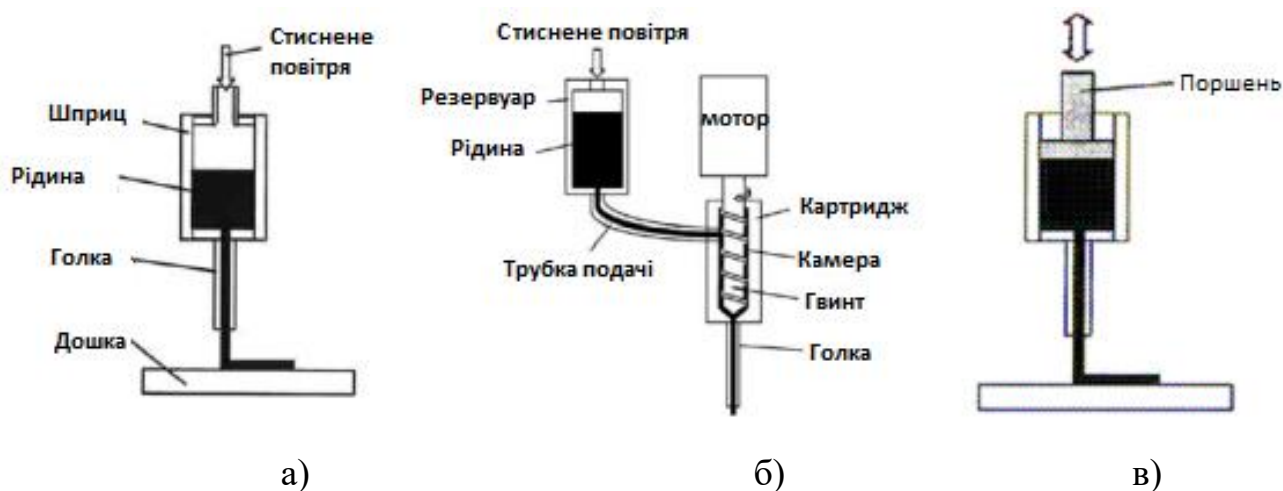


Рисунок 1.4 – Методи дозування рідини:

- а) метод дозування за допомогою часу і тиску;
- б) метод дозування за допомогою обертового гвинта;
- в) метод дозування із позитивним переміщенням

У методі дозування за допомогою часу і тиску рідина в шприці піддається впливу повітря під тиском під час циклу дозування і витісняється з голки. Як тільки тиск знімається, процес дозування зупиняється.

Для покращення якості дозування були внесені деякі модифікації, такі як додавання вакууму, щоб запобігти капанню матеріалу, коли клапан не працює, і зміна величини тиску повітря відповідно до кількості матеріалу в шприці.

Іншим способом більш точного контролю кількості рідини є використання додаткового запірного клапана на кінці голки [12]. Цей клапан контролює кількість дозованої рідини, відкриваючи або закриваючи прохід до голки. Цей метод особливо цінний при дозуванні капсульованих речовин з низькою в'язкістю, оскільки він здатний усунути непередбачуване капання.

Дозування під тиском набуло найбільшого поширення завдяки своїй гнучкості до різних застосувань, простоті експлуатації та легкому обслуговуванню. Однак на дозовану кількість може суттєво впливати поведінка потоку рідини, що дозується, та стисливість повітря [13].

Для в'язких капсульованих матеріалів найбільш поширеним методом дозування є гвинтовий метод [14], який показано на рисунку 1.4 (б). У цьому методі використовується шнек з моторним приводом, який виштовхує рідину до дна шприца.

Завдяки обертанню шнека на дні шприца створюється високий тиск рідини, і під його дією рідина в голці видавлюється з голки. Оскільки тиск, що створюється на дні шприца, викликає висхідний потік, цей метод дозування також чутливий до в'язкості рідини, але менш залежний від неї порівняно з методом часового тиску.

Метод дозування із позитивним переміщенням є одним з найточніших на сьогоднішній день [4]. У цьому методі дозування лінійний рух поршня використовується для витіснення рідини з дозуючої камери, осаджуючи витіснену кількість рідини через вихідний отвір.

Очевидна перевага методу полягає в тому, що кількість рідини, яка дозується, залежить лише від лінійного руху поршня. Однак, це не справедливо для малих об'ємів рідини [15] через вплив стисливості рідини. Порівняно з методами часового тиску і гвинтового дозатора, метод позитивного зміщення забезпечує найточнішу швидкість дозування, але його вартість є найвищою з усіх трьох.

Моделювання процесу дозування має як теоретичне, так і практичне значення. З теоретичної точки зору, моделювання процесу дозування покращить

розуміння впливу поведінки рідини, механічної структури, а також параметрів процесу дозування на продуктивність.

З практичної точки зору, точна модель сприятиме керуванню процесом, покращуючи показники дозування, такі як швидкість потоку та/або кількість рідини. На рисунку 1.5 схематично показано процес дозування за допомогою часу і тиску.

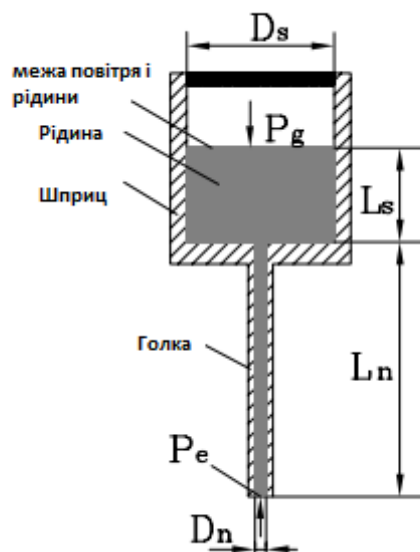


Рисунок 1.5 – Процес дозування за допомогою часу і тиску

Припускаючи, що стисливість повітря не враховується і рідина, що дозується, є ньютонівською, Баб'ярз [11] розробив модель для дозування за допомогою часу і тиску, в якій швидкість потоку через голку виражалася як функція геометрії, в'язкості матеріалу і різниці тисків.

$$Q = \frac{\pi D_n^4 (P_g - P_B)}{128 \mu L_n}, \quad (1.1)$$

де Q - швидкість потоку;

μ - в'язкість матеріалу в голці;

P_g - тиск на вході голки;

P_B - тиск на виході голки;

L_n - довжина голки;

D_n - діаметр голки.

Рівняння (1.1) показує, що швидкість потоку залежить від в'язкості матеріалу на додаток до різниці тисків. Ця проста модель справедлива лише для дозування ньютонівських рідин.

Однак більшість рідин, що використовуються в герметизації електроніки, зазвичай демонструють неньютонівську поведінку, що обмежує застосування цієї моделі. Розглядаючи поведінку неньютонівських рідин, можна виділити також дослідження, спрямовані на вдосконалення моделі.

Наприклад, Разбан [16] розробив модель на основі рівняння степеневого закону. Однак, в його моделі швидкість потоку представлена у сталому стані. Іншими словами, ця модель не підходить для відображення динаміки швидкості потоку.

Чень [17] врахував вплив стисливості повітря та неньютонівської поведінки рідини і розробив модель, що відображає динаміку швидкості потоку. На цій основі було проведено дослідження динаміки та її впливу на малу кількість рідини, що дозується.

Враховуючи, що модель була розроблена на основі загального рівняння степеневого закону для поведінки потоку рідини, вона не є дійсною для інших неньютонівських рідин, таких як в'язкопружні рідини.

Враховуючи стисливість повітря, Чжао [18] також розробив модель динаміки швидкості потоку в процесі дозування за часом і тиском. Під час розробки моделі Чжао також використовували рівняння степеневого закону, що обмежує застосування до інших рідин, які не мають степеневого закону.

Швидкість потоку в гвинтовій системі, показаній на рисунку 1.6, має більш складну залежність від в'язкості матеріалу, геометрії насоса та різниці тисків, ніж у системі дозування за часом і тиском, ніж у системі дозування за часом і тиском. Крім того, вона також залежить від швидкості обертання шприца.

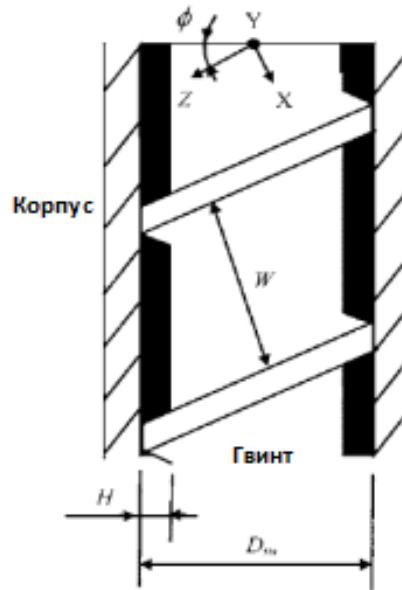


Рисунок 1.6 – Процес дозування в гвинтовій системі

Раувендал [19] розробив модель швидкості потоку за таких припущень.

1. Ньютонівська рідина.
2. Нестислива, стаціонарна рідина.
3. В'язкість не залежить від температури.

Тоді швидкість потоку виражається через рівняння:

$$Q = n_t \frac{\omega D_{sw} W H \cos \varphi}{2} F_d + n_t \frac{W H^3 (P_1 - P_2)}{12 l_a \mu} F_p, \quad (1.2)$$

де Q - витрата матеріалу;

μ - в'язкість матеріалу в шнеку;

n_t - кількість спіралей гвинта;

ω - швидкість обертання гвинта;

φ - кут випередження шприця;

W - відстань між кроками;

D_{sw} - внутрішній діаметр шприця;

H - відстань між коренем нитки та стінкою шприця;

l_a - загальна довжину шприця;

P_1 - тиск на вході шнека;

P_2 - тиск на виході шнека та вході голки;

F_d та F_p - геометричні форм-фактори.

Перший доданок у правій частині означає швидкість потоку опору, спричинену обертанням гвинта. Другий доданок - швидкість потоку, спричинену тиском, яка пропорційна градієнт тиску в каналі. Ця модель все ще використовується в багатьох реальних застосуваннях [11].

Так само, як і модель час-тиск (1.1), модель (1.2) не застосовується до неньютонівських рідин. Крім того, вона не може передбачити динаміку швидкості потоку. Усвідомивши цей недолік, Раувендал [20] запропонував нову модель, засновану на моделі (1.2) для неньютонівських рідин зі степеневим законом.

$$Q = \frac{(4+n)\omega D_{sw}WH\cos\varphi}{20} + \frac{WH^3(P_1-P_2)}{4K(1+2n)l_a} \left(\frac{D_{sw}\omega\cos\varphi}{2H}\right)^{1-n}, \quad (1.3)$$

де k - індекс узгодженості степеневого закону з одиницею $Pa \cdot s^n$;

n - індекс степеневого закону.

Хоча модель використовується для неньютонівської рідини, вона відображає лише швидкість потоку в каналі шнека, а не динаміку швидкості потоку, що відбувається в процесі дозування.

Чень [21] та Хашемі [22] помітили ці два моменти і зробили наступні вдосконалення на основі рівняння (1.3).

1. Розробили моделі для всього процесу, які включали швидкість потоку в шприці та в голці.

2. Розробили динамічну модель, яка описує залежність між витратою рідини та швидкістю обертання шнека. Модель зручна для керування невеликою кількістю рідини, що дозується протягом короткого часу.

Баб'ярз [11] розробив просту модель для об'ємної дозуючої системи, яка є простою функцією швидкості поршня та діаметра поршня. Модель має вигляд:

$$Q = V_p \pi D_p^2 / 4, \quad (1.4)$$

де Q - витрата;

V_p - швидкість руху поршня;

D_p - діаметр поршня.

З моделі видно, що швидкість потоку пропорційна швидкості руху поршня і діаметру поршня. Лінійна залежність означає, що властивості рідини, такі як в'язкість і стисливість, не впливають на швидкість потоку.

Хоча це може бути вірно для дозування великої кількості рідини, це не вірно для дозування малої кількості рідини. При дозуванні невеликої кількості рідини процес дозування ускладнюється через стисливість та поведінку рідини [23].

Оскільки більшість рідин, що дозуються, мають неньютонівську поведінку, потік рідини в шприці під дією поршня, як правило, є перехідним, неньютонівським, стисливим і в'язким. Відзначається, що така течія є складною через зв'язок між неньютонівською поведінкою потоку і стисливістю. На сьогоднішній день в літературі це питання не знайшло належного висвітлення.

Рідинні мости - це тіла рідини, закріплені між двома твердими опорами і утримувані капілярними силами, як показано на рисунку 1.7.

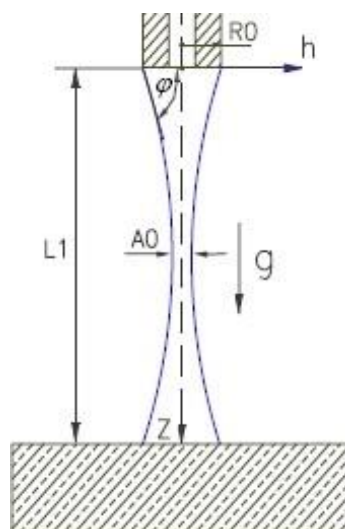


Рисунок 1.7 – Схема рідинного мосту

З точки зору властивостей рідини, рідинні мости можна розділити на дві категорії: ньютонівські та неньютонівські. У дослідженнях рідинних мостів нестійкість і механізм руйнування є предметом як академічного, так і практичного інтересу.

Для невагомого ньютонівського рідинного моста у вигляді правильного кругового циліндра існує добре відома межа стійкості Релея [24]. Стовпчик рідини стає нестійким, коли його довжина більша за незбурений периметр. Було проведено багато досліджень рідинних мостів, які відрізняються від ідеальної конфігурації.

Наприклад, Мезегер [25] проаналізував вплив осьової мікрогравітації на руйнування осесиметричних тонких рідинних мостів. Він також вивчав стійкість тонких осесиметричних рідинних містків між нерівними дисками [26, 27].

Пералес [28] досліджував стійкість осесиметричних рідинних мостів між рівними дисками в осьовому гравітаційному полі. Мезегер [25] проаналізував вплив багатьох збурень на ідеальну конфігурацію, таких як неаксіальне прискорення.

Що стосується досліджень руйнування ньютонівського рідинного моста, то історичний огляд репрезентативних публікацій можна знайти в роботі [29]. Жодне з цих досліджень не розглядає питання в'язкості при розтягуванні в процесі руйнування.

Для неньютонівського руйнування рідинних містків при дослідженні розриву сплавів полімерів при високих швидкостях розтягування у роботі [30] побудовано основну криву деформації розтягування при розриві як функцію швидкості розтягування, як показано на рисунку 1.8.

Запропоновано чотири режими руйнування при збільшенні швидкості розтягування, як описано нижче, кожен режим має різні характеристики залежності деформації розтягування від швидкості розтягування.

1. Режим течії - виникає при дуже низькій швидкості розтягування. Тут реакція рідинного містка домінує над в'язкою течією. Ефекти поверхневого натягу

часто є важливими в цьому режимі, а руйнування спричинене нестабільністю, зумовленою поверхневим натягом, через в'язке руйнування ("шийки").

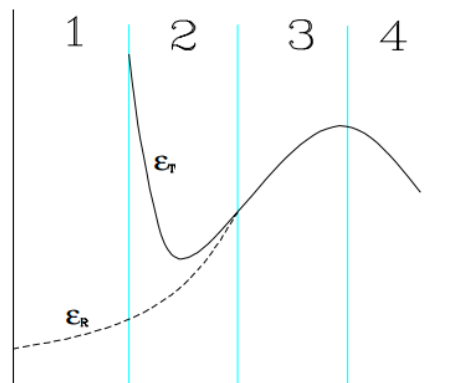


Рисунок 1.8 – Крива деформації розтягування при розриві як функція швидкості розтягування

Відновлювана (пружна) деформація зростає зі збільшенням швидкості розтягування, але вона дуже мала порівняно із загальною деформацією при руйнуванні.

2. Перехідний режим - у цьому режимі відбувається суперпозиція пружної деформації та в'язкої течії розтягування. Однак, стійка течія виявляється неможливою, оскільки рідинний місток руйнується до того, як може бути реалізований режим стійкої течії.

3. Гумовий режим - в цьому режимі практично відсутня течія, вся деформація є повністю пружною і відбувається майже повне відновлення деформації після розриву. Повна деформація при розриві зростає зі збільшенням швидкості розтягування в цьому режимі.

4. Склоподібна зона - виникає при дуже високих швидкостях деформації.

Розрив є крихким руйнуванням, напруження розтягування і деформація в місці розриву зменшуються зі швидкістю розтягування, і деформація повністю відновлюється.

На рисунку 1.9 схематично показано розриви, які відбуваються в режимі течії, перехідному режимі, гумовому режимі та склоподібному режимі відповідно зліва направо.



Рисунок 1.9 – Неньютонівські руйнування рідинних мостів

На основі своїх досліджень деформації в'язких ниток МакКінлі та Слідхар [31] також узагальнили два найпоширеніші типи розриву, а саме: капілярний розрив та розрив еластичної нитки. Капілярний розрив відбувається на ділянках з низькою деформацією розтягування.

Коли в'язкий міст розтягується, завдяки великому капілярному тиску в шийці, шийки рідкого моста швидко зменшуються. Як тільки локальна швидкість скорочення шийки перевищить масштаб розтягування, рух поблизу середньої площини зазнає сингулярності в кінцевому часі.

Цікавим явищем, яке спостерігали Шпігеберг і МакКінлі [32], було те, що реакція неньютонівської рідини спочатку дуже схожа на реакцію ньютонівської рідини при деформації менше двох, але при високих рівнях деформації неньютонівська рідина демонструє поведінку, відмінну від поведінки ньютонівської рідини.

Що стосується розриву еластичної нитки, то вважається, що він спричинений явищем "деформаційного зміцнення" [33]. Як тільки деформація розтягування перевищує одиницю, швидке збільшення перехідної в'язкості при

розтягуванні в центральній частині робить цю ділянку менш сприйнятливою до подальшої деформації.

При подальшому розтягуванні ділянки, що прилягають до центральної області, продовжуватимуть деформуватися до тих пір, поки вони також не зміцняться до того ж рівня, що і центральна частина моста.

Нарешті, деформація розтягування і напруження розтягування вздовж моста стають все більш і більш рівномірними, радіус рідинного моста стає все більш рівномірним по осі при великих деформаціях і, отже, призводить до все більш однорідної деформації розтягування.

Як тільки процес "деформаційного зміцнення" вирівнює деформацію, міст розширюється як суто еластичне подовження, що відповідає гумовому режиму на кривій Майстра. Коли відбувається розрив, це розрив еластичної нитки, або когезійне руйнування, як показано на рисунку 1.9.

Механізм руйнування тонкого стовпчика рідини кардинально відрізняється від капілярного руйнування, що спостерігається в ньютонівській рідині, яка не демонструє деформаційного зміцнення [34]. Варто зазначити, що у вищезгаданих дослідженнях для пояснення процесу руйнування розглядалися в'язкість при розтягуванні та деформація розтягування.

Слід зазначити, що хоча згадані вище механізми руйнування допомагають краще зрозуміти процес руйнування рідинних мостів, вони є лише загальними фізичними описами процесу руйнування, що ґрунтуються на експериментах з розтягування. Очевидно, що для вирішення реальних інженерних проблем, таких як дозування рідини, все ще потрібен кількісний інструмент для розрахунку кількості рідини, що падає на плату.

На рисунку 1.10 показано типовий процес дозування методом позитивного витіснення. Він складається з двох етапів.

1. Спочатку дозуючий пристрій транспортується до точки дозування і потрібний об'єм рідини видавлюється через голку. Коли кількість рідини, що дозується, дуже мала або тривалість дозування коротка, через вплив стисливості

та поведінки рідини об'єм, що витісняється з голки, не дорівнює переміщенню рухомого поршня.

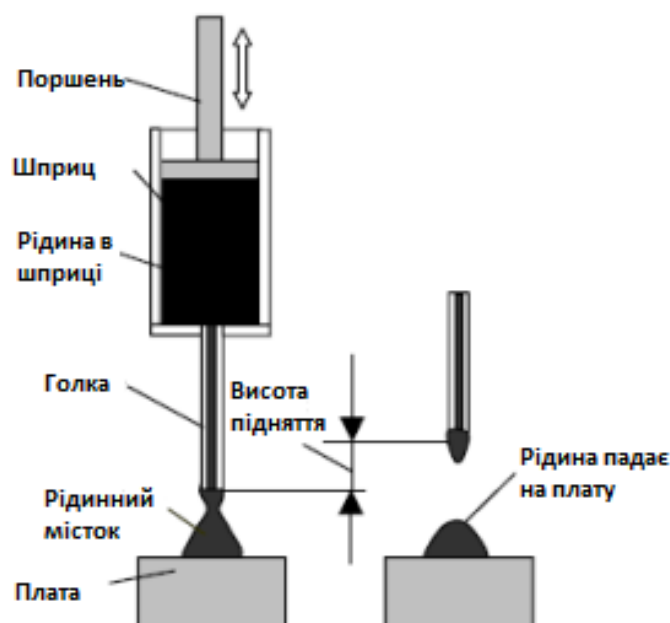


Рисунок 1.10 – Типова схема процесу дозування із позитивним переміщенням

Це перша проблема, яку необхідно вирішити. По-друге, після дозування рідина під дією поверхневого натягу стікає на поверхню мішені і утворює рідинний місток між голкою і поверхнею мішені.

Коли дозуюча головка піднята аж до втягнутого положення, рідинний міст деформується і буде зруйнований. У другому процесі домінує деформація розтягування рідини. Після розриву частина рідини переходить на плату, а решта залишається на ободі голки.

Очевидно, що об'єм, який падає на плату, не дорівнює об'єму рідини, що видавлюється з голки. Це вважається однією з найпоширеніших проблем методу позитивного витіснення, а також двох інших методів. В даний час існують різні конструкції систем дозування рідини.

Однак не було проведено жодних досліджень, які б оцінювали та порівнювали ці різні конструкції на загальній основі. Як оцінити три методи дозування та оптимізувати вибір методу дозування - це проблема промислового значення.

1.3 Висновки до першого розділу

1. В процесі аналізу сучасних методів дозування рідини було встановлено, що вибір відповідної технології залежить від характеристик рідини, вимог до точності дозування та умов експлуатації.

2. Метод дозування за допомогою часу і тиску базується на подачі рідини через дозувальний отвір протягом фіксованого проміжку часу за постійного тиску. Перевагами методу є простота конструкції й налаштування, висока швидкість дозування, що робить метод підходящим для масового виробництва, мінімальні витрати на обладнання. До недоліків відноситься те, що точність залежить від стабільності тиску й в'язкості рідини. Також можливі похибки через зміну умов, наприклад, перепади температури або коливання в'язкості рідини.

3. Метод дозування за допомогою обертового гвинта передбачає використання обертового гвинта (шнека), який витісняє рідину вперед, дозуючи її залежно від кількості обертів. Перевагами методу є висока точність дозування при роботі з в'язкими матеріалами, такими як пасти, клеї або креми, можливість роботи з рідинами різної в'язкості, а також стабільність процесу навіть за змінного тиску або інших зовнішніх умов.

