

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 температури  
сушки полотна флексографічної машини»**

Виконав здобувач III курсу групи АК-22мб  
ОПП «Автоматизація та комп'ютерно-  
інтегровані технології»

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

\_\_\_\_\_ Володимир КОЗЛОВ

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Ірина БЕРЕЗЮК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький – 2025 рік

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**

Козлова Володимира Юрійовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного регулювання температури сушки полотна флексографічної машини

2. Керівник роботи Березюк Ірина Анатоліївна, 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 температури сушки полотна флексографічної машини. 1. Огляд технології флексографічного друку та характеристика флексографічної машини ПФО – 45; 2. Розробка структурної схеми та вибір елементів системи; 3. Аналіз та синтез системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна; 4. Практична реалізація системи автоматичної стабілізації.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв



## Анотація

на кваліфікаційну роботу здобувача групи АК-22мб Козлова Володимира Юрійовича зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему: «Система автоматичного регулювання температури сушки полотна флексографічної машини».

Кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості продукції, що випускається на флексографічній машині ПФО-45 за рахунок регулювання температурного режиму сушки задрукованого полотна. Ця проблема досить гостро стоїть так як в даний час регулювання температурного режиму відбувається вручну.

В роботі розглянуті технологія флексографічного друку, принцип роботи та технічні характеристики флексографічної машини ПФО-45. розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температурного режиму сушки задрукованого полотна та обрані її елементи. Проведений аналіз та синтез системи автоматичного регулювання, досліджена стійкість замкненої системи та визначені запаси стійкості. Побудована бажана ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи та крива перехідного процесу. Визначені прямі показники якості синтезованої САР.

На основі одержаних результатів розроблена структурна, функціональна та принципова схеми мікропроцесорної системи автоматичного регулювання температурного режиму сушки задрукованого полотна флексографічної машини ПФО-45.

**Ключові слова:** флексографічний друк, система автоматичного регулювання, температурний режим сушки, синтез регулятора.

on qualification work of the student of group AK-22mb Kozlov Volodymyr on a speciality 151 «Automation and computer-integrated technologies» on the theme: «Automatic temperature control system for drying the web of a flexographic machine»

The qualification work is devoted to the problem of improving the quality of products produced on the PFO-45 flexographic machine by regulating the temperature regime of drying the printed web. This problem is quite acute, since currently the temperature regime is regulated manually.

The paper examines the technology of flexographic printing, the principle of operation and technical characteristics of the PFO-45 flexographic machine. The structural diagram of automatic regulation system of the temperature mode of drying the printed canvas and its elements are selected. The analysis and synthesis of the automatic control system was carried out, the stability of the closed system was investigated and the reserves of stability were determined. The desired LAFC of the open system optimal in terms of speed and the curve of the transition process are constructed. Direct indicators of the quality of the synthesized ARS have been determined.

On the basis of the obtained results, the structural, functional and principle diagrams of the microprocessor automatic regulation system of the temperature mode of drying the printed canvas of the PFO-45 flexographic machine were developed.

**Key words: flexographic printing, automatic regulation system, drying temperature regime, regulator synthesis.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Огляд технології флексографічного друку та характеристика флексографічної машини ПФО - 45 .....	4
1.1 Огляд технології флексографічного друку .....	4
1.2 Принцип роботи та технічні характеристики флексографічної машини ПФО - 45 .....	18
1.3 Вимоги до технологічного процесу та обґрунтування необхідності автоматизації .....	23
2 Розробка структурної схеми та вибір елементів системи .....	24
2.1 Розробка структурної схеми системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна .....	24
2.2 Вибір датчику температури .....	26
3 Аналіз та синтез системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна .....	37
3.1 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння .....	37
3.2 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи.....	38
3.3 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи	41
3.4 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості .....	42
3.5 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи .....	45
3.6 Побудова перехідного процесу замкнутої системи .....	46
3.7 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу .....	47
3.8 Аналіз системи автоматичного регулювання .....	47

3.9 Побудова перехідного процесу і визначення показників якості для системи, розробленої шляхом аналізу .....	49
3.10 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї .....	51
3.11 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР .....	54
3.12 Визначення прямих показників якості синтезованої САР .....	55
4 Практична реалізація системи автоматичної стабілізації .....	56
4.1 Визначення періоду дискретизації .....	56
4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора...	58
4.3 Розробка електричної структурної схеми системи.....	60
4.4 Розробка електричної функціональної схеми системи .....	61
4.5 Розробка електричної принципової схеми системи .....	63
Висновки.....	68
Список літератури .....	69

## Вступ

У сучасних умовах ринкової економіки основною пріоритетною задачею є забезпечення високої якості продукції. Підвищення якості товарів відкриває нові можливості для розширення ринків збуту, що призводить до збільшення обсягів виробництва та, відповідно, до зростання прибутковості. Додатково, встановлення системи автоматичного регулювання температури сушки полотна на флексографічній машині ПФО-45 дозволить зменшити кількість дефектів у виробленій продукції, що призведе до оптимізації витратних матеріалів на одиницю продукції.

Не відрегульований регулювання температурного режиму при сушці друку на полотні призводить до дефектів у готовій продукції. При недостатній температурі може виникнути розмазане зображення на друкарському відбитку, а також матеріал у рулоні готової продукції може склеюватися. Занадто висока температура призводить до надмірного розтягування полотна, оскільки для друку використовуються різні матеріали, такі як поліетилен, поліпропілен, папір та інші, з різними технічними характеристиками. Під час експлуатації флексографічної машини ПФО-45 оператор періодично змінює швидкість проходження полотна, тому необхідно постійно підтримувати заданий температурний режим сушки за допомогою регулювання температури подаваного повітря. Основною метою системи регулювання є забезпечення відповідності встановленому температурному режиму сушки полотна протягом всього періоду роботи флексографічної машини ПФО-45.

# **1 Огляд технології флексографічного друку та характеристика флексографічної машини ПФО - 45**

## **1.1 Огляд технології флексографічного друку**

Флексографічний друк - це метод високого прямого ротаційного друку, що використовує еластичні (гнучкі гумові, фотополімерні) рельєфні друковані форми, які можуть бути закріплені на формних циліндрах різних розмірів. За допомогою валика або растрованого циліндра, що взаємодіє з ракелем, ці форми покриваються рідкою або пастоподібною швидковисихаючою фарбою (водорозчинною або на летючих розчинниках) і передають її на друкований матеріал будь-якого типу, включаючи невбираючі матеріали. Зображення на друкованій формі має дзеркальну орієнтацію.

Флексографічні машини - це друкарські установки, де більшість друкованих секцій працює з використанням технології флексографічного друку.

Переваги флексографії сприяли розширенню її застосування, особливо в порівнянні з традиційними методами високого друку. Раніше для виготовлення друкованих форм високого друку використовувались виключно дерево або метал (наприклад, типографські сплави: гарт, цинк, мідь). Однак з появою еластичних друкованих форм у флексографії високий друк також почав використовувати фотополімери як матеріал для створення друкарських форм.

Основна відмінність між друкованими формами високого класичного друку і флексографією полягає в твердості їхніх друкуючих елементів. Навіть така невелика різниця у фізичних характеристиках, як "тверде-еластичне", призвела до значного розширення сфери застосування флексографії в

порівнянні з високим друком. Незважаючи на це, принципово обидва методи друку залишаються однаковими..

Протягом майже всього ХХ сторіччя тривало вдосконалювання як процесів друкування й матеріалів, застосовуваних для виготовлення еластичних друкованих форм, так і конструкції машин для флексографічного друку.

Друковані форми. Спочатку друковані форми виготовляли матрицюванням з каучуку, а після створення фотополімерів - експонуванням і вимиванням або гравіюванням (ручним або лазером).

Створення друкованих форм у ліногравюрі можна вважати однією з перших історичних методик для виготовлення флексографічних друкованих форм. Цей метод залишається актуальним для створення авторських форм. Автор гравірує (вирізає спеціальними різцями різного профілю) зображення на лінолеумі або аналогічному полімерному матеріалі, забираючи матеріал і поглиблюючи фон. Внаслідок цього зображення виходить виїмковим, і всі елементи, які виступають понад фон, розташовані на одній площині. З огляду на еластичність друкових елементів, такий матеріал слугує друкованою формою для флексографічного способу друку.

Для промислових потреб друковані форми виготовляють не з лінолеуму, а, як правило, з офсетного гумовотканинного полотна.

Отримані за допомогою гравіювання друковані форми широко використовуються, особливо в останні часи, при створенні форм для вибіркового лакування. Проте, у випадку, коли фрагменти лакування мають складну конфігурацію, більш доцільно використовувати фотополімери для виготовлення друкованих форм.

Використання різних типів формних пластин у флексографії сприяє підвищенню якості друку.

Друковані форми, зроблені на основі фотополімерних пластин, повинні володіти стійкістю до набрякання та бути сумісними з різними типами фарб,

включаючи не лише водорозчинні та розчинникові фарби, але й фарби для ультрафіолетового затвердіння.

Розвиток технології друкованих форм орієнтується на три основні напрямки: друк на гнучких упаковках, друк на етикетках і прямий друк на готовому гофрованому картоні.

В цих трьох сферах застосування використовують різні формні пластини, залежно від типу використовуваних підложок, компресійних прокладок або стрічок, матеріалу форми, його товщини і твердості, стійкості пластини до набрякання в розчиннику фарб, вимог до якості, сумісності матеріалів, а також від конструкції друкованої машини.

Для прямого друку на готовому гофрокартоні використовують пластини товщиною не менше 3 мм, які вважаються тонкими друкованими формами. У випадку друку етикеток і на гнучкій упаковці використовують пластини, товщина яких менше 1 мм, і вони вважаються ультратонкими друкованими формами.

Технологія тонких пластин передбачає використання "гнучкої підложки", яка використовується для кріплення друкованої форми. Зазвичай ця компресійна підложка складається з комбінації текстильних волокон і гуми. Деякі шари цього матеріалу спеціально відбираються для оптимізації всієї системи "друкована форма - підложка - задруковувана поверхня - зазор між формним і друкованим циліндрами".

Інший варіант використання тонких друкованих форм - це гільзова технологія. Її перевагою порівняно з традиційною є можливість многоразового використання. При встановленні гільзи на формний циліндр застосовується принцип повітряної подушки.

Як альтернативу тонким друкованим формам для друку на гнучкій упаковці можна вибрати багатошарові пластини, оскільки вони мають аналогічну структуру, яка включає тонку форму та стисливу підложку. Ці пластини складаються з нижньої захисної плівки, несучого еластичного шару, стабілізуючої плівки, світлочутливого рельєфоутворюючого шару та

верхньої захисної плівки. Така багатошарова структура друкованої форми має численні переваги для досягнення високоякісного флексографічного друку.

Одна з особливостей флексографії виявляється в необхідності використання тиску для вирівнювання нерівностей дотичних поверхонь під час друку. Застосування високого тиску може призвести до змін геометрії друкуючих елементів, що в свою чергу призводить до зниження якості відбитка - високого розтискування, змазування та нерівномірного розподілу фарби на поверхні. Також високий тиск може впливати на тиражостійкість друкованої форми і призвести до її розшарування. Очевидно, що в цьому випадку необхідний компроміс або новий підхід.

Для друку на етикетках і упаковці використовують тонкі друковані форми. У цьому випадку значна частина надмірного тиску поглинається стисливою підложкою, що призводить до зменшення ступеня деформації друкуючих елементів в області друкованого контакту. Це досягається завдяки здатності підложки до стиску, що виявляє значний позитивний вплив на якість друку.

Термін "стискальність" ("компресійність") вказує на здатність компенсувати тиск шляхом зменшення об'єму. Повернення підложкою до своїх початкових розмірів точно відновлює ефект вирівнювання тиску. Іншими словами, матеріал, який використовується при виготовленні друкованих форм для флексографії, повинен мати високу еластичність для здатності до великих деформацій.

Поверхня стисливих гільз, які використовуються в друці на упаковці, містить компресійний шар, що забезпечує збереження своїх властивостей навіть після декількох років використання. Ефект спіненої структури полягає в тому, що значна частина тиску, що діє на форму, поглинається підложкою. Таким чином, рельєф друкованої форми залишається більш стабільним, тоді як стисливий піноматеріал повертається до своєї первісної висоти після

проходження зони друкованого контакту. Це дозволяє використовувати одну форму для виконання растрових, штрихових і плашечних робіт.

Детальний розгляд друкованої форми для флексографічного друку є важливим через те, що саме вона визначає сильні сторони цього методу друку.

Основна ідея флексографії полягає в гнучкості друкованої форми, і всі інші елементи працюють на її користь та підсилюють позитивні аспекти.

Флексографічні машини, як правило, представляють собою великі комплекси, де друкована машина інтегрована в єдине ціле з обладнанням для виготовлення упаковочних матеріалів, виробництва паперової та плівкової тари, а навіть упаковочних машин для обробки продуктів та матеріалів.

Перша машина для анілінового друку, яка працювала з рулону на рулон, була введена в експлуатацію в 1914 році.

Флексографічні машини, які виробляються на сучасний момент, можна класифікувати за кількома критеріями:

За конструкцією - на машини секційної та планетарної будови, а також на машини із вбудованими друкованими секціями.

За формою матеріалу, який запечатується - на машини для листового та рулонного друку;

За шириною рулону запечатаного матеріалу флексографічні машини класифікуються на широкорулонні та вузькорулонні (вузькоформатні). Проте визначення цієї категорії може бути умовним, з границею приблизно на рівні 500-600 мм;

За видом матеріалу, який запечатується, флексографічні машини поділяються на три категорії: для друку на гофрокартоні, газетні та універсальні.

Машини секційної будови, в залежності від розташування друкованих секцій, можна класифікувати як горизонтальні лінійні та вертикальні лінійні (ярусні) машини.

Крім того, машини можуть включати лише флексографічні друковані пристрої або бути комбінованими, об'єднуючи апарати для флексографії, трафаретного друку, офсетного друку та високого друку. Зазвичай комбінованими є друкарські машини з вузьким рулоном.

У самому початку розробки флексографічних друкованих машин з метою покращення методів друку на синтетичних плівках були створені перші машини планетарного типу. Протягом наступних років також з'явилися машини, побудовані за лінійним принципом.

У 1980 році в газетних друкарнях США були вперше встановлені та протестовані флексографічні друковані секції, і в наступні роки з'явилися перші флексографічні газетні друковані машини.

Приблизно в той же час деякі виробники обладнали рулонні машини для друку на гофрокартоні шириною від 2200 до 2500 мм, випускаючи як секційні, так і планетарні конструкції.

Це відкрило новий значний сегмент ринку для флексографічного друку, а саме - друку на гофрокартоні. З того часу, протягом багатьох років, вирішення проблеми прямого друку на гофрокартоні можна вважати успішним.

Одночасно з цим почалося будівництво флексографічних друкованих машин для матеріалів шириною 300-400 мм. Ці невеликі секційні та планетарні друковані машини застосовуються переважно для друку та виробництва етикеток і малоформатних упаковок з тонкого картону.

Суть будь-якої друкарської машини лежить в друкарському апараті, який визначає тип машини, її продуктивність, точність, надійність, стабільність роботи та якість друку. Решта компонентів може бути спільною або подібною для різних видів друкарських машин.

У флексографічних друкарських машинах конструкція друкарського апарата значно простіша, ніж у високого або особливо офсетного друку. Зазвичай вона складається з двох циліндрів - формуючого і друкарського, а також з простого короткого фарбового апарата в її класичній схемі.

Фарбові апарати. У сучасний період особливий інтерес викликають два типи фарбових апаратів: дукторний (двоциліндровий) і ракельний, і останнім часом ракельний тип стає все більш популярним у нових машинах.

Дукторні фарбові двоциліндрові апарати з'явилися давно і впродовж багатьох років піддавались вдосконаленню, залишаючись популярними в багатьох флексографічних друкарнях. Ці апарати відзначаються простотою обслуговування та налагодження, гнучкістю технічних можливостей і доступністю. Зазвичай вони включають дукторний валик, растрований (анілоксний) циліндр і фарбове корито.

Дукторний валик передає фарбу з фарбового ящика (корита) на растрований циліндр, що є сталевим обрешиненим валиком з дуже гладкою поверхнею. Регулювання міжцентрової відстані між дукторним валиком і растрованим циліндром дозволяє контролювати кількість фарби, що подається на форму. Це значуща перевага цього типу фарбових апаратів. Однак зміни швидкості роботи можуть призводити до змін щільності відбитків, що є недоліком.

Для уникнення цього ефекту, на контакт з растрованим циліндром встановлюють ракель.

Таким чином, на друковану форму передається лише та фарба, яка знаходиться в комірках растрованого циліндра, а ракель повністю очищає його поверхню від надлишку фарби.

Останнім часом дукторні фарбові апарати також комплектують ракельним пристроєм, який притискається до растрованого циліндра зверху і під час його обертання видаляє надлишок фарби з поверхні циліндра.

У такому випадку фарбовий апарат ракельного типу складається з притиснутого до формного циліндра растрованого (анілоксового) циліндра, ракельного пристрою і фарбового корита.

Багато ракельних пристроїв обладнані механізмами осевого зворотно-поступального переміщення ракеля для видалення забруднень і сторонніх часток, які можуть потрапити на нього разом із фарбою. Спочатку в Європі

використовували тільки "попутню" (позитивну) установку ракеля, тоді як в США також виготовляли пристрої із зустрічною (негативною) установкою ракеля.

Зараз майже всі флексографічні машини, спрямовані на високоякісний растровий друк, використовують фарбові ракельні апарати.

Існують певні обмеження та недоліки у функціонуванні фарбового ракельного апарату. Наприклад, поруч із підвищеним зношуванням поверхні растрованого циліндра, до його недоліків можна віднести вплив товщини шару фарби на форму, який залежить від лініатури растра на циліндрі. Це означає, що для друку різних типів зображень, таких як текст, плашки чи напівтонові растрові ілюстрації, потрібно використовувати різні растровані циліндри з відповідною лініатурою.

