

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри електронної техніки

Вовна О.В.

(підпис)

(ініціали, прізвище)

«__» _____ 2021 р.

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи
визначення характеристик перетворення термоанемометрів»

Виконав: студент 2 курсу, групи ІВТзм-19

(шифр групи)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка

(шифр і назва спеціальності)

Руденко Роман Олександрович

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник професор кафедри ЕТ, д.т.н., проф.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

А.А. Зорі

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

*Засвідчую, що у цій випускній кваліфікаційній
роботі немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.*

Студент _____

(підпис)

Покровськ – 2021 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій,
автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки

(повна назва кафедри)

Захист відбувся _____

(дата)

з оцінкою _____

Секретар ДЕК _____

(підпис)

Випускна кваліфікаційна робота

магістра

Тема: «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи
визначення характеристик перетворення термоанемометрів»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент

гр. ІВТзм – 19

Руденко Р.О.

(підпис, дата, П.І.П.)

Керівник

проф. Зорі А.А.

(підпис, дата, П.І.П.)

Консультанти:

проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П.)

проф. Зорі А.А.

(підпис, дата, П.І.П.)

доц. Лактіонов І.С.

(підпис, дата, П.І.П.)

ст. викл. Тюрін Є.А.

(підпис, дата, П.І.П.)

Нормоконтроль

проф. Вовна О.В.

(підпис, дата, П.І.П.)

Покровськ – 2021

**Державний вищий навчальний заклад
"Донецький національний технічний університет"**

Інститут, факультет Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації, електроінженерії та радіоелектроніки

Кафедра Електронна техніка

Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр

Галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування

(шифр і назва)

Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка

(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри електронної техніки

Вовна О.В.

« _____ » 2021 року

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Руденко Роман Олександрович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи)	<u>Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи визначення характеристик перетворення термоанемометрів</u>
--------------------------	--

керівник проекту (роботи) Зорі Анатолій Анатолійович, д.т.н., проф.

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від 29.01.2021 року № 35

2. Строк подання студентом проекту (роботи) _____

3. Вихідні дані до проекту (роботи) _____

Технічна документація та матеріали з переддипломної практики

4.Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) аналіз технічних характеристик об'єкту; математична модель вимірювального каналу; обґрунтування та розробка структури інформаційно-вимірювальної системи; розробка структурної та принципової схем інформаційно-вимірювальної системи

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

6. Консультанти розділів проекту (роботи)

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	д.т.н., проф., проф. каф. ЕТ Зорі А.А.		
2	д.т.н., проф., проф. каф. ЕТ Зорі А.А.		
3	д.т.н., проф., зав. каф. ЕТ Вовна О.В.		
4	к.т.н., доц., доц. каф. ЕТ Лактіонов І.С.		
А	ст. викл каф. ОП Тюрін Є.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз характеристик і параметрів процесу вимірювання витрат газу термоанемометрами		
2	Розробка математичної моделі системи визначення характеристик перетворення термоанемометрів		
3	Розробка вимірювального каналу системи визначення температури повітря в трубі		
4	Розробка структури інформаційно-вимірювальної системи		
5	Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві		

Студент

_____ (підпис)

Руденко Р.О.

_____ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

_____ (підпис)

Зорі А.А.

_____ (прізвище та ініціали)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

Посада П.І.Б.	Суть зауваження, оцінка та підпис

АНОТАЦІЯ

Руденко, Р.О. Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи визначення характеристик перетворення термоанемометрів / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2021.

Пояснювальна записка: 78 стор., 28 рис., 2 табл., 20 посилань.

Обґрунтовано та розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури, на основі аналізу структурних систем автоматичного регулювання температури вибрано структуру, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку, для реалізації структури системи керування тиристорним регулятором, застосовано спосіб широтно-імпульсної модуляції. Для обґрунтування та розробки функціональної схеми виконані дослідження зміни температури газу під час нагрівання та охолодження в трубі для різних швидкостей потоку або витратах газу та середньої потужності нагрівача, за результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною величиною потужності нагрівача визначено величини мінімального часу перехідного процесу. Під час досліджень встановлено, що результати вимірювання температури термістором суттєво залежать від величини струму, який протікає через термістор, для усунення цього ефекту запропоновано значення теплової потужності, що розсіюється на термісторі, не повинно бути більше ніж 1 мВт. Обґрунтовано та розроблено принципові схеми вимірювального каналу температури, які складаються з ланки узгодження, що виконано на базі різницевого підсилювача, блоку формувача уставок, підсилювача помилки та тиристорного регулятора.

Ключові слова: вимірювання, температура, характеристика перетворення, сенсор, термоанемометр, система керування.

ABSTRACT

Rudenko, R.O. Development and research of the information-measuring system for determining of the hot-wire anemometers transformation characteristics / Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 152 'Metrology and information-measuring technique'. – SHEI 'DonNTU', Pokrovsk, 2021.

Explanatory note: 78 p., 28 fig., 2 table, 20 references.

The structural scheme of the information-measuring system for determining the static characteristics of the transformation of temperature sensors is substantiated and developed. Based on the analysis of structural systems of automatic temperature control, a structure implementing the principle of smooth feedback is selected for. To substantiate and develop a functional diagram, studies of gas temperature change during heating and cooling in the pipe for different flow rates or gas flow rates and average heater power, based on the measurement of gas temperature during heating and cooling of gas in the pipe with maximum gas flow rate and maximum the value of the heater power determines the values of the minimum transient time. Studies have shown that the results of temperature measurement by a thermistor significantly depend on the amount of current flowing through the thermistor, to eliminate this effect; the proposed value of thermal power dissipated by the thermistor should not exceed 1 mW. The basic schemes of the temperature-measuring channel are substantiated and developed, which consist of the coordination link, which is made because of the differential amplifier, the unit of the setter, the error amplifier and the thyristor regulator.

Key words: measurement, temperature, conversion characteristics, sensor, thermoanemometer, control system.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ГАЗУ ТЕРМОАНЕМОМЕТРАМИ.....	12
1.1 Якісний аналіз термоанемометричного способу вимірювання витрат газу.....	12
1.2 Аналіз меж застосування термістора для побудови термоанемометра постійної температури.....	14
1.3 Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи витрати газу.....	16
1.3.1 Задачі градуювання термоанемометричних сенсорів.....	17
1.3.2 Алгоритм градуювання термоанемометричних сенсорів.....	18
1.3.3 Технічний опис установки для визначення статичних характеристик перетворення сенсорів.....	19
1.3.4 Аналіз технічних характеристик прототипу інформаційно- вимірювальної системи.....	20
1.4 Обґрунтування мети та постановка задач досліджень.....	21
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕРМОАНЕМОМЕТРІВ.....	22
2.1 Обґрунтування та розробка структурних схем системи.....	22
2.2 Розробка математичної моделі системи керування значення температури.....	23
2.3 Висновки.....	36
3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ В ТРУБІ.....	38
3.1 Розробка вимірювального перетворювача зміни температури повітря в трубі.....	38

3.2 Розробка принципової схеми ланки узгодження вимірювального каналу.....	44
3.3 Розробка принципової схеми формувача уставок.....	46
3.4 Розробка принципової схеми підсилювача помилки вимірювального каналу.....	47
3.5 Розробка схеми керування тиристорного регулятора.....	48
3.6 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального каналу температури.....	58
3.7 Висновки.....	62
4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ.....	64
ВИСНОВКИ.....	67
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	70
ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві.....	72

ВСТУП

Актуальність теми. Проблеми під час вимірювання витрати рідин, газів, пульп, розплавів та інших речовин стають більш актуальними. Це пов'язано з освоєнням та створенням нових технологій в галузях промисловості, а саме в металургійній, хімічній та енергетичній. Також проблеми виникають під час проведення наукових досліджень з термодинаміки, хімії, теплофізики та ін. Вимірювальні системи витрат газу та рідини застосовуються для визначення обсягу газу, нафти та інших речовин, транспортування яких здійснюється за допомогою трубопроводів. Без застосування цих вимірювальних системи неможливо здійснювати контроль щодо витоку, а також зменшити втрати цих продуктів. Зменшення величини похибки вимірювання на 1% може мати дуже високе економічне значення. Застосування точних вимірювачів газу, рідини та пари дозволить ефективно використовувати ресурси води та енергоносіїв країни.

Однією з основних вимог до систем вимірювального контролю витрат є висока точності вимірювання. Декілька десятків років тому величини відносної похибки вимірювання витрати від 1,5 до 2 % вважалась задовільним та нормальним значенням. У теперішній час необхідно забезпечити величину відносної похибки не більше (0,2 – 0,5) %. Це підвищення точності можливо завдяки використанню нових сучасних способів і засобів вимірювання, а саме електромагнітних, тахометричних, ультразвукових та інших способів, а також модернізації та удосконаленню класичних способів вимірювання. Зниження величини відносної похибки вимірювання потребує здійснення градування первинних вимірювальних перетворювачів з більшою точністю, що є актуальною науково-практичною задачею.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є підвищення точності визначення статичної характеристики перетворення термістора під час його градування для термоанемометрів визначення витрат газу.

Для досягнення зазначеної мети в дослідженні представлені **такі задачі**:

- виконати аналіз характеристик і параметрів процесу вимірювання витрат газу термоанемометрами;
- розробити математичну модель системи визначення характеристик перетворення термоанемометрів;
- розробити вимірювальний канал системи визначення температури повітря в трубі;
- розробити структуру інформаційно-вимірювальної системи.

Об'єкт дослідження: процеси, що протікають у вимірювальних каналах температури повітря для визначення витрат газу термоанемометрами.

Предмет дослідження: методи та засоби підвищення точності визначення статичної характеристики перетворення термістора під час його градування для термоанемометрів визначення витрат газу.

Методи дослідження базуються на положеннях теорії вірогідності та математичної статистики, теорії інформаційно-вимірювальних систем та систем, теорії випадкових процесів, теорії планування наукового експерименту, комп'ютерного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Обґрунтовано та розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури, на основі аналізу структурних систем автоматичного регулювання температури вибрано структуру, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку, для реалізації структури системи керування тиристорним регулятором, застосовано спосіб широтно-імпульсної модуляції.

2. Для обґрунтування та розробки функціональної схеми виконані дослідження зміни температури газу під час нагрівання та охолодження в трубі для різних швидкостей потоку або витратах газу та середньої потужності нагрівача, за результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною величиною потужності нагрівача визначено величини

мінімального часу перехідного процесу.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Під час досліджень встановлено, що результати вимірювання температури термістором суттєво залежать від величини струму, який протікає через термістор, для усунення цього ефекту запропоновано значення теплової потужності, що розсіюється на термісторі, що не повинно бути більше ніж 1 мВт.

2. Обґрунтовано та розроблено принципові схеми вимірювального каналу температури, які складаються з ланки узгодження, що виконано на базі різницевого підсилювача, блоку формувача уставок, підсилювача помилки та тиристорного регулятора.

Особистий внесок здобувача. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи магістра одержані автором самостійно. Автором особисто: проаналізовано характеристики та параметрів процесу вимірювання витрат газу термоанемометрами; розроблено математичну модель системи визначення характеристик перетворення термоанемометрів; розроблено вимірювальний канал системи визначення температури повітря в трубі; розроблено структуру інформаційно-вимірювальної системи.

Апробація результатів роботи. Основні розділи роботи пройшли апробацію на наукових семінарах кафедри електронної техніки ДВНЗ «Донецький національний технічний університет» (м. Покровськ, 2019 – 2021 рр.).

Структура та обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Структура кваліфікаційної роботи магістра визначена загальною схемою наукового дослідження, метою досліджень та шляхами її досягнення. Робота складається зі вступу, чотирьох розділів, основних висновків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи містить 78 сторінки машинописного тексту, зокрема 71 сторінок основного тексту, 28 рисунків, 2 таблиці та список використаних джерел із 20 найменувань.

1 АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК І ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТ ГАЗУ ТЕРМОАНЕМОМЕТРАМИ

1.1 Якісний аналіз термоанемометричного способу вимірювання витрат газу

Термоанемометричні вимірювальні системи витрати базуються на залежності зміни швидкості або витрати потоку від втрати тепла нагрітого тіла (первинного вимірювального перетворювача). Це вимірювальний елемент розташовується в потоці газу або рідини [1, 2].

Вимірювальне значення величини, що є мірою витрат, – є температура вимірювального перетворювача під час дії постійної потужності нагрівання, або потужність, що має місце під час постійної температури вимірювального перетворювача. У вимірювальній системі, що розробляється, як вимірювана величина застосовується потужність, яка розсіюється під час нагрівання вимірювального перетворювача з постійною температурою нагрівання.

До переваг термоанемометричних вимірювачів витрат можна віднести:

- під час застосовування термоанемометричних вимірювачів, що визначають масове значення витрат, зміна щільності речовини, що вимірюється вимірюваної практично не впливає на результати вимірювання;

- під час визначення зміни «потужності нагрівача має місце зміна в широкому діапазоні шкали» [2];

- вимірювальні перетворювачі виготовляють з трубок, які мають будь-який діаметр, значення якого може змінюватися від десятої частки міліметра до метру та більше, отже, теплові вимірювачі витрат забезпечують вимірювання під час дії широкого діапазону зміни тиску ;

- не має втрат тиску газу в трубопроводі під час здійснення вимірювання;

- для цими вимірювачами витрат можна здійснювати розрахунок параметрів статичної характеристики перетворення за результатами

вимірювання окремих параметрів, які входять до рівняння;

- «конструкція вимірювальних перетворювачів теплових втрат є дуже простою, а спосіб встановлення цього перетворювача на трубопровід також є нескладним» [3];

- відносно проста реалізацію способу вимірювання;

- термоанемометричні вимірювачі мають відносно невелике значення постійної часу вимірювання, ця величина визначається постійною часу термістора та складає не більш 0,5 с.

Термоанемометричні вимірювачі витрат мають значення статичної похибки вимірювання такого ж порядку, як у інші вимірювачі витрати .

До недоліків термоанемометричних вимірювачів витрати зазвичай відносять [1, 2]:

- невелика надійність, що напряму залежить від процесу окислення чутливого вимірювального елемента, який є металевим дротом або напівпровідниковим термістора;

- необхідність розташування чутливого елемента вимірювального перетворювача напряму в трубопроводі;

- необхідно постійно виконувати градуювання, що пов'язано зі зміною параметрів перетворювачів;

- має місце нелінійність статичної характеристики перетворення, а саме зменшення крутизни в області високих витрат під час дії незмінної потужності нагрівача, це призводить до підвищення величини похиби під час здійснення вимірювання великих значень витрат;

- вимірювальне значення витрати залежить від багатьох параметрів, які входять до рівняння статичної характеристик перетворювача.

Якщо оцінити переваги та недоліки вимірювальних системи витрати, то можна зробити висновок, що галузь застосування – це вимірювальний контроль витрати неагресивного пального та інертних газів у промисловості.

1.2 Аналіз меж застосування термістора для побудови термоанемометра постійної температури

Як первинний вимірювальний перетворювач, який нагрівається, використовується металева нитка або плівка, а також напівпровідниковий опір, зміна параметрів якого залежить від температури, який виготовлено в формі бусинок або циліндрів. Протягом останнього час найбільше розповсюдження отримали тонкі металеві плівки. Ці плівки нанесено на керамічну або скляну підставу. Також широко знайшли широке застосування напівпровідникові термоопору, які виготовлено у виді бусинок [3, 4].

Параметри термоанемометрів залежать не тільки від зміни швидкості потоку, а також вони залежать від тиску й температури вимірювального середовища. Вплив цих факторів компенсується за допомогою спеціальних вимірювальних схем у деяких конструкціях вимірювачів.

Під час підвищення величини температури термоелемента його значення чутливості збільшується, також має місце менший вплив зміна температури вимірюваного потоку на результати вимірювання витрат. Проте, підвищення значення температури обмежується параметрами матеріалу, з якого виготовлено термоелемента.

Під час порівняльного аналізу термочутливих елементів, що виготовлено з металевих та напівпровідникових матеріалів, можна зробити такий висновок, що металеві нитки порівняно мають невисоке значення механічної міцності, проте вони мають достатньо стійкі характеристики. У термісторів має місце досить непогані механічні властивості, проте вони сильно старіють та є чутливими до зміни багатьох параметрів вимірювального середовища.

Значення витрати газу під час застосовування термоанемометричного способу вимірювання зі застосування, як чутливого вимірювального перетворювача. напівпровідникового термоопору визначається за таким співвідношенням [4, 5]:

$$\rho v = \frac{f}{d} \cdot \frac{L \cdot A \cdot (T_w - T_g) - Q \cdot (L + A)}{\eta \sqrt{D \cdot Q - L \cdot (T_w - T_g)}}, \quad (1.1)$$

де Q – теплова потужність сенсора термоанемометра; T_g – абсолютна величина вимірювання температури сенсором термометра; T_w – абсолютна величина сенсора ТА; f – в'язкість газу під час дії заданої температури; v – швидкість газу; ρ – щільність газу під час дії робочих умовах експлуатації вимірювача; d – характерний розмір сенсора; D – функція зміни температури газу та перегрівання, яку отримано під час обробки статичної характеристики перетворення ТА; L, A, η – постійні, значення яких одержано під час обробки статичної характеристики перетворення ТА.

«Величина теплової потужності сенсора ТА визначається зв таким співвідношенням» [1, 2]:

$$Q = \frac{(E - E_{zc})^2}{R_m}, \quad (1.2)$$

де E – значення напруги вимірювального моста ТА, E_{zc} , R_m – постійні величини, які задаються характеристиками та параметрами елементів схеми.

Значення функції D може бути розраховано за такою формулою:

$$D = a \cdot l_g \cdot \left(\frac{T_g}{T_w} \right)^m, \quad (1.3)$$

де l_g – теплопровідність газу під час дії температури T_g ; a, m – постійні величини, що визначаються під час обробки статичної характеристики перетворення ТА.

«Значення температури газу визначається за такою формулою» [1, 2]:

$$T_g = \frac{B \cdot 293,15}{B - 293,15 \cdot \ln\left(\frac{R_{Tg}}{R_{293,15}}\right)}, \quad (1.4)$$

де B – постійна величини, що визначена під час обробки статичної характеристики перетворення сенсора термометра; R_{Tg} – опір сенсора під час дії температури T_g ; $R_{293,15}$ – опір сенсора термометра під час дії абсолютної температури 293,15 К.

З аналізу наведених співвідношень, що застосовуються для визначення витрат газу за допомогою цього способу крім параметрів, які характеризують властивості газу (T_g, f, l_g), необхідно знати значення деяких постійних (L, A, n, a, m), які характеризують властивості сенсора ТА. Значення цих параметрів можна отримати під час визначення статичної характеристики перетворення сенсора ТА.

1.3 Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи витрати газу

Об'єктом вимірювального контролю є інформаційно-вимірювальна системи визначення витрат газу, принцип якої базується на термоанемометричному способів вимірювання. Ця система дозволяє виконувати вимірювання об'ємної витрати газу в межах від 6 до 955200 м³/год, якщо діаметри трубопроводу знаходиться в межах від 100 до 1300 мм, а також зміні температури газу від –40 до +50°C з тиском до 7 МПа. До складу інформаційно-вимірювальної системи входять вимірювач швидкості потоку (ВШП), який складається з двох вимірювальних перетворювачів – перетворювача термоанемометра (ТА) та перетворювача термометра (Т). Також система має обчислювач витрати газу (ОРГ), що за результатами вимірювання перетворювачів визначає величину витрати газу, персонального комп'ютера, що здійснює архівування результатів вимірювань з допоміжними сервісними

функціями. Структурну схему інформаційно-виміральної системи визначення витрат газу наведено на рис 1.1 [6].

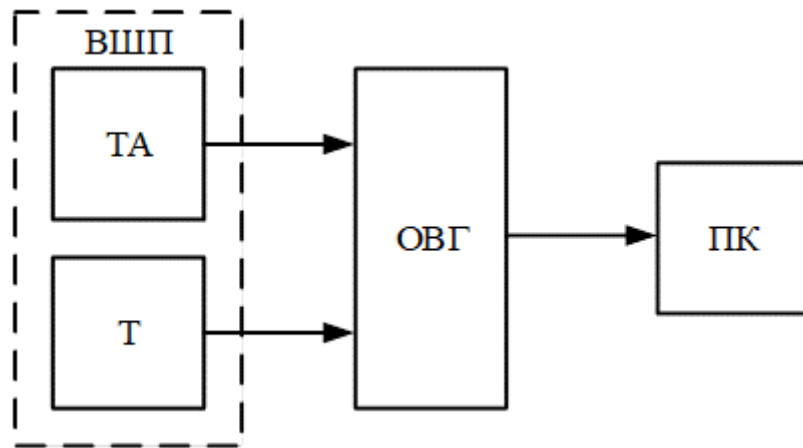


Рисунок 1.1 – Структурна схема інформаційно-виміральної системи визначення витрат газу

Інформаційні сигнали від сенсорів термоанемометра, значення потужності нагрівання якого залежить від зміни витрат газу, та термометра, що здійснює вимірювання температури газу в трубопроводі, передаються до відповідних вимірально-перетворювачів – вимірально-резистивних мости. За різницею результатів вимірювання сенсорів ТА і Т обчислювач визначає величину витрати газу по формулою (1.1).