4. Метод дозування із позитивним переміщенням забезпечує переміщення точного об'єму рідини завдяки роботі механізмів, таких як поршень, діафрагма або ротор. Перевагами метода є найвища точність дозування незалежно від зовнішніх умов, таких як тиск, в'язкість чи температура рідини, а також можливість роботи з агресивними, чутливими чи густими рідинами, мінімізація втрат і стабільність навіть при дуже малих дозах.

5. Кожен із розглянутих методів має свої переваги й недоліки, які визначають їх доцільність у конкретних умовах. Метод дозування за допомогою часу і тиску є оптимальним для високошвидкісного виробництва, де точність не є критичною. Метод обертового гвинта ідеальний для роботи з в'язкими рідинами в умовах середньої точності.

2 МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПОТОКУ РІДИНИ У ДОЗАТОРІ

2.1 Математична модель рідини для дозування

В електроніки рідини для дозування використовуються для захисту напівпровідникових пристроїв і з'єднань (наприклад, дротяних з'єднань і пайки) від вологи, озону, ультрафіолетового випромінювання та пошкоджень, спричинених тепловим ударом і циклічним перепадом низьких і високих температур, а також для підвищення їхньої довготривалої надійності

Найпоширенішими рідинами для дозування є уретанові, епоксидні або силіконові полімери. Уретанові рідини для дозування забезпечують хорошу стійкість до розчинників, мають хороші низькотемпературні властивості, але мають тенденцію до деградації при високих температурах.

Таким чином, уретан зазвичай використовується в тих випадках, коли теплове розширення не викликає занепокоєння. Епоксидні смоли є одними з найпоширеніших полімерів для пакування електроніки.

Основні хімічні та фізичні властивості, привабливі для пакування, включають відмінну хімічну та корозійну стійкість, електричні та фізичні властивості, відмінну адгезію, теплоізоляцію, низьку усадку та розумну вартість матеріалу.

Однак температурна стабільність епоксидних смол викликає занепокоєння. На відміну від них, силікон має стабільну силіконову основу і здатний забезпечити відмінну адгезію до різних поверхонь. Силікони застосовуються в різних випадках, коли потрібно працювати при високих температурах або в екстремальних умовах термоцикування.

Поведінка потоку рідини використовується для опису взаємозв'язку між напруженням зсуву і швидкістю зсуву в рідині. Залежно від поведінки рідини можна розділити на дві категорії: ньютонівські та неньютонівські. Ньютонівські рідини - це рідини, які демонструють лінійну залежність між напруженням зсуву і швидкістю зсуву.

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (2.1)$$

де u - швидкість рідини;

y - координата положення;

du/dy - швидкість зсуву;

μ - в'язкість;

τ - напруженість зсуву.

Рідини, які не демонструють лінійної залежності між напруженням зсуву і швидкістю зсуву, є неньютонівськими рідинами. Прикладами неньютонівських рідин є розплави полімерів, кров та матеріали, що мають одночасно в'язкі та пружні властивості. Неньютонівські рідини можна поділити на три групи.

1. Незалежні від часу неньютонівські рідини.

Для таких типів неньютонівських рідин зв'язок між швидкістю зсуву і напруженням зсуву можна виразити рівнянням:

$$f(\tau) = \frac{du}{dy}, \quad (2.2)$$

де f - нелінійна функція.

На рисунку 2.1 показано декілька типів рідин.

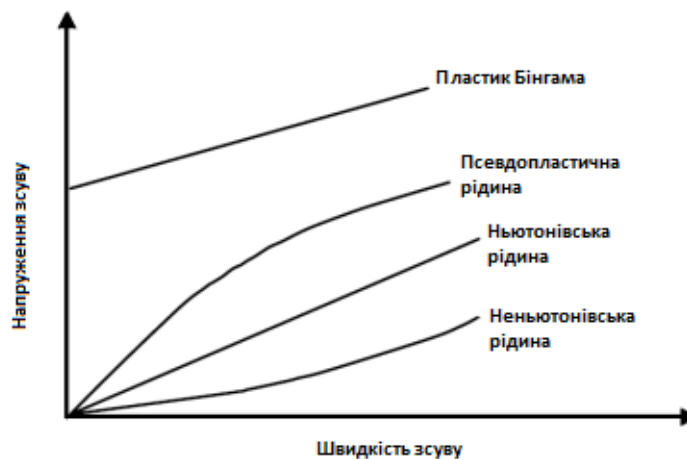


Рисунок 2.1 – Типи рідин

На рисунку 2.1 дилатаційні рідини демонструють зростання в'язкості зі збільшенням швидкості зсуву. Зсувна в'язкість псевдопластичних рідин зменшується зі збільшенням швидкості зсуву і демонструє поведінку зсувного розрідження.

2. В'язкі залежні від часу неньютонівські рідини

Залежні від часу рідини - це рідини, для яких швидкість зсуву є функцією як величини, так і тривалості зсуву. Зв'язок між швидкістю зсуву і зсувом стрес можна виразити рівнянням:

$$f(\tau, t) = \frac{du}{dy}, \quad (2.3)$$

де t - час.

Залежні від часу рідини зазвичай поділяють на дві групи: тиксотропні та реопектичні, залежно від того, чи зменшуються або збільшуються напруження зсуву.

З часом при заданій швидкості зсуву і постійній температурі. Для тиксотропних рідин матеріали демонструють оборотне зменшення напруги зсуву з часом при заданій швидкості зсуву і постійній температурі.

Якщо виміряти криву залежності напруження зсуву від швидкості в одному експерименті, в якому швидкість зсуву постійно збільшується від нуля до максимального значення, а потім негайно зменшується до нуля, то отримаємо форму петлі гістерезису, як показано на рисунку 2.2.

Реопектичні рідини - це матеріали, які демонструють оборотне збільшення напруги зсуву з часом при постійній швидкості зсуву в ізотермічних умовах. Розташування петлі гістерезису для даної рідини знову ж таки залежить від часової історії матеріалу, включаючи швидкість, з якою du/dy збільшується і зменшується під час експерименту

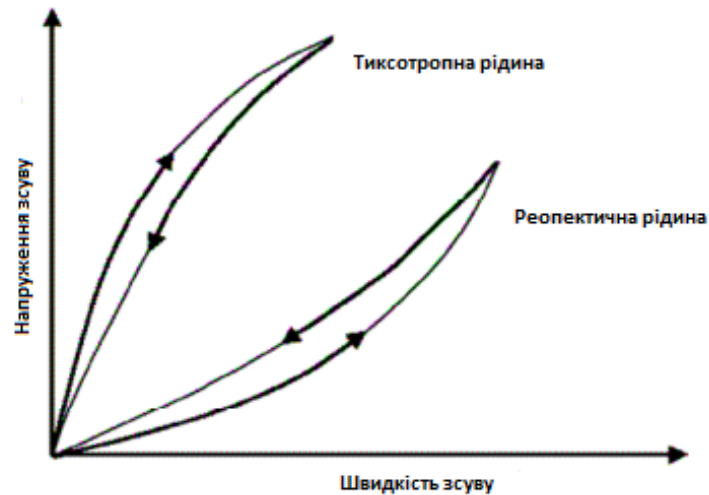


Рисунок 2.2 – Крива залежності напруження зсуву від швидкості

3. В'язкопружні неньютонівські рідини.

В'язкопружні неньютонівські рідини - це матеріали, які поєднують в собі пружні властивості твердих тіл з поведінкою потоку рідини. У чисто гуківському пружному твердому тілі напруження що відповідає заданій деформації, не залежить від часу, тоді як для в'язкопружних речовин напруження буде поступово зникати.

На відміну від незалежної від часу неньютонівської рідини, в'язкопружні рідини течуть під дією напруги, але частина їхньої деформації поступово відновлюється після зняття напруги.

Загальним рівнянням для опису поведінки течії незалежних від часу неньютонівських рідин є модель Гершеля-Балклі [35].

$$\tau = k(\dot{\gamma})^n \tau_0, \quad (2.4)$$

де τ - напруження зсуву;

k - коефіцієнт консистенції;

n - індекс поведінки потоку;

$\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву;

τ_0 - межа текучості.

Рівняння (2.4) має вигляд залежності напруження зсуву від швидкості зсуву. В інженерних застосуваннях для моделювання поведінки рідини завжди використовується уявна в'язкість, яка визначається як відношення напруги зсуву до швидкості зсуву. Отже, у формі уявної в'язкості рівняння (2.4) можна переписати у вигляді:

$$\eta = f(\dot{\gamma}) = k(\dot{\gamma})^{n-1} \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}, \quad (2.5)$$

де η - ефективна в'язкість.

Рівняння (2.5) також може бути використане для опису поведінки течії ньютонівської, степеневі та бінгамівської пластичних рідин залежно від значень τ_0 . Зокрема, для рідин Бінгема $n = 1$, таким чином рівняння (2.5) зводиться до виразу:

$$\eta = k + \frac{\tau_0}{\dot{\gamma}}. \quad (2.6)$$

Важливою характеристикою флюїдів Бінгема є наявність виходу напруження τ_0 , яке представляє собою скінченне напруження, необхідне для досягнення течії.

Для загальних рідин зі степеневим законом модель показана в рівнянні (2.7). Існує два різних типи степеневих рідин, залежно від значення n . Один з них є зсувним блиском (псевдопластичним), якщо $0 < n < 1$, а інший - зсувним потовщенням (дилатантом) якщо $1 < n < \infty$.

$$\eta = k(\dot{\gamma})^{n-1}. \quad (2.7)$$

На рисунку 2.3 показано залежність уявної в'язкості від швидкості зсуву для незалежних від часу рідин. Видно, що для $n > 1$ графік залежності η від швидкості

зсуву йде вгору і матеріал є дилатантним або зсувно-потовщеним, а для $n < 1$ графік залежності $\dot{\gamma}$ йде вниз і поведінка є зсувно-потоншеною.

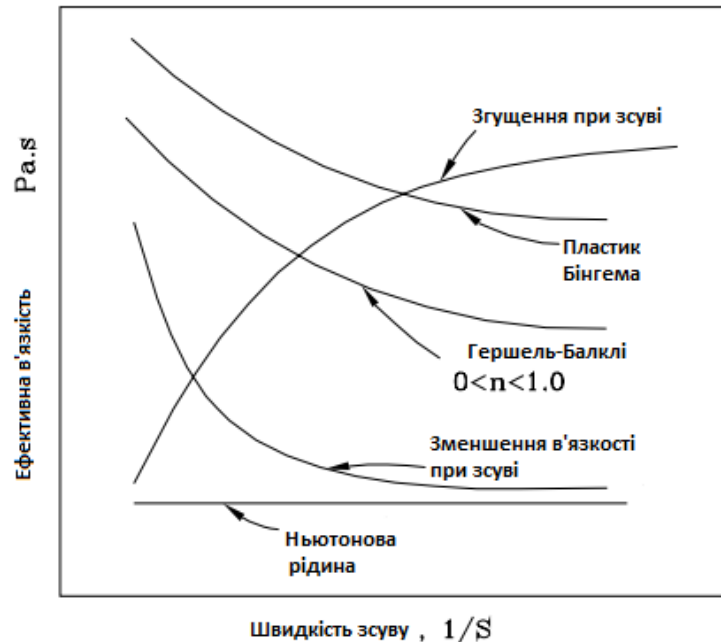


Рисунок 2.3 – Залежність уявної в'язкості від швидкості зсуву для незалежних від часу рідин

Модель степеневого закону розрідження при зсуві рівняння (2.7) відповідає експериментальним результатам для багатьох матеріалів при середніх швидкостях зсуву протягом двох-трьох десятиліть у логарифмічних масштабах. На прикладі розплаву полімеру діапазон становить $10 - 1024 \text{ с}^{-1}$.

Модель степеневого закону широко використовується для опису властивостей неньютонівських рідин у теоретичному аналізі, а також у розрахунках, що застосовуються в інженерних додатках, таких як процеси виробництва полімерів. Однак, ця модель не може описати напруження зсуву, коли швидкість зсуву є малою і великою.

Поведінка розрідження при зсуві дуже поширена в розплавах полімерів. Під час течії матеріали, що розріджуються при зсуві, демонструють три чіткі області, як показано на рисунку 2.4, де нахил кривої представляє уявну в'язкість.

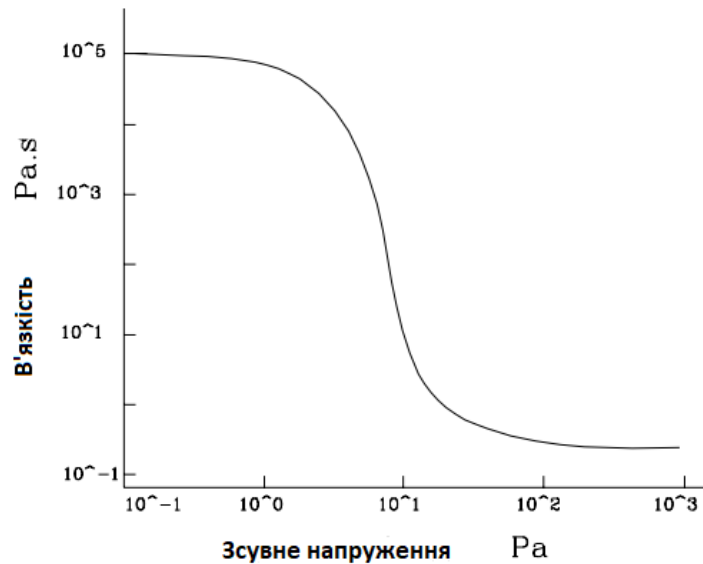


Рисунок 2.4 – Залежність уявної в'язкості від швидкості зсуву при зсувному розрідженні

В нижній області, η_0 (так звана нульова зсувна в'язкість) є приблизно сталою величиною змінюються швидкості зсуву; в середній області змінюється уявна в'язкість різко зростає зі швидкістю зсуву; а у верхній області η_∞ (яка називається граничною в'язкість при нескінченній швидкості зсуву) є приблизно постійною величиною незалежно від зміни швидкості зсуву.

Для всього діапазону швидкостей зсуву степенева модель розрідження зсуву, тобто (2.7), не відображає поведінку флюїду в нижній і верхній частинах. Кросс запропонував наступну покращену модель [35].

$$\frac{\eta_s - \eta_\infty}{\eta_0 - \eta_\infty} = \frac{1}{1 + (c\dot{\gamma})^n}, \quad (2.8)$$

де η_0 та η_∞ - асимптотичні значення в'язкості;

c - константою з розмірністю часу.

Порівняння між моделлю зсувного потоншення (2.7) та моделлю Кросса (2.8) наведено на Рисунку 2.5.

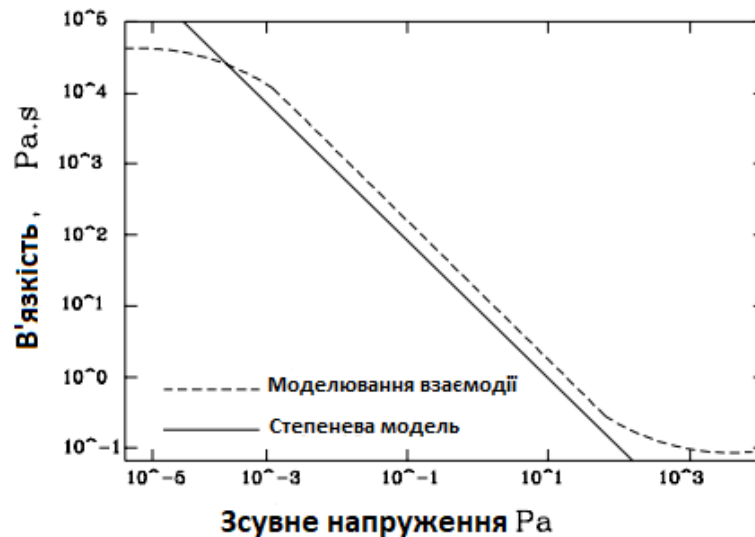


Рисунок 2.5 – Порівняння моделі степеневого закону з моделлю Кросса

У нижній області, коли $\eta_0 \gg \eta_\infty$, розроблено так звану 3-параметричну модель Карро, яка охоплює нижню та центральну області швидкостей зсуву:

$$\eta = \eta_0(1 + (c_1\dot{\gamma})^2)^{\frac{n-1}{2}}, \quad (2.9)$$

де c_1 - має таке ж значення, як і c моделі Кросса (2.8).

Рідина Nysol FP4451, яка виготовляється корпорацією Dexter, є різновидом неньютонівської рідини і використовується для інкапсуляції штампів при пакуванні електроніки.

Результати вимірювань залежності зсувної в'язкості від швидкості зсуву при різних температурах наведені на рисунку 2.6. З цього рисунка випливає, що FP4451 є неньютонівською рідиною, яка розріджується при зсуві.

Конкретна 3-параметрична модель Карро для рідини Nysol FP4451 при 45°C може бути розроблена за допомогою методу, шляхом підбору різних експериментальних даних при різних швидкостях зсуву, представлених кривою 45°C на рисунку 2.7, і підставляючи ці дані в рівняння (2.7), розраховується k , що має найкращий результат.

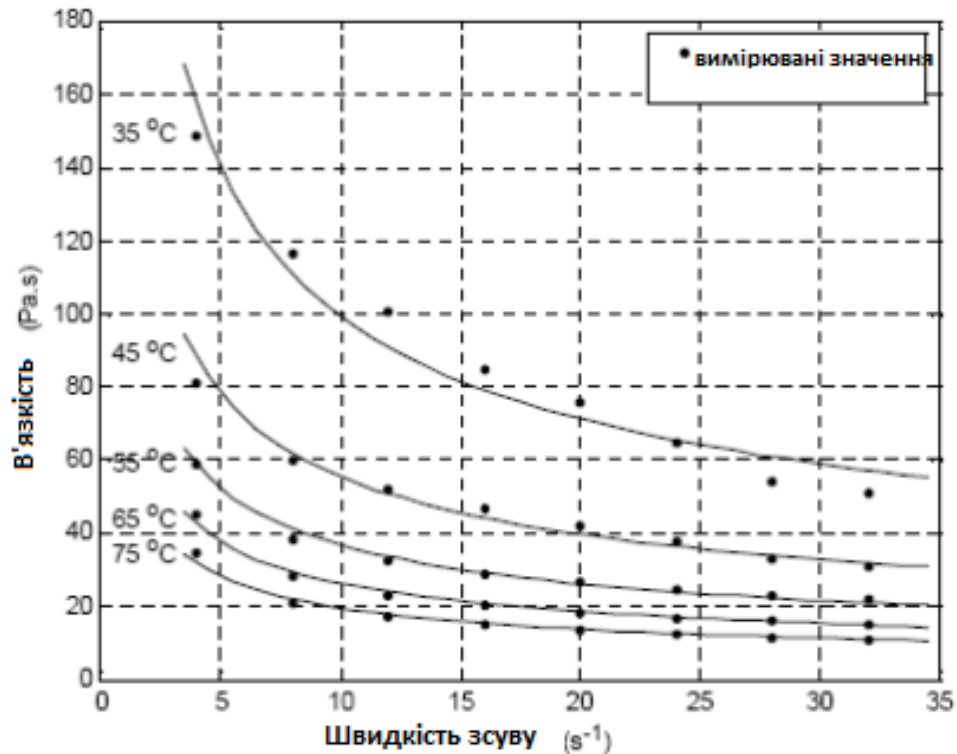


Рисунок 2.6 – Порівняння моделі степеневого закону з моделлю Кросса

2.2 Моделювання процесів дозування з позитивним переміщенням

У процесі дозування примусовим витісненням потік рідини в шприці та голка мають важливе значення. Тому логічно розробити модель процесу дозування примусового витіснення за допомогою двох основних етапів.

1. Представлення тиску в шприці.
2. Представлення швидкості потоку в голці під цим тиском.

Оскільки більшість рідин, що дозуються, мають неньютонівську течію, потік рідини в шприці під дією поршня, як правило, є нестационарним, неньютонівським, стисливим і в'язким. Така течія є досить складною через зв'язок між неньютонівською поведінкою потоку і стисливістю. Для спрощення цієї проблеми зроблено наступні припущення щодо течії рідини в шприці.

Розглядається лише стисливість рідини, нехтуючи впливом неньютонівської поведінки потоку та незначними втратами. Це доцільно, якщо швидкості рідини в шприці малі. Крім того, тиск у шприці вважається рівномірним через те, що

висота рівня рідини в шприці невелика, тому час, необхідний для поширення хвиль тиску через рідину, малий порівняно з часовим масштабом, що нас цікавить.

1. Шприц є ізотермічним, оскільки температура в процесі дозування зазвичай добре контролюється, що усуває необхідність в енергетичному рівнянні в моделі.

За цих припущень, підхід з використанням рівняння нерозривності може бути використаний для представлення тиску в шприці, P , який задається виразом.

$$A_p \dot{X} - Q = \frac{V_0 - A_p X}{B} \frac{dP}{dt}, \quad (2.10)$$

де Q - швидкість потоку, що витікає зі шприца або швидкість потоку, що надходить на голку;

X - положення поршня в шприці;

A_p - площа поперечного перерізу поршня;

V_0 - початковий об'єм рідини в шприці;

B - модуль об'ємної маси рідини.

На рисунку 2.7 зображено поршень, який опускається і виштовхує рідину зі шприца.

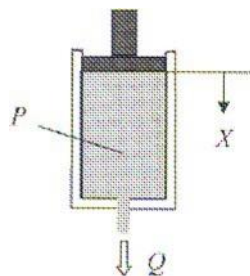


Рисунок 2.7 – Поршень, який опускається і виштовхує рідину зі шприца

Під тиском у шприці рідина з голки витісняється і дозується, як показано на рисунку 2.8.

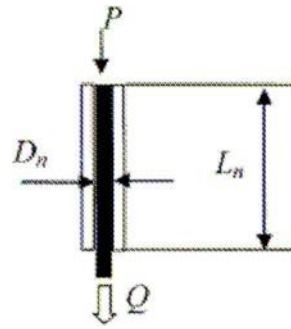


Рисунок 2.8 – Потік, керований тиском в голці

Для такого потоку, керованого тиском, на швидкість потоку може суттєво впливати поведінка рідини, що дозується. Відомо, що якщо рідина має неньютонівську поведінку течії, залежність між напруженням зсуву і швидкістю зсуву в рідині є нелінійною. Модель Гершеля-Балклі [35] степеневого закону є найбільш поширеною.

$$\tau = \tau_0 + k\dot{\gamma}^n, \quad (2.11)$$

де τ_0 - це критичне значення напруження зсуву, при якому рідина розтікається або починає текти;

k - міра в'язкості - чим вище k , тим в'язкіша рідина;

n - міра ступеня реологічної поведінки - чим більше відхилення n від одиниці, тим більш виражена реологічна поведінка.

Для конкретної рідини значення n , τ_0 і k визначаються експериментально. Зокрема, n зазвичай визначають як константу, а τ_0 і k - як функції температури

Для потоку рідини в голці передбачається що рідина в голці нестислива, враховуючи, що об'єм рідини в голці малий порівняно з об'ємом шприца, що означає, що швидкість потоку, який входить в голку, є такою ж, як і швидкість потоку, що виходить з голки, тобто швидкість потоку рідини, що дозується, властивості рідини не залежать від часу, а потік є ламінарним, і між рідиною та стінкою голки немає прослизання.