Проте, однією з вагомих переваг фарбових ракельних апаратів є їх здатність точно постачати тонкий шар фарби на форму, забезпечуючи високу та стабільну якість флексографічних відбитків. Стійка та точна подача особливо тонкого шару фарби на форму є можливою завдяки використанню ракельних апаратів.

На багатьох флексографічних друкарських машинах використовують закриті фарбові камери, виготовлені з алюмінію, з негативним ракелем на виході.

Ці камери мають численні переваги, такі як рівномірна подача фарби по всій ширині під низьким тиском, мінімальна циркуляція фарби, обмежений випар розчинників через використання закритої системи. Вони також сприяють збереженню умов роботи для растрованого циліндра завдяки спеціальній системі підвіски камери. Крім того, ці камери легко і швидко змиваються при зміні фарби.

Флексографічний друк з фарбовим камерним апаратом відкриває шлях до модифікованої техніки - глибокого непрямого друку. Можливість використання формних циліндрів глибокого друку на флексографічних

машинах відкриває шлях до отримання відбитків, близьких до якості глибокого друку.

Замість стандартного формного циліндра в цьому випадку використовується циліндр із гумовотканинним обтягуванням або обрезиненим валиком такого ж діаметра, як і у формного циліндра глибокого друку. Формний циліндр глибокого друку замінює растрований циліндр, а дукторний валик замінюється ракельним пристроєм, налаштованим на певну подачу фарби. Решта елементів і пристроїв друкованої секції залишаються незмінними, як у флексографічному друку.

Важливо враховувати, що фарба, яка передається від формного циліндра, не повинна висихати на проміжному циліндрі. Однак після передачі на задруковуваному матеріалі вона повинна фіксуватися протягом дуже короткого проміжку часу перед наступним нанесенням фарби.

Щодо растрованого (анілоксного) циліндра, це критично важливий компонент флексографічної друкарської машини. Його поверхня повинна бути надзвичайно твердою для уникнення вигинів і високою радіальною точністю, порядку 0,01 мм.

Для виготовлення комірчатої растрової сітки на поверхні растрованого циліндра використовується електронне гравіювання алмазним різцем. Під час цього процесу кожна комірка обробляється індивідуально. Інструмент вбивається в матеріал, відбувається його стискання, та формування виступаючих комірок. Останнім часом широке застосування отримало лазерне гравіювання керамічного шару, наприклад, оксиду хрому. У цьому випадку матеріал з комірок випаровується за допомогою лазерного променя.

Растрові комірки часто мають форму пірамід з гострою вершиною або усічених пірамід.

Зазвичай зараз використовують циліндри з діагональним хрестоподібним растром із лініатурою 140 ліній/см; растрові лінії орієнтовані під кутом 45° до осі циліндра. Для друкування плашок зазвичай використовують растр із лініатурою 60 ліній/см, при лакуванні - растр із

лініатурою 40 ліній/см. Для високоякісного напівтонового растрового друку застосовують растри із лініатурою 170 ліній/см і вище..

Сучасним та передовим засобом фарбозабезпечення є використання керамічних циліндрів, які гравіруються за допомогою лазера, у поєднанні з камерним ракельним пристроєм.

У сучасних умовах формні циліндри, які виготовляються зі сталевій труби, широко застосовуються, особливо в швидкохідних та великоформатних друкарських машинах. В окремих випадках, коли зображення має велику довжину, використовують алюмінієві формні циліндри. Друкарні, які спеціалізуються на виробництві упаковки, а також шпалерні фабрики, часто використовують насадні формні циліндри.

Усі формні циліндри повинні бути встановлені так, щоб їх можна було легко та швидко замінити.

Діаметр формного циліндра визначається врахуванням необхідного формату, тобто довжини друкарського відбитку, з урахуванням товщини форми та клеючої стрічки.

Останнім часом у виробництві використовують гільзи, зокрема, тонкі гільзи з нікелю або синтетичного матеріалу. Їх розширюють стиснутим повітрям, щоб надіти або натягнути на базовий формний циліндр, який може мати циліндричну форму або невелику конусність.

Приблизно 90% нових флексографічних машин, які випускаються в даний момент, розраховані на використання гільз. Гільзові технології вважаються перспективними, а фахівці передбачають, що майбутнє належить виключно цифровій обробці даних. В області гільзових технологій було представлено систему "лазер-гільза". Основна ідея полягає в принципі прямого лазерного гравірування, що дозволяє наносити інформацію та зображення безпосередньо на фотополімер. Це усуває необхідність використання традиційних процесів, таких як експонування, вимивання та сушіння.

Друкарський циліндр повинен бути спроектований для витримки певного навантаження, інакше можуть виникнути деформації, які ускладнюють рівномірний друк по всій ширині матеріалу.

У новітніх машинах відхилення друкарського циліндра зазвичай становить приблизно 0,01 мм. У швидкохідних машинах можливе внутрішнє охолодження друкарського циліндра водою для збереження стабільної температури матеріалу і фарби на невисокому рівні.

Щодо друку на гофрованому картоні, це жорсткий упаковочний матеріал, створений за допомогою наклеювання паперових шарів з обох боків на гофрований папір.

Картонні коробки, виготовлені з гофрованого картону, розглядаються як продукти, що мають таку ж цінність, як і вироби з деревини.

Використання флексографічного друку в промисловості гофрованого картону відрізняється від флексографії при друку на папері з рулону на рулон. Існують значні різниці як у форматах машин, так і в матеріалах, що друкується, друкарських формах, фарбах, а також в готовій продукції.

Товщина гофрованого картону може має великі відхилення від номіналу. Для забезпечення задовільного покриття фарбою в таких умовах друкарські форми повинні бути більш гнучкими, ніж традиційні. Процес друку виконується на листах, які, завдяки своїй жорсткості, повинні проходити через всю машину в горизонтальному положенні.

Для друку на гофрованому картоні часто використовують водорозчинні флексографічні фарби. Ці фарби не мають блиску, володіють високою стійкістю до стирання і швидко вбираються в картон, що усуває потребу в сушильних пристроях.

Наразі флексографія є основним методом друку в промисловості гофрованого картону, хоча вже існують аркушні офсетні друкарські машини, спроектовані для друку на мікрогофрованому картоні.

У зв'язку із труднощами, пов'язаними з запечатуванням готового гофрованого картону через його нерівномірну товщину, іноді в якості

останнього (плоского) полотна застосовують попередньо запечатаний матеріал.

При використанні цієї технології для запечатування плоских полотен, коли до якості друку пред'являються високі вимоги, використовується офсетний друк.

Характеристики післядрукарських процесів. Оптична густинна характеристика фотоформи на областях, що відповідають майбутнім пробільним елементам, повинна складати 4,0, при цьому сама фотоформа має мати рельєфну поверхню для ефективного усунення повітряних пазирів між плівкою та формною пластиною в процесі копіювання в копіювальній рамі. Присутність повітряних пазирів між фотоформою та формною пластиною під час копіювання може призводити до деформації друкованих елементів і виникнення кілець Ньютона на відтвореній формі.

Вибір лініатури растра є ключовим аспектом, на який слід звернути увагу. З одного боку, чим тонше елементи зображення, тим вище повинна бути лініатура. З іншого боку, підвищена лініатура растра може супроводжуватися сильними графічними та геометричними перекрученнями друкованих елементів

Грубший матеріал вимагає використання більшеї кількості фарби та тиску, тому він потребує грубшої лініатури растра. Навпаки, для гладких плівок використовується тонший растр. Зазвичай для друку на плівках використовується лініатура растра 48 ліній/см, для лощених типів паперу - 36 ліній/см, для нелощених - 32-28 ліній/см. Растрові крапки зазвичай мають круглу форму, оскільки використання растру з прямокутними або овальними крапками, особливо з великою лінійчатістю, може призвести до значних колірних перекручень через різну деформацію орієнтованих растрових крапок.

Лініатура анілоксового циліндра має бути в 3-5 разів вищою, ніж лініатура растра друкарської форми. В кожному випадку важливо, щоб растрова крапка не занурювалася в комірку анілоксового циліндра. З цієї

причини в офсетному друці деякі трендові техніки, такі як частотно-модульоване растрування з використанням крапок мінімально можливих розмірів, можуть не давати задовільних результатів у флексографії.

Для зменшення впливу растра анілоксового циліндра у флексографії, кути повороту растрів при виготовленні кольороділених фотоформ відрізняються від стандартних кутів, що використовуються в офсетному друці. Кут повороту растра анілоксового циліндра також визначає комплект кутів повороту растрових структур кольороділених зображень. Вибір здійснюється з урахуванням критерію мінімізації муарової структури на друку. Зазвичай кути у флексографії відрізняються на  $7^\circ$  від стандартних значень кутів, що використовуються в офсетному друці..

Переваги флексографічного друку в цілому. Конфігурація флексографічних друкарських машин може змінюватися в залежності від характеру виконуваних завдань. Зазвичай стандартна штанцевальна секція включає три блоки, в кожному з яких можна встановити пристрої для ротаційного вирізання, поздовжнього різання полотна, вирізання в аркуші або додатковий модуль для оздоблення (наприклад, для ротаційного тиснення фольгою і т.д.).

Для друку самоклеючих етикеток, до блоку висічки може бути доданий пристрій для намотування.

Зазвичай при роботі з картоном використовують спеціальні касетні модулі для ротаційної висічки, які мають міцні платформи і дозволяють встановлювати пристрої для обробки та налаштування для виводу готової продукції.

Флексографічні машини з вузьким рулоном володіють розширеним набором можливостей для обробки різноманітних матеріалів, таких як холодне ламінування, ламінування з використанням УФ-лаку, трафаретний друк, поздовжнє різання та перфорування, ротаційне тиснення фольгою та конгревне тиснення. Ці машини оснащені стандартними комплектаціями для виробництва продукції з елементами захисту від підробок, таких як різні

види квитків, ідентифікаційні марки, лотерейні квитки, етикетки з голограмою і інші. Крім того, існують мультирулонні системи, які дозволяють об'єднувати декілька полотен з різних основ при друці.

Для друку зображень на клейовому шарі етикеток, які мають властивість самоклеючості, використовується пристрій розшарування/припресовки. Цей пристрій здатен відокремити матеріал, який має клейовий шар, і після друку припресувати його до основи.

У випадку необхідності друку на звороті етикетки застосовується пристрій для перевертання стрічки або полотна.

У сучасному виробництві флексографія виступає як основний та неперевершений метод друку для гофрованого картону, хоча існують також офсетні друкарські машини для листового друку, спеціально призначені для мікрогофрокартону.

У флексографії в якості друкованого матеріалу використовують папір, картон, гофрокартон, плівку, самоклеючі матеріали, целофан, фольгу, пергамент і металізований папір.

Цей метод друку широко використовується для нанесення зображень на упаковках, пластикових пакетах, в газетній промисловості, а також при виготовленні етикеток та інших продуктів.

Друкарські форми для флексографічного друку характеризуються високою стійкістю до великих тиражів і можуть бути успішно використані для друку мільйонів екземплярів. У багатьох галузях друку флексографія є незамінною, оскільки вона дозволяє проводити друк на матеріалах різної якості та хімічної активності - від тонких розтягуються плівок до гофрованого картону, а також різних видів фольги та пластмас.

Флексографічний друк, уникнувши обмежень високого і офсетного друку, вирізняється високою технологічною гнучкістю. Його стрімкий розвиток сприяє інноваціям у сфері друку, що впливає на розвиток інших методів друку через передачу технологічних і технічних рішень. Флексографічні друкарські машини важко визначити як прості друкарські

пристрої, оскільки вони не обмежуються лише функцією друку, але і представляють собою комплексні лінії та агрегати.

## **1.2 Принцип роботи та технічні характеристики флексографічної машини ПФО - 45**

Флексографська машина марки ПФО-45, яка є компактною, призначена для виконання кольорового друку на полімерних матеріалах та пакувальному папері.

Ця машина призначена для друку та оформлення упаковки в різних галузях промисловості, зокрема в харчовій промисловості.

Принцип функціонування машини полягає в розгортанні матеріалу для друку з рулону 1 (див. рис. 1.1) через направляючі валики 2 на подаючий циліндр 3. Це забезпечує синхронну подачу матеріалу у друкарський апарат 4, де здійснюється нанесення першого шару фарби.

Потім стрічка матеріалу проходить через другий (5), третій (6) та четвертий (7) друкарські апарати, де послідовно застосовуються наступні шари фарб. Тягнення матеріалу між друкарськими апаратами забезпечується як за рахунок фрикційного зв'язку між друкарською формою та друкарським циліндром, так і завдяки зусиллю фрикційної пари тягнучого циліндра 8, а також зусиллю тертя циліндра охолодження 9.

Для уникнення прилипання свіжого відбитка перед кожним наступним нанесенням фарби використовується система підсушування. Відбиток піддається впливу теплового повітря, яке подається через спеціальні розподільвачі повітря 10, які також розташовані на верхній рамі. Це повітря постачається вентилятором високого тиску, а його підігрів виконується електрокалорифером. Температура і об'єм поданого повітря регулюються відповідно до технологічного режиму друку. Температуру в зоні сушіння можна налаштувати в межах від 20 до 80 градусів Цельсія. Друкар може регулювати температуру за допомогою датчика контролю температури.

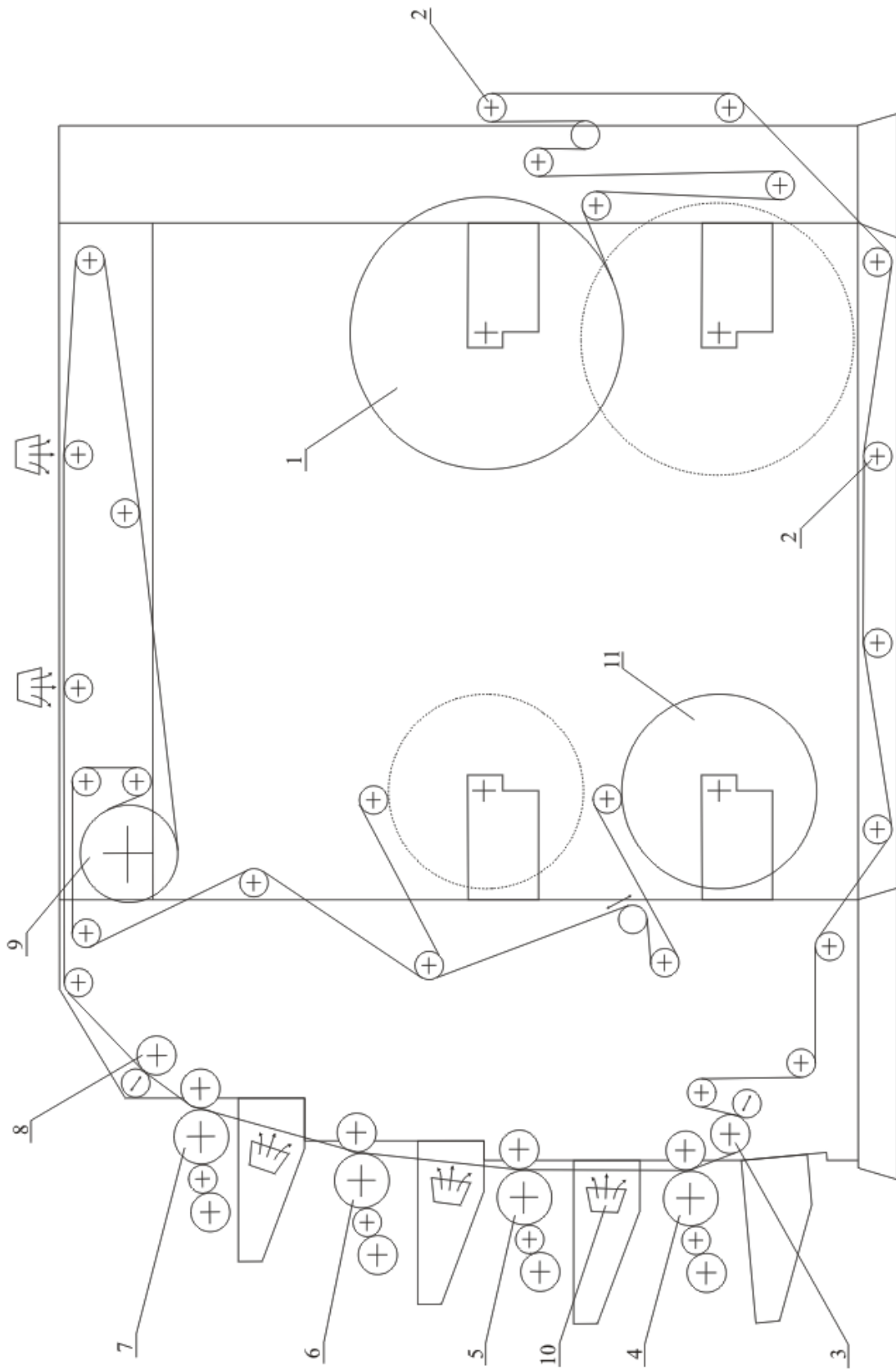


Рисунок 1.1 – Флексографічна машина ПФО - 45

Для уникнення забарвлення фарби в намотаному рулоні 11, матеріал після остаточної сушки піддається охолодженню за допомогою циліндра 9. Через цей циліндр прокачується холодна вода з системи водопостачання під невеликим тиском.

Машина має здатність виконувати осьове переміщення рулонів як при розгортанні, так і при намотці.

У друкарських апаратах відбувається підняття та опускання формних циліндрів, тонке регулювання натиску, подачі фарби та накатування її на друкарську форму. У конструкції машини передбачено зафіксовану позицію друкарського апарату для утримання друкарських форм.

Для забезпечення відповідності між відбитками передбачена осьова і повздовжня приводка друкарських форм.