1.3.1 Задачі градуювання термоанемометричних сенсорів

Для визначення значень постійних констант, що входять до складу формули (1.1) виникає задача здійснення градуювання сенсорів ТА. Для цього необхідно отримати залежності зміни значень вихідного сигналу ТА від витрат газу під час дії різних температур нагрівання газу [6, 7]:

$$R_w = f(\rho v, T_g), \quad (1.5)$$

де R_w – опір термоанемометра; ρv – величина масової витрати; T_g – температура термоанемометра.

1.3.2 Алгоритм градуювання термоанемометричних сенсорів

Для отримання статичної характеристики перетворення термоанемометра необхідно визначити масиви (v_{cp} ; ΔT) – середня за перетином швидкість потоку газу; різниця між вимірювальними значеннями температур ТА й термістора. Ці масиви отримуються за допомогою заздалегідь відомих установлених дискретних значень швидкості потоку газу в трубі, які змінюються у всьому діапазоні швидкості потоку та відомих заздалегідь значень температури газу в трубі, які отримуються за допомогою нагрівача та вимірюються сенсором у всьому діапазоні зміни температур газу. «Значення температури нагрівання сенсора ТА підтримується постійної. Установка цих значень швидкості потоку та температури нагрівача виконується регулятором потужності» [6, 7].

Процес визначення статичної характеристик перетворення здійснюється таким чином: під час дії постійної температури повітря дискретно змінюється швидкість його потоку та знімаються результати вимірювання сенсора ТА, що дозволяє отримати один з масивів вимірювання. Потім виконується зміна температури до наступного значення, а цикл повторюється. Цей процес виконується у всьому інтервалі температур, що дозволяє отримати необхідний масив. «Необхідний облік часового інтервалу встановлення потрібної температури газу в трубі складає не менш 20 хвилин під час переходу від однієї температури до іншої. Значення часу встановлення необхідної швидкості становить не менш 30 секунд під час переходу від однієї швидкості до іншої» [6].

1.3.3 Технічний опис установки для визначення статичних характеристик перетворення сенсорів

Для отримання статичної характеристик перетворення сенсорів ТА виду (1.5) розроблено спеціальну установку, схему якої наведено на рис. 1.2. Ця установка «є трубою (4), що представляє собою аналог трубопроводу, який спирається на опори (8). Установка має двигун (1), який підключено завдяки ременю (2) із крильчаткою (3) та визначений напір повітря, що забезпечує, (аналог газу) в установці, а також нагрівача (12), який здійснює нагрівання повітря в трубі до необхідного значення температури» [6].

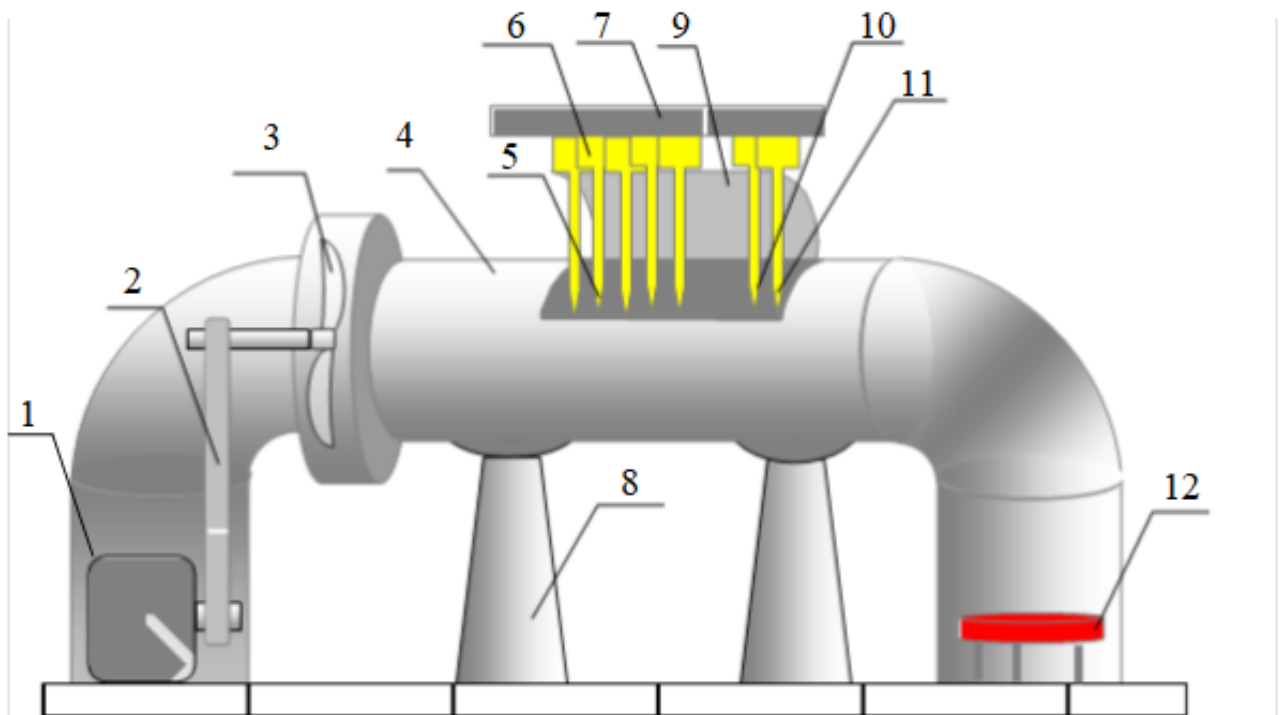


Рисунок 1.2 – Конструкція установки для визначення статичної характеристики перетворення сенсорів ТА

Вимірювальні перетворювачі, що досліджуються (5), яких може бути до шести сенсорів, та зразкові сенсори для вимірювання зразкових значень швидкості та температури, закріплюються в трубі на прикріплених до двох направляючих (7) спеціальних державок (6) на відстані від осі труби, значення

якої складає 0,242 від діаметра труби. На цій відстані витрати газу дорівнюють середньому значенню за перетином. Перед початком вимірювання усі сенсори закриваються кришкою (9) [6].

1.3.4 Аналіз технічних характеристик прототипу інформаційно-вимірювальної системи

У теперішній час розроблено та створено прототип інформаційно-вимірювальної системи, яка автоматично визначає статичні характеристики перетворення первинних вимірювальних перетворювачів ТА. На цьому етапі проектування прототип складається з таких основних блоків та вузлів [6]:

- двигуна постійного струму, який має потужність 4,5 кВт, він створює потрібний напір повітря в трубі;
- нагрівача, що споживає потужність 1,5 кВт, він необхідний для створення потрібної температури газу в трубі;
- аналог ділянки газопроводу, який має діаметр 400 мм;
- зразковий сенсор швидкості, який є трубка Піто;
- зразковий сенсор температури, що має абсолютне значення похибки вимірювання $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$;
- блоку первинної обробки вимірювальних значень від сенсорів, який виконує підсилення сигналів, їх масштабування та фільтрацію для уніфікації результатів вимірювання до вигляду, який є зручним для перетворення до цифрового формату даних;
- аналого-цифрового перетворювача;
- персональний комп'ютер, який застосовується для обробки результатів вимірювання від сенсорів та створення протоколу – запис результатів вимірювання від сенсорів та зведення їх до таблиці.

Цей прототип реалізується автоматичне зняття результатів вимірювання від сенсорів та введення цих значень до персонального комп'ютера. Основним

недоліком цього прототипу є процес ручного встановлення швидкості та температури повітря в трубі. Процес встановлення витрати газу є малоінерційним та може досить швидко встановлюватися під час завдання перемикачем уставок на необхідну швидкість. Проте, процес установки величини температури газу має велику інерційність, під час здійснення якого оператор втрачає доволі велику кількість часу. Так на установку кожної зі значень температури втрачається приблизно від 15 до 20 хвилин. Наступним недоліком є те, що зміна температури газу під час зміни величини витрати газу вимагає від оператора великої уваги протягом усього часу досліджень. У прототипі відсутній блок кінцевої обробки результатів для отримання статичної характеристики перетворення кожного сенсора. Існуюча система має змогу проводити одночасно дослідження невеликої кількості сенсорів за кількістю каналів інформаційно-вимірювальної системи.

1.4 Обґрунтування мети та постановка задач досліджень

Метою роботи є підвищення точності визначення статичної характеристики перетворення термоанометра під час його градуювання для термоанометрів визначення витрат газу. Зменшення величини абсолютної похибки вимірювання здійснюється завдяки підвищенню точності підтримки температури повітря в установці, що може здійснюватися в межах зміни на 1°C). Для досягнення зазначеної мети в дослідженні представлені такі задачі:

- виконати аналіз характеристик і параметрів процесу вимірювання витрат газу термоанометрами;
- розробити математичну модель системи визначення характеристик перетворення термоанометрів;
- розробити вимірювальний канал системи визначення температури повітря в трубі;
- розробити структуру інформаційно-вимірювальної системи.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕТВОРЕННЯ ТЕРМОАНЕМОМЕТРІВ

2.1 Обґрунтування та розробка структурних схем системи

Узагальнену структурну схему інформаційно-вимірювальної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури наведено на рис. 2.1 [7].

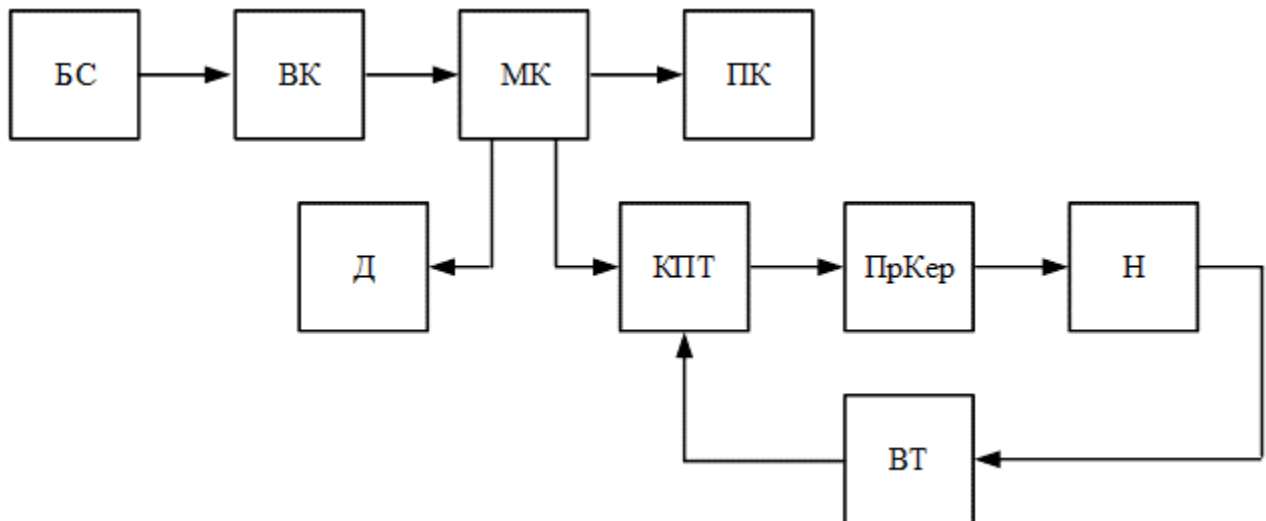


Рисунок 2.1 – Узагальнена структурна схема інформаційно-вимірювальної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури

До складу блоку сенсорів (БС) входять сенсори, статичні характеристик перетворення яких визначаються, а також зразкові сенсори. Вихідні сигнали від БС передаються до вимірювальних каналів (ВК), які виконують комутацію та фільтрації сигналів від сенсорів. Вихідні сигнали ВК передаються до мікроконтролера (МК), який здійснює первинну обробку результатів вимірювання та передачу їх до персонального комп'ютера (ПК). МК керує роботою нагрівача (Н) та двигуна (Д), а також здійснює загальне керування інформаційно-вимірювальною системою. У персональному комп'ютері

здійснюється усереднення результатів вимірювання та ведення архіву результатів вимірювання. Для здійснення підтримки величини температури під час вимірювання на постійному рівні застосовується канал підтримки температури (КПТ), який виконує порівняння уставок від МК та вихідної напруги вимірювача температури (ВТ). У залежності від їх різниці генерується значення напруги керування на пристрій керування (ПрКер) нагрівачем.

2.2 Розробка математичної моделі системи керування значення температури

Зміна та підтримка значення температури повітря в системі повинно здійснюватися завдяки системі автоматичного регулювання температури. На практиці застосовується декілька способів регулювання температури. Серед цих способів виділяють два основних – принципи жорсткого зворотного зв'язку («ВКЛ/ВИКЛ») та принцип плавного зворотного зв'язку (ЗЗ), що відстежує. Структурна схема системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принципом жорсткого зворотного зв'язку, наведено на рис. 2.2 [8].

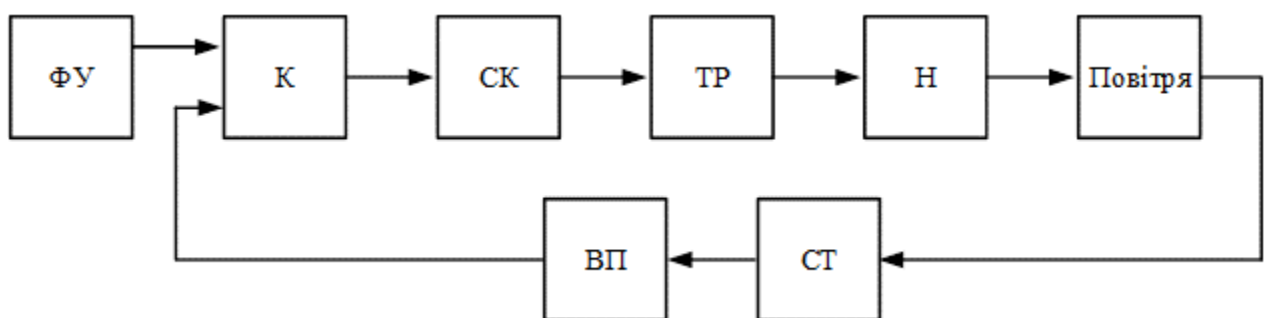


Рисунок 2.2 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип жорсткого зворотного зв'язку

Вихідний сигнал формувача уставок (ФУ) передається на один з двох входів компаратора (К). На другий вхід компаратора подається через вимірювальний перетворювач (ВП) вихідний сигнал сенсора температури (СТ),

який виконує вимірювання температури повітря в установці. Вихідний сигнал сенсора температури є сигналом зворотного зв'язку. Зміна сигналу компаратора через схему керування (СК) й тиристорний регулятор (ТР) забезпечує керування потужністю нагрівача (Н). Якщо величини сигналу на першому вході К більше ніж значення сигналу на іншому його вході, що є уставкою на нагрівання під час включеного компаратора, то до нагрівача подається максимальне значення потужності. Якщо сигнал на другому вході К дорівнює та більше ніж значення сигналу на його першому вході, тоді компаратор відключається та відключає нагрівач.

До переваг цього способу керування відноситься простота реалізації схемного рішення та невелике значення потужності, що споживається нагрівачем. До недоліків цього способу можна віднести те, що під час роботи нагрівача в режимі «ВКЛ/ВИКЛ» підвищується зношення нагрівального елемента. Також цей спосіб має невелику точність керування, що обумовлено інерційністю нагрівача та системи, особливо це має місце під час східчастого впливу.

До іншого способу керування зміною температури відноситься реалізація принципу плавного зворотного зв'язку, структурну схему реалізації цього способу наведено на рис. 2.3 [8].

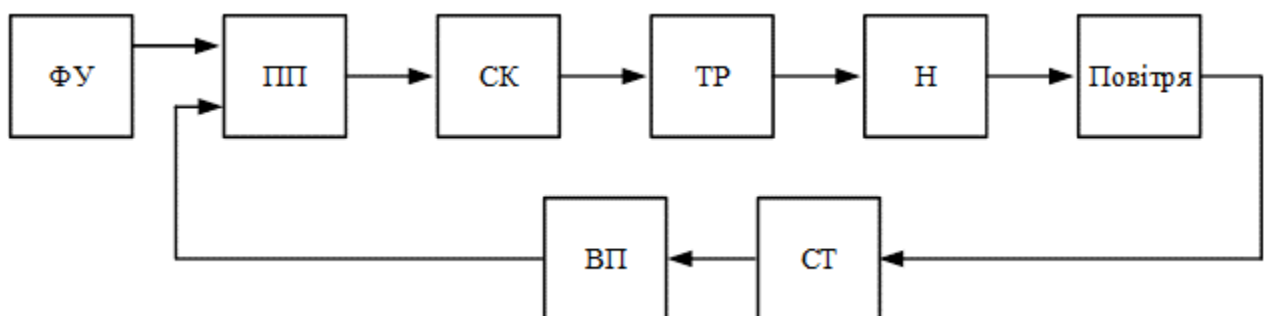


Рисунок 2.3 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку

Схема реалізації принципу плавного зворотного зв'язку практично збігається зі схемою, що реалізує жорсткий зворотній зв'язок за однією

різницею, замість компаратора (К) застосовується підсилювач помилки (ПП). Цей підсилювач збільшує величину сигналу неузгодженості між вихідними сигналами ФУ та ВП. Принцип побудови ПП зводиться до того, що під час переходу від однієї температури до іншої сигнал, що подається до нагрівача, відповідає максимальному значенню під час нагрівання або мінімальному значенню під час охолодження. Ці сигнали відповідають сигналам під час включення нагрівача на максимальну потужність або його відключення.

До переваг цього способу відноситься простота схмотехнічної реалізації, також завдяки використанню цього способу досягається велика точність регулювання, значення якої залежить від точності настройки ПП.

Отже, на основі аналізу структурних систем автоматичного регулювання температури вибираємо структуру, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку (див. рис. 2.3). Для реалізації структури, що реалізує систему керування тиристорним регулятором, застосовуємо спосіб широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Структурну схему системи керування тиристорним регулятором наведено на рис. 2.4 [9].