За цих припущень можна визначити швидкість потоку рідини, що дозується, і її передавальну функцію, яка має вигляд:

$$\frac{Q(s)}{P(s)} = \frac{Q_u}{\rho L_n \frac{Q_u}{A_n} s + 1}, \quad (2.12)$$

де ρ - густина рідини;

L_n - довжина голки;

A_n (або $\pi D_n^2/4$) - площа поперечного перерізу голки;

Q_u - стаціонарна витрата при одиничному тиску, що залежить від поведінки потоку рідини та геометрії голки.

Для рідини, що характеризується узагальненим степеневим законом (2.11), Q_u описується виразом:

$$Q_u = \frac{\pi D_n^3}{8PK^n \tau_w^3} (\tau_w - \tau_0)^{\frac{n+1}{n}} \times \\ \times \left[\frac{n}{3n+1} \tau_w^2 + \frac{2n^2}{(2n+1)(3n+1)} \tau_w \tau_0 + \frac{2n^3}{(n+1)(2n+1)(3n+1)} \tau_0^2 \right], \quad (2.13)$$

де τ_w - напруження зсуву на стінці голки під дією прикладеного тиску.

Враховуючи незначні втрати через ефект входу та виходу голки, τ_w становить

$$\tau_w = \frac{D_n}{4L_n} (P + L_n \rho g - 1.12 \rho u^2), \quad (2.14)$$

де g - прискорення сили тяжіння;

u - середня швидкість рідини в голці, яка визначається за формулою A/A_n .

Слід зазначити, що у наведеному вище рівнянні не враховується падіння тиску через поверхневий натяг на меніску рідини, що утворюється на виході з

голки. Однак, якщо діаметр голки досить малий, це падіння тиску слід враховувати і воно повинно з'явитися у наведеному вище рівнянні (2.14).

Поєднання рівняння (2.12) з перетворенням Лапласа рівняння (2.10) дає передавальну функцію для швидкості потоку рідини, що дозується, до швидкості руху поршня, яка має вигляд:

$$\frac{Q(s)}{\dot{X}(s)} = \frac{A_p}{a_2 s^2 + a_1 s + 1}. \quad (2.15)$$

З наведених вище рівнянь видно, що динаміка витрати рідини, яка дозується, еквівалентна системі другого порядку. Її стаціонарне значення є функцією площі поперечного перерізу поршня, A_p . Це загальновизнано в промисловості на сьогоднішній день. Перехідний процес швидкості потоку залежить від положення поршня (X) на додаток до стисливості рідини (B) і поведінки потоку u рідини (через Q_u).

Потрібно зазначити, що X не є постійною величиною під час процесу дозування і збільшується в міру протікання процесу. Як наслідок, динаміка швидкості потоку змінюється залежно від положення поршня або об'єму рідини, що залишився у шприці. Так само, як і об'єми рідини, що дозуються за однакових умов експлуатації.

Визначимо вплив тривалості руху поршня, об'єму рідини в шприці, температури голки, поведінки потоку рідини та стисливості рідини на сталість об'єму рідини, що дозується.

Параметри системи, що використовувалися при моделюванні, наведені в Таблиці 2.1, а властивості рідини - в Таблиці 2.2.

Блок-схема для моделювання витрати рідини зображена на рисунку 2.9. До складу блок схеми входить рівняння нерозривності (2.16), за допомогою якого визнається зміна тиску в часі. Далі використовується інтегрування, щоб визначити тиск у шприці. Далі за допомогою рівняння (2.12) визначаються витрати рідин в часі.

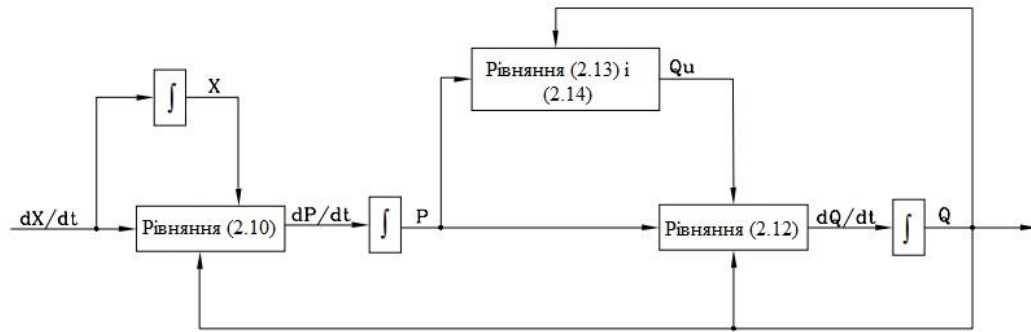


Рисунок 2.9 – Блок-схема для моделювання витрати рідини, що дозується

Таблиця 2.1 - Вихідні параметри системи для моделювання

Параметр	Значення
Швидкість руху поршня, \dot{x}	0,04 мм/с
Час дозування, t_d	0,2 с
Діаметр поршня або шприца, D_p	25 мм
Місткість шприца, C	60 куб.см
Довжина голки, L_n	16 мм
Внутрішній діаметр голки, D_n	1,0 мм
Температура голки, T	45 °С
Рівень рідини у шприці	50%

Таблиця 2.2 Властивості рідини

Параметр	Значення
Щільність,	1780 кг/м ³
Модуль об'ємної маси, B	1,0x10 ⁹ Па
Індекс поведінки потоку, n	0,6
Напруження текучості, τ_0	$9,22 \times e^{80,98/T} Pa$
Індекс узгодженості, K	$25,39 \times e^{92,47/T} \cdot s^n$

Використовуючи різні значення часу дозування t_d , було змодельовано тиск у шприці P та швидкість потоку Q. Результати показано на рисунку 2.10 та рисунку 2.11 для $t_{ds}=0,08, 0,2, 1,0$ та $3,0$ с.

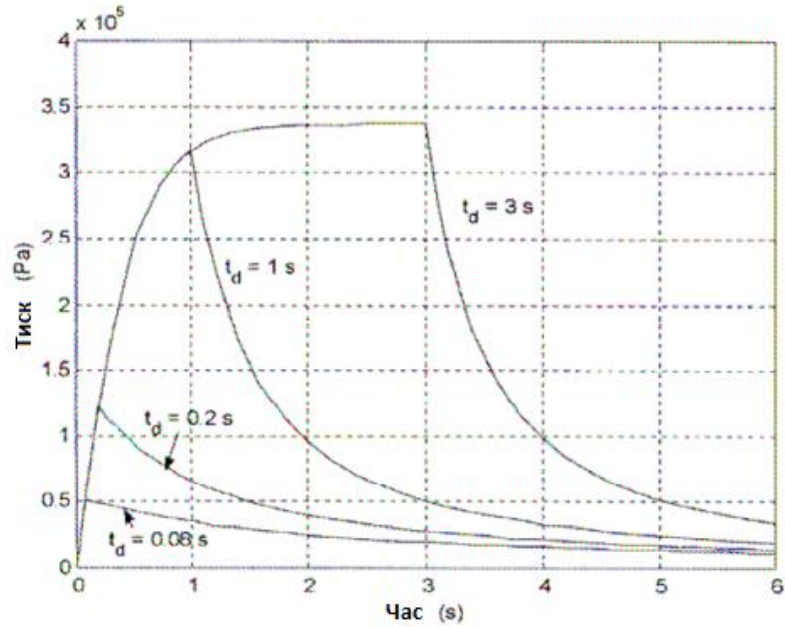


Рисунок 2.10 – Зміна тиску в часі

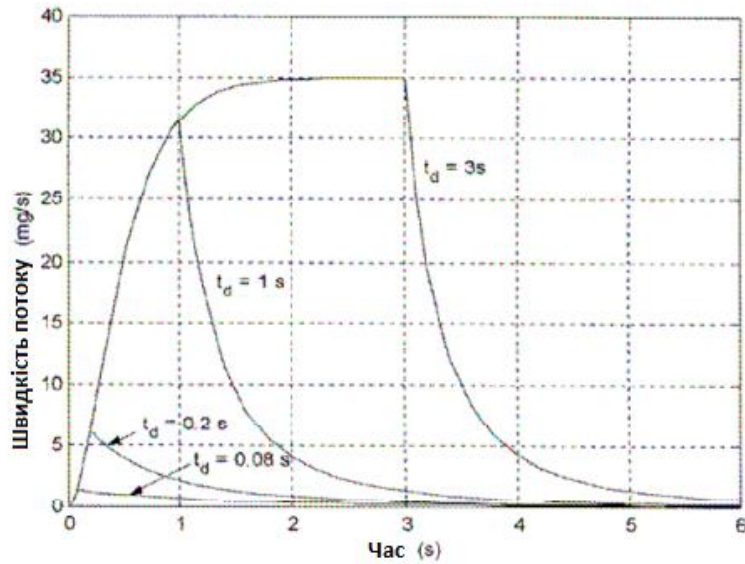


Рисунок 2.11 – Зміна швидкості потоку в часі

Результати показують, що для малих t_d , P і Q не досягають своїх стаціонарних значень. У таких випадках динаміка швидкості потоку має вирішальне значення для об'єму дозованої рідини.

При різних рівнях рідини в шприці були змодельовані швидкості потоку, і результати показані на рисунку 2.12 для $t_d = 0,2$ с.

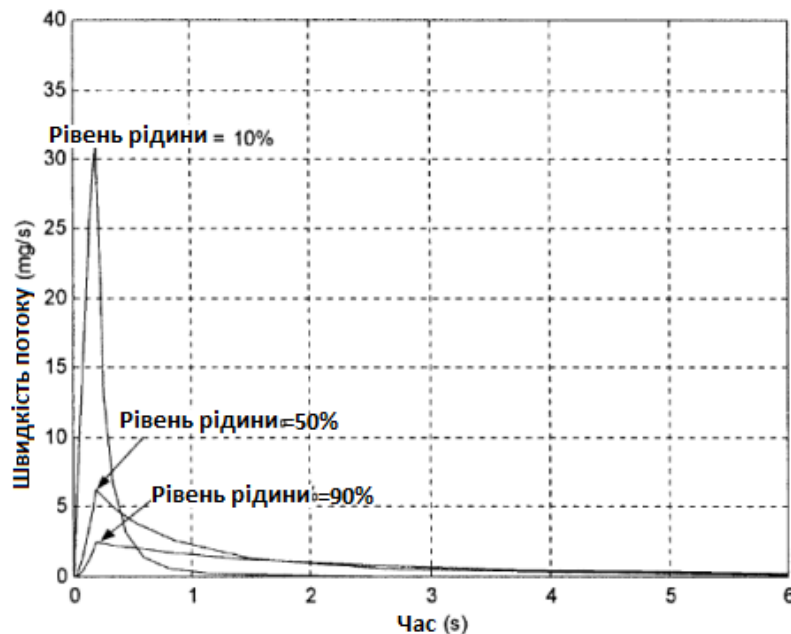


Рисунок 2.12 – Швидкість потоку при різних рівнях рідини в шприці
для $t_d = 0,2$ с

Це ілюструє, що рівень рідини в шприці може суттєво впливати на динаміку швидкості потоку, змінюючи таким чином об'єм дозованої рідини. Для вимірювання впливу рівня рідини на об'єм рідини, що дозується, використовується відносний об'єм були розраховані похибки протягом процесу дозування, тобто зміни рівня рідини від повного до порожнього; результати показані на рисунку 2.13 для $t_d = 0,08, 0,2$ та $1,0$ с.

Видно, що відносні похибки в процесі дозування не є постійними, а залежать від рівня рідини в шприці. Крім того, неузгодженість погіршується зі зниженням t_d або зменшенням об'єму рідини, необхідного для дозування.

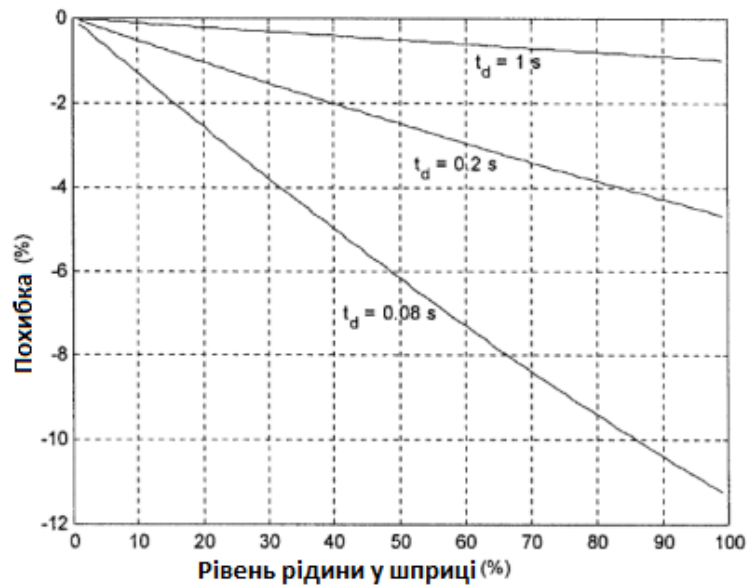


Рисунок 2.13 – Відносна похибка в залежності від рівня рідини у шприці

Відомо, що поведінка рідини залежить від температури голки, коли вона протікає через неї. Як наслідок, температура голки також може впливати на швидкість потоку та об'єм рідини, що дозується. У цьому моделюванні було використано залежність поведінки рідини від температури голки, наведену в таблиці 2.2. Для температур $35\text{ }^{\circ}\text{C}$, $45\text{ }^{\circ}\text{C}$ і $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ змодельовані витрати і розраховані відносні похибки показані на рисунках 2.14 і 2.15.

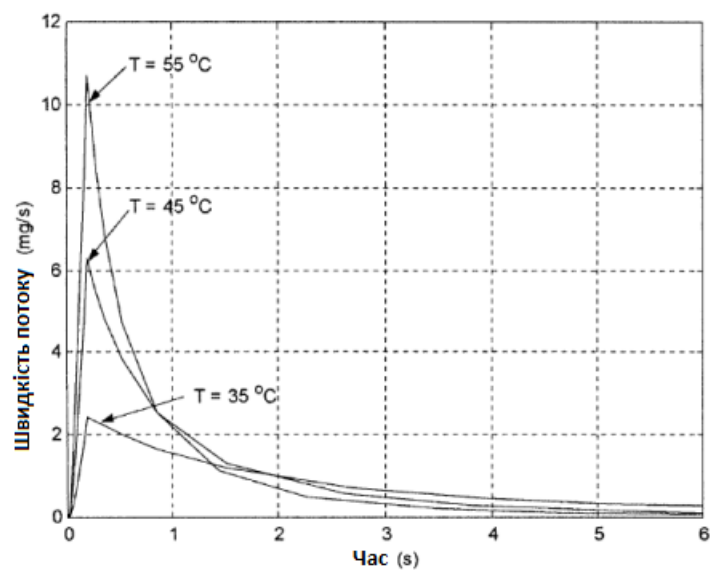


Рисунок 2.14 – Вплив температури голки на швидкість потоку

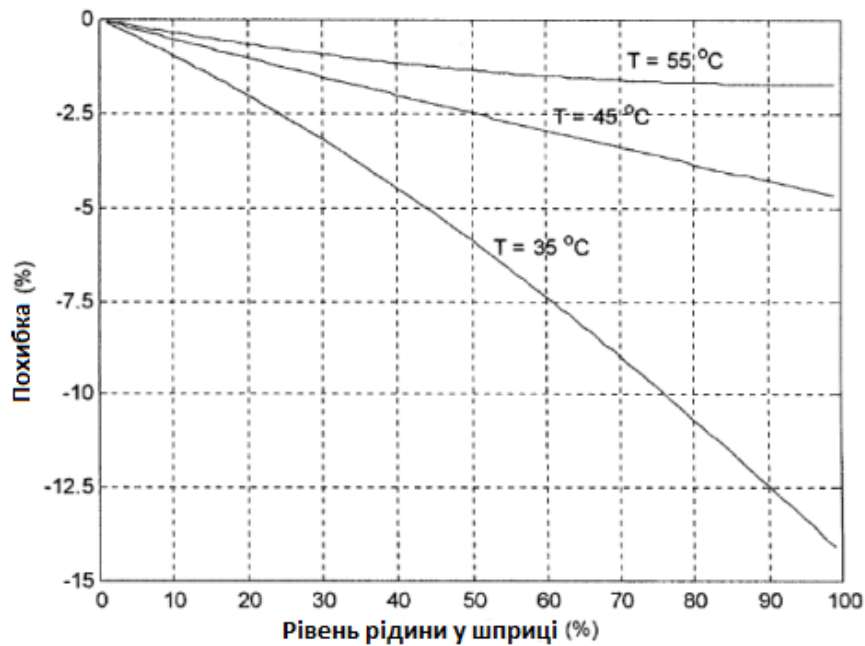


Рисунок 2.15 – Вплив температури голки:
відносна похибка в залежності від рівня рідини

Видно, що температура може суттєво змінювати динаміку швидкості потоку і, таким чином, стабільність об'єму рідини, що дозується. Зокрема, чим нижча температура, тим повільніша перехідна характеристика швидкості потоку і тим більше виражена нерівномірність об'єму дозованої рідини.

Якщо рідина демонструє залежну від часу поведінку течії, швидкість зсуву в рідині залежить не тільки від величини зсувної напруги, але й від тривалості зсувної напруги та проміжку часу між послідовними застосуваннями зсувної напруги (або історії зсуву).

Як наслідок, поведінка потоку змінюється з часом, залежно від історії зсуву, яку зазнає рідина. Крім того, також відомо, що поведінка рідини для пакування електроніки може суттєво відрізнятися від партії до партії. Всі ці відмінності в поведінці потоку рідини можуть бути представлені шляхом відповідної модифікації параметрів τ_0 , n і k .

У даній симуляції, як приклад, обрано різні значення n , щоб проілюструвати його вплив на однорідність об'єму рідини, що дозується. На рисунках 2.16 і 2.17

показано змодельовані витрати і розраховані відносні похибки для $n = 0,4, 0,6$ і $0,9$.

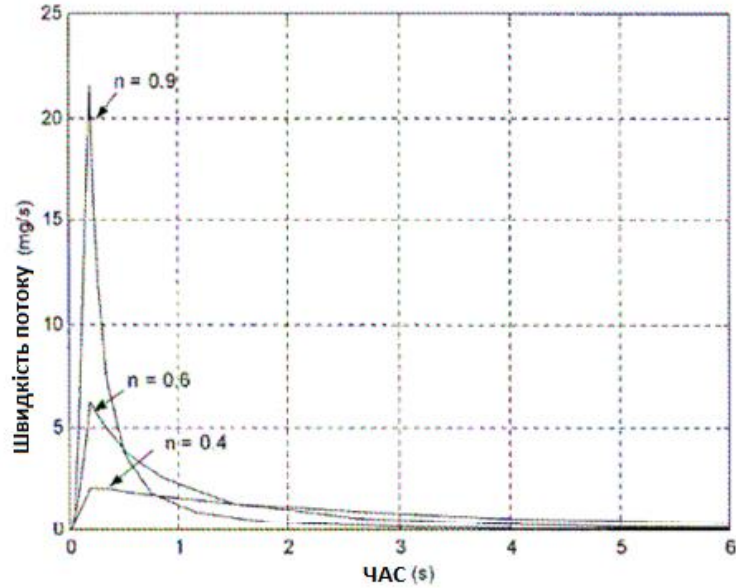


Рисунок 2.16 – Вплив поведінки потоку рідини:
швидкість потоку

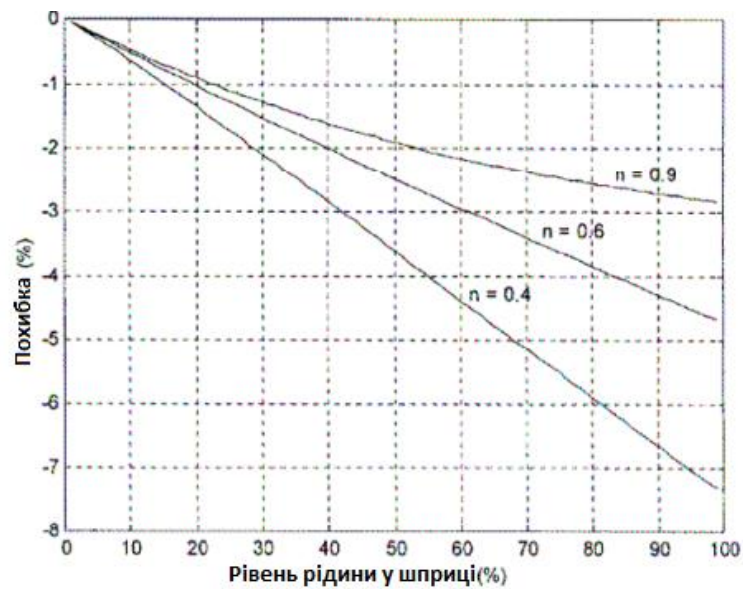


Рисунок 2.17 – Вплив поведінки потоку рідини:
відносна похибка в залежності від рівня рідини в шприці

Видно, що чим більше відхилення n від одиниці, тим повільніша перехідна характеристика витрати і тим більше виражена неузгодженість в об'ємі рідини, що дозується.

Рідина є стисливою, що відображається модулем об'ємної в'язкості, B . Щоб проілюструвати вплив стисливості рідини, було обрано різні значення B для моделювання швидкості потоку та розрахунку відносних похибок. Результати показано на рисунку 2.18 і рисунку 2.19 для $B = 0,5 \times 10^9$, $1,0 \times 10^9$ і $4,0 \times 10^9$ Па.

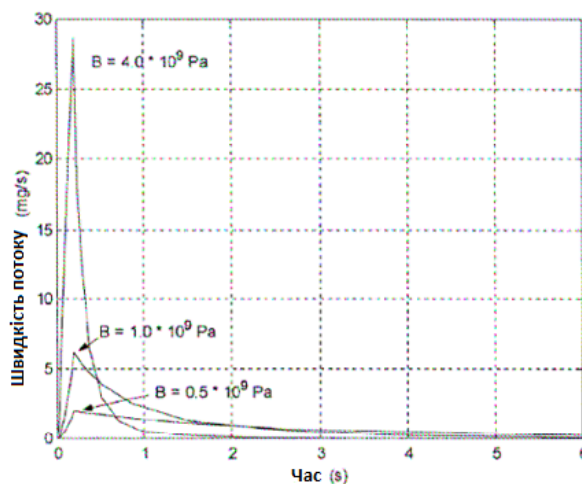


Рисунок 2.18 – Вплив стисливості рідини:
швидкість потоку

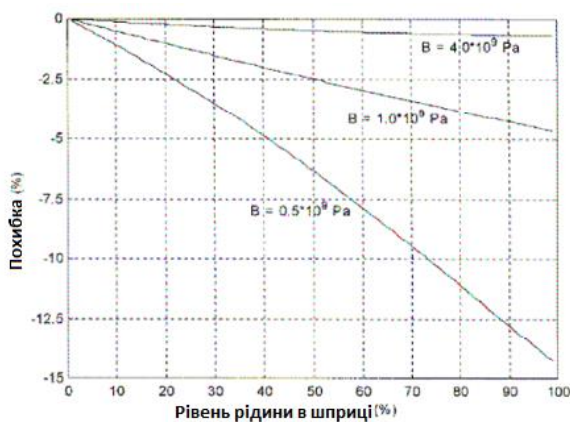


Рисунок 2.18 – Вплив стисливості рідини:
відносна похибка в залежності від рівня рідини в шприці

Видно, що стисливість рідини може суттєво змінювати динаміку та швидкість потоку i , таким чином, на стабільність об'єму рідини, що дозується. Зокрема, чим більше виражена стисливість рідини, тим повільніша перехідна характеристика швидкості потоку i тим більше виражена нерівномірність об'єму рідини, що дозується.