Структура машини та окремих її компонентів полягає в тому, що машина складається з:

1. Друкарська секція складається із станини, обладнаної приводом, друкарських апаратів, дмухала проміжної сушки, охолоджуючого циліндра, а також системи для протягування та намотки матеріалу у рулони;
2. Каркаси, обладнані двома осьовими розмотками;
3. Верхній каркас обладнано двома дмухалами для остаточної сушки та валиками для направлення матеріалу;
4. Нижній каркас має валики для направлення матеріалу;
5. Вентилятор обладнано калорифером та гумовими дифузорами для постачання теплого повітря;
6. Електрошафи обладнано пусковою станцією для керування приводом машини.

Процес протягування матеріалу через друкарські апарати виконується за допомогою вузла тягнучих роликів, чотирьох пар друкарських циліндрів (формуючого та друкарського циліндрів) і вузла подаючих роликів.

Для досягнення необхідного натягу полотна під час розмотки, рулон зафіксований по вісі гальмом. Процес намотування друкуваного матеріалу в рулони здійснюється осьовою намоткою, конструктивно аналогічною до тієї, яка використовується для розмотки рулону. Основна відмінність полягає у тому, що ось в цьому випадку не гальмується, а навпаки, отримує привід від головного двигуна через фрикційну пару.

На флексографічній машині передбачена можливість ручного налаштування натягу полотна. Процедура здійснюється шляхом візуального контролю положення коливного вала та провисання полотна. Регулювання натягу виконується вручну за допомогою механічної муфти на намотці полотна та механічного гальма на валу розмотки. Цей процес відбувається дискретно, з великими проміжками часу. Такий метод регулювання може призводити до погіршення якості продукції та збільшення відсотка браку у виробленій продукції.

Система керування машиною включає в себе керування основним приводом, двома калориферами та живленням активатора.

Основний привід реалізовано на основі асинхронного двигуна. Для плавного налаштування частоти обертання двигуна використовується частотний перетворювач. Запуск двигуна відбувається за допомогою кнопки. Регулювання швидкості здійснюється за допомогою змінного резистора та контролюється стрілковим приладом.

. Система сушіння обладнана двигуном вентилятора та обігрівачами. Включення вентилятора здійснюється за допомогою кнопки, а вимикання - також за допомогою кнопки. Крім того, включення та вимикання обігрівачів здійснюється датчиком (за положенням ручного приводу муфти). Вмикач нагрівачів, незалежно від положення муфти, обладнаний тумблером. Контроль температури у відносних одиницях виконується за допомогою приладу, що автоматично регулює температуру нагрівання відповідно до заданого значення. Датчик температури розташований на передній панелі шафи управління.

Таблиця 1.1 – Технічні характеристики

1. Найменування продукції, що виготовляється на машині	кольорове зображення, нанесене поліграфічним способом на рулоні полімерні матеріали і папір в вигляді полотна, рукава і напіврукава.
2. Найменування і характеристика основних матеріалів для виготовленої продукції	<ul style="list-style-type: none"> <li>- поліетиленова плівка ГОСТ 10354-82;</li> <li>- поліамідна плівка-рукав по НДТ;</li> <li>- оболочка штучна білкова ТУ 10-10-01-03-89;</li> <li>- целофан ГОСТ 7730-89;</li> <li>- папір масою 1 м<sup>2</sup> від 40 до 120 г;</li> </ul>
3. Найбільша технічна швидкість, м/хв	до 200
4. Найбільша робоча швидкість при друкуванні, м/хв: - на плівках - на папері	до 60 до 170
5. Максимальний діаметр рулонів, см: - на розмотці - на намотці	до 70 до 50
6. Автоматизовані технологічні операції	<ul style="list-style-type: none"> <li>- розмотка рулону;</li> <li>- друкування і проміжна сушка;</li> <li>- остаточна сушка відбитків;</li> <li>- охолодження відбитків;</li> <li>- намотка задрукованого матеріалу;</li> <li>- підтримка заданої температури в сушильній камері.</li> </ul>
7. Електроустаткування машини розраховане для роботи від трифазної мережі змінного струму з: - напругою, В - частотою, Гц	380 50
8. Загальна встановлена потужність, кВт не більше Споживана потужність, кВт не менше	12,7 5,2

### **1.3 Вимоги до технологічного процесу та обґрунтування необхідності автоматизації**

Під час ознайомлення з функціональністю флексографічної машини ПФО-45 та консультацій з фахівцями були встановлені вимоги та обмеження, пов'язані з температурним режимом сушіння задрукованого полотна. Під час роботи флексографічної машини оператору часто доводиться міняти швидкість проходження полотна. Це призводить до зміни кількості теплової енергії, що подається на полотно, і вимагає вручну встановлювати нові значення температури подаваного повітря. Процес вибору необхідної температури є складним і в значній мірі залежить від досвіду оператора. Однак, необхідно відзначити, що вчасне встановлення нового значення є критичним. Недостатня температура може спричинити виникнення нечіткого зображення на відбитку та злиплення матеріалу в рулоні готової продукції. З іншого боку, перегрів полотна може призвести до надмірного розтягання, особливо при використанні матеріалів, таких як поліетилен чи поліпропілен, які схильні до розтягування чи розриву при перегріві. Це ускладнює роботу друкаря, оскільки йому доводиться контролювати численні параметри друку, що також суттєво впливають на якість готової продукції. Ось чому автоматизація процесу регулювання температурного режиму сушіння задрукованого полотна на флексографічній машині ПФО-45 стає необхідною

Також визначено вимоги до технологічного процесу, згідно з якими максимальне перерегулювання не повинно перевищувати 25%, а час регулювання не повинен перевищувати 1 секунду.

## **2 Розробка структурної схеми та вибір елементів системи**

На основі проведеного огляду технології флексографічного друку та конструкції флексографічної машини ПФО-45 виявилася необхідність розробки системи автоматичного регулювання температурного режиму сушіння задрукованого полотна. Для втілення цієї системи потрібно розробити структурну схему САР та вибрати її елементи із наявних на флексографічній машині, а також, за необхідності, запропонувати нові. Також важливо розглянути технічні характеристики та динамічні властивості цих елементів системи.

### **2.1 Розробка структурної схеми системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна**

Об'єктом регулювання у даній системі є температура сушки фарбового покриття на друкарському матеріалі. Таким чином, вихідним параметром для регулювання є температура оточуючого середовища, де відбувається сушка полотна. В якості вхідного параметру системи служить температура повітря, яке надходить за допомогою вентилятора через спеціальні розподільники. Для виконання регуляційних функцій у системі використовуються електрокалорифери, які розташовані на флексографічній машині. Датчик температури необхідно розмістити в середовищі сушки задрукованого матеріалу. В результаті буде отримана структурна схема системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна (рис. 2.1). Задане значення температури сушки формується на підставі сигналу від потенціометра, призначеного для керування робочою швидкістю проходження полотна під час друку. Для визначення передаточної функції регулятора необхідно провести аналіз технічних параметрів та переглянути літературні джерела для визначення передаточних функцій елементів системи.

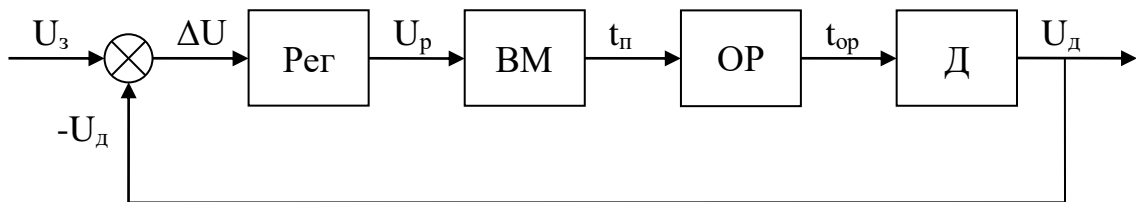


Рисунок 2.1 - Структурна схема системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна

Для процесу друку у флексографії використовують розчинники, які швидко випаровуються, оскільки друкарське полотно практично не вбирає фарбу. Сушка фарбового покриття включає декілька етапів. Після кожної друкарської секції встановлені розподільвачі, які за допомогою вентилятора подають підігріте повітря. Крім того, передбачена кінцева сушка після нанесення всіх фарб. Температурні режими сушки були вивчені та описані в літературних джерелах [1, 2]. Зупинимось тільки визначенням передаточної функції для об'єкта регулювання, яку з аналізу джерел можна представити як

$$W_{OP}(p) = \frac{k_{OP}}{p \cdot (T_{OP} \cdot p + 1)} \quad (2.1)$$

В якості елемента, що виконує функції виконавчого механізму, використовується електрокалорифер ПФО-45, який встановлено на флексографічній машині. Цей електрокалорифер нагріває повітря та, за допомогою вентилятора високого тиску, направляє його в область сушки полотна. Передаточна функція виконавчого механізму була визначена шляхом аналізу літературних джерел і може бути представлена наступним чином

$$W_{BM}(p) = \frac{k_{BM}}{T_{BM} \cdot p + 1} \quad (2.2)$$

Для вимірювання температури в середовищі сушки пропонується використовувати датчики температури. У цьому дипломному проекті рекомендується замінити вже встановлений датчик на флексографічній машині ПФО-45 на більш сучасні аналоги. Подальший аналіз буде

зосереджено на розгляді різних методів вимірювання температури для вибору оптимальних датчиків.

## **2.2 Вибір датчику температури**

На сьогоднішній день існує різноманіття методів для вимірювання температури, таких як терморезистори, напівпровідникові датчики, оптичні датчики та інші. При виборі датчика температури висувуються ключові вимоги, такі як надійність, висока точність, компактні розміри та доступна ціна. З цих позицій розглядаємо інтегральні датчики температури від компанії National Semiconductor.

Інтегральні датчики температури (ІДТ) є невід'ємною частиною практично будь-якого сучасного електронного пристрою. Це обумовлено необхідністю забезпечення високих характеристик апаратури в широкому діапазоні температур, а також необхідністю ефективного керування тепловим режимом елементів та захисту їх від перегріву. Відмінною рисою ІДТ у порівнянні із традиційними термодатчиками (термісторами, термопарами тощо) є їхня порівняльна простота використання, оскільки вони не вимагають лінеаризації та компенсації холодного спаяння, що робить їх досить зручними для застосування в різних термометрах і терморегуляторах.

Останнє покоління інтегральних датчиків температури (ІДТ) зі спеціалізованими цифровими інтерфейсами, відоме як інтелектуальні ІДТ (Smart Temperature Sensor), широко використовується для стабілізації теплових режимів обчислювальних систем, вимірювальної апаратури та в області техніки радіозв'язку.

Компанія National Semiconductor відома як один із провідних світових виробників різноманітних інтегральних датчиків температури. Ці датчики широко застосовуються в великій кількості електронних пристроїв, які виробляються в різних країнах. Фізична принципова основа роботи інтегральних датчиків температури полягає в температурній залежності

напруги на прямому зміщеному кремнієвому р-п переході, що виражається добре відомою формулою

$$U = (kT/q) \ln(I/I_s)$$

де  $U$  - напруга на переході,

$k$  - постійна Больцмана,

$T$  - абсолютна температура,

$q$  - заряд електрона,

$I$  - струм через перехід,

$I_s$  - Зворотний струм насичення, чия величина залежить від конфігурації та температури переходу.

Проте слід відзначити, що використання вищезазначеної залежності для точного вимірювання температури має свої обмеження. По-перше, це пов'язано зі значним розкидом "початкового" прямого спадання напруги на переході, який обумовлений технологічними відмінностями виготовлення. По-друге, великий внесок у залежність  $U(T)$  робить температурна залежність  $I_s$ . Отже, для вимірювання температури в інтегральних датчиках використовується різниця напруг між двома р-п переходами, а саме, напруга база-емітер ( $U_{BE}$ ) двох транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ , яку можна визначити за виразом

$$U_{BE} = U_{BE1} - U_{BE2} = (kT/q) \ln(J_{E1}/J_{E2})$$

де  $J_{E1}$  і  $J_{E2}$  — щільність струму емітерів транзисторів. Ефекти, пов'язані зі струмом насичення та початковим спаданням напруги на р-п переходах, при цьому компенсуються, і температурна залежність стає лінійною з високою точністю. У реальних пристроях використовують транзистори з різними площами емітерних переходів, що забезпечує задане співвідношення щільностей струму емітерів, або набір однакових транзисторів, з'єднаних паралельно — так званий осередок Брока (Brokaw Cell). Практична схема вимірювання температури з температурним коефіцієнтом вихідної напруги  $10 \text{ мВ}/^\circ\text{К}$  наведена на рис. 2.2.

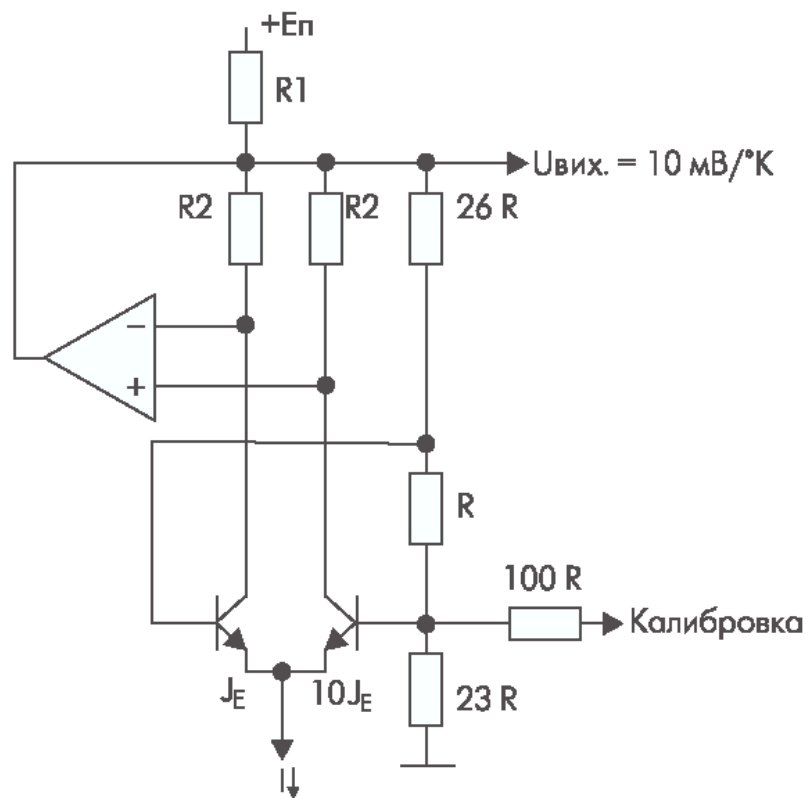


Рисунок 2.2 – Схема вимірювання температури за різницею напруг емітерних переходів транзисторів

Потрібне значення коефіцієнта досягається визначеним співвідношенням опорів резисторів  $26R$  і  $23R$ . Резистор, позначений на схемі як  $100R$ , використовується для точного калібрування датчика. Ця схема використовується в популярних мікросхемах інтегральних датчиків температури, таких як LM135 - LM335 (вітчизняний аналог K1019EM1), детальні характеристики яких будуть розглянуті далі. Подальше вдосконалення інтегральних датчиків температури спрямоване на підвищення лінійності та точності вимірювань. Також з'явилися спеціалізовані мікросхеми - контролери для роботи з віддаленими термочутливими елементами, такими як діоди або транзистори, які можуть розташовуватися безпосередньо в контрольованому пристрої, наприклад, мікропроцесорі.

У даному сценарії мікросхема-контролер проводить послідовне вимірювання вихідних напруг сенсора при двох фіксованих значеннях

струму, і потім обчислює різницю цих напруг для визначення температури, використовуючи відповідні формули.

Інтегральні напівпровідникові датчики можуть вимірювати температуру в широкому діапазоні від -60 до +200 °С, при цьому мінімальна погрішність вимірювання залежить від конкретного діапазону температур і може бути менше десятих долей градуса. Важливо відзначити, що точність вимірювання температури залежить від типу корпусу датчика, його конструктивної реалізації та місця в системі. Тепловиділення самого датчика, обумовлене прикладеною напругою та споживаним струмом, також впливає на результати вимірювань.

Тепер перейдемо до огляду інтегральних термодатчиків виробництва National Semiconductor.

Сучасні прилади можна умовно поділити на дві основні категорії.

Перша група включає в себе датчики з аналоговим виходом, де величина напруги пропорційна вимірюваній температурі у градусах Кельвіна або Цельсія. У випадку вимірювання в градусах Цельсія для правильного відображення негативних температур потрібне двополярне живлення ІДТ або додавання до вихідної напруги датчика, яка пропорційна вимірюваній температурі, деякої постійної величини.

Друга категорія включає в себе інтегральні термодатчики з цифровим виходом, при цьому у найпростішому варіанті це може бути вихід одно- або двопорогового компаратора, який перемикається, коли вимірювана температура виходить за межі заданого діапазону значень.

Датчики цього типу широко використовуються у різних термостатуючих пристроях. Цифровий вихід більшості сучасних інтегральних термодатчиків реалізований у формі послідовного інтерфейсу, з найбільш поширеними двопровідними I2C, трьохпровідними SPI і MICROWARE. Відповідне програмне забезпечення, необхідне для роботи таких датчиків, доступне на веб-сайті виробника.

Давайте розпочнемо розгляд з прецизійних термодатчиків температури в градусах Кельвіна з аналоговим виходом, таких як LM135, LM235 і LM335. Особливість цих приладів полягає в їхньому двопровідному з'єднанні за схемою, аналогічною стабілітрону.

Зразок типового рішення для використання термодатчиків LM135/235/335 показано на рисунку 2, а

При зміні струму через датчик, який контролюється зовнішнім резистором R1 в межах від 0,4 до 5 мА, вихідна напруга з високою точністю складає  $10^{\circ}\text{K}/\text{mV}$ . Якщо потрібно, датчик може бути точно налаштований за допомогою третього виводу та зовнішнього підстроювального резистора, як показано на рисунку 2, б.

