

Центральноукраїнський національний технічний університет  
Факультет будівництва, транспорту та енергетики  
Кафедра «Автоматизації виробничих процесів»

«Допущено до захисту»

Зав. кафедри АВП

к.т.н., доцент

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**  
**за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти**

**на тему**

**«Система автоматичного регулювання натягу паперу  
друкарської машини ПОГ90»**

Виконав здобувач ІV курсу групи АК-21  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»

спеціальності 151 «Автоматизація та  
комп'ютерно-інтегровані технології»

\_\_\_\_\_ Максим ШЕВЕЛЬОВ

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький – 2025 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

Спеціальність 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

Освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

«03» лютого 2025 року

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ  
ЗА ПЕРШИМ (БАКАЛАВРСЬКИМ) РІВНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ  
ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

*Шевельова Максима Сергійовича*

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного регулювання натягу паперу друкарської машини ПОГ90

2. Керівник роботи Дідик Олександр Костянтинівич, канд. техн. наук, доцент,  
( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

3. Строк подання здобувачем роботи до захисту 31.05.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматичного регулювання натягу паперу друкарської машини ПОГ90. 1. Призначення та характеристика газетної друкарської машини ПОГ90; 2. Синтез системи автоматичного регулювання натягу полотна газетної друкарської машини ПОГ90; 3. Моделювання роботи системи автоматичного регулювання; 4. Практична реалізація системи автоматичного регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв



## Анотація

на кваліфікаційну роботу здобувача групи АК-21 Шевельова Максима Сергійовича зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему: «Система автоматичного регулювання натягу паперу друкарської машини ПОГ90».

Кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості продукції, що випускається на газетній друкарській машині ПОГ90 за рахунок підтримки стабільного натягу полотна. Ця проблема досить гостро стоїть так як в даний час регулювання натягу полотна відбувається вручну.

В роботі проведено експериментальні дослідження експлуатаційних впливів на натяг полотна. За результатами експерименту проведений синтез оптимального регулятора та виконано аналіз якості регулювання. В результаті одержана передаточна функція, за якою побудовано цифровий регулятор. Також створена модель системи автоматичного регулювання в пакеті Simulink, за якою досліджено вплив радіуса вала розмотки на якість регулювання.

В наслідок проведеної роботи створено мікропроцесорну систему автоматичної стабілізації натягу полотна рулонної офсетної друкарської машини ПОГ90.

**Ключові слова:** друкарська машина, натяг полотна, експериментальні дослідження, оптимальний регулятор.

## Summary

on final qualification work of the student of group AK-21 Shevelov Maksym on a speciality 151 «Automation and computer-integrated technologies» on the theme: «Automatic paper tension control system for the POG90 printing machine».

The qualification work is devoted to the problem of improving the quality of products produced on the POG90 newspaper printing machine by maintaining stable web tension. This problem is quite acute, since at present the web tension is adjusted manually.

The work includes experimental studies of operational influences on web tension. Based on the results of the experiment, an optimal regulator was synthesized and the quality of regulation was analyzed. As a result, a transfer function was obtained, according to which a digital regulator was built. A model of the automatic regulation system was also created in the Simulink package, according to which the influence of the unwinding shaft radius on the quality of regulation was studied.

As a result of the work, a microprocessor system for automatic stabilization of the web tension of the POG90 web offset printing machine was created.

**Keywords: printing machine, paper tension, experimental research, optimal regulator.**

## Зміст

Вступ.....	2
1 Призначення та характеристика газетної друкарської машини ПОГ90.....	4
1.1 Принцип роботи та технічні характеристики друкарської машини ПОГ90 .....	4
1.2 Математичні моделі елементів машини.....	7
1.3 Моделі експлуатаційних впливів на систему .....	9
1.4 Вимоги та обмеження до технологічного процесу та обґрунтування необхідності автоматизації .....	16
2 Синтез системи автоматичного регулювання натягу полотна газетної друкарської машини ПОГ90 .....	18
2.1 Складення структурної схеми системи автоматичного регулювання .	18
2.2 Вибір датчика та виконавчого механізму .....	19
2.2.1 Датчики лінійного переміщення на основі МЧМС .....	19
2.2.2 Вибір виконавчого механізму .....	23
2.3 Синтез системи стабілізації натягу полотна .....	36
2.4 Аналіз якості вирішення задачі регулювання.....	45
3 Моделювання роботи системи автоматичного регулювання натягу паперу при зміні експлуатаційних факторів.....	52
3.1 Розробка моделі в середовищі MatLab .....	52
3.2 Визначення впливу радіуса вала розмотки на якість системи.....	54
4 Розробка схеми та програми для реалізації оптимального регулятора.....	57
4.1 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора.....	57
4.2 Опис принципової схеми регулятора .....	58
Висновки.....	64
Список літератури.....	65

## Вступ

**Актуальність теми.** У сучасних умовах ринкової економіки якість продукції виходить на перший план. Поліпшення якості продукції дозволяє виходити на нові ринки збуту, що сприяє збільшенню обсягів виробництва та підвищенню прибутковості. З переходом на двофарбовий друк газет на друкарській машині ПОГ90 виникає проблема несуміщення фарб. Цю проблему можна вирішити за допомогою системи автоматичного регулювання натягу паперу. Впровадження цієї системи на друкарську машину ПОГ90 дозволить знизити кількість бракованої продукції, що, у свою чергу, зменшить витрати на витратні матеріали на одиницю продукції.

Коливання натягу паперового полотна виникають через нерівномірність рулонів, зменшення радіусу рулону під час розмотування, зміни швидкості роботи машини, а також через коливання температури, вологості та механічні навантаження. Перевищення необхідного натягу призводить до обриву полотна, тоді як його ослаблення спричинює утворення зморшок, складок і неякісних відбитків.

**Мета і задачі дослідження.** Основною метою дослідження є підвищення якості продукції офсетного друку шляхом розробки системи автоматичного регулювання натягу паперу, яка базується на алгоритмах сучасної теорії управління.

Для досягнення поставленої мети дослідження були сформульовані та розв'язані такі задачі:

- Провести аналіз об'єкта регулювання та визначити його динамічні характеристики;
- Виконати експериментальні дослідження та встановити динамічні характеристики впливів, що виникають під час експлуатації, на натяг полотна;
- Синтезувати оптимальний регулятор для різних значень вагового коефіцієнта;

- Здійснити аналіз якості системи автоматичного регулювання натягу полотна та дослідити вплив зміни радіусу вала розмотки на ефективність роботи системи.

**Об'єкт дослідження** – система автоматичного регулювання натягу полотна в процесі офсетного друку.

**Предмет дослідження** – методи та алгоритми підвищення точності регулювання натягу полотна при офсетному друці.

**Методи дослідження** – базуються на сучасних методах теорії управління, математичної статистики, теорії випадкових функцій та спектрального аналізу. Для оцінки якості системи автоматичного регулювання натягу полотна та перевірки ефективності запропонованих методів застосовувалося імітаційне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.**

- Згідно з результатами експериментальних досліджень, встановлені спектральні щільності експлуатаційних впливів на натяг полотна.

**Практичне значення одержаних результатів.** Визначення структури та параметрів оптимального регулятора дає змогу інженеру-конструктору знаходити рішення задач без необхідності проведення аналогічних розрахунків.

# 1 Призначення та особливості газетної друкарської машини ПОГ90

## 1.1 Принцип функціонування та технічні параметри друкарської машини ПОГ90

Машина ПОГ90 призначена для друкування та фальцювання газет обсягом 4, 6 та 8 сторінок форматом сторінки 420×594 мм, а також 4, 8, 12 і 16 сторінок форматом 297×420 мм, з використанням одно- та двоколірного друку (1+1 та 2+2). Вона складається з двох рулонних зарядів, двох друкарських секцій і двох фальцапаратів.

*Принцип роботи машини.* Друкарська машина ПОГ90 використовує принцип ротаційного офсетного друку з рулону. Вона складається з двох друкарських секцій і двох фальцапаратів. Машина може працювати в різних режимах:

1. Роздільна робота друкарських секцій (одна рулонна подача, одна друкарська секція, один фальцапарат) – друкування 4-сторінкових газет форматом 594×840 мм та 4- і 8-сторінкових газет форматом 420×594 мм з використанням однофарбового друку (1+1);

2. Спільна робота друкарських секцій (дві рулонні подачі, дві друкарські секції, один фальцапарат) – друкування 6- і 8-сторінкових газет форматом 594×840 мм та 8-, 12- і 16-сторінкових газет форматом 420×594 мм з використанням однофарбового друку (1+1);

3. Спільна робота друкарських секцій (одна рулонна подача, дві друкарські секції, один фальцапарат) – друкування 4-сторінкових газет форматом 594×840 мм та 4- і 8-сторінкових газет форматом 420×594 мм з використанням двофарбового друку (2+2).

Для забезпечення роботи машини ПОГ90 в одному з режимів на горизонтальному валу встановлена зубчата муфта. При відключенні цієї муфти кожна друкарська секція може працювати автономно разом із власним

фальцапаратом, використовуючи двигуни, які розташовані на фундаментах фальцапаратів.

Робота машини ПОГ90 здійснюється таким чином: паперове полотно, змотуючись з рулону, проходить через паперонаправляючі валики та валик регулятора натягу рулонної зарядки, а потім через стабілізуючий циліндр і між офсетними циліндрами друкарських секцій, де друкується з обох сторін. Після друку паперове полотно переміщується по паперопроводячих валиках у фальцапарат, який здійснює фальцювання газет. Проводка паперу та тип готової продукції залежать від режимів роботи машини, зазначених раніше.

Система натягу паперу функціонує наступним чином. Плаваючий валик через систему важелів і тягу впливає на колодки рольного гальма. Коли під час роботи машини рівень натягу паперового полотна збільшується, плаваючий валик переміщується вліво, що призводить до ослаблення натягу пружин і відповідно до послаблення гальмування рулону. У разі зменшення натягу паперового полотна плаваючий валик переміщується вправо, натягує пружини і посилює гальмування. Натяг паперового полотна підтримується в рівновазі завдяки пружинам і регулюється маховиком. Для згладжування високочастотних коливань натягу, що виникають через неправильну геометричну форму рулону, використовується гідравлічний амортизатор.

Характерні технологічні неполадки, що виникають через нерегульований натяг полотна:

- утворення складок і зморшок на матеріалі;
- змазані зображення на відбитку;
- несуміщення фарб на відбитку.

Таблиця 1.1 – Основні технічні параметри друкарської машини ПОГ90

1. Тип машини	напівавтоматична
2. Формат машини по паперу, мм:	

- мінімальний	297×420
- максимальний	594×840
3. Розмір фальцьованої продукції при друкуванні з рулону 840 мм	297×420
4. Офсетне полотно:	
- матеріал	„Вулкан 714” або „КАУ Компрессибл”
- товщина, мм	1.9 ± 0.015
5. Максимальний діаметр рулону, мм	1000
6. Ширина рулону, мм	840, 420
7. Частота обертання формних циліндрів, об/год	
- максимальна	30000
- експлуатаційна	24000
8. Діапазон регулювання швидкості	1 : 37.5
9. Величина несуміщення фарб, мм, не більше	0.5
10. Обслуговуючий персонал, чоловік	6
11. Загальна встановлена потужність, кВт	37
12. Електрообладнання машини розраховано для	

роботи від чотирьохпроводної мережі змінного струму:  - напруга, В  - частота, Гц	   380  50
13. Габарити машини, мм  - довжина  - ширина  - висота	  9500  4000  3000

## 1.2 Математичні моделі складових частин машини

Потрібно знайти передаточну функцію об'єкта регулювання. Об'єктом регулювання є коливний вал. Вхідною величиною є гальмівний момент на валу розмотки, а вихідною – положення коливного валу, яке характеризує натяг полотна. Для цього необхідно розглянути схему динаміки системи.

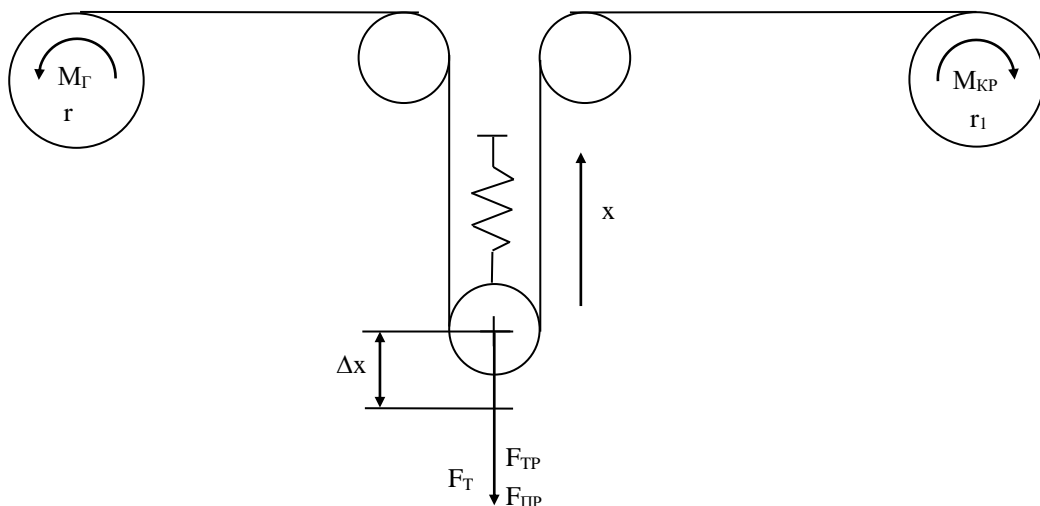


Рисунок 1.1 – Спрощена кінематична схема системи: де  $M_G$  – гальмівний момент на валу розмотки;  $r$  – радіус валу розмотки;  $M_{KP}$  – крутний момент на валу намотки;  $r_1$  – радіус валу намотки;  $F_T$ ,  $F_{DP}$ ,  $F_{TP}$  – сили тяжіння, пружності та тертя відповідно;  $\Delta x$  – відхилення від положення рівноваги.

Для цієї системи складемо диференційне рівняння, що описує її

$$m \cdot a = \sum_i F_i;$$

$$m \cdot a = F_{KP} + F_{\Gamma} - F_{TP} - F_{IP} - F_T;$$

рух.  $m \cdot \ddot{x} = F_{KP} + F_{\Gamma} - f \cdot \dot{x} - k \cdot x - F_T,$

$$\text{де } F_{KP} = M_{KP}/r_1, F_{\Gamma} = M_{\Gamma}/r.$$

Сформулюємо диференційне рівняння у вигляді відхилень.

$$x = x_o + \Delta x; F_{KP} = F_{KP_o}; F_{\Gamma} = F_{\Gamma_o} + \Delta F_{\Gamma}; F_T = F_{T_o}.$$

$$m \frac{d^2(x_o + \Delta x)}{dt^2} + f \frac{d(x_o + \Delta x)}{dt} + k \cdot (x_o + \Delta x) = F_{KP_o} + F_{\Gamma_o} + \Delta F_{\Gamma} - F_{T_o}. \quad (1.1)$$

У стані статичної рівноваги рівняння 1.1 набуде наступного вигляду

$$k \cdot x_o = F_{KP_o} + F_{\Gamma_o} - F_{T_o}.$$

У динамічному режимі рівняння 1.1 матиме такий вигляд.

$$m \cdot \Delta \ddot{x} + f \cdot \Delta \dot{x} + k \cdot \Delta x = \Delta F_{\Gamma} + f_{TP}, \quad (1.2)$$

де  $f_{TP}$  - випадковий процес, що обумовлений численними факторами.

$$m \cdot \Delta \ddot{x} + f \cdot \Delta \dot{x} + k \cdot \Delta x = \frac{\Delta M_{\Gamma}}{r} + f_{TP}. \quad (1.3)$$

Передаточна функція від входу  $\Delta M_{\Gamma}$  до виходу має  $\Delta x$  наступний вигляд.

$$W_{OP}(p) = \frac{1}{r(m \cdot p^2 + f \cdot p + k)}. \quad (1.4)$$

Передаточна функція, що описує перехід від входу  $f_{TP}$  до виходу  $\Delta x$ , має наступний вигляд

$$W_{TP}(p) = \frac{1}{m \cdot p^2 + f \cdot p + k}. \quad (1.5)$$

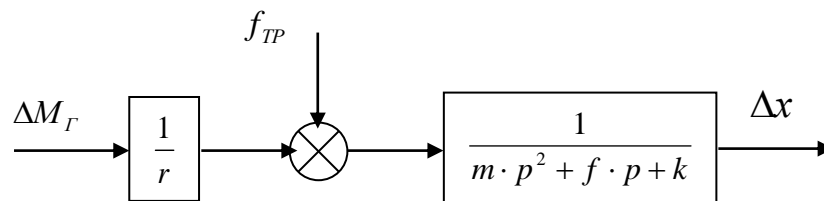


Рисунок 1.2 – Схема структури об'єкта регулювання

Підставивши всі необхідні параметри, отримаємо:

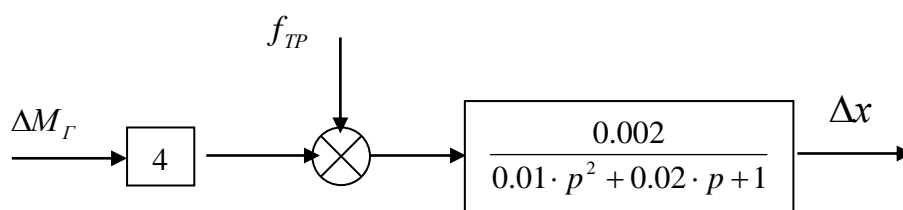


Рисунок 1.3 – Структура об’єкта регулювання

### 1.3 Моделі впливів експлуатаційного характеру на систему

Для визначення експлуатаційних впливів на систему було проведено експериментальне дослідження переміщень коливного валу без регулювання. Дослідження проводилися наступним чином: поряд з віссю коливного валу була прикріплена лінійка, а за допомогою відеокамери фіксувалося положення валу. Частота зйомки 25 кадрів на секунду була достатньою для реєстрації переміщень коливного валу. Мінімальне можливе положення валу, яке дозволяла конструкція, було взято за початок відліку. Максимальне можливе положення валу становило 16 міліметрів. Дискретність вимірювання переміщень дорівнювала  $d = 0,5$  мм. Оскільки процес роботи машини є тривалим, вимірювання проводилися чотири рази по 256 точок з інтервалом у 2 хвилини. Одержані відеоматеріали були оцифровані та внесені у вигляді таблиць до середовища MatLab для подальшої обробки. У результаті було отримано чотири масиви даних вимірювань, які проводилися з інтервалом у 2 хвилини.

Графіки виміряних переміщень представлені на рис. 1.4 – 1.7. За допомогою програмного середовища були розраховані такі параметри: середні значення, середньоквадратичне відхилення та кореляційна функція.