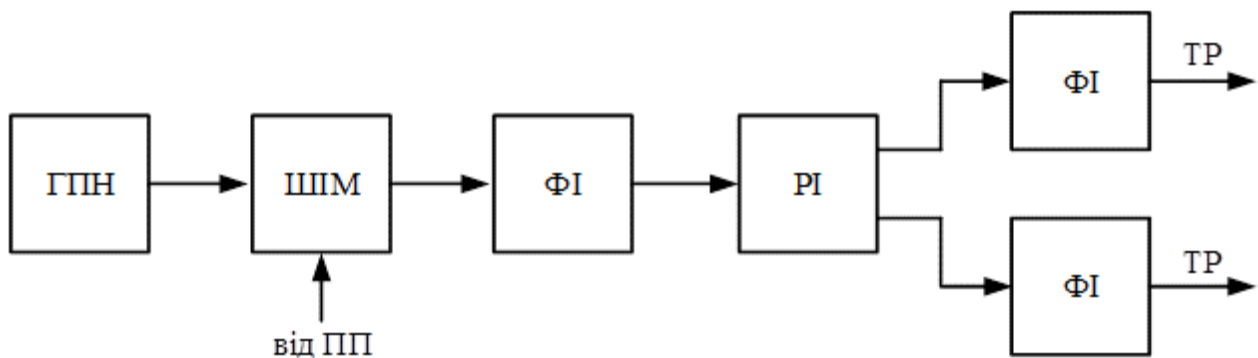


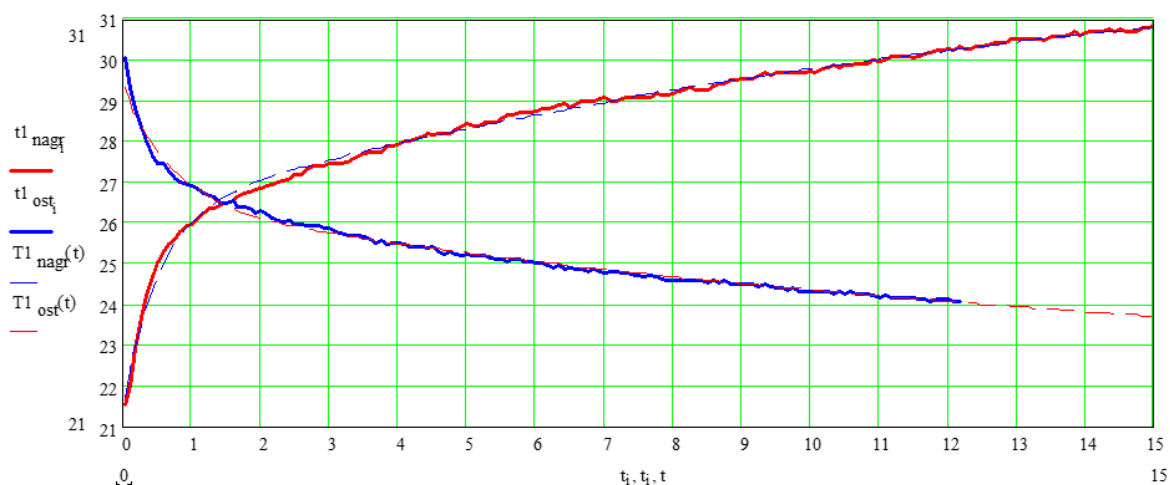
Рисунок 2.4 – Структурна схема системи керування тиристорним регулятором

Генератор напруги, що лінійно-змінюється, формує пилкоподібну напругу – генератор пилкоподібної напруги (ГПН). Ця напруга є синфазною з напругою мережі та має подвійне значення частоти в порівнянні з частотою напруги мережі. Вихідна напруга ГПН подається до одного з входів широтно-

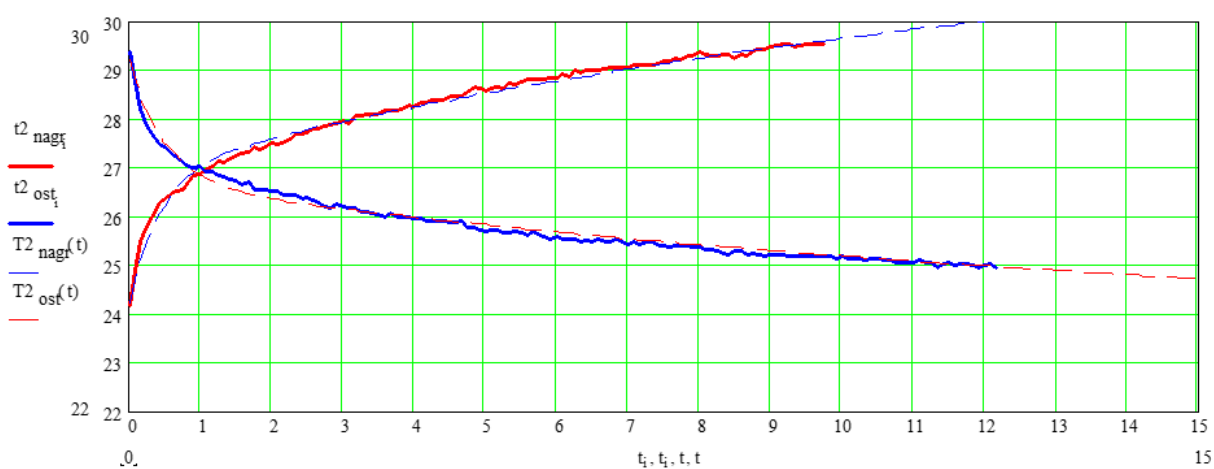
імпульсного модулятора (ШІМ), який виконано за схемою компаратора. На інших вхід ШІМ передається напруга від ПП. Якщо величини напруги на першому вході ШІМ більше ніж значення напруги на іншому, тоді на виході ШІМ утворюється високий рівень напруги, в протилежному випадку утворюється низький рівень. Шпаруватість вихідних імпульсів ШІМ є пропорційною за величину напруги ПП під час незмінної форми пілкоподібної напруги. ГПН і ПП повинні забезпечити регулювання шпаруватості імпульсів у інтервалі зміни температури 1°C . Від ШІМ імпульсний сигнал прямокутної форми передаються до формувача імпульсів (ФІ), який визначає довжину та амплітуду вихідної послідовності. Вихідний сигнал ФІ передається до розподільника імпульсів (РІ), який формує ці імпульси на два канали, що здійснюють керування тиристорами. Кожен з каналів через ФІ формує імпульси керування, частота яких дорівнює частоті мережі [9 – 11].

Для розробки функціональної схеми необхідно визначити функціональні залежності, за якими відбувається нагрівання та охолодження повітря в установці. Для цього визначено за результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження в трубі під час дії різних швидкостей потоку або витратах газу та середньої потужності нагрівача. Це необхідно для визначення якісних параметрів і характеристик під час нагрівання та охолодження газу в установці, а також для виявлення ступеню впливу зміни швидкості потоку газу на процеси, що відбуваються під час зміни температури. За результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною величиною потужності нагрівача для визначення величини мінімального часу перехідного процесу.

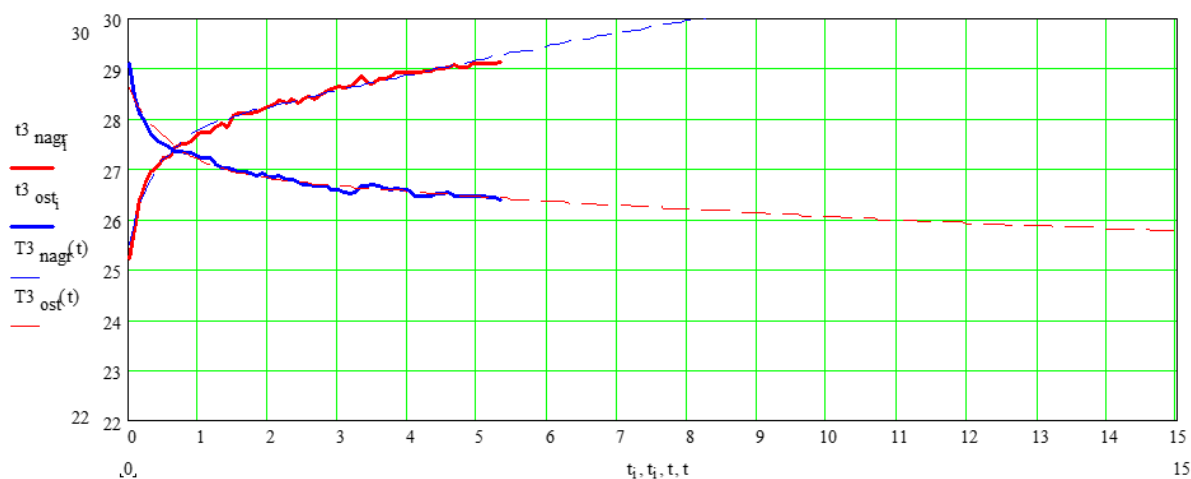
З результатів вимірювання виключено грубі помилки, а також усереднені значення вихідного сигналу напівпровідникового термістора за інтервал часу 5 с. Зчитування результатів відбувалось з періодом дискретизації 0,5 с. Результати досліджень зміни температури нагрівання та охолодження газу під час дії різної витрати газу наведено на рис. 2.5 [6].



а) під час дії витрати газу $\rho v = 10,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$



б) під час дії витрати газу $\rho v = 23,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$



б) під час дії витрати газу $\rho v = 30,5 \text{ кг/м}^2 \cdot \text{с}$

Рисунок 2.5 – Результати досліджень зміни температури нагрівання та охолодження газу під час дії різної витрати газу

—— — результати експериментальних досліджень;

----- — результати апроксимації

Отримані закономірності апроксимовано методом найменших квадратів функцією, яка є сумою двох експонент. Функція має п'ять параметрів: масштабні коефіцієнти експонент, показники ступеня експонент, а також значення температури в сталому режимі. Значення похибки апроксимації складає не більш 1,7%. Значення температури в сталому режимі обумовлено тим, що під час проведення експериментальних досліджень відбувалась зміна температура навколишнього середовища та нагрівача. Результати апроксимації функціями під час нагрівання та охолодження наведено в табл. 2.1 [8].

Таблиця 2.1 – Результати апроксимації функціями під час нагрівання та охолодження

Витрати газу, кг/м ² ·с	Апроксимовані функції під час нагрівання/охолодження	Відносне значення похибки апроксимації, %
10,5	$T_{\text{нагр}} = 33,2 - 4,5 \cdot e^{-\frac{t}{0,52}} - 7,0 \cdot e^{-\frac{t}{14,0}};$	1,6
	$T_{\text{охол}} = 22,0 + 2,8 \cdot e^{-\frac{t}{0,7}} + 4,5 \cdot e^{-\frac{t}{15,5}};$	1,6
23,5	$T_{\text{нагр}} = 32,4 - 2,7 \cdot e^{-\frac{t}{0,43}} - 5,5 \cdot e^{-\frac{t}{14,5}};$	1,2
	$T_{\text{охол}} = 23,5 + 2,5 \cdot e^{-\frac{t}{0,5}} + 3,2 \cdot e^{-\frac{t}{15,5}};$	1,7
30,5	$T_{\text{нагр}} = 34,0 - 2,0 \cdot e^{-\frac{t}{0,36}} - 6,5 \cdot e^{-\frac{t}{17}};$	1,3
	$T_{\text{охол}} = 25,0 + 1,6 \cdot e^{-\frac{t}{0,6}} + 2,0 \cdot e^{-\frac{t}{15,5}}.$	1,4

З аналізу отриманих залежності можна зробити такі висновки:

– процес може бути описаний завдяки двом експонентами, значення постійних часу яких відрізняються більш ніж на порядок, та відповідно дорівнюють значенням від 0,36 до 0,70 хвилин та від 14,0 до 17,0 хвилин, що відповідає витраті газу від 10,5 до 30,5 кг/м²·с;

– збільшення витрати газу призводить до зменшення значення постійних

часу для першої експоненти та впливає на значення постійної часу другої експоненти;

– значення постійних часу, які знаходяться в ступені експонент, під час нагрівання та охолодження приблизно мають однакові значення.

Під час нагрівання або охолодження на початковій стадії процесу значення температури повітря в трубі змінюється дуже швидко, що становить від 3 до 4°C. Це пояснюється конвективним нагрівання повітря, під час дії цього процесу установка не прогривається. Якщо досягається деяка різниця між температурою повітря та установки, то починається інтенсивний процес, який здійснює нагрівання установки. Це є наслідком значного зменшення швидкості підвищення температури газу в трубі. Результати цих процесів представлено під ас апроксимації у вигляді двох експонент, постійні часу яких відрізняються практично на порядок.

Збільшення конвективного обміну забезпечує підвищення теплообміну через установку з навколишнім середовищем. Під час цього збільшується інтенсивність обдування нагрівача, що призводить до підвищення кількості енергії, що розсіюється нагрівачем.

Коефіцієнт теплопередачі повітря та навколишнього середовищем через установку під час нагрівання та охолодження залишається практично незмінною величиною.

Результати вимірювання температури газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною потужністю нагрівача обробляються за такою ж самою методикою, як і в попередньому випадку. Одержані закономірності апроксимуються аналогічними теоретичними співвідношеннями але з іншими значеннями параметрів. Під час нагрівання та охолодження вони приймають такий вигляд:

$$T_{\text{нагр}} = 55 - 6,5 \cdot e^{-\frac{t}{0,4}} - 25,5 \cdot e^{-\frac{t}{19,0}}; \quad T_{\text{охол}} = 25,5 + 4 \cdot e^{-\frac{t}{0,4}} + 14 \cdot e^{-\frac{t}{16}}.$$

Результати досліджень та їх апроксимація наведено на рис. 2.6.

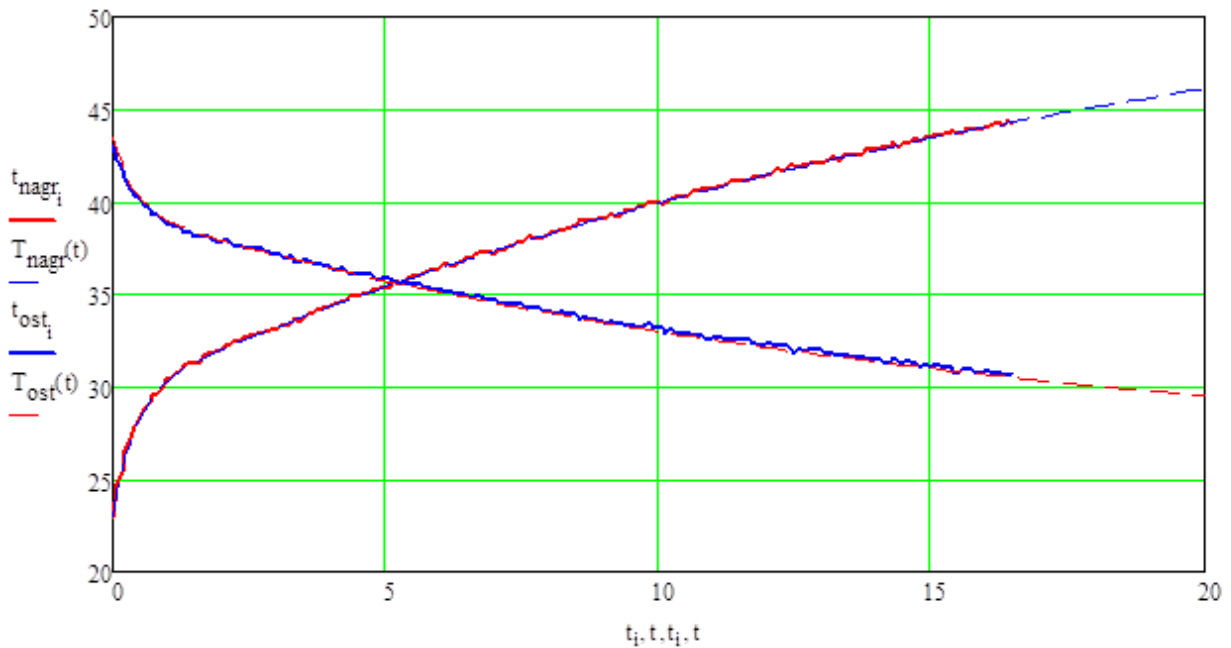


Рисунок 2.6 – Результати досліджень та їх апроксимація під час дії максимальної швидкості потоку газу та максимальної потужності нагрівача

——— — результати експериментальних досліджень;

----- — результати апроксимації

На основі аналізу результатів дослідження можна зробити такі висновки:

– під час дії максимальної швидкості потоку та максимальної потужності нагрівача для підвищення температури на 8°C , що визначає приріст температури під час визначення статичної характеристики перетворення сенсорів, необхідно час встановлення результатів не менш 10 хвилин;

– для того, щоб зменшити температури газу від максимального її значення до величини навколишнього середовища необхідно не менш 60 хвилин, якщо не застосовувати кондиціонера.

На базі структурної схеми системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку (див. рис. 2.3), розроблено функціональну схему на основі функцій передачі. Підсилювач помилки у функціональній схемі замінено ланкою, яка має насичення та

коефіцієнтом підсилення $k_{\text{ПП}}$, ТР та його схема керування також є лінійною ланкою, яка має коефіцієнт передачі $k_{\text{ТР}}$. Нагрівач має передавальну функцію $W_{\text{нагр}}(p)$, яка є інерційною ланка першого порядку. Він здійснює нагрівання повітря, яке може бути описано передавальною функцією $W_{\text{повітря}}(p)$. Сенсор температури є інерційною ланкою першого порядку, він описується передатною функцією $W_{\text{сенсор}}(p)$.

Під час застосування теоретичних моделей, що описують реакцію повітря в трубі з подачею визначеної уставки нагрівання, яка характеризується його потужністю, отримано передавальну функцію для повітря в установці, зміна якого може описано таким чином [7]:

$$W_{\text{повітря}}(p) = T_m + \frac{T_{\text{повітря1}}}{\tau_{\text{повітря1}} \cdot p + 1} + \frac{T_{\text{повітря2}}}{\tau_{\text{повітря2}} \cdot p + 1}$$

Функціональну схему системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку, наведено на рис. 2.7, де позначено:

$$W_{\Phi Y}(p) = \frac{k_{\text{уст}}}{p} - \text{передавальна функція уставки};$$

$$W_{\text{ПП}}(p) = k_{\text{ПП}} - \text{передавальна функція підсилювача помилки};$$

$$W_{\text{ТР}}(p) = k_{\text{ТР}} - \text{передавальна функція тиристорного регулятора};$$

$$W_{\text{нагр}}(p) = \frac{k_{\text{нагр}}}{\tau_{\text{нагр}} p + 1} - \text{передавальна функція нагрівача};$$

$$W_{\text{повітря}}(p) = T_m + \frac{T_{\text{повітря1}}}{\tau_{\text{повітря1}} \cdot p + 1} + \frac{T_{\text{повітря2}}}{\tau_{\text{повітря2}} \cdot p + 1} - \text{передавальна функція, що}$$

описує процес зміни температури повітря в установці;

$$W_{\text{сенсор}}(p) = \frac{k_{\text{сенсор}}}{\tau_{\text{сенсор}} \cdot p + 1} - \text{передавальна функція сенсора температури.}$$

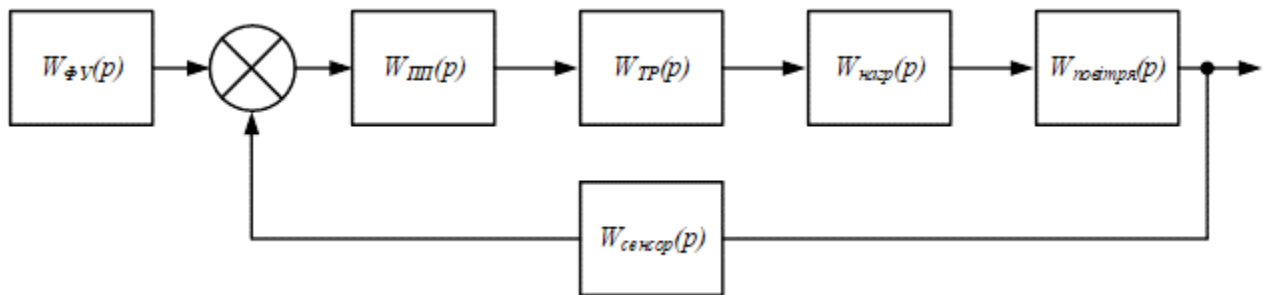


Рисунок 2.7 – Функціональна схема системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку

Передатна функція розімкненої системи описується такою залежністю:

$$\begin{aligned} W_{PC}(p) &= W_{\text{шт}}(p) \cdot W_{\text{нагр}}(p) \cdot W_{\text{тр}}(p) \cdot W_{\text{повітря}}(p) = \\ &= \frac{k_{\text{ус}} \cdot k_{\text{нагр}} \cdot k_{\text{тр}}}{\tau_{\text{нагр}} \cdot p + 1} \cdot \left(\frac{k_{\text{повітря1}}}{\tau_{\text{повітря1}} \cdot p + 1} + \frac{k_{\text{повітря2}}}{\tau_{\text{повітря2}} \cdot p + 1} \right). \end{aligned}$$

Передатна функція замкненої системи описується такою залежністю:

$$W_{3C}(p) = \frac{W_{PC}(p)}{1 + W_{PC}(p) \cdot W_{\text{сенсор}}(p)}. \quad (2.1)$$

Під час подачі на вхід блоку уставки, який має передавальну функцію $W_{\text{уст}}(p)$, отримаємо таку реакцію системи [8]:

$$W_{\text{СИСТ}}(p) = W_{\text{уст}}(p) \cdot W_{3C}(p). \quad (2.2)$$

Для якісної оцінки характеристик і параметрів процесу, що мають місце в замкнутій системі, визначимо такі значення:

$$k_{\text{нагр}} = 1;$$

$$k_{\text{сенсор}} = 1;$$

$$\tau_{\text{нагр}} = 0,1 \text{ хвилини};$$

$$\tau_{\text{сенсора}} = 0,02 \text{ хвилини};$$

$$k_{\text{ТР}} = 1.$$

Для повітря під час нагрівання в режимі жорсткого зворотного зв'язку:

$$T_{\text{м}} = 55^{\circ}\text{C};$$

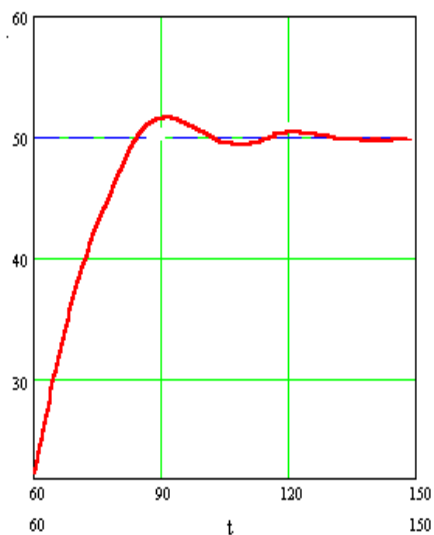
$$T_{\text{повітря1}} = 6,5^{\circ}\text{C};$$

$$T_{\text{повітря2}} = 25,5^{\circ}\text{C};$$

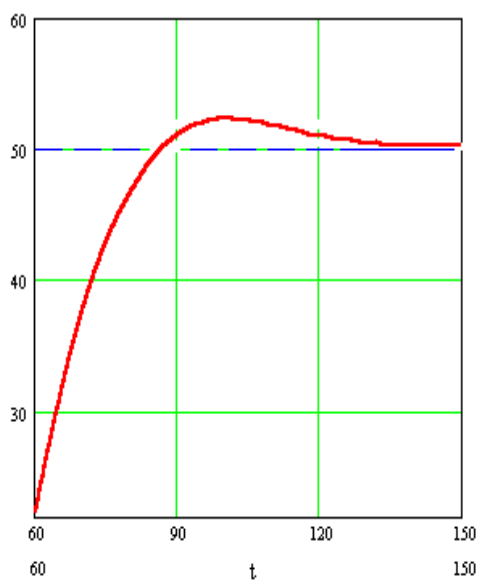
$$\tau_{\text{повітря1}} = 0,4 \text{ хвилини};$$

$$\tau_{\text{повітря2}} = 19 \text{ хвилин}.$$

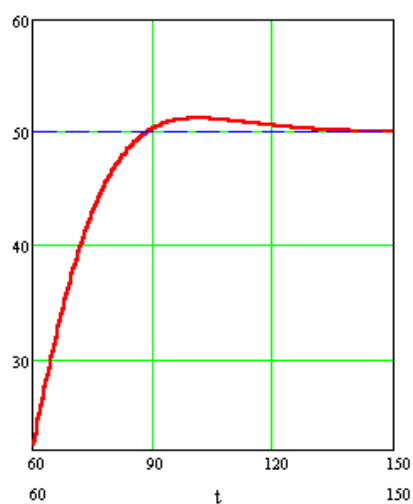
Залежність зміни перехідних процесів у замкнутій системі під час дії наведених значень параметрів передавальних функцій та зі зміною коефіцієнта підсилення підсилювача помилки наведено на рис. 2.8. Ці залежності отримано коли уставка за температурою газу в установці дорівнювала значенню температури навколишнього середовища та складала $+22^{\circ}\text{C}$.