При температурі  $25^{\circ}\text{C}$  датчику встановлюється вихідна напруга 2,982 В. Термодатчики LM135/235/335 доступні зі звичайною і підвищеною точністю (LM135A/235A/335A) і мають герметичні транзисторні корпуси TO-46 (LM135H/235H/335H і LM135AH/235AH/335AH). Датчик LM335 також представлений у пластиковому корпусі TO-92 (LM335Z і LM335AZ) і у форм-факторі SO-8 для поверхневого монтажу (LM335M).

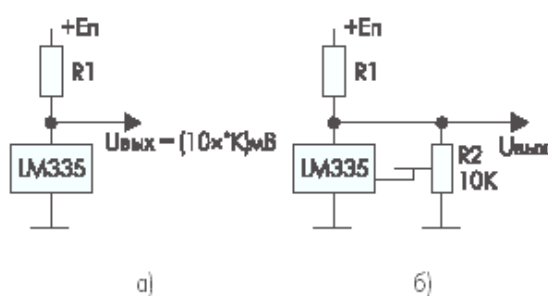


Рисунок 2.3 – Типова схема включення інтегральних датчиків температури в градусах Кельвіна LM135/235/335: а) базова схема; б) схема з калібруванням

Трьохвиводні прецизійні інтегральні датчики температури в градусах Цельсія з аналоговим виходом LM35 і LM45 не вимагають калібрування й працюють у широкому діапазоні живлячих напруг. Типова схема включення

ІДТ LM35 для виміру позитивних температур наведена на рис. 2.4,а, а для всього діапазону температур — на рис. 2.4,б.

Невелика величина споживаного струму (реально 60 мкА) зменшує погрішність вимірювань через саморозігрів датчика. ІДТ LM35 випускаються в різних модифікаціях по діапазону температур: від  $-55$  до  $+150$  °С (LM35, LM35A), від  $-40$  до  $+110$  °С (LM35C, LM35CA) і від  $0$  до  $+100$  °С (LM35D), точності:  $1$  °С (LM35A і LM35CA),  $2$  °С (LM35, LM35C, LM35D) і в чотирьох типах корпусів: TO-46 (LM35H, LM35AH, LM35CH, LM35CAH і LM35DH), TO-92 (LM35CZ, LM35CAZ і LM35DZ), TO-220 (LM35DT) і SO-8 (LM35DM). Точність датчика LM45B становить  $3$  °С, а LM45C —  $4$  °С у діапазоні температур від  $-20$  до  $+100$  °С. Ці термодатчики випускаються в корпусі SOT-23.

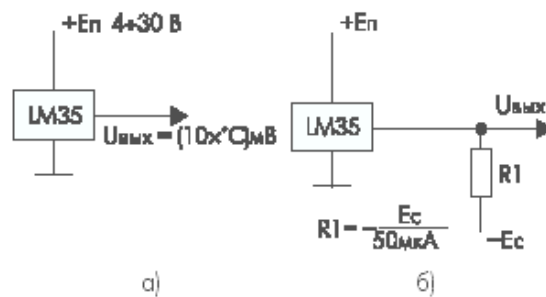


Рисунок 2.4 - Типова схема включення інтегральних датчиків температури в градусах Цельсія LM35/45: а) для додатніх температур; б) для всього діапазону температур

Аналогічні параметри має й інтегральний термодатчик LM50, відмінна риса якого — зсув вихідної напруги на  $+500$  мВ, що дає можливість обійтися однополярним живленням у всьому діапазоні вимірюваних температур. LM50 випускається у двох модифікаціях: LM50B — діапазон вимірюваних температур від  $-25$  до  $+100$  °С, точність вимірів  $3$  °С і LM50C — від  $-40$  до  $+125$  °С,  $4$  °С відповідно.

ІДТ LM60 і LM62 працюють при напрузі живлення від  $2,7$  В. Завдяки малому споживанню струму погрішність вимірювання температури через саморозігрів не перевищує  $0,2$  °С у повітрі. LM60 випускається в корпусах

SOT-23 і TO-92, а LM60 — тільки SOT-23. Мікропотужні мініатюрні термодатчики LM20 виготовляються за технологією КМОП, і, хоча температурна залежність вихідної напруги для цих приладів має невелику параболічну складову, максимальна погрішність вимірювань у всім діапазоні вимірюваних температур від  $-55$  до  $+130$  °C для ІДТ модифікації LM20В не перевищує  $\pm 2,5$  °C, а для LM20С —  $\pm 5$  °C. На відміну від розглянутих вище датчиків, виконаних за біполярною технологією, в LM20 температурний коефіцієнт негативний.

У діапазоні температур від  $-40$  до  $+85$  °C вихідна напруга  $U$  описується лінійною функцією температури й має вигляд

$$U = -11,67 \text{ мВ/}^\circ\text{C} * T + 1,8583 \text{ В}$$

з погрішністю не більше  $\pm 0,65$  °C. Для розрахунків у всім температурному діапазоні для збереження мінімальної погрішності в коефіцієнти варто вносити виправлення. Завдяки зверхмалому споживанню струму (максимально 10 мкА), LM20 прекрасно підходять для використання в пристроях з батарейним живленням, відзначимо також, що саморозігрів термодатчика в повітрі не перевищує 0,02 °C. Випускаються в корпусах SC-70-5 і micro SMD.

Інтегральний датчик температури LM56 призначений для використання в термостатах. Функціональна схема ІДТ LM56 і графіки, що пояснюють особливості його функціонування, представлені на рис. 2.5. Використовуючи зовнішні резистори й внутрішнє джерело опорної напруги 1,250 В, на контактах 3 і 2 задають граничні напруги перемикавання компараторів VT1 і VT2, що відповідають заданим температурам T1 і T2. У результаті на виході 1 (OUT1 — контакт 7) формується напруга низького рівня, якщо температура перевищить значення T1, і, відповідно, напруга високого рівня, якщо температура впаде нижче значення T1 – Thyst (Thyst = 5 °C). Аналогічно стосовно температури T2 формується сигнал на виході 2 (OUT2 — контакт 8). Напруга на виході мікросхеми VTEMP (контакт 5) пропорційно температурі в градусах Цельсія з коефіцієнтом 6,2 мВ/°C і зміщена на +395

мВ, погрішність вимірювання температури у всім діапазоні не перевищує 3 °С для модифікації LM56ВІМ і 4 °С для LM56СІМ. Типова схема включення ІДТ LM56 наведена на рис. 2.6.

Відзначимо, що максимальний струм колекторів вихідних транзисторів становить усього 50 мкА, що вимагає підключення до них досить високоомного навантаження. LM56 випускаються у звичайних і міні-корпусах SO-8.

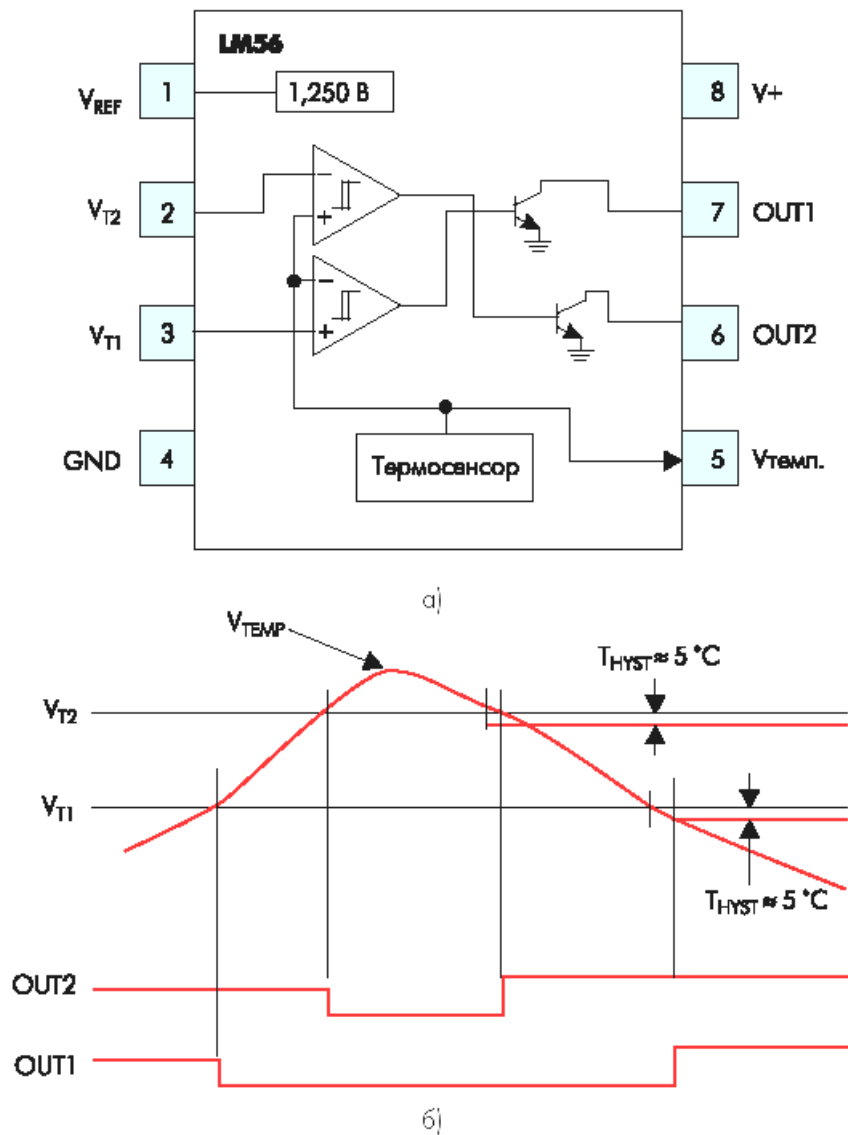


Рисунок 2.5 – Інтегральний датчик температури – термоста LM56:  
а) функціональна схема; б) залежність вихідних напруг від температури

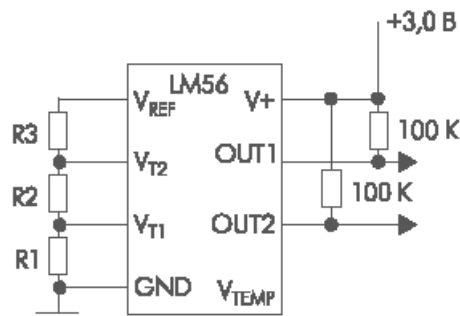


Рисунок 2.6 – Типова схема включення LM56 в режимі двопорогового термостата

Перейдемо тепер до розгляду інтегральних датчиків температури із цифровим виходом. ІДТ LM70 і LM74 представляють сімейство цифрових термодатчиків з послідовним інтерфейсом, сумісним із протоколами Motorola SPI і National Semiconductor MICROWARE. Функціональна схема LM70 наведена на рис. 2.7, LM74 відрізняється від нього 13-бітним АЦП. LM70/74 функціонують як ведені пристрої, повний цикл прийому-передачі даних займає 32 такту сигналу SC, з яких перші 16 приділяються передачі даних на контролер, а другі - прийому. Керування роботою датчика виконується шляхом запису даних у конфігураційний регістр, для ідентифікації ІДТ і зчитування результатів вимірів служать регістр ідентифікації й температурний регістр, що працюють у режимі читання.

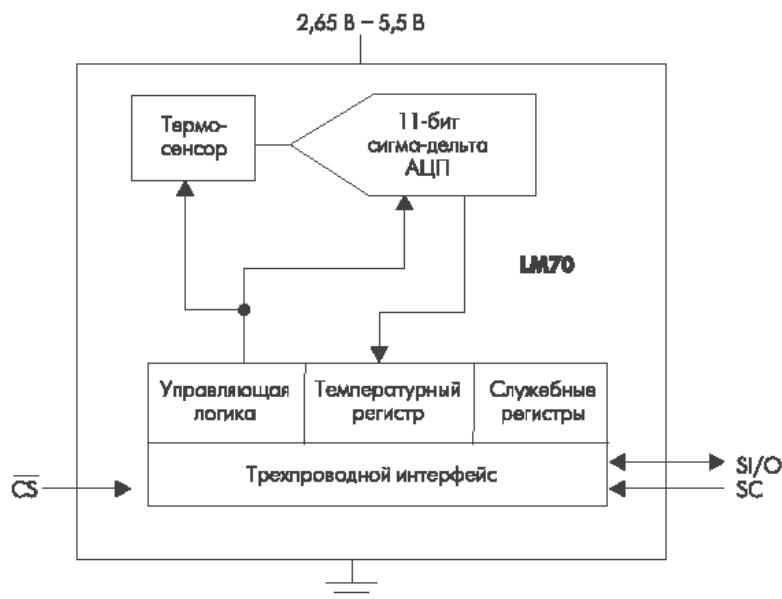


Рисунок 2.7 – Функціональна схема цифрового ІДТ LM70 з послідовним інтерфейсом SPI/MICROWARE

LM70/74 апаратно сумісні практично з будь-якими мікроконтролерами, програмування яких у цьому випадку не становить великої праці. Для економії енергії в інтервалі між вимірами є можливість переключення ІДТ у режим shutdown зі струмом споживання менше 10 мкА, що може бути дуже корисно в пристроях з автономним живленням. Існує два варіанти мікросхем по напрузі живлення: LM70/74-3 - 2,65-3,6 В, LM70/74-5 - 4,5-5,5 В. LM70 випускаються в корпусах з 8 виводами MSOP і LLP, а LM74 - SO-8 і 5-вивідному microSMD.

Цифрові ІДТ LM75-LM77 мають послідовний двопровідний інтерфейс по протоколу Philips I2C, а також додаткові цифрові виходи, що змінюють свій стан, коли температура перевищує задане значення (OverTemper) або виходить із заданих меж (OverWin). Останні виконані з відкритим стоком і можуть використовуватися для побудови термостатів, сигналізаторів перевищення температури, а також для роботи мікроконтролера по перериванню. Функціональна схема LM76 наведена на рис. 2.8. ІДТ функціонують як ведені пристрої, є розвинена система внутрішніх регістрів для установки режимів роботи й параметрів вихідних сигналів. Для полегшення програмування термодатчиків на сайті фірми вільно пропонується відповідне програмне забезпечення. В інтервалі між вимірами є можливість переключення ІДТ у режим shutdown зі струмом споживання не більше 8 мкА. LM75/6/7 випускаються в 3- і 5-вольтовій модифікації в корпусах з 8 виводами SO і MSOP.

Останнє покоління цифрових ІДТ, розроблених фірмою National Semiconductor, як ми вже відзначали вище, крім виміру локальної (власної) температури дозволяє підключати віддалені термодатчики, у якості яких може використовуватися діод або транзистор у діодному включенні, наприклад 2N3904, а також сенсор, вбудований у мікропроцесор. Сімейство



### 3 Аналіз та синтез системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна

#### 3.1 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння

Елементи структурної схеми САР розташовані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи потрібно перемножити передаточні функції всіх елементів [3, 4]:

$$W_p(p) = W_{BM}(p) \cdot W_{OP}(p) \cdot W_D(p) = \frac{k_{BM} k_{OP} k_D}{p(T_{BM}p + 1)(T_{OP}p + 1)}. \quad (3.1)$$

Для спрощення запису введемо позначення:

$$k = k_{BM} k_{OP} k_D. \quad (3.2)$$

Тоді передаточна функція розімкнутої системи матиме вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_{BM}p + 1)(T_{OP}p + 1)}. \quad (3.3)$$

Передаточна функція замкнутої системи, з врахуванням того, що  $W_3(p) = 1$ , розраховується за формулою

$$W_3(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_{BM}p + 1)(T_{OP}p + 1) + k}. \quad (3.4)$$

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_{BM}T_{OP}p^3 + (T_{BM} + T_{OP})p^2 + p + k = 0. \quad (3.5)$$

Підставимо параметри елементів системи у характеристичне рівняння.

$$k_{BM} = 5 \text{ град} / \text{В}; \quad k_{OP} = 3,5; \quad k_D = 1 \text{ В} / \text{град}; \quad T_{BM} = 1,6 \text{ с}; \quad T_{OP} = 0,02 \text{ с}.$$

$$0,032p^3 + 1,62p^2 + p + 17,5 = 0. \quad (3.6)$$

### 3.2 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи

#### 3.2.1 Побудова АФЧХ розімкнутої системи.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи необхідно у відповідній передаточній функції провести заміну  $p = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – частота), виділити дійсну  $P(\omega)$  і уявну  $Q(\omega)$  частини та, змінюючи частоту від 0 до  $\infty$ , відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned} W_p(j\omega) &= \frac{k}{j\omega(T_{BM}j\omega + 1)(T_{OP}j\omega + 1)} = \frac{k}{T_{BM}T_{OP}(j\omega)^3 + (T_{BM} + T_{OP})(j\omega)^2 + j\omega} = \\ &= \frac{k}{-jT_{BM}T_{OP}\omega^3 - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2 + j\omega} = \frac{k}{-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2 + j(\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3)} = \\ &= \frac{k(-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2 - j(\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))}{(-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2)^2 + ((\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))^2} \end{aligned}$$

Отже, підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$\begin{aligned} P(\omega) &= \frac{k(-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2)}{(-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2)^2 + ((\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))^2} = \frac{17,5(-1,62\omega^2)}{(-1,62\omega^2)^2 + (\omega - 0,032 \cdot \omega^3)^2}; \\ Q(\omega) &= \frac{k(-(\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))}{(-(T_{BM} + T_{OP})\omega^2)^2 + ((\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))^2} = \frac{17,5(-(\omega - 0,032 \cdot \omega^3))}{(-1,62\omega^2)^2 + (\omega - 0,032 \cdot \omega^3)^2}. \end{aligned}$$

Побудуємо графік АФЧХ розімкнутої системи (рис. 3.1).