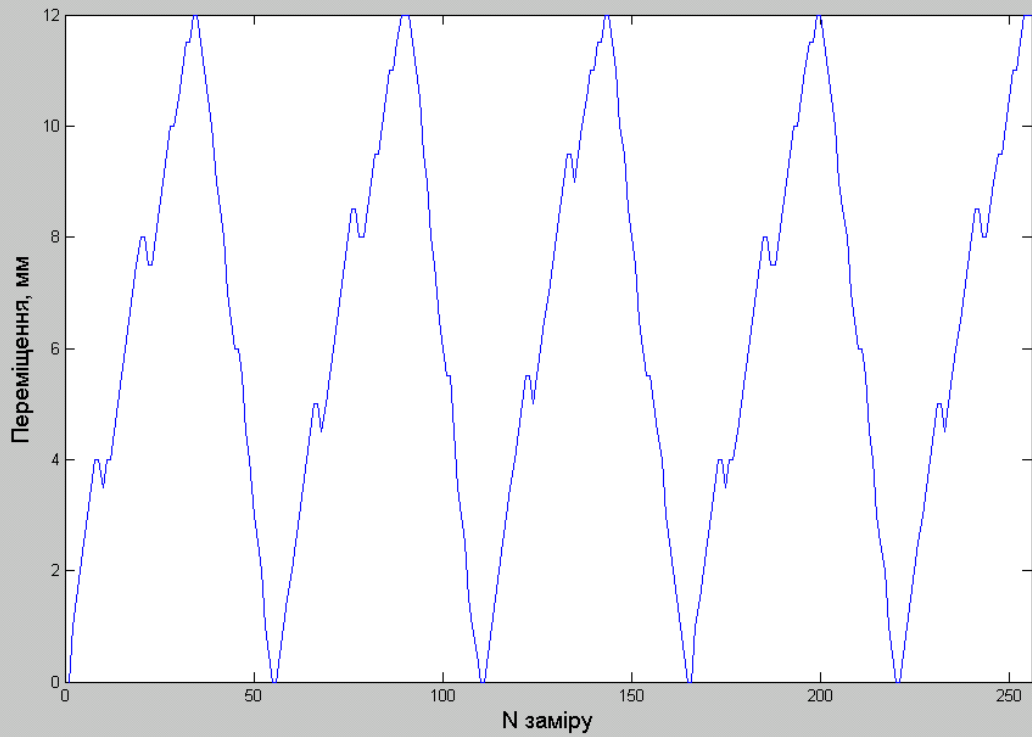


Рисунок 1.4 – Графік випробування №1

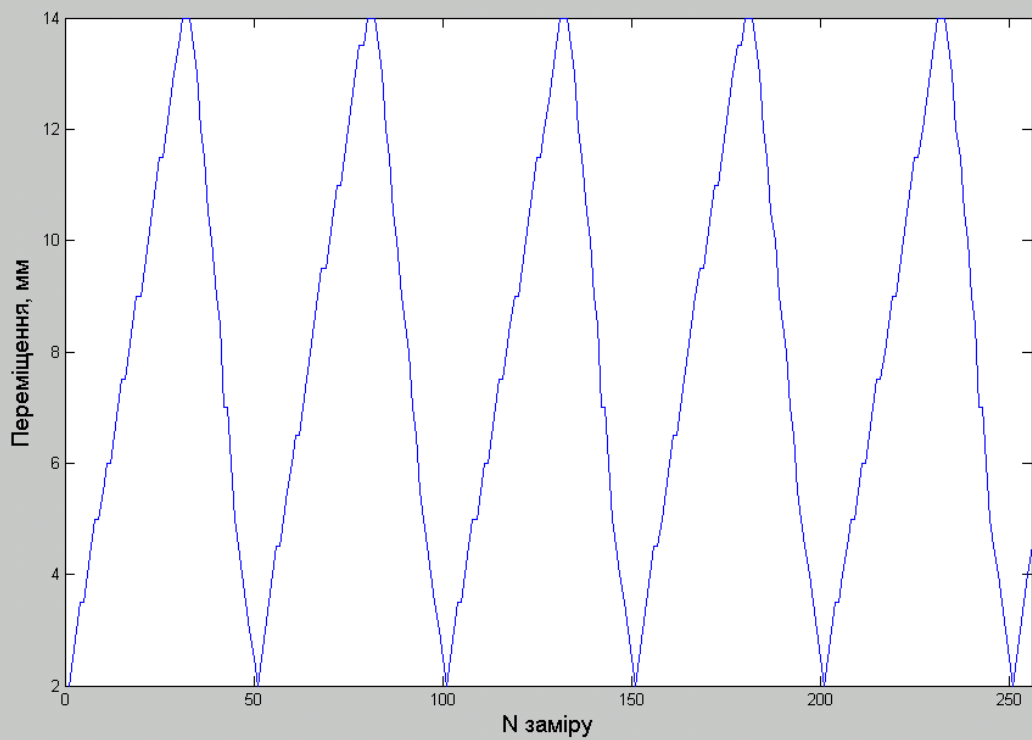


Рисунок 1.5 – Графік випробування №2

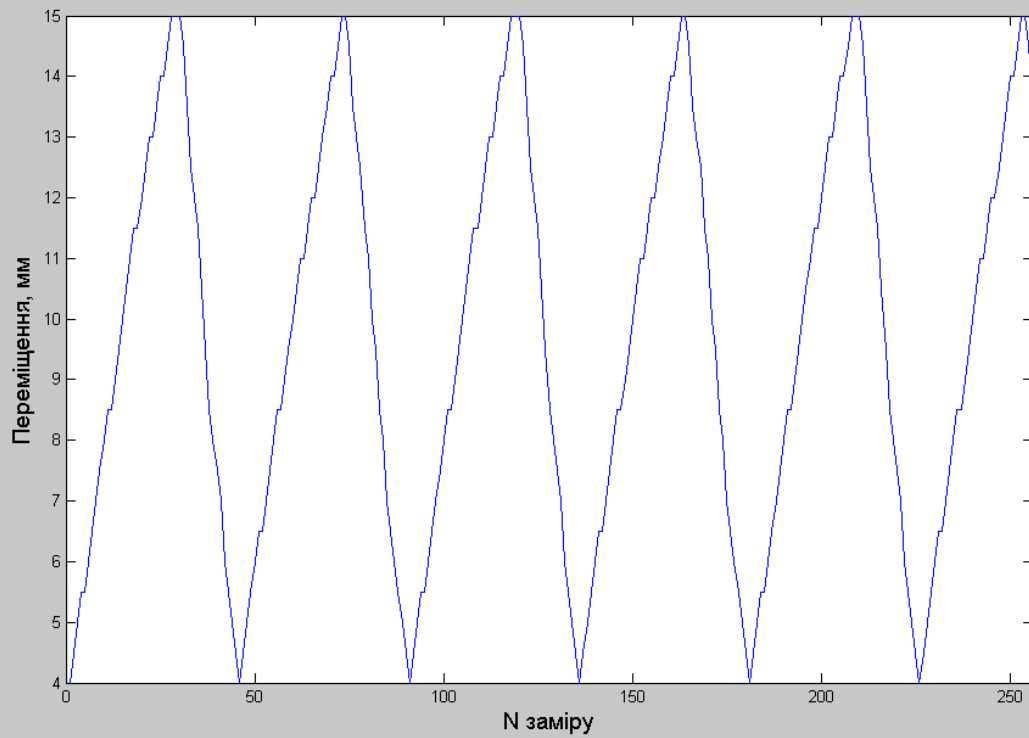


Рисунок 1.6 – Графік випробування №3

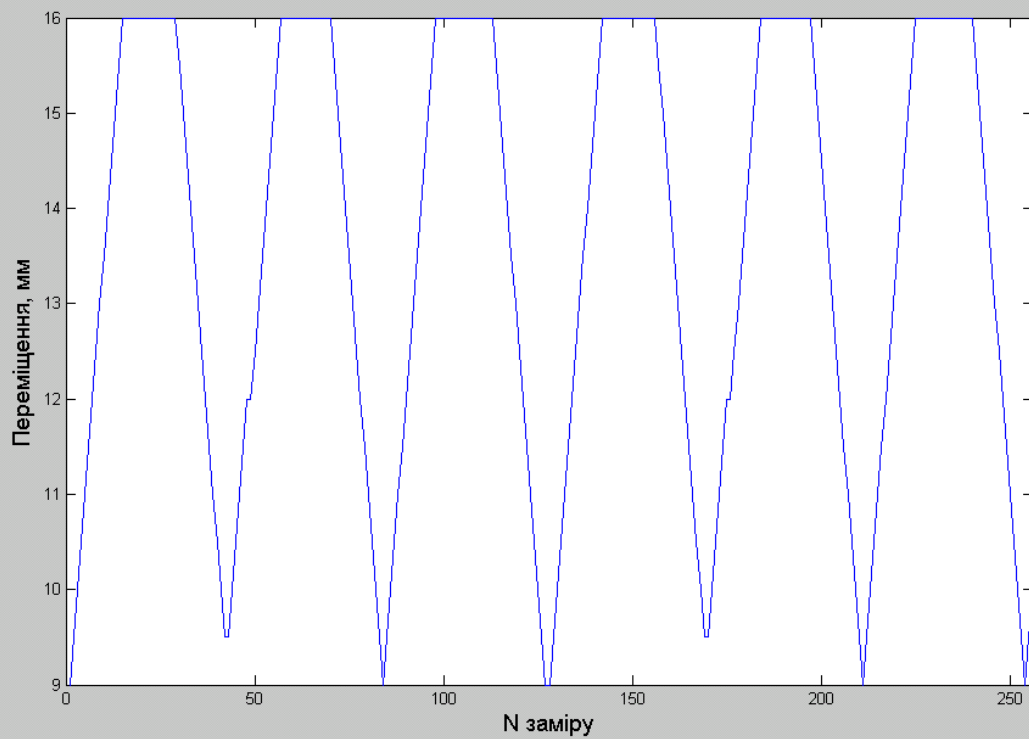


Рисунок 1.7 – Графік випробування №4

Таблиця 1.2 – Статистичні результати випробувань

Номер випробування	1	2	3	4
Середнє значення параметру, мм	6.352	7.982	9.721	13.62
Середньоквадратичне відхилення, мм	3.512	3.68	3.35	2.356

Для обчислення кореляційних функцій потрібно виконати певні розрахунки в середовищі MatLab. Перший масив даних створюється у вигляді вектора  $a1$ . Також формується вектор часу  $t$ . Потім за допомогою команди `xcov` обчислюється кореляційна функція у вигляді масиву даних, після чого будується графік.

```
>> t=0:1/25:255/25;
>> [c1,lg]=xcov(a1,'coeff');
>> lg1=lg/25;
>> plot(lg1,c1)
```

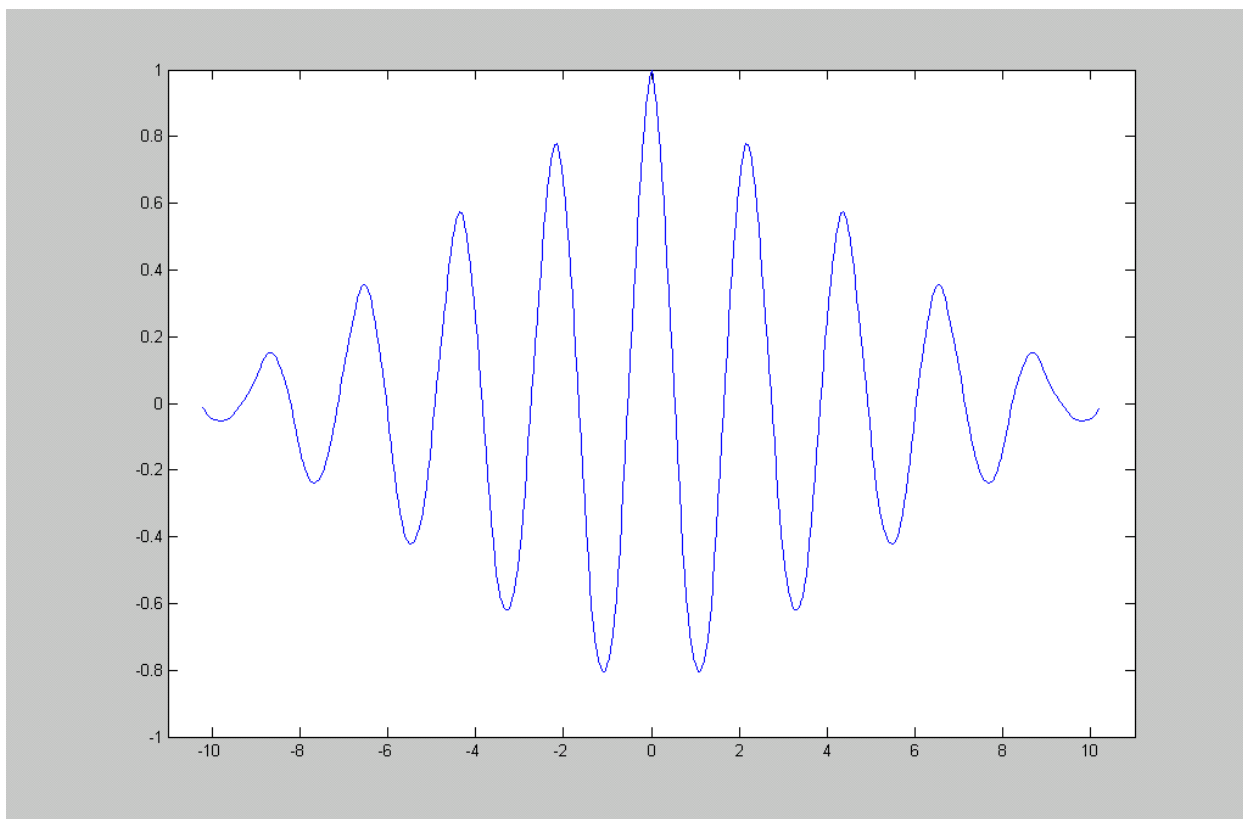


Рисунок 1.8 – Графік кореляційної функції  $K_1(\tau)$  для першого випробування

№1

Далі за допомогою пакету Curve Fitting в середовищі MatLab визначається функціональна залежність кореляційної функції у вигляді  $K(\tau) = a \cdot e^{-b|\tau|} \cdot \cos(c \cdot \tau)$ .

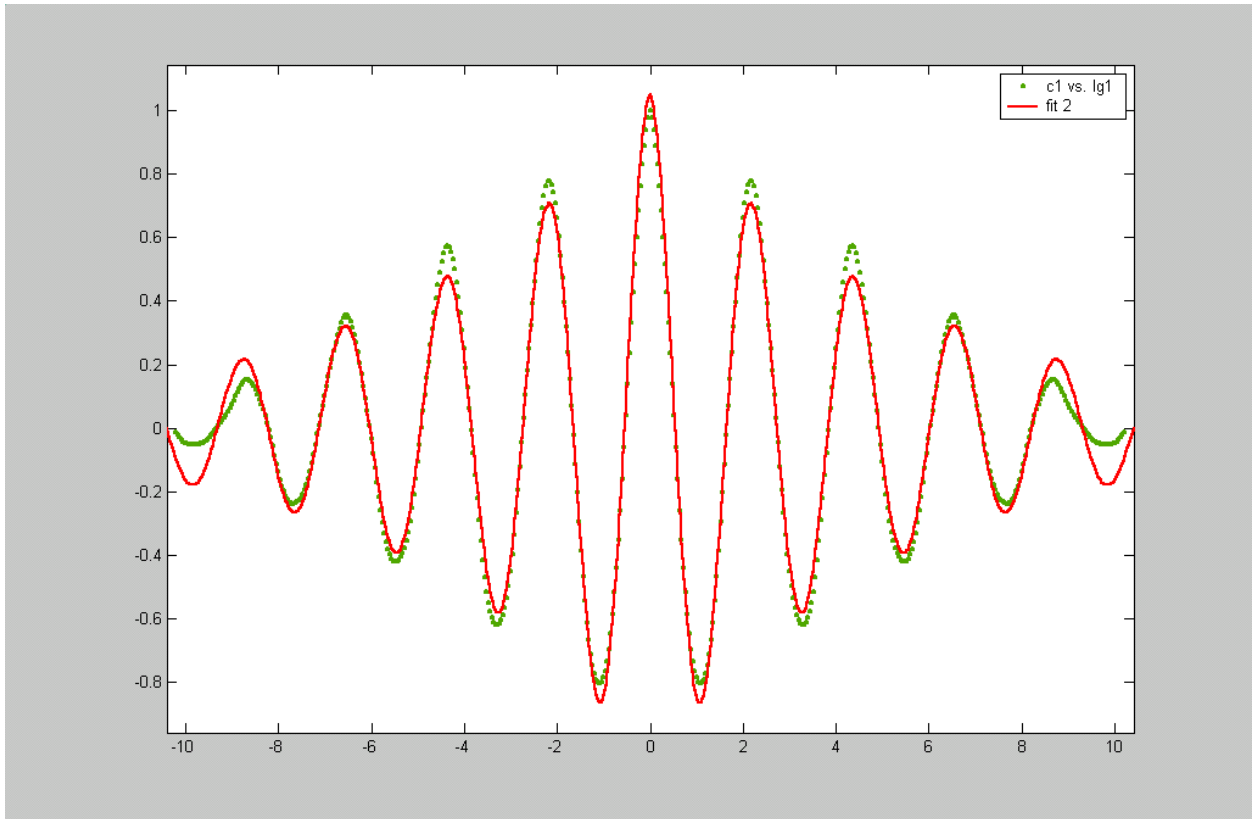


Рисунок 1.9 – Графік кореляційної функції для першого випробування №1 ... одержаний експериментально; \_\_\_ апроксимований.

Після апроксимації була отримана наступна кореляційна функція  $K_1(\tau) = 1.049 \cdot e^{-0.1796|\tau|} \cdot \cos(2.867 \cdot \tau)$ , з середньоквадратичною помилкою  $RMSE1 = 0.0495$ .

Далі аналогічні операції потрібно виконати для інших випробувань. Щоб уникнути повторення тих самих дій, для наступних випробувань будуть представлені лише результати: графік експериментально отриманої та апроксимованої кореляційної функції, математичний вираз для кореляційної функції та середньоквадратична помилка.