2.3 Висновки до другого розділу

1. Динаміка швидкості потоку рідини, що дозується, еквівалентна системі другого порядку. Її стаціонарне значення залежить лише від площі поперечного перерізу поршня, як це прийнято в промисловості; а рівень рідини в шприці, температура голки та властивості рідини впливають на її перехідний процес. Зокрема, чим вищий рівень рідини в шприці, нижча температура голки або більш виражена неньютонівська поведінка i стисливість рідини, тим повільніша перехідна характеристика швидкості потоку.

2. Через динаміку швидкості потоку об'єм рідини, що дозується, відрізняється від об'єму, що витісняється рухом поршня. Ця різниця стає більш помітною зі зменшенням часу дозування або зменшенням об'єму рідини, який необхідно дозувати. Це вказує на те, що метод об'ємного дозування не є справжнім об'ємним процесом дозування.

3. Швидкість потоку рідини, що дозується, є непостійною протягом процесу дозування, залежно від температури голки та властивостей рідини. Чим нижча температура голки або чим більш виражена неньютонівська поведінка або чим гірша стисливість рідини, тим більш виражена невідповідність об'єму рідини, що дозується, може бути результатом. Це свідчить про те, що для покращення консистенції в процесі дозування голку слід підігрівати, щоб покращити потік рідини в ній. Водночас слід використовувати шприци меншого розміру, щоб зменшити зміну рівня рідини у шприці під час дозування.

3 ІМІТАЦІЙНА МОДЕЛЬ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ

3.1 Особливості імітаційної моделі удосконаленого методу керування дозатором рідини

Розуміння процесу дозування є першим кроком у моделюванні нанесення рідини на плату. На рисунку 3.1 показані типові операції в процесі дозування. Дозуюча голка переміщує голку вниз до контактної позиції (рисунок 3.1 (а)), так що рідина контактує з поверхнею дошки, і під дією поверхневого натягу рідина швидко стікає на дошку і утворює рідинний місток між голкою і дошкою (рисунок 3.1 (б)).

Потім голка переміщується вертикально вгору (рисунок 3.1 (в)), і місток деформується до конфігурації "шийки", поки місток не розпадається на дві частини: одна частина стікає на дошку, а інша все ще залишається на голці (рисунок 3.1 (г)).

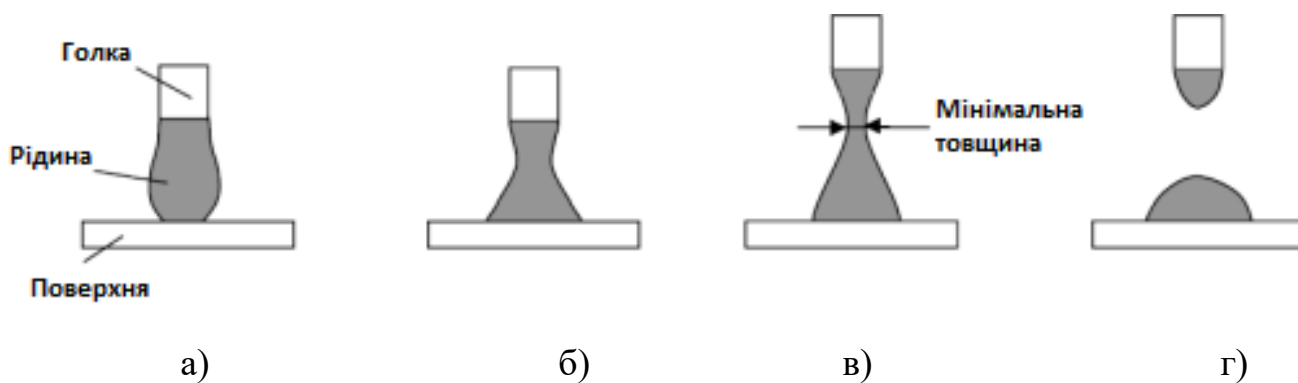


Рисунок 3.1 – Типові процеси дозування рідини з голки на плату

Наведений вище процес показує, що кількість рідини, що видавлюється з голки, відрізняється від кількості рідини, яка в кінцевому підсумку потрапляє на дошку. Ця різниця вважається однією з основних проблем, що впливають на продуктивність дозування, особливо у випадку, коли кількість рідини, що дозується, є мізерною.

Ця проблема існує у всіх трьох методах дозування: примусового витіснення, повітряного тиску, і поворотного гвинта. дозування. Для вирішення проблеми необхідно розробити модель для представлення кількості рідини, що подається на дошку.

На рисунку 3.2 схематично показано геометрію ідеального рідинного містка в пристрої для розтягування ниток. Він називається ідеальним, якщо форма рідинного містка завжди симетрична і рівномірна під час розтягування, радіуси верхньої і нижньої пластин рівні, а вагою рідини нехтуємо.

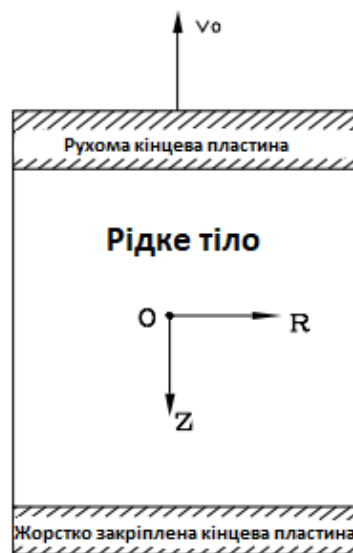


Рисунок 3.2 – Геометрія рідинного містка в пристроях для розтягування
НИТОК

При одновісному розтягуванні тіло рідини розтягується в одному напрямку за рахунок зменшення розмірів у двох інших напрямках. Для вимірювання одновісної деформації розтягування використовується деформація Хенкі, яка визначається шляхом оцінки інтеграла від початкової довжини L_0 до розширеної довжини L .

$$\varepsilon_h = \int_{L_0}^L \frac{dl}{L_0} = \ln(L/L_0), \quad (3.1)$$

де ε_h - деформація Хенкі.

В ейлеровому стаціонарному потоці розширення, якщо швидкість розширення v_0 є сталою, то залежність між v_0 і швидкістю розширення $\dot{\epsilon}$ в напрямку Z можна описати формулою:

$$v_0 = \dot{\epsilon}L(t), \quad (3.2)$$

де $L(t)$ - миттєва довжина рідинного містка під час розтягування.

З рівняння (3.2) швидкість розтягування визначається виразом:

$$\dot{\epsilon} = \frac{v_0}{L(t)} = \frac{v_0}{L_0 + v_0 \cdot t}. \quad (3.3)$$

Відповідно до закону збереження маси, для такого ідеального розширення радіус рідинного містка змінюється початкового значення $R(0)$ у відповідності до виразу:

$$r(t) = R_0 \sqrt{\frac{L_0}{L(t)}}. \quad (3.4)$$

де R_0 - початковий радіус рідинного містка;

$r(t)$ - радіус рідини в момент часу t .

Таким чином, ідеальну площу поперечного перерізу моста в реальному часі $A(t)$ можна визначити і подати у вигляді:

$$A(t) = \pi r^2(t) = \pi R_0^2 \times \frac{L_0}{L_0 + v_0 \cdot t}. \quad (3.5)$$

На практиці виявили, що для розтягування, показаного на рисунку 3.2 з постійною швидкістю розтягування $\dot{\epsilon}$, локальна швидкість деформації в осьовій середній площині $Z = L(t)/2$ була на 50% вищою, ніж накладена $\dot{\epsilon}$.

В результаті отримано залежність між витягнутою довжиною $L(t)$ і радіусом середньої площини $R_{mid}(t)$ виражається рівнянням:

$$\frac{L(t)}{L_0} = \left(\frac{R_0}{R_{mid}(t)} \right)^{4/3}. \quad (3.6)$$

Для пояснення цих явищ зазначимо, що реальне одновісне розтягнення не є чистою деформацією розтягування через існування зсувних ефектів поблизу двох торцевих ділянок через защемлення елементів рідини, прилеглих до торцевих пластин.

Як впливає з рівняння (3.3), якщо швидкість розширення v_0 постійна і розтягнення відбувається протягом дуже короткого проміжку часу, то швидкість розтягування є приблизно постійною, а радіус середньої площини також визначається рівнянням (3.6).

Отже, для розсування моста з постійною швидкістю V_0 , в реальному часі площа перерізу в середній площині $L(t)/2$ тоді змінюється з рівняння (3.5) до рівняння:

$$A \left(t, \frac{L(t)}{2} \right) = \pi r^2 \left(t, \frac{L(t)}{2} \right) = \pi R_0^2 \times \left(\frac{L_0}{L_0 + v_0 \cdot t} \right)^{\frac{3}{2}} = A_0 \left(\frac{L_0}{L_0 + v_0 \cdot t} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (3.7)$$

Для деформації розтягування перехідна функція росту в'язкості при розтягуванні описується виразом:

$$\eta_E^+(t, \dot{\varepsilon}) = \frac{\tau_{zz} - \tau_{rr}}{\dot{\varepsilon}}. \quad (3.8)$$

де τ_{zz} - розтягуюче напруження в напрямку Z ;

τ_{rr} - напруження в радіальному напрямку R .

Напруження розтягу τ_{zz} , що розвивається при $L(t)/2$ в напрямку Z , описується виразом:

$$\tau_{zz} = \frac{F_0}{A(t, L(t))} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{2\sigma}{r}, \quad (3.9)$$

де F_0 - сила, прикладена до верхньої пластини;

ρ - густина рідини розтягнутий;

σ - поверхневий натяг рідини;

r - радіус поперечного перерізу при $L(t)/2$.

Тим часом, напруження τ_{rr} в радіальному напрямку при $L(t)/2$, завдяки наявності поверхневого натягу, дорівнює:

$$\tau_{rr} = \frac{-\sigma}{r}. \quad (3.10)$$

У перерізі середньої площини $L(t)/2$, підставивши рівняння (3.9) і (3.10) у рівняння (3.8) дає в'язкість при розтягуванні, яка має вигляд:

$$\eta_E^+(t, \dot{\epsilon}) = \frac{\left(\frac{F_0}{A\left(t, \frac{L(t)}{2}\right)} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right)}{\dot{\epsilon}}. \quad (3.11)$$

Для розрахунку сумарного напруження $\left(\frac{F_0}{A\left(t, \frac{L(t)}{2}\right)} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right)$ у рівнянні (3.11), важливо знати рівняння розтяжної в'язкості $\eta_E^+(t, \dot{\epsilon})$. Існує два методи для знаходження рівняння в'язкості при розтягуванні для даного рідкого матеріалу.

1. Проведення експериментів з розтягування для дослідження поведінки матеріалу при деформації з розтягуванням, а потім розробка рівняння в'язкості при розтягуванні на основі експериментальних результатів.

2. Знаходження взаємозв'язку між в'язкістю при зсуві та в'язкістю при розтягуванні. Обґрунтування цього методу полягає в тому, що в'язкість при зсуві і в'язкість при розтягуванні пов'язані між собою, якщо деформація при розтягуванні невелика.

Для ньютонівських рідин Траутон встановив математичну залежність між в'язкістю при розтягуванні та в'язкістю при зсуві, яка наведена нижче і є справедливою для всіх швидкостей розтягування.

$$\eta_E = 3\eta_s, \quad (3.12)$$

де η_E - в'язкість при розтягуванні;

η_s - в'язкість при зсуві.

Коефіцієнт Траутона описується виразом:

$$T_R = \frac{\eta_E(\dot{\epsilon})}{\eta_s(\dot{\gamma})}, \quad (3.13)$$

де $\dot{\gamma}$ - швидкість зсуву.

Для неньютонівських рідин справедливе наступне граничне співвідношення між в'язкістю при розтягуванні та зсуві:

$$\eta_E(\dot{\epsilon})|_{\dot{\epsilon} \rightarrow 0} = 3\eta_s(\dot{\gamma})|_{\dot{\gamma} \rightarrow 0}. \quad (3.14)$$

Хінгманн дослідив реологічні властивості неньютонівської рідини: конверсійного ізотактичного поліпропілену. Було виявлено, що для різних швидкостей розтягування в межах короткого часу розтягування миттєва в'язкість при розтягуванні $\eta_E^+(t, \dot{\epsilon})$ також слідує за поведінкою Траутона.

В результаті, якщо рідинний місток короткого періоду розтягування або деформація розтягування мала, то складове рівняння (3.14) в'язкості при розтягуванні можна переписати у вигляді:

$$\eta_E^+(t, \dot{\epsilon}) = 3\eta_s(\sqrt{3}\dot{\epsilon}). \quad (3.15)$$

Підставивши (3.15) у (3.11), отримаємо:

$$\left(\frac{F_0}{A(t, \frac{L(t)}{2})} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right) = \dot{\varepsilon} \cdot 3\eta_s(\sqrt{3}\dot{\varepsilon}). \quad (3.16)$$

3.2 Імітаційна модель удосконаленого методу керування дозатором рідини

При різних швидкостях розтягування в процесі деформації рідинного моста виникають три типи руйнувань: в'язке руйнування, когезійне руйнування і крихке руйнування. Для кількісного прогнозування в'язкого руйнування можна використовувати критерій Консідера, який стверджує, що однорідне одновісне розтягнення в'язкопружної нитки гарантується за умови, що деформація є меншою за значення, при якому на кривій залежності сили від розтягування спостерігається максимум.

Або, навпаки, розтягнення буде нестійким і утвориться "шийка", якщо чисте розтягуюче зусилля у нитці пройде через максимум при критичному деформації ε_c . Цей критерій прийнято використовується для прогнозування розриву неньютонівського рідинного моста, оскільки деформація розтягування вважається малою, тому а час розтягування дуже малий.

В процесі однорідного одновісного розширення площа зменшується у відповідності до виразу:

$$A(\varepsilon) = \pi R^2(\varepsilon) = \pi R_0^2 e^{-\varepsilon}, \quad (3.17)$$

де $\varepsilon = \dot{\varepsilon}_0 t$ - деформація розтягування;

$\dot{\varepsilon}_0$ - початкова швидкість розтягування.

Припускаючи, що напруження ($\tau_{zz} - \tau_{rr}$) вже відоме, критерій Консідера стверджує що стабільність гарантована за умови, що:

$$\frac{dF_{ex}}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} [(\tau_{zz} - \tau_{rr})\pi R_0^2 e^{-\varepsilon}] \geq 0, \quad (3.18)$$

де F_{ex} - це повна сила розтягування.

По суті, середня площа є найбільш легко руйнуючим перерізом при в'язкому руйнуванні, оскільки вона має мінімальну площу вздовж моста. Тому критерій руйнування можна отримати, підставивши рівняння (3.9) і (3.10) у рівняння (3.18), а потім замінивши $\pi R_0^2 e^{-\varepsilon}$ на рівняння:

$$\frac{dF_{ex}}{d\varepsilon} = \frac{d}{d\varepsilon} \left[\left(\frac{F_0}{A(t, \frac{L(t)}{2})} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right) A_0 \left(\frac{L_0}{L_0 + v_0 t} \right)^{3/2} \right] \geq 0. \quad (3.19)$$

Коли деформація розтягу збільшується до ε_c і відповідає умові:

$$\left. \frac{dF_{ex}}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = \frac{d}{d\varepsilon} \left[\left(\frac{F_0}{A(t, \frac{L(t)}{2})} - \frac{\rho g L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right) A_0 \left(\frac{L_0}{L_0 + v_0 t} \right)^{3/2} \right] \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = 0. \quad (3.20)$$

В результаті рідинний місток можна розглядати як такий, що починає руйнуватися, а ε_c можна вважати критичною деформацією розтягування.

Рівняння (3.20) можна використовувати для визначення часу, коли відбувається руйнування рідинного містка для випадків, коли розтягування є малим.

Для рідини FP4451 зсувна в'язкість визначається за допомогою 3-параметричної моделі Карро:

$$\eta_s = 728,5(1 + (34.9\dot{\gamma})^2)^{\frac{0.5672-1}{2}}. \quad (3.21)$$

Підставивши наведене вище рівняння у рівняння (3.15), отримаємо рівняння в'язкості при розтягуванні для короткого часу розтягування:

$$\eta_E^+(t, \dot{\varepsilon}) = 3 \times 728.5(1 + (34.9 \times \sqrt{3}\dot{\varepsilon})^2)^{\frac{0.5672-1}{2}}. \quad (3.22)$$

Підставивши рівняння (3.22) в рівняння (3.16), напруження розтягування можна виразити за допомогою виразу:

$$\left(\frac{F_0}{A\left(t, \frac{L(t)}{2}\right)} - \frac{\rho \cdot g \cdot L(t)}{2} - \frac{\sigma}{r} \right) = \dot{\varepsilon} \times \eta_E^+(t, \dot{\varepsilon}) =$$

$$= \dot{\varepsilon} \times 3 \times 728.5 (1 + (34.9 \times \sqrt{3} \dot{\varepsilon})^2)^{\frac{0.5672-1}{2}}. \quad (3.23)$$

Врешті-решт, підставляючи рівняння (3.23) в рівняння (3.21), отримуємо критерій розриву моста для рідини FP4451, який має вигляд:

$$\left. \frac{dF_{ex}}{d\varepsilon} \right|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = \frac{d}{d\varepsilon} \left[(\dot{\varepsilon} \times 3 \times 728.5 (34.9 \times \sqrt{3} \dot{\varepsilon})^2)^{\frac{0.5672-1}{2}} A_0 \left(\frac{L_0}{L_0 + v_0 t} \right)^{3/2} \right] \Big|_{\varepsilon=\varepsilon_c} = 0. \quad (3.24)$$

Рівняння критерію розриву (3.24) не є достатнім для розрахунку кількості рідини, що потрапила на плату. Для визначення об'єму, який потрапив на плату, необхідно дослідити форму рідинного містка. У стаціонарному стані рідинний місток описується рівнянням Лапласа.

Розглянемо довільну невелику гладку поверхню, як показано на рисунку 3.3, де довільна точка P_0 розглядається як початок пари ортогональних прямих AB і CD.

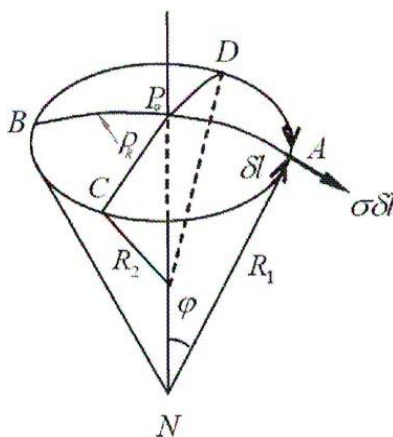


Рисунок 3.3 – Капілярна рівновага несферичного ковпачка

Радіуси кривизни обох кривих у точці P_0 дорівнюють R_1 та R_2 , відповідно. Тоді коло - це проведена вздовж поверхні з постійною відстанню P_R до P_0 . Згідно з теоремою Ейлера, запишемо рівність:

$$\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}. \quad (3.25)$$

де r_1 і r_2 - головні радіуси кривизни.

У точці А на елемент δl граничної лінії діє сила $\sigma \delta l$, проекція якої на нормаль PN дорівнює:

$$\sigma \delta l \sin \varphi = \sigma \varphi \delta l = \sigma \left(\frac{P_R}{R_1} \right) \delta l, \quad (3.26)$$

де φ дуже мале.

Розглядаючи чотири елементи δl периферії в точках А, В, С і D, результуюча еквівалентна сила описується виразом:

$$\sigma \delta l \left[2 \left(\frac{P_R}{R_1} \right) + 2 \left(\frac{P_R}{R_2} \right) \right] 2p \sigma \delta l \left[\left(\frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_2} \right) \right]. \quad (3.27)$$

Враховуючи, що цей вираз не залежить від вибору АВ і CD, його можна інтегрувати по всьому колу. Оскільки було розглянуто чотири ортогональні елементи, інтегрування виконується за чверть оберту, що призводить до виразу:

$$\pi P_R^2 \sigma \left[\left(\frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_2} \right) \right]. \quad (3.28)$$

У стані рівноваги ця сила повинна бути врівноважена силою чистого тиску:

$$(P'' - P') \pi P_R^2 \sigma = \pi P_R^2 \sigma \left[\left(\frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_2} \right) \right]. \quad (3.29)$$

Рівняння (3.29) зводиться до рівняння Лапласа:

$$(P'' - P') = \sigma \left[\left(\frac{1}{r_1} \right) + \left(\frac{1}{r_2} \right) \right], \quad (3.30)$$

де P' і P'' - тиск на опуклій і увігнутій поверхні відповідно.

На рисунку 3.4 схематично показано рідинний місток між вихідним отвором голки та підкладкою.

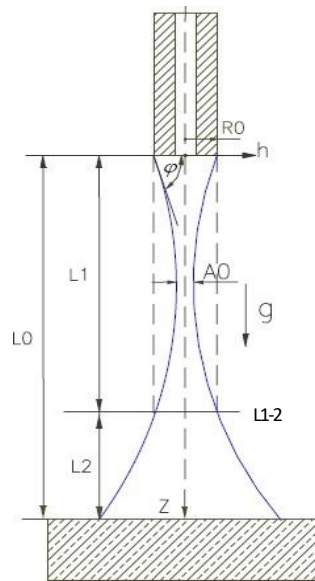


Рисунок 3.4 – Рідинний місток між голкою та підкладкою

На рисунку 3.4 зроблені наступні позначення:

R_0 - зовнішній радіус голки;

L_0 - початкова відстань від виходу голки до підкладки;

m - маса рідинного містка.

З урахуванням гравітаційного ефекту, виходячи з рівняння Лапласа (3.30), форма асиметричного рідинного містка $h(z)$ визначається виразом:

$$\sigma \left(\frac{1}{h(z) \left[1 + \left(\frac{dh(z)}{dz} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{\frac{d^2 h(z)}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh(z)}{dz} \right)^2 \right]^{3/2}} \right) = P_{z(0)} + \rho g z - P_0, \quad (3.31)$$

де $P_{z(0)}$ - внутрішній тиск в середній точці виходу голки;

z - координата рідини в напрямку z .

Граничні умови рідинного містка визначаються наступним чином.

1. Об'єм рідинного моста:

$$V_L = \pi \int_0^{L_0} h^2(z) dz. \quad (3.32)$$

Радіус виходу голки:

$$h(z = 0) = R_0. \quad (3.33)$$

На рисунку 3.5 зображено діаграму для розрахунку $P_{z(0)}$.

