

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 при  
виробництві сухого молока»**

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

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

\_\_\_\_\_ Олександр НЕСТЕРЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Керівник роботи

доцент, канд.техн.наук

\_\_\_\_\_ Олександр ДІДИК

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

Рецензент

\_\_\_\_\_ Іван САВЕЛЕНКО

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

м. Кропивницький – 2025 рік

Центральноукраїнський національний технічний університет

Факультет будівництва, транспорту та енергетики

Кафедра автоматизації виробничих процесів

Рівень вищої освіти бакалавр

Галузь знань 15 Автоматизація та приладобудування

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

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

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри Дідик О.К.

« 03 » лютого 2025 року

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

Нестеренка Олександра Миколайовича

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Система автоматичного регулювання температури при виробництві сухого молока

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

3. Строк подання здобувачем роботи до захисту 31.05.2025 р.

4. Мета та завдання кваліфікаційної роботи Розробити систему автоматичного регулювання температури вихідного повітря з сушильної вежі. Провести огляд технологічного процесу виробництва сухого молока; Розробити структурну схему системи автоматичного регулювання, вибір та аналіз її елементів; Проектування системи автоматичного регулювання; Практична реалізація системи автоматичної регулювання.

5. Консультанти по роботі, із зазначенням розділів роботи

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв



## Анотація

на кваліфікаційну роботу здобувача групи АК-22мб Нестеренка Олександра Миколайовича зі спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» на тему: «Система автоматичного регулювання температури при виробництві сухого молока».

Кваліфікаційну роботу присвячено проблемі підвищення якості вихідного продукту при виробництві сухого молока. Основним показником якості сухого молока є його вологість, яка повинна підтримуватись в межах 3-3,2 %. В даній роботі запропоновано оцінювати вологість сухого молока за непрямим параметром, а саме за температурою вихідного повітря із сушильної вежі.

В роботі розглянуті тенденції розвитку виробництва сухого молока, характеристика сучасних технологій сушіння молока. Проведений ґрунтовний аналіз об'єкта керування показав велику кількість зовнішніх збурень, що діють на сушильну башту, та можливості регулювання температури вихідного повітря. Розроблена структурна схема системи автоматичного регулювання температури при виробництві сухого молока 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 принципова схема мікропроцесорної системи автоматичного регулювання температури вихідного повітря із сушильної вежі.

**Ключові слова:** сухе молоко, регулювання температури, сушильна башта, оптимальний регулятор.

## Summary

on final qualification work of the student of group AK-22mb Nesterenko Oleksandr on a speciality 151 «Automation and computer-integrated technologies» on the theme: «Automatic temperature control system for milk powder production».

The qualification work is devoted to the problem of improving the quality of the initial product in the production of powdered milk. The main indicator of the quality of powdered milk is its humidity, which should be maintained within 3-3.2%. In this work, it is proposed to estimate the humidity of powdered milk by an indirect parameter, namely by the temperature of the outlet air from the drying tower.

The work considers the trends in the development of powdered milk production, the characteristics of modern milk drying technologies. A thorough analysis of the control object showed a large number of external disturbances acting on the drying tower, and the possibility of regulating the outlet air temperature. A structural diagram of the automatic temperature control system in the production of powdered milk has been developed and its elements have been selected. An analysis and synthesis of the automatic control system have been carried out, the stability of the closed system has been investigated and the stability reserves have been determined. The desired LAFC of the open-loop optimal in terms of speed system and the transition process curve have been constructed. Direct indicators of the quality of the synthesized ACS have been determined.

Based on the results obtained, a schematic diagram of a microprocessor system for automatic temperature control of the outlet air from the drying tower was developed.

**Keywords: powdered milk, temperature control, drying tower, optimal controller.**

## ЗМІСТ

Вступ.....	3
1 Огляд технології виробництва сухого молока.....	4
2 Розробка функціональної схеми об'єкта керування процесом.....	8
2.1 Програмно-технічний комплекс для реалізації автоматизованої системи керування процесом виготовлення напівфабрикату.....	8
2.2 Вибір елементної бази.....	10
2.3 Аналіз об'єкта керування.....	13
3 Проектування системи автоматичного регулювання температури вихідного повітря з сушильної вежі.....	25
3.1 Розробка структурної схеми САР температури вихідного повітря з сушильної вежі.....	25
3.2 Визначення передаточних функцій розімкнутої та замкнутої систем та характеристичного рівняння.....	27
3.3 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ та ЛФЧХ розімкнутої системи.....	27
3.4 Побудова дійсної частотної характеристики замкнутої системи	30
3.5 Визначення стійкості замкнутої системи і запасів стійкості. Побудова області стійкості.....	31
3.6 Оцінка якості регулювання замкнутої САР по ЛАЧХ розімкнутої системи.....	34
3.7 Побудова перехідного процесу замкнутої системи.....	36
3.8 Визначення прямих показників якості САР за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги до САР для її аналізу та синтезу.....	37
3.9 Побудова бажаної ЛАЧХ розімкнутої оптимальної за швидкодією системи по вимогам, які пред'явлені до неї.....	37
3.10 Побудова кривої перехідного процесу синтезованої САР.....	40
3.11 Визначення прямих показників якості синтезованої САР.....	41

4	Практична реалізація системи автоматичного регулювання .....	42
4.1	Визначення періоду дискретизації .....	42
4.2	Визначення Z-перетворення передаточної функції регулятора...	44
4.3	Опис принципової схеми регулятора .....	45
	Висновки.....	54
	Список літератури .....	55

## Вступ

У ринкових умовах особливої ваги набуває проблема забезпечення населення якісними продуктами харчування, зокрема продукцією молочної промисловості, виробленої на вітчизняних підприємствах.

Збільшення обсягів виробництва молочної продукції насамперед пов'язане з ефективнішим використанням сировини та впровадженням технологій без відходів при переробці продуктів тваринного походження. Тому серед пріоритетних завдань переробної промисловості агропромислового комплексу є зменшення втрат на всіх етапах виробництва та підвищення кількості продукції, отриманої з одиниці сировини.

Одним із ключових завдань у процесі переробки молока є контроль температурно-вологісного режиму в режимі реального часу, що значною мірою впливає на ефективність роботи обладнання, витрати на виробництво та якість кінцевої продукції.

Отже, для створення автоматизованої системи, що відповідає встановленим стандартам та забезпечує високу продуктивність при мінімальних витратах, необхідно:

- здійснити аналіз технологічного процесу з метою виявлення основних чинників, що впливають на якість кінцевого продукту;
- побудувати математичну модель керування регульованим об'єктом з урахуванням його статичних і динамічних властивостей;
- на основі цієї моделі провести імітаційне моделювання систем автоматичного регулювання параметрів технологічного процесу за відповідними каналами впливу;
- розробити автоматизовану систему управління процесом переробки молочної сировини.

В умовах ринкової економіки одним із засобів підвищення ефективності виробництва є виготовлення продукції високої якості, зокрема сухих, швидкорозчинних молочних порошоків, які відповідають стандартам.

## **1 Аналіз технологічного процесу виготовлення сухого молока.**

Сушіння застосовується для отримання сухого молока, сироватки, лактози та казеїну і розглядається як спосіб консервування, що базується на зменшенні впливу вологи на продукт. Основними наслідками висушування для готової продукції є:

- уповільнення розвитку мікроорганізмів;
- зменшення інтенсивності хімічних реакцій;
- скорочення витрат на зберігання та транспортування.

У результаті сушіння продукт має зберегти свої властивості до моменту його споживання.

Етапи технологічного процесу сушіння продукту в розпилювальних установках представлені на рисунку 1.1.

Основним конструктивним елементом розпилювальних установок є сушильна камера (башта), в яку подається розпилений продукт, а також нагріте повітря, що використовується як сушильний агент.

Сушарки за методом розпилювання продукту поділяються на дискові та форсункові. У дискових установках розпилювання відбувається під впливом відцентрової сили, тоді як у форсункових — через різкий перепад тиску при виході продукту з сопла або завдяки дії повітря. Зрозуміло, що більш дрібне розпилювання сприяє швидшому сушінню. Розподіл крапель за розміром повинен бути якомога рівномірнішим для забезпечення однорідного процесу сушіння та, відповідно, однакової теплової обробки.

Розпилювальні сушарки також поділяються за способом подачі повітря на прямотечійні, протитечійні та комбіновані.



Рисунок 1.1 - Етапи технологічного процесу сушіння в розпилювальних установках.

До процесу сушіння в сушильній установці пред'являються такі вимоги:

- ефективно використання об'єму сушильної камери;
- мінімізація налипання порошку на стінках;
- висушений продукт не повинен повторно контактувати з гарячим повітрям;
- висушений продукт має бути вивантажений з сушильної камери в найкоротший час.

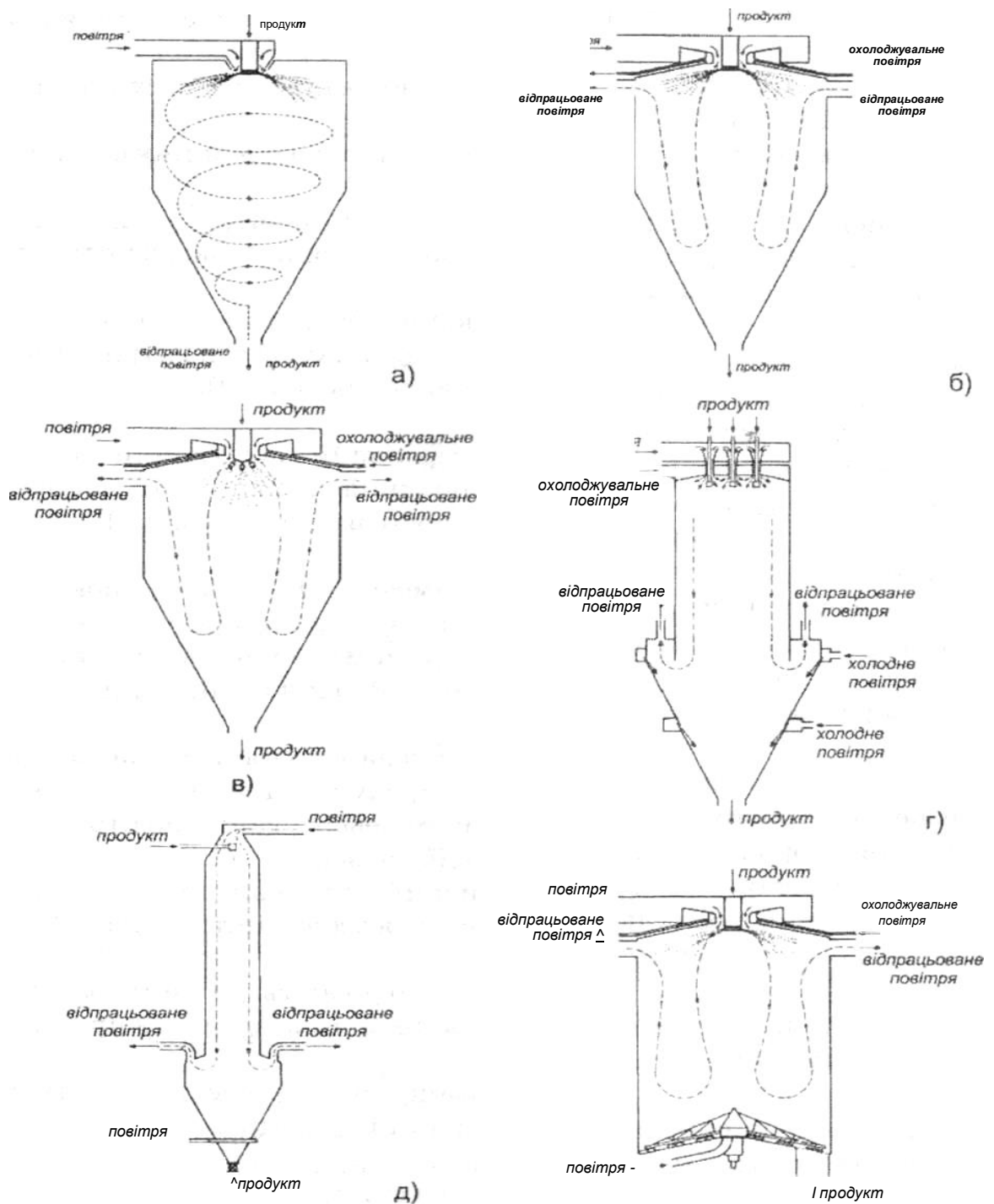


Рисунок 1.2 - Спектри руху повітря в сушильній башті:

а) дисковий розпилювач з спіральним рухом повітря; б) дисковий розпилювач з реверсивним повітряним потоком; в) форсунковий розпилювач з реверсивним повітряним потоком; г) форсунковий розпилювач з прямоточним рухом повітря; д) форсунковий розпилювач з реверсивним рухом повітря; е) дисковий розпилювач з реверсивним повітряним потоком.

Можливі спектри руху повітря в сучасних конструкціях сушильних башт представлені на рисунку 1.2:

а) дисковий розпилювач. Спіральний рух повітря. Сушка продукту біля стінок при високій концентрації порошку. Висока концентрація продукту в конусі;

б) дисковий розпилювач. Реверсивний повітряний потік. Сушка продукту в центрі башти. Відділення порошку від повітря здійснюється через зміну напрямку повітряного потоку. Верхня стінка башти охолоджується;

в) форсунковий розпилювач. Реверсивний повітряний потік. Сушка продукту в центрі башти. Відділення порошку від повітря здійснюється через зміну напрямку потоку повітря. Верхня стінка башти охолоджується;

г) форсунковий розпилювач. Прямоточна подача повітря. Екрани з холодним повітрям для запобігання повторному контакту висушеного порошку з гарячим повітрям. Порошок відокремлюється шляхом зміни напрямку потоку повітря. Верхня стінка башти охолоджується;

д) форсунковий розпилювач. Подовжена верхня частина башти забезпечує хороший контакт повітря і продукту. Екран із холодним повітрям. Порошок відокремлюється шляхом зміни напрямку потоку повітря. Вивантаження здійснюється через шлюзовий затвор;

е) дисковий розпилювач. Реверсивний тепловий потік. Подача кондиційованого повітря через дно башти. Вивантаження продукту – скребкове.

Повітря, що подається в сушарку, нагрівається до температури 160 - 200 °С за допомогою парових калориферів або теплогенераторів прямого нагріву.

На виході з сушарки відпрацьоване повітря має температуру 70 - 90 °С і містить 110 - 200 мг молока на 1 кг відпрацьованого повітря. Для очищення повітря застосовують матерчаті рукавні фільтри, циклонні системи та установки для мокрого очищення.

## **2 Розробка функціональної схеми системи управління процесом**

### **2.1 Програмно-технічний комплекс для впровадження автоматизованої системи управління процесом виробництва напівфабрикату**

Для здійснення технологічного процесу сушіння молока та молочних продуктів пропонується програмно-апаратний комплекс, функціональна схема якого зображена на рисунку 2.1.

Для традиційного сухого знежиреного та незбираного молока, а також для кристалізованого концентрату сироватки застосовується відцентрове розпилення. Для сухих порошків з дуже високою щільністю та для легкосіпучого незбираного напівфабрикату рекомендується використовувати сопла низького тиску в комбінації з двоступінчастим процесом сушіння.

Принцип розпилювального сушіння полягає в розподілі концентрату на велику кількість дрібних крапель, які обробляються гарячим повітрям.

Сушка переважно відбувається під час проходження краплі через гаряче повітря. Це відбувається в радіусі 1 метра від точки розпилення, і основний перепад температури сушильного повітря забезпечується випаровуванням вологи з концентрату.

Процес сушіння може бути організований у вигляді одноступінчастої або двоступінчастої системи.

Для виробництва сухих молочних продуктів використовують молоко не нижче другого сорту з кислотністю не більше 20°C, вершки з вмістом жиру до 40% і кислотністю не більше 26°C, знежирене молоко та сколотини з кислотністю не більше 20°C. Проводиться підготовка молока, що включає очищення, охолодження та інші етапи.