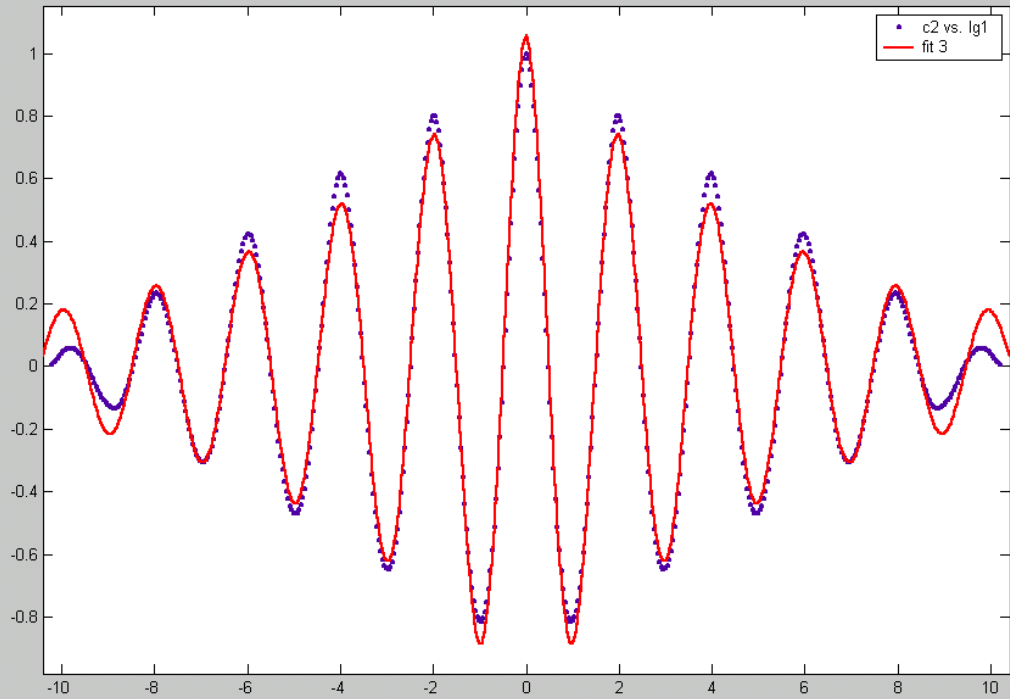


Рисунок 1.10 – Графік кореляційної функції для другого випробування №2

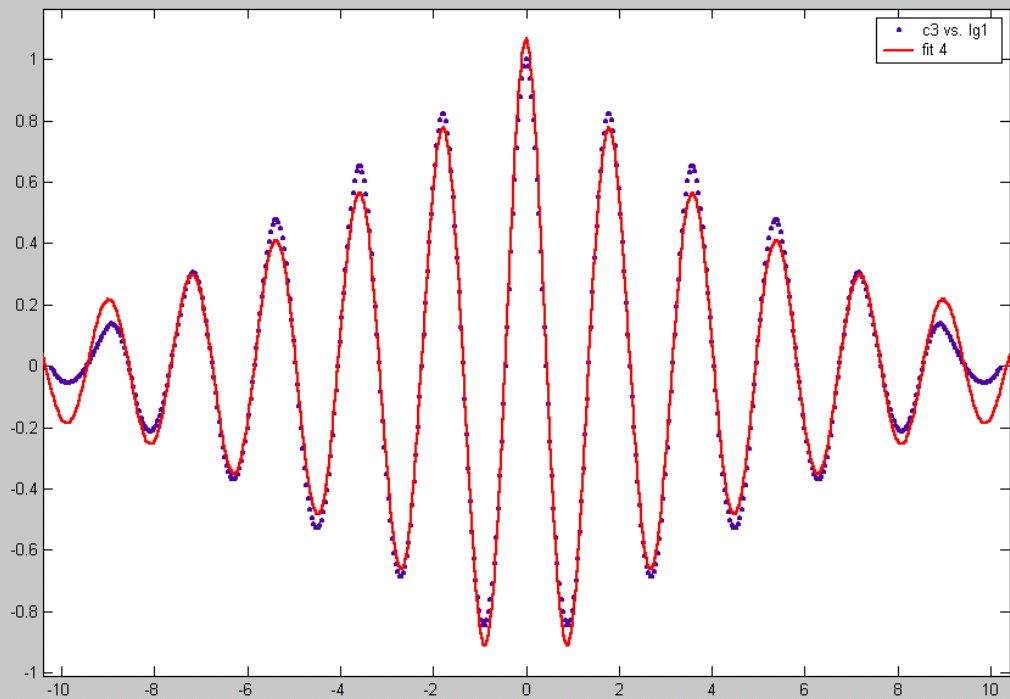


Рисунок 1.11 – Графік кореляційної функції для третього випробування № 3

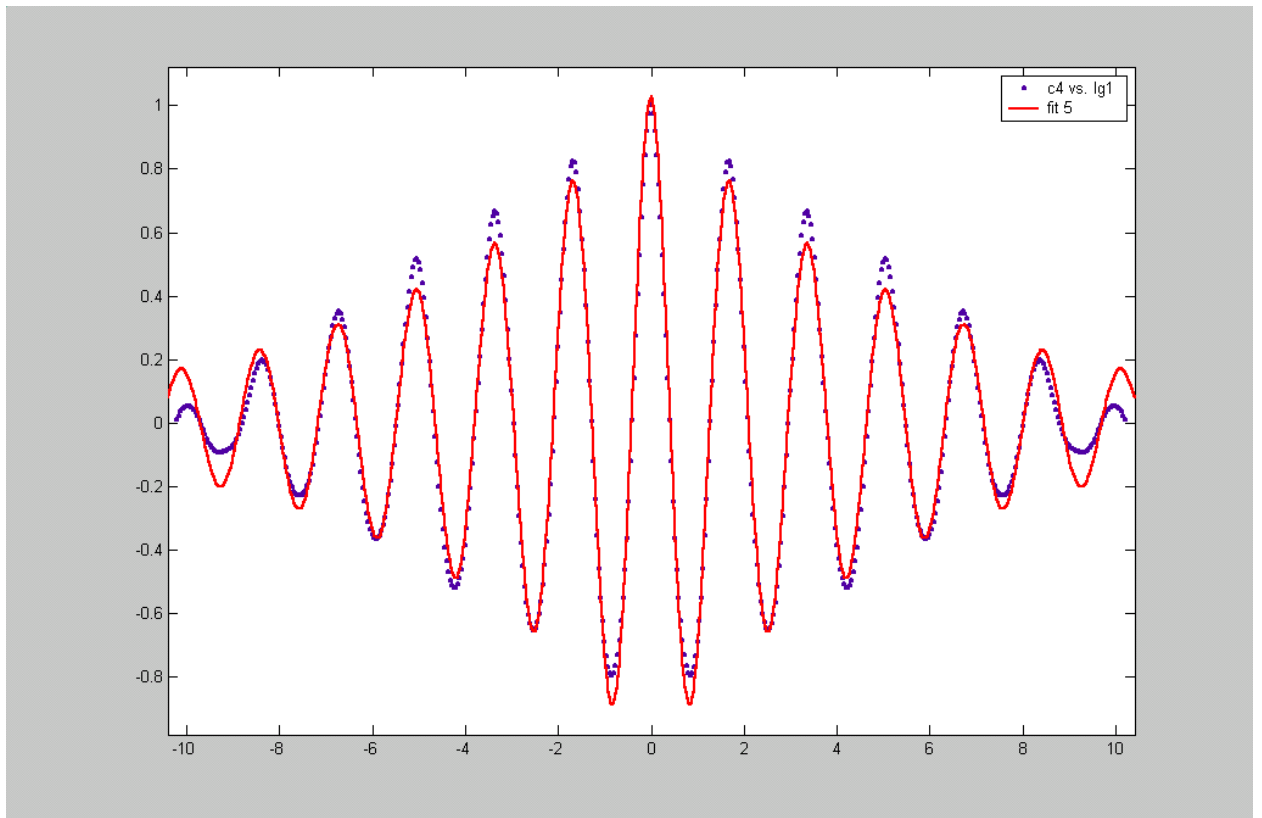


Рисунок 1.12 – Графік кореляційної функції четвертого випробування № 4

Кореляційні функції випробувань № 2-4:

$$K_2(\tau) = 1.056 \cdot e^{-0.177|\tau|} \cdot \cos(3.152 \cdot \tau),$$

$$K_3(\tau) = 1.066 \cdot e^{-0.1768|\tau|} \cdot \cos(3.494 \cdot \tau),$$

$$K_4(\tau) = 1.026 \cdot e^{-0.1766|\tau|} \cdot \cos(3.726 \cdot \tau).$$

Середньоквадратичні помилки апроксимації:

$$RMSE2 = 0.04935,$$

$$RMSE3 = 0.04793,$$

$$RMSE4 = 0.05153.$$

Переміщення коливного вала можуть змінюватися в межах від 0 до 16 мм. Система регулювання повинна підтримувати середнє положення вала на рівні 8 мм. Оскільки середнє значення для випробування №4 становить 13.62, його результати можна не враховувати. Серед кореляційних функцій для випробувань №1–3 необхідно знайти середню, яка матиме наступний вигляд

$$K(\tau) = 1.057 \cdot e^{-0.1778|\tau|} \cdot \cos(3.171 \cdot \tau), \quad (1.6)$$

а середньоквадратичне відхилення  $\sigma_f = 3.514 \cdot 10^{-3}$  м.

Тепер потрібно визначити спектральну щільність експлуатаційних впливів. Для цього використовується пакет Mathcad.

$$S_e(\omega) = \frac{\sigma^2}{2\pi} \cdot \frac{0.3768 \cdot \omega^2 + 3.109}{\omega^4 - 16.375 \cdot \omega^2 + 68.095} \quad - \quad \text{спектральна} \quad \text{густина}$$

експлуатаційних впливів.

Знайдемо залежність спектральної густини від  $s = j\omega$ .

$$S_e(s) = \frac{0.74 \cdot 10^{-6} \cdot (-s^2 + 8.251)}{s^4 + 16.375s^2 + 68.095}. \quad (1.7)$$

Оскільки вимірювання проводились на виході об'єкта регулювання, відповідно до структури, показаної на рис. 1.4, потрібно знайти спектральну щільність впливів  $f_{TP}$ . Для цього слід виконати певні розрахунки.

$$\begin{aligned} S_f(s) &= S_e(s) \cdot (0.01s^2 + 0.02s + 1) \cdot (0.01s^2 - 0.02s + 1) / (0.002)^2 = \\ &= \frac{0.185(-s^2 + 8.251) \cdot (0.01s^2 + 0.02s + 1) \cdot (0.01s^2 - 0.02s + 1)}{s^4 + 16.375s^2 + 68.095}. \end{aligned} \quad (1.8)$$

#### **1.4 Вимоги та обмеження щодо технологічного процесу та обґрунтування потреби в автоматизації**

У процесі обробки паперове полотно на рулонних друкарських машинах повинно підтримувати стабільний натяг для досягнення необхідного технологічного ефекту. Це особливо важливо для швидкісних машин, де збурюючі впливи посилюються. Коливання натягу виникають через нерівномірність рулонів, зменшення радіусу рулону під час розмотування, зміну швидкості роботи машини, а також через перепади температури, вологості та механічні навантаження. У сучасних рулонних машинах, наприклад, через необхідність пропускання паперового полотна через сушильні та охолоджуючі пристрої, довжина його шляху між друкарськими секціями може досягати 12 м, а при перевертанні для друку на

зворотному боці – навіть 50 м. Під впливом температури паперове полотно деформується і змінює свої розміри, що призводить до змін натягу, порушення суміщення фарб і точності фальцовки. Чим довший шлях, який полотно проходить між друкарськими секціями, тим більший вплив коливання натягу мають на точність суміщення фарб, і тим складнішим і тривалішим стає процес компенсації відхилень. Перевищення необхідного натягу може призвести до обриву полотна, тоді як його послаблення спричиняє утворення зморшок, складок та змазаних відбитків. Таким чином, натяг паперового полотна є критично важливим параметром, що визначає надійність паперопроводящої системи та загальну якість роботи рулонних машин, а стабільність натягу в оптимальних межах є однією з основних складних задач автоматичної стабілізації швидкісних друкарських процесів.

Під час вивчення роботи друкарської машини ПОГ90 та консультацій з працівниками були встановлені вимоги та обмеження щодо натягу друкарського полотна. Оскільки натяг полотна визначається за положенням коливного вала, основні вимоги такі:

- коливання повинні відбуватись навколо середнього положення коливного вала, тобто статичне положення має підтримуватись на рівні  $x = 8$  мм;
- амплітуда коливань повинна бути мінімальною, тобто необхідно розробити систему, яка забезпечуватиме стабільність положення коливного вала навколо середнього значення.

У ручному режимі роботи машини підтримка середнього значення коливань натягу полотна можлива, проте якість буде незадовільною, оскільки регулювання здійснюється дискретно і з великими проміжками часу. Крім того, зменшити коливання валу в ручному режимі взагалі неможливо. Це призводить до утворення складок та зморшок на матеріалі, несуміщення фарб і змазаних зображень на відбитках. Тому є необхідність у автоматизації процесу регулювання натягу полотна. Потрібно розробити систему автоматичного регулювання, яка б підтримувала середнє значення коливань і знижувала амплітуду.

## **2 Розробка системи автоматичного регулювання натягу полотна для газетної друкарської машини ПОГ90**

### **2.1 Розробка структурної схеми системи автоматичного регулювання**

Положення коливного вала є основним показником натягу полотна. Таким чином, завдання системи автоматичного регулювання натягу полягає у забезпеченні стабільного положення коливного вала. З експериментально отриманих моделей експлуатаційних впливів можна зробити висновок, що в процесі роботи коливний вал змінює своє положення, коливаючись навколо певного середнього значення, яке також може змінюватись. Система регулювання повинна забезпечувати стабільне середнє значення коливань і зменшувати амплітуду коливань до мінімуму. Це можна досягти зміною гальмівного моменту на валу розмотки полотна. Таким чином, об'єктом регулювання є коливний вал. Вхідним сигналом об'єкта регулювання є гальмівний момент на валу розмотки  $M_{\Gamma}$ , а вихідним – відхилення від середнього положення коливного вала  $\Delta X$ . Структурна схема системи автоматичного регулювання представлена на рисунку 2.1. Передаточна функція об'єкта регулювання була визначена у підрозділі 1.2. У наступному підрозділі буде розглянуто вибір датчика та виконавчого механізму і визначення їхніх передаточних функцій.

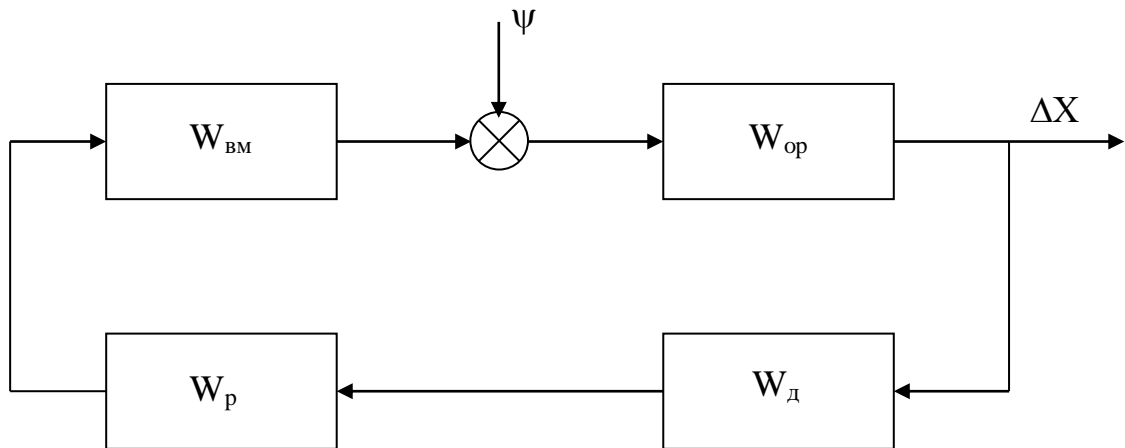


Рисунок 2.1 – Схема структури системи автоматичного регулювання

- $W_{op}$  – передаточна функція об'єкта регулювання;
- $W_{вм}$  – передаточна функція виконавчого механізму;
- $W_{д}$  – передаточна функція датчика переміщення;
- $W_{p}$  – передаточна функція регулятора;
- $\psi$  - експлуатаційні впливи.

## 2.2 Вибір сенсора та приводного механізму

2.2.1 Датчики лінійного переміщення, засновані на МЧМС, мають конструкцію, подібну до приладів, що використовують інші перетворювачі магнітного поля. Вони відрізняються лише деякими особливостями у використанні магніточутливих інтегральних схем.

На малюнку 2.2 зображено вигляд магнітного датчика лінійних переміщень типу APS3A2AA, виробленого компанією Honeywell.

У датчику APS3A2AA використовується кремнієва магніточутлива мікросхема 1 як перетворювач магнітного поля. Конструкція датчика включає мініатюрний постійний магніт 2, який жорстко закріплений на поводку 3. Вектор переміщення контрольованого об'єкта передається датчику через поводок 3, що переміщує постійний магніт 2 вздовж чутливої поверхні МЧМ. Всі компоненти датчика розташовані у пластиковому корпусі 4, з

якого виходить трьохпровідний кабель 5 для підключення датчика до зовнішніх пристроїв.

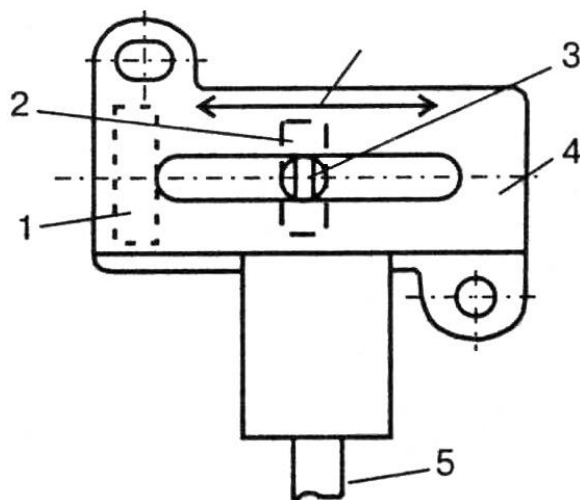


Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд датчика лінійного переміщення типу APS3A2AA: 1 – магніточутлива інтегральна схема; 2 – постійний магніт; 3 – поводиток; 4 – пластиковий корпус; 5 – трьохпровідний кабель.

Таблиця 2.1 – Головні характеристики датчика APS3A2AA

№ п\п	Найменування параметра, одиниця виміру	Діапазон значень
1	Довжина робочого ходу, мм	19
2	Чутливість, мВ\мм	237
3	Напруга живлення, В	8 – 16
4	Струм споживання, мА	10
5	Вихідний струм, мА, не більш	10
6	Нелінійність характеристики перетворення, %	±2,5
7	Постійна часу, мкс, не більш	3
8	Повторюємість, %	<1,0
9	Діапазон робочих температур, 3°	-20...+85
10	Габаритні розміри, мм <sup>3</sup>	34×34×22

На рисунку 2.3 зображена конструкція датчика лінійних переміщень, виготовленого компанією ММТ. Її конструкція є досить простою і не потребує додаткових пояснень. Магніточутливим елементом 6 є Холовий датчик, розташований у зазорі магнітної системи 5.

Вектор переміщення контрольованого об'єкта передається рухомому магнітному шунту 7 через шток 1, що призводить до зміни вихідного сигналу ЕХ. Сигнал від Холового елемента посилюється електронною схемою, розташованою на платі 4. Електронна схема датчика забезпечує термостабілізацію основних параметрів. Вихідні характеристики датчика показані на рисунку 2.4, а основні параметри наведені в таблиці 2.2.

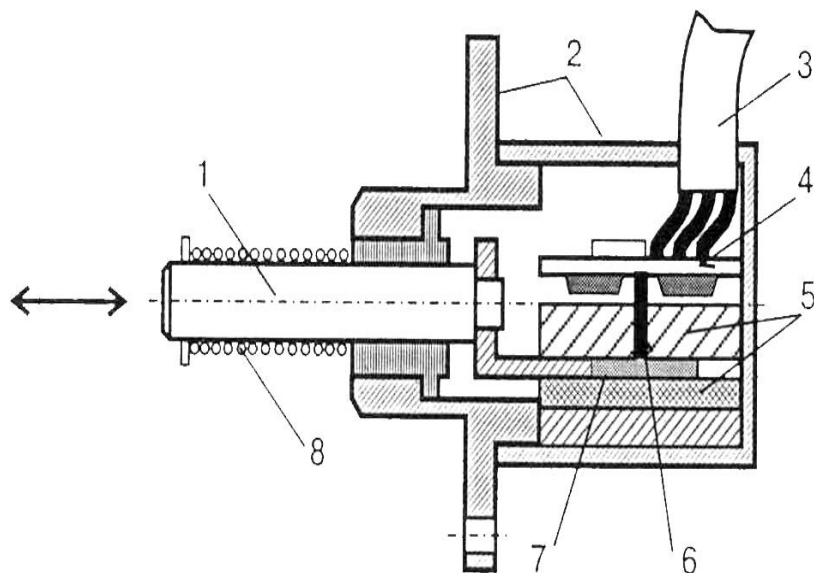
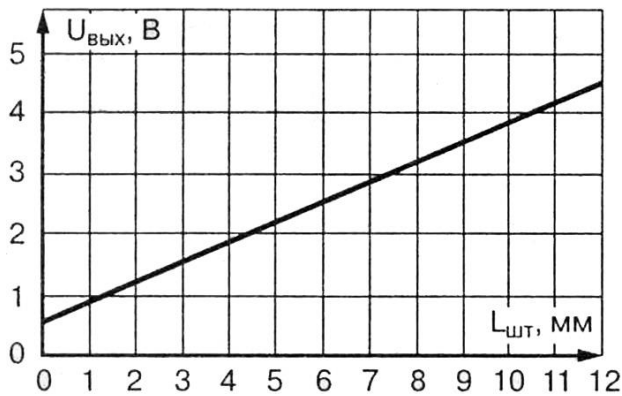
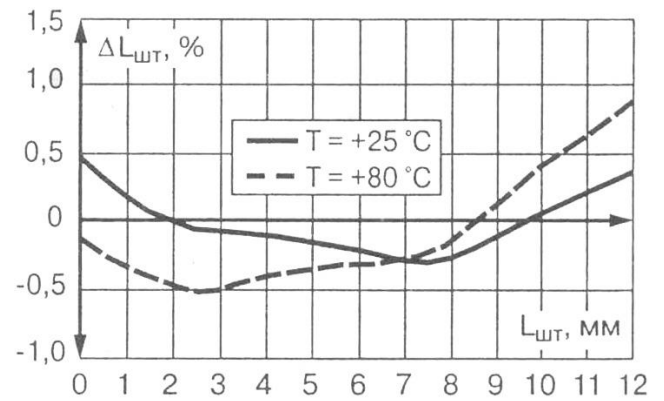


Рисунок 2.3 – Конструкція датчика лінійних переміщень від компанії ММТ:

1 – шток; 2 – корпус; 3 – кабель; 4 – плата з електронною схемою; 5 – магнітна система; 6 – Холів елемент; 7 – магнітний шунт; 8 – зворотна пружина.