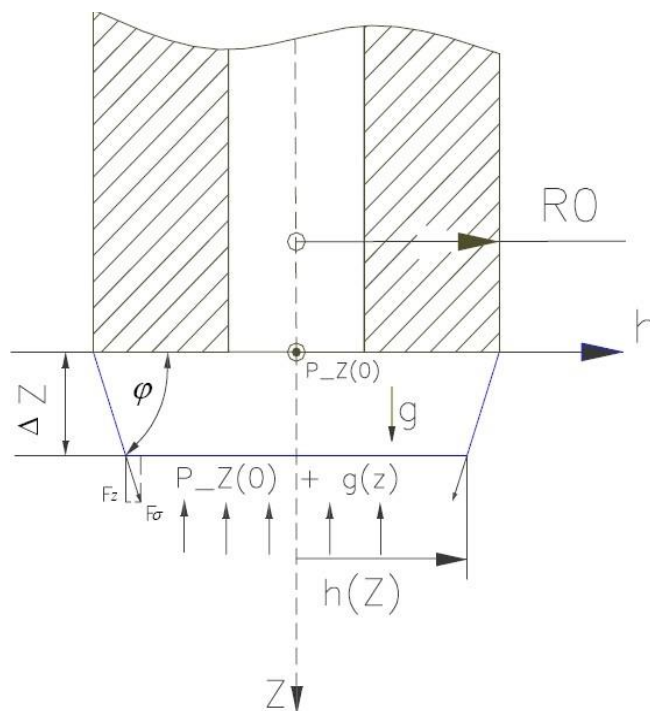


Рисунок 3.5 – Діаграма для розрахунку $P_{z(0)}$

Підставивши (3.32)-(4.34) у (3.31), коли Δz наближається до нуля, отримаємо розв'язок для $P_{z(0)}$.

$$P_{z(0)} = \frac{2\sigma}{R_0} \sin\varphi. \quad (3.34)$$

Підставивши (3.34) в (3.31), форму рідинного містка під дією сили тяжіння можна виразити рівняння (3.35):

$$\sigma \left(\frac{1}{h(z) \left[1 + \left(\frac{dh(z)}{dz} \right)^2 \right]^{1/2}} - \frac{\frac{d^2 h(z)}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dh(z)}{dz} \right)^2 \right]^{3/2}} \right) = \frac{2\sigma}{R_0} \sin\varphi + \rho g z - P_0. \quad (3.35)$$

Імітаційне моделювання рідинного моста було проведено за умови, що верхня і нижня пластини мають однаковий радіус. Результати імітаційного моделювання рідинного моста використані разом з критерієм розриву і моделлю форми моста, які були наведені раніше для оцінки кількості рідини на платі. В процесі імітаційного моделювання рідинного моста зроблені наступні припущення.

1. Теплообмін між внутрішньою і зовнішньою сторонами рідинного моста відсутній.

2. Температура рідини в шприці та голці однакова і постійна. Таким чином, вплив температури на поверхневий натяг відсутній. Вплив навколишнього повітря на поверхневий натяг також не враховується.

3. Маса рідини невелика, і результуюча інерція незначна.

На основі цих припущень пропонується удосконалений метод керування дозатором рідини. Ідея удосконаленого методу керування дозатором рідини полягає в наступному.

Після того, як рідина видавлюється і контактує з платою, рідинний місток вважається рівноважним, у відповідності до рисунку 3.6 (а).

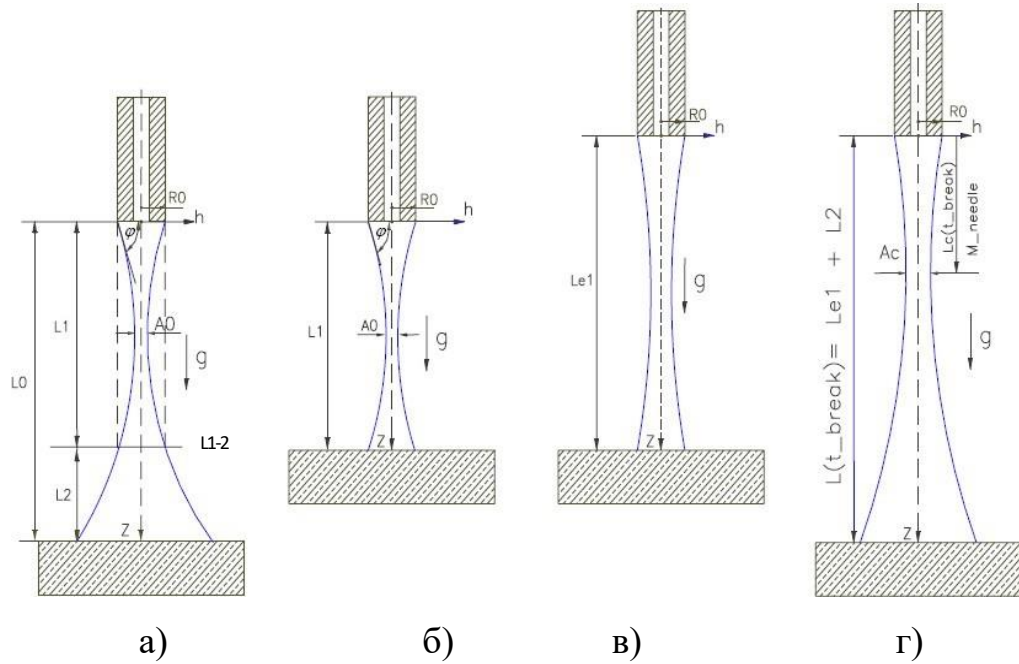


Рисунок 3.6 – Удосконалений метод керування дозатором рідини

Далі в межах містка можна ідентифікувати рідке тіло з однаковими верхнім і нижнім радіусами у відповідності до рисунку 3.6 (б). Таким чином, можна застосувати критерій розриву моста, представлений раніше, для визначення довжини розриву при русі голки вгору у відповідності до рисунку 3.6 (в).

Припускаючи, що рідинний місток з довжиною розриву у відповідності до рисунку 3.6 (г) знаходиться в рівновазі, кількість рідини, що потрапила на дошку, розраховується за допомогою рівняння Лапласа (3.35).

Удосконалений метод керування дозатором рідини складається з трьох етапів.

1. Обчислення $L1$, $A0$ та $M(L1)$ моста, як показано на рисунку 3.6 (а), у початковому стані. Взявши радіус голки R_0 , початкову довжину моста L_0 і кількість дозованої рідини M як граничні умови, використовуючи рівняння Лапласа (3.39) для обчислення $L1$, $A0$ та $M(L1)$.

На рисунку 3.6 зроблені наступні позначення:

$L1$ - довжина відрізка від $Z=0$ до а перерізу того ж радіуса R_0 ;

$M(L1)$ - маса рідини від виходу голки до відрізка L_{1-2} ;

$A0$ - мінімальна площа ділянки вздовж мосту.

2. Отримання подовженої довжини L_{e1} , у відповідності до рисунка 4.6 (б) та (в). На цьому кроці $L1$ та $A0$ використовуються як початкові вхідні дані для рівняння (3.24). Коли швидкість розтягування V_0 також відома, з рівняння (3.24), буде знайдено критичне розтягування напруга ϵ_c . Підставляючи ϵ_c в рівняння (3.1), отримуємо значення довжини L_{e1} .

3. Розрахунок кількості рідини на платі. Взавши радіус голки $R0$ і кількість рідини M в якості граничних умов, повторно використовуючи рівняння Лапласа (3.39), знайдемо критичний переріз, який має мінімальну площу перерізу A_c на довжині $L(t_break)$. Кількість рідини нижче критичного перерізу розглядається як кількість рідини на платі після розриву.

У наведеному вище процесі розрахунку довжина $L2$ розглядається як константа. Це є обґрунтованим, враховуючи, що реальна швидкість розтягування середнього перерізу (з мінімальною площею перерізу) на 50 % вища за номінальну швидкість розтягування. Було встановлено, що площа поперечного перерізу в перерізі L_{1-2} значно більша, ніж мінімальна площа в перерізі $A0$. Це свідчить про те, що переріз $A0$ і його околиці деформуються швидше, ніж переріз L_{1-2} і перерізи нижче. Таким чином, вважається, деформація розтягу основному спричинена флюїдом над перерізом $L_{(1-2)}$.

На основі моделі, представленої в попередньому розділі, було проведено моделювання з метою дослідження впливу поверхневого натягу та кількості рідини, що видавлюється з голки, на кількість рідини на платі. Для моделювання використовувався матеріал FP4451.

Процедура моделювання така сама, як і три вищезгадані кроки при розрахунку кількості рідини. На основі рівняння (3.35) розроблено імітаційну модель в середовищі Simulink для розрахунку параметрів, пов'язаних з формою рідинного містка, таких як $L1$, $A0$ і $M(L1)$, які використовуються для знаходження критичної деформація розтягування.

Імітаційна модель в середовищі Simulink для розрахунку параметрів, пов'язаних з формою рідинного містка, зображена на рисунку 3.7.

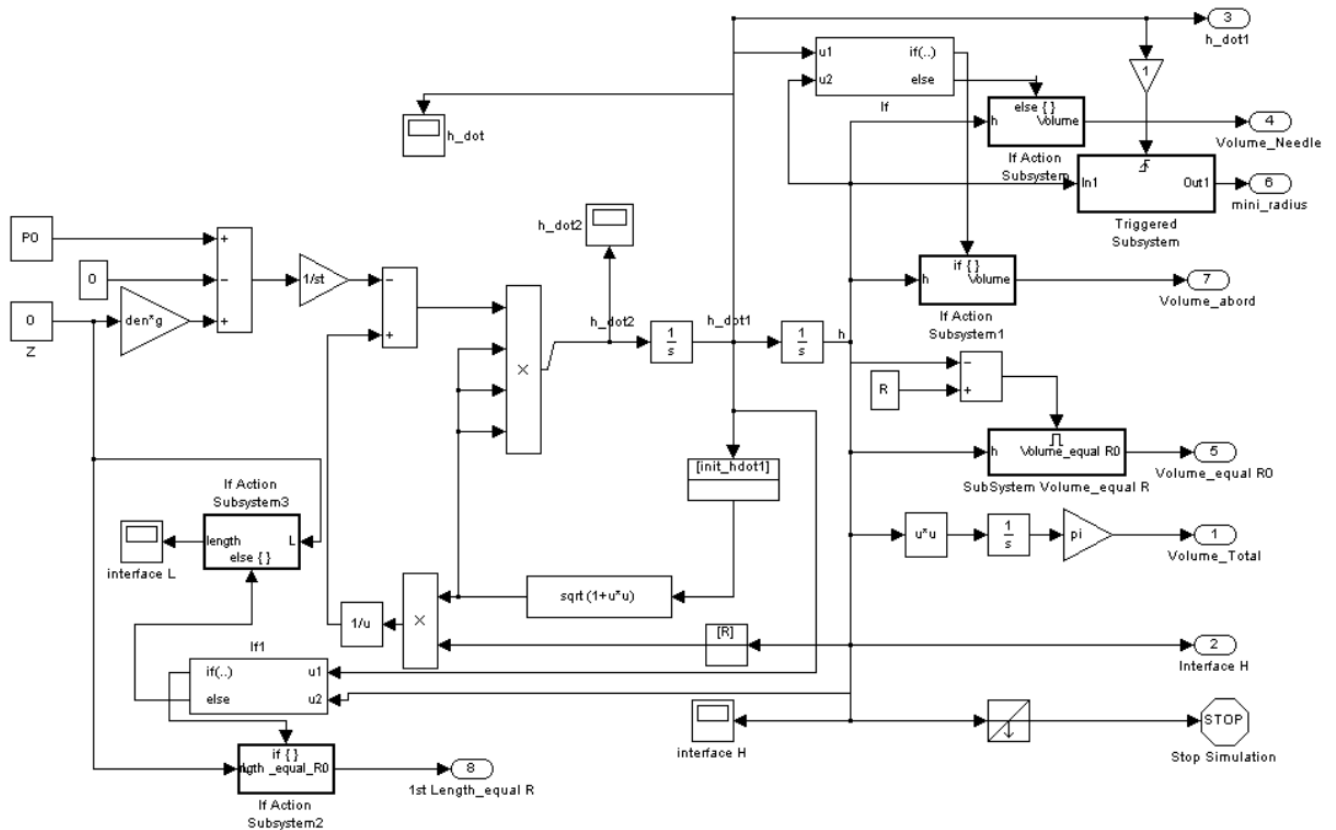


Рисунок 3.7 – Імітаційна модель удосконаленого методу керування дозатором рідини в середовищі Simulink

Рівняння (3.1) і (3.39) дозволяють знайти критичну довжину моста, коли міст починає руйнуватися. Перше моделювання полягає у дослідженні впливу поверхневого натягу на кількість рідини на платі. Десять різних значень поверхневого натягу наведені у таблиці 3.1, починаючи від 0,06 Н/м до 0,55 Н/м.

Таблиця 3.1 - Значення поверхневого натягу для моделювання

№ значення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхневий натяг, Н/м	0,06	0,08	0,1	0,155	0,2	0,25	0,3	0,35	0,43	0,55

Ці значення були використані в процесі моделювання, тоді як інші значення параметрів, що використовувалися, наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 - Параметри моделювання

Опис	Значення
Зовнішній діаметр голки, м	$R_0=1,06/2/1000$
Початковий кут контакту рідини з голкою на ділянці $Z=0$	$\text{con_angle}=\pi/3,3$
Густина FP4451, кг/м^3	$\rho=1780$
Прискорення сили тяжіння, м/с^2	$g=9,8$
Швидкість висування, м/с	$v_0=30/1000$
Загальна кількість рідини, що вийшла з голки, мг	$M=8$
Початкова довжина рідинного містка, мм	$L_0=2$

У цьому моделюванні використовується відсоткове співвідношення кількості рідини на платі до загальної кількості рідини, що дозується, а результати моделювання представлені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 - Результати моделювання

№ значення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Поверхневий натяг, Н/м	0,06	0,08	0,1	0,155	0,2	0,25	0,3	0,35	0,43	0,55
Кількість рідини на платі/загальна кількість рідини, %	97,8	97,5	97,3	96,8	96,6	96,4	96,2	96,1	96,0	95,9

Результати моделювання також показані на рисунку 3.8. Видно, що кількість рідини на платі може змінюватися в межах невеликого відсотка від загальної кількості рідини, витиснутої з голки, через різний поверхневий натяг.

Зокрема, величина варіюється від 95,9 % до 97,8 %, а чиста зміна становить близько 2% від 8 мг. Також видно, що чим більший поверхневий натяг, тим менша кількість рідини потрапляє на плату. Причина цієї тенденції полягає в тому, що більша капілярна сила, спричинена більшим поверхневим натягом,

захоплює більше рідини навколо вихідного отвору голки, а отже, на плату витікає менше рідини.

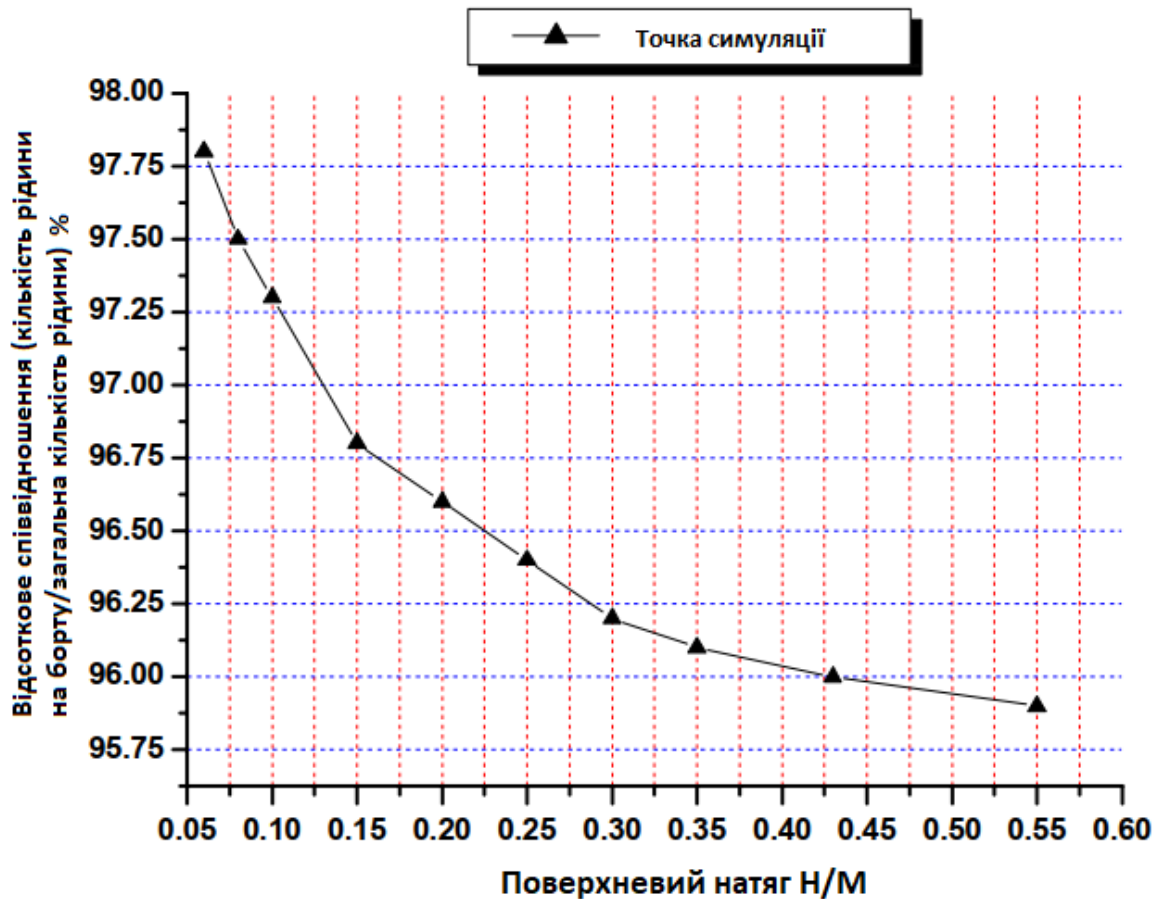


Рисунок 3.8 – Вплив поверхневого натягу на кількість рідини на платі

Друге моделювання полягає в дослідженні впливу загальної кількості рідини, що витікає з голки, на кількість рідини на платі. Було використано одинадцять різних значень поверхневого натягу у відповідності до таблиці 3.4, що варіюються від 6 мг до 12 мг.

Інші значення параметрів наведені в таблиці 3.5. Як і в попередньому моделюванні, було використано відсоткове співвідношення кількості рідини на дошці до загальної кількості дозованої рідини, а результати моделювання наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.4 - Початкова кількість дозованої рідини для моделювання

№ значення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Маса, мг	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11	12

Таблиця 3.5 Параметри моделювання для вивчення впливу початкової кількості дозованої рідини

Опис	Значення
Зовнішній діаметр голки, м	$R_0=1,06/2/1000$
Початковий кут контакту рідини з голкою на ділянці $Z=0$	$\text{con_angle}=\pi/3,3$
Поверхневий натяг, Н/м	$\sigma=0,43$
Густина FP4451, кг/м ³	$\rho=1780$
Прискорення сили тяжіння, м/с ²	$g=9,8$
Швидкість висування, м/с	$v_0=30/1000$
Початкова довжина рідинного містка, мм	$L_0=2$

Таблиця 3.6 Результати моделювання при різних початкових кількостях рідини

№ значення	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Маса, мг	6	6,5	7	7,5	8	8,5	9	9,5	10	11	12
Кількість рідини на платі/загальна кількість рідини, %	89,2	92,1	93,0	95,1	96,0	96,7	97,3	97,8	98,1	98,6	99,0

Результати моделювання також показані на рисунку 3.8. Видно, що початкова кількість дозованої рідини також впливає на рідини на платі, тобто кількість рідини на платі може змінюватися в межах невеликого відсотка від загальної кількості рідини, екструдованої з голки, через різну початкову кількість рідини, дозованої з голки.

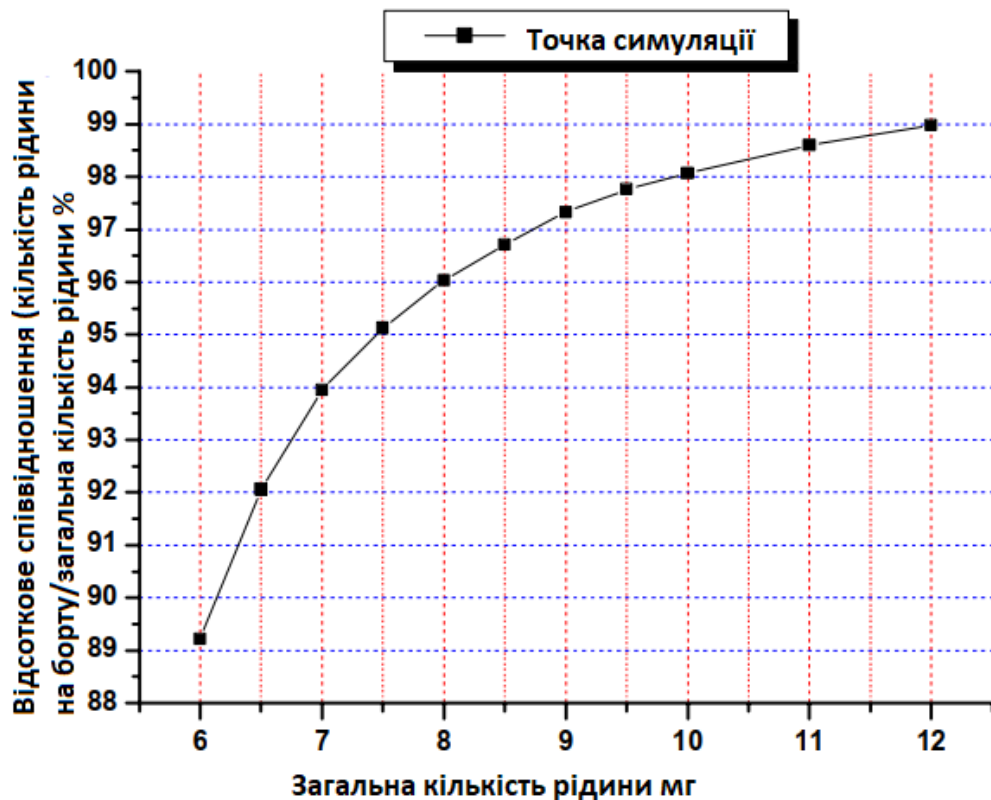


Рисунок 3.9 – Вплив початкової кількості рідини на кількість рідини на платі

Зокрема, відсоткове співвідношення варіюється від 89,2% до 99,0%, а чиста зміна становить близько 10%, що відповідає початковій кількості рідини від 6 мг до 12 мг. Також видно, що чим більша початкова кількість рідини дозується, тим більше рідини потрапляє на плату.

Одне з можливих пояснень цієї тенденції полягає в тому, що поверхневий натяг фіксований, а здатність голки вміщати підвішену рідину також обмежена. Зі збільшенням кількості рідини, що витікає з голки в кінцевому підсумку на плату потрапляє більше рідини.

3.3 Висновки до третього розділу

1. В процесі контактного дозування кількість рідини, що видавлюється з голки, відрізняється від кількості рідини, що потрапляє на плату. Ця різниця вважається однією з основних проблем, що впливають на продуктивність дозування. У цій главі пропонується модель для представлення кількості рідини,

що переноситься на плату, на основі існуючі теорії руйнування рідинного містка та рівняння Лапласа.

2. На основі розробленої моделі було проведено симуляції для дослідження впливу поверхневого натягу та початкової кількості рідини, що витікає з вихідного отвору голки, на кількість рідини, що переноситься на плату.

3. Поверхневий натяг впливає на процес деформації розтягування, тим самим впливаючи на кількість рідини, що переноситься на плату. Чим більший поверхневий натяг, тим менша кількість рідини переноситься на плату.

4. Кількість рідини, що видавлюється з голки, має прямий зв'язок з кількістю рідини на платі. Чим більша початкова кількість рідини дозується, тим більше рідини переноситься на плату.