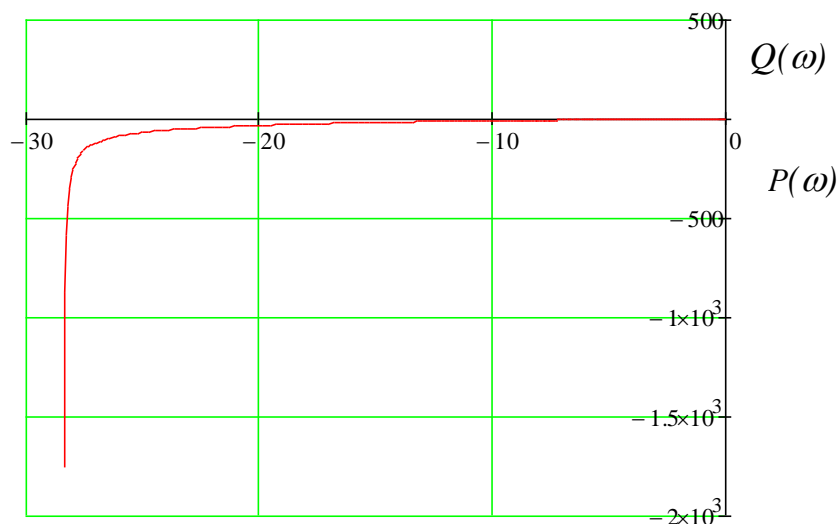


Рисунок 3.1 – АФЧХ розімкнутої системи

### 3.2.2 Побудова ЛАЧХ розімкнутої системи.

Для побудови ЛАЧХ за допомогою асимптотичного методу передусім потрібно знайти спрягаючі частоти за сталими часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_{BM}} = \frac{1}{1,6} = 0,625 \text{ с-1, належить аперіодичній ланці;}$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_{OP}} = \frac{1}{0,02} = 50 \text{ с-1, належить аперіодичній ланці.}$$

Знайдені спрягаючі частоти відмічаємо на осі частот в логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при  $\omega < \omega_0$  являє собою пряму з нахилом  $-20$  дБ/дек, так як система містить інтегруючу динамічну ланку. Ця пряма або її продовження при  $\omega = 1$  повинна мати ординату, яка дорівнює  $20 \lg k = 24,9$  дБ ( $k = 17,5$  – коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

Після кожної із спрягаючих нахил характеристики  $L(\omega)$  змінюється порівняно з попереднім значенням на  $-20$  дБ/дек, так як дані частоти належать аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. Високочастотна асимптота ЛАЧХ, тобто її частина при частотах, більших  $\omega_1$ , має нахил  $-60$  дБ/дек.

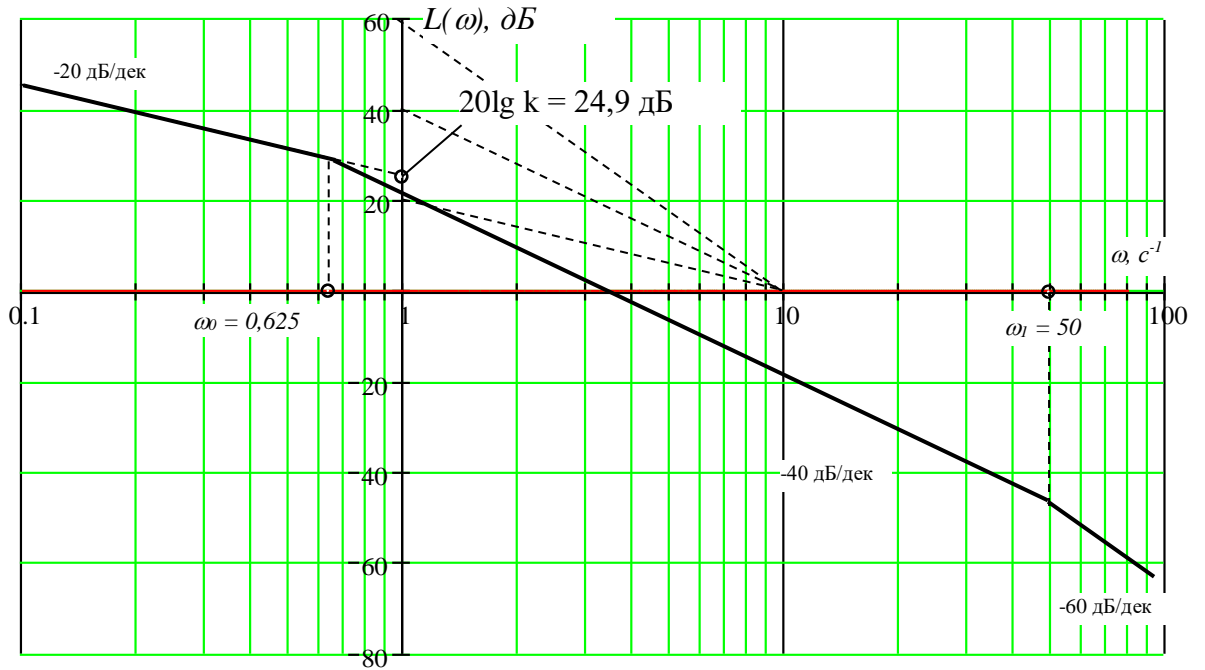


Рисунок 3.2 – ЛАЧХ розімкнутої системи  $L(\omega)$

### 3.2.3 Побудова ЛФЧХ розімкнутої системи.

ЛФЧХ одноконтурної розімкнутої системи отримується в результаті простого складання ординат фазових характеристик типових ланок:

$$\phi(\omega) = \left( -\arctg(\omega T_{OP}) - \left( \frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_{BM}) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3.7)$$

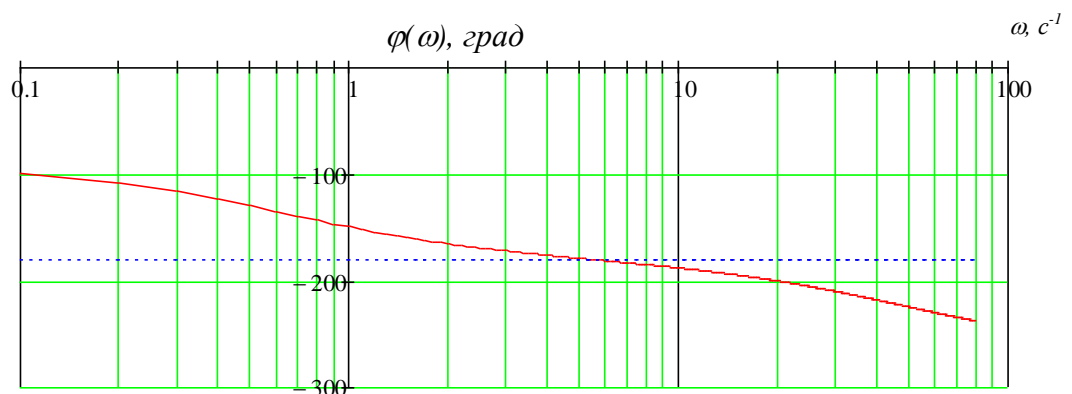


Рисунок 3.3 – ЛФЧХ розімкнутої системи  $\phi(\omega)$

### 3.3 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи

Для цього необхідно виділити дійсну частину передаточної функції замкнутої системи, провівши заміну  $p = j\omega$  ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  - частота), та, змінюючи частоту від 0 до  $\infty$ , відкласти відповідні значення  $P_3(\omega)$ :

$$W_3(\omega) = \frac{k}{p(T_{BM}p+1)(T_{OP}p+1)+k} = \frac{k}{T_{BM}T_{OP}p^3 + (T_{BM} + T_{OP})p^2 + p + k};$$

Підставимо  $p = j\omega$ , отримаємо:

$$W_3(\omega) = \frac{k}{T_{BM}T_{OP}(j\omega)^3 + (T_{BM} + T_{OP})(j\omega)^2 + j\omega + k} = \frac{k}{-jT_{BM}T_{OP}\omega^3 - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2 + j\omega + k} =$$

$$= \frac{k}{(k - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2) + j(\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3)} = \frac{k((k - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2) - j(\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3))}{(k - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2)^2 + (\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3)^2}$$

Виділимо дійсну частину:

$$P_3(\omega) = \frac{k(k - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2)}{(k - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2)^2 + (\omega - T_{BM}T_{OP}\omega^3)^2} = \frac{17,5(17,5 - 1,62\omega^2)}{(17,5 - 1,62\omega^2)^2 + ((\omega - 0,032 \cdot \omega^3))^2}$$

Побудуємо графік дійсної частотної характеристики замкнутої системи (рис. 3.4).

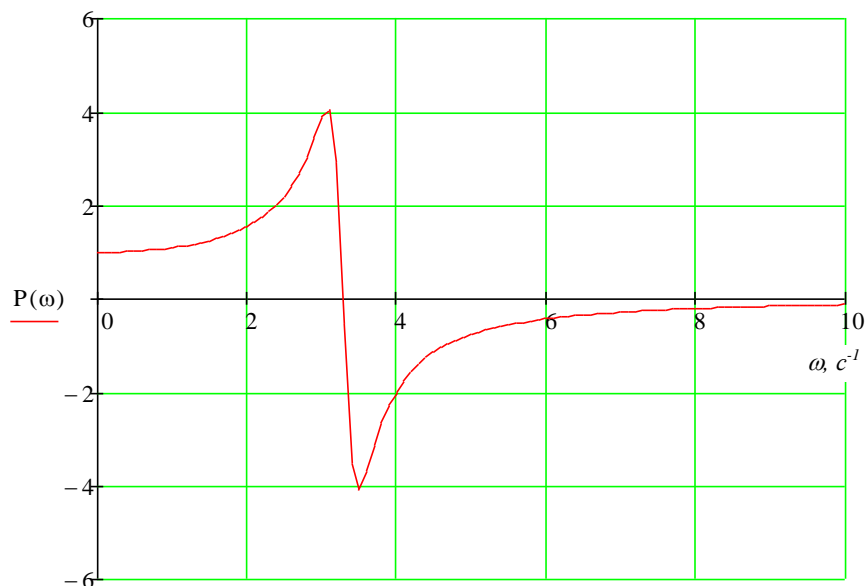


Рисунок 3.4 – Дійсна частотна характеристика замкнутої системи

### 3.4 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості.

#### Побудова області стійкості

3.4.1 Дослідження системи на стійкість за допомогою критерію Гурвіца.

Критерій стійкості Гурвіца (алгебраїчний критерій) дає змогу визначити стійкість системи автоматичного регулювання досить високого порядку, але користуватись цим критерієм порівняно легко лише при рівняннях до п'ятого порядку, оскільки надалі зростає складність обчислень.

Згідно з цим критерієм умови стійкості формулюються таким чином.

Всі корені характеристичного рівняння  $T_{BM}T_{OP}p^3 + (T_{BM} + T_{OP})p^2 + p + k = 0$  матимуть від'ємні дійсні частини, якщо при додатному знаку всіх коефіцієнтів будуть додатними головний визначник Гурвіца  $\Delta_2 > 0$  і його діагональні мінори більше нуля. Підставивши значення коефіцієнтів та сталих часу, отримаємо:

$$0,032p^3 + 1,62p^2 + p + 17,5 = 0.$$

$$\Delta_2 := \left| \begin{pmatrix} 1.62 & 17.5 \\ 0.032 & 1 \end{pmatrix} \right|$$

$$\Delta_2 = 1.06$$

Виходячи з того, що головний визначник  $\Delta_2 = 1,06 > 0$ , створений за правилом знаходження визначників Гурвіца та всі коефіцієнти мають додатній знак, можна зробити висновок, що система за критерієм стійкості Гурвіца стійка.

3.4.2 Дослідження системи на стійкість та визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова.

За цим критерієм стійкість замкнутої системи автоматичного регулювання визначають за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкнутої системи (рис. 8). Розімкнута система автоматичного регулювання стійка в тому разі, коли складається тільки із стійких динамічних ланок (має не більше однієї інтегруючої ланки). Якщо розімкнута система автоматичного керування є стійкою, то для стійкості замкнутої системи необхідно і достатньо, щоб АФХ розімкнутої системи не охоплювала точку з координатами  $(-1, j0)$  при зміні частоти від  $0$  до  $\infty$ .

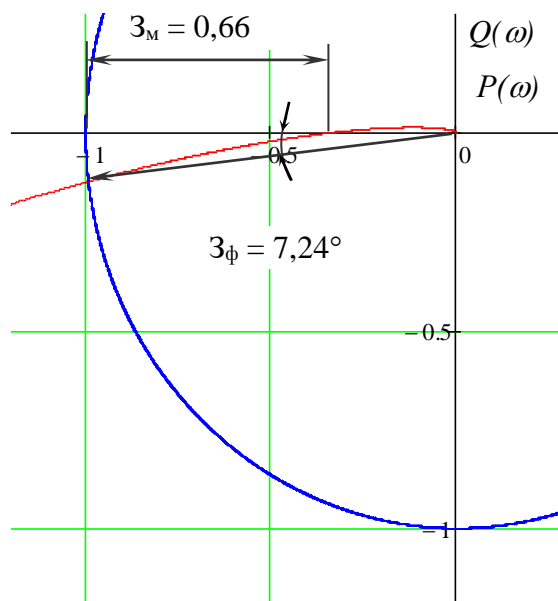


Рисунок 3.5 – Визначення запасів стійкості за модулем і фазою за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова

Таким чином маємо: за критерієм Найквіста-Михайлова система стійка і запас стійкості за модулем  $Z_m = 0,66$ ; за фазою –  $Z_\phi = 7,24^\circ$ .

3.4.3 Дослідження системи на стійкість та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного параметра.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметру  $k_{ВМ}$ , тому що його легко змінювати шляхом підбору коефіцієнту підсилення підсилювача:

Характеристичне рівняння має вигляд:

$$T_{BM}T_{OP}p^3 + (T_{BM} + T_{OP})p^2 + p + k_{BM}k_{OP}k_{\dot{A}} = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння відносно  $k_{BM}$ :

$$K(p) = -\frac{(T_{BM}T_{OP}p^3 + (T_{BM} + T_{OP})p^2 + p)}{k_{OP}k_{\dot{A}}}$$

Підставивши  $p = j\omega$  та виділивши дійсну і уявну частини даного виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = -\frac{(-jT_{BM}T_{OP}\omega^3 - (T_{BM} + T_{OP})\omega^2 + j\omega)}{k_{OP}k_{\dot{A}}} = \frac{(T_{BM} + T_{OP})\omega^2}{k_{OP}k_{\dot{A}}} + j\frac{(T_{BM}T_{OP}\omega^3 - \omega)}{k_{OP}k_{\dot{A}}}$$

$$P(\omega) = \frac{(T_{BM} + T_{OP})\omega^2}{k_{OP}k_{\dot{A}}}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_{BM}T_{OP}\omega^3 - \omega)}{k_{OP}k_{\dot{A}}}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметру  $k_{BM}$  при зміні частоти від  $-\infty$  до  $+\infty$  (рис. 3.6).

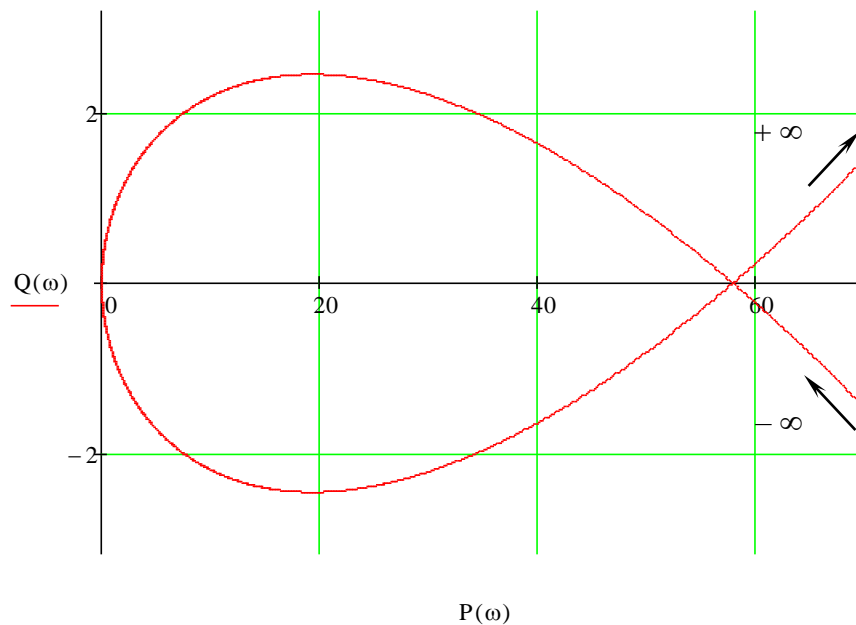


Рисунок 3.6 – D-розбиття в площині параметру  $k_{BM}$

Оскільки у стійкій системі всі корені містяться ліворуч від уявної осі, при обході її від  $-\infty$  до  $+\infty$  ділянка стійкості також буде ліворуч від добутої кривої. Для зручності відшукування ділянки стійкості можна нанести на криву штриховку зліва при русі від  $-\infty$  до  $+\infty$ . З побудованої області стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта  $k_{BM}$ , яке в даному випадку

дорівнює  $k_{\text{ВМкр}} = 58$ . Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення підсилювача  $k_{\text{ВМ}} = 5$  входить в зону стійкості, а значить для подальших розрахунків можна залишити задане значення цього параметра.

### 3.5 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

Оцінка якості регулювання замкнутої САР полягає в визначенні запасу стійкості (по модулю і фазі), та частоти зрізу. Для визначення цих величин будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при чому виконуємо їх взаємне розміщення.