а)



б)

Рисунок 2.4 – Датчики лінійних переміщень від компанії ММТ: а – характеристика виходу; б – типова залежність похибки вимірювання  $\Delta L_{шт}$  від довжини  $L_{шт}$  при температурах 25°C і 80°C.

Таблиця 2.2 – Ключові характеристики датчика лінійних переміщень компанії ММТ

№ п\п	Найменування параметра, одиниця виміру	Діапазон значень
1	Довжина робочого ходу, мм	30
2	Чутливість, мВ\мм	400
3	Напруга живлення, В	5
4	Струм споживання, мА	10
5	Вихідний струм, мА, не більш	10
6	Нелінійність характеристики перетворення, %	±1,0
7	Діапазон робочих температур, С°	-40...+130

Для системи автоматичного регулювання обрано датчик лінійних переміщень від компанії ММТ, характеристики якого наведені в таблиці 2.2. Передаточна функція цього датчика буде мати наступний вигляд:

$$W_d(p) = K_d = 400 \quad (2.1)$$

## 2.2.2 Обрання виконавчого механізму

### *Електромеханічні муфти*

Муфта – це пристрій, який використовується для з'єднання двох валів, забезпечуючи передачу обертаючого моменту від одного вала (ведучого) до іншого (веденого). Ведучий вал приводиться в обертання двигуном, а ведений вал з'єднаний з навантаженням. Електромеханічною муфтою називається така муфта, де для передачі механічного моменту використовуються електричні явища. Керування муфтою здійснюється за допомогою електричного сигналу, що робить її перетворювачем електричного сигналу в механічний обертаючий момент. Оскільки потужність, що передається на веденому валу, значно перевищує потужність керуючого сигналу, електромеханічна муфта також забезпечує посилення потужності сигналу. Двигун, який обертає ведучий вал, виконує в енергетичному плані ту ж роль, що й джерело живлення в класичному електричному підсилювачі. В обох випадках вхідний електричний сигнал контролює потік потужності від джерела. Електромеханічні муфти використовуються в різних системах сільськогосподарської автоматизації та як регульовані електроприводи для сільськогосподарської техніки.

Муфти поділяються на релейної дії, які забезпечують жорстке з'єднання валів при подачі сигналу, та муфти безперервної дії, які забезпечують гнучке зчеплення. У муфтах безперервної дії швидкість веденого валу змінюється залежно від величини вхідного сигналу, і ця залежність може бути представлена у вигляді плавної статичної характеристики «швидкість веденого валу - вхідний сигнал». У автоматичних системах особливий інтерес становлять муфти з гнучким зчепленням.

Електромеханічні муфти використовуються як виконавчі елементи. Вони можуть замінювати виконавчий двигун з регульованою швидкістю обертання, що дозволяє застосовувати нерегульовані електричні та неелектричні двигуни в якості приводних. Така заміна зазвичай спрощує

загальну схему та конструкцію автоматичної системи, а також підвищує її надійність.

Головною перевагою електромеханічних муфт порівняно з звичайними керованими електродвигунами є їхня вища швидкодія. Це обумовлено тим, що момент інерції обертових частин муфти, які з'єднані з веденим валом, можна зробити значно меншим, ніж момент інерції приводного двигуна. Це, в свою чергу, впливає на швидкість системи управління навантаженням, коли вплив здійснюється на двигун, а не на муфту.

Електромеханічні муфти використовуються в широкому діапазоні потужностей — від кількох ват (наприклад, у малопотужних приладових системах для спостереження) до десятків тисяч кіловат (у електроприводах прокатних станів, металорізальних верстатах і приводах гребних гвинтів на судах).

Виконавчі механізми (ВМ), що оснащені електромеханічними муфтами, мають простішу конструкцію, нижчу вартість, високу надійність і довговічність порівняно з ВМ, які використовують електродвигуни. Однак вони менш економічні при великому діапазоні регулювання швидкості обертання.

Використання електромеханічних муфт є доцільним, насамперед, у механізмах, де витрати енергії складають незначну частину собівартості продукції. У таких випадках підвищення надійності, що веде до зменшення простоїв і дефектів, зазвичай компенсує додаткові витрати на енергію. Низька собівартість цих механізмів також мінімізує розрахункові витрати. Крім того, вони ефективні у механізмах, де момент навантаження залежить від квадрату швидкості обертання, наприклад, у вентиляторах.

Електромеханічні муфти класифікуються за принципом їхньої роботи на два основні типи: муфти тертя (ЕМТ) і муфти ковзання (ЕМК). Зазвичай вони виконують дві головні функції:

1. З'єднання та роз'єднання приводного двигуна з робочим механізмом.

2. Регулювання швидкості обертання робочого механізму, незалежно від постійної швидкості обертання приводного двигуна.

#### *Електромеханічні муфти тертя*

У муфтах тертя обертовий момент на веденому валу генерується завдяки силі тертя. Електромеханічні муфти тертя можна поділити на муфти сухого тертя та ферропорошкові (магнітоемультсійні) муфти тертя.

#### *Електромеханічні муфти сухого тертя*

Принцип дії муфти сухого тертя ілюструється рисунком 2.5,а. Муфта складається з двох половин 1 і 2 (напівмуфт), на яких укріплені диски тертя 3 із фрикційного матеріалу. Одна напівмуфта може переміщатися уздовж свого вала на шпонці, інша з'єднана зі своїм валом жорстко. Якщо притиснути обидві половин муфти друг до друга, то нерухомий до цього ведений вал стане обертатися заодно з ведучим, тобто відбудеться зчеплення валів за рахунок сили тертя, що перешкоджає прослизанню дисків тертя один відносно одного.

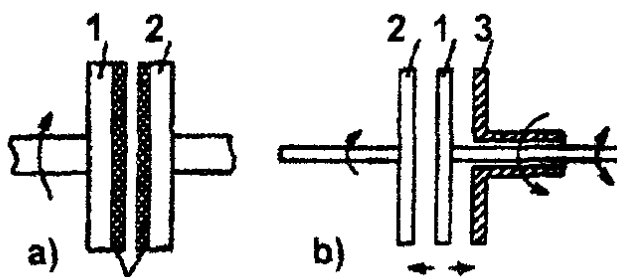


Рисунок 2.5 – Принцип роботи муфт сухого тертя: а – нереверсивна муфта, б – реверсивна муфта.

На рисунку 2.5, б показано, як працює реверсивна муфта тертя, яка дозволяє змінювати напрямок обертання веденого вала. Вона є комбінацією двох простих нереверсивних муфт: ведений диск 1 розташований між двома ведучими дисками 2 і 3, які обертаються у протилежні сторони. Напрямок обертання веденого диска можна змінювати, притискаючи його до одного або іншого ведучого диска. Ведучі диски можуть обертатися як за допомогою

двох окремих двигунів, так і одного загального. У другому випадку один з дисків з'єднується з двигуном через зубчасту передачу, що змінює його напрямок обертання відносно іншого диска.

Для швидкого гальмування ведений вал муфти тертя поєднується з гальмом. Така комбінована муфта виглядає як реверсивна (рис. 2.5, б), але другий ведучий диск у цьому випадку замінюється нерухомим диском, закріпленим на основі муфти. Гальмування веденого диска відбувається за рахунок притискання його до нерухомого диска.

Притискання частин муфти одна до одної може здійснюватися, наприклад, за допомогою гідравлічного або пневматичного сервомотора. У цьому випадку отримують відповідно гідравлічну чи пневматичну муфту тертя з відповідним типом керування. Якщо ж частини муфти стискаються за допомогою електромеханічного перетворювача, то утворюється електромеханічна муфта тертя.

Електромеханічні муфти тертя з електромагнітним керуванням є найбільш поширеними, де для з'єднання обох половин муфти використовується електромагніт. Найшвидкодійні муфти тертя мають магнітоелектричне керування, при якому електричний сигнал перетворюється на переміщення і силу за допомогою магнітоелектричного перетворювача замість електромагніта.

На рисунку 2.6,а зображений елемент найпростіший нереверсивної муфти тертя з електромагнітним керуванням. Вона включає електромагніт, що складається з якоря 1, магнітопроводу 2 та обмотки 3. Струм підводиться до обмотки через два контактні кільця з щітками.

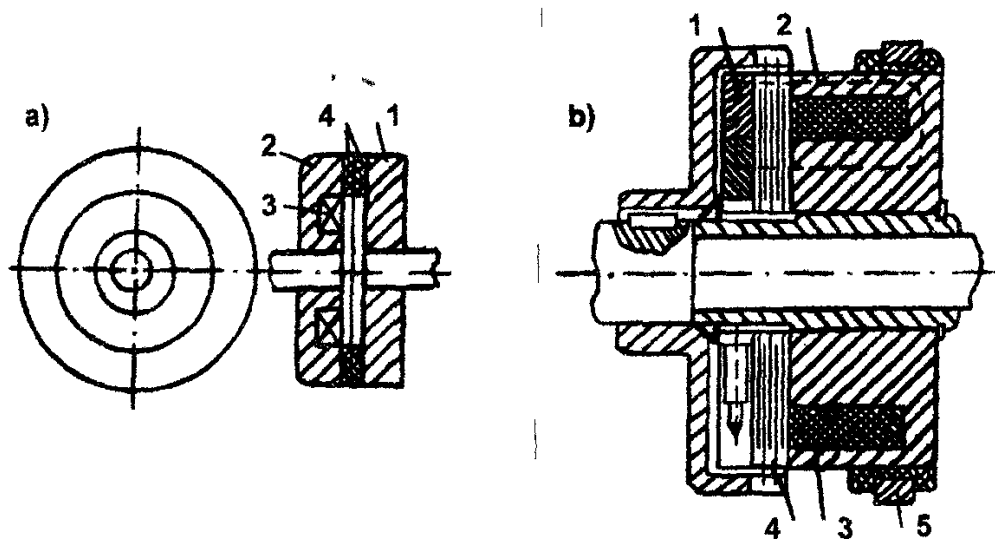


Рисунок 2.6 – Муфта тертя з електромагнітним керуванням: а – однодискова, б – багатодискова; 1 – якор, 2 – магнітопровід, 3 – обмотка, 4 – диски тертя, 5 – контактне кільце.

На магнітопроводі та якорі закріплені диски тертя 4. Якор може переміщуватись уздовж одного валу за допомогою шпонки, тоді як магнітопровід фіксовано закріплений на іншому валу. Якор відтягується від магнітопроводу завдяки поворотній пружині (яка на рисунку не показана). Тому, коли струм в обмотці відсутній, ведений вал залишається нерухомим. При подачі електричного сигналу на обмотку якор притягується до магнітопроводу, що спричиняє зчеплення валів.

Муфти тертя з електромагнітним керуванням можуть бути однодисковими (рисунок 2.6,а) або багатодисковими (рисунок 2.6,б). Багатодискові муфти використовуються для збільшення потужності при зменшенні їхніх розмірів.

На рисунку 2.7 представлений варіант муфти тертя з електромагнітним керуванням і нерухоною обмоткою. Ці муфти позбавлені ковзних контактів для підведення струму до обмотки і характеризуються високою швидкодією завдяки меншій постійній часу обмотки. Однак вони мають більші розміри обмотки через збільшений повітряний зазор.

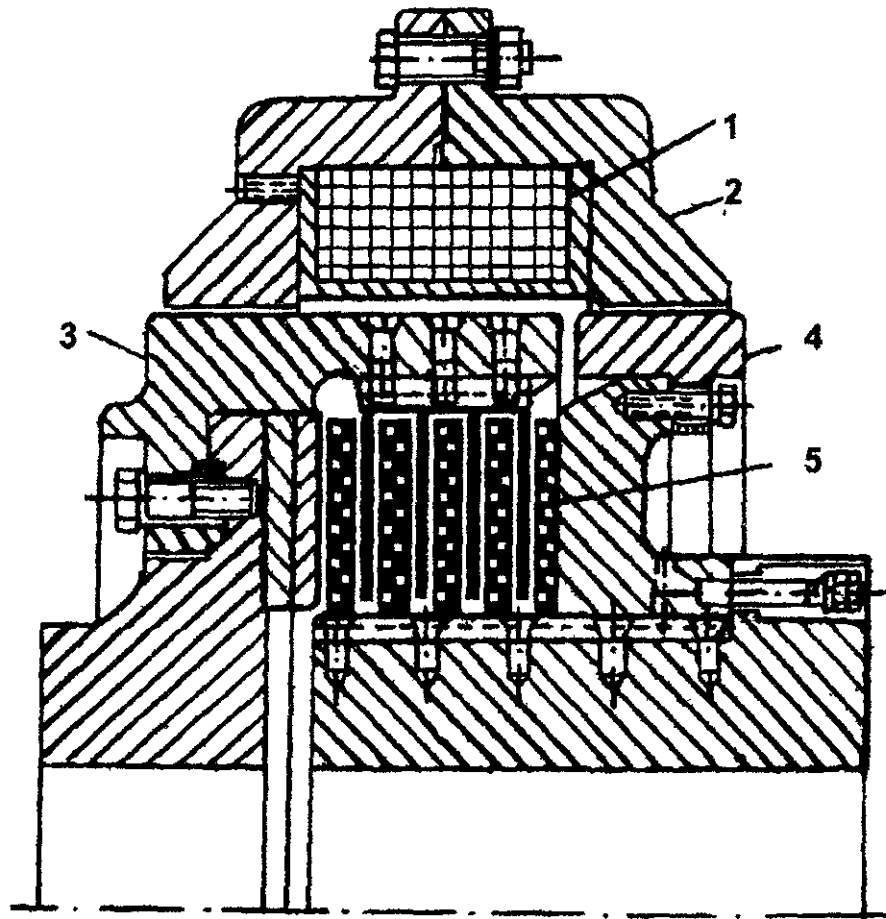


Рисунок 2.7 – Муфта тертя з електромагнітним керуванням і нерухоною обмоткою: 1 – обмотка, 2 – магнітопровід, 3 і 4 – напівмуфти, 5 – диски тертя.

У муфтах тертя з електромагнітним управлінням зазвичай використовують електромагніти постійного струму, оскільки вони мають значні переваги порівняно з електромагнітами змінного струму. У разі використання змінного струму в електромагніти постійного струму вбудовують випрямлячі.

Розрахунок муфти тертя з електромагнітним управлінням включає визначення площ тертя та розрахунок електромагніта. Вхідними даними є

обертаючий момент, який муфта повинна передавати, а також розміри муфти. Далі розглянемо алгоритм розрахунку муфти на прикладі дискової муфти.

Обертаючий момент, який передається муфтою

$$M = \frac{2\pi}{3} \cdot m \cdot p \cdot K_{TP} \cdot (1 - K_p^3) \cdot R_2^3, \quad (2.2)$$

де  $m$  — кількість поверхонь тертя, яка визначається числом дисків тертя;  $K_p = (R_1/R_2) \cdot K_{TP}$  — розрахункове співвідношення;  $K_{TP}$  — коефіцієнт тертя, що залежить від матеріалу дисків та стану їхніх поверхонь;  $R_1$  та  $R_2$  — внутрішній і зовнішній радіуси дисків тертя;  $p$  — тиск, під яким диски притискаються електромагнітом.

Визначивши зовнішній радіус дисків тертя  $R_2$ , можна обчислити кількість поверхонь тертя  $m$ , необхідних для передачі заданого обертаючого моменту  $M$ , або, знаючи  $m$ , знайти  $R_2$ .

Стискальне зусилля, яке створюється електромагнітом, визначається як

$$F_T = p \cdot \pi \cdot (R_2 - R_1) = p \cdot (1 - K_2) \cdot R_2. \quad (2.3)$$

Наступним етапом є розрахунок електромагніта. Для зменшення габаритів обмотки, що обмежуються допустимим рівнем нагріву, у потужних муфтах застосовують рідинне охолодження. У менш потужних муфтах охолодження забезпечується за рахунок використання ребер для покращення теплообміну.

Приблизні значення параметрів, які використовуються у формулах: коефіцієнт тертя  $K_{TP}$  для тертьових поверхонь зі сталі, чавуну, бронзи становить близько 0,1–0,2; для спеціальних фрикційних матеріалів, таких як ферродо, цей показник коливається від 0,4 до 0,8; відношення  $K_p$  приймається в межах 0,3–0,6; тиск  $p$  зазвичай становить від 2 ÷ 3 кг/см.

Розглянемо динаміку роботи електромеханічної муфти тертя. Перехідний процес від моменту подачі напруги на обмотку муфти, коли ведений вал ще нерухомий, до досягнення стабільної швидкості обертання веденого валу включає три етапи. Перший етап — від початку подачі

напруги до моменту контакту поверхонь тертя — є етапом активації електромагніта. Тривалість цього етапу відповідає часу спрацьовування електромагніта. Для його скорочення можна використовувати звичайні методи регулювання часових характеристик електромагнітів.

Другий етап завершується повним зчепленням поверхонь тертя, що означає припинення ковзання між веденим і ведучим валами. Проте перехідний процес не завершується на цьому етапі, оскільки зчеплення напівмуфт призводить до того, що двигун, який обертає ведучий вал і працював до цього вхолосту, починає передавати навантаження на ведений вал. Тому після другого етапу настає третій етап, який є перехідним процесом для приводного двигуна у відповідь на різкий стрибок навантаження.

Загальний час спрацьовування муфти з електромагнітним керуванням, який є сумою часу всіх трьох етапів перехідного процесу, вимірюється в сотих і десяткових частинах секунди.

Розглянуті муфти тертя використовуються переважно для надійного з'єднання валів. Однак за їх допомогою також можна забезпечити поступову зміну сталого значення швидкості веденого валу за допомогою імпульсного керування муфтою. У цьому випадку вхідний сигнал складається з імпульсів напруги, що подаються з постійною частотою. Під час імпульсу муфта спрацьовує, і ведений вал починає розганятися; під час пауз між імпульсами муфта розслабляється, і вал гальмується. У результаті швидкість веденого валу коливається навколо певного середнього значення з частотою, що відповідає частоті керуючих імпульсів.

Змінюючи скважність вихідних імпульсів, можна регулювати величину цього середнього значення.

#### *Ферропорошкові муфти тертя*

Головне призначення цих муфт — забезпечення гнучкого з'єднання валів, хоча вони також можуть використовуватися для жорсткого зчеплення.

Ферропорошкова муфта тертя відрізняється від муфти сухого тертя з електромагнітним управлінням тим, що повітряний зазор між напівмуфтами заповнений феромагнітним матеріалом. Ведена напівмуфта, як і ведуча, жорстко закріплена на своєму валу, тому зазор між ними залишається незмінним. Феромагнітний наповнювач є механічною сумішшю феромагнітного порошку (зазвичай залізного) і рідкого або твердого діелектрика. Як рідкий діелектрик часто використовують мастила, а як твердий – графітовий порошок або тальк.

Коли феромагнітний наповнювач поміщений у магнітне поле, окремі феромагнітні частинки починають зміщуватися і притягуються одна до одної, формуючи ланцюжки, що орієнтуються уздовж поля. Зі збільшенням магнітного поля рідкий наповнювач стає щільнішим, спочатку переходячи в желеподібний стан, а потім і зовсім твердне. Твердий наповнювач, у свою чергу, перетворюється з сипучого порошку на тверде тіло, що з'єднується силами магнітного поля.

Ця особливість феромагнітного наповнювача тверднути в магнітному полі використовується у ферропорошкових муфтах тертя. Коли на обмотку електромагніта не подається сигнал, момент, що передається з ведучого вала на ведений, є мінімальним і обумовлений початковою низькою в'язкістю феромагнітного наповнювача. При проходженні струму через обмотку електромагніта створюється магнітний потік, який призводить до збільшення в'язкості наповнювача. У результаті момент, переданий на ведений вал, збільшується. З ростом струму в обмотці обертаючий момент на веденому валу також зростає, доки не досягає максимального значення, що відповідає повному моменту ведучого вала. Це відбувається, коли обидві напівмуфти зчіплюються і утримуються затверділим наповнювачем.