4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ УДОСКОНАЛЕНОГО МЕТОДУ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ

4.1 Особливості експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини

Для експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини виберемо дозатор Performus X від компанії Nordson EFD, який зображено на рисунку 4.1.



Рисунок 4.1 – Витискний дозатор рідини

Дозатори Performus X від компанії Nordson EFD збільшують пропускну здатність і знижують виробничі витрати за рахунок контрольованого застосування клеїв, мастильних матеріалів та інших монтажних рідин. Performus X100 оснащений регулятором тиску 0–7 бар і може використовувати всі рідини.

Performus X15 оснащений регулятором тиску 0–1 бар і забезпечує більший контроль під час дозування рідких рідин. Пристрої Performus X15 і X100 оснащені контролем вакууму, зручною функцією Learn.

У 2024 році ТОВ «ТопСітіСервіс» передало у користування кафедри автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Хмельницького національного університету стенд для вивчення і дослідження методів керування рухом, який зображено на рисунку 4.2.

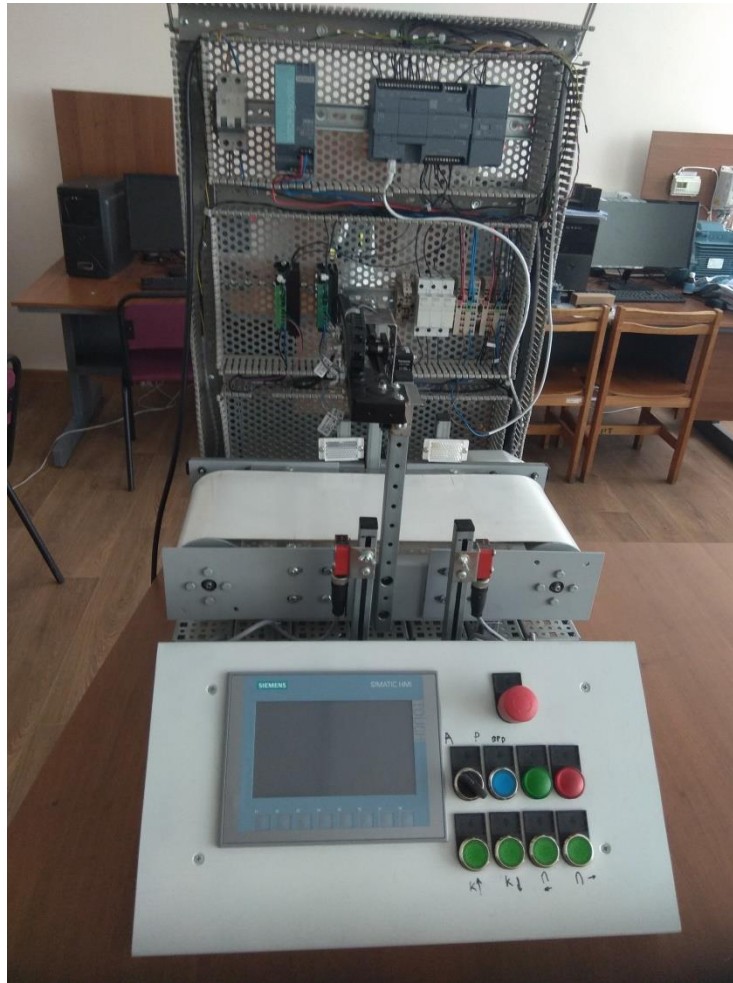


Рисунок 4.2 – Стенд для вивчення і дослідження методів керування рухом ТОВ «ТопСітіСервіс»

Програмне забезпечення для експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини було розроблено за допомогою програмного забезпечення TIA Portal від компанії Siemens.

Програмне забезпечення експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини орієнтоване на управління стендом ТОВ «ТопСітіСервіс», який здійснює подачу плати для дозатора і забирає плату після нанесення рідини.

Керування стендом ТОВ «ТопСітіСервіс» здійснюється за допомогою функціональних блоків (англійською мовою Function Block FB), які виконують задані технологічні функції. Функціональні блоки поділяються на три категорії за рівнем складності:

1. Функціональні блоки базових операцій.
2. Функціональні блоки модулів керування.
3. Функціональні блоки модулів пристроїв.

Таким чином, функціональні блоки призначені для екрування основними рухами окремих осей, а також операціями багатоосьового переміщення. Перші дві функції призначені для підготовки до введення стенда ТОВ «ТопСітіСервіс» в експлуатацію. Це прив'язка положень всіх осей стенда ТОВ «ТопСітіСервіс» і позиціонування до початкової точки. Третя функція призначена для виконання запиту замовлення на заповнення дозатора.

Слоти надають всю необхідну інформацію про об'єкти дозатора і плати. Вся інформація про стенд ТОВ «ТопСітіСервіс» зберігається в блоках даних з використанням структур типу даних, визначений користувачем (англійською мовою User defined Data Type UDT).

Візуалізація забезпечує можливість як управління стендом ТОВ «ТопСітіСервіс», так і повного керування дозатором рідини. Також надається доступ до функцій руху нижнього рівня. Однак їх використання не є необхідним або рекомендованим під час роботи. Прив'язку до осей потрібно вводити тільки після ввімкнення комірки, після цього розглядається тільки використання функції заповнення замовлень.

Перед початком створення програми необхідно підключити виконавчі механізми і датчики до фізичних входів і виходів ПЛК, це підключення описано в таблиці 4.1 для вхідних з'єднання та таблиці 4.2 для вихідних з'єднання.

Після цього слід налаштувати апаратну конфігурацію ПЛК і підключеного модуля. Першим кроком після підключення ПЛК до механізмів і датчиків і після конфігурації обладнання було важливе завдання оживити виконавчі механізми і зробити їх функціональними.

Тому опис програмного забезпечення починається з підрозділів, присвячених цьому завданню. Основним елементом трьохосьового маніпулятора є приводи, які переміщують маніпулятор по кожній осі.

Таблиця 4.1 - Вхідні та вихідні з'єднання

Вхідні з'єднання	Опис
DI0.0	Кнопка E-Stop
DI0.1	Несправність джерела живлення
DI0.2	Кодер 1 - А
DI0.3	Кодер 1 - В
DI0.4	Оптичний кінцевий датчик - задній
DI0.5	Кінцевий оптичний датчик - передній
DI0.6	Кінцевий індуктивний датчик - нижній
DI0.7	Кінцевий індуктивний датчик - верхній
DI1.0	Кінцевий оптичний датчик - лівий
DI1.1	Кінцевий оптичний датчик - правий
DI1.2	Датчик наявності плати

Таблиця 4.2 - Вихідні з'єднання

Вихідні з'єднання	Опис
DQ0.0	Двигун постійного струму - напрямок
DQ0.1	Двигун постійного струму - ШІМ
DQ0.2	Кроковий двигун приводу (захват) – активація
DQ0.3	Привід крокового двигуна (захоплення) – напрямок
DQ0.4	Кроковий двигун приводу (захват) - крок
DQ0.5	Кроковий двигун приводу (переміщення) - активація
DQ0.6	Кроковий двигун приводу (переміщення) - напрямок
DQ0.7	Кроковий двигун приводу (переміщення) - крок
DQ4.0	Сигналізація
DQ4.1	Сигналізація
DQ4.2	Сигналізація

Пара крокових двигунів використовується для переміщення візка (вісь X) і тримача плати (вісь Z), а двигун постійного струму використовується для переміщення маніпулятора у вертикальному напрямку (вісь Y).

У зв'язку з тим, що використовувані приводи працюють на різних принципах, важливо підходити до їх введення в експлуатацію та управління подвійним чином.

При цьому різниця в керуванні приводами залежить від типу використовуваної апаратури керування. Перший спосіб полягає у створенні об'єктів технологічних осей і керуванні приводом за допомогою бібліотечних інструкцій. Другий спосіб полягає у створенні користувацьких інструкцій.

Використаний ПЛК серії S7-1200 з процесором 1214C оснащений базовими інструкціями для контролю рухом (англійською мовою Motion Control), тобто керування приводами. Використання цих інструкцій обумовлено створенням технологічних об'єктів типу Axis та їх конфігурацією для заданих приводів.

Технологічні об'єкти поділяються на три основні групи.

1. Контроль рухом (англійською мовою Motion Control).
2. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (англійською мовою Proportional-Integral-Derivative controller PID).
3. Технологічні об'єкти ідентифікації (англійською мовою SIMATIC Ident).

Спектр використовуваних об'єктів в групі Motion Control відрізняється типом використовуваного ПЛК, причому, ПЛК S7-1500 містить більш просунуте програмне забезпечення для управління приводами.

Технологічними об'єктами, які можна створити в ПЛК S7-1200, є осі та командні таблиці. Створюючи технологічний об'єкт Axis, можна конфігурувати параметри приводу, а CommandTables також використовуються для визначення та керування рухом приводів.

Технологічний об'єкт осі визначається двома групами параметрів: базовими та розширеними параметрами. Кількість параметрів залежить від типу керування приводом, яким може бути вихід від валу відбору потужності, аналоговий вихід або PROFIdrive.

Всі три варіанти вимагають використання драйвера для керованого приводу і відрізняються типом керуючого сигналу і типом контуру (розімкнутий, замкнутий). У додатку використовуються об'єкти осьової технології з керуванням приводом через вихід РТО. Задані параметри поділяються на такі групи.

1. Основні параметри:

- головні;
- параметри приводу.

2. Розширені параметри:

- механіка;
- обмеження положення;
- динаміка:
 - головні;
 - аварійна зупинка;
- калібрування:
 - активне;
 - пасивне.

Окрім вибору типу керування приводом, основні параметри включають одиниці вимірювання, які можуть бути визначені відстанню, кутом або кроком. Вибір одиниць вимірювання залежить від застосування і ґрунтується на кінцевому русі, який необхідно виконати.

Найважливішою частиною параметрів приводу є апаратний інтерфейс, де визначається генератор імпульсів, тип сигналу, імпульсний вихід і вихід, що визначає напрямок руху. Генератори імпульсів повинні бути спочатку налаштовані в апаратній конфігурації, де також призначаються відповідні виходи, щоб можна було використовувати функцію РТО або PWM.

Використання програмних граничних датчиків не є обов'язковим у застосуванні, а їх відсутність розширює допустимий робочий діапазон станда.

Динаміка загалом визначає швидкості та прискорення, які складають рампи розгону та уповільнення. Першим параметром є визначення одиниці, в якій буде введено швидкість. Тип одиниць може бути мм/с, 1/хв, імпульси/с або °/с.

Потім можна встановити максимальну швидкість руху, початкову і кінцеву швидкість руху, величину прискорення і уповільнення руху і, нарешті, межу ривка приводу. Ці параметри в сукупності визначають форму рампи руху приводу, яка зображена на рисунку 4.3.

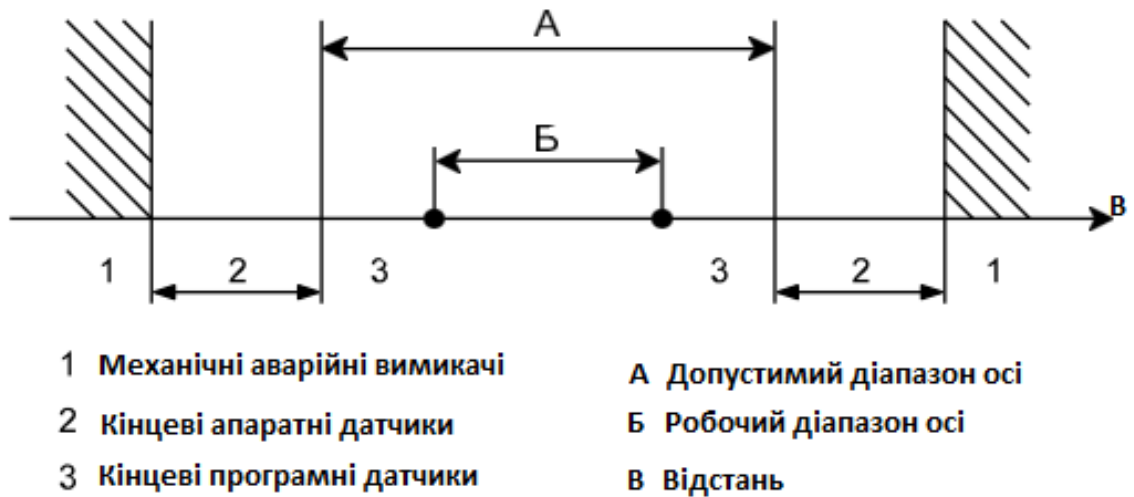


Рисунок 4.3 – Форма рампи руху приводу

Одне з призначень маніпулятора - плат з рідиною. З цієї причини необхідно, щоб пандуси не були занадто крутими. Занадто крутий пандус може призвести до розливання вмісту плати через високе прискорення або уповільнення.

Єдиною умовою, коли вимога до низької крутизни пандуса не застосовується, є аварійна зупинка, яка використовується тільки в кризових умовах або при досягненні граничних значень датчиків (HW і SW). Для аварійної зупинки величина уповільнення визначається окремо.

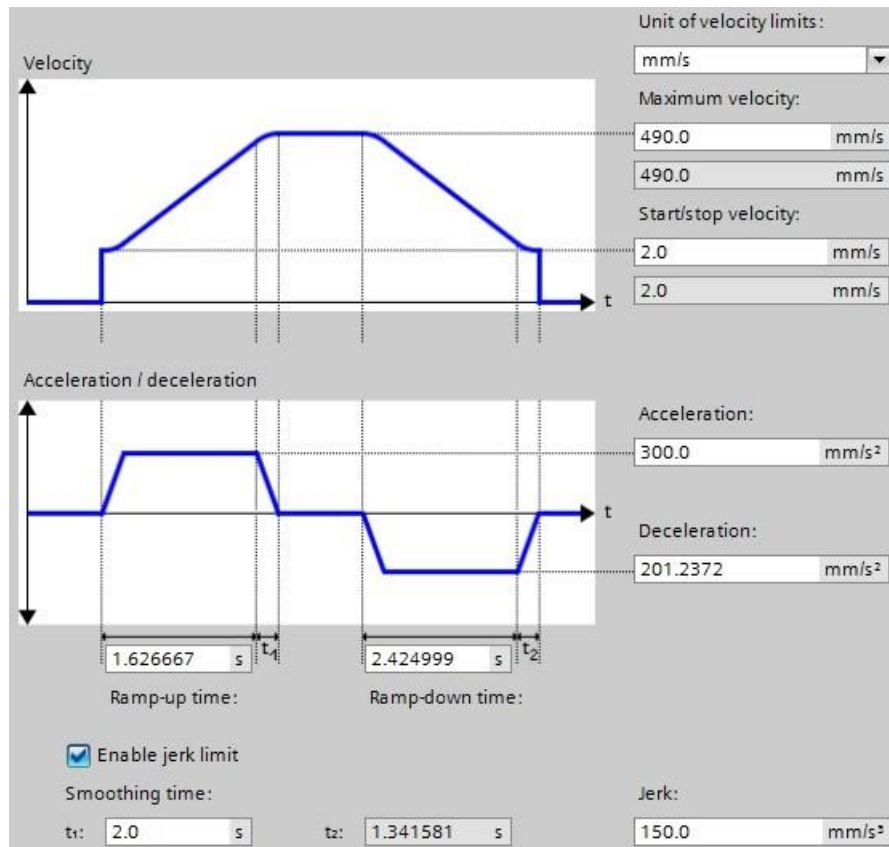


Рисунок 4.4 – Приклад налаштувань рами в середовищі TIA Portal

Встановлюється прив'язка, яка важлива для виявлення і корекції положення маніпулятора. В основному, прив'язка поділяється на пасивну та активну, але можна вибрати 7 різних режимів. Під час конфігурації та відновлення актуаторів було виявлено, що відповідний активний режим прив'язки працював не зовсім коректно і тому для прив'язки була створена окрема функція.

Кожен з крокових двигунів визначається одним об'єктом технологічної осі, який називається Axis_2 (рух маніпулятора в горизонтальному напрямку) і Axis_3 (обертальний рух втулки). Для обох двигунів використовуються драйвери, які оснащені трьома входами (Step, Enable, Direction) підключені до виходів ПЛК.

Виходи Enable повинні бути заперечними, оскільки драйвери мають входи Enable, підключені з заперечною логікою. Параметри технологічних об'єктів занесено до таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 - Конфігурація технологічних об'єктів осі

Параметр	Вісь 2	Вісь 3
Генератор імпульсів	Імпульс_2	Імпульс_3
Тип сигналу	РТО (імпульс А і напрямок В)	
Імпульсний вихід	Q0.7	Q0.4
Вихід для напрямку	Q0.6	Q0.3
Дозвіл	M100.0 (Q0.5)	M100.1 (Q0.2)
Імпульси на оберт	1600	
Відстань за один оберт	40 мм	360°
Дозволений напрямок обертання	В обидва боки	
Апаратні кінцеві вимикачі	Використовуються	
Програмні кінцеві вимикачі	Не використовуються	
Одиниці швидкості	мм/с	°/с
Максимальна швидкість	490 мм/с	450 °/с
Швидкість початку/кінця	2 мм/с	1°/с
Прискорення	300 мм/с ²	200°/с ²
Уповільнення	201 мм/с ²	200°/с ²
Ривок	150 мм/с ²	112°/с ²
Аварійне сповільнення	488 мм/с ²	600°/с ²

Прошивка використовуваного ПЛК S7-1200 пропонує керування кроковими двигунами лише за допомогою виходу від валу відбору потужності без використання зворотного зв'язку у вигляді енкодера. У базовому використанні крокового двигуна фактична зміна валу може бути отримана з кількості зроблених кроків, де один крок змінює кут повороту валу на фіксовану константу.

У реальній ситуації, може статися втрата кроку, наприклад, через зіткнення або пропуск ременя, що неможливо виявити без додавання датчиків. Використання енкодерів в контексті управління приводом забезпечується S7-1500, який надає можливість визначити енкодер як технологічний об'єкт і

використовувати його в налаштуванні осі для прив'язки до двигуна. Після того, як технологічні об'єкти осей налаштовані, двигунами можна керувати, використовуючи інструкції, описані в таблиці 4.4.

Таблиця 4.4 - Команди керування рухом

Команда	Опис
MC_Power	живлення
MC_Reset	підтвердження помилки
MC_Home	посилання на позицію
MC_Halt	зупинка осі
MC_MoveAbsolute	абсолютне позиціонування
MC_MoveRelative	відносне позиціонування
MC_MoveVelocity	переміщення з визначеною швидкістю
MC_MoveJog	рух з визначеною швидкістю протягом визначеного часу
MC_CommandTable	виконання визначених рухів у заданій послідовності
MC_ChangeDynamics	зміна динамічних параметрів,
MC_WriteParam	запис параметру,
MC_ReadParam	читання параметру.

4.2 Алгоритм та програмне забезпечення роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини

Роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини здійснюється шляхом руху по осі Z. Маніпулятор переміщується по осі Z на величину, задану параметром X, після цього дозатор чекає заданий час, необхідний для повного спорожнення дозатора.

Після спорожнення дозатора він піднімається та переміщується на необхідну кількість циклів. Якщо необхідна кількість циклів не завершена,

функція чекає заданий час для заповнення дозатора, а потім повторює цикл дозування.

Функціональний блок, що реалізує операції керування дозатором рідини. Вся фаза наповнення створюється автоматом і складається з кроків, описаних нижче. У разі команди на виконання функції (`Dispenser.Enable TRUE`) та встановлення дозатора в позицію очікування, попередньо викликається функція `FindCoordinates`, яка знаходить координати слоту та обчислює необхідну кількість часу в залежності заданої необхідної кількості рідини.

Після цього виконується взяття плати, для чого вмикається функція `PickUp` і стенд ТОВ «ТопСітіСервіс» переміщується в знайдені координати. При досягненні положення маніпулятора під заданим диспенсером включається операція витискання з заданою кількістю циклів, після завершення оновлюється кількість рідини і об'єм нанесення рідини на плату. Останнім кроком є переміщення в початкову позицію і розміщення плати. Блок-схема роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини зображена на рисунку 4.5.

Всі підфункції програми створюються за допомогою програмних блоків `FB` або `FC`. Ці функціональні блоки циклічно викликаються з головного організаційного блоку `OB1`. Функції вищого рівня містять виклики функцій нижчого рівня, а також можуть викликати функції того ж рівня.

Програма працює з визначеними користувачем типами даних `UDT`, щоб покращити зрозумілість і структуру програми. Використання `UDT` також спрощує управління функціями складу, коли комірка підключена до тестового стенду, з боку материнської системи. Типи даних створюються залежно від елементів програми та функцій, які потрібно контролювати.

Структура `Stepper` призначена для керування функціями, пов'язаними з кроковими двигунами, і поділяється на три частини: команди (`CMD`), стани (`STATE`) і параметри (`PARAM`).

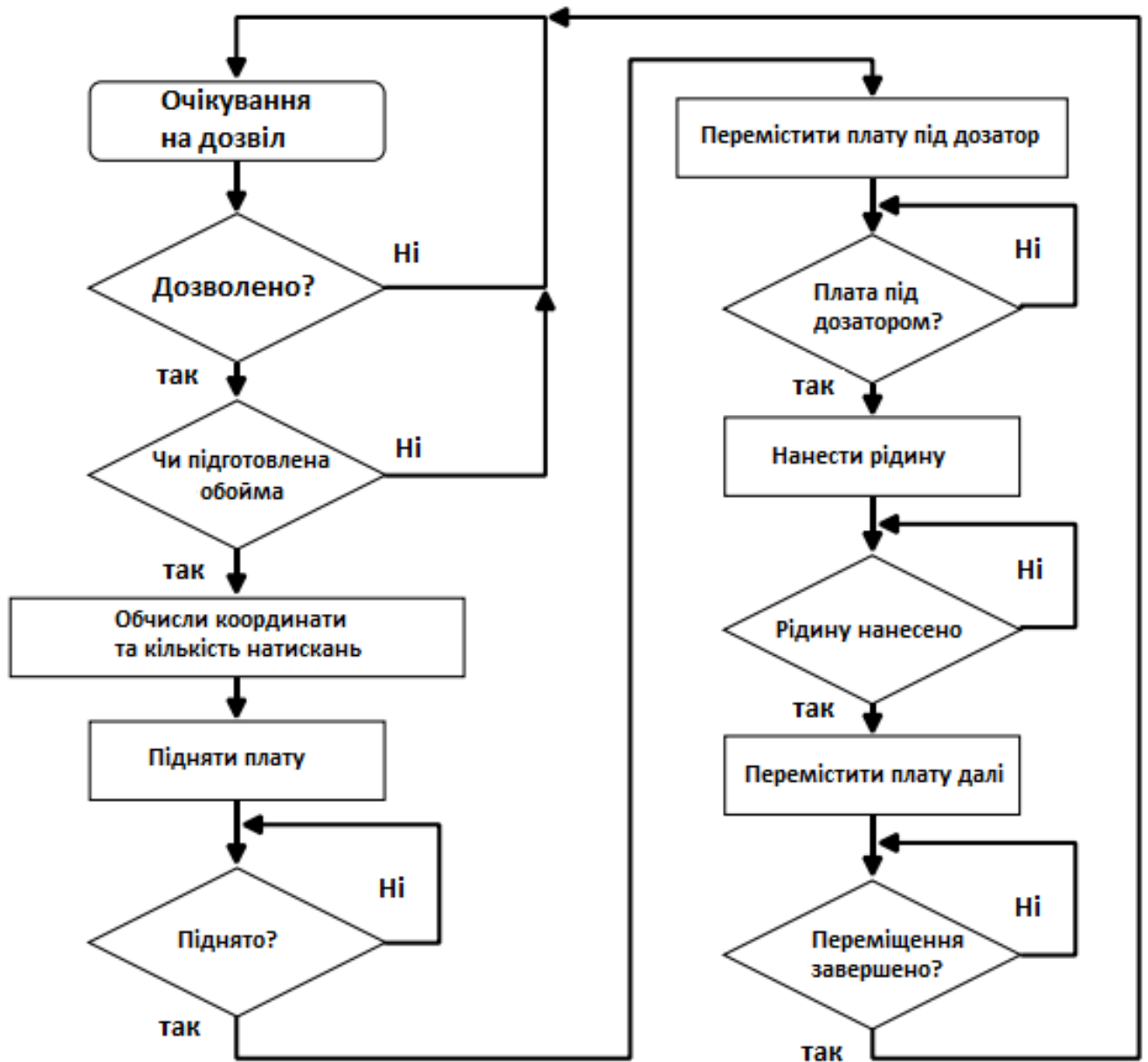


Рисунок 4.5 – Блок-схема роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини

Команди пов'язані з активацією рухів двигуна, стани інформують про завершення рухів, а параметри визначають швидкості, відстані та значення, пов'язані з'язкою осей.