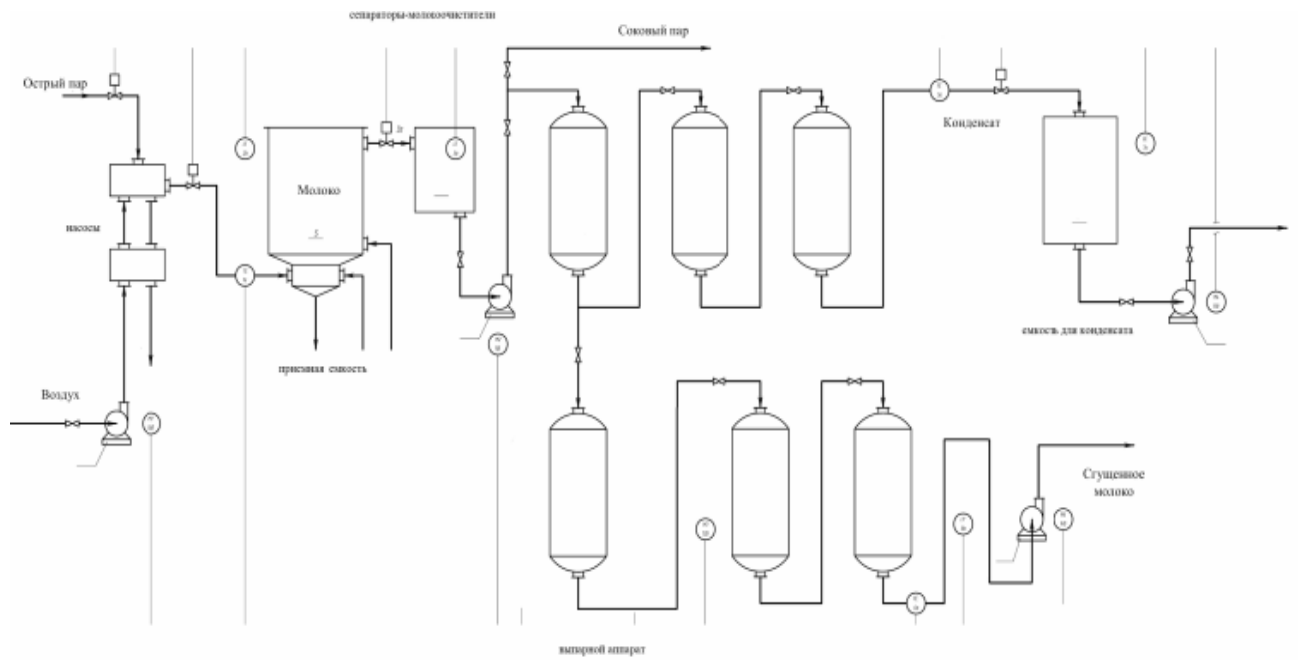


Рисунок 2.1 - Схема функціонування технологічного процесу сушіння  
молока.

Нормалізацію молока здійснюють шляхом додавання в нього вершків, знежиреного молока або склотин. У нормалізованій молочній суміші співвідношення жиру і СЗМЗ (сухого знежиреного молочного залишку) має відповідати тому, яке передбачено для готового продукту. Молоко пастеризують при температурі 95°C без витримки, фільтрують і направляють для згущення в вакуум-випарну установку.

Основними завданнями автоматизованої системи управління процесом сушіння молока є:

- збір та обробка технологічної інформації, взаємодія з програмованим логічним контролером, датчиками та виконавчими механізмами;
- візуалізація технологічного процесу;
- автоматичне регулювання температури повітря на вході через вплив на регулюючий пристрій, розташований на

- лінії подачі повітря в калорифер; підтримка заданої температури повітря на виході з сушильної вежі;
- збір даних про "історію" роботи системи та їх подання у вигляді графіків, таблиць, звітів тощо.

## 2.2 Вибір компонентної бази.

Термоперетворювачі з уніфікованими вихідними сигналами ТСМУ / ТСПУ / ТХАУ-205, -205Ех, ТСМУ / ТСПУ-055 застосовуються для вимірювання температури в процесах автоматизації технологічних операцій.

Занесені до Державного реєстру засобів вимірювальної техніки під № 15200-01, сертифікат № 10115.

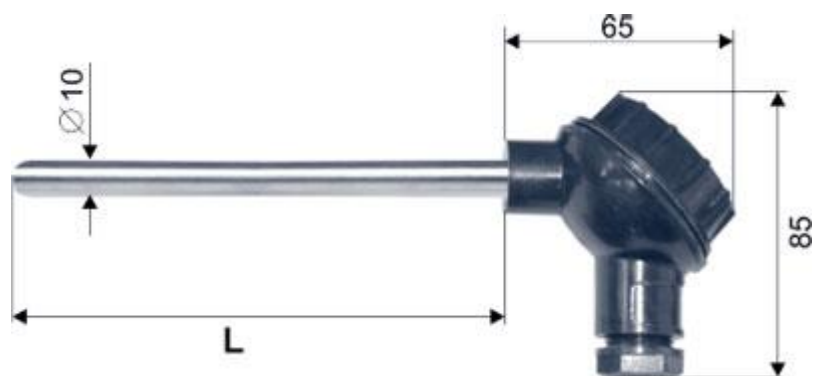


Рисунок 2.2 - Загальний вигляд датчика.

Термоперетворювачі призначені для перетворення температури рідких, газоподібних та сипучих речовин у стандартний струмовий вихідний сигнал.

Забезпечують вимірювання температури нейтральних та агресивних середовищ, що не пошкоджують матеріал захисних оболонок.

Термоперетворювач складається з первинного перетворювача та вимірювального перетворювача (ВП), який вбудований у головку первинного перетворювача.

Як первинні перетворювачі використовуються термоперетворювачі опору серій НСХ - 100М, 100П та термоелектричні перетворювачі серії НСХ - ХА(К).

Додаткова похибка, спричинена зміною температури навколишнього повітря з нормальної на будь-яку температуру в межах робочого діапазону, не перевищує 0,5 від основної допустимої похибки на кожні 10 °С.

Вимірювальний перетворювач представляє собою друковану плату діаметром 43 мм, покриту компаундом з обох сторін, на якій розміщені елементи електронної схеми.

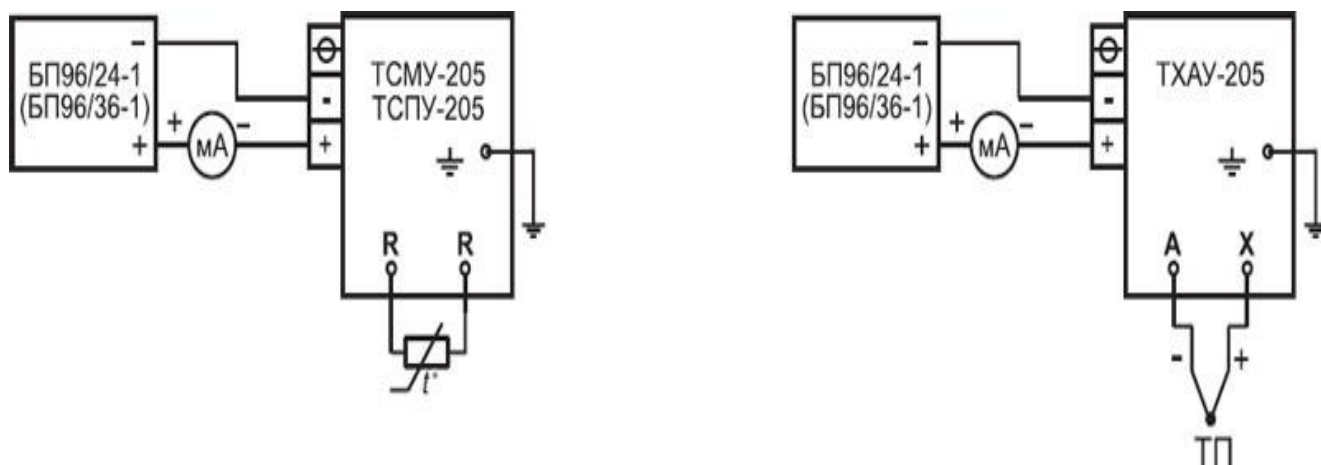


Рисунок 2.3 - Схема з'єднань.

Вимірювальний перетворювач перетворює сигнал, отриманий від виходу первинного перетворювача, в стандартизований струмовий вихідний сигнал, що дозволяє будувати АСУТП без використання додаткових перетворювачів для нормалізації сигналу.

До складу ВП входять компенсатор нелінійності вхідного сигналу, а для ТХАУ-205, ТХАУ-205ЕХ – також компенсатор температури "холодного спаю".

Напруга живлення:

- від 18 до 36 В постійного струму для термоперетворювачів ТСМУ/ТСПУ/ТХАУ-205, -055;

- "іскробезпечний електричний ланцюг" рівня "Іа" для вибухонебезпечних сумішей групи НС за ДСТ 12.1.011 з напругою

холостого ходу  $U_{xx} < 24$  В і струмом короткого замикання  $I_{K3} < 120$  мА – для термоперетворювачів ТСМУ, ДСПУ/ТХАУ-205Ех.

Термоперетворювачі стійкі до динамічних змін напруги живлення: переривання живлення тривалістю від 10 мс до 10 с; зміни напруги на  $\pm 20\%$   $U_n$  при тривалості коливань від 10 мс до 5 с. Споживана потужність не перевищує 0,8 ВА. Група вібростійкості: N3 за ДСТ 12997.

Ступінь захисту від пилу та води: IP54 за ДСТ 14254

Виконавчий механізм – молочний насос ТЕН

Робочі характеристики: молочні насоси серії ТЕН відзначаються високою надійністю і широко застосовуються в харчовій промисловості. Конструкція насоса дозволяє перекачувати рідини, суміші або рідини з твердими зваженими частками (до 20% твердих часток) з діаметром часток до 30 мм. Варіант конструкції з зовнішнім торцевим ущільненням здебільшого використовується в хімічній та фармацевтичній промисловості. Цей насос також застосовується разом з міксером BL 120 для змішування порошків з рідинами (наприклад, борошна з водою, порошку з молоком), запобігаючи утворенню грудок.

Основним критерієм при виборі насоса є його санітарно-технічні характеристики. Насос був протестований і повністю відповідає вимогам EHEDG (Європейської групи гігієнічного проектування та інженерії) згідно з "Report n. V6603".

#### ТЕХНІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ:

- матеріал виготовлення: нержавіюча сталь AISI 316;
- робоче колесо: відкритого типу з 3/4 лопатками діаметром від 115 мм до максимум 230 мм;
- ніпелі: DIN 11851 (стандартний) з затискачем, на замовлення доступні DIN 11864 та інші варіанти;
- електродвигун: 2-4 полюси / IP55 – 400 В, 3 фази, 50 Гц;
- частота обертання молочних насосів ТЕН: 2900 об/хв.

### 2.3 Оцінка об'єкта управління

Оцінка технологічної системи як об'єкта управління дозволила розробити систему критеріїв, які всебічно оцінюють ефективність технологічного процесу виробництва резервного напівфабрикату.

Результати обстежень об'єкта управління — сушильної установки "Нема-500", а також аналіз літературних джерел, показують, що найбільш важливим критерієм ефективності технологічного процесу сушіння молока та молочних продуктів є вологість сухого молока і молочних продуктів, оскільки це основний показник якості готової продукції.

Для управління процесом сушіння в розпилювальних сушильних установках можливі два варіанти автоматичного регулювання: за прямим параметром — вологістю сухого продукту, що виходить з сушильної вежі, та за непрямим параметром — залежністю вологості готового продукту від температури вихідного сушильного агента (гарячого повітря).

Наразі існують прилади для вимірювання вологості в реальному часі. Однак ці прилади мають низьку надійність, і їх інтеграція в контур регулювання може призвести до непередбачених наслідків. Тому для управління процесом зазвичай використовують непрямий параметр — температуру повітря на виході з сушильної вежі.

У літературі зазначено, що вологість сухого молока та температура вихідного повітря взаємопов'язані. Коефіцієнт кореляції між цими величинами збільшується при сталих вхідних параметрах гарячого повітря (витрата  $Q_i$ , вологість  $W_v$ , температура  $t$ ). Коли вхідні параметри продукту (витрата  $Q_{in}$ , вологість  $W_{in}$ , температура  $t_{in}$ ) залишаються постійними, цей коефіцієнт наближається до 1.

Рівняння, яке описує взаємозв'язок між параметрами  $W_{2p}$  і  $t_{2p}$ , має таку форму:

$$W_{2p} = A - Bt_{2p}, \quad (2.1)$$

де  $W_{2p}$  — вологість продукту у відсотках;  $t_{2B}$  — температура вихідного повітря в градусах Цельсія.

Тому для автоматичного керування процесом сушіння використовують непрямий параметр — температуру повітря, що виходить із сушильної вежі. Масова частка вологи в сухому молоці та температура відпрацьованого повітря взаємопов'язані

$$W_2 = A - B \cdot t_2, \quad (2.2)$$

де  $W_2$  — масова частка вологи в сухому молоці, %;  $t_2$  — температура відпрацьованого повітря, °C;  $A$  і  $B$  — коефіцієнти регресії.

При сушінні незбираного молока в сушильній установці «Нема - 500» при температурі відпрацьованого повітря в межах 60-75 °C ця залежність набуває наступного вигляду:

$$W_2 = 16,5 - 0,2 \cdot t_2 \quad (2.3)$$

Температура  $t_i$  гарячого повітря для парових калориферів регулюється зміною тиску пари, яка нагріває рідину  $p_k$ .

Статичні та динамічні характеристики об'єктів регулювання щодо широко застосовуваних сушильних установок «Нема-500» наведені далі.

Статична характеристика сушильної вежі за каналом  $Q_{in} \rightarrow t_{2B}$

$$t_{2B} = t_{oc} - K_{nc} Q_{in} \quad (2.4)$$

де  $t_{2B}$  — температура вихідного повітря, °C;  $K_{nc}$  — коефіцієнт передачі об'єкта, °C·год/кг ( $K_{nc} = 0,0255$ );  $Q_{in}$  — витрата згущеного молока, кг/год;  $t_{oc}$  — постійна величина, °C ( $t_{oc} = 90^\circ\text{C}$ ).

Статична характеристика калорифера за каналом  $p_k \rightarrow t_{1B}$ :

$$t_{1B} = t_{OK} + K_{пк} P_k \quad (2.5)$$

де  $t_{1B}$  — температура гарячого повітря, °C;  $K_{пк}$  — коефіцієнт підсилення об'єкта ( $K_{пк} = 34$ );  $p_k$  — тиск пари, що нагріває, МПа;  $t_{OK}$  — постійна величина, °C ( $t_{OK} = 126,5^\circ\text{C}$ ).

Вологість отриманого продукту повинна залишатися сталою з точністю до  $\pm 0,5\%$  вологи, що відповідає зміні температури вихідного повітря в межах  $\pm 2,5^\circ\text{C}$ . Температура вхідного гарячого повітря повинна контролюватися з точністю  $\pm 4,8^\circ\text{C}$ , а коливання вологості згущеного молока не повинні перевищувати  $\pm 2\%$  вологи.

У практиці вологість згущеного молока може коливатися в більших межах, тому при розробці систем автоматичного регулювання температури вхідного та вихідного повітря доцільно встановити менші допуски для регульованих параметрів, а саме:  $A(t_{1B}) = \pm 3^\circ\text{C}$  и  $A(t_{2B}) = \pm 2^\circ\text{C}$ .

Формули (2.2) та (2.3) можуть бути використані для діапазонів  $Q_{in} = 450\text{--}1150$  кг випарованої вологи на годину та  $p_k = 0,32\text{--}18$  МПа.

На поточному підприємстві витрата згущеного молока становить  $990\text{--}1000$  кг/год, а тиск пари, що гріє, на калорифері варіюється від  $1,0\text{--}1,05$  МПа, що дає змогу застосовувати залежності (2.3) – (2.5) в цій роботі. ( $760$  мм рт. ст. =  $101325$  Па).

Під час досліджень були виявлені фактори, які впливають на основний показник якості готового продукту — вологість сухого молока. Було доведено, що для керування сушильною установкою, яка складається з калорифера для підігріву повітря до  $160\text{--}180^\circ\text{C}$  та сушильної вежі, доцільно використовувати температуру повітря на виході з вежі як непрямий параметр. Цей параметр є найбільш доступним для контролю на об'єкті керування.