Обертаючий момент на веденому валу, таким чином, визначається струмом в обмотці електромагніта і майже не залежить від швидкості обертання ведучого вала. На рисунку 2.8,а показана типовий графік статичної характеристики ферропорошкової муфти тертя «обертаючий момент на виході - вхідний сигнал». На рисунку 2.8,б представлено схематичне зображення ферропорошкової муфти тертя циліндричного типу. Такі муфти також можуть виготовлятися у вигляді дискових конструкцій, подібних до муфти сухого тертя, описаної раніше.

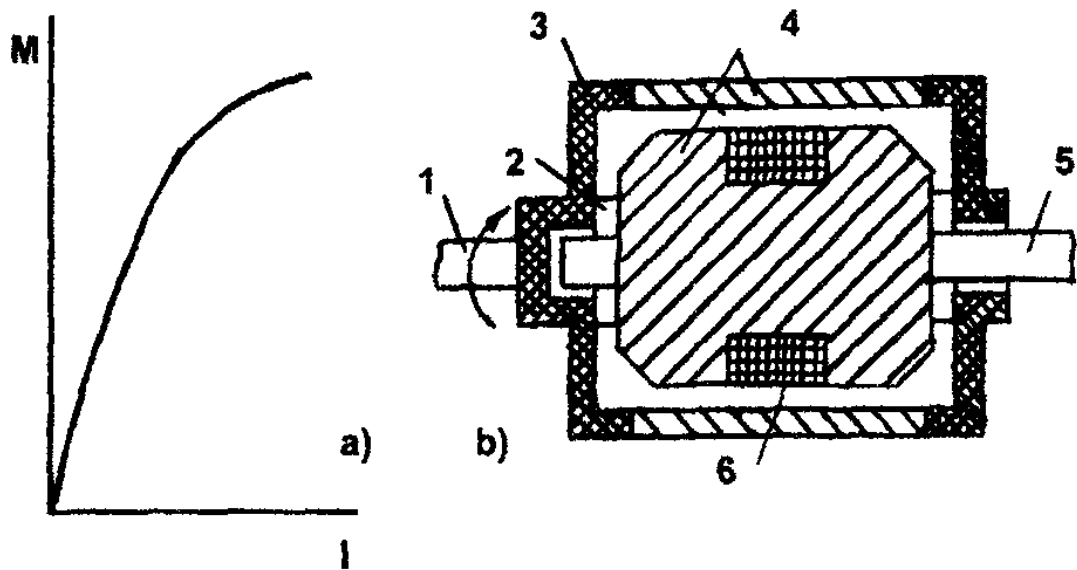


Рисунок 2.8 – Ферропорошкова муфта тертя: а – статична характеристика муфти; б – схематичне зображення муфти циліндричного типу (1 – ведучий вал, 2 – ущільнення, 3 – фланець з немагнітного матеріалу, 4 – деталі з феромагнітного матеріалу, 5 – ведений вал, 6 – обмотка).

Ферропорошкові муфти тертя мають складнішу конструкцію порівняно з муфтами сухого тертя. Основні труднощі пов'язані з необхідністю створення надійних ущільнень, які запобігають потраплянню порошку в підшипники (див. рис. 2.8,б), а також із запобіганням вивільнення феромагнітного порошку з наповнювача під дією відцентрової сили під час обертання муфти та через його осідання, коли муфта не працює.

Розглянемо динаміку ферропорошкових муфт. Оскільки у них відсутній рухомий якорь, як у муфтах сухого тертя, ферропорошкові муфти характеризуються високою швидкодією. Можна припустити, що обертаючий момент на веденому валу у перехідний період змінюється синхронно з магнітним потоком у зазорі, що означає, що інерційність процесу зміни в'язкості наповнювача можна ігнорувати. Миттєве значення магнітного поля, у свою чергу, залежить від струму в обмотці, тому характеристика  $M = f(I)$ , наведена на рис. 2.8,а, залишається дійсною й під час перехідного процесу. Передаточна функція ферропорошкової муфти тертя, яка зв'язує момент на веденому валу з напругою на обмотці, виглядає так:

$$W(p) = \frac{K_E \cdot K_M}{T_E \cdot T_M \cdot p^2 + (T_E + T_M) \cdot p + 1}, \quad (2.4)$$

де  $K_E = U / R$  — електромагнітний передаточний коефіцієнт муфти;  $U$  — напруга на обмотці муфти;  $R$  — опір обмотки муфти;  $K_M = \Delta M / \Delta I$  — електромеханічний передаточний коефіцієнт муфти, що визначається за її статичною характеристикою, показаною на рис. 2.8,а;  $T_E = L/R$  — електромагнітна постійна часу муфти;  $L$  — індуктивність обмотки муфти;  $T_M = \frac{J}{M_H} \cdot \omega_0 \cdot s_H$  — електромеханічна постійна часу муфти;  $J$  — момент інерції муфти;  $M_H$  — номінальний обертаючий момент муфти;  $\omega_0$  — кутова частота обертання ведучого вала муфти;  $s_H$  — номінальне ковзання муфти.

Рівняння передаточної функції ферропорошкової муфти тертя загалом є нелінійним. Нелінійність виникає через зміну значень передаточних коефіцієнтів і постійних часу муфти в залежності від робочої точки. По-перше, при врахуванні насичення магнітопроводу електромагнітна постійна часу  $T_E$  зменшується із збільшенням сигналу через зменшення індуктивності обмотки  $L$ . По-друге, наявність моменту опору навантаження  $M_C$  впливає на значення електромеханічного передаточного коефіцієнта  $K_M$  і електромеханічної постійної часу  $T_M$ . Залежність  $\omega = f(M_C)$  може бути також нелінійною функцією, що додає нелінійність до передаточної функції муфти.

Якщо розглядати невеликі відхилення вхідного сигналу  $U$  від його постійного значення, яке відповідає початковій стійкій швидкості обертання системи муфт-робоча машина, то передаточну функцію муфти можна спростити, лінеаризуючи її. У результаті отримуємо рівняння передаточної функції ферропорошкової муфти тертя в точці стійкого режиму, щодо якого аналізуються відхилення змінних. Це рівняння матиме вигляд аперіодичної ланки другого порядку. Коефіцієнти цієї ланки є змінними і визначаються за статичною характеристикою муфти для кожної робочої точки окремо.

Після аналізу характеристик різних муфт для використання в якості виконавчого механізму була обрана безконтактна електромагнітна порошкова муфта МПБ-40-2.

Передаточну функцію муфти можна отримати, підставивши відповідні параметри у рівняння (2.4).

$$W_{BM}(p) = \frac{1.6}{0.0004 \cdot p^2 + 0.085 \cdot p + 1} \quad (2.5)$$

Муфта показана на рисунку 2.9, а її розміри представлені на рисунку 2.10.



Рисунок 2.9 – Безконтактна електромагнітна порошкова муфта МПБ-40-2

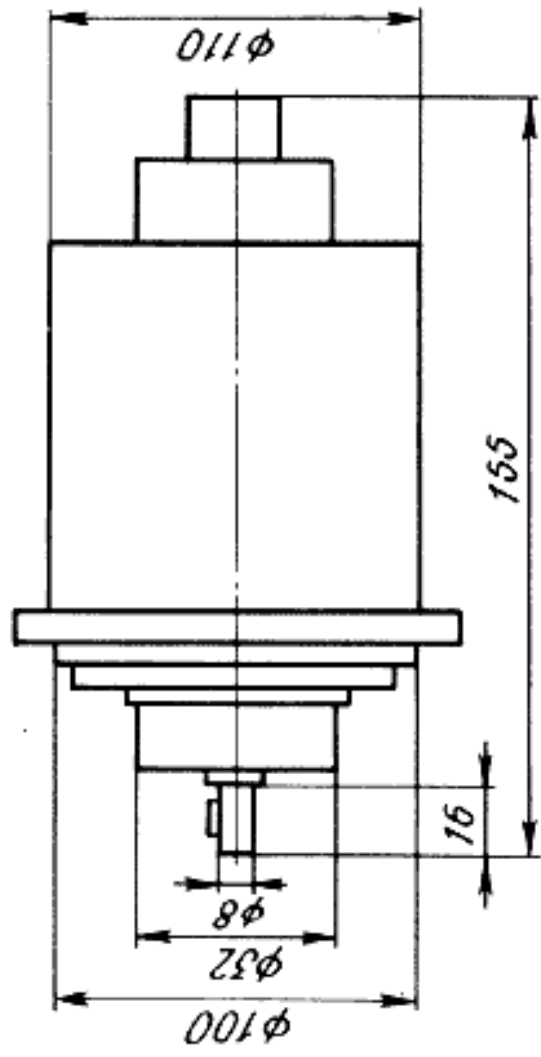
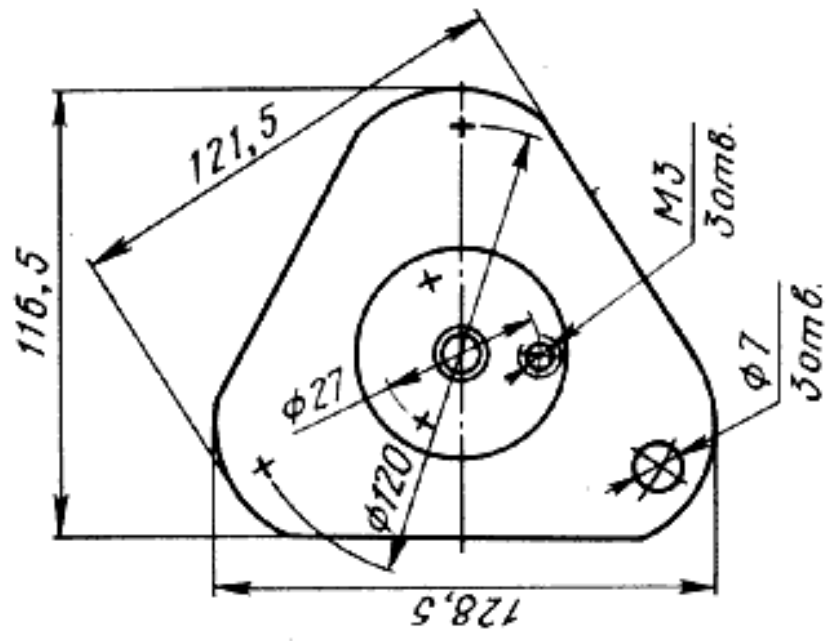


Рисунок 2.10 – Габаритні та монтажні розміри муфти електромагнітної порошкової безконтактної МПБ-40-2

### 2.3 Розробка системи стабілізації натягу полотна

Аналізуючи структурну схему системи автоматичного регулювання натягу полотна, наведену в підрозділі 2.1, можна представити її як систему стабілізації, перетворивши структуру у вигляд, показаний на рисунку 2.11.

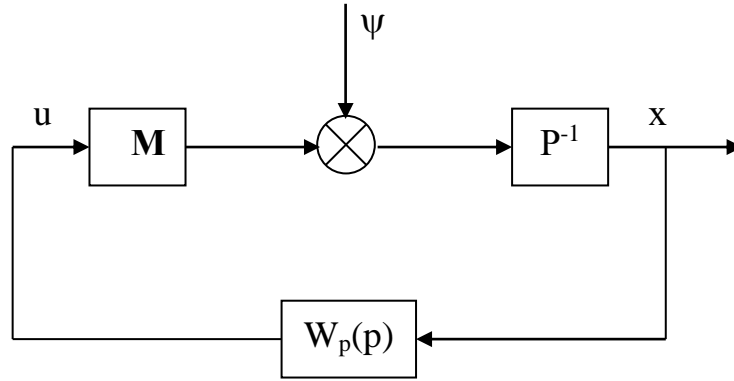


Рисунок 2.11 – Схема структури системи стабілізації

У цьому випадку рух об'єкта можна описати за допомогою лінійного диференційного рівняння з постійними коефіцієнтами

$$P(p)x(t) = M(p)u(t) + \psi(t). \quad (2.6)$$

Тут  $x(t)$  позначає координату об'єкта;  $u(t)$  – координату регулятора (управляюче діяння);  $\psi(t)$  – зовнішнє збурення, яке вважається стаціонарним випадковим процесом з нульовим математичним очікуванням і відомою спектральною щільністю.

$$S_{\psi}(\omega) = \frac{\Gamma_1(i\omega)\Gamma_1(-i\omega)}{\Gamma_0(i\omega)\Gamma_0(-i\omega)}; \quad (2.7)$$

$P(p)$  та  $M(p)$  – операторні поліноми від  $p = d/dt$ .

Потрібно знайти закон управління в системі зворотного зв'язку (скласти диференційне рівняння, що зв'язує  $u$  та  $x$ ), щоб забезпечити стійкість замкненої системи "об'єкт + регулятор" і оптимізацію для досягнення мінімуму квадратичного функціоналу

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle, \quad (2.8)$$

де  $r$  і  $c$  – вагові константи  $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$ , а дисперсія величин  $x$  і  $u$

Потрібно визначити рівняння регулятора

$$W_0(p)u = \tilde{W}(p)x \quad (2.9)$$

(операторні поліноми  $W_0(p)$  та  $\tilde{W}(p)$ ) повинні бути знайдені таким чином, щоб функціонал (2.8) мінімізувався для стійких замкнутих систем “об’єкт + регулятор”.

Рівняння регулятора отримуємо за методикою Ларіна. Синтез системи стабілізації здійснюється за допомогою середовища MatLab. Для зручності роботи з програмним середовищем замість оператора  $p$  використовуватимемо оператор  $s$ . Передаточна функція регулятора  $W(s)$  матиме наступний вигляд

$$W(s) = \frac{-rM(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + P(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}{c(s)P(-s)\Gamma_1(s)G^{-1}(-s) + M(s)\Gamma_0(s)B_-(s)}, \quad (2.10)$$

де  $B_-(s)$ ,  $G(-s)$ ,  $\Gamma_0(s)$  та  $\Gamma_1(s)$  визначаються формулами

$$B_0(s) + B_+(s) + B_-(s) = \frac{R(s)\Gamma_1(s)}{G(-s)Q(s)\Gamma_0(s)}, \quad (2.11)$$

$$R(s) = r\beta(s)M(-s) - c(s)\alpha(s)P(-s), \quad (2.12)$$

$$G(s)G(-s) = rM(s)M(-s) + c(s)P(s)P(-s), \quad (2.13)$$

$$Q(s) = \alpha(s)M(s) + \beta(s)P(s), \quad (2.14)$$

$$S_\psi(s) = \frac{\Gamma_1(s)\Gamma_1(-s)}{\Gamma_0(s)\Gamma_0(-s)}; \quad (2.15)$$

$\alpha(s)$  та  $\beta(s)$  вибираються довільно;

$\Gamma_0(s)$  та  $\Gamma_1(s)$  – поліноми, які мають нулі лише в лівій півплощині.

Спочатку потрібно привести структурну схему системи до вигляду, зображеного на рисунку 2.11. Це передбачає визначення поліномів  $P(s)$  і  $M(s)$ , а також спектральної щільності  $S_\psi(s)$ . Після підставлення знайдених передаточних функцій у вихідну структурну схему вона набуде вигляду, зображеного на рисунку 2.12.

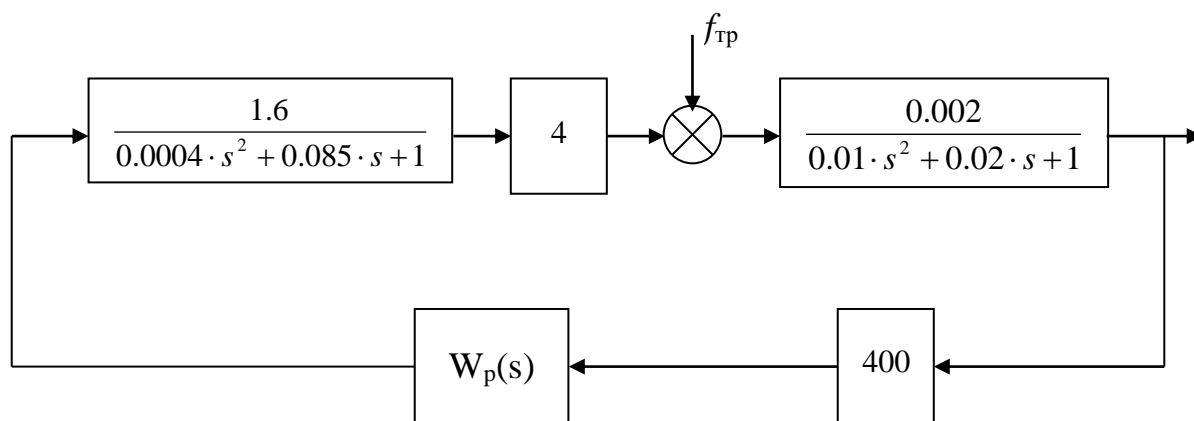


Рисунок 2.12 – Структурна схема системи

Після виконання потрібних перетворень ми отримуємо:

$$P(s) = 5 \cdot 10^{-6}(s + 200)(s + 12.5)(s^2 + 2s + 100); \quad (2.16)$$

$$M(s) = 6.4; \quad (2.17)$$

І після проведення факторизації  $S\psi(s)$  ми отримуємо:

$$\Gamma_1(s) = 1.721 \cdot 10^{-6}(s + 200)(s + 12.5)(s + 2.873)(s^2 + 2s + 100); \quad (2.18)$$

$$\Gamma_0(s) = s^2 + 0.3591s + 8.252. \quad (2.19)$$

Передаточну функцію  $W(s)$  регулятора будемо знаходити при вагових коефіцієнтах функціоналу  $r = 1$ , а значення  $s$  будуть обиратися як 0.1, 0.3, 1 і 10.