а) якщо $k_{yc} = 2$



б) якщо $k_{yc} = 10$



в) якщо $k_{yc} = 50$

Рисунок 2.8 – Зміни перехідних процесів у замкнутій системі під час дії наведених значень параметрів передавальних функцій та зі зміною коефіцієнта підсилення підсилювача помилки

Структурну схему системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку, яку використано під час розробки системи наведено 2.3. Виконаємо обґрунтування вимог до блоків і вузлів цієї системи. Діапазон зміни вихідної напруги вимірювального моста сенсора температури (СТ) дорівнює від 0 до 1,5 В. Значення нижньої межі цього діапазону відповідає температурі $T_{\min}=+50^{\circ}\text{C}$, а її верхньої межі – $T_{\max}=0^{\circ}\text{C}$. Формувач уставок (ФУ) повинен відповідати таким самим вимогам за діапазоном міні напруги. Підсилювач помилки (ПП) забезпечує підсилення сигналу помилки ($U_{\text{ФУ}} - U_{\text{СТ}}$), що є різницею напруги, величини якої відповідає різниці значення температур уставки та повітря в трубі. Величини цієї різниці температури повинна бути не більше $\Delta=1^{\circ}\text{C}$. Діапазон зміни під час плавного регулювання визначає величину помилки, значення якої обмежено на рівні $\Delta=1^{\circ}\text{C}$ та обумовлено інерційністю системи. Вихідне значення напруги підсилювача помилки знаходиться від 0 до 5 В. Якщо величина різниці температури більше ніж 1°C , то значення вихідної напруги ПП становить 5 В, у іншому випадку воно повинно бути менше 0 В. Вимоги до ПП в аналітичному вигляді можна записати таким чином:

$$U_{\text{ПП}} = \begin{cases} (0..5) \text{ В, якщо } 0^{\circ}\text{C} \leq (U_{\text{ФУ}} - U_{\text{СТ}}) \leq 1^{\circ}\text{C}; \\ 5 \text{ В, якщо } (U_{\text{ФУ}} - U_{\text{СТ}}) > 1^{\circ}\text{C}; \\ < 0 \text{ В, якщо } (U_{\text{ФУ}} - U_{\text{СТ}}) < 0^{\circ}\text{C}. \end{cases} \quad (2.3)$$

Вихідна напруга ПП передається до схеми керування (СК) тиристорним регулятором (ТР). ТР здійснює формування коротких імпульсів, частота яких дорівнює частоті мережі живлення. Ці імпульси керують включенням тиристорів, тобто змінюють значення потужності нагрівача. Зсув фаз напругою мережі живлення та імпульсами керування визначається величиною напруги ПП. Схема керування повинна забезпечувати, щоб під час дії вихідної напруги ПП у діапазоні від 0 до 5 В, зсув фази змінювався π до 0. Якщо величина

$U_{\text{ПП}} < 0\text{В}$, то схема керування не повинна формувати імпульси. Тривалість імпульсу повинна визначатися часом включення тиристорів. Амплітуда імпульсів визначається значенням напруги керування тиристорів. ТР розраховується на максимальне значення потужності $P_{\text{max}} = 1,5 \text{ кВт}$ та активне навантаження $R_{\text{H}} = 50 \text{ Ом}$.

2.3 Висновки

Обґрунтовано та розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури. На основі аналізу структурних систем автоматичного регулювання температури вибрано структуру, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку. Для реалізації структури системи керування тиристорним регулятором, застосовано спосіб широтно-імпульсної модуляції.

Для обґрунтування та розробки функціональної схеми виконані дослідження зміни температури газу під час нагрівання та охолодження в трубі для різних швидкостей потоку або витратах газу та середньої потужності нагрівача. За результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною величиною потужності нагрівача визначено величини мінімального часу перехідного процесу.

Під час аналізу результатів досліджень встановлено:

- процес може бути описаний завдяки двом експонентами, значення постійних часу яких відрізняються більш ніж на порядок, та відповідно дорівнюють значенням від 0,36 до 0,70 хвилин та від 14,0 до 17,0 хвилин, що відповідає витраті газу від 10,5 до 30,5 $\text{кг/м}^2 \cdot \text{с}$;

- збільшення витрати газу призводить до зменшення значення постійних часу для першої експоненти та впливає на значення постійної часу другої експоненти;

– значення постійних часу, які знаходяться в ступені експонент, під час нагрівання та охолодження приблизно мають однакові значення.

На основі аналізу результатів дослідження можна зробити такі висновки:

– під час дії максимальної швидкості потоку та максимальної потужності нагрівача для підвищення температури на 8°C , що визначає приріст температури під час визначення статичної характеристики перетворення сенсорів, необхідно час встановлення результатів не менш 10 хвилин;

– для того, щоб зменшити температури газу від максимального її значення до величини навколишнього середовища необхідно не менш 60 хвилин, якщо не застосовувати кондиціонера.

На базі структурної схеми системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку та результатів досліджень обґрунтовано та розроблено функціональну схеми на основі функцій передачі. Виконаємо обґрунтування вимог до блоків і вузлів функціональну схеми автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку.

3 РОЗРОБКА ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ПОВІТРЯ В ТРУБІ

3.1 Розробка вимірювального перетворювача зміни температури повітря в трубі

Як первинний вимірювальний перетворювач температури застосовується сенсор типу СТ-3-19, що є напівпровідниковим резистором (термістором), який має форму бусинки. Характеристика сенсора датчика – залежність зміни опору від температури, може бути розрахована за такою функціональною залежністю:

$$R(t) = R_0 e^{b/T}. \quad (3.1)$$

Параметри цієї формули можна розрахувати зі застосуванням двох експериментальних значень $t=0^\circ\text{C}$, R_{273} та $t=100^\circ\text{C}$, R_{373} . Ці значення отримано під час вимірювання опору цього сенсора в киплячій воді, яка має температуру $t=100^\circ\text{C}$ та у воді з льодом, що має температуру $t=0^\circ\text{C}$. Під час вимірювань отримано такі значення опору:

$$R_{273}=4500 \text{ Ом та } R_{373}=230 \text{ Ом.}$$

Параметри залежності (3.1) можна розрахувати з використанням результатів виконаних досліджень під час розв'язання системи рівнянь [8]:

$$\begin{cases} R_{273} = R_0 e^{b/273}; \\ R_{373} = R_0 e^{b/373}. \end{cases} \quad (3.2)$$

Результати розв'язання системи (3.2) відносно її змінних R_0 та b отримано

в загальному аналітичному виді:

$$\begin{cases} R_0 = R_{273} \cdot \left(\frac{R_{273}}{R_{373}} \right)^{-\frac{373}{373-273}}; \\ b = \frac{\ln \frac{R_{273}}{R_{373}}}{\frac{1}{273} - \frac{1}{373}}. \end{cases} \quad (3.3)$$

Після підстановки значень R_{273} та R_{373} до системи рівнянь (3.3), отримано значення параметрів $R_0=0,069$ Ом та $b=3028$ К. Якщо підставити ці значення до залежності (3.1), то отримаємо статичну характеристику перетворення термістора виду $R(t)$, яку наведено на рис. 3.1. Більший практичний інтерес має характеристика виду $t(R)$, графік зміни якої наведено на рис. 3.2.

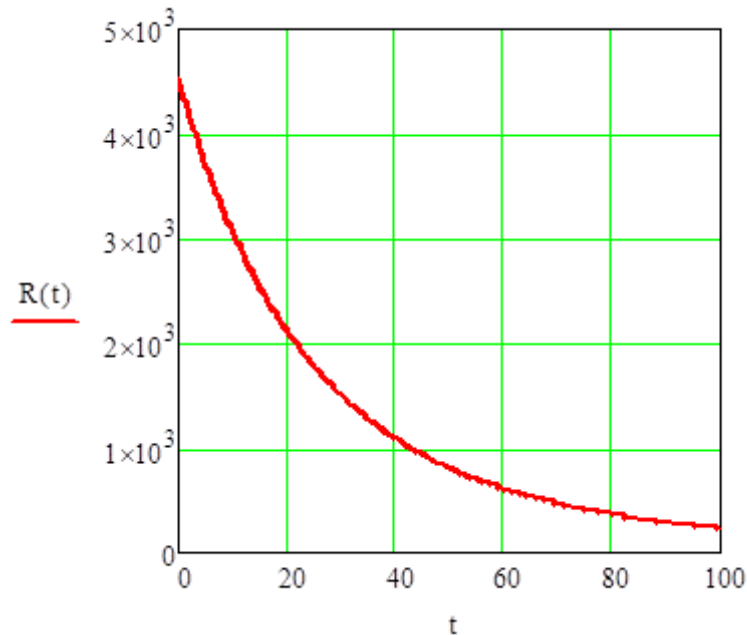


Рисунок 3.1 – Статична характеристика перетворення термістора типу СТ-3-19, яка має функціонал $R(t)$

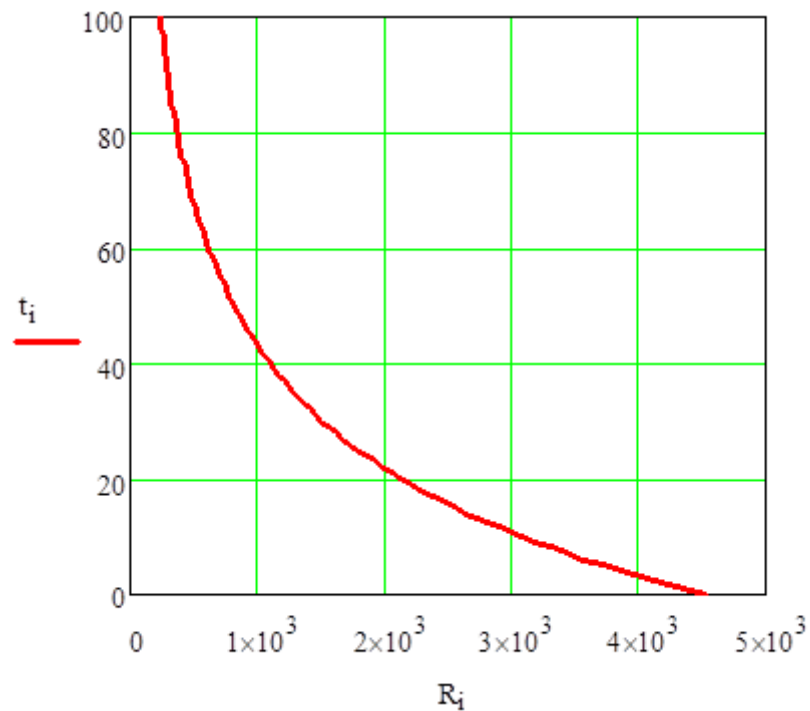


Рисунок 3.2 – Статична характеристика перетворення термістора типу СТ-3-19, яка має функціонал $t(R)$

З аналізу наведених характеристик випливає, що в інтервалі зміни температури від 0 до 50°C:

- опір термістора має зворотно пропорційну залежність від зміни температури;
- максимальне значення опору сенсора дорівнює $R_{\max}=R(0)=4500$ Ом, а мінімальне його значення $R_{\min}=R(50)=813$ Ом;
- максимальне та мінімальне значення крутизни характеристики:

$$\frac{\partial R}{\partial t}_{\max} = -180 \text{ Ом/}^{\circ}\text{C, якщо } t=50^{\circ}\text{C та}$$

$$\frac{\partial R}{\partial t}_{\min} = -24 \text{ Ом/}^{\circ}\text{C, якщо } t=0^{\circ}\text{C.}$$

Як вимірювальний перетворювач застосовується вимірювальний резистивний міст, схему якого наведено на рис. 3.3 [11, 12].

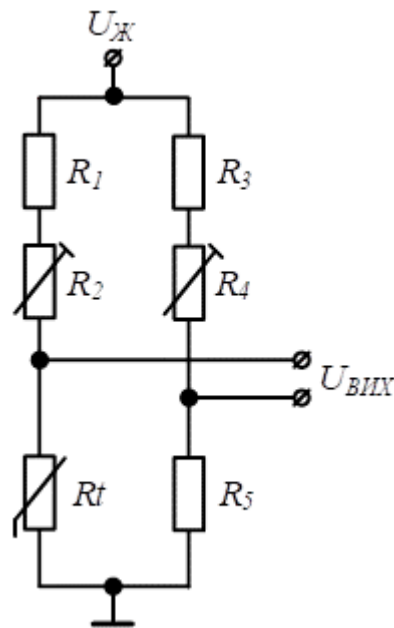


Рисунок 3.3 – Схема вимірювального резистивного моста для визначення температури повітря в трубі

Величину напруги для живлення резистивного вимірювального моста вибираємо $U_{\text{Ж}}=5\text{ В}$. Максимальне значення чутливості має симетричний резистивний міст, значення опору плеч якого дорівнює мінімальному опору сенсора [13 – 15]:

$$R_1=R_3=R_5=R_{\min}\approx 820\text{ Ом.}$$

Обмеження на вибір величини опорів пліч вимірювального резистивного моста визначається максимальним значенням струму, який протікає через термістор. Результати вимірювання температури термістором суттєво залежать від величини цього струму тому, що під час протікання струму через термістор, він розсіює потужність, яка підвищує температуру сенсора. Для усунення цього ефекту значення теплової потужності, що розсіюється на термісторі, не повинно бути більше ніж 1 мВт. Для вимірювального моста, схему якого наведено на рис. 3.3, під час обліку того, що міст навантажено на велике значення опору підсилювача, величина потужності, що розсіюється сенсором під час протікання через його струму, визначається за співвідношенням [11]:

$$P_{Rt} = \frac{U_{\text{ж}}^2 \cdot Rt}{(R_1 + Rt)^2}. \quad (3.4)$$

Залежність (3.4) має екстремум. Будемо вибирати значення Rt таким чином, щоб у робочому діапазоні зміни опору сенсора $P_{Rt\text{max}} < 1 \text{ мВт}$. Вибираємо значення опору $Rt = 6200 \text{ Ом}$. Тоді функціональна залежність (3.4) матиме вигляд, як на рис. 3.4. З аналізу рис. 3.4 можна зробити висновок, що в робочому діапазоні зміни опору Rt , величина потужності, що розсіюється, складає не більше 1 мВт.

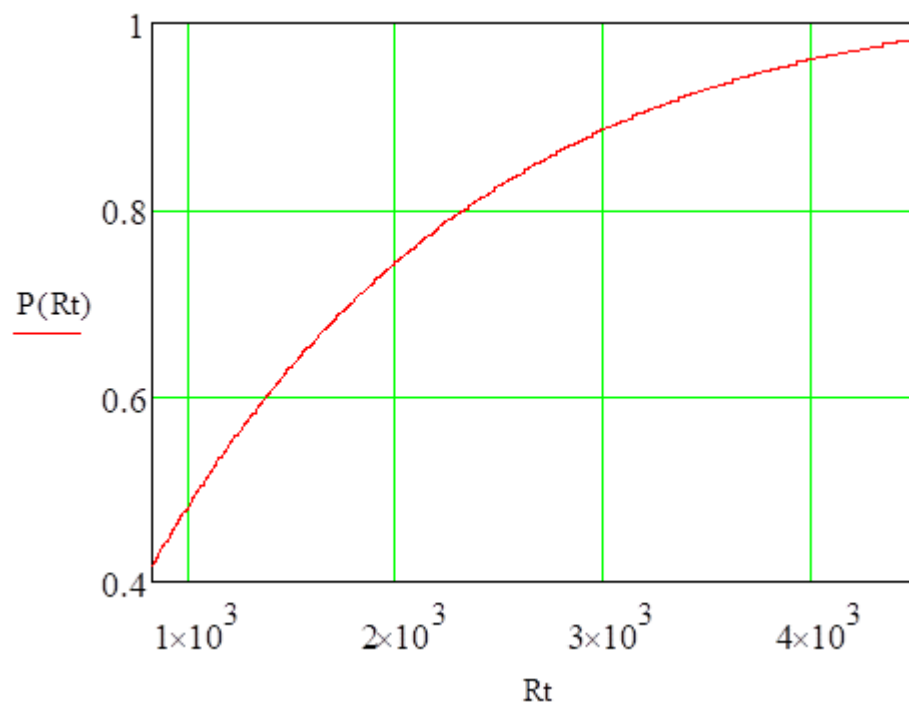


Рисунок 3.4 – Залежність зміни потужності, що розсіюється термістором, від зміни його опору

Як опори, які входять до складу вимірювального моста, вибираємо термостабільні резистори типу С2-1-0,5, з номінальним значенням опору 6,2 кОм класу точності 0,5 %. Як опору для підстроювання вибираємо резистори типу СП-0,4 з номінальним значенням опору 470 Ом з діапазоном регулювання $\pm 30\%$ від його номінального значення.

