

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»
Факультет комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
(повне найменування інституту, назва факультету)

Кафедра електронної техніки
(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри електронної техніки
_____ Олександр ВОВНА
(підпис) (ініціали, прізвище)
«__» _____ 2021 р.

Випускна кваліфікаційна робота

_____ магістра
(освітньо-кваліфікаційний рівень)

на тему «Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очищення»

Виконав (ла) студент (ка) 2 курсу, групи ІВТм-20
(шифр групи)

спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва спеціальності)

_____ Марченко Наталія Ігорівна
(прізвище та ініціали) (підпис)

Керівник _____ зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф _____ Олександр ВОВНА
(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-інформаційних технологій та автоматизації
(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 витрати коксового газу після очищення»

Спецчастина: _____

Виконавець, студент (ка)

гр. ІВТм – 20

Наталія МАРЧЕНКО

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Консультанти:

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Олександр ШТЕПА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Іван ЛАКТИОНОВ

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Нормоконтроль

Олександр ВОВНА

(підпис, дата, Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Покровськ – 2021

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

Інститут, факультет Комп'ютерно-інформаційних технологій та автоматизації
Кафедра Електронна техніка
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Галузі знань 15 Автоматизація та приладобудування
(шифр і назва)
Спеціальність 152 Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри електронної техніки
Олександр ВОВНА
« » 2021 року

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

Марченко Наталія Ігорівна

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Розробка та дослідження інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очищення

керівник проекту (роботи) Вовна Олександр Володимирович, д.т.н., проф.

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

затверджені наказом вищого навчального закладу від 22.09.2021 року № 570

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	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
2	зав. каф. ЕТ, д.т.н., проф. Вовна О.В.		
3	проф. каф. ЕТ, д.т.н., доц. Лактіонов І.С.		
4	доц. каф. ЕТ, к.т.н., доц. Штепа О.А.		

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Аналіз інформаційно-вимірювальної системи витрати очищеного коксового газу	29.09.2021	
2	Розробка математичної моделі вимірювального каналу вимірювання витрати	15.10.2021	
3	Дослідження та розробка методів підвищення точності вимірювання витрати коксового газу	10.11.2021	
4	Розробка та обґрунтування інформаційно-вимірювальної системи	01.12.2021	

Студент

(підпис)

Наталія МАРЧЕНКО

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

Керівник роботи

(підпис)

Олександр ВОВНА

(Ім'я та ПРІЗВИЩЕ)

ЛИСТ ЗАУВАЖЕНЬ

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

АНОТАЦІЯ

Марченко, Н.І. Розробка та дослідження інформаційно-виміральної системи витрати коксового газу після очищення / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» зі спеціальності 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка. – ДВНЗ «ДонНТУ», Покровськ, 2021.

Пояснювальна записка: 83 стор., 24 рис., 8 табл., 18 посилань.

Випускна кваліфікаційна робота складається з вступу, основної частини, яка складається з чотирьох розділів, висновку та списку використаних джерел.

Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення точності на етапі проектування, дослідження та розробки інформаційно-виміральної системи витрати коксового газу після очистки, що дозволить та розробити принципову схему компенсації похибок, що спричинені дестабілізуючими факторами.

Обґрунтування та розробка структурної схеми первинного перетворювача інформаційно-виміральної системи витрати коксового газу після очищення, на основі аналізу структурних систем та математичних моделей процесу перетворення вимірюваної величини.

Дослідження впливу зміни витрати на інформаційно-вимірвальну систему та виявлення похибок, що виникають під час вимірювання первинним перетворювачем та методика їх компенсацій.

Розрахунок вимірвальних приладів, що входять до структури інформаційно-виміральної системи; постановка вимог та вибір засобів, що задовольняють вимогам.

Ключові слова: витрата газу, звужувальний пристрій, дестабілізуючий фактор, дослідження інформаційно-виміральної системи, математична модель, похибка, звужувальний пристрій.

ABSTRACT

Marchenko, N.I. Development and research of the information-measuring system for coke oven gas consumption after purification/ Graduation qualification work for obtaining an educational degree 'Master' in specialty 152 'Metrology and information-measuring technique'. – SHEI 'DonNTU', Pokrovsk, 2021.

Explanatory note: 83 p., 24 fig., 8 tables, 18 references.

Final qualifying work consists of an introduction, the main part, which consists of four sections, a conclusion and a list of sources used.