Визначаємо передаточну функцію  $W(s)$  регулятора для першого випадку, коли  $r = 1$  та  $s = 0.1$ . Розрахунки проводимо у середовищі MatLab. Встановлюємо значення  $\alpha = 0$ ,  $\beta = 1$ , після чого, використовуючи формули (2.10-15), проводимо необхідні обчислення.

```
>> s=zpk('s');
>> M=6.4*s^0;
>> M_=6.4*s^0;
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> P_=5e-6*(-s+200)*(-s+12.5)*(s^2-2*s+100);
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
>> a=0;b=1;
>> Q=a*M+b*P
```

```
Zero/pole/gain:
5e-006 (s+200) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)
```

```
>> c=0.1;r=1;
```

>> GG\_r=M\*M\_c\*P\*P\_

Zero/pole/gain:

2.5e-012 (s-200) (s+200) (s-37.1) (s+37.1) (s^2 - 36.26s + 1364) (s^2 + 36.26s + 1364)

>> sqrt(2.5e-12)

ans =

1.5811e-006

>> G\_=1.5811e-006\*(s-200)\*(s-37.1)\*(s^2-36.26\*s+1364)

Zero/pole/gain:

1.5811e-006 (s-200) (s-37.1) (s^2 - 36.26s + 1364)

>> R=r\*b\*M\_c\*a\*P\_

Zero/pole/gain:

6.4

>> B=R\*g1/(G\_\*Q\*g0)

Zero/pole/gain:

1857946998.9248 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s-200) (s+200) (s-37.1) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)  
(s^2 - 36.26s + 1364)

>> [B0,B\_]=SRWN(B)

Zero/pole/gain:

207.6341 (s+2.083) (s+12.5) (s+200) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s+200) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)

Zero/pole/gain:

-207.6341 (s-200) (s^2 - 70.06s + 2778)

-----  
(s-200) (s-37.1) (s^2 - 36.26s + 1364)

>> B\_=-207.6341\*(s^2-70.06\*s+2778)/((s-37.1)\*(s^2-36.26\*s+1364))

Zero/pole/gain:

-207.6341 (s^2 - 70.06s + 2778)

-----  
(s-37.1) (s^2 - 36.26s + 1364)

>> W=(-M\_\*g1/G\_+P\*g0\*B\_)/(c\*P\_\*g1/G\_+M\*g0\*B\_)

Zero/pole/gain:

-3.5761 (s+200) (s-200)^2 (s-37.1)^4 (s+12.5) (s+2.083) (s^2 + 2s + 100)  
(s^2 - 36.26s + 1364)^4

```

-----
(s-200)^2 (s+200) (s-37.1)^4 (s^2 + 0.3683s + 8.275) (s^2 - 36.26s + 1364)^4
(s^2 + 73.86s + 3136)
>> W=-3.5761*(s+12.5)*(s+2.083)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.3683*s+8.275)*(s^2+73.86*s+3136))

```

```

Zero/pole/gain:
-3.5761 (s+12.5) (s+2.083) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.3683s + 8.275) (s^2 + 73.86s + 3136)

```

Таким чином, ми визначили передаточну функцію регулятора для випадку, коли  $r = 1$  і  $c = 0.1$

$$W_{P(0.1)}(s) = \frac{-3.5761(s+12.5)(s+2.083)(s^2+2s+100)}{(s^2+0.3683s+8.275)(s^2+73.86s+3136)} \quad (2.20)$$

Знаходимо передаточну функцію  $W(s)$  регулятора для другого випадку, коли  $r = 1$  і  $c = 0.3$ .

```

>> s=zpk('s');
>> M=6.4*s^0;
>> M_=6.4*s^0;
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> P_=5e-6*(-s+200)*(-s+12.5)*(s^2-2*s+100);
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
>> a=0;b=1;
>> Q=a*M+b*P

```

```

Zero/pole/gain:
5e-006 (s+200) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)

```

```

>> c=0.1;r=1;
>> GG_=r*M*M_+c*P*P_

```

```

Zero/pole/gain:
7.5e-012 (s-200) (s+200) (s+30.83) (s-30.83) (s^2 + 30.11s + 948.3) (s^2 - 30.11s + 948.3)

```

```

>> sqrt(7.5e-012)

```

```

ans =
2.7386e-006

```

```

>> G_=2.7386e-6*(s-200)*(s-30.83)*(s^2-30.11*s+948.3)

```

```

Zero/pole/gain:
2.7386e-006 (s-200) (s-30.83) (s^2 - 30.11s + 948.3)

```

```

>> R=r*b*M_-c*a*P_

```

```

Zero/pole/gain:
6.4

```

```

>> B=R*g1/(G_*Q*g0)

```

Zero/pole/gain:

```
1072664865.2596 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s-200) (s+200) (s-30.83) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100) (s^2 - 30.11s + 948.3)
>> [B0,B_]=SRWN(B)
```

Zero/pole/gain:

```
211.2211 (s+1.959) (s+12.5) (s+200) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s+200) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)
```

Zero/pole/gain:

```
-211.2211 (s-200) (s^2 - 58.49s + 1891)
-----
(s-200) (s-30.83) (s^2 - 30.11s + 948.3)
```

```
>> B_=-211.2211*(s^2-58.49*s+1891)/((s-30.83)*(s^2-30.11*s+948.3))
```

Zero/pole/gain:

```
-211.2211 (s^2 - 58.49s + 1891)
-----
(s-30.83) (s^2 - 30.11s + 948.3)
```

```
>> W=(-M_*g1/G_+P*g0*B_)/(c*P_*g1/G_+M*g0*B_)
```

Zero/pole/gain:

```
-2.1(s+200) (s-200)^4 (s-30.83)^4 (s+12.5) (s+1.959) (s^2 + 2s + 100) (s^2 - 30.11s + 948.3)^4
-----
(s-200)^4 (s+200) (s-30.83)^4 (s^2 + 0.3824s + 8.309) (s^2 - 30.11s + 948.3)^4
(s^2 + 62.32s + 2174)
```

```
>> W=-2.1*(s+12.5)*(s+1.959)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.3824*s+8.309)*(s^2+62.32*s+2174))
```

Zero/pole/gain:

```
-2.1 (s+12.5) (s+1.959) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.3824s + 8.309) (s^2 + 62.32s + 2174)
```

Отже отримали передаточну функцію регулятора при  $r = 1$  та  $c = 0.3$

$$W_{P(0.3)}(s) = \frac{-2.1(s+12.5)(s+1.959)(s^2+2s+100)}{(s^2+0.3824s+8.309)(s^2+62.32s+2174)}. \quad (2.21)$$

Знайдемо передаточну функцію  $W(s)$  регулятора для другого випадку, коли  $r = 1$  і  $c = 1$ .

```
>> s=zpk('s');
>> M=6.4*s^0;
>> M_=6.4*s^0;
```

```

>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> P_=5e-6*(-s+200)*(-s+12.5)*(s^2-2*s+100);
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
>> a=0;b=1;
>> Q=a*M+b*P
Zero/pole/gain:
5e-006 (s+200) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)

>> c=1;r=1;
>> GG_=r*M*M_+c*P*P_

Zero/pole/gain:
2.5e-011 (s-200) (s+200) (s+25.24) (s-25.24) (s^2 + 24.39s + 635.8) (s^2 - 24.39s + 635.8)

>> G_=5e-6*(-s+200)*(-s+25.24)*(s^2-24.39*s+635.8)

Zero/pole/gain:
5e-006 (s-200) (s-25.24) (s^2 - 24.39s + 635.8)

>> R=r*b*M_-c*a*P_

Zero/pole/gain:
6.4

>> B=R*g1/(G_*Q*g0)

Zero/pole/gain:

587520000 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s-200) (s+200) (s-25.24) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)
(s^2 - 24.39s + 635.8)

>> [B0,B_]=SRWN(B)

Zero/pole/gain:
215.3137 (s+1.805) (s+12.5) (s+200) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s+200) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)

Zero/pole/gain:
-215.3137 (s-200) (s^2 - 47.75s + 1237)
-----
(s-200) (s-25.24) (s^2 - 24.39s + 635.8)

>> B_=-215.3137*(s^2-47.75*s+1237)/((s-25.24)*(s^2-24.39*s+635.8))

Zero/pole/gain:
-215.3137 (s^2 - 47.75s + 1237)
-----
(s-25.24) (s^2 - 24.39s + 635.8)

>> W=(-M_*g1/G_+P*g0*B_)/(c*P_*g1/G_+M*g0*B_)

Zero/pole/gain:

```

$$\begin{aligned}
& -1.1727 (s-200)^2 (s+200) (s-25.24)^4 (s+12.5) (s+1.805) \\
& \frac{(s^2 + 2s + 100) (s^2 - 24.39s + 635.8)^4}{(s-200)^2 (s+200) (s-25.24)^4 (s^2 + 0.4238s + 8.404) (s^2 - 24.39s + 635.8)^4} \\
& \frac{(s^2 + 51.48s + 1452)}{>> W=-1.1727*(s+1.805)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.4238*s+8.404)*(s^2+51.48*s+1452))}
\end{aligned}$$

Zero/pole/gain:

$$\begin{aligned}
& -1.1727 (s+1.805) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100) \\
& \frac{(s^2 + 0.4238s + 8.404) (s^2 + 51.48s + 1452)}{>> W=-1.1727*(s+1.805)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.4238*s+8.404)*(s^2+51.48*s+1452))}
\end{aligned}$$

Таким чином, ми отримали передаточну функцію регулятора для випадку, коли  $r = 1$  і  $c = 1$

$$W_{P(1)}(s) = \frac{-1.1727(s+12.5)(s+1.805)(s^2 + 2s + 100)}{(s^2 + 0.4238s + 8.404)(s^2 + 51.48s + 1452)}. \quad (2.22)$$

Визначаємо передаточну функцію  $W(s)$  регулятора для другого випадку, де  $r = 1$  і  $c = 10$ .

```

>> s=zpk('s');
>> M=6.4*s^0;
>> M_=6.4*s^0;
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> P_=5e-6*(-s+200)*(-s+12.5)*(s^2-2*s+100);
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
>> a=0;b=1;
>> Q=a*M+b*P

```

Zero/pole/gain:

$$5e-006 (s+200) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)$$

```

>> c=0.1;r=1;
>> GG_=r*M*M_+c*P*P_

```

Zero/pole/gain:

$$2.5e-010 (s+200) (s-200) (s-17.62) (s+17.62) (s^2 - 15.53s + 295.8) (s^2 + 15.53s + 295.8)$$

```

>> sqrt(2.5e-10)

```

```

ans =
1.5811e-005

```

```

>> G_=1.5811e-005*(s-200)*(s-17.62)*(s^2-15.53*s+295.8)

```

Zero/pole/gain:

$$1.5811e-005 (s-200) (s-17.62) (s^2 - 15.53s + 295.8)$$

```

>> R=r*b*M_-c*a*P_

```

Zero/pole/gain:  
6.4

>> B=R\*g1/(G\_\*Q\*g0)

Zero/pole/gain:

185794699.8925 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)

-----  
(s-200) (s+200) (s-17.62) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)

(s^2 - 15.53s + 295.8)

>> [B0,B\_]=SRWN(B)

Zero/pole/gain:

218.9373 (s+1.476) (s+200) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)

-----  
(s+200) (s+12.5) (s^2 + 0.3591s + 8.252) (s^2 + 2s + 100)

Zero/pole/gain:

-218.9373 (s-200) (s^2 - 31.91s + 544.9)

-----  
(s-200) (s-17.62) (s^2 - 15.53s + 295.8)

>> B\_=-218.9373\*(s^2-31.91\*s+544.9)/((s-17.62)\*(s^2-15.53\*s+295.8))

Zero/pole/gain:

-218.9373 (s^2 - 31.91s + 544.9)

-----  
(s-17.62) (s^2 - 15.53s + 295.8)

>> W=(-M\_\*g1/G\_+P\*g0\*B\_)/(c\*P\_\*g1/G\_+M\*g0\*B\_)

Zero/pole/gain:

-0.37708 (s-200)^2 (s+200) (s-17.62)^4 (s+12.5) (s+1.476) (s^2 + 2s + 100)

(s^2 - 15.53s + 295.8)^4

-----  
(s-200)^2 (s+200) (s-17.62)^4 (s^2 + 0.8141s + 9.242) (s^2 - 15.53s + 295.8)^4

(s^2 + 35.03s + 656.2)

>> W=-0.37708\*(s+1.476)\*(s+12.5)\*(s^2+2\*s+100)/((s^2+0.8141\*s+9.242)\*(s^2+35.03\*s+656.2))

Zero/pole/gain:

-0.37708 (s+1.476) (s+12.5) (s^2 + 2s + 100)

-----  
(s^2 + 0.8141s + 9.242) (s^2 + 35.03s + 656.2)

Таким чином, ми отримали передаточну функцію регулятора для випадку, коли  $r = 1$  і  $c = 10$

$$W_{P(10)}(s) = \frac{-0.37708(s+12.5)(s+1.476)(s^2+2s+100)}{(s^2+0.8141s+9.242)(s^2+35.03s+656.2)}. \quad (2.23)$$

## 2.4 Оцінка ефективності розв'язання задачі регулювання

Оцінка якості системи автоматичного регулювання здійснюється за допомогою значення квадратичного функціоналу (2.8)

$$J = r\langle x^2 \rangle + c\langle u^2 \rangle,$$

де  $r$  і  $c$  — вагові константи, а  $\langle x^2 \rangle, \langle u^2 \rangle$  дисперсія значень  $x$  та  $u$ .

Потрібно з'ясувати, при яких значеннях вагових констант  $r$  і  $c$  функціонал досягатиме мінімуму.

Використовуючи формули (2.6 – 2.9), визначимо передаточні функції, що зв'язують координати системи з зовнішніми впливами:

$$\left. \begin{aligned} x(s) &= F_x(s)\psi(s) = \frac{1}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= F_u(s)\psi(s) = \frac{W(s)}{P(s) - M(s)W(s)}\psi(s), \\ u(s) &= W(s)x(s) = F_u(s)F_x^{-1}(s)x(s), \end{aligned} \right\} \quad (2.24)$$

де  $W(s) = W_0^{-1}(s)\tilde{W}(s)$  Оскільки замкнена система повинна залишатися стійкою та функції  $F_x(s)$  і  $F_u(s)$  повинні бути фізично здійсненними (не мати полюсів у правій півплощині комплексної площини), скориставшись перетворенням Фур'є (підставивши  $s = i\omega$ ), функціонал (2.8) можна представити у вигляді

$$J = \frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} [rF_x(s)F_x(-s)S_\psi(s) + cF_u(s)F_u(-s)S_\psi(s)] ds. \quad (2.25)$$

Щоб знайти функціонал, спочатку потрібно визначити функції  $F_x(s)$  та  $F_u(s)$  для значень  $c = 0.1; 0.3; 1; 10$ . Потім, використовуючи функцію `norm` в середовищі MatLab, слід обчислити функціонал.

$$\text{norm}\left(F(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) = \sqrt{\frac{1}{i} \int_{-i\infty}^{i\infty} F(s)F(-s)S_\psi(s)ds} \quad (2.26)$$

$$J = r \cdot \left( \text{norm}\left(F_x(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 + c \cdot \left( \text{norm}\left(F_u(s) \cdot \frac{\Gamma_1(s)}{\Gamma_0(s)}\right) \right)^2 \quad (2.27)$$

Обчислюємо функціонал для значення  $c = 0.1$ .

```
>> s=zpk('s');
>> c=0.1;r=1;
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
>> S=g1/g0

Zero/pole/gain:
1.721e-006 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.3591s + 8.252)

>> M=6.4*s^0;
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> W=-3.5761*(s+12.5)*(s+2.083)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.3683*s+8.275)*(s^2+73.86*s+3136))

Zero/pole/gain:
-3.5761 (s+12.5) (s+2.083) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.3683s + 8.275) (s^2 + 73.86s + 3136)

>> Fx=1/(P-M*W)

Zero/pole/gain:
200000 (s^2 + 0.3683s + 8.275) (s^2 + 73.86s + 3136)
-----
(s+200) (s+37.1) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100) (s^2 + 36.26s + 1364)

>> Fu=W/(P-M*W)

Zero/pole/gain:
-715220 (s+2.083)
-----
(s+2.873) (s+37.1) (s+200) (s^2 + 36.26s + 1364)

>> stdx=norm(Fx*S)

stdx =
0.0810

>> stdu=norm(Fu*S)

stdu =
0.1249

>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

J =  
0.0121

Функціонал J дорівнює 0.0121, а середньоквадратичні відхилення складають  $\sigma_x = 0.081$ ,  $\sigma_u = 0.1249$ .

Знаходимо функціонал при  $c = 0.3$ .

```
>> s=zpk('s');  
>> c=0.3;r=1;  
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);  
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;  
>> S=g1/g0
```

```
Zero/pole/gain:  
1.721e-006 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s^2 + 0.3591s + 8.252)
```

```
>> M=6.4*s^0;  
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);  
>> W=-2.1*(s+12.5)*(s+1.959)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.3824*s+8.309)*(s^2+62.32*s+2174))
```

```
Zero/pole/gain:  
-2.1 (s+12.5) (s+1.959) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s^2 + 0.3824s + 8.309) (s^2 + 62.32s + 2174)
```

```
>> Fx=1/(P-M*W)
```

```
Zero/pole/gain:  
200000 (s^2 + 0.3824s + 8.309) (s^2 + 62.32s + 2174)  
-----  
(s+200) (s+30.83) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100) (s^2 + 30.11s + 948.3)
```

```
>> Fu=W/(P-M*W)
```

```
Zero/pole/gain:  
-420080 (s+1.959)  
-----  
(s+2.873) (s+30.83) (s+200) (s^2 + 30.11s + 948.3)
```

```
>> stdx=norm(Fx*S)
```

```
stdx =  
0.0890
```

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

```
stdu =  
0.0858
```

```
>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

J =  
0.0101

Функціонал дорівнює  $J = 0.0101$ , а середньоквадратичне відхилення складає  $\sigma_x = 0.089$ ,  $\sigma_u = 0.0858$ .

Знаходимо функціонал при значенні  $c = 1$ .

```
>> s=zpk('s');  
>> c=1;r=1;  
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);  
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;  
>> S=g1/g0
```

```
Zero/pole/gain:  
1.721e-006 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s^2 + 0.3591s + 8.252)
```

```
>> M=6.4*s^0;  
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);  
>> W=-1.1727*(s+12.5)*(s+1.805)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.4238*s+8.404)*(s^2+51.48*s+1452))
```

```
Zero/pole/gain:  
-1.1727 (s+12.5) (s+1.805) (s^2 + 2s + 100)  
-----  
(s^2 + 0.4238s + 8.404) (s^2 + 51.48s + 1452)
```

```
Zero/pole/gain:  
200000 (s^2 + 0.4238s + 8.404) (s^2 + 51.48s + 1452)  
-----  
(s+200) (s+25.24) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100) (s^2 + 24.39s + 635.8)
```

```
>> Fu=W/(P-M*W)
```

```
Zero/pole/gain:  
-234540 (s+1.805)  
-----  
(s+2.873) (s+25.24) (s+200) (s^2 + 24.39s + 635.8)
```

```
>> stdx=norm(Fx*S)
```

```
stdx =  
0.0989
```

```
>> stdu=norm(Fu*S)
```

```
stdu =  
0.0615
```

```
>> J=r*stdx^2+c*stdu^2
```

```
J =  
0.0136
```

Функціонал  $J$  дорівнює 0.0136, а середньоквадратичне відхилення для  $\sigma_x$  становить 0.0989, для  $\sigma_u = 0.0615$ .

Обчислюємо функціонал при  $c = 10$ .

```
>> s=zpk('s');
>> c=10;r=1;
>> g1=1.721e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s+2.873)*(s^2+2*s+100);
>> g0=s^2+0.3591*s+8.252;
Zero/pole/gain:
1.721e-006 (s+200) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.3591s + 8.252)

>> M=6.4*s^0;
>> P=5e-6*(s+200)*(s+12.5)*(s^2+2*s+100);
>> W=-0.37708*(s+12.5)*(s+1.476)*(s^2+2*s+100)/((s^2+0.8141*s+9.242)*(s^2+35.03*s+656.2))
Zero/pole/gain:
-0.37708 (s+12.5) (s+1.476) (s^2 + 2s + 100)
-----
(s^2 + 0.8141s + 9.242) (s^2 + 35.03s + 656.2)

Zero/pole/gain:
200000 (s^2 + 0.8141s + 9.242) (s^2 + 35.03s + 656.2)
-----
(s+200) (s+17.62) (s+12.5) (s+2.873) (s^2 + 2s + 100) (s^2 + 15.53s + 295.8)

>> Fu=W/(P-M*W)

Zero/pole/gain:
-75416(s+1.476)
-----
(s+2.873) (s+17.62) (s+200) (s^2 + 15.53s + 295.8)

>> stdx=norm(Fx*S)

stdx =
0.1255

>> stdu=norm(Fu*S)

stdu =
0.0421

>> J=r*stdx^2+c*stdu^2

J =
0.0335
Функціонал  $J$  дорівнює 0.0335, а середньоквадратичні відхилення складають  $\sigma_x = 0.1255$  та  $\sigma_u = 0.0421$ 
```