Система автоматичного регулювання (САР) повинна підтримувати температуру повітря на виході з сушильної вежі в межах  $65\text{--}70^\circ\text{C}$ , що забезпечить вологість готового продукту на рівні  $3\text{--}3,2\%$ .

Під час виробництва сухих молочних продуктів у розпилювальній сушильній установці важливо досягти необхідної вологості готового продукту та забезпечити задану продуктивність обладнання. Зазвичай продуктивність регулюється шляхом зміни температури гарячого повітря,

яке надходить із калорифера. Підвищення цієї температури обмежується ризиком самозаймання напівфабрикату, тоді як її зниження призводить до збільшення витрат теплоносія на кожну тонну випаруваної вологи. Крім того, зменшення подачі повітря також небезпечне через загрозу самозаймання, а збільшення — спричиняє втрати готового продукту.

Ефективність регулювання продуктивності сушильної установки шляхом зміни температури повітря на вході в сушильну вежу була досліджена для випадків одно- та двоступінчастого сушіння згущеного молока. Встановлено, що зі зростанням температури повітря на вході в сушильну камеру знижується питома витрата теплоти в усьому діапазоні кінцевої вологості продукту. Сушіння молока до масової частки вологи 8–10% є більш економічно доцільним у розпилювальній сушарці, тоді як подальше зниження вологості до 4% вигідніше здійснювати у віброконвективній сушарці.

Режим функціонування об'єкта регулювання формується під впливом внутрішніх процесів, на які, у свою чергу, впливають зовнішні чинники. У системі автоматичного керування частина зовнішніх впливів слугує джерелом інформації про ціль регулювання — це так звані корисні або регулюючі сигнали. Вони можуть формуватися регулятором автоматично або задаватися вручну оператором.

Шляхом експериментальних досліджень були зібрані дані щодо вхідних та вихідних параметрів процесу сушіння молока і молочних продуктів у сушильній установці "Нема-500". Вимірювання параметрів технологічного процесу здійснювались кожні 3 хвилини протягом 2,5 години. Загалом було зафіксовано 15 реалізацій.

Було виконано статистичну обробку результатів експериментальних досліджень сушильної установки "Нема-500". Обчислено математичне сподівання, дисперсію, коефіцієнти кореляції, а також побудовано графіки, що відображають зміну вхідних і вихідних параметрів сушильної вежі (рис. 2.4 – 2.9).

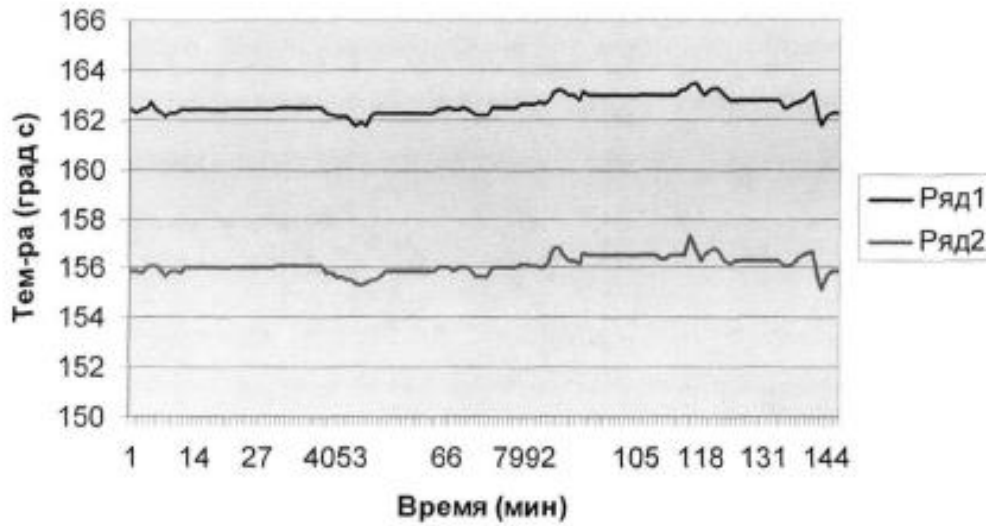


Рисунок 2.4 – Графіки температури повітря на виході з калориферів №1 та №2

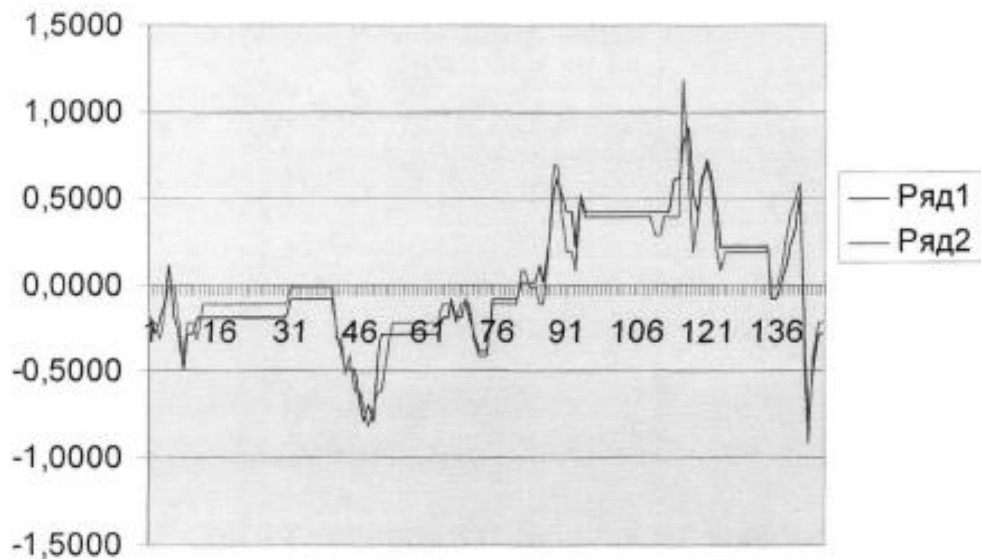


Рисунок 2.5 – Графіки відхилення температури повітря на виході з калориферів №1 і №2 від їхніх середніх значень

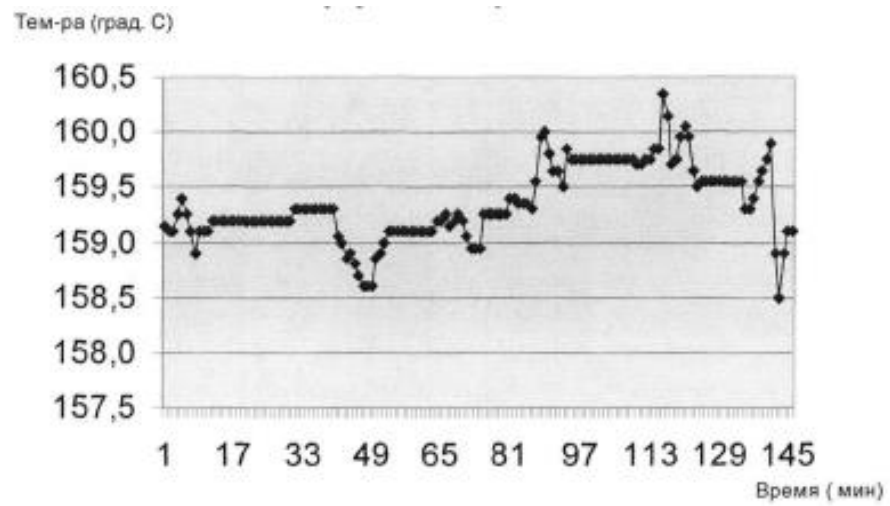


Рисунок 2.6 – Графік усередненої температури повітря на вході до сушильної вежі

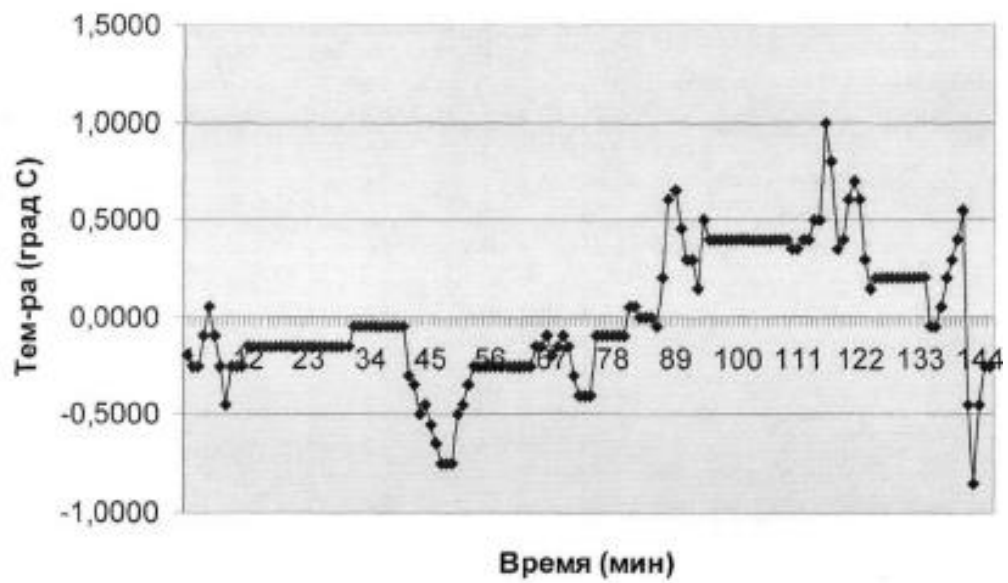


Рисунок 2.7 – Графік відхилення середньої температури повітря на вході до сушильної вежі від її математичного сподівання

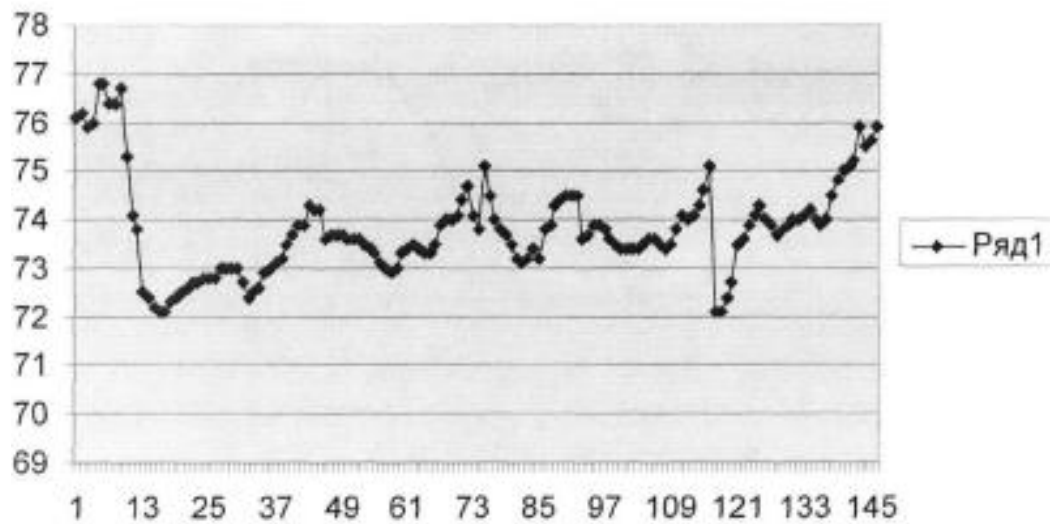
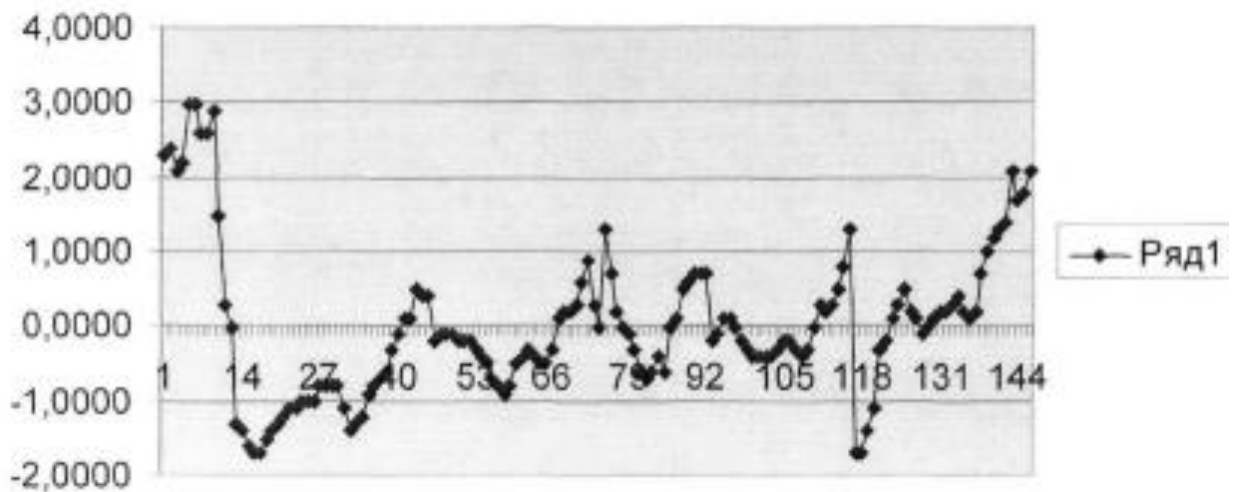


Рисунок 2.8 – Графік температури повітря на виході з сушильної вежі



Графік 2.9 – Відхилення температури повітря на виході з сушильної вежі від середнього значення

Статистичні показники вхідних та вихідних параметрів сушильної вежі:

- математичне очікування для реалізації температури повітря на виході з калорифера 1 складає  $164,24^{\circ}\text{C}$ ;

- математичне очікування для реалізації температури повітря на виході з калорифера 2 становить  $155,60^{\circ}\text{C}$ ;
- математичне очікування для реалізації температури повітря на виході з сушильної вежі становить  $68,06^{\circ}\text{C}$ ;
- математичне очікування для реалізації кількості обертів парової турбіни становить 8070 об/хв;
- математичне очікування для реалізації тиску пари, що гріє, на калорифері 1 становить 7,55 МПа;
- математичне очікування для реалізації тиску пари, що гріє, на калорифері 1 складає 7,44 МПа;
- дисперсія для реалізації температури повітря на виході з калорифера 1 становить  $13,42^{\circ}\text{C}$  ;
- дисперсія для реалізації температури повітря на виході з калорифера 2 становить  $0,31^{\circ}\text{C}$ ;
- дисперсія для реалізації температури повітря на виході з сушильної вежі складає  $7,43^{\circ}\text{C}$ ;
- дисперсія для реалізації кількості обертів парової турбіни становить 0,0 об/хв;
- дисперсія для реалізації тиску пари, що гріє, на калорифері 1 складає 0,02 МПа;
- дисперсія для реалізації тиску пари, що гріє, на калорифері 2 становить 0,05 МПа;
- Коефіцієнт кореляції між реалізаціями температури повітря на виході з калориферів 1 і 2 становить 0,956;
- Коефіцієнт кореляції між реалізаціями середньої температури на вході в сушильну вежу та температурою на виході складає 0,0659.

На рисунку 2.10 зображені основні вхідні та вихідні параметри, а також збурюючі впливи сушильної установки, що включає сушильну вежу та два калорифери.