Залежність зміни вихідної напруги від температури для цього вимірювального резистивного моста наведено на рис. 3.5 визначається за співвідношенням [11]:

$$U_{\text{вих}}(t) = U_{\text{ж}} \cdot \frac{(R_3 + R_4) \cdot R(t) - (R_1 + R_2) \cdot R_5}{(R_3 + R_4 + R_5) \cdot (R(t) + R_1 + R_2)} \quad (3.5)$$

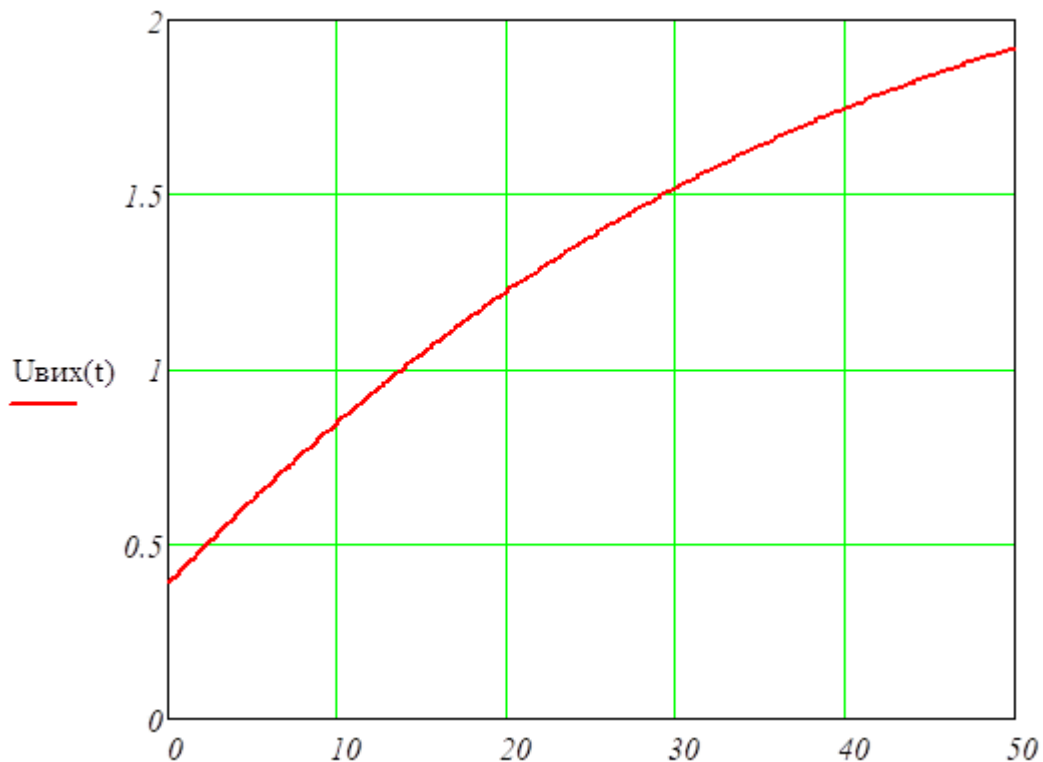


Рисунок 3.5 – Залежність зміни вихідної напруги від температури вимірювального резистивного моста

З аналізу залежності, яку наведено на рис. 3.5 можна зробити висновок, що зміна вихідної напруги під час зміни температури повітря має практично лінійний характер. Виконаємо оцінку значення нелінійності статичної характеристики перетворення вимірювального резистивного моста:

$$\Delta_{\Pi} = \frac{U_{\text{вих}}(t = 50^{\circ}\text{C}) - U_{\text{вих}}(t = 49^{\circ}\text{C})}{50 - 49} = 0,015 \frac{\text{В}}{^{\circ}\text{C}};$$

$$\Delta_K = \frac{U_{BHX}(t=1^\circ\text{C}) - U_{BHX}(t=0^\circ\text{C})}{1-0} = 0,049 \frac{\text{В}}{^\circ\text{C}};$$

$$\delta = \frac{\Delta_{II} - \Delta_K}{\Delta_{II}} = -2,261.$$

3.2 Розробка принципової схеми ланки узгодження вимірювального каналу

Вимірювальний резистивний міст, що застосовується в каналі вимірювання температури має двохполюсний вихід. Вихідний сигнал резистивного моста необхідно подавати до одного з входів підсилювача помилки. Для цього вихідних двохполюсний сигнал резистивного вимірювального моста розв'язується відносно землі. Для реалізації цього необхідне використовувати погоджувальну ланку, яка є диференціальним підсилювачем на базі операційного підсилювача постійного струму, принципову схему якого наведено на рис. 3.6 [10, 12].

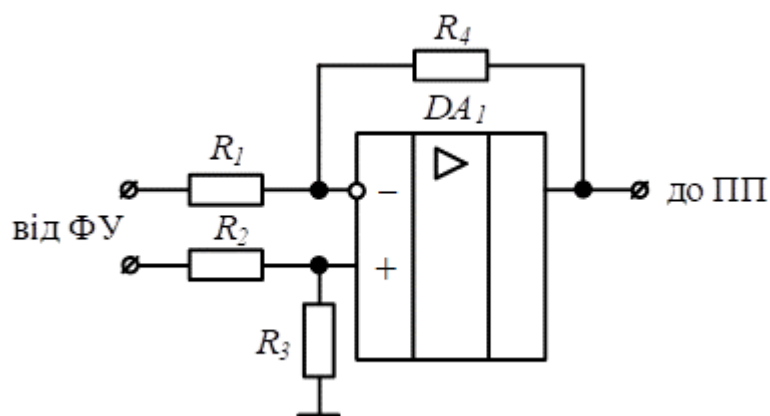


Рисунок 3.6 – Принципова схема ланки узгодження вимірювального каналу

Для цієї схеми співвідношення між опорамі резисторів R_4/R_1 та $1+R_4/R_1$ визначають величину коефіцієнтів підсилення за напругою за кожним з каналів. Значення вихідного сигналу диференціального підсилювача визначається за такою формулою [10, 12]:

$$U_{BHX} = \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \cdot \frac{R_3}{R_2 + R_3} \cdot \varphi_2 - \frac{R_4}{R_1} \cdot \varphi_1,$$

якщо $R_4=R_3$ та $R_1=R_2$, то отримаємо^

$$\begin{aligned} U_{BHX} &= \left(1 + \frac{R_4}{R_1}\right) \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_1} \cdot \varphi_2 - \frac{R_4}{R_1} \cdot \varphi_1 = \\ &= \frac{R_1 + R_4}{R_1} \cdot \frac{R_4}{R_4 + R_1} \cdot \varphi_2 - \frac{R_4}{R_1} \cdot \varphi_1 = \frac{R_4}{R_1} \cdot \varphi_2 - \frac{R_4}{R_1} \cdot \varphi_1 = \\ &= \frac{R_4}{R_1} \cdot (\varphi_2 - \varphi_1) = \frac{R_4}{R_1} \cdot \Delta U_{BX}, \end{aligned}$$

де φ_1 та φ_2 – потенціали відносно землі на інвертуючому та неінвертуючому входах ланки узгодження.

Значення вихідної напруги формувача уставок (ЦАП) знаходиться в межах від 0 до 5 В. Вибираємо номінальні значення опорів резисторів R_1 , R_2 , R_3 та R_4 таким чином, щоб

$$U_{BHX \max} = U_{\phi V \max} = 5 \text{ В.}$$

Необхідне значення коефіцієнту підсилення за напругою ланки узгодження буде дорівнювати:

$$K_U = \frac{R_4}{R_1} = \frac{U_{BHX \max}}{U_{BX \max}} = \frac{5}{1,92} = 2,6.$$

Приймаємо номінальне значення опору резисторів $R_1 = R_2 = 1 \text{ кОм}$, тоді

$$R_4 = R_3 = K_U \cdot R_1 = 2,6 \cdot 1 = 2,6 \text{ кОм}.$$

Резистори R_1 , R_2 та R_3 , R_4 вибираємо типу С2-8-0,25 $\pm$ 0,5% на номінальне значення опорів 1 кОм та 2,6 кОм. Операційний підсилювач DA_1 вибираємо прецизійний операційний підсилювач постійного струму LTC6084, який має такі параметри [16]:

- напруга зсуву, U_{3C} , мкВ 750;
- температурний дрейф напруги зсув, $\Delta U_{3C}/\Delta T$, мкВ/°C 30;
- різниця вхідних струмів, ΔI_{BX} , нА 4;
- температурний дрейф різниці вхідних струмів, $\Delta I_{BX}/\Delta T$, нА/°C 0,1.

3.3 Розробка принципової схеми формувача уставок

Формувачем уставок (ФУ) є мікроконтролер, який підключено через цифро-аналоговий перетворювач, до одного з входів підсилювача помилки. Формування уставок здійснюється в діапазоні зміни температури від 0 до 50°C з дискретним кроком 8°C. За допомогою характеристики, яку наведено на рис. 3.5, значення якої помножено на коефіцієнт підсилення за напругою ланки узгодження ($K_U = 2,6$) визначені значення напруги уставок, які повинні формувати ФУ, результати розрахунку представлено в табл. 3.1. Для реалізації ФУ застосовується 8-розрядний ЦАП, який має максимальне значення вихідною напруги 5 В.

Таблиця 3.1 – Сітка значень вихідної напруги схеми формувача уставок

$t_{уст}, ^\circ\text{C}$	0	8	16	24	32	40	48
$U_{уст}, \text{В}$	1,014	1,984	2,818	3,515	4,085	4,545	4,914

3.4 Розробка принципової схеми підсилювача помилки вимірювального каналу

Принципову схему підсилювача помилки вимірювального каналу наведено на рис. 3.7. Коефіцієнт підсилення за напругою цієї схеми визначається номінальними значеннями опору резисторів R_1 та R_2 .

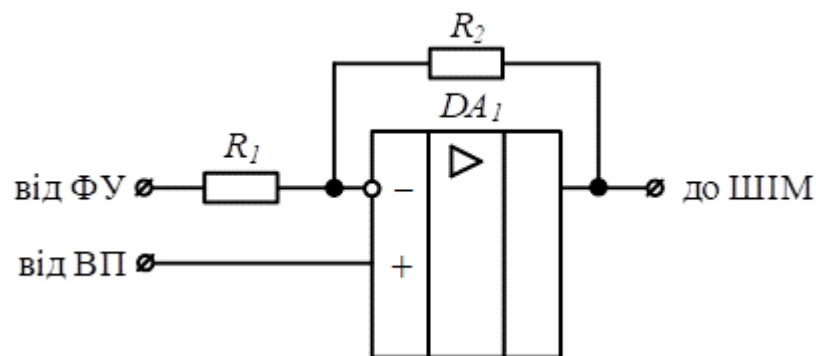


Рисунок 3.7 – Принципова схема підсилювача помилки вимірювального каналу

Для реалізації підсилювача помилки вибираємо прецизійний операційний підсилювач постійного струму DA_1 типу LTC2058[17], який має такі параметри:

- напруга зсуву, U_{3C} , мкВ 5;
- температурний дрейф напруги зсув, $\Delta U_{3C}/\Delta T$, мкВ/°C 0,2;
- різниця входних струмів, ΔI_{BX} , нА 0,1;
- температурний дрейф різниці входних струмів, $\Delta I_{BX}/\Delta T$, нА/°C 0,001;
- діапазон зміни напруги джерела живлення, $U_{Ж}$, В від ± 3 до ± 18 .

Для уніфікації блоку живлення інформаційно-вимірювальної системи вибираємо напруга джерела живлення операційного підсилювача $U_{Ж} = \pm 5$ В. На базі відомих значень крутизни статичної характеристики перетворення вимірювального резистивного на початку ($\Delta_P = 15$ мВ/°C) та кінці ($\Delta_K = 49$ мВ/°C) визначаємо, що для здійснення регулювання в інтервалі від 0 до 1°С бажано, щоб різниця входної напругу підсилювача помилки була не більше ніж 15 мВ. Отже, визначаємо значення коефіцієнта підсилення за напругою підсилювача

ПОМИЛКИ:

$$K_{U \text{ III}} = \frac{U_{\text{III max}}}{\Delta U_{BX \text{ min}}} = \frac{5}{0,015} = 333.$$

Для забезпечення цього значення коефіцієнта підсилення за напругою вибираємо номінальне значення опору резистора $R_1 = 1 \text{ кОм}$, тоді номінальне значення опору резистора R_1 буде дорівнювати:

$$R_2 = K_{U \text{ III}} \cdot R_1 = 333 \cdot 1 = 333 \text{ кОм}.$$

Резистори R_1 та R_2 вибираємо типу С2-8-0,25 $\pm$ 0,5% на номінальне значення опорів 1 кОм та 330 кОм.

3.5 Розробка схеми керування тиристорного регулятора

Схема керування забезпечує регулювання величини потужності на виході тиристорного регулятора в діапазоні від 0 до 1500 Вт. Діапазон зміни потужності відповідає кута керування від 180° до 0° . Структурну схеми, яка реалізує систему керування тиристорним регулятором, наведено на рис. 2.4.

Генератор пилоподібної напруги (ГПН) забезпечує пилоподібну напругу, яка є синфазною з мережевою напругою. Амплітуда вихідної напруги ГПН становить 5 В, частота якої складає $2f_M = 100 \text{ Гц}$, а тривалість переднього фронту імпульсу становить не більш 5% від тривалості його заднього фронту. Структурну схему, яка реалізує генератор пилоподібної напруги, наведено на рис. 3.8. Сигнал від низьковольтної обмотки трансформатора мережі передається до випрямляча (В), який зібрано за двохнапівперіодною схемою (В). Вихідна напруга випрямляча передається до формувача коротких імпульсів (ФІ), які мають шпаруватість не більш 5 %. Як ФІ застосовується компаратор,

що має невелику опорну напругу. Вихідні імпульси з компаратора є синфазними з напругою мережі та мають частоту повторення $2f_M = 100$ Гц. Ці імпульси керують роботою генератора пилоподібної напруги (ГПН).

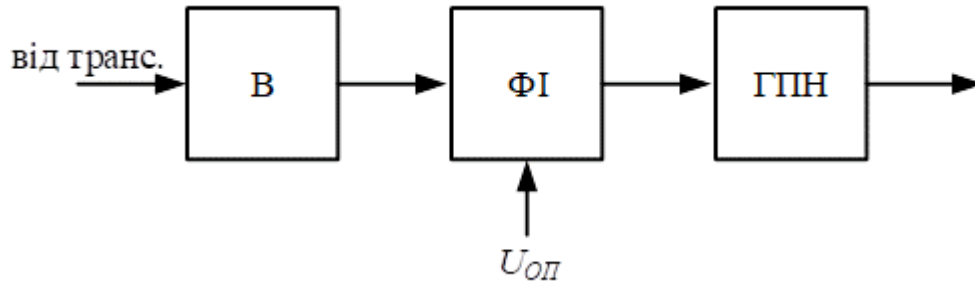


Рисунок 3.8 – Структурна схема генератора пилоподібної напруги

Принципову схему генератора пилоподібної напруги наведено на рис. 3.9. Випрямляч у цій схемі, виконано як діодний міст на мікросхемі типу КЦ302М [18]. Цю мікросхему розраховано на значення прямого струму $I_{PP} = 0,3$ А та величину зворотної напруги $U_{ЗВР} = 180$ В. Вихідна напруга випрямляча передається до інвертуючого входу компаратора на мікросхемі DA_1 . Цей компаратор реалізовано на базі операційного підсилювача постійного струму типу LTC2058 [17], який має напругу живлення $U_{Ж} = \pm 5$ В. На неінвертуючий вхід компаратора DA_1 передається опорна напруга від параметричного стабілізатора, який має в своєму складі стабілітрон VD_2 та резистор R_3 . Параметричний стабілізатор має напругу живлення 5 В.

Величина вихідної напруги випрямляча та значення напруги стабілізації VD_2 повинно бути підібрати так, щоб компаратор на базі DA_1 здійснював формування імпульсів, які мають шпаруватість не більш 5%. Для реалізації цього необхідно виконання такої умови:

$$U_{CT} \leq (U_{\max} - 2 \cdot U_{VDnp}) \cdot \sin \omega t, \text{ якщо } \omega t = \pi \cdot 5\%,$$

де U_{CT} – напруга стабілізації; $U_{\max}$ – амплітуда вихідної напруги випрямляча; U_{VDnp} – падіння напруги на діоді моста під час його прямого включення.

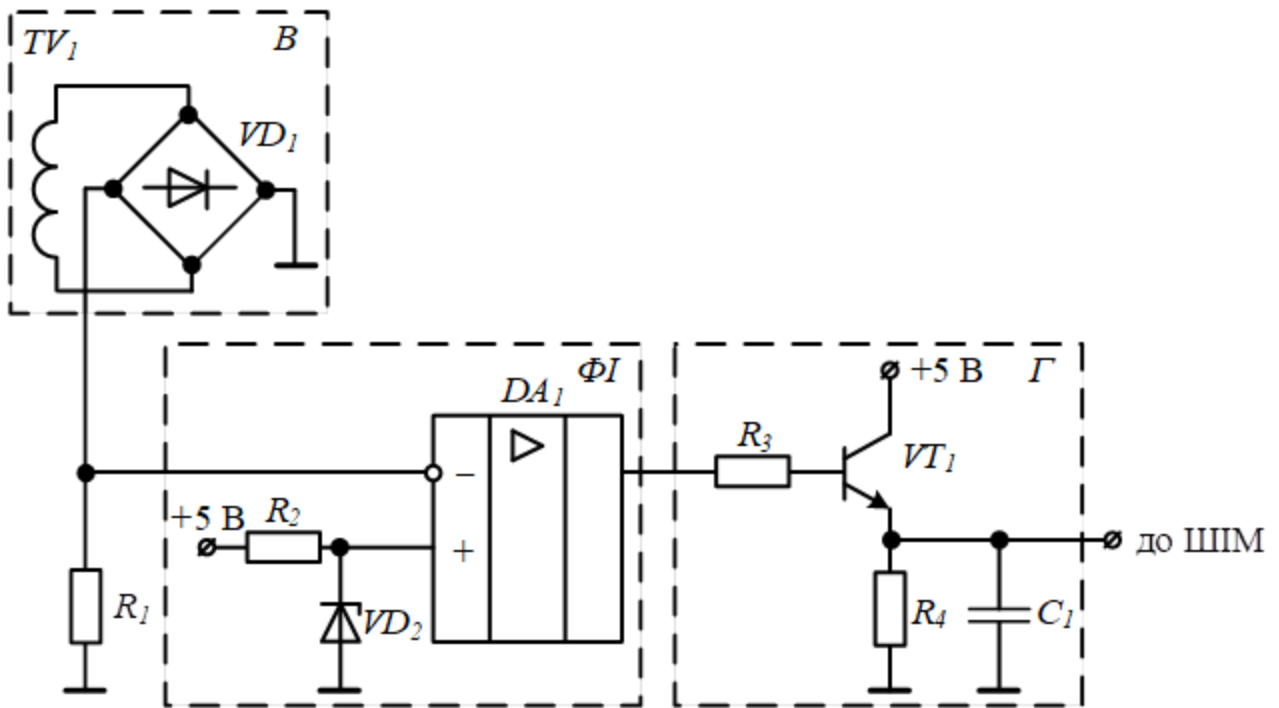


Рисунок 3.9 – Принципова схема генератора пилкоподібної напруги

Якщо значення вихідної напруги випрямляча дорівнює $U_{\max} = 6 \text{ В}$ та падіння напруги на діоді моста $U_{VDnp} = 0,5 \text{ В}$ та $\omega t = 0,05\pi$ то отримаємо:

$$U_{CT} \leq (6 - 2 \cdot 0,5) \sin 0,05\pi \text{ або } U_{CT} \leq 0,78 \text{ В.}$$

Вибираємо стабілітрон VD_2 типу 2С107А [18], який має величину напругу стабілізації $U_{CT} = 0,7 \text{ В}$, $I_{CT\min} = 1 \text{ мА}$, $I_{CT\text{ном}} = 30 \text{ мА}$; $I_{CT\max} = 120 \text{ мА}$. Номінальне значення опору балансного резистора дорівнює:

$$R_2 = \frac{E_1}{I_{CT\text{ном}}} = \frac{5}{30 \cdot 10^{-3}} = 167 \text{ Ом.}$$

Як балансний опір вибираємо резистор типу С2-1-0,5– 160 Ом $\pm 5\%$.

Під час такого вибору номінальних значень елементів схеми, форма вихідної напруги ФІ наведено на рис. 3.10, б. Ця форма напруги передається до генератора, який розроблено на транзисторі VT_1 , конденсаторі C_1 та резисторах R_1 , R_2 , R_4 . Схема генератора має двохполярну напругу живлення. Принцип

роботи генератора в наступному. Вихідний короткий імпульс ФІ здійснює відкриття транзистор VT_1 , цей імпульс здійснює зарядження ємності C_1 за колом $E_2 - VT_1 - C_1$. Постійна часу заряду конденсатора C_1 ($\tau_{зар}$) має невелике значення та визначається величиною опору $R_{KEнас}$ відкритого транзистора VT_1 . Після закінчення тривалості імпульсу транзистор VT_1 закривається, а ємність C_1 розряджається за колом $C_1 - R_4 - E_3$. Постійна часу розряду конденсатора C_1 ($\tau_{розр}$) визначається за співвідношенням $R_4 C_1$, її значення значно більше ніж $\tau_{зар}$. Значення вихідної напруги формується на лінійній ділянці експоненти, тому для підвищення лінійності спаду необхідно через R_4 подати негативну напругу E_3 . Для отримання пилкоподібної напруги, яка має амплітуду 5 В, необхідно використати $E_2 = +5$ В та $E_3 = -5$ В.