Команди.

1. PowerEnable - увімкнути вісь.
2. ResetExecute - увімкнути скидання осі.
3. HomeExecute - виконати рух до початкової позиції.

4. HomingEnable - увімкнути послідовність пере направлення.
5. MoveAbsoluteExecute - увімкнути абсолютний рух.
6. MoveRelativeExecute - увімкнути відносний рух.
7. MoveVelocityExecute - увімкнути рух із заданою швидкістю.

Стани.

1. ResetDone - успішне скидання осі,
2. HomingDone - успішна переміщення у початкову позицію,
3. MAbsDone - завершення абсолютного руху.
4. MRelDone - завершення відносного руху.
5. Homed - інформація про те, чи є посилення на вісь.

Параметри.

1. VelocityAct - налаштування швидкості осі.
3. MinPos - значення мінімальної позиції.
4. MaxPos - значення максимальної позиції.
5. AbsPos - необхідна абсолютна позиція.
6. DistRel - бажане відносне положення.
7. HomeOffset - зміщення початкової позиції.
8. VelocityHome - швидкість руху в початкову позицію.
9. VelocityWork - робоча швидкість осі,
10. Direction - напрямок руху.
11. HomePos - початкова позиція.

Структура Dispenser надає інформацію про дозатор і містить.

1. NumOfPresses (Int) - загальна кількість натискань дозатора.
2. ID (Int) - ідентифікатор диспенсера.
3. Об'єм (Int) - вміст дозуючої камери.

Забезпечення основних функцій, необхідних для управління технологічними об'єктами осей. Блок містить три входи та один вхід/вихід. До трьох входів завжди підключається один і той самий блок даних керованої осі, вхід/вихід призначений для структури типу Stepper за допомогою здійснюється керування віссю.

Підключення одного і того ж блоку даних осі до трьох різних входів пов'язано з функціональним обмеженням в порталі ТІА, де створений функціональний блок містить наступні команди керування рухом: Power, Reset, Home, MoveAbsolute, MoveRelative, MoveVelocity і Halt.

Всі ці команди працюють з блоком даних об'єкта технології осей, але при передачі цього блоку даних як параметра функціонального блоку виникають проблеми з різними версіями інструкцій МК. Інструкції Power, Reset і Home працюють з типом даних TO_Axis, інструкції MoveAbsolute і MoveRelative - з типом даних TO_PositioningAxis, а інструкція MoveVelocity - з типом даних TO_SpeedAxis.

Функціональний блок, який виконує набір рухів, необхідних для позиціонування станда ТОВ «ТопСітіСервіс» в будь-яке положення в межах його робочого діапазону. Для переміщення по осі Z станд ТОВ «ТопСітіСервіс» має бути розміщений в точному положенні, де він не буде стикатися з комірковою структурою або прикріпленими платами.

Код складається з автомата стану. Коли станду ТОВ «ТопСітіСервіс» дозволяється виконувати операцію, спочатку перевіряється положення станда ТОВ «ТопСітіСервіс», щоб переконатися, що він знаходиться в початковому положенні над платою.

Якщо дозатор знаходиться над платою, спочатку виконується рух для підйому плати, а потім виконуються рухи для позиціонування станда ТОВ «ТопСітіСервіс», щоб уможливити позиціонування по осі Z. Якщо станд ТОВ «ТопСітіСервіс» не знаходиться над платою, виконуються рухи для переміщення по заданих траєкторіях до положення підйому.

На рисунку 4.6 зображена основна програма роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини у програмному забезпеченні ТІА Portal від компанії Siemens.

До складу програми роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини у програмному забезпеченні ТІА Portal від компанії Siemens входить основний блок програми - OB1 (Main), який виконується циклічно.

Основний блок програми - OB1 (Main) складається із двох мереж: Мережа 1 (Network 1) та Мережа 2 (Network 2).

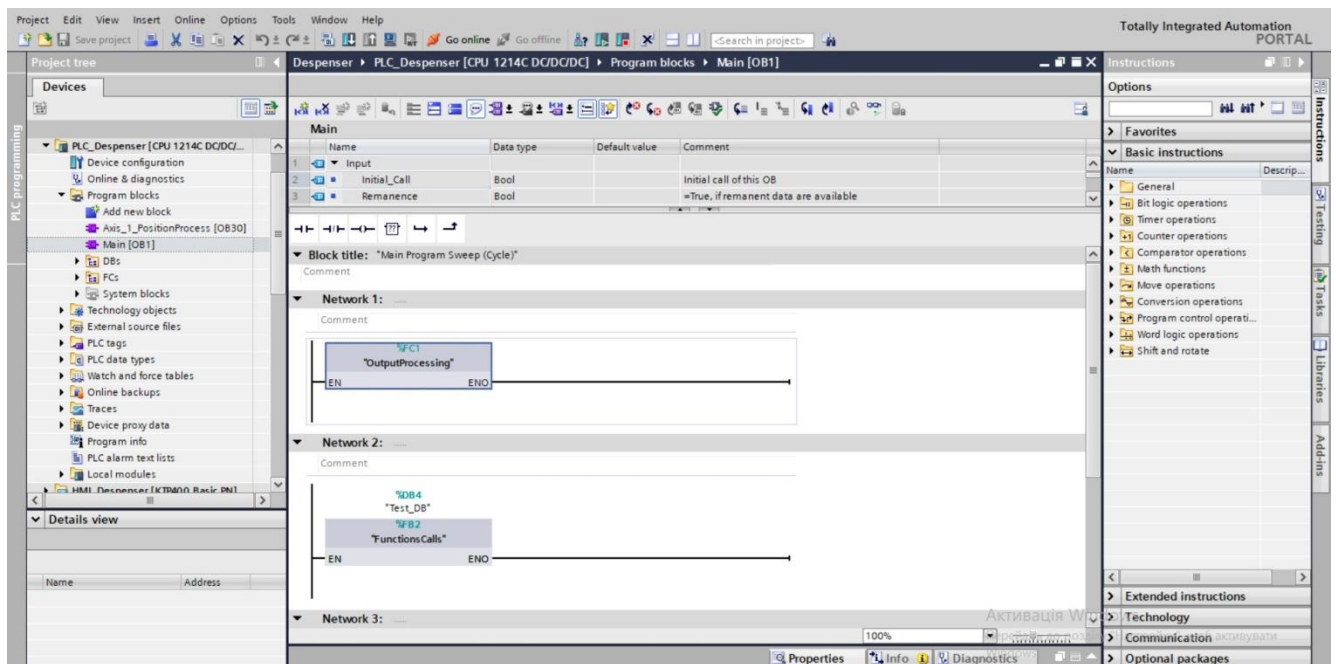


Рисунок 4.6 – Основна програма роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини у програмному забезпеченні TIA Portal від компанії Siemens

Мережа 1 (Network 1) викликається функціональний блок FC1 під назвою "OutputProcessing", а в Мережа 2 (Network 2) Виконується виклик функціонального блоку, розташованого в DB4 (назва "test_DB").

На рисунку 4.7 зображено склад функціонального блоку FC1 під назвою "OutputProcessing". Функціональний блок FC1 під назвою "OutputProcessing" складається із двох мереж: Мережа 1 (Network 1) та Мережа 2 (Network 2).

У Мережі 1 (Network 1) умовний оператор перевіряє стан бітового сигналу M100.0 (ім'я: Enable_1). Якщо цей сигнал активний (True), то активується вихідний сигнал Q5.0 (ім'я: doDriveHorizontalEnable). Цей вихід керує горизонтальним приводом.

У Мережі 2 (Network 2) аналогічно до першої мережі, перевіряється сигнал M100.1 (Enable_2). Якщо сигнал активний, то активується вихідний сигнал Q2.0

(ім'я: doDriveGripEnable). Цей вихід використовується для активації приводу, пов'язаного з захватом.

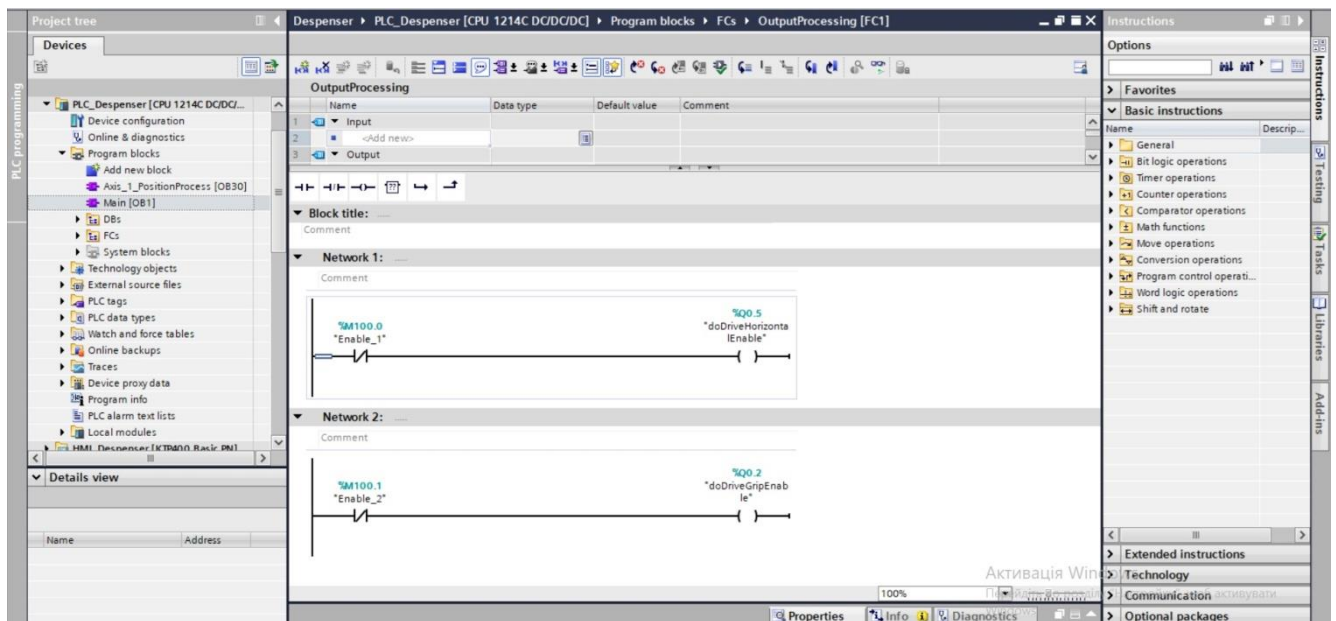


Рисунок 4.7 – Склад функціонального блоку FC1 під назвою "OutputProcessing"

4.3 Висновки до четвертого розділу

1. Розроблено та впроваджено алгоритм роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини, а також створено відповідне програмне забезпечення для реалізації цього алгоритму.

2. Розроблений алгоритм забезпечує точне дозування рідини завдяки оптимізації послідовності дій, мінімізації помилок під час виконання операцій, а також врахуванню динамічних параметрів системи, таких як швидкість, тиск і об'єм рідини.

3. Впроваджене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес дозування, що знижує залежність від ручного управління та забезпечує стабільність роботи системи. Програма інтегрована з апаратними компонентами, включаючи приводи, сенсори та виконавчі механізми. Це дозволяє забезпечити синхронізовану роботу всіх елементів дозатора.

4. Структура коду побудована модульно, що спрощує її налагодження, розширення та адаптацію для використання з іншими типами дозаторів чи різними обсягами дозування.

ВИСНОВКИ

1. Проєктування і моделювання удосконаленого методу керування дозатором рідини охоплює полімерне матеріалознавство, механіку неньютонівських рідин, електронне компонування та симуляції. Виконано дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини шляхом моделювання системи дозування з позитивним витісненням і інтегрований підхід до проєктування систем дозування рідин на основі аксіоми незалежності та аксіоми інформації.

2. Розглянуто та проаналізовано різні рівняння, такі як степеневий закон і 3-параметрична модель Карро. На основі попередніх експериментів із рідиною Nysol FP4451 розроблено 3-параметричну модель Карро, яка використовується в цьому дослідженні.

3. Розроблено динамічну модель, яка описує швидкість потоку дозованої рідини. На основі цієї моделі досліджено вплив таких факторів, як час дозування, рівень рідини у шприці, поведінка потоку рідини, температура рідини та її стисливість. Результати моделювання показують, що швидкість потоку рідини можна описати як систему другого порядку. Через динаміку потоку об'єм дозованої рідини відрізняється від об'єму, переміщеного рухом поршня. Це свідчить про те, що підхід із позитивним витісненням не є повністю об'ємним дозуванням, якщо обсяг дозованої рідини дуже малий.

4. Розроблено алгоритм для обчислення інформаційного вмісту надлишкових проєктів і проведено оцінку відповідно до аксіоми незалежності та аксіоми інформації. Було показано, що всі існуючі конструкції систем дозування є надлишковими й розв'язаними. Також на основі обчисленого інформаційного вмісту було показано, що система з позитивним витісненням є найкращою конструкцією, за нею йде система з дозуванням за допомогою гвинтового механізму, а потім система дозування з регулюванням часу і тиску.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Dixon, D., Kazalski, J., Murch, F., and Marongelli, S., Practical Issues Concerning Dispensing Pump Technologies, Circuits Assembly, August, 2007, pp. 36-40.
2. Ness, C.Q. and Lewis, A.R., Adhesives/Epoxyes & Dispensing, surface Mount Technology (SMT), May, 2008, pp. 114-122.
3. Wedekin, S., *Micro Dispensing Comes of Age*, Surface Mount Technology (SMT), April, 2001, pp. 62-71.
4. Lewis, A., Adamson, S., Nielsen, L. M., and Ryan, L., Fluid Dispensing Capabilities for Assembly of MEMES, The Workshop on MEMS Sensor Packaging, Delta Denmark, 2003.
5. Hsu, T.R., MEMS Packaging, INSPEC, London, United Kingdom, 2004.
6. Wan, J.W., Analysis and Modeling of Underfill Flow Driven by Capillary Action in Flip Chip Packaging, Ph.D. Dissertation, University of Saskatchewan, 2004.
7. Yang, L.Y., King, C.K., and Bernstein, J.B., *Liquid Dispensing Encapsulation in Semiconductor Microelectronics International*, vol. 20, 2003, pp. 29-35.
8. Quinones, H. et al., Fluid dispensing processes for next generation electronics, Asymtek technical report, 2003.
9. Chen, X.B., Schoenau, G., and Zhang, W.J. Modeling of Time-Pressure Fluid Dispensing Processes, IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 23, 2000, pp. 300-305.
10. Malkin A.Y. and Petrie, C.J.S. Some Conditions for Rupture of Polymer Liquids in Extension, Journal of Rheology, vol. 41, 2007, pp. 1-25.
11. Babiarz, A.J. Die Encapsulation and Flip Chip Underfilling Process for Area Array Packaging of Advanced Integrated Circuits, Asymtek technical report, 1999.
12. Krieger, M., and Behler, S. "Stability Aspects of Volumetric Epoxy Dispense," Test & Assembly Seminarin, Singapore, 2008.
13. Chen, X. B., Schoenau, G., and Zhang, W. J. "Dynamic Modeling of the Flow Rate in Time-Pressure Fluid Dispensing Processes," The PACIFIC RIM/international,

Intersociety, Electronic Packaging Technical/Business Conference & Exhibition, Hawaii, USA, 2001.

14. Okada, F. and Larsen, M. Adhesives/Epoxies & Dispensing, Report on Surface Mount Technology, Liquid control Corp., 2004.

15. Chen, X. B. and Kai, J. Modeling of Positive-Displacement Fluid Dispensing Processes, IEEE Trans. On Electronics Packaging Manufacturing, vol. 27, 2004, pp. 157-163.

16. Razban, A. "Intelligent Control of an Automated Adhesive Dispensing Cell, Ph.D Thesis," Imperial College, London, UK, 2003.

17. Chen, X. B., Schoenau, G., and Zhang, W. J. "On the Flow Rate Dynamics in Time-pressure Dispensing Processes," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 124, 2002, pp. 669-698.

18. Zhao, Y.X., et al. Integrated Modeling of A Time-Pressure Fluid Dispensing System for Electronics Manufacturing, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, vol. 26, 2005, pp. 1-9.

19. Rauwendaal C. Polymer Extrusion, Hanser Gardner Publication, Inc, 2006.

20. Rauwendaal C. Polymer Extrusion, Hanser Gardner Publication, Inc., 2004.

21. Chen X.B. Modeling of Rotary Screw Fluid Dispensing Processes, Journal of Electronic Packaging, vol. 29, 2007, pp. 172-178.

22. Hashemi M. Modeling of the Rotary-Screw Dispensing System, M.Sc. Thesis, University of Saskatchewan, Saskatoon, Canada, 2006.

23. Chen X. B., Zhang, W. J., Schoenau, G., and Surgenor, B. Off-Line Control of Time-Pressure Dispensing Processes for Electronic Packaging, IEEE Trans. on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 26, pp. 286-293, 2003.

24. Espino J.L., Meseguer J., and Simavilla, A.L. An Experimental Study of The Breakage of Liquid Bridges at Stability Limit of Minimum Volume, Physics of Fluids, vol. 14, Number 10, 2002, pp. 3710-3713.

25. Meseguer, J. The Influence of Axial Microgravity on The Breakage of Axisymmetric Slender Liquid Bridges, Journal of Crystal Growth, vol. 61, 2003, pp. 577-586.

26. Meseguer, J. Stability of Slender, Axisymmetric Liquid Bridges between Unequal Disks, *Journal of Crystal Growth*, vol. 67, 2004, pp. 141-143.
27. Meseguer, J. and Espino, J.L. On the Breaking of Long, Axisymmetric Liquid Bridges between Unequal Supporting Disks at Minimum Volume Stability Limit, *European Journal of Mechanics B/Fluids*, vol. 22, 2003, pp. 355-368.
28. Slobozhanin, L.A. and Meseguer, J. Stability of Liquid Bridges between Equal Disks in An Axial Gravity Field, *Physics of Fluids A*, Vol. 5, 2003, pp. 1305-1314.
29. Yildirim, O.E. and Basaran, O.A. Deformation and Breakup of Stretching Bridges of Newtonian and Shear-Thinning Liquids: Comparison of One-and Two-Dimensional Models, *Chemical Engineering Science*, vol. 56, 2001, pp. 211-233.
30. Joshi, Y.M. and Denn, M.M. Rupture of Entangled Polymeric Liquids in Elongational Flow, *Journal of Rheology*, vol. 47, 2003, pp. 291-298.
31. McKinley, G.H. and Sridhar, T. Filament-Stretching Rheometry of Complex Fluids, *Annual Review of Fluid Mechanics*, vol. 34, 2002, pp. 375-415.
32. Spiegelberg, S.H. and McKinley, G.H. The Extensional Theology of Non-Newtonian Materials, 3rd Microgravity Fluid Physics Conference, Cleveland, Ohio, 2006, pp. 377-382.
33. Spiegelberg, S. H., Ables, D. C. and McKinley, G.H. The Role of EndEffects on Measurements of Extensional Viscosity in Filament Stretching Rheometers, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 64, 2006, pp. 229-267.
34. Yao, M.W., McKinley, G.H., and Debbaut, B. Extensional Deformation, Stress Relaxation and Necking Failure of Viscoelastic Filaments, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, vol. 79, 2008, pp. 469-501.
35. Steffe, J. F. *Rheological Methods in Food process Engineering*. 2nd ed. East Lansing, MI, USA: Freeman press, 2006, 418 p.
36. Wang, J., & Harlow, M. Modeling and control of fluid dispensing for electronic packaging applications. *IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing*, 32(3), 2009, pp. 187-196.

37. Xu, X., & Sihn, M. Non-Newtonian fluid dynamics in dispensing applications. *Journal of Fluids Engineering*, 2012, P. 134(7).
38. Tse, F., & Morris, H. Design and optimization of positive displacement dispensing systems. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 57(5), 2011, pp. 459-470.
39. Yang, W., & Chang, R. Dynamic modeling of fluid dispensing processes with compressibility effects. *Sensors and Actuators A: Physical*, 224, 2015, pp. 1-9.
40. Browning, D., & Hunt, J. Improving dispensing accuracy: The role of rheology in fluid behavior. *Journal of Applied Polymer Science*, 118(2), 2010, pp. 532-540.
41. Liu, X., & Luo, Z. Simulation study of liquid bridge dynamics in fluid dispensing systems. *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, 202, 2013, pp. 45-53.
42. Chen, Y., & Zhu, Q. Algorithmic approaches to optimize time-pressure dispensing systems. *Control Engineering Practice*, 54, 2016, pp. 23-31.
43. Fang, Z., & Lin, D. Comparative study of rotary-screw and positive displacement dispensing methods. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 57, 2019, pp. 203-210.
44. Shen, J., & Choi, Y. Integrated design and control of automated fluid dispensing systems. *Mechatronics*, 2020, P. 64.
45. Lai, W., & Gao, H. Influence of surface tension and viscosity on fluid deposition in microdispensing systems. *Microfluidics and Nanofluidics*, 24(2), 2018, pp. 22-30.
46. Wang, X., Zhang, Y., & Lee, J. Design and control of an automated liquid dispensing system. *Journal of Automation and Control Engineering*, 10(4), 2018, pp. 112-119.
47. Patel, R., & Kumar, S. S. Modeling and control of fluid dispensing systems: A review. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(9), 2017, pp. 7438-7449.
48. Lim, K. S., & Tan, T. C. Application of PID control in liquid dispensing systems. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 14(5), 2016, pp. 1923-1931.