The purpose of this qualification work is to increase accuracy at the stage of design, research and development of an information and measuring system for coke oven gas consumption after cleaning, which will allow and develop a principle scheme for compensation of error caused by destabilizing factors.

Substantiation and development of the structural scheme of the primary converter of the information-measuring system of coke oven gas consumption after cleaning, based on the analysis of structural systems and mathematical models of the process of conversion of the measured value.

Investigation of the impact of cost changes on the information and measurement system and detection of errors arising during the measurement by the primary converter and the method of their compensation.

Calculation of measuring instruments included in the structure of the information and measuring system; setting requirements and choosing the means that meet the requirements.

Keywords: gas consumption, narrowing device, destabilizing factor, research of information-measuring system, mathematical model, error, tapering device.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
1 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИТРАТИ ОЧИЩЕНОГО КОКСОВОГО ГАЗУ	11
1.1 Аналіз об'єкту дослідження	11
1.2 Аналіз методів вимірювального контролю витрати коксового газу.....	14
1.3 Аналіз засобів вимірювання витрати коксового газу	20
1.4 Аналіз методів вимірювального контролю температури коксового газу	23
1.5 Мета за задачі дослідження кваліфікаційної роботи.....	27
Висновки	27
2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ.....	29
2.1 Структурна схема Метран 150 вимірювання витрати.....	29
2.2 Побудова математичної моделі перепаду тиску	31
2.3 Аналіз похибки обчислення значень різниці тиску при мікропроцесорній обробці сигналів	37
2.4 Дослідження похибки визначення усередненого значення витрати газу	39
Висновки	42
3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ КОКСОВОГО ГАЗУ.....	44
3.1 Вимірювальний блок датчика витрати Метран - 150	44
3.2 Методи компенсації дестабілізуючого фактору вимірювання витрати коксowego газу.....	46
Висновки	50
4 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	51
4.1 Градування засобу вимірювання за еталонними значеннями	51
4.2 Корегування діапазону вимірювання комутатором	57
4.3 Градування електронного пристрою вимірювання	59

4.4 Проектування додаткового вимірювального пристрою для визначення статистичного тиску.....	65
Висновки	71
ВИСНОВКИ.....	73
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	75
ДОДАТОК А.....	77

ВСТУП

Актуальність теми дослідження. Для того, щоб якісно контролювати та керувати процесами виробництва часто недостатньо просто періодично вимірювати параметри даного процесу. Технології розвиваються з кожним днем та вимагають все більшої кількості контрольно-вимірювальних пристроїв, що працюють у автоматичному режимі. Такі інформаційно-вимірювальні системи показують, обчислюють та можуть реєструвати значення фізичної величини або декількох одночасно для контролю та/або підтримання регламентованих значень параметрів.

Інформаційно-вимірювальні системи можуть забезпечувати проведення операцій без зупинки обладнання для вимірювання параметрів та тим самим підвищувати рівень ефективності та оптимізувати процес виробництва.

У коксохімічній промисловості контроль витрати газових середовищ є необхідною частиною великого виробництва. Досліджувана тема є актуальною з причини того, що проведення належного моніторингу витрати дозволяє оптимізувати можливі матеріальні втрати та вартість, допомагає збільшити прибуток підприємства, зробити його товари та послуги більш конкурентоспроможними.

Мета та завдання досліджень. Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення точності при розробці та дослідженні інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очистки, що дозволить та розробити принципову схему компенсації похибок, що спричинені дестабілізуючими факторами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути та вирішити такі задачі, як:

- провести аналіз сучасних методів та засобів визначення витрати коксового газу;
- розглянути та виявити проблеми роботи датчиків визначення витрати газових середовищ;

- розробити математичну модель перетворювального каналу витрати з урахуванням дестабілізуючих факторів, провести аналіз впливу цих факторів на точність вимірювання витрати;
- обґрунтувати та розрахувати складові інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очистки.

Об'єкт дослідження: інформаційно-вимірювальна система витрати коксового газу.

Предмет дослідження: способи та методи покращення точності вимірювання витрати коксового газу.

Наукова новизна одержаних результатів у випускній кваліфікаційній роботі полягає в запропонуванні способів підвищення точності датчиків перепаду тиску для вимірювання витрати за рахунок компенсації впливу температури та похибки, що виникає через кінцеве значення коефіцієнту підсилення операційного підсилювача.