Транзистор, який застосовується для схеми ГПН типу КТ315А [19], який має такі параметри $U_{KEmax} = 25$ В та $I_{Kmax} = 100$ мА. Номінальне значення опору резистору R_4 розраховується за формулою

$$R_4 = \frac{U_{KE \max}}{I_{K \max}} = \frac{25}{0,1} = 250 \text{ Ом.}$$

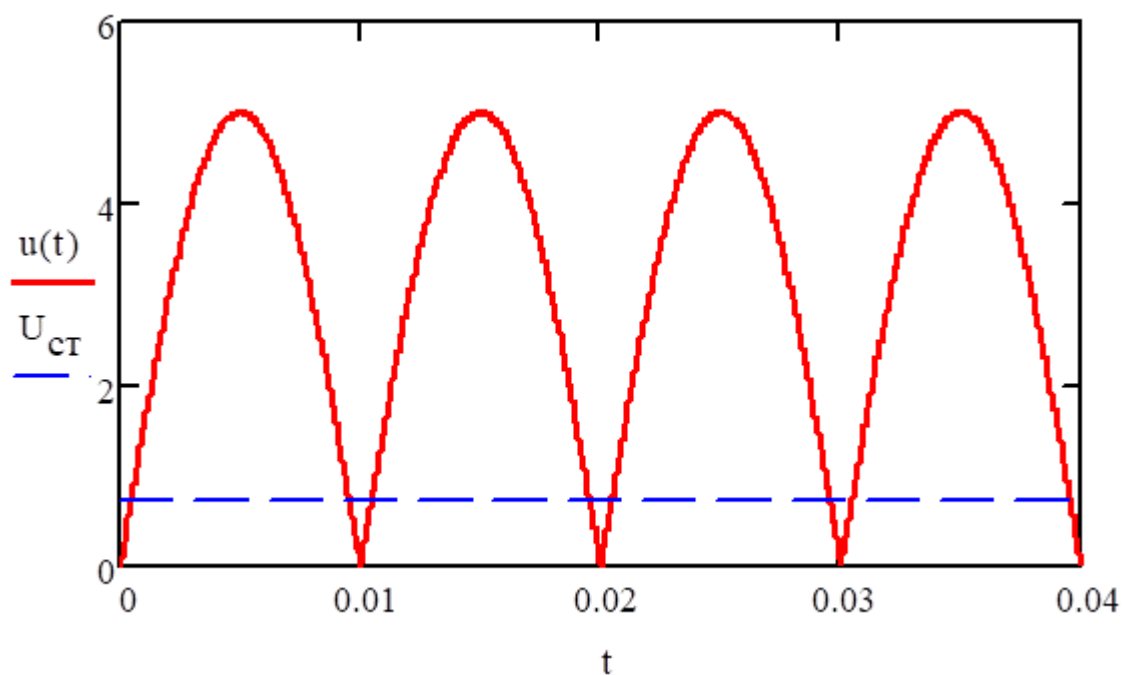
Вибираємо резистор R_4 типу С2-6-0,5 – 250 Ом ± 5 %.

Для отримання форми вихідної напруги ГПН, що наведено на рис. 3.10, необхідно щоб ємність за час паузи імпульсу від ФІ встигла розрядитися на E_3 до значення 0 В. Для забезпечення цієї умови необхідно:

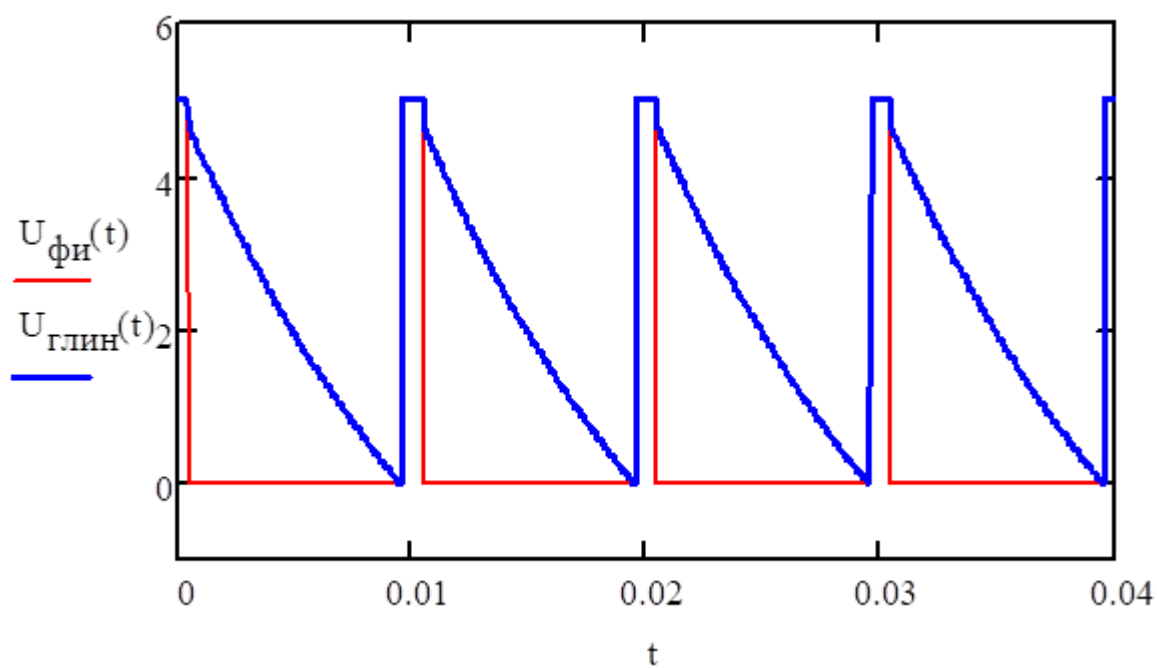
$$(E_2 - E_3) \cdot e^{-\frac{t_{розр}}{\tau_{розр}}} + E_3 = 0,$$

де $\tau_{розр} = R_4 \cdot C_1$;

$$t_{розр} = 0,95 \cdot T = 0,95 \cdot \frac{1}{2 \cdot f_M} = 0,95 \cdot \frac{1}{2 \cdot 50} = 9,5 \text{ мс.}$$



а) – форма вхідної напруги формувача імпульсів



б) – форма вихідної напруги формувача імпульсів та генератора
пилкоподібної форми

Рисунок 3.10 – Осцилограми роботи блоків генератора пилкоподібної
напруги

Розраховуємо необхідне значення постійної часу розряду конденсатора C_1 :

$$\tau_{розр} = \frac{t_{розр}}{\ln \frac{E_3 - E_2}{E_3}} = \frac{9,5 \cdot 10^{-3}}{\ln \frac{-5 - 5}{-5}} = 13,7 \text{ мс.}$$

Номінальне значення ємності конденсатора дорівнює:

$$C_1 = \frac{\tau_{розр}}{R_4} = \frac{13,7 \cdot 10^{-3}}{250} = 54,8 \text{ мкФ.}$$

Вибираємо номінальне значення ємності конденсатора $C_1=56 \text{ мкФ}$ та тип конденсатора K52-1.

Для реалізації ШІМ застосовується операційний підсилювач типу LTC6084 [16]. ШІМ працює як компаратор та застосовується для зміни величини шпаруватості вихідних імпульсів, що залежності від значення сигналу помилки. Для такої реалізації до інвертуючого входу підключається вихідна напруга ГПН, а до неінвертуючого входу – вихідна напруга ПП. Під час збільшення амплітуди сигналу помилки величина шпаруватості вихідних імпульсів ШІМ знижується (див. рис. 3.11).

Під час реалізації ШІМ передбачено вихід напруги ПП за межу лінійної ділянки зверху. Тобто до навантаження подається максимальна величина потужності. Для цього випадку імпульси мають мінімальне значення шпаруватості та не повинні зриватися. Для цієї реалізації запропоновано на вихід ПП підключити додатково параметричний стабілізатор, значення напруги стабілізації якого трохи менше ніж 5В або здійснювати живлення ПП величиною напруги, значення якої також менше ніж 5 В.

Схема тиристорного регулятора складається з двохнапівперіодної мостова схема, яка має два тиристорами в плечах. Для забезпечення керування

тиристорами застосовується схема, що здійснює розподіл імпульсів з ШІМ за двома каналах, які включаються по-черзі. Для реалізації такого варіанта застосовується розподільник імпульсів, який є D-тригер, що підключено за схемою лічильника імпульсів (див. рис. 3.12).

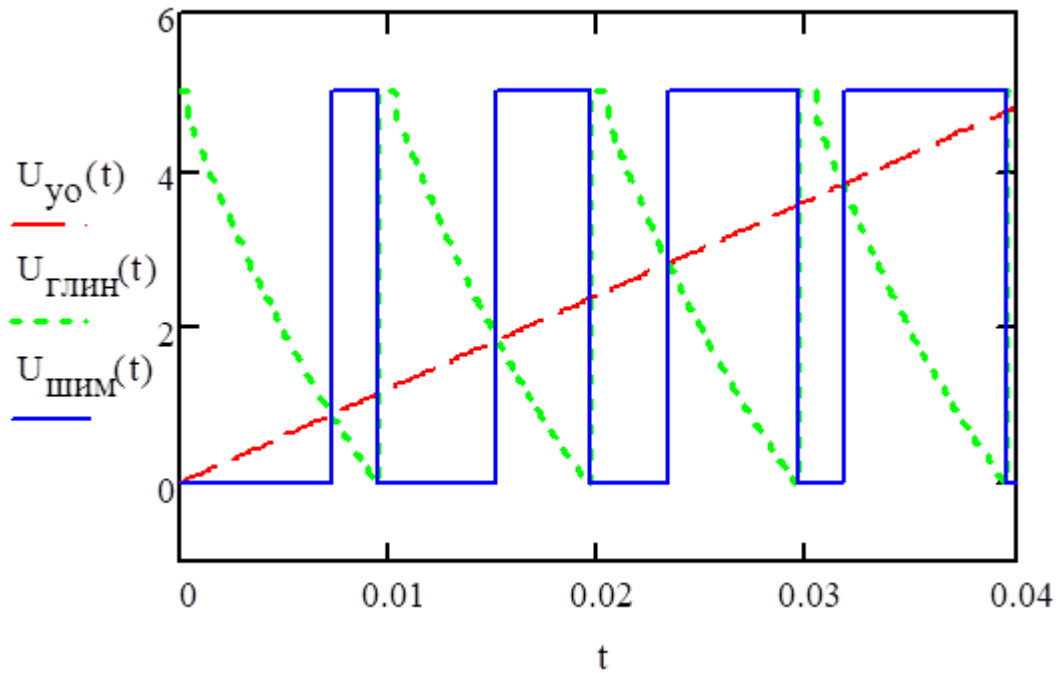


Рисунок 3.11 – Осцилограми, що пояснюють роботу ШІМ

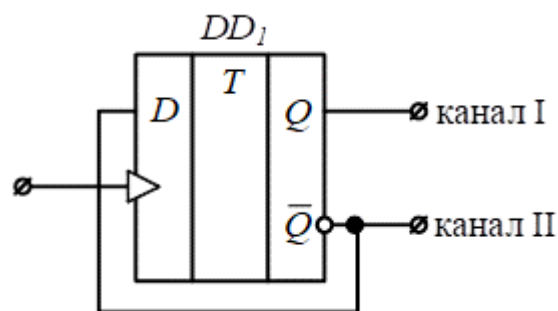
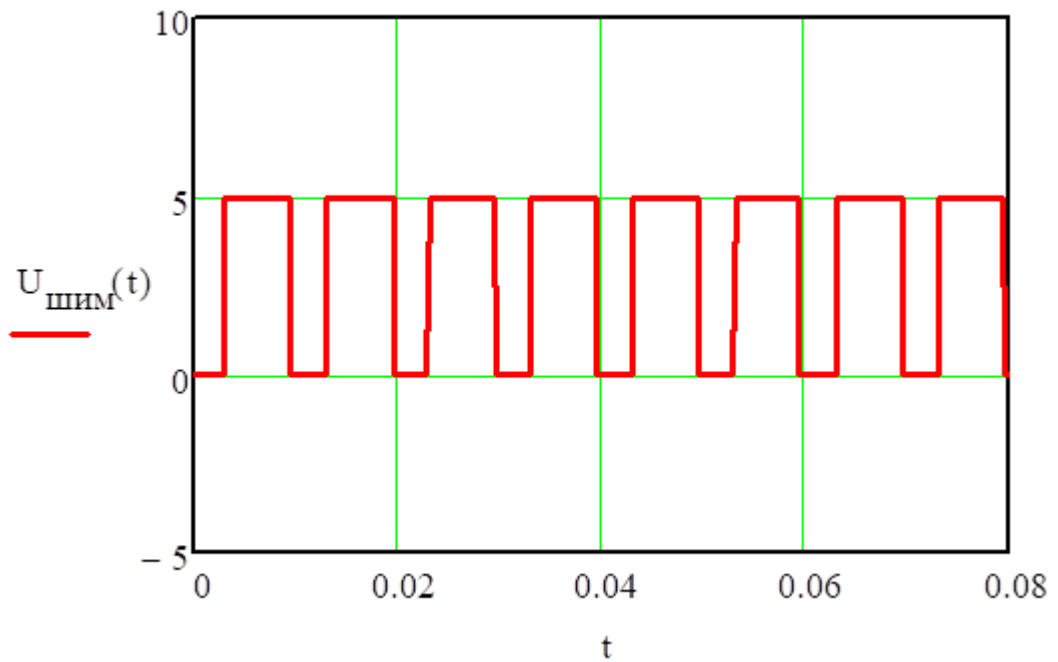
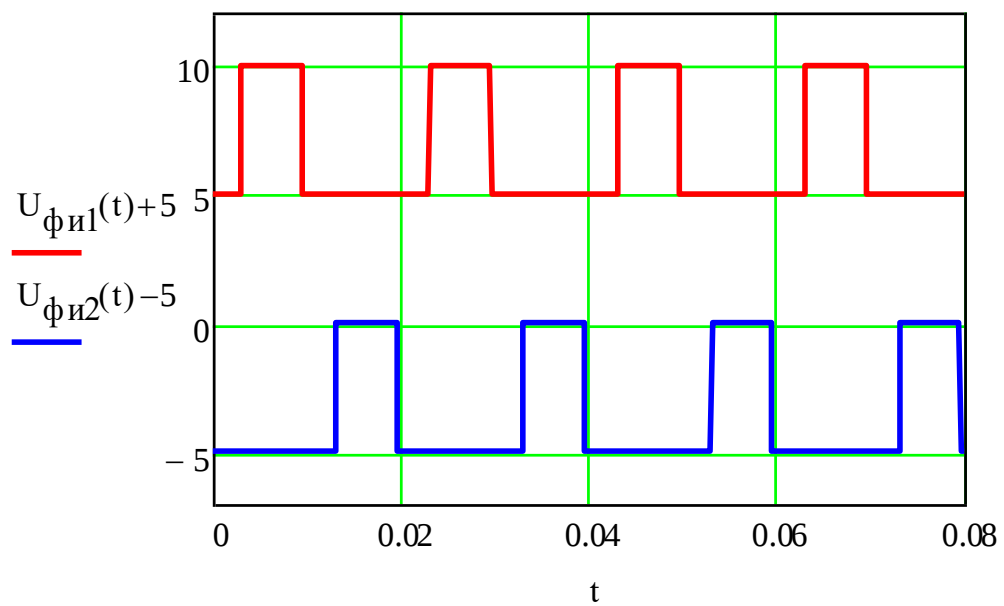


Рисунок 3.12 – Принципова схема реалізації розподільника імпульсів

Часові діаграми роботи розподільника імпульсів наведено на рис. 3.13, де а – напруга на вході розподільника імпульсів; б – напруга на виходах розподільника імпульсів.



а) – напруга на вході розподільника імпульсів

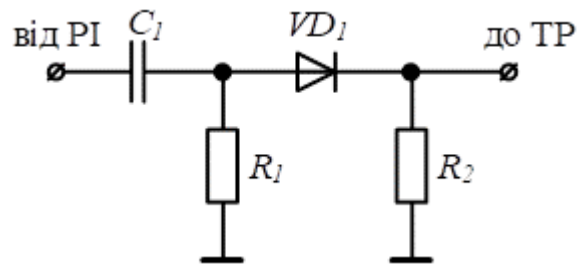


б) – напруга на виходах розподільника імпульсів

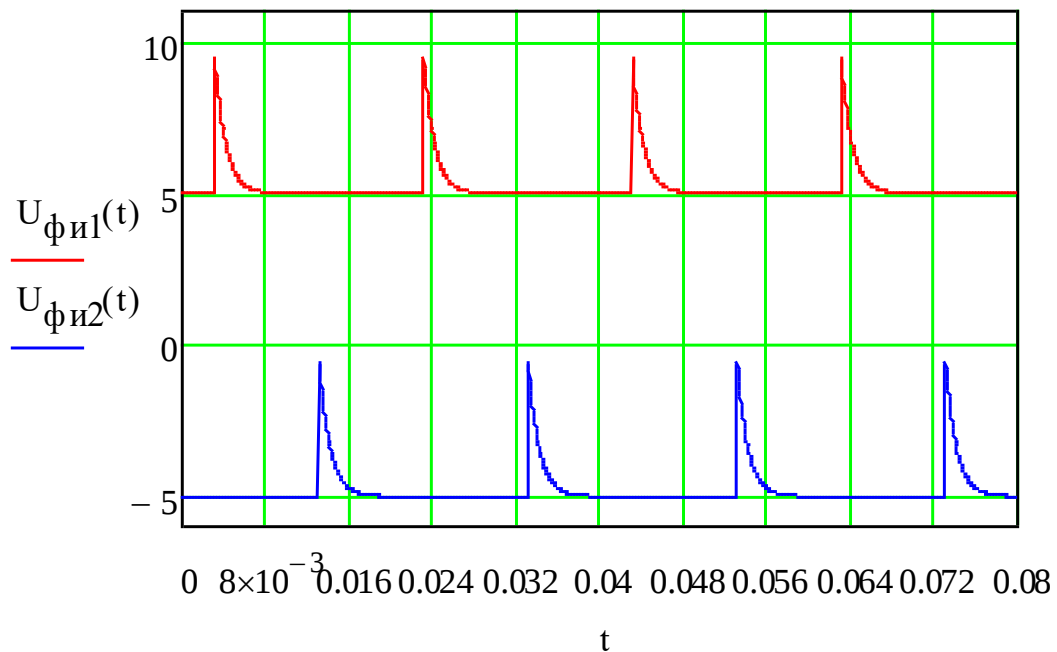
Рисунок 3.13 – Часові діаграми роботи розподільника імпульсів

Для здійснення керування тиристорами до кожного з каналу розподільника імпульсів здійснюється підключення формувачів імпульсів. Формувачі імпульсів за переднім фронтом напруги з виходу розподільника імпульсів формують короткі імпульси, тривалість яких складає не менш ніж час

включення тиристорів. Величина амплітуда цих імпульсів складає не більше 5 В. Як формувач імпульсів застосовується коло, що диференціює, принципову схему якого наведено на рис. 3.14, а. Вибираємо номінальні значення елементів кола, що диференціює, $R_1=1$ кОм та $C_1=0,1$ мкФ, а значення постійної часу розряду дорівнює $R_1C_1=0,1$ мс, а також малопотужний випрямляючий діод VD_1 . Часові діаграми роботи формувача імпульсів наведено на рис. 3.14, б.



а) принципова схема формувача імпульсів



б) часові діаграми роботи формувача імпульсів

Рисунок 3.14 – Принципова схема формувача імпульсів та часові діаграми його роботи

У схемі керування потужністю нагрівача застосовуються тиристори типу КУ202М [18], які мають мінімальне значення струму керування $I_{BKJmin} = 200$ мА. Проте, формувач імпульсів має недостатнє значення амплітуди імпульсу струму. Для підсилення значення цього імпульсу струму до величини 200 мА в схемі керування додаткового застосовуються кінцеві підсилювачі, принципову схему якого наведено на рис. 3.15.