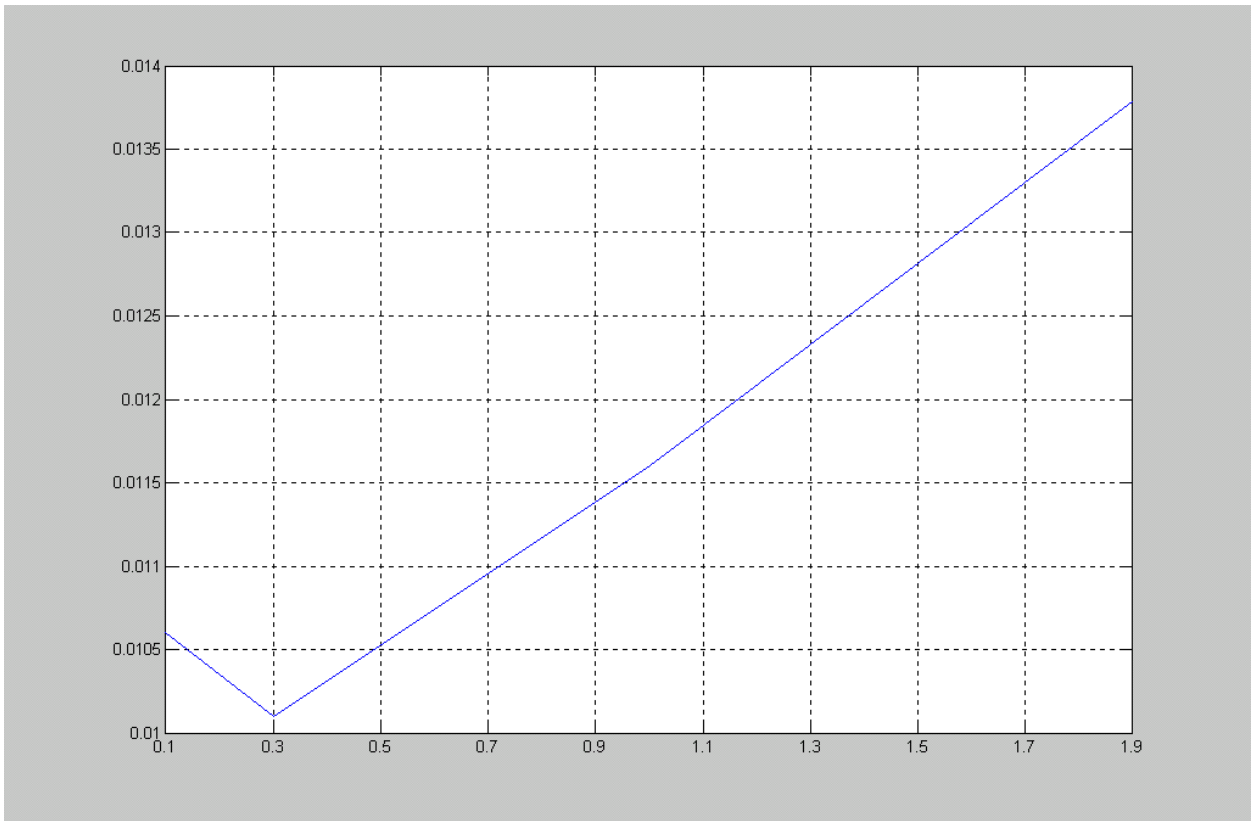


Рисунок 2.13 – Графік залежності функціоналу J від значення  $c$

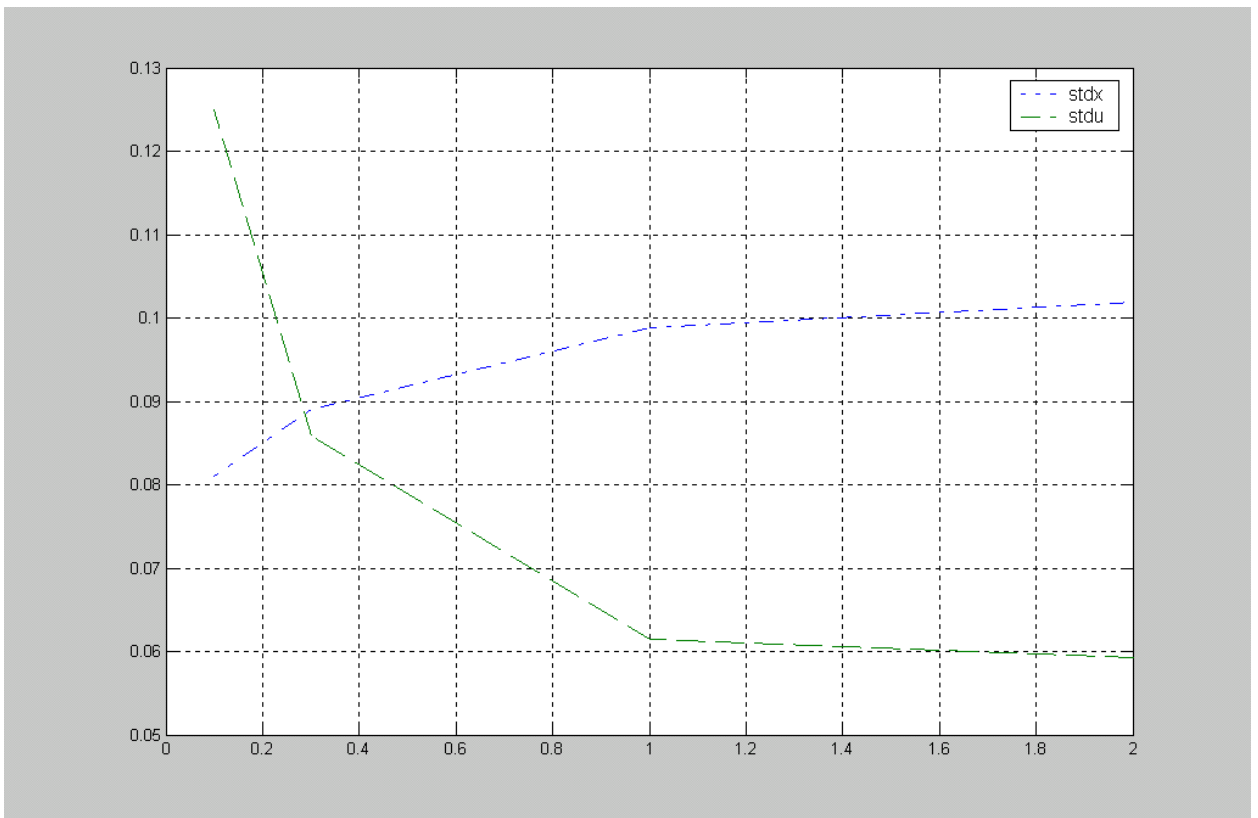


Рисунок 2.14 – Графік залежності середньоквадратичного відхилення  $\sigma_x$  та  $\sigma_u$  від значення  $c$

За результатами дослідження якості регулювання встановлено, що функціонал мінімізується і дорівнює  $J = 0.0101$  при ваговій константі  $c = 0.3$ . У цьому випадку середньоквадратичне відхилення вихідної координати системи складає  $\sigma_x = 0.089$ , а координати регулятора –  $\sigma_u = 0.0858$ . Таким чином, передаточна функція регулятора буде мати наступний вигляд

$$W_P(s) = \frac{-2.1004(s+12.5)(s+1.959)(s^2+2s+100)}{(s^2+0.3824s+8.309)(s^2+62.32s+2174)} \quad (2.28)$$

Щоб знайти середньоквадратичне відхилення вихідної координати об'єкта регулювання за структурною схемою, показаною на рисунку 2.12, потрібно середньоквадратичне відхилення вихідної координати системи розділити на передаточну функцію датчика (2.1).

$$\sigma_x = 0.089/400 = 0.22 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

З урахуванням того, що середньоквадратичне відхилення експлуатаційних впливів, визначене в підрозділі 1.3, дорівнює  $\sigma_f = 3.514 \cdot 10^{-3}$  м, знайдемо відношення  $\sigma_f/\sigma_x$

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_x} = \frac{3.514 \cdot 10^{-3}}{0.22 \cdot 10^{-3}} = 15.97 \text{ .}$$

Таким чином, завдяки системі автоматичного регулювання впливи експлуатаційного середовища на вихідну координату об'єкта зменшилися майже в 16 разів. Цей рівень регулювання повністю відповідає початковим вимогам.

### 3 Моделювання функціонування системи автоматичного регулювання натягу паперу при зміні умов експлуатації

#### 3.1 Створення моделі в середовищі MatLab

Виходячи зі структурної схеми, показаної на рисунку 2.12, за допомогою пакету Simulink буде створена модель системи автоматичного регулювання натягу паперу. У Simulink об'єкти системи задаються за допомогою коефіцієнтів поліномів чисельника та знаменника передаточної функції. Тому потрібно подати всі об'єкти у вигляді поліномів.

Передаточну функцію об'єкта регулювання можна подати у вигляді двох ланок, з'єднаних послідовно  $W_{1/r}(s) = 4$  та  $W_{op}(s) = \frac{0.002}{0.01s^2 + 0.02s + 1}$ .

Передаточна функція виконавчого механізму (муфти)

$$W_{em}(s) = \frac{1.6}{0.0004s^2 + 0.085s + 1}$$

Передаточна функція датчика  $W_d(s) = 400$ .

Передаточна функція регулятора

$$W_p(s) = \frac{-2.1s^4 - 34.57s^3 - 322.2s^2 - 3140s - 5143}{s^4 + 62.7s^3 + 2206s^2 + 1349s + 18060}$$

Згідно з отриманою спектральною щільністю експлуатаційних впливів на виході об'єкта регулювання (1.7), потрібно здійснити моделювання цих впливів. Для цього необхідно провести факторизацію, в результаті чого буде отримано

$$S_e(s) = \frac{0.86 * 10^{-3} s + 2.47 * 10^{-3}}{s^2 + 0.3591s + 8.252} \cdot \frac{-0.86 * 10^{-3} s + 2.47 * 10^{-3}}{s^2 - 0.3591s + 8.252}$$

Для моделювання експлуатаційних впливів буде використано генератор білого шуму, сигнал якого буде пропущений через елемент з передаточною функцією  $W_e(s) = \frac{0.86 * 10^{-3} s + 2.47 * 10^{-3}}{s^2 + 0.3591s + 8.252}$ . Цей сигнал буде поданий на вихід об'єкта регулювання.

Параметри генератора білого шуму встановлюються наступним чином: енергія шуму дорівнює 1, а крок дискретизації складає 0.001 с. Змодельований експлуатаційний вплив виглядатиме так, як показано на рисунку 3.1.

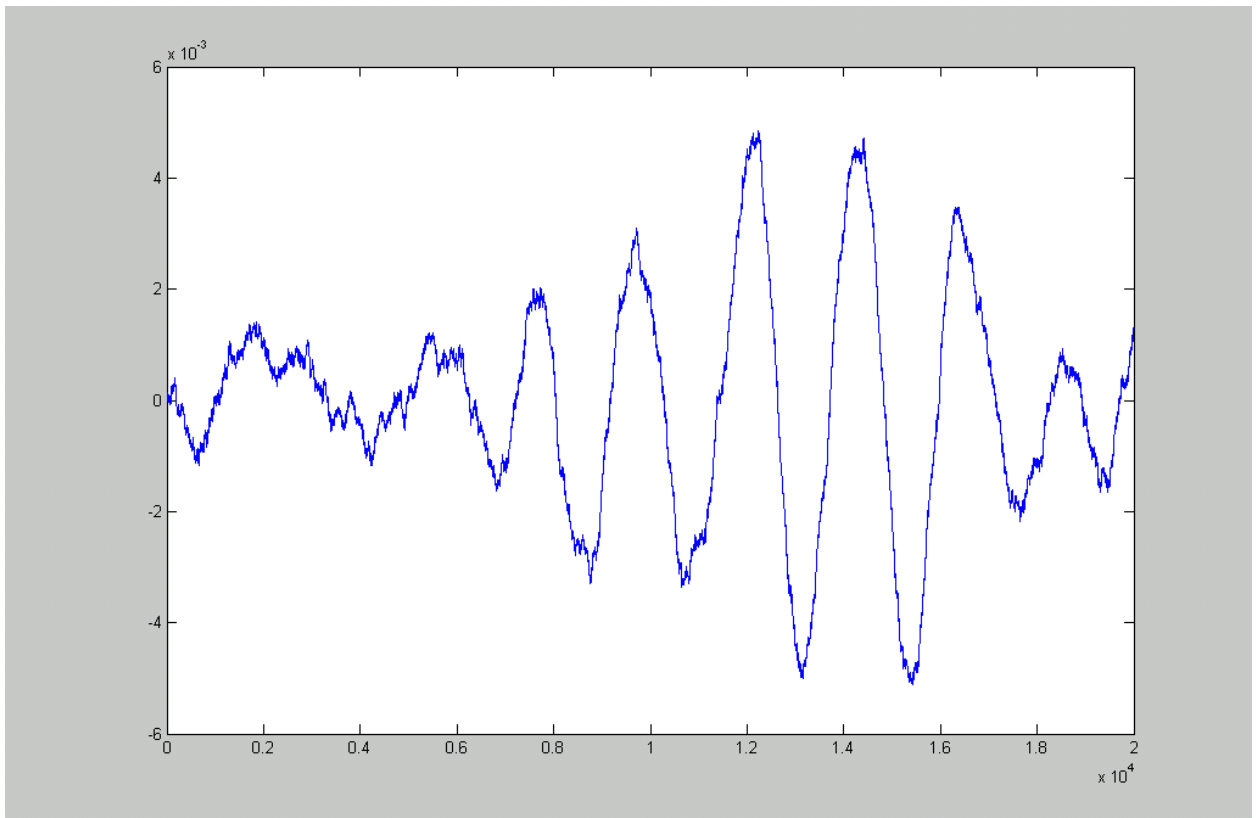
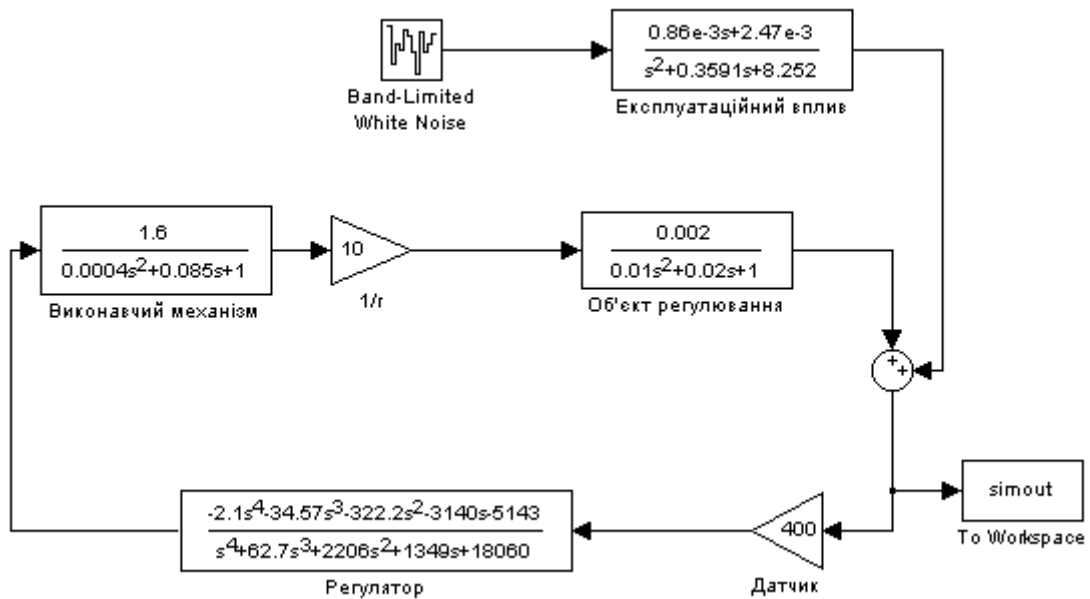


Рисунок 3.1 – Модель впливів експлуатаційного середовища за період часу  $t = 20$  с

Вихідний сигнал буде зчитуватись з виходу об'єкта регулювання та записуватись у вигляді масиву даних у робочу область MatLab. Потім за допомогою функції `std` буде обчислюватись середньоквадратичне відхилення положення коливного валу.

На рисунку 3.2 зображена модель системи автоматичного регулювання натягу полотна.



Модель системи автоматичного регулювання зображена на рисунку 3.2.

### 3.2 Оцінка впливу радіуса вала розмотки на ефективність роботи системи

Оскільки під час експлуатації друкарської машини ПОГ90 радіус вала розмотки змінюється в межах від 0.1 м до 0.5 м, необхідно з'ясувати, як це впливає на ефективність роботи системи автоматичного регулювання. У розрахунках було прийнято значення радіусу вала рівним 0.25 м. Для дослідження впливу радіуса вала на якість роботи системи будемо використовувати створену модель САР натягу полотна в середовищі Simulink. Дослідження проводитиметься для п'яти значень радіусу вала розмотки:  $r = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5$ . У моделі необхідно змінювати передаточну функцію  $W_{1/r}(s)$ , яка набирає значення 10; 5; 3.33; 2.5; 2 відповідно.

Визначаємо середньоквадратичне відхилення для випадку, коли  $r = 0.1$  м.

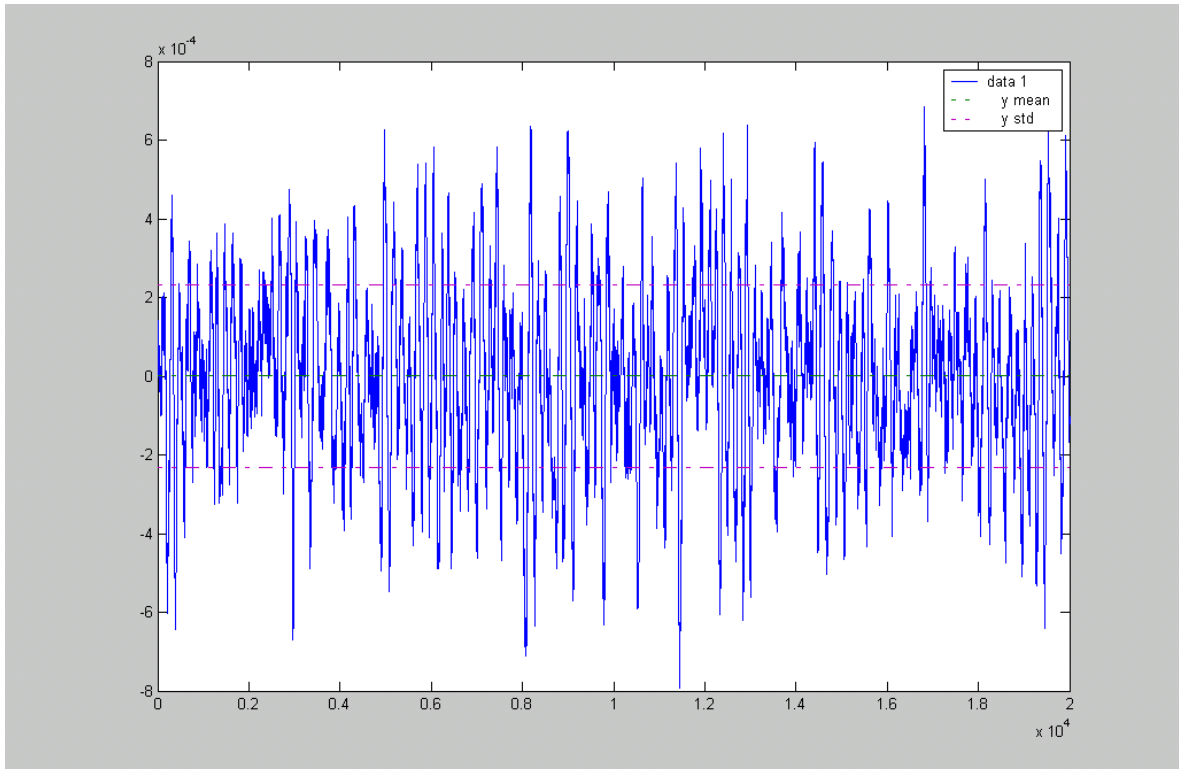


Рисунок 3.3 – Графік вихідного сигналу моделі системи автоматичного регулювання при  $r = 0.1$  м

Середньоквадратичне відхилення становить  $\sigma_x = 0.231 \cdot 10^{-3}$ .

Обчислюємо середньоквадратичне відхилення для випадку, коли  $r = 0.2$  м.

Середнє квадратичне відхилення  $\sigma_x = 0.225 \cdot 10^{-3}$ .

Визначаємо середньоквадратичне відхилення для випадку, коли  $r = 0.3$  м.

Середньоквадратичне відхилення  $\sigma_x = 0.238 \cdot 10^{-3}$ .

Знаходимо середньоквадратичне відхилення для випадку  $r = 0.4$  м.

Середньоквадратичне відхилення складає  $\sigma_x = 0.258 \cdot 10^{-3}$ .

Визначаємо середньоквадратичне відхилення для випадку, коли  $r = 0.5$  м.

Середнє квадратичне відхилення  $\sigma_x = 0.293 \cdot 10^{-3}$ .