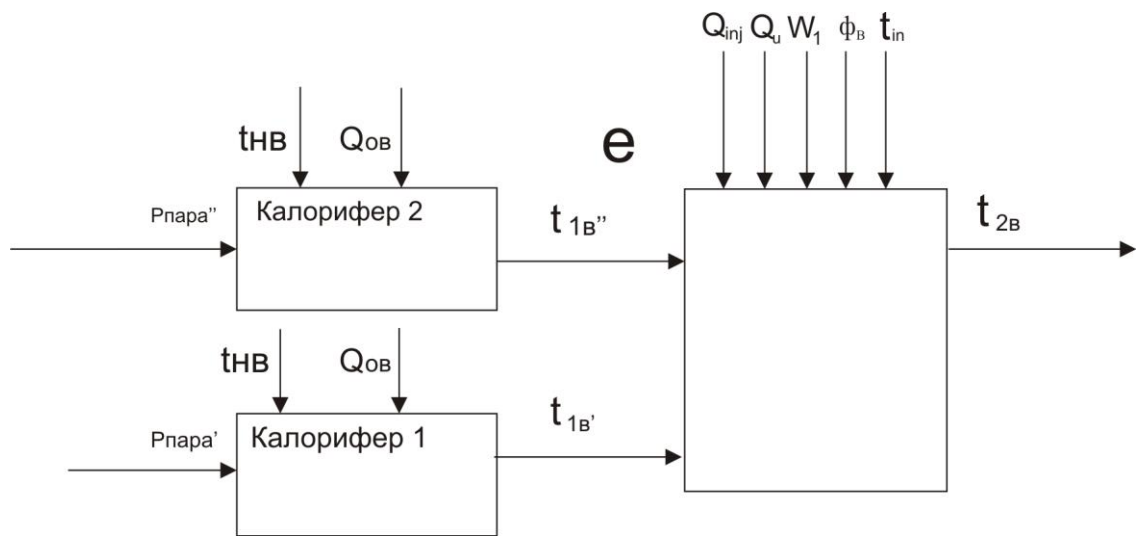


Рисунок 2.10 – Схема параметрів сушильної установки

Вхідними параметрами для калориферів є: тиск пари, що гріє, на вході в калорифери 1 і 2 –  $P_{\text{гр пари}'}$  і  $P_{\text{гр пари}''}$ .

Вихідними параметрами для калориферів є:

- температура гарячого повітря на виході з калорифера 1 (вході в сушильну вежу) –  $t_{1В'}$ ;
- температура гарячого повітря на виході з калорифера 2 (температура гарячого повітря на вході в сушильну вежу) –  $t_{1В''}$ .

Збурюючими параметрами для калориферів є:

- температура навколишнього (зовнішнього) повітря –  $t_{нв}$ ;
- витрата навколишнього повітря –  $Q_{ов}$ .

Вхідними параметрами для сушильної вежі є:

- температура, витрата, вологість гарячого повітря на вході в сушильну вежу –  $t_{1В'}$ ,  $t_{1В''}$ ,  $Q_u$ ,  $\phi_B$ ;
- температура, витрата, вологість згущеного молока на вході в сушильну вежу –  $t_{in}$ ,  $Q_{inj}$ ,  $W_{in}$ ;
- тиск пари на парову турбіну –  $p_{\text{пр пари}}$ ;

Вихідним параметром для сушильної вежі є:

- температура повітря на виході з сушильної вежі –  $t_{2В}$ .

На основі результатів обстеження об'єкта керування була розроблена структурна схема сушильної установки, яка дає змогу досліджувати

динамічні характеристики об'єкта через канали керування та збурень (рис. 2.11).

На цьому об'єкті керування виділяються керуючі та збурюючі впливи. Керуючими впливами можуть бути витрата згущеного молока, температура та витрата гарячого повітря. На основі проведених експериментальних досліджень як керуючий вплив для цього об'єкта регулювання обрана температура повітря на вході в сушильну вежу.

Інші параметри вважаються збурюючими. При цьому природа збурюючих впливів є випадковою, тобто на об'єкт керування активно діють неконтрольовані збурення, які мають адитивний характер.

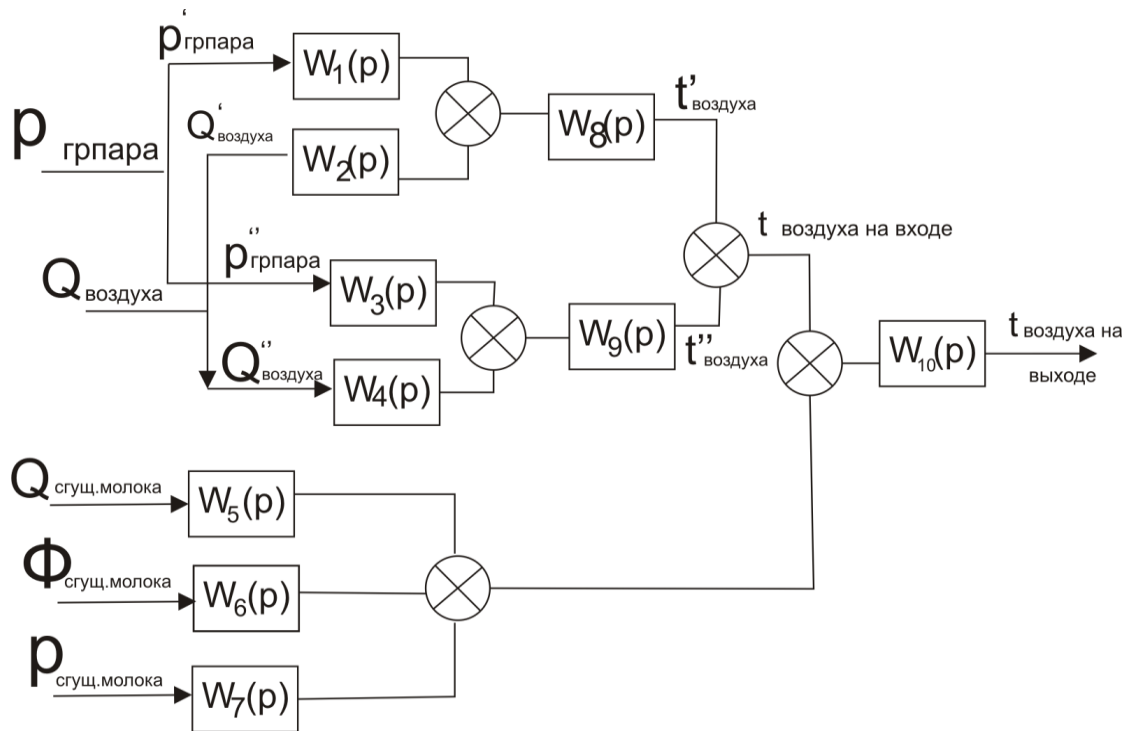


Рисунок 2.11 – Схема структури сушильної установки як об'єкта керування

Тому в даному випадку доцільно замінити всі неконтрольовані збурення на один еквівалентний вектор збурюючих впливів в адитивній формі (рис. 2.12)

Аналіз об'єкта керування показав, що для підтримання вологості напівфабрикату в межах 3-3,2 % достатньо підтримувати температуру на

виході з сушильної вежі в діапазоні 65-75°C. Крім того, необхідно, щоб вологість згущеного молока, яке надходить до сушильної установки, перебувала в межах 52-58% (42-48% за концентрацією сухих речовин), а число обертів розпилювального диска становило 8000 об/хв. Такий температурний діапазон дозволить забезпечити стабільну роботу системи автоматичного регулювання вологості готового продукту, в якій використовується цифровий регулятор на основі мікропроцесорного контролера.

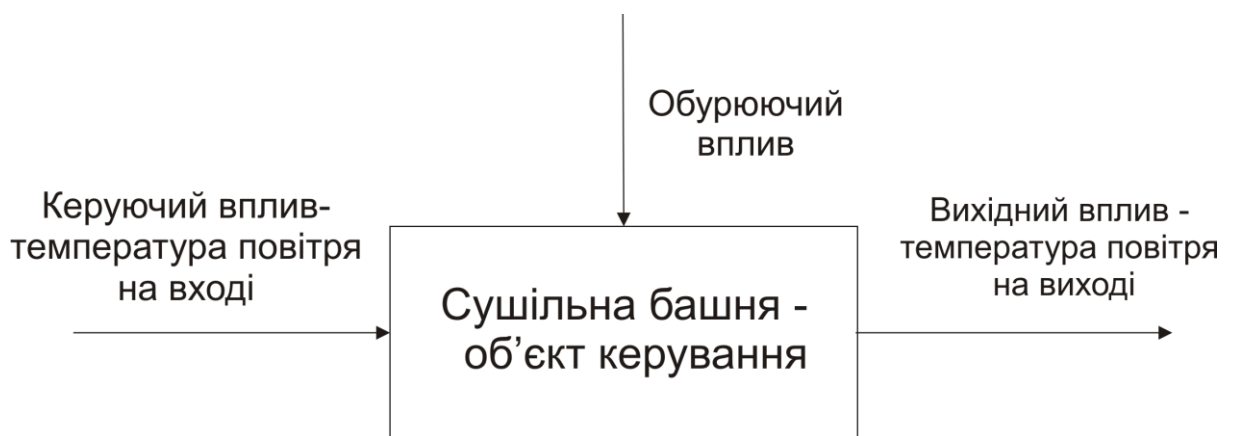


Рисунок 2.12 – Еквівалентна схема параметрів сушильної вежі

Аналіз роботи сушильної установки показав, що забезпечити статичне навантаження сушильної вежі є складним завданням, оскільки сировина (згущене молоко), яка надходить до сушильної вежі, має нерівномірні показники за кількістю та якістю (різна вологість і температура). Це призводить до того, що в системі періодично виникають перехідні процеси (рис. 2.13).

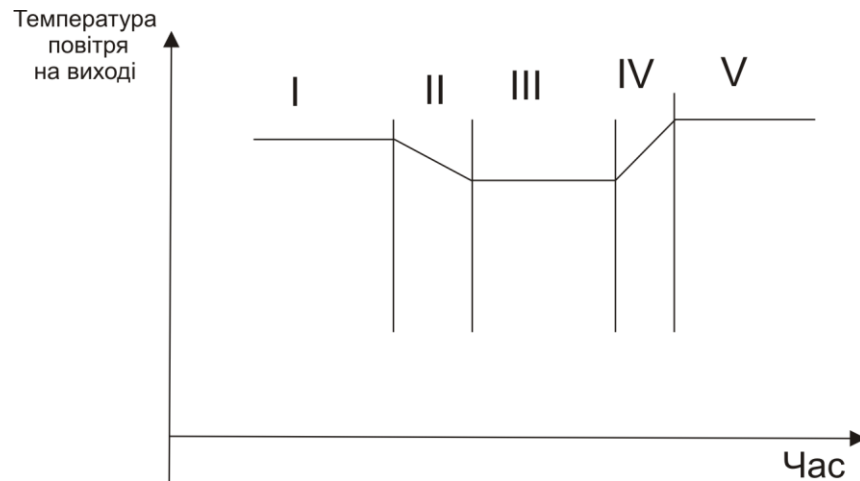


Рисунок 2.13 – Основні етапи технологічного процесу сушіння резервованого продукту

Розглянемо основні етапи технологічного процесу підготовки напівфабрикату:

- ділянка I – стаціонарний режим;
- ділянка II – підвищення вологості сухого продукту, що призводить до зниження температури повітря на виході з сушильної вежі, а отже, до зниження якості готової продукції та її ринкової вартості;
- ділянка III – стаціонарний режим;
- ділянка IV – зниження вологості сухого продукту, що викликає підвищення температури повітря на виході з сушильної вежі, що в свою чергу призводить до втрат через вигорання готової продукції;
- ділянка V – стаціонарний режим.

### **3 Розробка системи автоматичного регулювання температури повітря на виході з сушильної вежі**

Як було показано в попередніх розділах, підтримання вологості вихідного продукту під час сушіння молока на заданому рівні можна досягти шляхом регулювання температури вхідного повітря, що подається з калорифера. Контролювати вологість сухого молока на виході з сушильної вежі доцільно непрямим методом, зокрема, через вимірювання температури вихідного повітря. На основі аналізу технологічного процесу виробництва сухого молока та огляду наукової літератури необхідно розробити структурну схему системи автоматичного регулювання температури вихідного повітря з сушильної вежі та визначити динамічні характеристики її складових елементів.

#### **3.1 Розробка схеми структури системи автоматичного регулювання температури вихідного повітря з сушильної вежі**

Згідно з викладеним вище, об'єктом керування (ОК) в цій системі є сушильна вежа (рис. 3.1). Вихідним параметром об'єкта є температура вихідного повітря  $t_{2В}$ , за якою можна оцінити вологість сухого молока. Ця температура вимірюється за допомогою датчика температури (ДТ) і у вигляді нормованого напруги  $U_d$  передається на пристрій порівняння, де порівнюється з заданим значенням  $U_z$ , яке задається здавачем (З). Різниця між напругами  $\Delta U$  надходить на регулятор, що згідно з розрахованим законом регулювання генерує сигнал  $U_p$ . Цей сигнал передається на підсилювач (П), який посилює його, і підсилений сигнал  $U_{п}$  передається на виконавчий механізм (ВМ). Як виконавчий механізм використовується паровий калорифер. Залежно від вхідного сигналу  $U_{п}$  змінюється тиск пари калорифера  $P_k$ , що, у свою чергу, впливає на температуру вхідного повітря  $t_{1В}$  в сушильну вежу, яка є вхідним сигналом для об'єкта керування

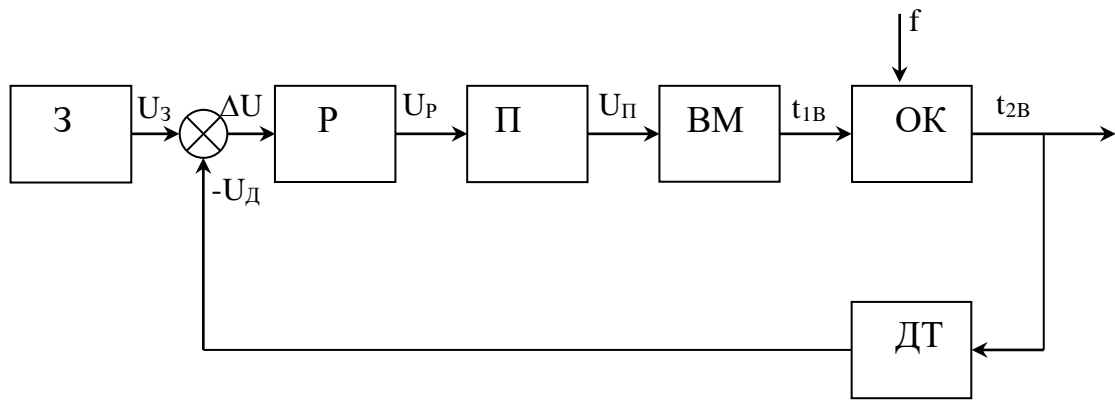


Рисунок 3.1 – Схема структури системи автоматичного регулювання температури вихідного повітря з сушильної вежі

Аналіз літературних джерел дозволив визначити передаточні функції елементів системи:

- системи керування

$$W_{OK}(p) = \frac{k_0}{T_0 p + 1}; \quad (3.1)$$

- механізму виконання

$$W_{BM}(p) = \frac{k_1}{p(T_1 p + 1)}; \quad (3.2)$$

- посилювач

$$W_{II}(p) = k_2; \quad (3.3)$$

- сенсора температури

$$W_{DT}(p) = 1. \quad (3.4)$$

Параметри цих передаточних функцій мають такі значення

$$k_0 = 0,18; k_1 = 2,2 \text{ } ^\circ\text{C/V}; k_2 = 18; T_0 = 4,2 \text{ с}; T_1 = 0,05 \text{ с}. \quad (3.5)$$

Далі розглянемо роботу системи автоматичного регулювання температури без використання регулятора та визначимо необхідний закон регулювання за допомогою методів аналізу та синтезу.

### 3.2 Визначення передаточних функцій для розімкнутої та замкнутої систем, а також характеристичного рівняння

Елементи структурної схеми САР з'єднані послідовно, тому для отримання передаточної функції розімкнутої системи необхідно перемножити передаточні функції всіх складових елементів:

$$W_p(p) = W_{OK}(p) \cdot W_{BM}(p) \cdot W_{II}(p) \cdot W_{DT}(p) = \frac{k_0 k_1 k_2}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.6)$$

Для зручності запису введемо наступні позначення:

$$k = k_0 k_1 k_2. \quad (3.7)$$

Отже, передаточна функція розімкнутої системи матиме такий вигляд:

$$W_p(p) = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1)}. \quad (3.8)$$

Передаточна функція замкнутої системи, враховуючи, що  $W_{зз}(p) = 1$ , визначається за допомогою наступної формули:

$$W_z(p) = \frac{W_p(p)}{1 + W_p(p)} = \frac{k}{p(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) + k}. \quad (3.9)$$

Характеристичне рівняння набуває такого вигляду:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0, \quad (3.10)$$

$$0,21 p^3 + 4,25 p^2 + p + 7,128 = 0.$$

### 3.3 Побудова АФЧХ, ЛАЧХ і ЛФЧХ для розімкнутої системи.

3.3.1 Побудова амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи.