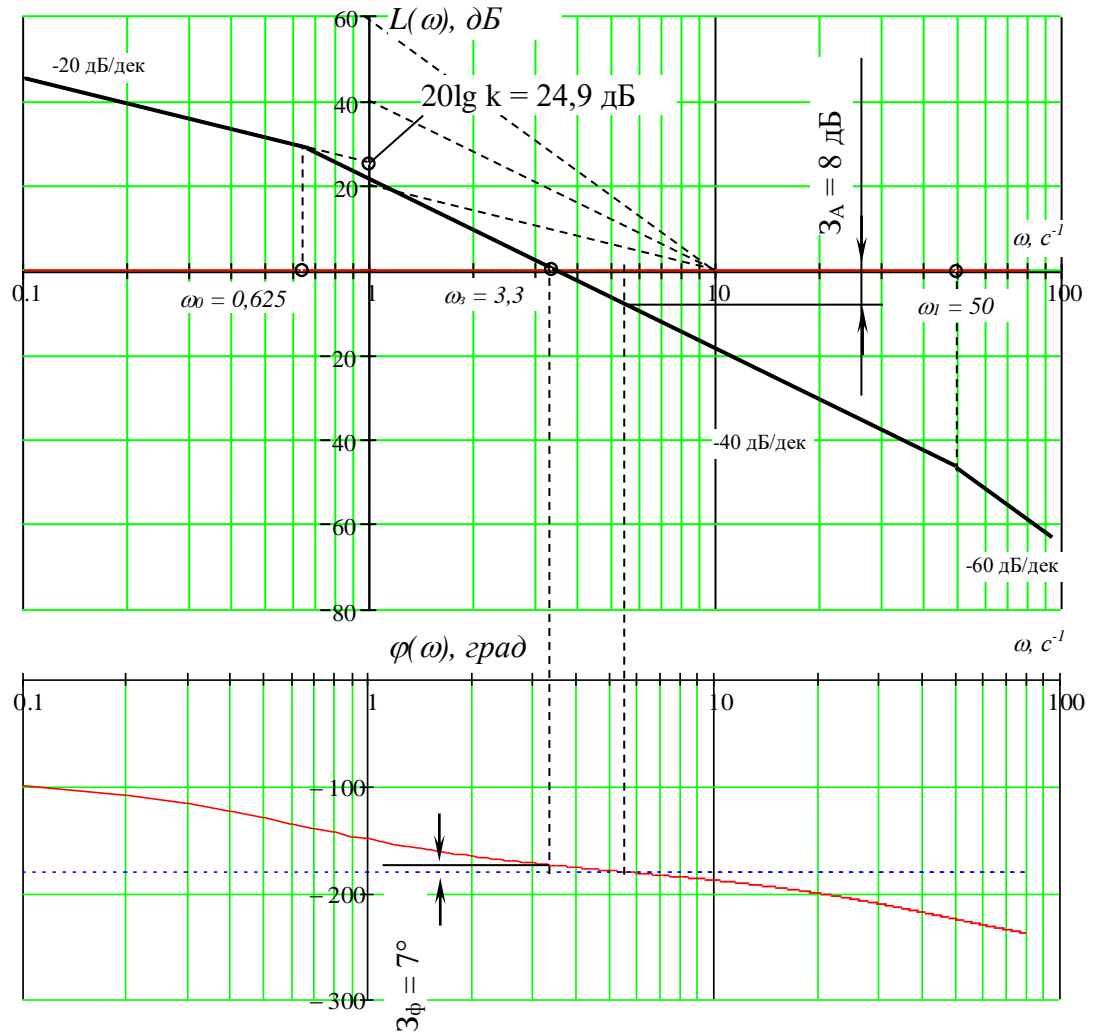


Рисунок 3.7 – Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи

З даної побудови можна визначити: частота зрізу  $\omega_3 = 3,3 \text{ с}^{-1}$ , звідки можна визначити час регулювання, поставивши систему в жорсткі умови,  $t_p = \frac{2\pi}{\omega_3} = 1,9 \text{ с}$ ; запас стійкості по амплітуді  $z_A \approx 8 \text{ дБ}$ ; запас стійкості по фазі  $z_\phi \approx 7^\circ$ .

### 3.6 Побудова перехідного процесу замкнутої системи

Регульована величина в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого діяння описується залежністю

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.8)$$

Підставляючи відповідні значення, отримаємо наступний графік (рис. 3.8).

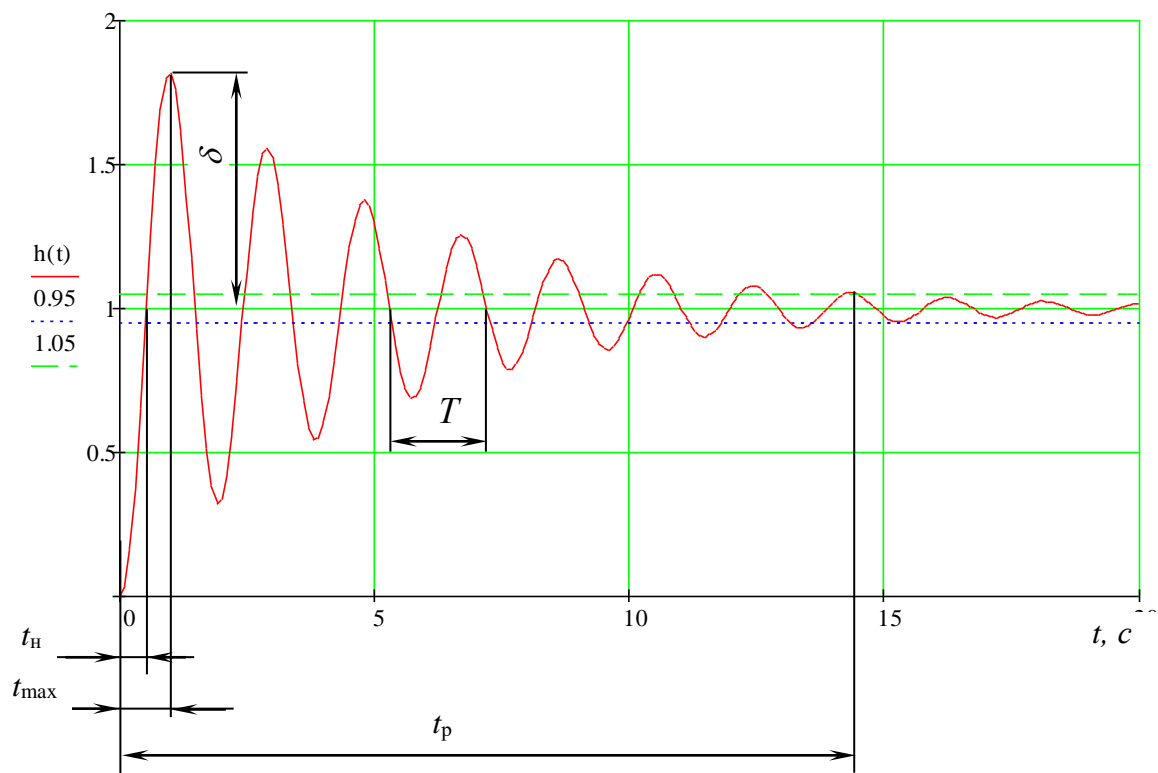


Рисунок 3.8 – Графік перехідного процесу вихідної системи

По графіку можна зробити висновок, що перехідний процес – коливальний, він здійснюється з незмінним періодом коливань.

### **3.7 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу**

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

- час регулювання  $t_p \approx 14,5$  с – це час від початку дії вхідного діяння до входження системи в зону  $2\Delta$ , він залежить від швидкодії динамічних ланок та від їх кількості в головному контурі; через те, що до системи ставляться жорсткі вимоги, то даний параметр, як вимога до САР для її аналізу та синтезу, приймається рівним  $t_p = 1,9$  с, як визначено по ЛАЧХ розімкнутої системи, чим поставимо ще більш жорсткі умови;

- перерегулювання  $\delta = 81,9$  %;
- частота коливань  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 3,5$  с<sup>-1</sup>, де  $T = 1,8$  с – період коливань;
- кількість коливань перехідного процесу  $n = 7$ ;
- час досягнення першого максимуму  $t_{\max 1} = 1,0$  с;
- час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,5$  с – це час досягнення вихідною величиною усталеного значення;
- декремент затухання перехідного процесу характеризує затухання перехідного процесу, це відношення відхилень сусідніх коливань  $d = 1,47$ .

Згідно вимог до системи, час регулювання для проведення її аналізу та синтезу приймається  $t_p = 1,33$  с.

### **3.8 Аналіз системи автоматичного регулювання**

Аналіз являє собою метод проб і помилок. При аналізі розробляють принципіальну схему системи з врахуванням досвіду такої розробки, потім

отримують структурну схему і рівняння динаміки, за якими досліджують САР на стійкість, визначають показники якості.

У випадках отримання від'ємних результатів, змінюються параметри та структура системи і знову обчислюються показники якості. В результаті кількох проб отримується система, яка задовольняє поставленим вимогам. Розроблені спеціальні прийоми, які дозволяють аналіз САР виконати ефективніше. До них можна віднести заходи підвищення якості в усталеному режимі, забезпечення стійкості і підвищення запасу стійкості, покращення показників якості системи.

Для аналізу САР та підвищення запасу стійкості системи в даній роботі застосовано демпфування з підняттям високих частот. Цей спосіб підвищення запасу стійкості теоретично є універсальним і дає бажаний результат практично при будь-якій передаточній функції вихідної системи. Крім того, одночасно із збільшенням запасу стійкості підвищується швидкодія системи. Проте практичне застосування цього способу значно обмежується, через те що при розширенні смуги пропускання системи зростає вплив високочастотних перешкод. Ефект демпфування досягається за рахунок послідовного введення інтегро-диференціюючої ланки з передаточною функцією:

$$W_k(p) = \frac{(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)} \quad (3.9)$$

Для знаходження оптимальних значень сталих часу для даної передаточної функції використовується метод проб та помилок:

1.  $T_2 = 3,33$  с;  $T_3 = 0,1$  с.

Після введення в систему такої ланки ЛАЧХ розімкнутої системи прийняла вигляд, наведений на рис. 3.9.

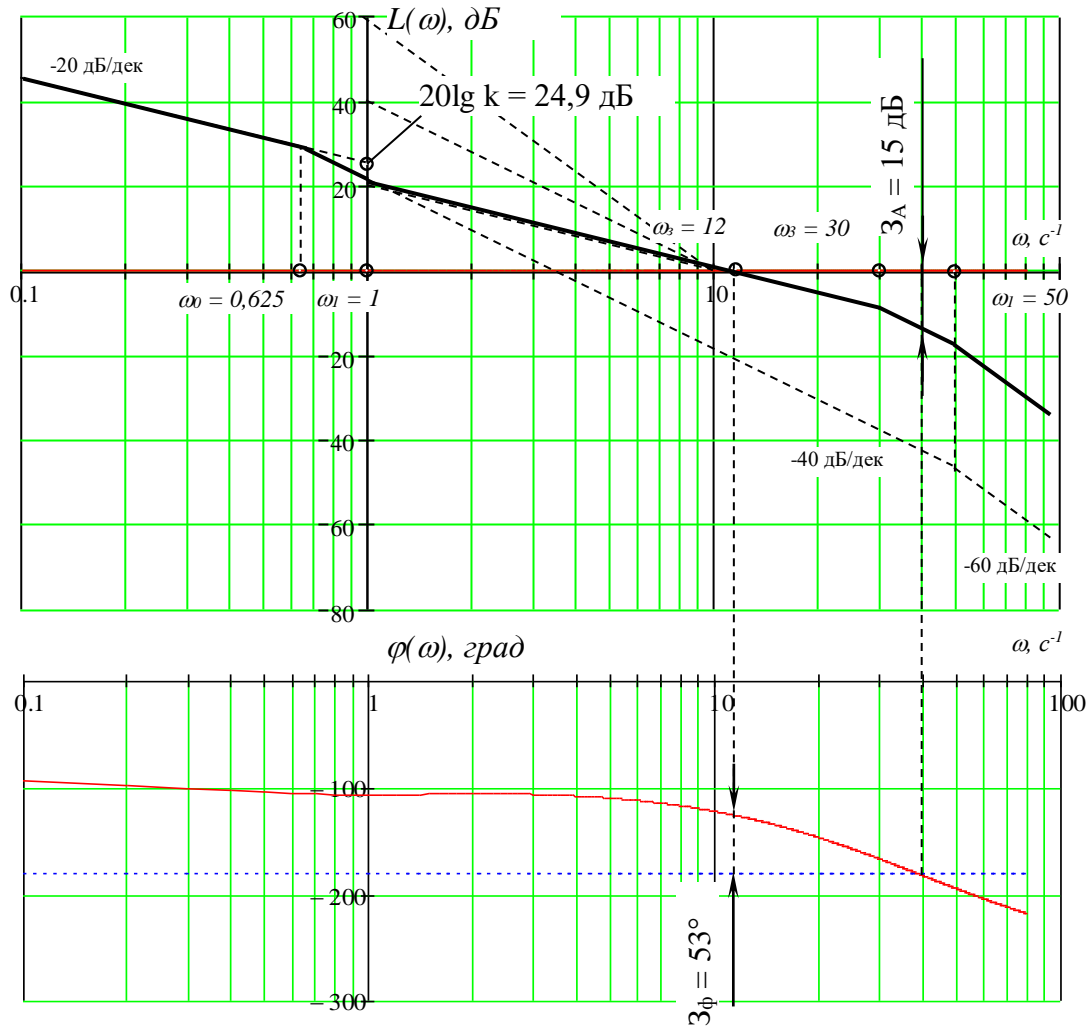


Рисунок 3.9 – Визначення показників якості, перший етап аналізу

З даної побудови можна визначити: частота зрізу  $\omega_z = 12 \text{ с}^{-1}$ , звідки можна визначити час регулювання  $t_p = 0,52 \text{ с}$ ; запас стійкості по амплітуді  $z_A \approx 15 \text{ дБ}$ ; запас стійкості по фазі  $z_\phi \approx 53^\circ$ . Як видно, корегуюча ланка з такими сталими часу задовольняє поставленим до системи вимогам. Проте перевіримо прямі показники якості системи.

### 3.9 Побудова перехідного процесу і визначення показників якості для системи, розробленої шляхом аналізу

Проведемо побудову графіка перехідного процесу аналогічно побудові такого графіка для вихідної системи, отримаємо рис. 3.10.

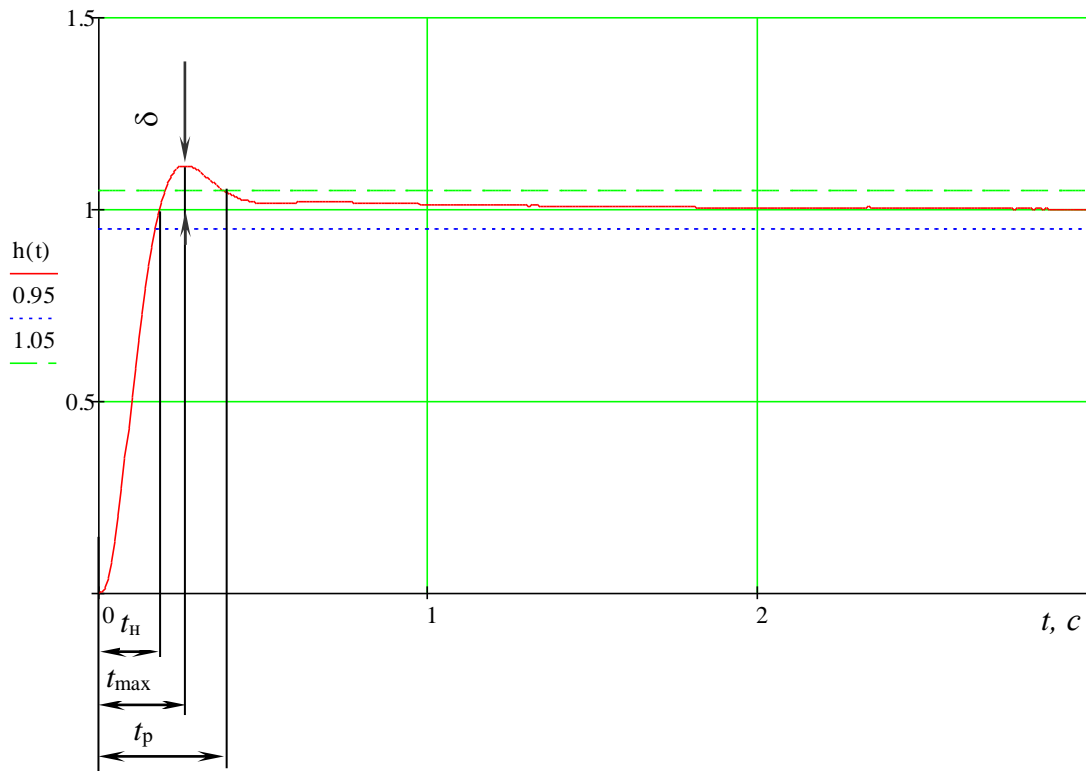


Рисунок 3.10 – Графік перехідного процесу системи, розробленої шляхом аналізу

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

час регулювання  $t_p = 0,39$  с;

перерегулювання  $\delta = 11,4$  %;

час досягнення першого максимуму  $t_{\max} = 0,26$  с;

час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,2$  с;

перехідний процес аперіодичний з перерегулюванням (на відміну від перехідного процесу вихідної системи).

Таким чином, реалізація отриманого виразу передаточної функції коректуючого пристрою задовольнить задані вимоги по якості системи.

### 3.10 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї

Вимоги до синтезуємої САР: час регулювання  $t_p = 1,33$  с; максимальне перерегулювання  $\delta = 25\%$ ; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше  $30^\circ$ . Для синтезу САР необхідно побудувати вихідну ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коректуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ виконується в кілька етапів.

Побудова в області низьких частот аналогічна до побудови ЛАЧХ незмінної системи. Тобто проводиться асимптота з нахилом  $-20$  дБ/дек через точку з координатами  $20 \lg k = 24,9$  дБ.