Після знаходження середньоквадратичного відхилення для різних значень радіуса  $r$ , можна побудувати графік залежності  $\sigma_x(r)$

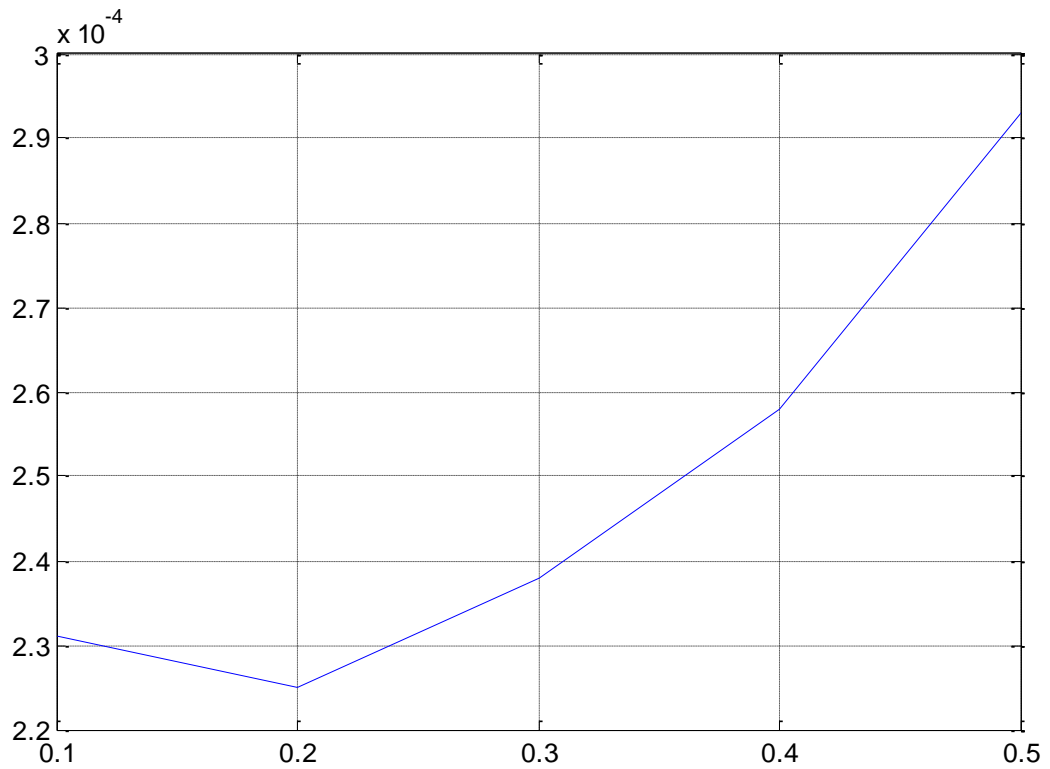


Рисунок 3.8 – Графік залежності середньоквадратичного відхилення положення коливного вала від радіусу вала розмотки

З графіка видно, що при зміні радіуса вала розмотки в межах від 0.1 м до 0.5 м середньоквадратичне відхилення координати коливного вала залишається в межах  $0.3 \cdot 10^{-3}$  м, що відповідає вимогам щодо якості роботи системи автоматичного регулювання.

## 4 Створення схеми та програмної реалізації оптимального регулятора

### 4.1 Знаходження Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи регулювання потрібно провести Z-перетворення передаточної функції регулятора, яка була отримана в процесі синтезу в другому розділі.

$$W_P(s) = \frac{-2.1(s+12.5)(s+1.959)(s^2+2s+100)}{(s^2+0.3824s+8.309)(s^2+62.32s+2174)}. \quad (4.1)$$

Здійснимо розклад передаточної функції регулятора на елементарні дроби:

$$W_P(s) = -2.1 + \frac{-1.238s - 1.549}{s^2 + 0.3824s + 8.309} + \frac{98.35s + 4352}{s^2 + 62.32s + 2174}. \quad (4.2)$$

Тепер здійснимо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, використовуючи крок дискретизації  $T_0 = 0.001$  с.

$$W_P(z) = -2.1 + \frac{-0.001238z + 0.001237}{z^2 - 2z + 0.9996} + \frac{0.09744z - 0.09323}{z^2 - 1.937z + 0.9396}. \quad (4.3)$$

$$W_P(z) = -2.1 + \frac{-0.001238z^{-1} + 0.001237z^{-2}}{1 - 2z^{-1} + 0.9996z^{-2}} + \frac{0.09744z^{-1} - 0.09323z^{-2}}{1 - 1.937z^{-1} + 0.9396z^{-2}} \quad (4.4)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора формулюємо різницеві рівняння:

$$u[n] = u_1[n] + u_2[n] + u_3[n];$$

$$u_1[n] = -2.1x[n];$$

$$u_2[n] = -0.001238x[n-1] + 0.001237x[n-2] + 2u_2[n-1] - 0.9996u_2[n-2];$$

$$u_3[n] = 0.09744x[n-1] - 0.09323x[n-2] + 1.937u_3[n-1] - 0.9396u_3[n-2].$$

Схему програмної реалізації показано на рисунку 4.1, де коефіцієнти мають такі значення:

$$a = -2.1; b_1 = -0.001238; b_2 = 0.001237; c_1 = 2; c_2 = -0.9996;$$

$$d_1 = 0.09744; d_2 = -0.09323; e_1 = 1.937; e_2 = -0.9396.$$

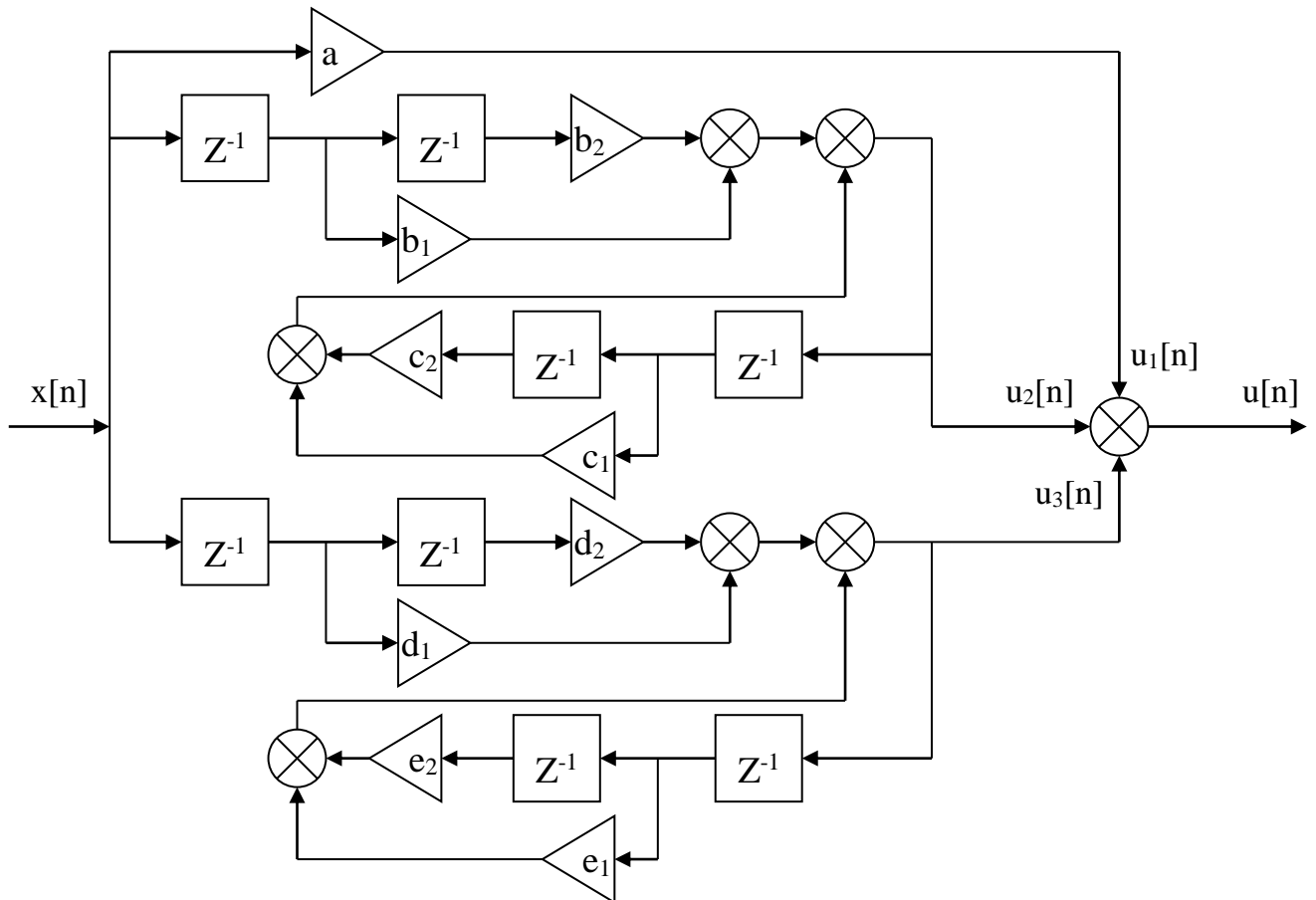


Рисунок 4.1 – Схема реалізації програмного регулятора

На основі отриманої схеми програмної реалізації потрібно створити регулятор із використанням мікропроцесора.

## 4.2 Опис основної схеми регулятора

Цифровий регулятор натягу полотна реалізовано на мікроконтролері PIC16F873, який відповідає за управління, створення інтерфейсу, аналогово-цифрове перетворення та виконання математичних обчислень.

Мікроконтролер PIC16F873 належить до сімейства КМОП мікроконтролерів і оснащений вбудованою пам'яттю EEPROM обсягом 1К x 14 біт для зберігання програм, а також 64 байт EEPROM пам'яті для зберігання даних. Мікроконтролери цього сімейства відзначаються низькою ціною і високою продуктивністю.

Пристрій складається з датчика положення валу, встановленого на об'єкті управління, який перетворює положення валу у відповідну напругу. Крім того, до складу входять логічні, керуючі та сигнальні пристрої, вузол індикації та клавіатура, а також джерела живлення.

Логічний пристрій здійснює перетворення напруги, що надходить від датчика положення, і за допомогою логічних операцій формує сигнали для керуючого та сигнального обладнання, а також для вузла індикації та клавіатури відповідно до спеціального алгоритму.

Розглянемо принцип роботи регулятора. Перетворювач опору в напругу реалізований на мікросхемі LM324AN. Він включає генератор стабільного струму (ГСС) на основі операційного підсилювача DA1.1, компенсатор лінії зв'язку на операційному підсилювачі DA1.2, масштабний підсилювач сигналу (МПС) DA1.3 та формувач віртуальної землі (ФВЗ) DA1.4.

Генератор стабільного струму створює вимірюваний струм, що протікає через датчик і спричинює падіння напруги, пропорційне його опору. Значення цього вимірюваного струму вибирається з урахуванням наступного. Оскільки перетворювач опору в напругу функціонує як підсилювач постійного струму (ППС), для зменшення впливу дрейфу напруги зміщення операційного підсилювача на результати вимірювання струм необхідно вибирати якомога більшим. Однак його значення обмежується типом чутливого елемента та навантажувальною здатністю операційного підсилювача. У якості основи генератора стабільного струму обрано пристрій, що представляє собою підсилювач постійного струму з позитивним і негативним зворотним зв'язком. Падіння напруги, створене струмом

генератора на датчику, надходить до компенсатора лінії зв'язку, який є інвертуючим підсилювачем. Важливо, щоб провідники лінії зв'язку мали однаковий переріз і були виготовлені з однакового матеріалу. Також необхідно забезпечити однаковість опорів резисторів R9 або R13. Значення опору резистора розраховується як половина опору резистора R9 або R13.

Резистор R11 виконує роль елемента, який підтягує неінвертуючий вхід DA1.2 до нуля у разі обриву лінії зв'язку. Його опір має бути в 1000 разів більший за опір датчика при максимальному значенні положення вала.

Напруга, що виходить з компенсатора лінії зв'язку, подається на масштабний підсилювач сигналів DA1.3. Цей підсилювач реалізований за класичною схемою неінвертуючого підсилювача і призначений для посилення сигналу до рівня, потрібного для коректної роботи аналого-цифрового перетворювача, інтегрованого в ПІС-контролер. Резистор R21 використовується для запобігання перенавантаження входу аналого-цифрового перетворювача у випадку, коли операційний підсилювач переходить у режим насичення і вихідна напруга зростає

$$U_{KT3} = U_{жив} - 1,5B$$

Для зменшення кількості ліній та спрощення конструкції використовується динамічна індикація. Регістр зсуву та дешифратор служать для реалізації динамічної індикації. Принцип роботи полягає у наступному: спочатку на вході дешифратора встановлюється код 1111, в результаті чого на всіх його виходах задається рівень логічної одиниці, через що жоден із розрядів індикатора не світиться.

Далі в регістр записується код необхідного символу, після чого на дешифратор подається код, що відповідає відповідному розряду індикатора.

Оновлення даних індикатора відбувається одночасно з процесом сканування клавіатури, що складається з шістнадцяти кнопок, розподілених на дві групи по вісім кнопок у кожній. Загальні виходи кнопок обох груп підключені до виводів RB6 та RB7 мікроконтролера. Коли натискається будь-яка клавіша, на відповідний вхід подається сигнал логічного нуля з

виходу дешифратора, що дозволяє визначити код клавіші. Час оцінки стану кнопки не перевищує кілька мікросекунд.

Комутація катодів індикаторів реалізується за допомогою транзисторів VT1–VT4. Для передачі сигналу при виході з ладу датчика температури використовується активний п'єзоелектричний випромінювач. Окрім випромінювача, він включає підсилювач і генератор сигналу з фіксованою частотою. Такий випромінювач не створює додаткового навантаження на порт мікроконтролера і забезпечує достатньо високий рівень звуку.

Формування аналогового сигналу для управління порошковою муфтою здійснюється за допомогою вбудованого в мікроконтролер модулятора ширини імпульсу. Мікроконтролер PIC16F873 обладнаний двома виходами модулятора ширини імпульсу — RC1 і RC2. Цей модулятор генерує серію імпульсів з фіксованою частотою та періодом. Форма сигналу формується шляхом зміни ширини кожного окремого імпульсу. Широтно-імпульсна модуляція в даному випадку полягає у створенні сигналу з програмованою частотою та заповненням.

Для отримання вихідної напруги, пропорційної середньому часу високого рівня, використовується фільтр низьких частот. Щоб підвищити цю напругу до рівня, необхідного для створення сигналу управління транзисторними частотними перетворювачами, застосовуються буферні підсилювачі DA9 і DA10.

Джерело живлення складається з трансформатора, випрямного моста, мікросхемних стабілізаторів і фільтруючих конденсаторів. Прецизійний термокомпенсований стабілізатор генерує зразкову напругу, яка подається на вихід мікроконтролера, генератор стабільного струму та формувач.

З клавіатури значення коефіцієнтів різницевого рівняння заносяться в пам'ять мікроконтролера.

Регулювання положення валу розпочинається після отримання сигналу від системи дозування про завершення завантаження шоколадної маси в темперуючий циліндр. У цей момент на контакті RA4 порту A

встановлюється логічна одиниця, а на контакті RA5 – нуль. Одночасно змінюється стан контакту RB7: сигнал на контакті RB7 дорівнює “1”, якщо завантаження відбулося, і “0”, якщо процес ще не завершився. Стан контакту RB7 постійно перевіряється програмою. Коли на контакті RB7 з’являється сигнал логічної одиниці, запускається таймер Timer 0, який контролює час процесів охолодження та нагрівання. Модуль таймера 0 – це таймер/лічильник з наступними характеристиками: – восьмирозрядний таймер/лічильник; – можливість читання та запису лічильника; – восьмирозрядний програмований попередній лічильник; – вибір зовнішньої або внутрішньої синхронізації; – переривання при переповненні, коли відбувається перехід від FFH до 00H; – вибір фронту при зовнішній синхронізації.

Час виконання всього технологічного циклу контролюється таймером Timer 1. Якщо на клавіатурі натискається будь-яка клавіша, генерується сигнал переривання через зміну стану на контактах порту В, що запускає підпрограму обробки натиснутої клавіші. Окрім цього, мікроконтролер має 14 джерел переривання. Регістр контролю переривання (INTCON) містить біти для загального та локального переривання. Біт загального переривання GIE (INTCON<7>) дозволяє активацію всіх немаскованих переривань, якщо вони попередньо були увімкнені. Коли біт GIE встановлено, і переривання активоване, воно відбувається миттєво. Локальні переривання можна заборонити, встановивши відповідні біти в регістрах. Локальні переривання управляються бітом GIE, який скидається при скиді. Для повернення з переривання використовується команда RETFIE. Вихід з підпрограми обробки переривання автоматично встановлює біт GIE для можливості повторного переривання.

При зовнішньому перериванні, наприклад, при спрацюванні виходу INT порту В, тривалість стану переривання складає 3-4 командні цикли.

Після цього формуються керуючі дії, і починається опитування датчика. Сигнал з датчика через перетворювач опору в напругу, масштабний

підсилювач та формувач віртуальної землі подається на аналого-цифровий перетворювач, вбудований у контролер. Мікроконтролер оснащений восьмирозрядним модулем аналого-цифрового перетворювача.

Після проведення перетворення пристрій формує цифровий результат, який відображає аналоговий рівень за допомогою послідовної апроксимації. Результат перетворення представлений десятибітною цифровою комбінацією. Модуль аналого-цифрового перетворювача має еталонні напруги високого та низького рівня.

## Висновки

1. У процесі виконання роботи було проведено аналіз об'єкта регулювання та визначено його передатну функцію.

2. У результаті проведених експериментальних досліджень було визначено спектральну щільність експлуатаційних впливів на натяг полотна.

3. Було визначено структуру системи автоматичного регулювання натягу полотна, при цьому в якості датчика обрано магнітний датчик лінійних переміщень, а в ролі виконавчого механізму – електромагнітну порошкову муфту.

4. Було проведено синтез оптимального регулятора.

5. Було проведено аналіз якості регулювання, в результаті якого середньоквадратичне відхилення коливного вала знизилось у 16 разів після встановлення регулятора.

6. Моделювання роботи системи автоматичного регулювання натягу полотна дозволило оцінити вплив зміни радіуса вала розмотки на середньоквадратичне відхилення коливного валу. У результаті середньоквадратичне відхилення не перевищує 0.3 мм.

## Список літератури

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: Підручник. – 2-ге вид., – К.: Либідь, 2007. - 656 с.
2. Автоматизація технологічних процесів і виробництв харчової промисловості: Підручник/ Ладанюк А.П.,Трегуб В.Г., Ельперін І.В., Цюцюра В.Д. – К.: Аграрна освіта, 2001 – 224 с.
3. Теорія автоматичного управління: Навчальний посібник [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології», освітньо-професійна програма «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кібер-енергетичних систем»; уклад.: О. Й. Штіфзон, П. В. Новіков, В.П. Бунь. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,2 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. – 144 с.
4. Аналіз та синтез систем автоматичного керування в MATLAB. Навчальний посібник/ О.Г. Гурко, І.Ф.Єрмоєнко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
5. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
6. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
7. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
8. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
9. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.

10. Åström K.J., Hägglund T. Advanced PID control. – ISA (The Instrumentation, System, and Automation Society) , 2006. — 460 p.
11. Романенко В.Д. Методи автоматизації прогресивних технологій.- К.:Вища школа,1995.-519 с.
12. Стеклов В.К. Проектування систем автоматичного керування.- К.:Вища школа,1995.-231 с.
13. Технології конструювання сучасних конкурентоспроможних комплексів керування стохастичним рухом об'єктів : монографія / Л. М. Блохін та ін., Кропивницький: Лисенко В.Ф., 2023. 292 с.
14. Сільськогосподарські машини. Основи теорії та розрахунку: Підручник / Д.Г. Войтюк, В.М. Барановський, В.М. Булгаков та ін.; за ред. Д.Г. Войтюка. – К.: Вища освіта, 2005. – 464 с.
15. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
16. Босов Є. П., Жесан Р. В., Каліч В. М., Голик О. П., Зубенко В. О. Охорона праці при проектуванні систем автоматизації виробництва : навч. посіб. 2-е вид., перероб. і доп. Кропивницький : ЦНТУ, 2022. 208 с.
17. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
18. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.