Для побудови амплітудно-фазової частотної характеристики розімкнутої системи потрібно в передаточній функції замінити змінні

$p = j\omega$ , ( $j = \sqrt{-1}$ ,  $\omega$  – частота) виділити дійсну частину  $P(\omega)$  та уявну частину  $Q(\omega)$ , а потім, змінюючи частоту від 0 до  $\infty$ , відкласти відповідні значення:

$$\begin{aligned}
 W_p(j\omega) &= \frac{k}{j\omega(T_1j\omega+1)(T_0j\omega+1)} = \frac{k}{T_1T_0(j\omega)^3 + (T_1+T_0)(j\omega)^2 + j\omega} = \\
 &= \frac{k}{-jT_1T_0\omega^3 - (T_1+T_0)\omega^2 + j\omega} = \frac{k}{-(T_1+T_0)\omega^2 + j(\omega - T_1T_0\omega^3)} = \\
 &= \frac{k(-(T_1+T_0)\omega^2 - j(\omega - T_1T_0\omega^3))}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1T_0\omega^3))^2} \quad (3.11)
 \end{aligned}$$

Таким чином, підставивши значення коефіцієнтів і постійних величин, ми отримаємо:

$$P(\omega) = \frac{k(-(T_1+T_0)\omega^2)}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1T_0\omega^3))^2} = \frac{7,128(-4,25\omega^2)}{(-4,25\omega^2)^2 + (\omega - 0,21 \cdot \omega^3)^2}; \quad (3.12)$$

$$Q(\omega) = \frac{k(-(\omega - T_1T_0\omega^3))}{(-(T_1+T_0)\omega^2)^2 + ((\omega - T_1T_0\omega^3))^2} = \frac{7,128(-(\omega - 0,21 \cdot \omega^3))}{(-4,25\omega^2)^2 + (\omega - 0,21 \cdot \omega^3)^2}. \quad (3.13)$$

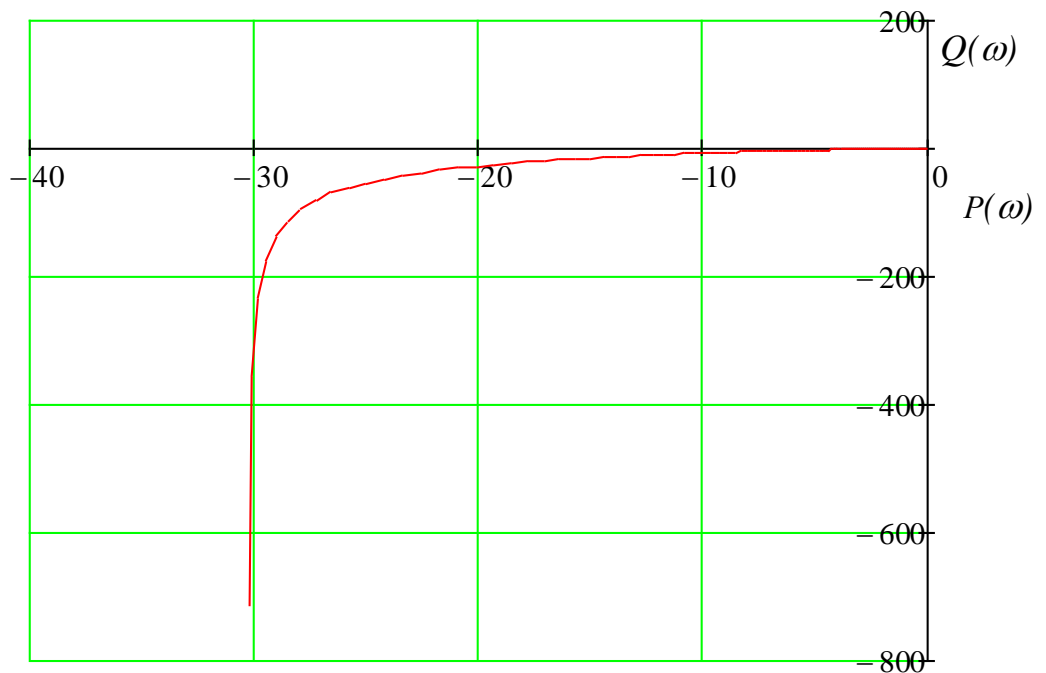


Рисунок 3.2 – Амплітудно-частотна характеристика розімкнутої системи

Побудуємо графік амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи (рис. 3.2).

3.3.2 Побудова логарифмічної амплітудно-частотної характеристики розімкнутої системи.

Щоб побудувати логарифмічну амплітудно-частотну характеристику (ЛАЧХ) за допомогою асимптотичного методу, насамперед необхідно визначити спряжені частоти, використовуючи сталі часу динамічних ланок:

$$\omega_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{4,2} = 0,24 \text{ с}^{-1}, \text{ є частиною аперіодичної ланки};$$

$$\omega_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0,05} = 20 \text{ с}^{-1}, \text{ є частиною аперіодичної ланки}.$$

Визначені спряжені частоти наносяться на частотну вісь у логарифмічному масштабі. Низькочастотна асимптота ЛАЧХ при малих значеннях  $\omega < \omega_0$  є прямою з нахилом  $-20$  дБ/дек, оскільки в системі присутня інтегруюча динамічна ланка. Ця пряма або її продовження повинна проходити через точку, де при  $\omega = 1$  ордината становить  $20 \lg k = 17,06$  дБ ( $k = 7,128$  — коефіцієнт підсилення розімкнутої системи).

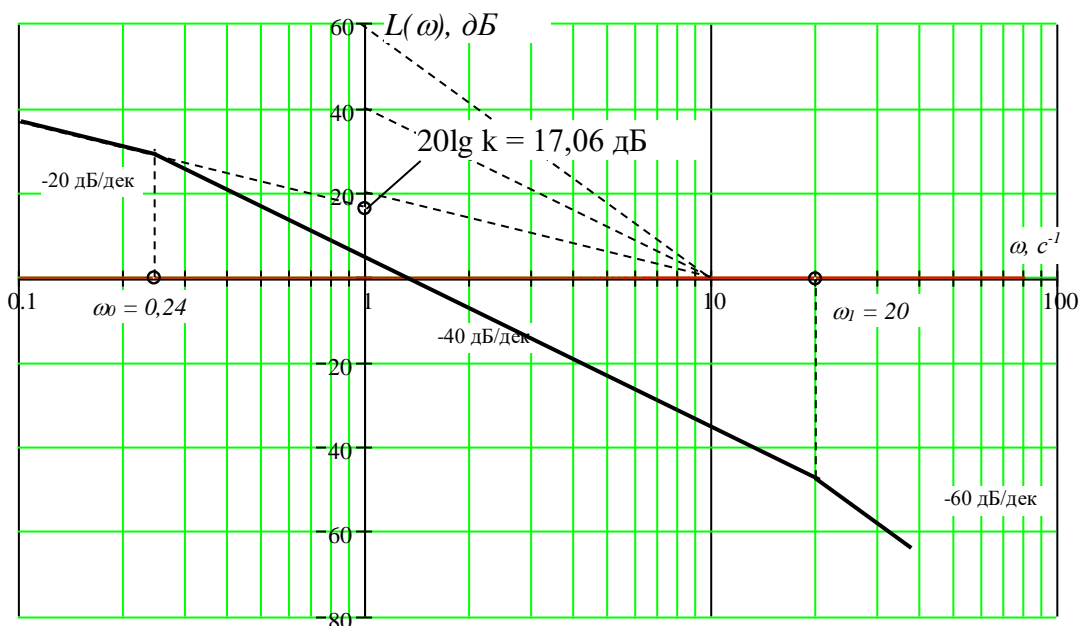


Рисунок 3.3 – Логарифмічна амплітудно-частотна характеристика розімкнутої системи

Після кожної спряженої частоти нахил ЛАЧХ змінюється на  $-20$  дБ/дек порівняно з попереднім, оскільки ці частоти відповідають аперіодичним динамічним ланкам першого порядку. На високих частотах, тобто при значеннях частоти, що перевищують останню спряжену, ЛАЧХ має нахил  $-60$  дБ/дек.

3.3.3 Побудова логарифмічної фазо-частотної характеристики розімкнутої системи.

Логарифмічна фазо-частотна характеристика одноконтурної розімкнутої системи визначається шляхом простого додавання ординат фазових характеристик окремих типових ланок:

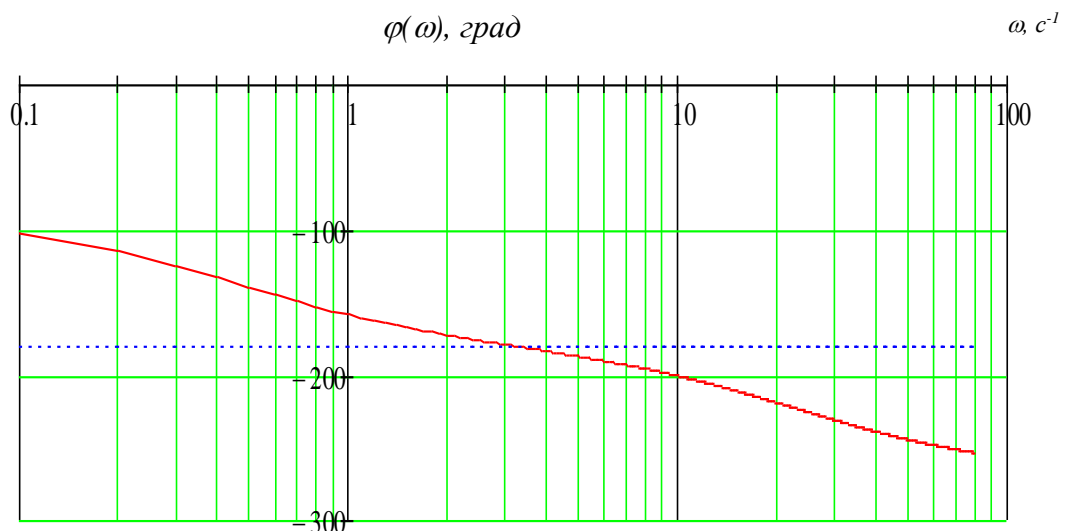


Рисунок 3.4 – Логарифмічна фазо-частотна характеристика розімкнутої системи  $\varphi(\omega)$

$$\varphi(\omega) = \left( -\arctg(\omega T_0) - \left( \frac{\pi}{2} + \arctg(\omega T_1) \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}. \quad (3.14)$$

### 3.5 Оцінка стійкості замкнутої системи та визначення запасів стійкості. Побудова області стійких режимів

3.5.1 Аналіз стійкості системи з використанням критерію Гурвіца.

Критерій стійкості Гурвіца (алгебраїчний критерій) дозволяє визначити стійкість систем автоматичного регулювання високого порядку,

але його застосування стає досить зручним лише для рівнянь до п'ятого порядку, оскільки з подальшим збільшенням порядку обчислення ускладнюються.

За цим критерієм умови стійкості викладаються наступним чином.

Всі корені характеристичного рівняння  $T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k = 0$  матимуть від'ємні дійсні частини, якщо при додатних значеннях усіх коефіцієнтів головний визначник Гурвіца  $\Delta_2 > 0$  буде більший за нуль, а його діагональні мінори також перевищуватимуть нуль. Підставивши значення коефіцієнтів і сталих часу, отримаємо:

$$0,21p^3 + 4,25p^2 + p + 7,128 = 0.$$

$$\Delta_2 := \left| \begin{pmatrix} 4.25 & 7.128 \\ 0.21 & 1 \end{pmatrix} \right|$$

$$\Delta_2 = 2.753$$

Оскільки головний визначник  $\Delta_2 = 2,753 > 0$ , обчислений за правилом Гурвіца, а всі коефіцієнти мають додатний знак, можна зробити висновок, що система є стійкою за критерієм Гурвіца.

3.5.2 Аналіз стійкості системи та визначення її запасів стійкості за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова, з урахуванням модуля та фази.

Згідно з цим критерієм, стійкість замкненої системи автоматичного регулювання визначається за амплітудно-фазовою частотною характеристикою стійкої розімкненої системи (рис. 3.6). Розімкнена система автоматичного регулювання вважається стійкою, якщо вона складається лише з стійких динамічних ланок (не має більше ніж одну інтегруючу ланку). Якщо розімкнена система є стійкою, то для

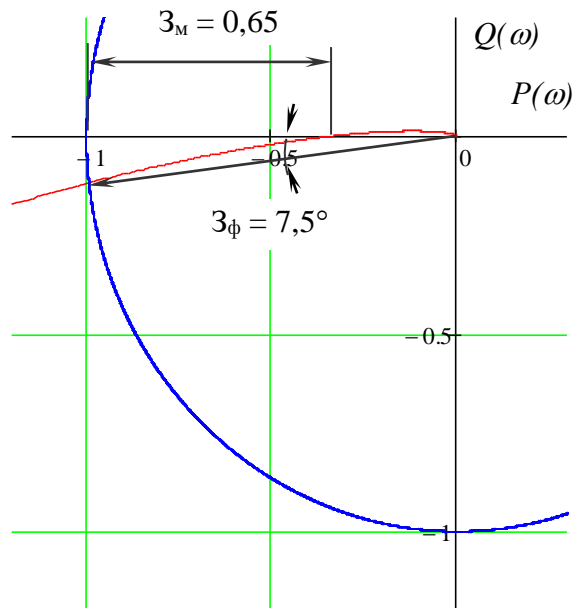


Рисунок 3.6 – Оцінка запасів стійкості за допомогою частотного критерію Найквіста-Михайлова через модуль і фазу

забезпечення стійкості замкненої системи необхідною та достатньою умовою є те, щоб АФХ розімкненої системи не перетинала точку з координатами  $(-1, j0)$  при зміні частоти від  $0$  до  $\infty$ .

Отже, згідно з критерієм Найквіста-Михайлова, система є стійкою, а запас стійкості за модулем становить  $Z_M = 0,65$ ; за фазою –  $Z_\phi = 7,5^\circ$ .

3.5.3 Аналіз стійкості системи та визначення області стійкості за методом D-розбиття в площині одного з параметрів.

Побудуємо область стійкості системи в площині параметра  $k_2$ , оскільки його можна легко варіювати шляхом налаштування коефіцієнта підсилення підсилювача.

Характеристичне рівняння має таку форму:

$$T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p + k_0 k_1 k_2 = 0$$

Запишемо характеристичне рівняння щодо  $k_2$ :

$$K(p) = -\frac{(T_1 T_0 p^3 + (T_1 + T_0) p^2 + p)}{k_0 k_1}$$

Підставивши  $p = j\omega$  значення та розділивши дійсну і уявну частини цього виразу, отримаємо:

$$K(\omega) = -\frac{(-jT_1 T_0 \omega^3 - (T_1 + T_0) \omega^2 + j\omega)}{k_0 k_1} = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_1} + j \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_1}.$$

$$P(\omega) = \frac{(T_1 + T_0) \omega^2}{k_0 k_1}; \quad Q(\omega) = \frac{(T_1 T_0 \omega^3 - \omega)}{k_0 k_1}$$

Побудуємо криву D-розбиття в площині параметра  $k_2$ , змінюючи частоту від  $-\infty$  до  $+\infty$  (рис. 3.7).