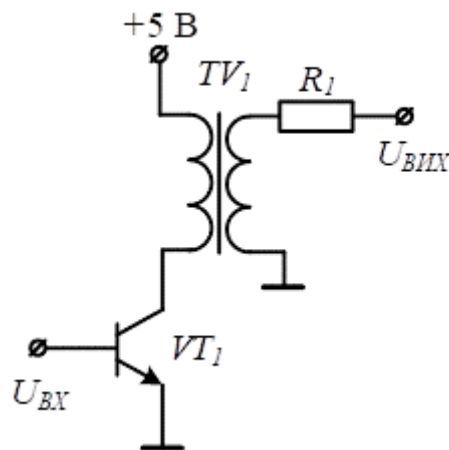


Рисунок 3.15 – Принципова схема кінцевого підсилювача

Значення амплітуди імпульсів на виході формувача складає 2 В, а величина струму керування тиристорами становить 200 мА. На базі цих даних вибираємо транзистори підсилювального каскаду середньої потужності низької частоти типу КТ501Б [19], які мають такі параметри:

– імпульсний струм колектору, I_{Kimp} , мА	500;
– максимальний струм бази, I_{Bmax} , мА	100;
– максимальне значення падіння напруги між напруги колектором і базою, U_{KBmax} , В	15;
– максимальне значення падіння напруги між напруги колектором і емітером, U_{KEmax} , В	15;
– максимальне значення потужності, що розсіюється на колекторі, P_{Kmax} , мВт	350;
– типове значення коефіцієнту передачі за струмом у схемі включення зі спільним емітером, h_{21E}	135.

Живлення кінцевого підсилювача здійснюється від напруги джерела живлення 5 В. Трансформатор має на потужність 1 Вт, а його коефіцієнт трансформації дорівнює 1. Резистори, що використовуються у вторинній обмотці підсилювача типу С2 – 1 – 2 – 2 Ом, мають потужність розсіювання 1 Вт.

3.6 Розрахунок метрологічних характеристик вимірювального каналу температури

Значення похибка під час підтримки температури в установці визначиться величиною інерційністю нагрівача, а також значенням похибок вимірювання температури первинного перетворювача, вимірювального перетворювача, різницевого підсилювача та підсилювача помилки.

Величину похибку первинного перетворювача можна зменшити завдяки здійсненню градуювання сенсора температури градується в точках, в яких заздалегідь відоме значення температури уставок 0, 8, 16, 24, 32, 40, 48°C.

Величина статичної похибки вимірювального перетворювача визначається точністю підтримки напруги джерела живлення (0,1%) та точністю номінальних значень опорів вимірювального моста. Вплив цієї похибки можна усунути завдяки підстроюванню у схемі змінних резисторів. Вплив температури на величину похибки вимірювального перетворювача можна суттєво знизити завдяки вибору резисторів з однієї серії та партії, для яких вплив під час зміни температури має однаковий характер.

Для схеми ланки узгодження та підсилювача помилки величини статичної похибки вимірювання визначається такими факторами:

- точністю номінального значення опорів у схемах, вплив яких можна усунути завдяки використанню змінних резисторів у плечах підсилювачів;
- точністю підтримки значення напруги джерела живлення операційних підсилювачів постійного струму;

– напругою зсуву та вхідним різницеvim струмом операційних підсилювачів постійного струму, вплив цих параметрів усувається завдяки включенню до схем підсилювача змінних резисторів, які здійснюють підстроювання.

Похибку, яку неможливо усунути, обумовлено для ланки узгодження та підсилювача помилки зміною температури та синфазної складової сигналу.

Виконаємо розрахунок значення похибки, яку обумовлено температурних дрейфом вихідного сигналу підсилювачів [10, 11]:

$$\frac{\Delta U_{ВИХ}}{\Delta T} = \frac{\Delta U_{ЗС}}{\Delta T} \cdot (1 + K_U) + \frac{\Delta I_{РІЗН}}{\Delta T} R_{ЗЗ}. \quad (3.6)$$

За величиною коефіцієнта підсилення за напругою ланки узгодження становить ($K_{УЛУ}=2,6$) та підсилювача помилки ($K_{ПП}=330$), а також довідкових параметрам інтегральних мікросхем LTC6084 та LTC2058 розраховано значення дрейфу вихідної напруги, що обумовлено зміною температури.

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{ЛУ}}{\Delta T} &= \frac{\Delta U_{ЗСЛУ}}{\Delta T} \cdot (1 + K_{УЛУ}) + \frac{\Delta I_{РІЗНЛУ}}{\Delta T} R_{ЗЗЛУ} = \\ &= 30 \cdot (1 + 2,6) + 0,1 \cdot 2,6 = 108 \text{ мкВ}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\Delta U_{ПП}}{\Delta T} &= \frac{\Delta U_{ЗСПП}}{\Delta T} \cdot (1 + K_{УПП}) + \frac{\Delta I_{РІЗНПП}}{\Delta T} R_{ЗЗПП} = \\ &= 1 \cdot (1 + 330) + 0,004 \cdot 330 = 332 \text{ мкВ}. \end{aligned}$$

Настройка підсилювачів здійснюється під час дії температури навколишнього середовища $+20^\circ\text{C}$, а оцінка величини похибки, що обумовлено температурний дрейфом, здійснюється в діапазоні зміни температур від 0 до $+40^\circ\text{C}$. Отже, максимальне значення зміни вихідної напруги, що обумовлено зміною температури, дорівнює:

$$\Delta U^t_{\text{ЛН}} = \frac{\Delta U_{\text{ЛН}}}{\Delta T} \Delta T = 0,108 \cdot 20 = 2,16 \text{ мВ};$$

$$\Delta U^t_{\text{ПП}} = \frac{\Delta U_{\text{ПП}}}{\Delta T} \Delta T = 0,332 \cdot 20 = 6,64 \text{ мВ}.$$

Виконаємо приведення значення цієї похибки до входу підсилювачів:

$$\Delta U^t_{\text{ЛН ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ЛН}}}{K_{\text{У ЛН}}} = \frac{2,16}{2,6} = 0,83 \text{ мВ};$$

$$\Delta U^t_{\text{ПП ВХ}} = \frac{\Delta U_{\text{ПП}}}{K_{\text{У ПП}}} = \frac{6,64}{330} = 0,02 \text{ мВ}.$$

З аналізу отриманих значень можна зробити висновок, що величини похибки підсилювача помилки є значно меншою ніж ланки узгодження на різницевого підсилювачі. Отже, під час подальших розрахунків будемо враховувати тільки величину похибки підсилювача помилки.

Розрахуємо значення похибки, яку обумовлено синфазною перешкодою. Величина коефіцієнта ослаблення синфазного сигналу визначається за такою формулою:

$$K_{\text{ОС СФ}} = (1 + K) \cdot \frac{K}{\Delta K},$$

де $K/\Delta K$ – визначиться точністю номінальних значень опорів резисторів (0,1%) та становить $1/0,0001=1000$, тоді

$$K_{\text{ОС СФ}} = (1 + 2,6) \cdot 1000 = 3600.$$

Значення напруги, що обумовлено синфазною перешкодою складає

$$U_{ном\ C\Phi\ ЛУ} = U_{BX} \cdot K_{C\Phi} = U_{BX} \cdot \frac{K_{неінв}}{K_{OC\ C\Phi}} = 1,9 \cdot \frac{2,6}{3600} = 1,4\text{ мВ.}$$

Виконаємо приведення значення цієї похибки до входу ланки узгодження на базі різницевого підсилювача:

$$U_{BX\ C\Phi\ ЛУ} = \frac{U_{ном\ C\Phi\ ЛУ}}{K_{У\ ЛУ}} = \frac{1,4}{2,6} = 0,54\text{ мВ.}$$

Загальна величина похибки, яка є сумою двох складових, а саме синфазної та температурної, дорівнює:

$$\Delta U_{BX} = \Delta U_{ЛУ\ BX}^t + U_{BX\ C\Phi\ ЛУ} = 0,83 + 0,54 = 1,37\text{ мВ.}$$

Максимальне значення вхідного сигналу ланки узгодження на базі різницевого підсилювача складає 1,9 В. Визначимо значення відносної похибки вимірювання:

$$\delta_{ЛУ} = \frac{\Delta U_{BX}}{U_{ЛУ\ max}} \cdot 100\% = \frac{1,4 \cdot 10^{-3}}{1,9} \cdot 100\% = 0,07\%$$

За допомогою статичної передавальної характеристики вимірювального каналу температури, фрагмент якої наведено на рис. 3.16, виконаємо приведення отриманою величини похибки до температури під час дії найменшої крутизни вихідної характеристики вимірювального моста:

$$\Delta T(\Delta U_{BX}) = \Delta T(1,40\text{ мВ}) \approx 0,1^{\circ}\text{C.}$$

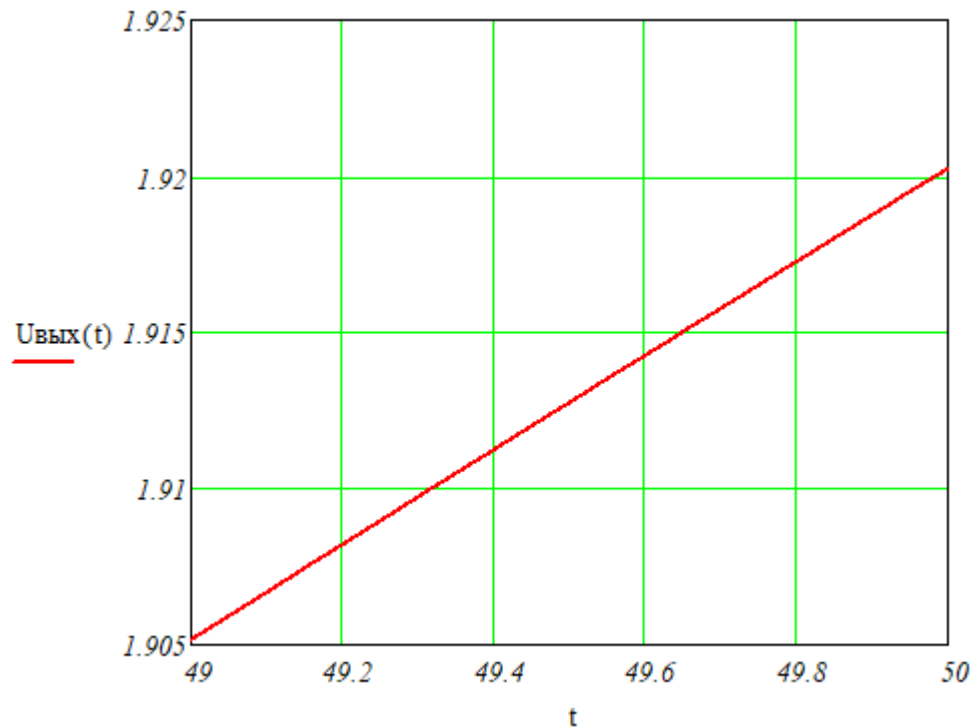


Рисунок 3.16 – Фрагмент статичної передавальної характеристики вимірювального каналу температури

Значення відносної похибка підтримки температури в установці, яку приведено до загального інтервалу температур (0..50°C), в якому здійснюється градуювання сенсора, дорівнює:

$$\delta_T = \frac{\Delta T}{T_{\max} - T_{\min}} \cdot 100\% = \frac{0,1}{50} \cdot 100\% = 0,2\%.$$

3.7 Висновки

Обґрунтовано та розроблено вимірювальний перетворювач зміни температури повітря в трубі. Як первинний вимірювальний перетворювач температури застосовується сенсор типу СТ-3-19, що є напівпровідниковим резистором (термістором), який має форму бусинки. Як вимірювальний перетворювач застосовується вимірювальний резистивний міст.

Під час досліджень встановлено, що результати вимірювання температури термістором суттєво залежать від величини струму тому, що під час протікання струму через термістор. Для усунення цього ефекту запропоновано значення теплової потужності, що розсіюється на термісторі, яке не повинно бути більше ніж 1 мВт.

Обґрунтовано та розроблено принципові схеми вимірювального каналу температури, яка складається з ланки узгодження, що виконано на базі різницевого підсилювача, блоку формувача уставок, підсилювача помилки та тиристорного регулятора.

Розраховано метрологічні характеристики вимірювального каналу температури. Встановлено, що значення похибка під час підтримки температури в установці визначається величиною інерційністю нагрівача, а також значенням похибок вимірювання температури первинного перетворювача, вимірювального перетворювача, різницевого підсилювача та підсилювача помилки. Визначено, що для ланки узгодження та підсилювача помилки величини статичної похибки вимірювання визначається точністю номінального значення опорів у схемах, точністю підтримки значення напруги джерела живлення операційних підсилювачів постійного струму, напругою зсуву та вхідним різницеvim струмом операційних підсилювачів постійного струму. Похибку, яку неможливо усунути, обумовлено для ланки узгодження та підсилювача помилки зміною температури та синфазної складової сигналу. Загальна величина похибки, яка є сумою двох складових, а саме синфазної та температурної, дорівнює 1,4 мВ. Максимальне значення вхідного сигналу ланки узгодження на базі різницевого підсилювача складає 1,9 В, а значення відносної похибки вимірювання дорівнює 0,07 %. Приведене значення величини похибки до температури під час дії найменшої крутизни вихідної характеристики вимірювального моста дорівнює 0,1°C. Значення відносної похибка підтримки температури в установці, яку приведено до загального інтервалу температур (0..50°C), в якому здійснюється градування сенсора, дорівнює 0,2 %.

4 РОЗРОБКА СТРУКТУРИ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

Під час розробки функціональної схеми вимірювальних каналів системи необхідно передбачити те, що здійснюється градування двох вимірювачів швидкості потоку. Кожен з цих вимірювачів має в своєму складі по два сенсори: сенсор температури та сенсор термоанемометра. Вихідні електричні сигнали цих сенсорів є сигнали напруги, яка змінюється в діапазоні від 0 до 5 В, а також сигнал струм, який має діапазон зміни 0 до 5 мА. Також до складу інформаційно-вимірювальної системи входять два зразкових сенсори – сенсор тиску, який застосовується для вимірювання швидкості потоку та сенсор температури зразкового термометра.

Функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи наведено на рис. 4.1. Ця схема має 4 сигнали напруги з блоку градування сенсорів (БГС), які знаходяться в безпосередньо біля мультиплексор аналогових сигналів (МАС). Також до складу цієї системи входять 4 сигнали струму, які мають перетворювачі струм/напруга (I/U). До другого мультиплексора аналогових сигналів надходить сигнали від зразкового сенсора температури (ЗСТ) та зразкового сенсора швидкості (ЗСШ). Ці сигнали виходу мультиплексора аналогових сигналів під час використання нормуючого підсилювача (НП) приводяться до уніфікованого вигляду в діапазоні від 0 до 5 В.

Вихідні сигнали двох мультиплексорів аналогових сигналів передаються через третій мультиплексор до фільтру нижніх частот (ФНЧ), який використовується для зменшення впливу шумів і перешкод. Для перетворення аналогового сигналу після фільтрації подачі до цифрового формату, який придатний для обробки в мікроконтролер (МК) застосовується аналого-цифровий перетворювач (АЦП) з джерелом опорної напруги (ДОН).

Для забезпечення автоматичного зчитування вихідних сигналів сенсорів під час градування, якщо досягнуто сталий режим потрібно в схемі

використовувати програмне забезпеченні на персональному комп'ютері. Програмне забезпечення повинно здійснювати затримку, яка формує сигнал на зчитування результатів вимірювання від сенсорів щодо досягнення сталого режиму. Це режим визначається моменту часу, коли значення температури та швидкості повітря в установці досягнуть та будуть незмінним протягом встановлено періоду часу. Після цього формується видача наступної уставки.

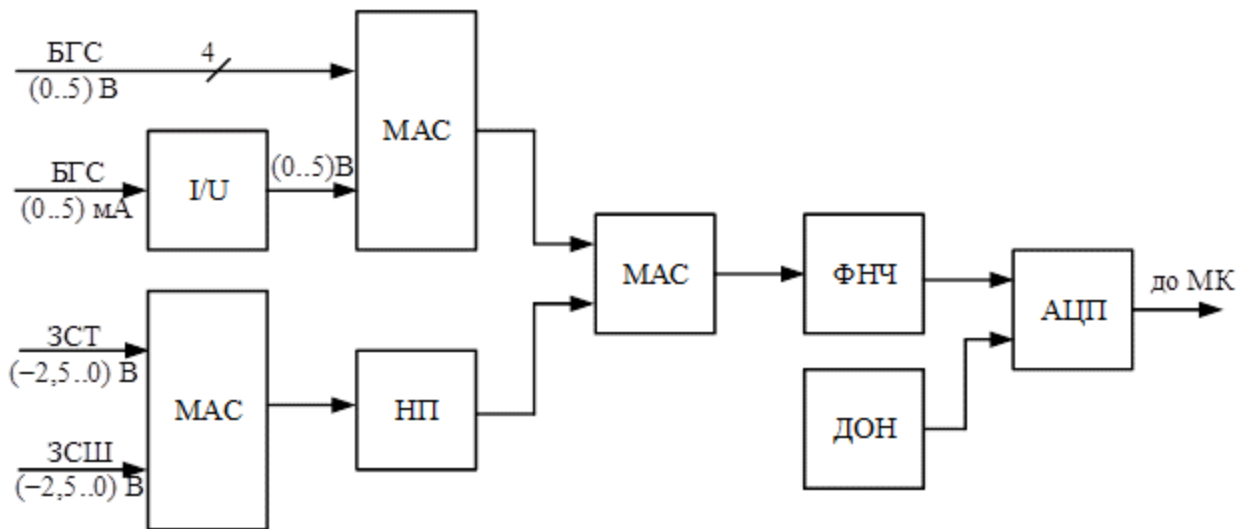


Рисунок 4.1 – Функціональна схема каналів інформаційно-вимірювальної системи

Функції, що виконуються мікроконтролерним блоком:

- зчитувати результатів вимірювання від блоку градування сенсорів, а також зразкових сенсорів, що здійснюють вимірювання швидкості газу та його температуру під час досягнення сталого режиму;
- формування та видача уставки до нагрівача та до двигуна, що залежить від уведених значень;
- передача результатів вимірювання до персонального комп'ютера, де здійснюється подальшої обробки та архівування результатів вимірювання.

Для реалізації функцій мікроконтролерного блоку інформаційно-вимірювальної системи застосовується структура, яку наведено на рис. 4.2. На цій структурі аналогові сигнали від блоку сенсорів передаються до

вимірювального каналу, де здійснюється перетворення аналогового сигналу до цифрового 12 розрядного коду. Цей код надходить до одного з портів мікроконтролера (МК) через пристрій введення/виведення (ПВВ). ПВВ застосовується для забезпечення наявності резервного порту введення/виведення мікроконтролера під час можливого подальшого удосконалення інформаційно-вимірювальної системи. Для здійснення керування нагрівачем та двигуном уставки в цифровому форматі передаються через ПВВ до двох цифро-аналогових перетворювачів (ЦАП). ЦАП здійснює видачу уставки на роботу нагрівача, також він формує уставку на роботу двигуна. Для підсилення потужності вихідного сигналу мікроконтролерного блоку після ЦАП застосовуються вихідні підсилювачі потужності.