Особистий внесок здобувача. У даній випускній кваліфікаційній роботі, автором на здобуття освітнього ступеня «Магістр», було описано математичні моделі вимірювання витрати, структурну схему процесу перетворення, запропоновано методи компенсації дестабілізуючих факторів.

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра. Кваліфікаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел та додатка – охорона праці та безпеки під час надзвичайних ситуаціях на підприємстві. Обсяг роботи становить 83 сторінки основного тексту, 24 рисунка, 8 таблиць та 18 найменувань використаних джерел.

1 АНАЛІЗ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ВИТРАТИ ОЧИЩЕНОГО КОКСОВОГО ГАЗУ

1.1 Аналіз об'єкту дослідження

У коксохімічній промисловості коксовий газ є одним з основних побічних продуктів, що утворюється у процесі коксування кам'яного вугілля на потужностях Авдіївського коксохімічного заводу. Процес коксування кам'яного вугілля проходить у коксовій печі без доступу повітря шляхом нагрівання палива до температури близько 900-1100° С.

Користь від уловлювання хімічних продуктів, що утворилися під час коксування освідомили не одразу. У другій половині XIX ст., а точніше у 1867 році, інженер Кнаб із Німеччини побудував печі з можливістю уловлювання продуктів коксування. До побудови печей Кнаба існувала думка, що при уловлюванні якість коксу стає нижче. Однак, саме його запропоноване рішення зіграло важливу роль у розвитку індустрії [1].

Коксовий газ є горючим газом із великою калорійністю, а також містить у собі багато цінних речовин, таких як: водень, метан, оксиди вуглецю, до його складу входять кам'яновугільні смоли, бензол, аміак, сірководень та інші. Склад та властивості газу можуть незначно відрізнятися залежно від якості використаної сировини та умов коксування. Приблизний склад коксового газу наведено у таблиці 1.1:

Таблиця 1.1 – Приблизний склад коксового газу

Назва речовини	Хімічна формула	Доля газів, у %
Водень	H ₂	50-60
Метан	CH ₄	20-30
Оксид вуглецю	CO	5-7
Діоксид вуглецю	CO ₂	2-3
Азот	N ₂	2-3,5

Очищення коксового газу від смол та летючих речовин здійснюють за схемою приведеною на рисунку 1.1 [3]: 1 - коксова батарея; 2 - подача шихти; 3 - видача коксу; 4 - газозбірники; 5 - сепаратор; 6 - первинні холодильники; 7 - ексгаустери; 8 - електрофільтри; 9 – підігрівач газу паром; 10 - аміачні скруббери; 11 - кислотні пастки; 12 - уловлювач ціаністого водню; 13 – сіркоочистка; 14 – вторинний холодильник; 15 – бензолні скруббери; 16 – газодувки; 17 – пароплям; 18 – трубопровід чистого газу; 19 – байпас.