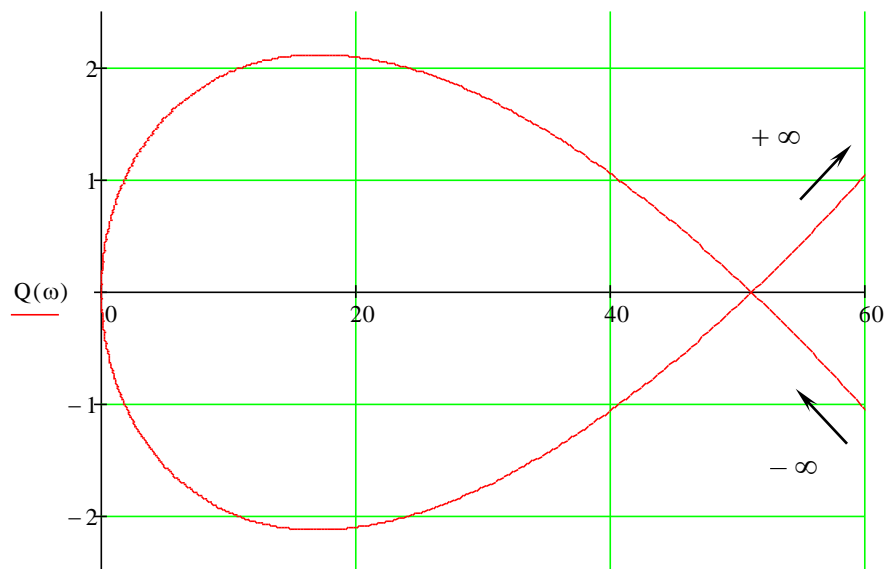


Рисунок 3.7 – D-розбиття в площині параметра  $k_2$

Оскільки в стійкій системі всі корені розташовані ліворуч від уявної осі, при обході її від  $-\infty$  до  $+\infty$  область стійкості також буде знаходитися

ліворуч від побудованої кривої. Для зручності визначення області стійкості можна нанести штриховку зліва при русі від  $-\infty$  до  $+\infty$ . За побудованою областю стійкості можна визначити критичне значення коефіцієнта  $k_2$ , яке в даному випадку дорівнює  $k_{2кр} = 51$ . Як видно, задане значення коефіцієнта підсилення  $k_2 = 18$  потрапляє в зону стійкості, тому для подальших розрахунків можна залишити це значення параметра.

### **3.6 Оцінка якості регулювання замкненої системи автоматичного регулювання на основі ЛАЧХ розімкненої системи**

Оцінка якості регулювання замкненої системи автоматичного регулювання полягає в визначенні запасу стійкості (за модулем і фазою) та частоти зрізу. Для цього будуємо ЛАЧХ і ЛФЧХ розімкненої системи, при цьому виконуючи їх взаємне розміщення.

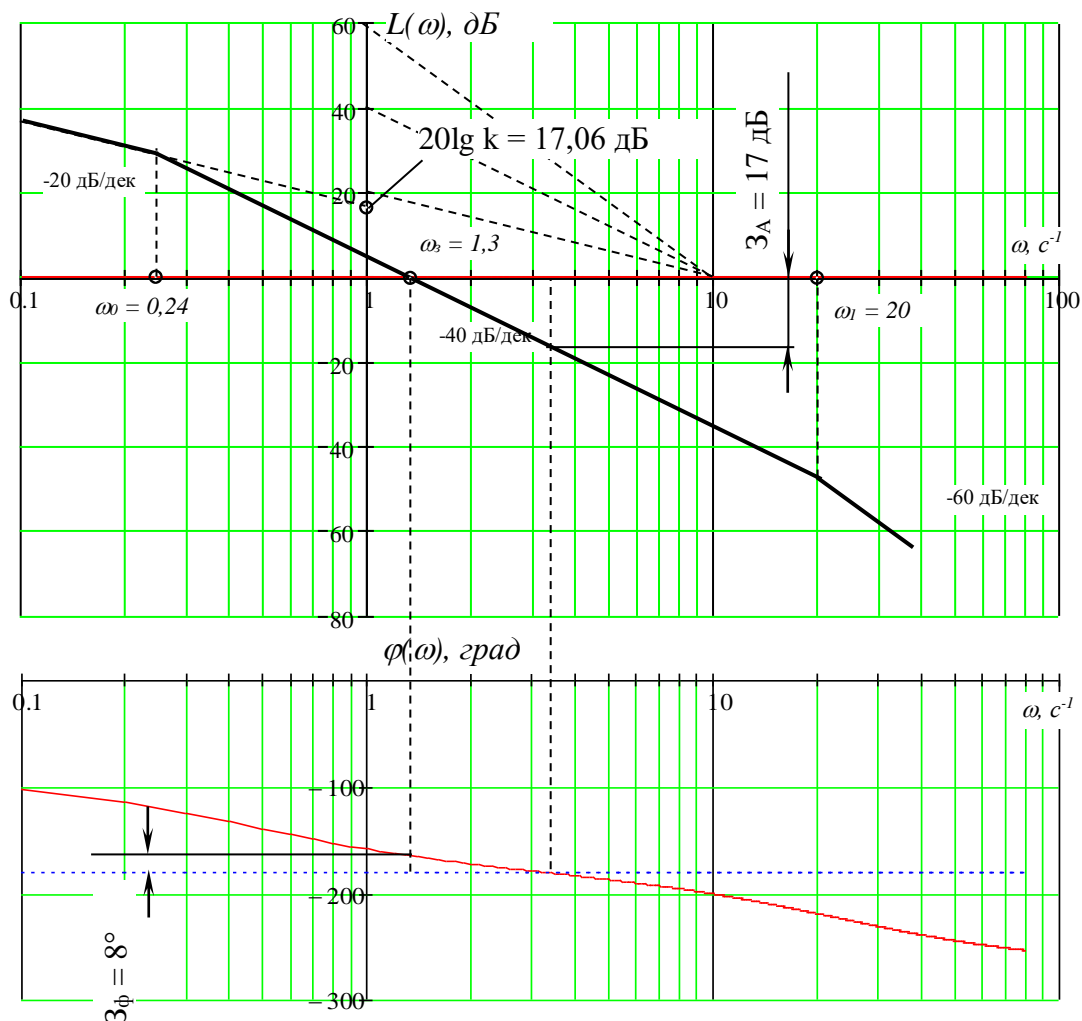


Рисунок 3.8 – Оцінка якості регулювання замкненої системи автоматичного регулювання за ЛАЧХ розімкненої системи

З цієї побудови можна визначити: частота зрізу  $\omega_z = 1,3 \text{ c}^{-1}$ , з чого можна обчислити час регулювання, встановивши систему в жорсткі умови

$$t_p = \frac{2\pi}{\omega_z} = 4,83; \text{ запас стійкості за амплітудою } z_A \approx 17 \text{ дБ}; \text{ запас стійкості за}$$

фазою  $z_\phi \approx 8^\circ$ .

### 3.7 Побудова перехідної характеристики замкненої системи

Зміна регульованої величини в часі при подачі на вхід системи одиничного ступінчастого сигналу описується рівнянням

$$h(t) = \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} P_3(\omega) \frac{\sin(\omega t)}{\omega} d\omega. \quad (3.18)$$

Підставивши відповідні значення, отримуємо наступний графік (рис. 3.9).

З графіка можна зробити висновок, що перехідний процес є коливальним, і коливання відбуваються з постійним періодом.

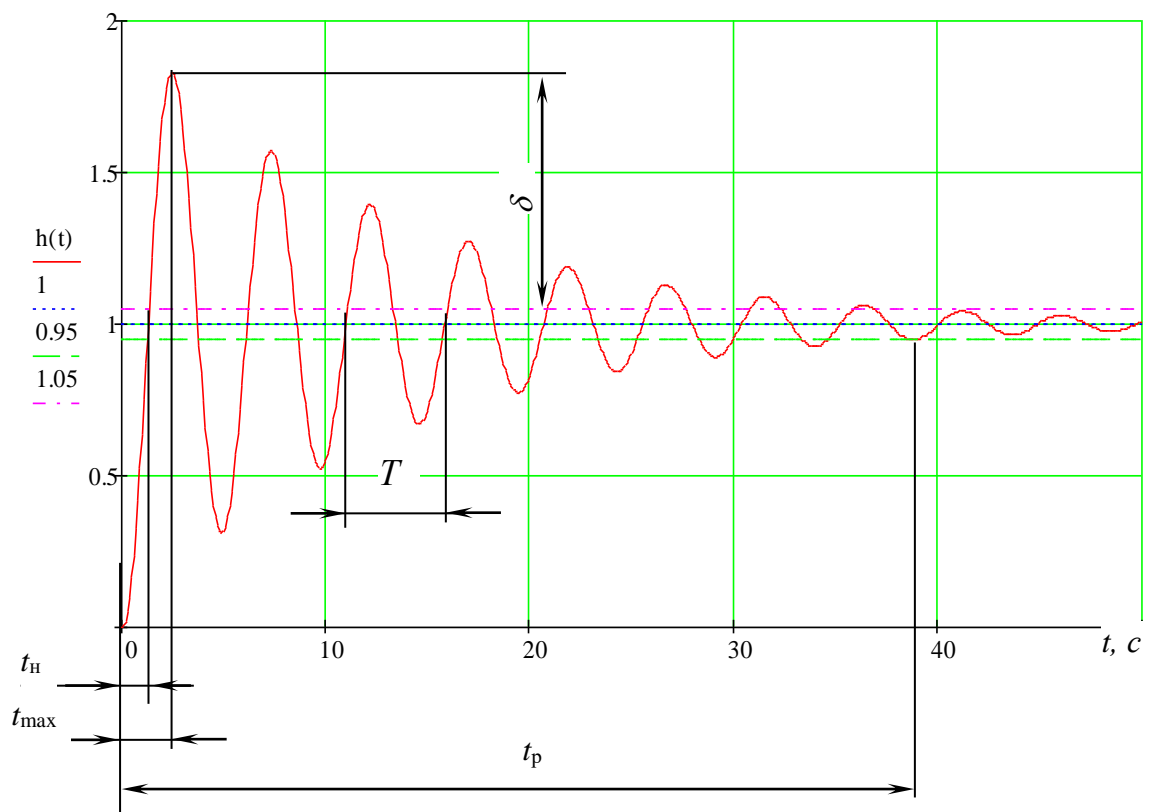


Рисунок 3.9 – Графік перехідної характеристики вихідної системи

### 3.8 Оцінка основних показників якості системи автоматичного регулювання за графіком перехідного процесу. Визначення часу регулювання системи як вимоги для аналізу та синтезу САР.

З побудованого перехідного процесу можна визначити такі основні показники якості системи автоматичного регулювання:

- Час регулювання  $t_p \approx 39$  с – це час від початку впливу вхідного сигналу до моменту, коли система потрапляє в зону  $2\Delta$ . Цей параметр залежить від швидкодії динамічних ланок та їх кількості в головному контурі. Оскільки до системи висуваються суворі вимоги, цей параметр для аналізу та синтезу системи автоматичного регулювання приймається рівним  $t_p = 4,83$  с, як визначено за ЛАЧХ розімкнутої системи, що накладає ще більш строгі умови.
  - перерегулювання  $\delta = 82,9$  %;
  - частота коливань  $\omega = \frac{2\pi}{T} = 1,37$  с<sup>-1</sup>, де  $T = 4,6$  с – період коливань;
  - Число коливань перехідного процесу  $n = 7$ ;
  - Час досягнення першого піку.  $t_{\max 1} = 2,5$  с;
  - Час наростання перехідного процесу  $t_H = 1,4$  с – це час, необхідний для досягнення вихідною величиною сталого значення.;
  - Декремент затухання перехідного процесу характеризує ступінь затухання коливань, це відношення відхилень між сусідніми коливаннями  $d = 1,45$ .

Відповідно до вимог до системи, час регулювання для її аналізу та синтезу приймається зменшеним на 30 % від отриманого значення, тобто  $t_p = 3,38$  с.

### 3.9 Побудова оптимальної за швидкодією ЛАЧХ розімкнутої системи відповідно до вимог, які до неї висуваються

Вимоги до синтезованої системи автоматичного регулювання: час регулювання  $t_p = 3,38$  с; максимальне перерегулювання  $\delta = 25\%$ ; запас стійкості за модулем не менше 15 дБ; за фазою не менше  $30^\circ$ . Для синтезу САР необхідно побудувати початкову ЛАЧХ розімкнутої системи, бажану ЛАЧХ та ЛАЧХ коригуючого пристрою.

Побудова бажаної ЛАЧХ здійснюється в кількох етапах.

Побудова в області низьких частот аналогічна побудові ЛАЧХ незмінної системи. Тобто, проводиться асимптота з нахилом  $-20$  дБ/дека через точку з координатами  $20 \lg k = 17,06$  дБ.

Побудова в області середніх частот є найважливішим етапом для асимптоти. У цьому діапазоні ЛАЧХ визначається заданими значеннями перегулювання та тривалістю перехідного процесу. Для того, щоб наблизити реальний процес до оптимального (за швидкодією), нахил середньочастотної асимптоти бажаної ЛАЧХ обирається рівним  $-20$  дБ/дека. Вибір частоти зрізу (частоти, при якій ЛАЧХ перетинає вісь частот) здійснюється на основі нерівності  $\omega_{z\min} \leq \omega_z \leq \omega_{z\text{opt}}$ . Щоб задовольнити вимоги до якості системи,  $\omega_z$  частота зрізу  $\omega_z$  повинна бути меншою за значення, яке визначається максимальним прискоренням координати та величиною керуючого ступінчатого сигналу. Крім того, ця частота  $\omega_z$  має бути більшою за певну величину  $\omega_{z\min}$ , яка обирається на основі заданого значення максимального перегулу та тривалості регулювання  $t_p$ . За заданим значенням  $\delta_m$  за допомогою кривої  $\delta = f(P_{z\max})$  номограми [1] визначаємо відповідне значення  $P_{z\max}$ . Потім, знаючи це значення, за допомогою кривої  $t_p = f(P_{z\max})$  визначаємо значення іншої

величини  $\frac{3\pi}{t_p}$ . Цю величину прирівнюємо до заданого значення  $t_p = 3,38$  с,

і з отриманого рівняння визначаємо частоту зрізу  $\omega_{z\min} = 2,79$  с<sup>-1</sup>.

Вибрану частоту зрізу  $\omega_z = 3,0$  с<sup>-1</sup> (трохи збільшену) наносимо на графік (рис. 3.10). Далі будуємо середньочастотну асимптоту, провівши її через точку  $\omega_z$  на осі абсцис з нахилом -20 дБ/дека.

За відомим значенням  $P_{z\max} = 1,2$  дійсної частотної характеристики визначаємо мінімальне значення  $P_{z\max}$ , застосовуючи наближене співвідношення для типової дійсної частотної характеристики:  $P_{z\min} = 1 - P_{z\max} = -0,2$ .

Для забезпечення необхідного запасу стійкості системи за амплітудою і фазою необхідно продовжити середньочастотну асимптоту ліворуч і праворуч на певну величину. Запаси стійкості визначаються за допомогою номограм  $L(\omega) = f(\varphi)$ , коли  $P_z$  є сталою величиною — це колові діаграми, де  $P_z$  — значення дійсної частотної характеристики замкненої системи. Таким чином, за допомогою номограм визначаємо лінії, що відповідають  $P_{z\max} = 1,2$  і  $P_{z\min} = -0,2$ . Ці криві симетричні відносно осі абсцис. Запас стійкості за амплітудою визначається шляхом проведення горизонтальних дотичних до цих кривих та зчитування значень на осі ординат:  $L_1 = 15$  дБ,  $L_2 = -15$  дБ. Отже, середньочастотну асимптоту необхідно продовжити ліворуч і праворуч до ординат  $L_1$  та  $L_2$ , а потім вже з'єднати з сусідніми ділянками [2].

Запас стійкості за фазою  $\gamma$  визначається шляхом проведення вертикальних дотичних до кривих  $P_{z\max} = 1,2$  і  $P_{z\min} = -0,2$ , після чого зчитується значення кута в градусах від дотичної до лінії -180°. У цьому випадку  $\gamma = 45^\circ$  [2], [3].

ЛАЧХ коригуючого пристрою визначається як різниця між бажаною та незмінною ЛАЧХ:  $L_k(\omega) = L_6(\omega) - L_n(\omega)$  (рис. 3.10).