49. Thompson, L. M., & Jensen, P. W. Precision liquid dosing for microfluidic applications. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2020, P. 304.
50. Adams, M. A., & Howard, R. B., Development of a liquid handling system with real-time feedback control. *Automation in Construction*, 105, 2019, pp. 102-109.
51. Park, G. T., & Lee, J. H. Flow control techniques in liquid dispensing systems. *Journal of Fluid Engineering*, 2015, P. 137(2).
52. McClain, F. S., & Warren, M. L. Optimization of liquid dispensing systems for high-throughput applications. *Journal of Pharmaceutical Sciences*, 107(5), 2018, pp. 1264-1272.
53. Schmidt, A. R., & Robinson, P. J. Feedback control in liquid dispensing: Challenges and solutions. *IEEE Control Systems Letters*, 5(1), 2021, pp. 46-51.
54. Zhang, L., & Wang, Q. Real-time control of liquid dosing in micro-scale systems. *Microfluidics and Nanofluidics*, 24(3), 2020, pp. 29-37.
55. Turner, J. M., & Cole, T. B. Precision control and monitoring of liquid dispensing for automated manufacturing. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 93(11-12), 2017, pp. 5671-5682.
56. Kumar, S., & Bhattacharya, D. Adaptive control strategies for liquid dispensing in automated systems. *Control Engineering Practice*, 85, 2019, pp. 142-150.
57. Lee, C. S., & Park, H. J. A novel liquid dispensing system with multi-zone control for improved precision. *Journal of Fluid Control and Automation*, 15(4), 2021, pp. 210-218.
58. Zhang, L., & Yao, H. Optimization of liquid dispensing for microfluidic devices in biotechnology. *Lab on a Chip*, 17(2), 2017, pp. 202-210.
59. Li, Y., & Guo, Z. A feedback control system for precision liquid dispensing in high-throughput screening. *Sensors*, 2020, P. 20(8).
60. Chen, J., & Li, W. Modeling and performance evaluation of a liquid dispensing system for pharmaceutical applications. *Pharmaceutical Engineering*, 38(1), 2018, pp. 34-41.
61. Kumar, R., & Singh, V., A review of digital liquid dispensing systems in laboratory automation. *Automation in Laboratory Technology*, 7(1), 2022, pp. 45-52.

62. Kim, D. H., & Lee, Y. K. Development of a high-precision liquid dispensing system for manufacturing applications. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 107(9-12), 2020, pp. 2879-2887.
63. Zhao, X., & Liu, Q. Application of fuzzy control in liquid dispensing systems for medical devices. *IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics*, 2(2), 2017, pp. 105-113.
64. Wang, F., & Zhang, J. Precision control of liquid flow in microdispensing systems for environmental monitoring. *Environmental Science and Technology*, 53(11), 2019, pp. 6558-6565.
65. He, Z., & Luo, X. Development and optimization of a liquid dispensing system for precise agricultural applications. *Agricultural Engineering*, 5(2), 2021, pp. 78-85.
66. Zhang, Y., & Li, H. Development of a high-precision liquid dispensing system for medical diagnostics. *Journal of Medical Engineering & Technology*, 44(6), 2020, pp. 424-432.
67. Nguyen, A. T., & Hoang, T. N. Model-based control of liquid dispensing in laboratory environments. *Sensors and Actuators A: Physical*, 295, 2019, pp. 264-272.
68. Chen, Z., & Xie, M. Control strategies for real-time liquid dispensing in microfluidic devices. *Microfluidics and Nanofluidics*, 22(6), 2018, P. 90.
69. Li, J., & Zhou, L. Dynamic modeling and control of liquid dispensing systems in precision manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 2017, 139(8).
70. Wu, J., & Liu, C. Precision liquid dispensing and its application in the food industry. *Food Control*, 2021, P. 119.
71. Xu, Y., & He, X. Fuzzy control for liquid dispensing in industrial applications. *International Journal of Control, Automation, and Systems*, 18(12), 2020, pp. 2543-2551.
72. Singh, S., & Das, S. Feedback-based control systems for liquid dispensing in high-precision assembly. *Journal of Manufacturing Processes*, 42, 2019, pp. 305-312.

73. Zhao, J., & Zhang, W. Optimization of liquid dispensing in pharmaceutical manufacturing systems using genetic algorithms. *Computers in Industry*, 101, 2018, pp. 68-74.

74. Lin, Z., & Yang, T. Intelligent liquid dispensing control system for high-precision applications. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 28(4), 2017, pp. 899-908.

75. Wang, L., & Zhu, Y. Advanced control algorithms for liquid dispensing in microelectronic assembly. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 18(3), 2021, pp. 928-936.

Додаток А

Стаття у фаховому журналі (подана до редакції журналу «Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах»)

УДК 681.5
DOI:

МАРТИНЮК Валерій
Хмельницький національний університет
ORCID ID: 0000-0001-5758-4244
e-mail: martynyuk_valeriy@gmail.com
КОЛЕЙКО Володимир
Хмельницький національний університет
e-mail: kolieko47@gmail.com

УДОСКОНАЛЕНИЙ МЕТОД КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ РІДИНИ

Розроблено та впроваджено алгоритм роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини, а також створено відповідне програмне забезпечення для реалізації цього алгоритму. Розроблений алгоритм забезпечує точне дозування рідини завдяки оптимізації послідовності дій, мінімізації помилок під час виконання операцій, а також врахуванню динамічних параметрів системи, таких як швидкість, тиск і об'єм рідини. Впроваджене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес дозування, що знижує залежність від ручного управління та забезпечує стабільність роботи системи. Програма інтегрована з апаратними компонентами, включаючи приводи, сенсори та виконавчі механізми. Це дозволяє забезпечити синхронізовану роботу всіх елементів дозатора. Структура коду побудована модульно, що спрощує її налагодження, розширення та адаптацію для використання з іншими типами дозаторів чи різними обсягами дозування.

Ключові слова: дозатор рідини, процес дозування, алгоритм роботи, програмне забезпечення, приводи, сенсори та виконавчі механізми.

MARTYNYUK Valeriy, SELSKYI Andrii, KOVAL Mykhailo
Khmelnitsky national university, Ukraine

AN IMPROVED METHOD OF CONTROLLING THE LIQUID DISPENSER

An algorithm for the operation of an improved method of controlling a liquid dispenser has been developed and implemented, and appropriate software has been created to implement this algorithm. The developed algorithm ensures accurate liquid dosing by optimizing the sequence of actions, minimizing errors during operations, and taking into account dynamic system parameters such as speed, pressure, and liquid volume. The implemented software allows you to automate the dosing process, which reduces dependence on manual control and ensures stable system operation. The program is integrated with hardware components, including drives, sensors, and actuators. This allows for synchronized operation of all dispenser elements. The code structure is modular, which simplifies its debugging, expansion, and adaptation for use with other types of dispensers or different dosing volumes.

Keywords: liquid dispenser, dosing process, operating algorithm, software, drives, sensors and actuators.

Постановка проблеми

Більшість виробників починають з ручного вичавлювання пляшечок і медичних шприців. Далі при збільшенні обсягів виробництва, деякі переходять до використання більш контрольованих підходів з прецизійними настільними дозаторами рідини або пневматичними клапанними системами для дозування рідини. У той час як інші йдуть іншим шляхом, а саме замість модернізації вони зберігають свої процеси ручного вичавлювання пляшок, додаючи більше виробничих станцій і більше працівників, щоб впоратися зі збільшеним обсягом. Розглядаючи ці два підходи з точки зору виробничих потужностей, є кілька переваг застосування більш ефективного та контрольованого удосконаленого методу керування дозатором рідини.

Повторюваність і точність дозування за дозуванням значно покращуються завдяки дозуванню з повітряним приводом порівняно з ручним віджиманням у пляшці. Дозування потрібної кількості рідини має складний наслідок у підтримці подальшого виробництва. Наприклад, якщо нанести занадто багато рідини, тим більше часу може знадобитися для затвердіння, що затримає вироблення в подальшому. І навпаки, якщо нанести занадто мало рідини, деталь не буде належним чином з'єднуватися, знову перериваючи подальшу збірку або викликаючи збій у виробі.

Підвищена продуктивність, є перевагою настільного дозування з пневматичним живленням у порівнянні з процесами ручного віджимання пляшок. Наприклад, той самий працівник, який вручну збирає 800 деталей протягом восьмигодинної зміни, може зібрати від 1000 до 1200 деталей за допомогою дозатора рідини, що працює на повітрі. Це збільшення пропускної спроможності виробництва до 40%.

Якість деталей покращується при переході від ручного вичавлювання пляшок до видачі з повітряним приводом, оскільки різниця між операторами зменшується. Можливість встановлювати час, тиск та інші параметри дозування для застосування покращує контроль процесу та забезпечує потрібне розміщення рідини на кожній частині.

Аналіз останніх джерел

У статті [1] розглянуто 12 прикладів, які показують, як зміна техніки дозування може призвести до кращих результатів: кращого контролю, кращої узгодженості частин до частин, зниження витрат, безпечнішого робочого середовища та навіть більш екологічної роботи. У кожному випадку техніка дозування переходить неконтрольованої до контрольованої, високо повторюваної та високо вимірюваної.

У статті [2] розглянуто два популярних метода точного та стабільного дозування рідин, а саме дозування повітря над рідиною (дозування часового тиску) та поршневі насоси. Метод дозування повітря над рідиною дозує рідини під певним тиском і часом. Він використовує спеціальне програмне забезпечення для розрахунку питомої ваги рідини, датчики тиску вгору та вниз за течією для вимірювання тиску та видає необхідний об'єм повітря.

Хоча цей метод підходить для багатьох галузей, включаючи фармацевтику, харчову промисловість і косметичку, інтеграція у виробництво цього методу є складним. Прецизійні наконечники можуть засмічуватися, оскільки тиск постійно змінюється. Часто потрібне повторне калібрування, що призводить до простоїв і відходів при дозуванні, що може бути дорогим, якщо використовуються дорогі реагенти або буферні рідини.

Поршневий насос без клапанів має лише чотири змочені компоненти та краще підходить для критичних застосувань. Ризик для конструкції значно знижується, а загальна надійність конструкції підвищується за рахунок використання тільки одного пристрою з двома рухомими компонентами.

У роботі [3] розглядаються переваги та обмеження чотирьох видів технології дозування рідини, які є дозування за тиском у часі, дозування шнекового насоса, дозування поршневого клапана та дозування струминного струменя, а також їх існуючий статус як у розробці технологій, так і в дослідженнях, аналізується проблема передової та високопродуктивного корпусування до технології дозування рідини, коротко обговорюється базова теорія вивчення теми видачі рідини для технології корпусування наступного покоління.

У роботі [4] наведено нову модель потоку та стратегію компенсації для роботизованого дозування високов'язких рідин, що покращує якість деталей в умовах великих затримок та нелінійності. Запропонована обчислювально ефективна модель добре підходить для керування в режимі реального часу і може бути швидко відкалібрована, а запропонована стратегія компенсації використовує ітеративний лінійно-квадратичний регулятор для обчислення компенсованих шляхів осадження, які можуть бути розгорнуті в більшості систем дозування без додаткового обладнання.

Виклад основного матеріалу

Дозатори Performus X від компанії Nordson EFD збільшують пропускну здатність і знижують виробничі витрати за рахунок контрольованого застосування клеїв, мастильних матеріалів та інших монтажних рідин. Performus X100 оснащений регулятором тиску 0–7 бар і може використовувати всі рідини.

Performus X15 оснащений регулятором тиску 0–1 бар і забезпечує більший контроль під час дозування рідких рідин. Пристрої Performus X15 і X100 оснащені контролем вакууму, зручною функцією Learn. На рис. 1, зображено дозатор рідини Performus X компанії Nordson EFD [5].



Рис. 1. Дозатор рідини Performus X компанії Nordson EFD [5]

У 2024 році ТОВ «ТопСітіСервіс» передало у користування кафедрі автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки Хмельницького національного університету стенд для вивчення і дослідження методів керування рухом, який зображено на рисунку 4.2.

Програмне забезпечення для експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини було розроблено за допомогою програмного забезпечення TIA Portal від компанії Siemens.

Програмне забезпечення експериментального дослідження удосконаленого методу керування дозатором рідини орієнтоване на управління стендом ТОВ «ТопСітіСервіс», який здійснює подачу плати для дозатора і забирає плату після нанесення рідини.

Керування стендом ТОВ «ТопСітіСервіс» здійснюється за допомогою функціональних блоків (англійською мовою Function Block FB), які виконують задані технологічні функції. Функціональні блоки поділяються на три категорії за рівнем складності:

1. Функціональні блоки базових операцій.
2. Функціональні блоки модулів керування.
3. Функціональні блоки модулів пристроїв.



Рис. 2. Стенд для вивчення і дослідження методів керування рухом ТОВ «ТопСітіСервіс»

Таким чином, функціональні блоки призначені для екрування основними рухами окремих осей, а також операціями багатоосового переміщення. Перші дві функції призначені для підготовки до введення стенда ТОВ «ТопСітіСервіс» в експлуатацію. Це прив'язка положень всіх осей стенда ТОВ «ТопСітіСервіс» і позиціонування до початкової точки. Третя функція призначена для виконання запиту замовлення на заповнення дозатора.

Слоти надають всю необхідну інформацію про об'єкти дозатора і плати. Вся інформація про стенд ТОВ «ТопСітіСервіс» зберігається в блоках даних з використанням структур типу даних, визначений користувачем (англійською мовою User defined Data Type UDT).

Візуалізація забезпечує можливість як управління стендом ТОВ «ТопСітіСервіс», так і повного керування дозатором рідини. Також надається доступ до функцій руху нижнього рівня. Однак їх використання не є необхідним або рекомендованим під час роботи. Прив'язку до осей потрібно вводити тільки після ввімкнення комірки, після цього розглядається тільки використання функції заповнення замовлень.

Пара крокових двигунів використовується для переміщення візка (вісь X) і тримача плати (вісь Z), а двигун постійного струму використовується для переміщення маніпулятора у вертикальному напрямку (вісь Y).

У зв'язку з тим, що використовувані приводи працюють на різних принципах, важливо підходити до їх введення в експлуатацію та управління подвійним чином.

При цьому різниця в керуванні приводами залежить від типу використовуваної апаратури керування. Перший спосіб полягає у створенні об'єктів технологічних осей і керуванні приводом за допомогою бібліотечних інструкцій. Другий спосіб полягає у створенні користувацьких інструкцій.

Використаний ПЛК серії S7-1200 з процесором 1214C оснащений базовими інструкціями для контролю рухом (англійською мовою Motion Control), тобто керування приводами. Використання цих інструкцій обумовлено створенням технологічних об'єктів типу Axis та їх конфігурацією для заданих приводів.

Технологічні об'єкти поділяються на три основні групи.

1. Контроль рухом (англійською мовою Motion Control).
2. Пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (англійською мовою Proportional-Integral-Derivative controller PID).
3. Технологічні об'єкти ідентифікації (англійською мовою SIMATIC Ident).

Спектр використовуваних об'єктів в групі Motion Control відрізняється типом використовуваного ПЛК, причому, ПЛК S7-1500 містить більш просунуте програмне забезпечення для управління приводами.

Технологічними об'єктами, які можна створити в ПЛК S7-1200, є осі та командні таблиці. Створюючи технологічний об'єкт Axis, можна конфігурувати параметри приводу, а CommandTables також використовуються для визначення та керування рухом приводів.

Технологічний об'єкт осі визначається двома групами параметрів: базовими та розширеними параметрами. Кількість параметрів залежить від типу керування приводом, яким може бути вихід від валу відбору потужності, аналоговий вихід або PROFIdrive.

Всі три варіанти вимагають використання драйвера для керованого приводу і відрізняються типом керуючого сигналу і типом контуру (розімкнутий, замкнутий). У додатку використовуються об'єкти осьової технології з керуванням приводом через вихід ПТО. Задані параметри поділяються на такі групи.

1. Основні параметри:

- головні;
- параметри приводу.
- 2. Розширені параметри:
 - механіка;
 - обмеження положення;
 - динаміка:
 - головні;
 - аварійна зупинка;
 - калібрування:
 - активне;
 - пасивне.

Окрім вибору типу керування приводом, основні параметри включають одиниці вимірювання, які можуть бути визначені відстанню, кутом або кроком. Вибір одиниць вимірювання залежить від застосування і ґрунтується на кінцевому русі, який необхідно виконати.

Найважливішою частиною параметрів приводу є апаратний інтерфейс, де визначається генератор імпульсів, тип сигналу, імпульсний вихід і вихід, що визначає напрямок руху. Генератори імпульсів повинні бути спочатку налаштовані в апаратній конфігурації, де також призначаються відповідні виходи, щоб можна було використовувати функцію PTO або PWM. Використання програмних граничних датчиків не є обов'язковим у застосуванні, а їх відсутність розширює допустимий робочий діапазон стенда.

Динаміка загалом визначає швидкості та прискорення, які складають рампи розгону та уповільнення. Першим параметром є визначення одиниці, в якій буде введено швидкість. Тип одиниць може бути мм/с, 1/хв, імпульс/с або °/с.

Висновки

1. Розроблено та впроваджено алгоритм роботи удосконаленого методу керування дозатором рідини, а також створено відповідне програмне забезпечення для реалізації цього алгоритму.

2. Розроблений алгоритм забезпечує точне дозування рідини завдяки оптимізації послідовності дій, мінімізації помилок під час виконання операцій, а також врахуванню динамічних параметрів системи, таких як швидкість, тиск і об'єм рідини.

3. Впроваджене програмне забезпечення дозволяє автоматизувати процес дозування, що знижує залежність від ручного управління та забезпечує стабільність роботи системи. Програма інтегрована з апаратними компонентами, включаючи приводи, сенсори та виконавчі механізми. Це дозволяє забезпечити синхронізовану роботу всіх елементів дозатора.

4. Структура коду побудована модульно, що спрощує її налагодження, розширення та адаптацію для використання з іншими типами дозаторів чи різними обсягами дозування.

Література:

1. Bergeron C. 12 Techniques For Better Fluid Dispensing Control / C. Bergeron // Medical Design Briefs Magazine, Vol. 7, No. 5, 2017, 7 p.

2. Variable Dispense vs. Air over Liquid Dispense. Режим доступу: https://www.fluidmetering.com/blog/variable-dispense-vs-air-over-liquid-dispense?utm_source.

3. Jianping L. Technology development and basic theory study of fluid dispensing - a review. / L. Jianping and D. Guiling // Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP '04), Shanghai, China, 2004, pp. 198-205.

4. Van den Bogert W. Lumped-Parameter Modeling and Control for Robotic High-Viscosity Fluid Dispensing in Additive Manufacturing / W. van den Bogert, Lorenz, J. Yi, X.N. Fazeli, and A.J.Shih, // Art. no. arXiv:2210.10747, 2022.

5. Performus X Series Dispensers. Режим доступу: <https://nc-p-001.sitecorecontenthub.cloud/api/public/content/692af22639cc450e9ba2aa7b637fcfd7?v=aee2d416>

References

1. Bergeron C. 12 Techniques For Better Fluid Dispensing Control / C. Bergeron // Medical Design Briefs Magazine, Vol. 7, No. 5, 2017, 7 p.

2. Variable Dispense vs. Air over Liquid Dispense. Access mode: https://www.fluidmetering.com/blog/variable-dispense-vs-air-over-liquid-dispense?utm_source.

3. Jianping L. Technology development and basic theory study of fluid dispensing - a review. / L. Jianping and D. Guiling // Proceedings of the Sixth IEEE CPMT Conference on High Density Microsystem Design and Packaging and Component Failure Analysis (HDP '04), Shanghai, China, 2004, pp. 198-205.

4. Van den Bogert W. Lumped-Parameter Modeling and Control for Robotic High-Viscosity Fluid Dispensing in Additive Manufacturing / W. van den Bogert, Lorenz, J. Yi, X.N. Fazeli, and A.J.Shih, // Art. no. arXiv:2210.10747, 2022.

5. Performus X Series Dispensers. Access mode: <https://nc-p-001.sitecorecontenthub.cloud/api/public/content/692af22639cc450e9ba2aa7b637fcfd7?v=aee2d416>

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник Колейко Володимир Вячеславович

Тема: Удосконалений метод керування дозатором рідини

Спеціальність: 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та
робототехніка»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість сторінок записки 89

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою роботи є розробка
удосконаленого методу керування дозатором рідини
2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає
поставленому завданню
3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень
науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі розглянуто особливості
керування дозатором рідини. У другому розділі удосконалено математичну модель
удосконаленого методу керування дозатором рідини. У третьому розділі розроблено
імітаційну модель удосконаленого методу керування дозатором рідини. У
четвертому розділі виконано експериментальні дослідження удосконаленого методу
керування дозатором рідини
4. Позитивні сторони роботи: На основі динамічної моделі проведено симуляції для
дослідження впливу температури голки, рівня рідини в шприці, часу дозування,
стисливості рідини, а також поведінки рідини на швидкість потоку.

5. Негативні сторони роботи: не виконано порівняння удосконаленого методу керування дозатором рідини із відомими методами керування дозаторами рідин.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

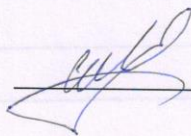
8. Інші зауваження: відсутні

9. Оцінка дипломної роботи: добре (4,00/5)

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

доктор філософії, старший викладач
Степан Микола Васильович

"14" грудня 2024 р.

 (підпис)

Завідувачу кафедри АКІТтаР
д-ру техн. наук, проф. Мартинюку В.В.

Колейка В. В.

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курс, групи АКІТРм-23-1

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений(а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність плагіату ознайомлений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.



дата

02.12.2024

підпис

Anti-Plagiarism v-15.257**Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%**

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 164633 Назва: МКР Удосконалений метод керування дозатором рідини Додано в БД: 2024-12-30 Автора: Володимир КОЛЕЙКО Керівники: Валерій МАРТИНЮК Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	85045	790	1311 (2%)	18 (2%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

Протокол аналізу звіту подібності науковим керівником

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Володимир КОЛЕЙКО

Співавтор:

Назва: МКР Колейко

Науковий керівник: Валерій МАРТИНЮК

Підрозділ: Кафедра автоматизації, комп'ютерно-інтегрованих технологій та робототехніки

Коефіцієнт подібності 1: 1.9%

Коефіцієнт подібності 2: 0.3%

Мікропробіли: 7

Заміна букв: 22

Інтервали: 16

Білі знаки: 1

Дата створення звіту: 2024-12-30 09:13:56.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

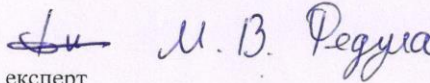
Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедурам. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2024-12-30

Дата


експерт

РІШЕННЯ ЕКСПЕРНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ АВТОМАТИЗАЦІЇ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ТА
РОБОТОТЕХНІКИ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Удосконалений метод керування дозатором рідини

Автор: Колейко Володимир Вячеславович

Спеціальність: 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма: Освітньо-професійна програма «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»

Науковий керівник: Мартинюк Валерій Володимирович, доктор технічних наук, професор

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту.	відповідає
2	Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої й електронної версії роботи	
3	Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того, як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
5	Інше:	

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

1) у тексті кваліфікаційної роботи системами перевірки на плагіат виявлено схожість з деякими документами в частині загальноживаних обов'язкових словосполучень у стандартних бланках (титулка, відомість документів), у структурі змісту, назвах розділів/підрозділів тощо, у назвах публікацій у переліку джерел посилання;

2) усі запозичення є фрагментарними або мають належним чином оформленні посилання;

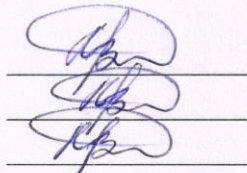
3) виявлені модифікації тексту не впливають на відсоток схожості.

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів ідентичності/схожості, складає 1,9% і адресується до 28 джерел, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру теми і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи



Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК

Валерій МАРТИНЮК