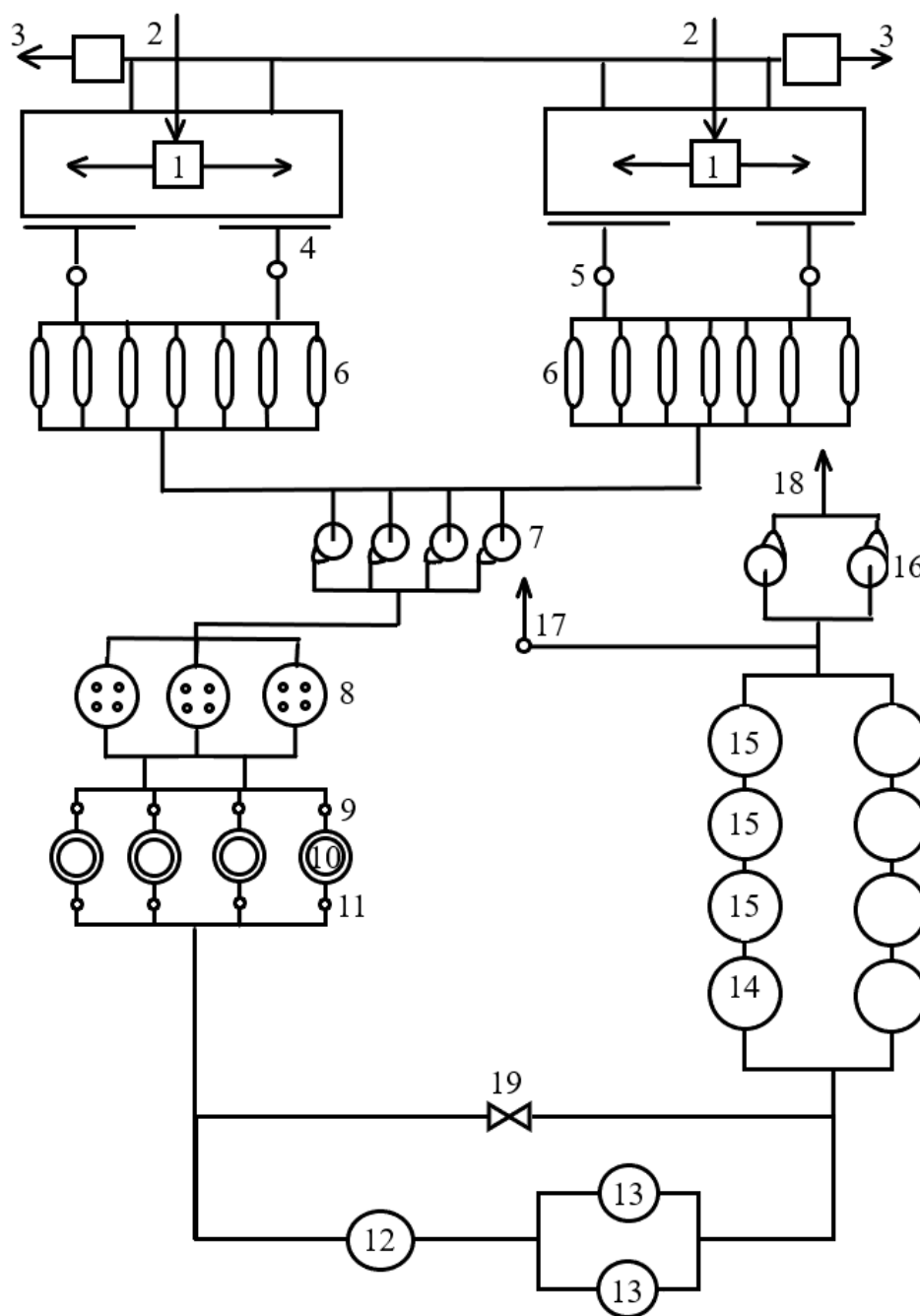


Рисунок 1.1 – Принципова схема очистки коксового газу

Парогазову суміш, яка виходить з коксових камер, уловлюють за допомогою колекторів-газозбірників та відводять у цех Уловлювання №1 та Уловлювання №2.

Газ має високу теплотворність, величиною 14 - 18 МДж/м³, що характеризує його як найбільш ефективне газоподібне паливо [2]. У складі газу об'ємна частка горючих компонентів складає 93%, саме тому він має високий показник ККД.

Газ використовується як сировина для виробництва хімічних продуктів. Коксовий газ, що отримують з печей (прямий газ), не може бути використано безпосередньо. Після збору газ підлягає очищенню та процедурі уловлювання продуктів сухої перегонки вугілля та вологи.

Уловлювання домішок в першу чергу зумовлено збереженням обладнання та газопроводів, тому що більшість речовин, що містить коксовий газ, може стати причиною виходу з ладу машин, забивання трубопроводів та гідравлічних ударів. Ціанід водню, зміст якого в коксовому газі великий, можуть бути основною причиною корозії професійного обладнання. Крім того, під час появи коксового газу в обов'язковому порядку виділяється аміак. Ця речовина дуже згубно впливає не тільки на трубопроводи, а й на навколишнє середовище, бо потрапляє у повітря.

Бензол отримують у бензольному відділенні цеху Уловлювання №1 методом дистиляції обензолених поглинаючих масел. Зміст парів бензольних вуглеводнів у прямому газі приблизно дорівнює 30–40 г/м³. Бензол має велику цінність для хімічної промисловості як сировина, його використовують і як реагент для синтезу різноманітних речовин, і як розчинник для інших реакцій.

Коксовий газ задля вилучення бензолу проходить через скруббер. Бензол уловлюється у скрубберу з насадками методом абсорбції. Перед попаданням до бензольного скрубера газ додатково охолоджують до температури 25 - 30 °С у спеціальних холодильниках у холодильному відділенні.