Передавальна функція такого коригуючого пристрою в загальному вигляді:

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_3 p + 1)} \quad (3.19)$$

де  $T_2 = 1/\omega_2 = 1/0,6 = 1,7 \text{ с}$ ;

$T_3 = 1/\omega_3 = 1/20 = 0,05 \text{ с}$

Підставивши сталі часу в рівняння загального вигляду, отримаємо передавальну функцію коригуючого пристрою:

$$W_{\text{кл}}(p) = \frac{1 \cdot (1,7 p + 1)}{(0,05 p + 1)} \quad (3.20)$$

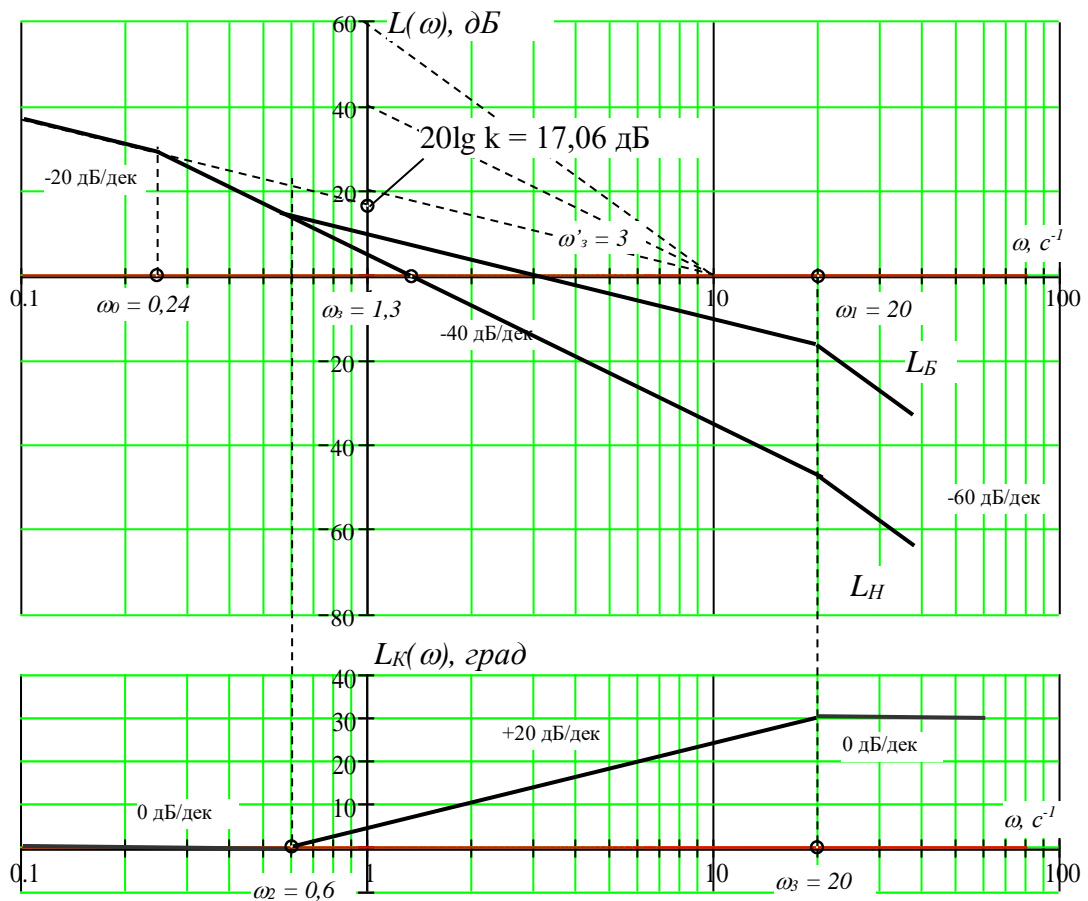


Рисунок 3.10 – Побудова бажаної ЛАЧХ і визначення ЛАЧХ коригуючого пристрою

### 3.10 Побудова графіка перехідного процесу синтезованої системи автоматичного регулювання

Запишемо передавальну функцію замкненої коригованої системи

$$W_{зк}(p) = \frac{k(T_2 p + 1)}{(T_1 p + 1)(T_0 p + 1) \cdot (T_3 p + 1) + k \cdot (T_2 p + 1)} \quad (3.21)$$

Побудуємо графік перехідного процесу синтезованої системи автоматичного регулювання температури повітря на виході сушильної вежі (рис. 3.11).

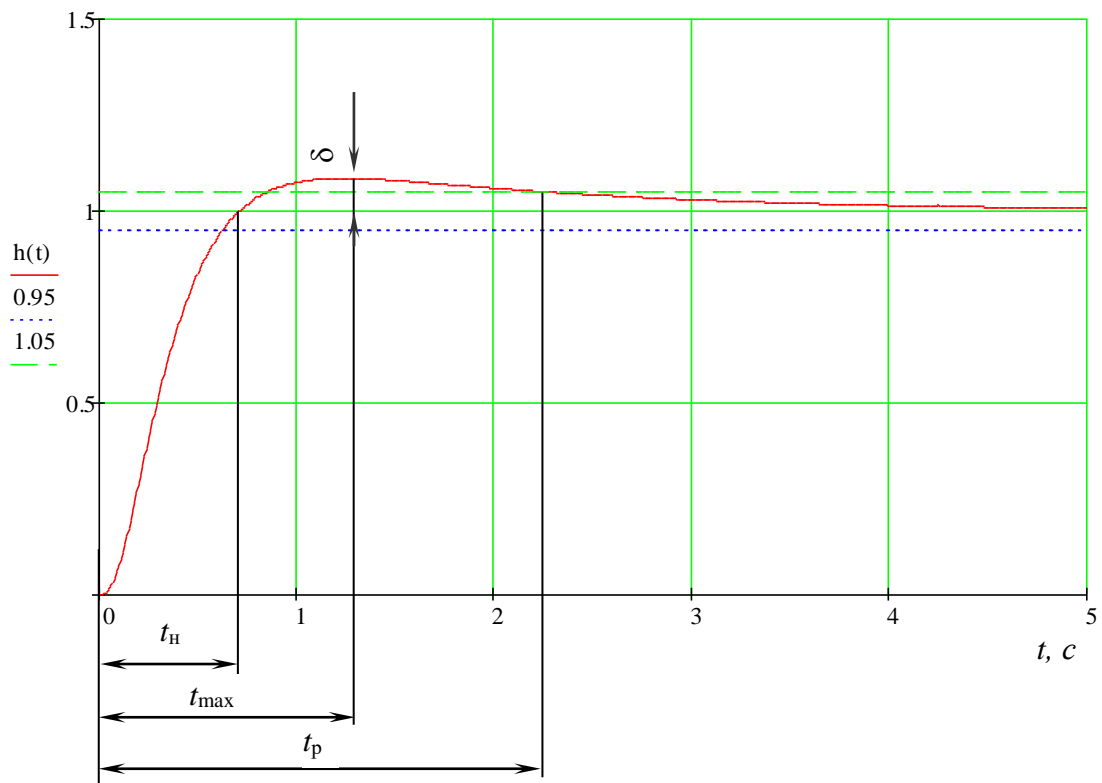


Рисунок 3.11 – Графік перехідного процесу системи, коригованої за допомогою синтезу

### 3.11 Оцінка основних показників якості синтезованої системи автоматичного регулювання

З побудованого графіка перехідного процесу можна визначити такі основні показники якості САР:

- час регулювання  $t_p = 2,24$  с;
- перерегулювання  $\sigma = 8,5\%$ ;
- час досягнення першого максимуму  $t_{max} = 1,26$  с;
- час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,71$  с.

За виглядом кривої, цей перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням (на відміну від перехідного процесу початкової системи).

Отже, реалізація отриманого виразу передавальної функції коригуючого пристрою відповідає заданим вимогам до якості системи.

## 4 Практична втілення системи автоматичного регулювання

### 4.1 Оцінка періоду дискретизації

З використанням вихідних даних визначаємо оптимальний період квантування сигналів у цифровій системі.

Частотна передавальна функція об'єкта керування виражена рівнянням

$$W_{OK}(p) = \frac{7,128}{p(0,05p+1)(4,2p+1)} \quad (4.1)$$

Частотна передавальна функція регулятора виражена рівнянням

$$W_P(p) = \frac{(1,7p+1)}{(0,05p+1)} \quad (4.2)$$

У цьому випадку необхідна точність управління об'єктом в усталеному режимі  $\Theta_{om} = 0.1$ .

Частотна передавальна функція замкненої системи задається виразом:

$$\beta(j\omega) = \frac{W_P(j\omega) \cdot W_{OK}(j\omega)}{1 + W_P(j\omega) \cdot W_{OK}(j\omega)} = \Theta \quad (4.3)$$

Внаслідок підстановки виразів (4.4, 4.5) у (4.6) отримаємо:

$$\frac{7,128(1,7 \cdot j\omega + 1)}{j\omega(0,05 \cdot j\omega + 1)(4,2 \cdot j\omega + 1)(0,05 \cdot j\omega + 1) + 7,128(1,7 \cdot j\omega + 1)} = 0,1 \quad (4.4)$$

Визначивши розв'язок цього рівняння, отримуємо значення частоти  $\omega_{\max} = 12,96$ .

Раціонально обраний розрахунковий період квантування сигналів.

$$T_{роз} = \frac{\pi}{\omega_{\max}} = \frac{\pi}{12,96} = 0,24c \quad (4.5)$$

Приймаємо  $T < T_{роз}$   $T_d = 0,01$  с

Такий період дискретизації обирається з метою забезпечення максимальної точності роботи системи.

#### 4.2 Обчислення Z-перетворення передаточної функції регулятора

Для впровадження мікропроцесорної системи керування потрібно здійснити Z-перетворення передаточної функції регулятора, отриманої в результаті синтезу в розділі 3:

$$W_p(p) = \frac{(1,7p + 1)}{(0,05p + 1)} \quad (4.6)$$

Розкладемо передаточну функцію регулятора на прості дроби:

$$W_p(p) = 34 - \frac{33}{(0,05p + 1)}. \quad (4.7)$$

Далі проведемо Z-перетворення за допомогою середовища MatLab при дискретизації з періодом  $T_0 = 0.01$  с.

$$W_p(z) = 34 - \frac{11,37}{z - 0,574}. \quad (4.8)$$

$$W_p(z) = 34 - \frac{11,37 \cdot z^{-1}}{1 - 0,574 \cdot z^{-1}} \quad (4.9)$$

На основі отриманої дискретної передаточної функції регулятора формулюємо різницеве рівняння:

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

$$u_1[n] = 34 x[n];$$

$$u_2[n] = - 11,37 x[n-1] - 0,574 u_2[n-1];$$

Програмну реалізацію подано на рисунку 4.1, де коефіцієнти мають такі значення:

$$a = 34; b_1 = - 11,37; b_2 = - 0,574;$$

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

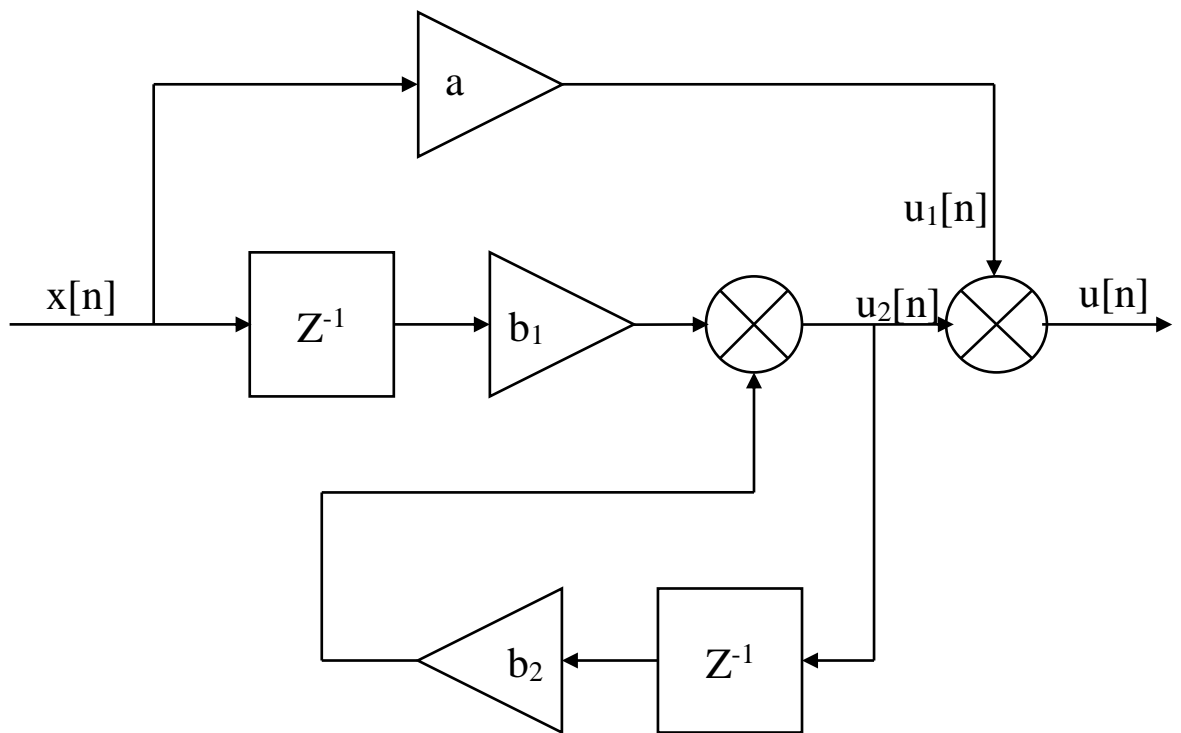


Рисунок 4.1 – Структурна схема програмної реалізації регулятора

### 4.3 Опис принципової схеми регулятора

Цифровий регулятор розробляється на базі однокристальної мікроЕОМ AVR - AT90S8515.

Цей мікроконтролер має такі особливості:

8-ми розрядний AVR® мікроконтролер з 8 Кбайт Flash пам'яті, що підтримує внутрішньосистемне програмування.

Особливості:

AVR® — висока ефективність та архітектура RISC з низьким споживанням енергії

118 ефективних інструкцій, більшість з яких виконуються за один такт

8 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою програмування в системі:

- SPI послідовний інтерфейс для завантаження програмного коду

Ресурси: 1000 циклів запису/стирення

- 512 байт EEPROM
- Ресурс: 100 000 циклів запису/стирення
- 512 байт внутрішньої SRAM
- 32 регістри загального призначення по 8 біт
- 32 програмовані шини I/O
- Програмований послідовний UART
- SPI послідовний інтерфейс
- Напруга VCC: від 2.7 В до 6.0 В

Повністю статичний режим роботи:

- Від 0 до 8 МГц (від 4.0 В до 6.0 В)
- Від 0 до 4 МГц (від 2.7 В до 4.0 В)
- Продуктивність: до 8 MIPS при 8 МГц

- Один 8-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником частоти

- Один 16-розрядний таймер/лічильник з окремим попереднім дільником частоти, режимами порівняння та захоплення

- Подвійний ШИМ

Зовнішні та внутрішні джерела переривань

- Програмований таймер з функцією спостереження та вбудованим тактовим генератором

- Вбудований аналоговий компаратор

Режими зниженого енергоспоживання:

- Режим спокою (Idle)
- Режим відключення (Power Down)

Програмувальне блокування для забезпечення безпеки програмного забезпечення

AT90S8515 — це 8-ми розрядний CMOS мікроконтролер з низьким енергоспоживанням, побудований на удосконаленій AVR RISC архітектурі. Завдяки виконанню високопродуктивних інструкцій за один такт, AT90S8515 досягає продуктивності, близької до 1 MIPS на МГц, що

дає розробникам можливість оптимізувати енергоспоживання залежно від необхідної обчислювальної потужності.