Побудова в області середніх частот – це найбільш відповідальна асимптота. В даному діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перерегулювання та тривалістю перехідного процесу. З міркувань наближення реального процесу до оптимального (за швидкодією) нахил середньо частотної асимптоти бажаної ЛАЧХ вибирається  $-20$  дБ/дек. Вибір частоти зрізу  $\omega_z$  (частота, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) виконують на підставі нерівності  $\omega_{z\min} \leq \omega_z \leq \omega_{z\text{opt}}$ . Для того, щоб задовольнити вимоги до якості системи, необхідно, щоб  $\omega_z$  була менше частоти зрізу  $\omega_{z\text{opt}}$ , яка визначається за максимальним прискоренням координати і величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того дана частота  $\omega_z$  повинна бути більше  $\omega_{z\min}$ , яка вибирається за заданим значенням максимального перерегулювання  $\delta_m$  та тривалістю регулювання  $t_p$ . По заданому значенню  $\delta_m$  за допомогою кривої  $\delta = f(P_{z\max})$  номограми  $\delta = f(P_{z\max})$  визначаємо відповідне значення  $P_{z\max}$ . Потім по значенню  $P_{z\max}$  за допомогою кривої  $t_p = f(P_{z\max})$  визначаємо значення  $\frac{3\pi}{t_p}$ .

Цю величину прирівнюємо до заданого значення  $t_p = 1,33$  с і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу  $\omega_{z\min} = 7,1$  с<sup>-1</sup>.

Вибрану частоту зрізу  $\omega_z = 10 \text{ c}^{-1}$  (дещо збільшену), наносимо на графік (рис. 3.11). Потім будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку  $\omega_z$  на осі абсцис з нахилом  $-20 \text{ дБ/дек}$ .

По відомому значенню  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  дійсної частотної характеристики знаходимо мінімальне значення  $P_{\text{зmin}}$ , використовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики  $P_{\text{зmin}} = 1 - P_{\text{зmax}} = -0,2$ .

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи по амплітуді і фазі треба продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості знаходять по номограмам  $L(\omega) = f(\varphi)$  при  $P_z$  дорівнює константі – це колові діаграми,  $P_z$  – значення дійсної частотної характеристики замкнутої системи. Отже по номограмі знаходимо лінії, які відповідають  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  і  $P_{\text{зmin}} = -0,2$ . Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості по амплітуді знайдемо, провівши до цих кривих горизонтальні дотичні і прочитавши відповіді на осі ординат,  $L_1 = 15 \text{ дБ}$ ,  $L_2 = -15 \text{ дБ}$ , тобто середньочастотну асимптоту треба продовжити ліворуч і праворуч до ординат  $L_1$  та  $L_2$  і лише після цього спрягати з сусідніми ділянками [4].

Запас стійкості по фазі  $\gamma$  знайдемо, провівши вертикальні дотичні до кривих  $P_{\text{зmax}} = 1,2$  і  $P_{\text{зmin}} = -0,2$  і відрахувавши значення кута в градусах від дотичної до лінії  $-180^\circ$ . В даному випадку  $\gamma = 45^\circ$  [4], [5].

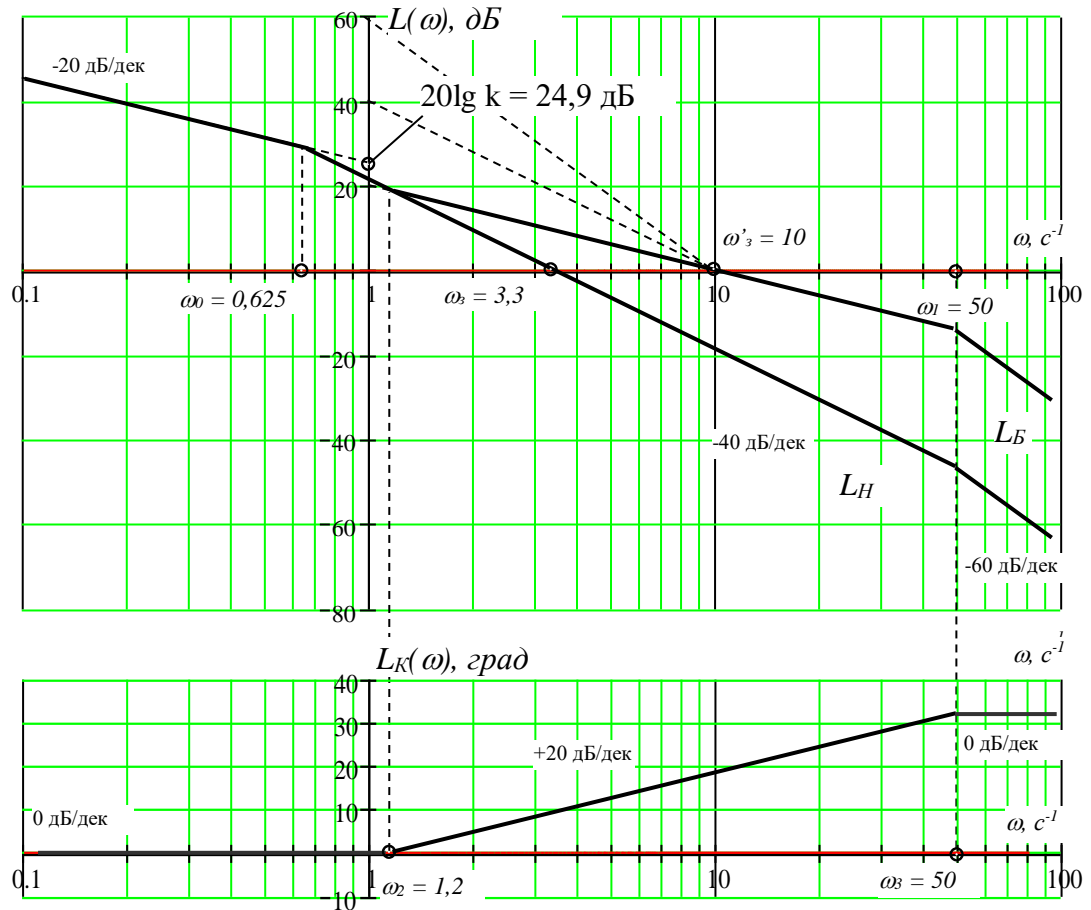


Рисунок 3.11 – Побудова бажаної ЛАЧХ та визначення ЛАЧХ корегуючого пристрою

ЛАЧХ коректуючого пристрою визначаємо як різницю бажаної та незмінної ЛАЧХ  $L_k(\omega) = L_b(\omega) - L_n(\omega)$  (рис. 3.11).

Передаточна функція такого коректуючого пристрою у загальному вигляді:

$$W_{kn}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)}$$

де  $T_2 = 1/\omega_2 = 1/1,2 = 0,83$  с;

$T_3 = 1/\omega_3 = 1/50 = 0,02$  с.

Підставивши у рівняння загального виду сталі часу, матимемо передаточну функцію коректуючого пристрою:

$$W_{kn}(p) = \frac{1 \cdot (0,83p + 1)}{(0,02p + 1)}$$

### 3.11 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР

Запишемо передаточну функцію замкнутої скорегованої системи

$$W_{3K}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{p(T_{BM} p + 1)(T_{OP} p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (3.10)$$

Провівши заміну  $p = j\omega$ , виділимо дійсну частину передаточної функції замкнутої скорегованої системи для побудови дійсної частотної характеристики:

$$P_{3K}(\omega) = \frac{k \cdot T_2 \omega \left( (1 + kT_2)\omega^5 - T_{BM}(T_{OP} + T_{BM} + T_{OP}T_3)\omega^3 \right) + k \left( T_{BM}T_{OP}T_3\omega^4 - (T_{OP} + T_{BM} + T_3)\omega^2 + k \right)}{\left( T_{BM}T_{OP}T_3\omega^4 - (T_{OP} + T_{BM} + T)\omega^2 + k \right)^2 + \left( (1 + kT_2)\omega^5 - T_{BM}(T_{OP} + T_{BM} + T_{OP}T_3)\omega^3 \right)^2}$$

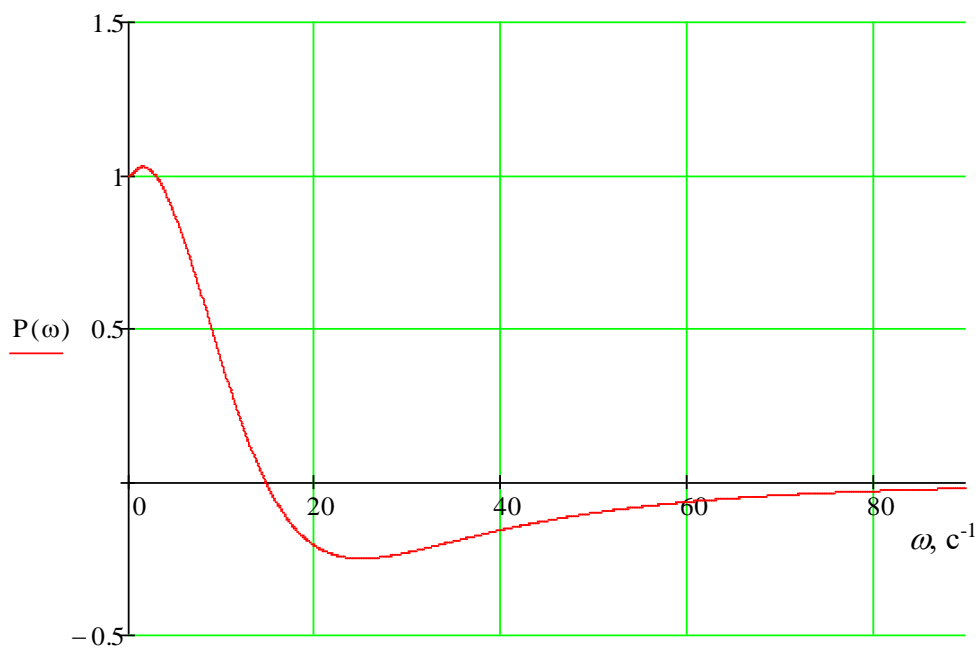


Рисунок 3.11 – Дійсна частотна характеристика замкнутої скорегованої системи

Побудуємо криву перехідного процесу синтезованої САР температури повітря в приміщенні (рис. 3.12).

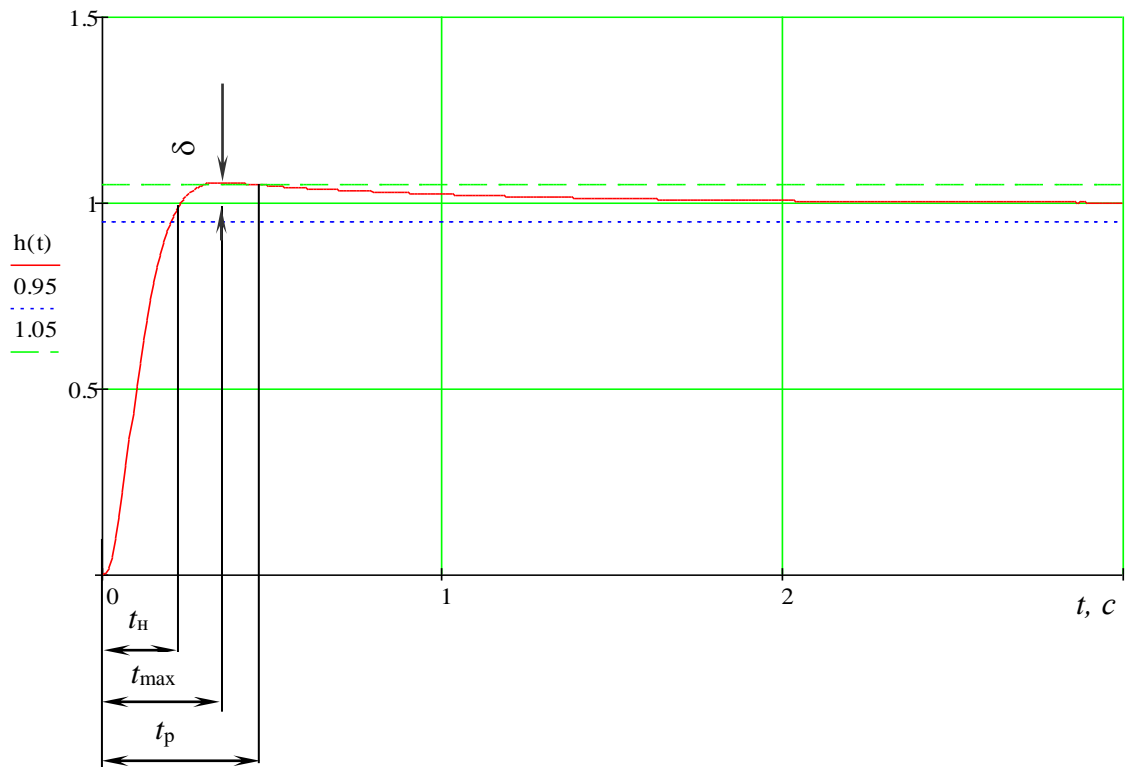


Рисунок 3.12 – Графік перехідного процесу системи, скоректованої шляхом синтезу

### 3.12 Визначення прямих показників якості синтезованої САР

З побудованого перехідного процесу можна визначити наступні прямі показники якості САР:

час регулювання  $t_p = 0,5$  с;

перерегулювання  $\delta = 5,6$  %;

час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,23$  с;

час досягнення першого максимуму  $t_{max} = 0,37$  с;

по вигляду кривої цей перехідний процес аперіодичний з перерегулюванням.

Таким чином, реалізація отриманого виразу передаточної функції коректуючого пристрою задовольнить задані вимоги по якості системи.

## 4 Практична реалізація системи автоматичної стабілізації

### 4.1 Визначення періоду дискретизації

Перетворення неперервних сигналів у дискретні пов'язано з наявністю в системі дискретного елемента, на виході якого утворюється послідовність імпульсів. Таким елементом може бути ключ  $K'$ , який замикається через кожен період квантування  $T$ .

Задачу вибору оптимального періоду квантування  $T$  можна віднести до однієї з основних проблем оптимальних витрат машинного часу під час реалізації систем цифрового керування. При зменшенні  $T$  точність керування й завантаження мікроЕОМ збільшуються, але при цьому неекономно витрачається машинний час. При збільшенні  $T$  погіршується якість керування системи. Тому, природно, виникає проблема пошуку компромісного рішення для задоволення цих суперечливих вимог. Залежно від спектра неперервної функції  $\Theta(t)$  вибір  $T$  здійснюється на підставі теореми Котельникова.

Теорема Котельникова. Функція часу  $\Theta(t)$ , яка не містить гармонічних складових з частотами, вищими від частоти  $\omega_{\max}$  повністю визначається своїми значеннями в моменти часу  $nT$ , що відстають один від одного на періоди

$$T = \frac{\pi}{\omega_{\max}} \quad (4.1)$$

тобто частота квантування має бути вибрана відповідно до умови  $\omega \geq \omega_{\max}$ . У цьому випадку дискретна решітчаста функція точно відобразить неперервну функцію

$$\Theta(t) = \Theta \left[ n \cdot \frac{\pi}{\omega_{\max}} \right] \quad (4.2)$$

і втрати інформації при її квантуванні не буде.

Максимальну частоту  $\omega_{\max}$  у спектрі вихідного сигналу  $\beta(j\omega)$  за амплітудно-частотною характеристикою замкненого контуру цифрового керування можна визначити за допомогою критерію Джурі. Якщо на вхід регулятора подавати гармонічний одиничний сигнал  $\alpha(t) = \sin \omega t$ , то вихідний сигнал замкненого контуру можна подати як функцію, тобто

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}. \quad (4.3)$$

Звідси можна визначити частоту  $\omega_{\max}$  при якій  $|\beta(j\omega)|$  матиме мале значення, тому що замкнена система згладжує високочастотні складові сигналу. Значення  $\Theta_{0\delta}$  визначає точність, яку треба забезпечити на виході системи.

Користуючись вихідними даними визначаємо оптимальний період квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передаточна функція об'єкта керування описується рівнянням

$$W_o(p) = \frac{17,5}{p(0,02p + 1)(1,6p + 1)} \quad (4.4)$$

Частотна передаточна функція регулятора описується рівнянням

$$W_p(p) = \frac{(0,83p + 1)}{(0,02p + 1)} \quad (4.5)$$

При цьому потрібна точність керування об'єктом в усталеному режимі  $\Theta_{om} = 0.1$

Частотна передаточна функція замкненої системи визначається виразом:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)}{1 + W_p(j\omega) \cdot W_o(j\omega)} = \Theta \quad (4.6)$$

В результаті підстановки виразів (4.4, 4.5) в (4.6) одержимо

$$\frac{17,5(0,83 \cdot j\omega + 1)}{j\omega(0,02 \cdot j\omega + 1)(1,6 \cdot j\omega + 1)(0,02 \cdot j\omega + 1) + 17,5(0,83 \cdot j\omega + 1)} = 0,1 \quad (4.7)$$

Розв'язуючи це рівняння, знаходимо частоту  $\omega_{\max} = 12,96$

Оптимальний розрахунковий період квантування сигналів

$$T_{\text{роз}} = \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{\pi}{12,96} = 0,24 \quad (4.8)$$

Приймаємо  $T < T_{\text{роз}}$   $T = 0.01$  с

Ми приймаємо такий період дискретизації тому що для нас важливо забезпечити якомога більшу точність системи.

## 4.2 Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для реалізації мікропроцесорної системи регулювання необхідно виконати Z-перетворення передаточної функції регулятора одержаної синтезом в розділі 3:

$$W_P(p) = \frac{(0,83p + 1)}{(0,02p + 1)} \quad (4.9)$$

Виконаємо розбиття передаточної функції регулятора на елементарні дроби:

$$W_P(p) = 41,5 - \frac{40,5}{(0,02p + 1)}. \quad (4.10)$$

Тепер виконаємо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab, при часі дискретизації  $T_0 = 0.01$  с.

$$W_P(z) = 41,5 - \frac{15,94}{z - 0,6065}. \quad (4.11)$$

$$W_P(z) = 41,5 - \frac{15,94 \cdot z^{-1}}{1 - 0,6065 \cdot z^{-1}} \quad (4.12)$$

За одержаною дискретною передаточною функцією регулятора складемо різницеві рівняння:

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

$$u_1[n] = 41,5 x[n];$$

$$u_2[n] = -15,94 x[n-1] - 0,6065 u_2[n-1];$$

Схему програмної реалізації зображено на рисунку 4.1. Де коефіцієнти рівні:

$$a = 41,5; b_1 = -15,94; b_2 = -0,6065;$$

За одержаною схемою програмної реалізації необхідно побудувати регулятор з використанням мікропроцесора.