Скрубер являє собою вертикальний циліндр діаметром 6 - 8 м, заввишки 20 - 30 м, футерований зсередини для запобігання корозії керамічною плиткою.

У середині скрубера розміщені труби кількома ярусами. На трубах розміщені форсунки, через які подається вода для зрошування газу.

Охолоджений газ з бензольних скрубєрів проходить на наступний ступень очищення. Очищений коксовий газ, після процедури очищення та вилучення з нього хімічних речовин у спеціалізованих цехах заводу, використовується як паливо для підігріву коксових батарей, для виробництва електричної енергії, пару, тепла на теплоелектроцентралі (ТЕЦ).

На етапі виходу коксового газу із скрубєра важливо контролювати тиск у газопроводі та об'єм газу, що проходить для запобігання аварійних ситуацій. Для цього необхідно розробити та реалізувати систему вимірювання витрати коксового газу.

1.2 Аналіз методів вимірювального контролю витрати коксового газу

На відміну від рідин, гази не мають фіксований об'єм та заповнюють весь доступний простір, наприклад труби. Як і рідини, гази володіють текучістю та пручаються деформації.

Газове середовище непостійне та змінюється в залежності від зміни температури та надлишкового тиску. Задля вирішення задачі обліку газу виконують одночасне вимірювання трьох основних параметрів середовища: витрату газу при робочих умовах, температуру та абсолютний тиск. Потім проводять обчислення за формулою 1.1 за виміряними значеннями витрати (об'єму) газу, які привели до стандартних умов згідно з ГОСТ для паливних газів: $P_0=101,325$ кПа, $T_c=20^\circ\text{C}$.

$$V_{20} = V \cdot \frac{(273.2 + 20) \cdot P}{(273.2 + T_c) \cdot P_0}, \quad (1.1)$$

де V_{20} – об'єм газу при $T_c = 20^\circ\text{C}$, м³;

P – робочий тиск газу, кПа;

P_0 – нормальний тиск газу, $P_0=101.325$ кПа (760 мм рт.ст.);

V – об'єм газу при тиску P та температурі T_c , м³;

T_c – температура при стандартних умовах, $T_c = 20$ °С.

Для розробки системи вимірювання витрати коксового газу, як і для будь-якого іншого, необхідно враховувати три параметри, які впливають на результати, а саме: абсолютний тиск, температуру та витрату газу.

Витратою газу у механіці називають кількість речовини, яка проходить через переріз за одиницю часу. Прилади, що вимірюють витрату, називають витратомірами. Без них складно уявити роботу сучасних галузей промисловості: енергетики, металургії, транспорту, комунального та сільського господарств.

Перед тим, як обрати елементи системи вимірювання витрати коксового газу, необхідно розглянути методи вимірювального контролю витрати газу.

Усі методи вимірювання витрати можна поділити на декілька груп за способом вимірювання:

- 1) З безперервно рухомим тілом:
 - Тахометричні (турбінні, камерні, ротаційні, мембранні та інші);
 - Силкові (коріолісові – масоміри газу, використовується ефект Коріоліса);
- 2) Засновані на особливих методах:
 - Міточні;
 - Концентраційні;
- 3) Засновані за різних фізичних явищах:
 - Теплові (калориметричні, з зовнішнім підігрівом, термоанемометричні);
 - Акустичні (ультразвукові);
 - Електромагнітні (засновані на законі електромагнітної індукції);
 - Оптичні (лазерно-доплеровські анемометри);
- 4) Засновані на гідродинамічних методах:

- Змінного перепаду тиску (витратоміри змінного перепаду тиску зі звужувальним пристроєм)
- Обтікання (ротаміри, поплавкові, поршневі пристрої та інші);
- Вихрові (струменеві, вихрові) [3].

Ознайомимося з деякими методами вимірювального контролю витрати коксового газу та зробимо короткий аналіз. У якості таких методів виступають: калометричний, електротермічний та метод вимірювання витрати по перепаду тиску (гідродинамічний).

Калометричний метод засновано на тому, що зміна температури підігріваемого газового потоку пропорційна кількості витраченого тепла та його вазі. Через нагрівач, який встановлено у газопроводі, протікає електричний струм, температуру газу вимірюють 2 термометра опору, які встановлено по обидві сторони нагрівального елемента (до та після нього). Електрична потужність підтримується постійною та витрату газу визначаємо за різницею температур його до та після підігрівача. Як вимірювальний пристрій можна використати гальванометр, включений до діагоналі моста Уїнстона.