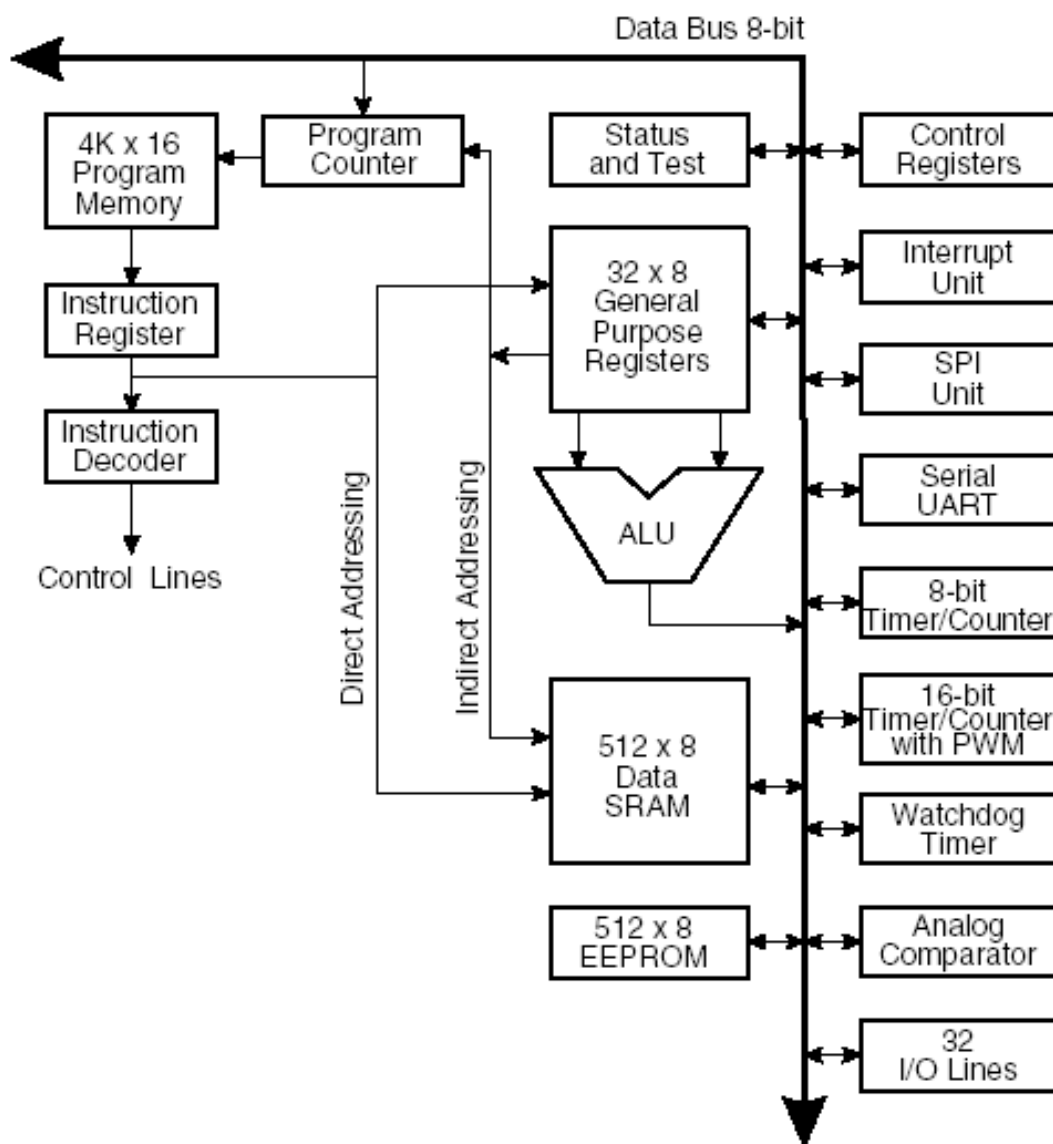


Рисунок 4.2 – Блок-схема AT90S8515

Ядро AVR має потужний набір інструкцій та 32 регістри загального призначення. Усі ці регістри безпосередньо підключені до арифметико-логічного пристрою (АЛП), що дозволяє отримати доступ до двох незалежних регістрів під час виконання однієї інструкції за один такт. Це забезпечує високу ефективність коду та значне підвищення пропускну здатності, до 10 разів більше, ніж у стандартних мікроконтролерах CISC.

AT90S8515 оснащений: 8 Кбайт Flash-пам'яті з підтримкою

програмування в системі, 512 байт EEPROM, 512 байт SRAM, 32 лініями I/O загального призначення, 32 регістрами загального призначення, універсальними таймерами/лічильниками з режимами порівняння, внутрішніми та зовнішніми перериваннями, програмованим послідовним UART, програмованим таймером з функцією спостереження та вбудованим тактовим генератором, а також програмованим SPI послідовним портом. Окрім того, є два програмовані режими економії енергоспоживання. Режим «Idle Mode» зупиняє процесор, але дозволяє працювати SRAM, таймеру/лічильникам, SPI порту та системі переривань. Режим «Power Down» зберігає значення регістрів, але вимикає тактовий генератор і всі інші функції мікроконтролера до наступного зовнішнього переривання або апаратної ініціалізації.

Пристрій виготовляється за допомогою технології енергонезалежної пам'яті з високою щільністю, розробленої компанією Atmel. Вбудована Flash-пам'ять з підтримкою внутрішнього програмування дозволяє перепрограмувати програмний код безпосередньо в системі через SPI послідовний інтерфейс або за допомогою стандартного програматора енергонезалежної пам'яті. Завдяки поєднанню вдосконаленого 8-розрядного RISC CPU і Flash-пам'яті з підтримкою внутрішнього програмування на одному кристалі, було створено високопродуктивний мікроконтролер AT90S8515, який пропонує гнучке та економічно ефективно рішення для численних систем управління.

AVR AT90S8515 підтримує повний набір програмних інструментів для розробки, включаючи компілятори C, макроасемблери, відладчики/симулятори програм, емулятори для внутрішньосхемного тестування та набори для створення макетів.

Для зчитування даних з датчиків використовується паралельний інтерфейс RS-485, реалізований за допомогою мікросхеми MAX1481 компанії MAXIM. Для опитування трьох термодатчиків застосовуються три мікросхеми паралельного інтерфейсу, позначені як

DD1-DD3.

Інтерфейс RS-485 (також відомий як EIA/TIA-485) є одним із найпоширеніших стандартів фізичного рівня комунікацій. Фізичний рівень визначає канал зв'язку та метод передачі сигналу (перший рівень моделі взаємозв'язку відкритих систем OSI).

Мережа, побудована на інтерфейсі RS-485, складається з приймально-передавальних пристроїв, з'єднаних через виту пару — два скручені проводи. Основою інтерфейсу RS-485 є принцип диференціальної (балансової) передачі даних, при якому сигнал передається через два проводи. Один провід (умовно А) несе оригінальний сигнал, а інший (умовно В) — його інверсну копію. Тобто, коли на одному проводі "1", на іншому буде "0" і навпаки. Таким чином, між двома проводами вити пари завжди існує різниця потенціалів: при "1" вона позитивна, а при "0" — негативна.

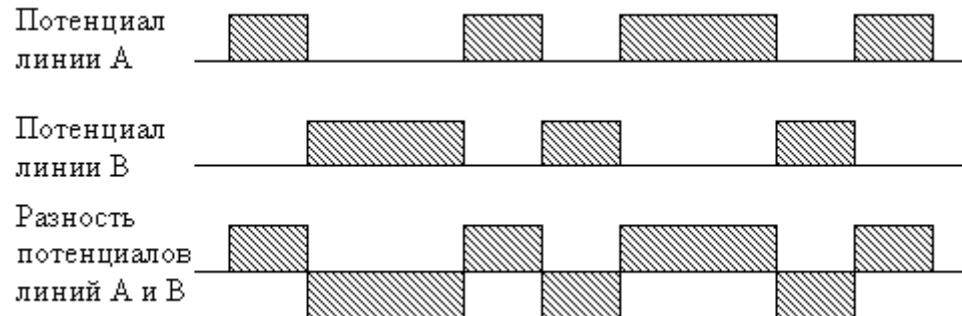


Рисунок 4.3 - Принцип диференціальної передачі інформації

Саме завдяки різниці потенціалів і передається сигнал. Такий метод передачі гарантує високу стійкість до синфазних перешкод. Синфазними називають перешкоди, що впливають на обидва проводи лінії однаково. Наприклад, електромагнітна хвиля, проходячи через лінію зв'язку, наводить потенціал на обох проводах. Якщо сигнал передається через потенціал одного проводу відносно загального (як в RS-232), то наведення на цей провід може спотворити сигнал через загальні шумові впливи, такі

як "земля". Крім того, на опорі довгого спільного проводу буде виникати різниця потенціалів, що додає шуми. У випадку диференціальної передачі такого перекручування не відбувається. Якщо два проводи знаходяться поруч і ще й скручені, наведення на обох проводах буде однаковим. Потенціал обох проводів змінюється однаково, і різниця потенціалів, що містить інформацію, залишається незмінною.

Апаратна реалізація інтерфейсу передбачає використання мікросхем приймально-передавальних пристроїв з диференціальними входами/виходами (для лінії) та цифровими портами (для підключення до портів UART контролера). Існують два варіанти такого інтерфейсу: RS-422 та RS-485.

RS-422 — це повнодуплексний інтерфейс, де прийом і передача здійснюються через дві окремі пари проводів. На кожній парі проводів може бути лише один передавач.

RS-485 — це напівдуплексний інтерфейс, де прийом і передача здійснюються через одну пару проводів з поділом за часом. У мережі може бути кілька передавачів, оскільки вони можуть вимикатися під час прийому.

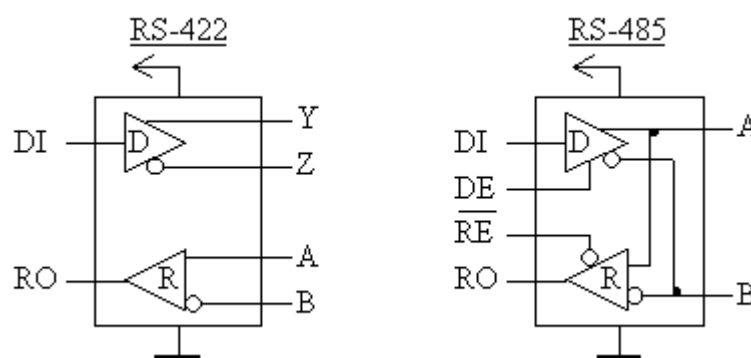


Рисунок 4.4 – схема функціональної апаратної реалізації інтерфейсу

D (driver) — передавальний пристрій;

R (receiver) — приймальний пристрій;

DI (driver input) — цифровий вхід передавального пристрою;

RO (receiver output) — цифровий вихід приймального пристрою;

- DE (driver enable) — сигнал дозволу для передавача;
- RE (receiver enable) — сигнал дозволу для приймача;
- A — прямий диференціальний вхід/вихід;
- B — інверсний диференціальний вхід/вихід;
- Y — прямий диференціальний вихід (RS-422);
- Z — інверсний диференціальний вихід (RS-422).

Розглянемо детальніше приймально-передавальний пристрій RS-485. Цифровий вихід приймача (RO) підключається до порту приймання UART (RX), а цифровий вхід передавача (DI) — до порту передачі UART (TX). Оскільки на диференціальній стороні приймач і передавач з'єднані, необхідно вимикати передавач під час прийому та приймач під час передачі. Для цього використовуються керуючі входи — дозвіл приймача (RE) та дозвіл передавача (DE). Оскільки вхід RE інверсний, його можна під'єднати до DE і перемикаати між прийманням і передачею одним сигналом з будь-якого порту контролера. При рівні "0" пристрій працює в режимі прийому, а при рівні "1" — у режимі передачі.

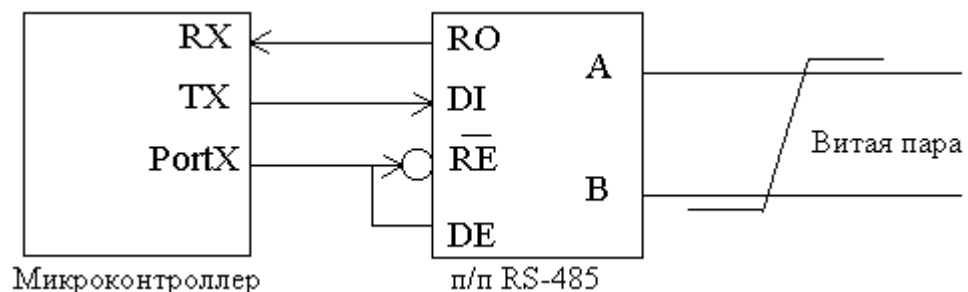


Рисунок 4.5 – Схема підключення інтерфейсу RS-485 до мікроконтролера

Приймач, отримуючи різницю потенціалів (UAB) на диференціальних входах (AB), перетворює їх на цифровий сигнал на виході RO. Чутливість приймача може варіюватися, але гарантовані межі розпізнавання сигналу зазвичай вказуються в документації виробників мікросхем приймально-передавальних пристроїв. Зазвичай ці пороги становлять  $\pm 200$  мВ. Тобто, коли  $UAB > +200$  мВ, приймач визначає "1", а коли  $UAB < -200$  мВ — "0". Якщо різниця потенціалів на лінії занадто мала

і не перевищує ці граничні значення, правильне розпізнавання сигналу не гарантується. Крім того, в лінії можуть бути не синфазні перешкоди, які спотворюють такий слабкий сигнал.

Усі пристрої підключаються до однієї вити пари однаково: прямі виходи (А) підключаються до одного проводу, а інверсні (В) — до іншого.

Вхідний опір приймача з боку лінії (RAB) зазвичай становить 12 кОм. Оскільки потужність передавача обмежена, це накладає обмеження на кількість приймачів, які можна підключити до лінії. Згідно зі специфікацією RS-485, з урахуванням резисторів, що узгоджують, передавач може підключити до 32 приймачів. Проте існують мікросхеми з підвищеним вхідним опором, які дозволяють підключити до лінії значно більше ніж 32 пристрої.

Згідно зі специфікацією RS-485, максимальна швидкість передачі даних може досягати 10 Мбод/с, а максимальна відстань — 1200 м. Якщо потрібно організувати зв'язок на більшій відстані або підключити більше пристроїв, ніж дозволяє навантажувальна здатність передавача, використовують спеціальні повторювачі (репітери).

Інтерфейс RS-485 також використовується для підключення мікроконтролера до парового калорифера, з метою передачі керуючих команд і отримання інформації про стан холодильної установки.

Для управління подачею пари за допомогою мікроконтролера застосовується схема увімкнення та вимкнення двигуна, яка базується на транзисторному ключі та оптосемісторі.

Для отримання інформації про стан температури в сушильній вежі на різних рівнях передбачений чотирьох знаковий восьми сегментний індикатор, а для вибору рівня з якого необхідно зняти температуру використовується клавіатура 3x4.

## Висновки

1. У процесі виконання роботи була вивчена технологія виробництва сухого молока та основні тенденції його розвитку.
2. Розроблена структурна схема системи автоматичного контролю температури вихідного повітря з сушильної вежі та обрані її компоненти.
3. У роботі проведено аналіз системи автоматичного регулювання, визначено резерви стійкості, час регулювання та інші параметри системи без використання регулятора.
4. Методом синтезу була визначена передаточна функція регулятора, а також оцінені показники якості роботи налаштованої системи: час регулювання  $t_p = 2,24$ ; перерегулювання  $\delta = 8,5 \%$ ; час наростання перехідного процесу  $t_n = 0,71$  с; час досягнення першого максимуму  $t_{\max} = 1,26$  с. За характеристиками кривої, цей перехідний процес є аперіодичним з перерегулюванням. Запас стійкості по амплітуді  $Z_A$  становить не менше 15 дБ, а запас стійкості по фазі  $Z_\phi$  – не менше  $30^\circ$ .
5. Розроблені принципова схема системи автоматичного регулювання 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.Єрьюменко. – Харків: ХНАДУ, 2011. - 286 с.
5. Matlab Documentation.[Електронний ресурс]. - Режим доступу: - <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/control>.
6. Simulink Documentation [Електронний ресурс]. - Режим доступу: <http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/simulink>.
7. Теорія систем керування: підручник / В.І. Корнієнко, О.Ю. Гусєв, О.В. Герасіна, В.П. Щокін; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпро: НГУ, 2017. – 497 с.
8. А.П. Ладанюк Теорія автоматичного керування технологічних об'єктів: Навч. посіб. / А.П. Ладанюк, К.С. Архангельська, Л.О. Власенко – К.: НУХТ, 2014. – 274 с.
9. Автоматизація виробничих процесів: навч. посіб. / Б. М. Гончаренко, С. І. Осадчий, Л. Г. Віхрова [та ін.]. - Кіровоград: Лисенко В.Ф., 2016. - 352 с.

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