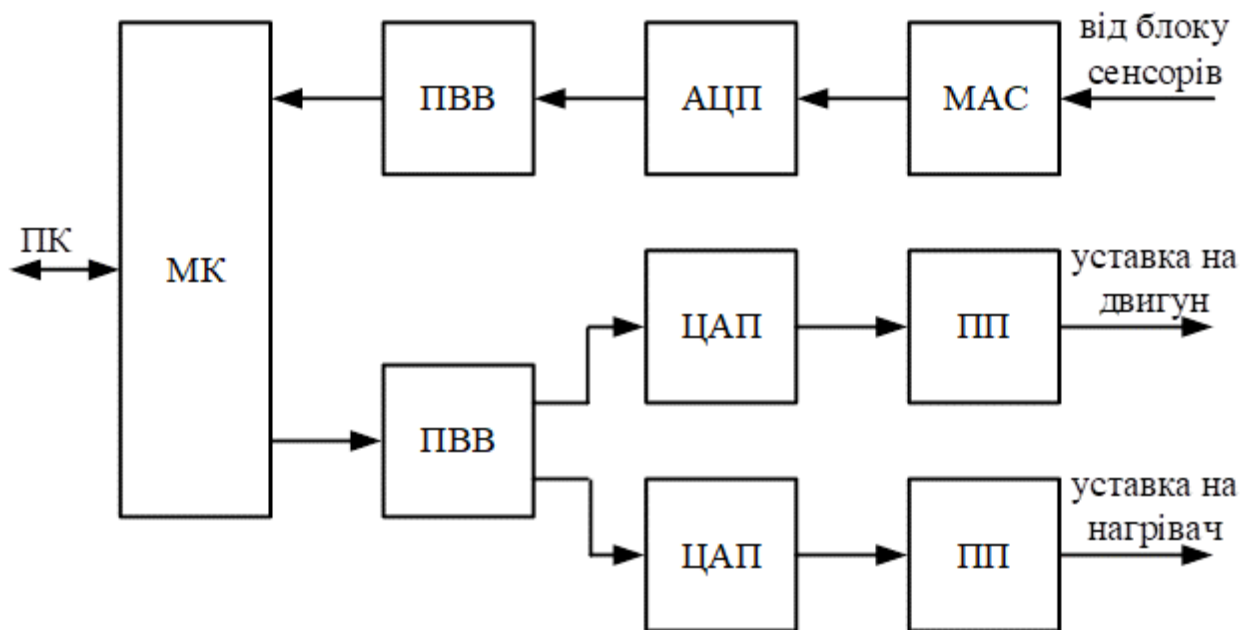


Рисунок 4.2 – Структурна схема мікропроцесорного блоку

Мікроконтролер здійснює функції приймання вимірювальних даних від сенсорів, він також формує уставки на роботу двигуна та нагрівача. МК здійснює обмін даними між персональним комп'ютером, а також функції керування роботою мультиплексора аналогових сигналів, аналого-цифрового перетворювача та пристроїв введення/виведення.

ВИСНОВКИ

Обґрунтовано та розроблено структурну схему інформаційно-виміральної системи визначення статичної характеристики перетворення сенсорів температури. На основі аналізу структурних систем автоматичного регулювання температури вибрано структуру, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку. Для реалізації структури системи керування тиристорним регулятором, застосовано спосіб широтно-імпульсної модуляції.

Для обґрунтування та розробки функціональної схеми виконані дослідження зміни температури газу під час нагрівання та охолодження в трубі для різних швидкостей потоку або витратах газу та середньої потужності нагрівача. За результатами вимірювання температури газу під час нагрівання та охолодження газу в трубі з максимальною швидкістю потоку газу та максимальною величиною потужності нагрівача визначено величини мінімального часу перехідного процесу.

Під час аналізу результатів досліджень встановлено:

- процес може бути описаний завдяки двом експонентами, значення постійних часу яких відрізняються більш ніж на порядок, та відповідно дорівнюють значенням від 0,36 до 0,70 хвилин та від 14,0 до 17,0 хвилин, що відповідає витраті газу від 10,5 до 30,5 кг/м²·с;

- збільшення витрати газу призводить до зменшення значення постійних часу для першої експоненти та впливає на значення постійної часу другої експоненти;

- значення постійних часу, які знаходяться в ступені експонент, під час нагрівання та охолодження приблизно мають однакові значення.

На основі аналізу результатів дослідження можна зробити такі висновки:

- під час дії максимальної швидкості потоку та максимальної потужності нагрівача для підвищення температури на 8°C, що визначає приріст температури під час визначення статичної характеристики перетворення

сенсорів, необхідно час встановлення результатів не менш 10 хвилин;

– для того, щоб зменшити температури газу від максимального її значення до величини навколишнього середовища необхідно не менш 60 хвилин, якщо не застосовувати кондиціонера.

На базі структурної схеми системи автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку та результатів досліджень обґрунтовано та розроблено функціональну схеми на основі функцій передачі. Виконано обґрунтування вимог до блоків і вузлів функціональної схеми автоматичного регулювання температури, що реалізує принцип плавного зворотного зв'язку.

Обґрунтовано та розроблено вимірювальний перетворювач зміни температури повітря в трубі. Як первинний вимірювальний перетворювач температури застосовується сенсор типу СТ-3-19, що є напівпровідниковим резистором (термістором), який має форму бусинки. Як вимірювальний перетворювач застосовується вимірювальний резистивний міст.

Під час досліджень встановлено, що результати вимірювання температури термістором суттєво залежать від величини струму, який протікає через термістор. Для усунення цього ефекту запропоновано значення теплової потужності, що розсіюється на термісторі, що не повинно бути більше ніж 1 мВт.

Обґрунтовано та розроблено принципові схеми вимірювального каналу температури, які складаються з ланки узгодження, що виконано на базі різницевого підсилювача, блоку формувача уставок, підсилювача помилки та тиристорного регулятора.

Розраховано метрологічні характеристики вимірювального каналу температури. Встановлено, що значення похибка під час підтримки температури в установці визначається величиною інерційністю нагрівача, а також значенням похибок вимірювання температури первинного перетворювача, вимірювального перетворювача, різницевого підсилювача та підсилювача помилки. Визначено, що для ланки узгодження та підсилювача

помилки величини статичної похибки вимірювання визначається точністю номінального значення опорів у схемах, точністю підтримки значення напруги джерела живлення операційних підсилювачів постійного струму, напругою зсуву та вхідним різницеvim струмом операційних підсилювачів постійного струму. Похибку, яку неможливо усунути, обумовлено для ланки узгодження та підсилювача помилки зміною температури та синфазної складової сигналу. Загальна величина похибки, яка є сумою двох складових, а саме синфазної та температурної, дорівнює 1,4 мВ. Максимальне значення вхідного сигналу ланки узгодження на базі різницевого підсилювача складає 1,9 В, а значення відносної похибки вимірювання дорівнює 0,07 %. Приведене значення величини похибки до температури під час дії найменшої крутизни вихідної характеристики вимірювального моста дорівнює 0,1°C. Значення відносної похибка підтримки температури в установці, яку приведено до загального інтервалу температур (0..50°C), в якому здійснюється градуювання сенсора, дорівнює 0,2 %.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Геращенко, О.А. Тепловые и температурные измерения: Справочное руководство / О.А. Геращенко, В.Г. Федоров. – К.: Наукова думка, 1965. – 296 с.
2. Кремлевский, П.П. Расходомеры и счетчики количества веществ: справочник: Кн. 2/ под общ. ред. Е.А. Шорникова. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.
3. Клаасен, К.Б. Основы измерений: Электронные методы и приборы в измерительной технике; пер. с англ. / К.Б. Клаасен. – М.: Постмаркет, 2000. – 352 с.
4. Чистяков, В.С. Краткий справочник по теплотехническим измерениям / В.С. Чистяков. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с.
5. Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия: Межгос. стандарт ГОСТ 22261–94. – Действующ. от 1998–01–01. – М.: Стандартинформ, 2007. – 35 с. – (Метрология).
6. Кузнецов, Д.Н. Настройка оптимального регулятора температуры воздушного потока аэродинамического стенда АДС – 200/250 / Д.Н. Кузнецов, А.А. Дьяченко, Д.А. Чупис // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: Вычислительная техника и автоматизация. – Выпуск 21(183) – Донецк, ДонНТУ, 2011.– С. 171 – 177.
7. Земельман, М.А. Автоматическая коррекция погрешностей измерительных устройств / М.А. Земельман. – М.: Изд-во стандартов, 1972. – 199 с.
8. Володарский, Е.Т. Планирование и организация измерительного эксперимента: учеб. пособ. / Е.Т. Володарский, Б.Н. Малиновский, Ю.М. Туз. – К.: Вища шк., 1987. – 280 с.
9. Опадчий, Ю.Ф. Аналоговая и цифровая схемотехника (Полный курс): учебник для вузов / Ю.Ф. Опадчий, О.П. Глудкин, А.И. Гуров; под ред.

О.П. Глудкина. – М.: Горячая Линия – Телеком, 2000. – 768 с.

10. Бойко, В.И. Схемотехника электронных систем. Аналоговые и импульсные устройства / В.И. Бойко, А.Н. Гуржий, В.Я. Жуйков и др. – СПб.: БХВ-Петербург, 2004. – 496 с.

11. Гершунский, Б.С. Справочник по расчету электронных схем / Б.С. Гершунский. – К.: Вища школа, 1983, – 240 с.

12. Основи технічної електроніки: підручник у 2 т. Т. 2. Схемотехніка / В.І. Бойко, В.Я. Жуйков, А.А. Зорі, В.М. Співак, Т.О. Терещенко. – К.: Вища шк., 2007. – 512 с.

13. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл; пер. с англ. – 5-е изд. – М.: Мир, 1998. – 704 с.

14. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том I / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. – 12-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 828 с.

15. Титце, У. Полупроводниковая схемотехника. Том II / У. Титце, К. Шенк; пер. с нем. – 12-е изд. – М.: ДМК Пресс, 2007. – 942 с.

16. LTC6084 [Электронный ресурс]: – Электрон. дані. – Режим доступу: <https://www.analog.com/ru/products/ltc6084.html>. – Дата доступу: квітень 2021. – Загл. з екрану.

17. LTC2058 [Электронный ресурс]: – Электрон. дані. – Режим доступу: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LTC2058.pdf>. – Дата доступу: квітень 2021. – Загл. з екрану.

18. Полупроводниковые приборы: Диоды, тиристоры, оптоэлектронные приборы: справочник / под. общ. ред. Н.Н. Горюнова. – [3-е изд., перераб.]. – М.: Энергоатаомиздат, 1987. – 744 с.

19. Перельман, Б.Л. Транзисторы для аппаратуры широкого применения: справочник / К.М. Брежнева, Е.И. Гантман, Т.И. Давыдова и др.; под ред. Б.Л. Перельмана. – М.: Радио и связь, 1981. – 656 с.

20. Жидецький, В.Ц. Практикум із охорони праці / В.Ц. Жидецький та ін. – Л.: Афіша, 2000 – 349 с.

ДОДАТОК А – Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві

До приміщення науково-дослідного відділу й організації робочого місця з обліком шкідливих виробничих факторів пред'являється ряд вимог. Приміщення в якому знаходиться робоче місце з ПК повинно мати природне освітлення, бажано з однобічним розміщенням світопрорізів, площа осклянілості яких не повинна перевищувати 25 % від площі стіни світопрорізами. Віконні прорізи в приміщенні з ПК повинні мати регульовані жалюзі чи занавеси або інші сонцезахисні пристрої. Не допускається розташування робочих місць із ПК у підвальних і цокольних поверхах. Робочі місця з ПК рекомендується розміщати в окремих приміщеннях. Площа на одного працюючого з ПК повинна складати 6 м², об'єм – 20 м³. Неприпустиме розташування ПК, при якому працюючий звернений обличчям, або спиною до вікон чи кімнати задньої частини ПК, у яку монтуються вентилятори.

Забороняється застосовувати для обробки інтер'єра приміщень із ПК полімерні матеріали (дерев'яностружечні плити, шпалери що миються, плівкові та рулоні синтетичні матеріали, шаруватий паперовий пластик та ін.), що виділяються в повітря шкідливі хімічні речовини, що перевищують гранично допустимі концентрації, не включені в «Перелік дозволених , МЗ» 1977-1985 р.

В лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідної роботи робочі місця з ПК розташовані від стіни з вікнами на відстані 1 м, відстань між столами складає 3 м. Екрани відеомоніторів ПК знаходяться від очей користувача на відстані 700 мм відповідно до СН 512-78, приміщення (S=21 м², V=73,5 м³) дозволяє розташовувати більше 3 робочих місця.

Робочі місця в положенні сидячі відповідають вимогам ДСТ 12.2.032 – 78 та ДСТ 12.2.029 – 77. Поверхня робочого столу знаходиться на висоті 0,75 метрів від підлоги, розміри робочої поверхні стільниці складають 1050x590 міліметрів, розміри вільного простору для ніг під столом складає висота 650, глибина 550, ширина 450 міліметрів відповідно. Робочий стілець оснащений

підйомно-поворотнім пристроєм, що забезпечує регуляцію висоти сидіння і спинки, пневматичним і гідравлічними амортизаторами та обладнанні підлокітниками.

А.1 Мікроклімат робочого місця

У приміщенні науково-дослідного відділу є джерела тепловиділення, тому необхідно визначити необхідні умови його вентилявання. Витрату повітря в приміщенні з додатковим тепловиділенням визначаємо за формулою:

$$L = \frac{Q_{\text{НАД}}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)}, \quad (\text{A.1})$$

де $Q_{\text{НАД}}$ – надлишкове виділення тепла в робочому приміщенні, ккал/год.; c – теплоємність повітря (0,237 ккал/кг); p – обсягова вага повітря (1,226 кг/м³); t_B – температура витяжного повітря (30°C); t_H – температура приточного повітря (20°C).

Розрахуємо надлишкове надходження тепла за наступною формулою:

$$Q_{\text{НАД}} = Q_{\text{УСТ}} + Q_{\text{ПЕР}} + Q_{\text{ОСВ}} + Q_{\text{СР}}, \quad (\text{A.2})$$

де $Q_{\text{УСТ}}$ – виділення тепла від устаткування; $Q_{\text{ПЕР}}$ – виділення тепла робітниками; $Q_{\text{ОСВ}}$ – надходження тепла від електричного освітлення; $Q_{\text{СР}}$ – надходження тепла від сонячної радіації через вікна.

Визначимо виділення тепла від устаткування за формулою:

$$Q_{\text{УСТ}} = P \cdot K_a \cdot K_{\theta} \cdot 860, \quad (\text{A.3})$$

де P – сумарна потужність устаткування, кВт/год; K_a – коефіцієнт установленної потужності (0,95); K_o – коефіцієнт одночасної роботи (1,0).

$$\begin{aligned} Q_{уст} &= [x_1 \cdot k_1 + x_2 \cdot k_2 + x_3 \cdot k_3 + x_4 \cdot k_4 + x_5 \cdot k_5 + x_6 \cdot k_6 + x_7 \cdot k_7 + \\ &+ x_8 \cdot k_8 + x_9 \cdot k_9] \cdot K_a \cdot K_o \cdot 860 = \\ &= [1 \cdot 0,5 + 1 \cdot 0,1 + 1 \cdot 0,07 + 2 \cdot 0,4 + 1 \cdot 0,06 + 1 \cdot 0,05 + 1 \cdot 0,6 + 4 \cdot 0,15 + \\ &+ 1 \cdot 3,5] \cdot 0,95 \cdot 1 \cdot 860 = 5131 \text{ ккал/год.} \end{aligned}$$

Визначимо виділення тепла від обслуговуючого персоналу за допомогою наступної формули:

$$Q_{пер} = n \cdot g = 2 \cdot 100 = 200 \text{ ккал/год,} \quad (A.4)$$

де n – кількість працюючих; g – кількість тепла, що виділяє один працівник за годину (100 ккал/год.).

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

$$Q_{осв} = E_M \cdot g_1 \cdot S = 300 \cdot 0,05 \cdot 21 = 315 \text{ ккал/год,} \quad (A.5)$$

де E_M – нормована освітленість для цієї зорової роботи, величина якої дорівнює 300 лк; g_1 – питоме тепловиділення на 1 м² підлоги при 1 лк освітленості (для / люмінесцентних ламп – 0,05 ккал/год.) S – площа приміщення, м².

Визначимо надходження тепла від сонячної радіації через вікна за наступною формулою:

$$Q_{сп} = F \cdot g_2 \cdot K_{осл} = 7,5 \cdot 65 \cdot 0,4 = 195 \text{ ккал/год,} \quad (A.6)$$

де F – площа віконних прорізів (3x2,5=7,5 м²); g_2 – кількість тепла, що

надходить через 1 м² віконного прорізу (65 ккал/год.); $K_{осл}$ – коефіцієнт ослаблення, приймаємо 0,4.

Визначимо кількість надлишкового тепла:

$$Q_{НАД} = Q_{УСТ} + Q_{ПЕР} + Q_{ОСВ} + Q_{СР} = 5131 + 200 + 315 + 195 = 5841 \text{ ккал/год.}$$

Визначимо витрати повітря в приміщенні:

$$L = \frac{Q_{НАД}}{c \cdot p \cdot (t_B - t_H)} = \frac{5848}{0,237 \cdot 1,226 \cdot (30 - 20)} = 2010 \text{ м}^3 / \text{год.}$$

Існуюча в наявності система кондиціонування та вентилявання має продуктивність 2200 куб. м./годину, що задовольняє необхідним нормативам.

Параметри мікроклімату на робочих місцях регламентуються ДНАОП 0.03.3.15 – 86 «Санітарні норми мікроклімату виробничих приміщень № 4088–86». Відповідно доданих санітарних норм температура повітря, швидкість руху повітря та відносна вологість у холодні періоди року повинна складати (22 – 24) градуса за Цельсієм, 0,1 метра в секунду та 40-60 % відповідно. При збереженні всіх параметрів можливе коливання температури від 21 до 25 градусів Цельсія. У теплі періоди року температура повітря повинна складати (23 – 25) градусів Цельсія, рухливість повітря (0,1 – 0,2) метрів секунду, вологість (40 – 60) %. Температура може коливатися від 22 до 26 градусів Цельсія при збереженні всіх інших параметрів мікроклімату. Вище зазначені норми цілком відповідають фактичним даним приміщення лабораторії вимірювальної техніки та науково-дослідним відділом.

А.2.2 Розрахунок системи загального рівномірного освітлення з лампами розжарювання для приміщення, в якому використовуються зорові роботи високої точності

Розміри приміщення: довжина ($a=6$ м), ширина ($b=3,5$ м), висота ($h=3,5$ м). Приміщення має світлу побілку: коефіцієнт відбиття $P_{стелі} = 70 \%$, $P_{стін} = 50 \%$. Висота робочих поверхонь (столів) $h_p = 0,7$ м. Для освітлення прийнято світильники типу УПМ-15, які підвищуються до стелі, відстань від світильника до стелі $h_c = 0,4$ м. Мінімальна освітленість за нормами $E=200$ лк.

1) Визначимо висоту підвісу світильників над підлогою

$$h_0 = H - h_c = 3,5 - 0,4 = 3,1 \text{ м.}$$

Для світильників загального освітлення з лампами розжарювання потужністю до 200 Вт мінімальна висота підвісу над підлогою відповідно до СНІП П-4-79 повинна бути у межах (2,5 – 4,0) м, залежно від характеристики світильника. В лабораторії виміральної техніки та науково-дослідному відділу відповідає цій вимозі.

2) Визначимо висоту підвісу світильника над робочою поверхнею:

$$h = h_0 - h_p = 3,1 - 0,4 = 2,7 \text{ м.}$$

Рівномірність освітлення досягається при відповідному співвідношенні відстані між світильниками (L) та висоти їх підвісу (h).

3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,7 = 1,9 \text{ м.}$$

4) Розрахуємо необхідну кількість світильників

$$N = \frac{a \cdot b}{L^2} = \frac{6 \cdot 3,5}{2^2} = 6.$$

Приймаємо 6 світильників, враховуючи розміри приміщення розміщуємо їх у два ряди по 3 штуки.

5) Світловий потік лампи світильника (Φ_L) визначається за формулою:

$$\Phi_L = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

де E – нормативна освітленість, лк; K_3 – коефіцієнт запасу, який враховує зниження освітленості в результаті забруднення та старіння ламп; S – площа приміщення, що освітлюється, м²; Z – коефіцієнт нерівномірності освітлення для ламп розширювання (1,15); N – кількість світильників; n – кількість ламп у світильнику; η – коефіцієнт використання світового потоку, який визначається за світлотехнічними таблицями залежно від показника приміщення (i) та коефіцієнтів відбиття стін та стелі.

6) Визначимо показник приміщення:

$$i = \frac{a \cdot b}{h \cdot (a + b)} = \frac{6 \cdot 3,5}{3,5 \cdot (6 + 3,5)} = 2,21.$$

Коефіцієнт використання $\eta = 0,48$ для світильника УПМ-15 (при $i = 2,5$, $P_{стелі} = 70\%$, $P_{стін} = 50\%$)

Світловий потік одного світильника, а значить і лампи, оскільки за конструктивним виконанням у світильнику цього типу встановлена лише одна лампа, дорівнює:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta} = \frac{200 \cdot 21 \cdot 1,15}{6 \cdot 1 \cdot 0,48} = 1677 \text{ лм.}$$

9) обираємо лампу Б-150 потужністю 150 Вт, світловий потік якої становить 2100 лм. Хоча це значення на 18% більше розрахованого, однак не перевищує встановлену норму ($-0\% < \Phi_{\text{л}} < +20\%$). Сумарна електрична потужність усіх світильників, встановлених у приміщенні становить:

$$P_{\text{CB}} = P \cdot N = 150 \cdot 6 = 900 \text{ Вт.}$$