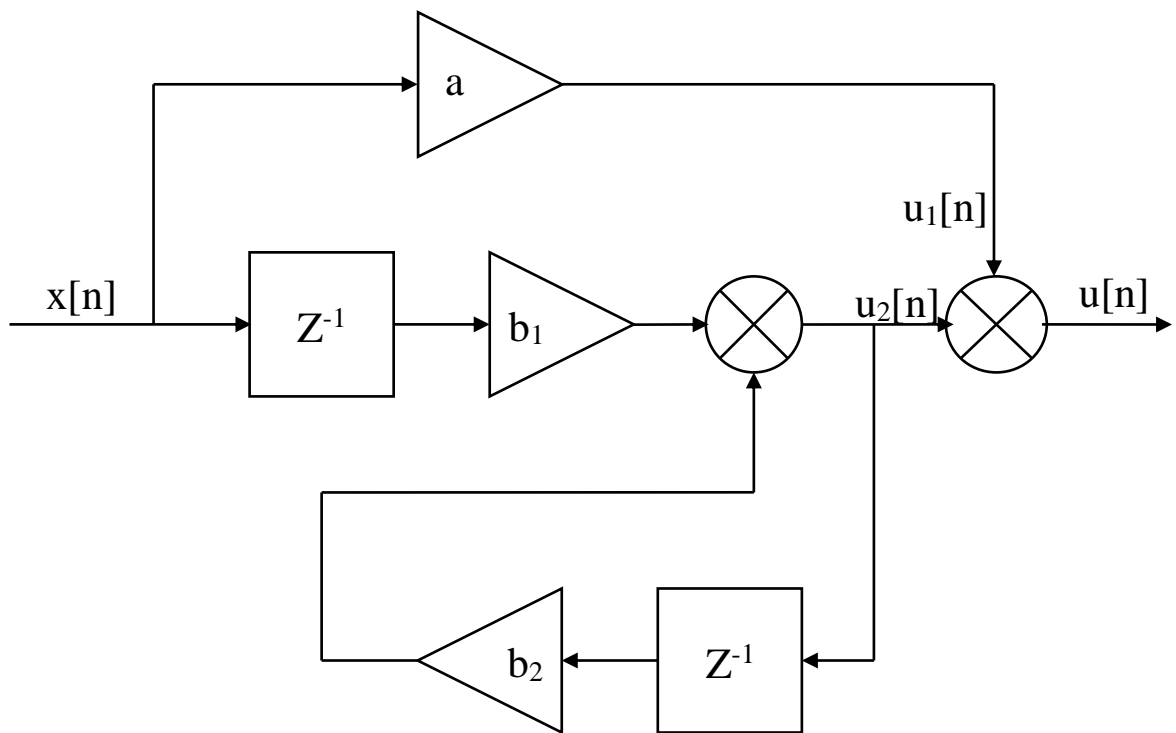


Рисунок 4.1 – Схема програмної реалізації регулятора

### 4.3 Розробка електричної структурної схеми системи

До складу електричної структурної схеми системи входять:

- датчики температури (ДТ1-5);
- задатчик температури (ЗТ);
- аналого-цифровий перетворювач (АЦП);
- однокристална мікро-ЕОМ (ОМЕОМ);
- блок індикації (БІ);

Датчики температури призначені для контролю температури сушки задрукованого матеріалу в зоні дії розподільвача повітря. Оскільки на флексографічній машині ПФО-45 розміщено 5 розподільвачів повітря, тому було прийняте рішення встановити 5 датчиків температури. При цьому за вимірними значеннями визначається середнє значення температури сушки. В якості задатчика температури (ЗТ) використовується сигнал з

потенціометра призначеного для управління швидкістю руху полотна при друку на флексографічній машині.

Аналогові сигнали з датчиків температури та задатчика поступає на аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який входить до блока контролера і призначений для перетворення аналогових сигналів з датчиків у цифровий вигляд зручний для подальшої обробки. З виходу АЦП цифровий сигнал подається на однокристальну мікро-ЕОМ (ОМЕОМ), яка виконує в системі функції збору та обробки інформації, прийняття рішення та формування відповідного сигналу управління згідно з алгоритмом функціонування. Управління АЦП (вибір каналу, запуск перетворення, тактування і т. ін.) також відбувається за допомогою ОМЕОМ.

Для відображення інформації про поточні та встановлені значення температури в схему введено блок індикації (БІ), який керується мікро-ЕОМ. На цифрові індикатори виводиться інформація про значення параметрів технологічного процесу. Крім того на блок індикації виводяться сигнали про стан флексографічної машини, які також формуються мікро-ЕОМ.

Сигнал управління з мікро-ЕОМ подаються на схему управління електрокалорифером. В даному випадку використовується схема управління електрокалорифером, яка встановлена на флексографічній машині, тому ця схема не розглядалась в даному дипломному проекті.

#### **4.4 Розробка електричної функціональної схеми системи**

Датчики температури 1-5 являють собою інтегральні перетворювачі типу «температура-напруга». З виходів датчиків 1-5 аналогова напруга пропорційна температурі поступає на активні фільтри нижніх частот 7-11 відповідно, які призначені для усунення індустріальних перешкод. З фільтрів сигнали подаються на підсилювачі 12-16, які підсилюють сигнали до необхідного рівня. З виходів підсилювачів 12-16 фільтровані та підсилені сигнали подаються на входи IN0-IN4 АЦП 17 відповідно. На інший вхід IN5

АЦП 17 поступає сигнал від датчика температури 6. Датчик температури 6 являє собою перетворювач «опір-напруга», тобто є змінним резистором, який включений в дільник напруги.

Вибір відповідного каналу АЦП 17 відбувається за допомогою мікро-ЕОМ 18, на виходах P2.0-P2.2 якої формуються сигнали вибору каналу у двійковому вигляді. Номер каналу подається на адресні входи AD0-AD2 вбудованого в АЦП дешифратора. Двійковий номер фіксується в АЦП 17 сигналом LE (Latch Enable), який формується на виводі P3.6 мікро-ЕОМ 18. Тактування АЦП відбувається сигналом ALE, який формується мікро-ЕОМ в кожному машинному циклі і подається на вхід CLK АЦП.

Для запуску перетворення АЦП 17 мікро-ЕОМ 18 формує сигнал на виводі P3.4, який поступає на вхід STCNV (Start Converting) запуску АЦП. Після закінчення перетворення АЦП формує сигнал на виводі EOC (End of converting) кінця перетворення, який подається на вхід запиту на переривання INT0 мікро-ЕОМ 18. У відповідь на ці дії мікро-ЕОМ формує сигнал на виводі P3.7, який подається на вхід OE (Output Enable) дозволу виходу, АЦП підключає свої внутрішні регістри до виходів D0-D7, а мікро-ЕОМ зчитує дані з АЦП по лініях P0.0-P0.7.

Порт P1 мікро-ЕОМ 18 використовується для управління 6-розрядним цифровим світлодіодним індикатором 19, на який виводяться поточні або встановлені значення температури. В даній схемі реалізовано принцип програмної динамічної індикації. Суть полягає в тому, що через лінії порту P1 в певний момент часу виводяться дані та номер першого розряду, а в інший момент дані та номер другого розряду і т д в циклі. Кількість циклів відповідає кількості розрядів індикатора. Через лінії P1.0-P1.3 виводяться дані в двійковій системі числення, які поступають на входи перетворювача кодів 20. Перетворювач 20 виконує функцію перетворення двійкового вхідного коду на код семисегментного цифрового індикатора. Виходи перетворювача кодів підключено до індикатора 19.

З виходів P1.4, P1.5 у двійковій формі передається номер активного в даний момент часу розряду, який поступає на входи дешифратора 21. Дешифратор 21 перетворює вхідний двійковий код у позиційний. Таким чином, на виході дешифратора, номер якого відповідає номеру активного розряду з'являється сигнал включення розряду. Цей сигнал поступає на блок ключів 22 і вмикає відповідний ключ активуючи потрібний розряд індикатора 19.

В наступному циклі інші дані будуть виводитись в наступний розряд. Таким чином, послідовно в часі, циклічно будуть виведені дані у всі розряди індикатора.

Управляючий сигнал, який подається на схему управління електрокалорифером формується на виході P2.6.

#### **4.5 Розробка електричної принципової схеми системи**

Оскільки система складається з блоків, будемо розглядати кожний блок окремо.

##### Блок датчиків та задатчиків.

В якості датчиків температури застосовано інтегральні датчики температури типу LM35 компанії National Semiconductor. Датчики даної серії є інтегральними прецизійними температурними датчиками з виходом за напругою, яка прямо пропорційна температурі в °C. Датчики мають лінійну вихідну характеристику у всьому робочому діапазоні температур від -55°C до 150°C. Датчики не потребують додаткової калібровки і зміщення. Датчики потребують малий струм споживання (близько 10  $\mu$ A), що запобігає саморозігріву датчика, а відповідно і появі похибок вимірювань. Напруга живлення датчиків складає 5-40 В. Похибка у всьому робочому діапазоні для зовнішніх застосувань складає  $\frac{3}{4}$ °C. Датчики підключаються до блока мікроконтроллера через роз'єми XP1-XP5. Через ці ж роз'єми на датчики подається напруга живлення, яка додатково фільтрується конденсаторами C1, C5, C9, C13 та C17 в блоці контролера

### Блок контроллера.

Сигнал з датчика подається на вхід активного фільтра, який є низькочастотним фільтром 2-го порядку. Схема фільтра була взята з офіційного сайту виробника і є типовим застосуванням для даного підсилювача. В якості підсилювача DA1.2 використаний здвоєний підсилювач типу MCP602 компанії National Semiconductor. Одна половина підсилювача використана у фільтрі DA1.1, а інша DA1.2 в якості неінверсуючого підсилювача напруги. Коефіцієнт підсилення DA1.2 задається співвідношенням опорів R4 та R3. Всі канали вимірювання температури є ідентичними.

Через роз'єм XP6 подається напруга задатчика температури, яка додатково фільтрується конденсатором C21.

Задатчик температури являє собою перетворювач «опір-напруга», тобто є змінним резистором типу СП5-19, який через роз'єм включений в ділянку напруги на елементах R21, R22. Резистори R21, R22 є обмежувальними.

З виходів підсилювачів фільтровані та підсилені сигнали датчиків температури подаються на входи IN0-IN4 АЦП DD1 відповідно. На інший вхід IN5 АЦП поступає сигнал від задатчика температури. В якості АЦП використано 8-розрядний 8-канальний АЦП типу ADC0809 компанії National Semiconductor.

Вибір необхідного каналу АЦП відбувається за допомогою мікро-ЕОМ DD2, на виходах P2.0-P2.2 якої формуються сигнали вибору каналу у двійковому вигляді. Номер каналу подається на адресні входи AD0-AD2 вбудованого в АЦП дешифратора. Двійковий номер фіксується в АЦП переходом сигналу LE (Latch Enable) з «1» в «0», який формується на виводі P3.6 мікро-ЕОМ програмно. Тактування АЦП відбувається сигналом ALE, який формується мікро-ЕОМ в кожному машинному циклі і подається на вхід CLK АЦП. Після запису номера каналу АЦП готовий до перетворення.

Для запуску перетворення АЦП мікро-ЕОМ DD2 програмно формує сигнал на виводі P3.4, який поступає на вхід STCNV (Start Converting) запуску АЦП. По передньому фронту (наростанню) сигналу починається перетворення, яке займає 8 тактових циклів. Після закінчення перетворення АЦП формує сигнал на виводі EOC (End of converting) кінця перетворення з активним рівнем «1», який подається на вхід запиту на переривання INTO мікро-ЕОМ DD2. Оскільки для запиту на переривання активним є рівень «0», то в схему введено інвертор на DD3.1. У відповідь на ці дії мікро-ЕОМ формує сигнал «1» на виводі P3.7, який подається на вхід OE (Output Enable) дозволу виходу, АЦП підключає свої внутрішні регістри до виходів D0-D7, а мікро-ЕОМ DD2 зчитує дані з АЦП по лініях P0.0-P0.7.

Основою системи є однокристална мікро-ЕОМ DD2, яка виконує в системі функції збору та обробки інформації, прийняття рішення та формування відповідних сигналів управління згідно з алгоритмом функціонування. В схемі використано мікро-ЕОМ типу компанії AT89S51 Atmel. Тактування мікро-ЕОМ відбувається вбудованим тактовим генератором, до виводів якого підключено зовнішній частото задаючий ланцюг на C28C29ZQ1. Апаратний скид контролера при включенні напруги живлення відбувається за допомогою диференціюючого ланцюга на R25C30, який формує короткий імпульс скиду на вході Reset контролера. На вхід вибору режиму роботи із внутрішньою пам'яттю програм ДЕМА через резистор R24 подається «1».

Управління цифровим індикатором здійснюється через роз'єм XS10 блока контролера.

Для програмування ОМЕОМ в схемі передбачений роз'єм XS9. Програмування здійснюється спеціальним програматором засобами інтерфейсу SPI.

Живлення блока контролера відбувається напругою +12 В, яка подається через роз'єм XP7. Для гальванічної розв'язки живлення цифрової та аналогової частини блока в схему введено перетворювачі DA6 та DA7

типу P610U-1205ELF компанії Реак. Дані перетворювачі перетворюють постійну напругу +12 В в +5 В. На виході перетворювачів встановлено згладжуючі (блокуючі) конденсатори С22-С27.

#### Блок індикації.

Порт P1 мікро-ЕОМ через роз'єм XS10 передає сигнали управління індикатором. В даній схемі реалізовано принцип програмної динамічної індикації. Суть полягає в тому, що через лінії порту P1 в певний момент часу в одному байті виводяться дані та номер першого розряду, а в інший момент дані та номер другого розряду і т. д. в циклі. Кількість циклів відповідає кількості розрядів індикатора. Через лінії P1.0-P1.3 виводяться дані в двійковій системі числення, які поступають на входи перетворювача кодів DD1 типу КР514ИД2. Перетворювач виконує функцію перетворення двійкового вхідного коду на код семисегментного цифрового індикатора. Виходи перетворювача кодів підключено до катодів індикаторів HG2, HG3 та HG5, HG6 типу А551. Хоча в схемі використано 6 індикаторів, фактично індикація є 4-розрядною. Індикатори HG1, HG4 використовуються тільки якщо необхідно вивести на індикатори значення більше 100. В цьому випадку HG1, HG4 працюють паралельно з HG2, HG5, але їх катоди В та С завжди підключені через ключовий транзистор VT3 до землі, що відповідає цифрі «1». Таким чином, при виводі цифр більше 100, на лінії P3.6 формується «1», яка підсилюється інверторами на DD2.4, DD2.3, відкриває VT3 і відображує цифру 1.

З виходів P1.4, P1.5 через роз'єм XS7 з блока контролера у двійковій формі передається номер активного в даний момент часу розряду, який поступає на входи дешифратора DD3 типу К555ИД4. Дешифратор перетворює вхідний двійковий код у позиційний. Таким чином, на виході дешифратора, номер якого відповідає номеру активного розряду з'являється сигнал включення розряду. Цей сигнал поступає на блок ключів на транзисторах VT4-VT7, які підключають анод індикатора до напруги живлення, активуючи потрібний розряд індикатора.

В наступному циклі інші дані будуть виводитись в наступний розряд. Таким чином, послідовно в часі, циклічно будуть виведені дані у всі розряди індикатора.

При відкриванні ключів в блоці контролера, сигнали з них подаються через роз'єм XS10 на світлодіодні індикатори HL2 та HL3, які вмикаючись вказують на включення електрокалорифера та вентилятора. Світлодіод HL1 вказує на подачу живлення на блок індикації, яке поступає через роз'єм XS10.

Сигнал аварії подається на блок індикації через роз'єм XS10. Він поступає через інвертор DD2.1 на світлодіод HL4, який вказує на аварію. Одночасно цей сигнал подається через інвертор DD2.2 та електронний ключ виконаний на транзисторах VT1VT2. Відкриваючись ключ вмикає звуковий оповішувач, який підключається до клем AL+ та AL- блока індикації.

## Висновки

1. Під час виконання кваліфікаційної роботи була розглянута технологія флексографічного друку та конструкція флексографічної машини ПФО-45.
2. Розроблена структурна схема системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна та обрані її елементи.
3. В роботі проведений аналіз системи автоматичної стабілізації, визначені запаси стійкості, час регулювання та інші параметри системи без регулятора.
4. Методами аналізу та синтезу визначена передаточна функція регулятора та визначені показники якості роботи скоректованої системи: час регулювання  $t_p = 0,5$  с; перерегулювання  $\delta = 5,6$  %; час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,23$  с; час досягнення першого максимуму  $t_{max} = 0,37$  с; по вигляду кривої цей перехідний процес аперіодичний з перерегулюванням; запас стійкості по амплітуді  $Z_A$  – не менше 15 дБ; запас стійкості по фазі  $Z_\phi$  не менше  $45^\circ$ .
5. Розроблені структурна, функціональна та принципова схеми системи автоматичної стабілізації температури сушки задрукованого полотна та алгоритм програмної реалізації.

## 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. Жидецький В. Ц. Основи охорони праці : підруч. 3-є вид., перероб і доп. Львів : УАД, 2006. 336 с.
15. 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.
16. Жидецький В. Ц., Джигирей В. С., Сторожук В. М., Туряб Л. В., Лико Х. І. Практикум з охорони праці. Львів : Афіша, 2000. 352 с.
17. Правила улаштування електроустановок : вид. офіц. Київ : Міненерговугілля України, 2017. 617 с.