Принципову схему вимірювального пристрою витрати газу калометричним методом подано на рисунку 1.2 [3].

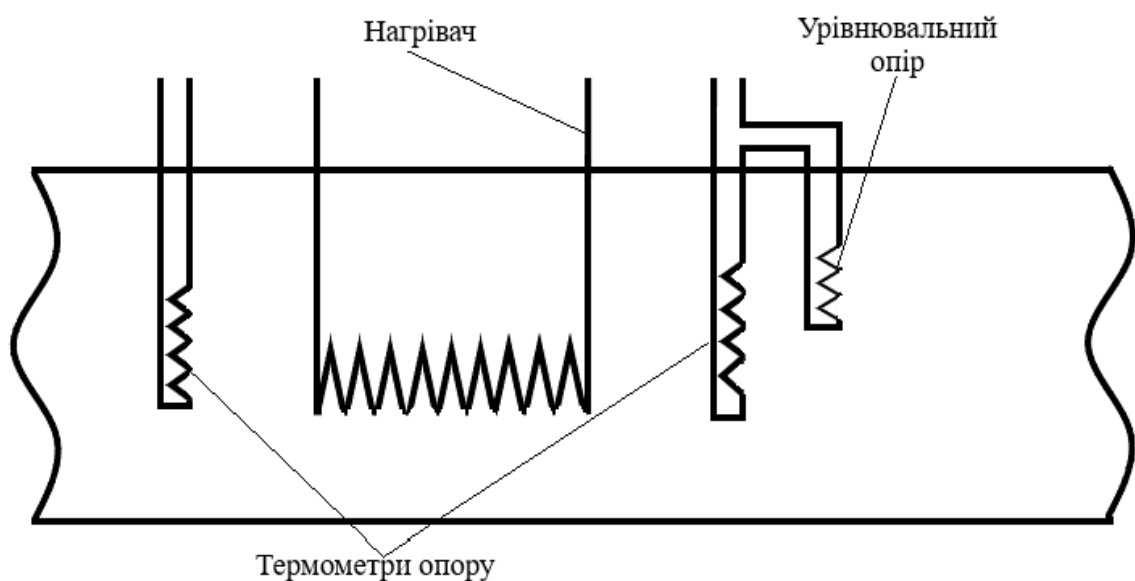


Рисунок 1.2 – Схема пристрою для вимірювання калометричним методом

Калориметричний метод вимірювання витрати коксового газу в умовах газопроводу може мати значні похибки вимірювання внаслідок зміни складу газу та внаслідок його теплоємності та теплопередачі. Ці похибки в нормі можуть досягати 5% [4].

При вимірюванні витрати газу калориметричним методом необхідно встановлювати прилад усередину газопроводу. Домішки у складі коксового газу приведуть до забруднення поверхні нагрівача, зміну його коефіцієнта теплопередачі та можливий вихід зі строю. Цей метод не підходить для роботи у заданих експлуатаційних умовах через невисоку надійність нагрівального елемента в даних умовах роботи та не може через це використовуватись у безперервному виробництві.

Електротермічний метод вимірювання витрати газу побудовано на залежності між кількістю теплоти, яку витрачає нагріте тіло, яке помістили в потік, що рухається зі швидкістю. Температуру тіла вимірюють за допомогою термоперетворювача, у його ролі може бути використано термопару або термометр опору. Якщо встановлено термопару, то до неї під'єднують мілівольтметр. Показання приладу є функцією температури гарячого спаю.

У випадку, коли у ролі термоперетворювача використовують термометр опору, є 2 способи встановлення: сила струму або опір підтримується постійними. При постійній силі струму швидкість потоку у газопроводі можна розрахувати через температуру проволочки термометру. Також можна судити про швидкість через зміну опору термометра R.

Коли опір є постійним, про швидкість газового потоку, що проходить газопроводом, можна судити за значенням сили струму, необхідної для підтримання постійної температури.

Згідно з деякими дослідженнями чутливість при постійній силі струму вище. Тому доцільно використовувати схему з постійним струмом, але цей метод має дуже вагомий недолік. При зміні температури газу похибка вимірювання може досягати 20%, при забрудненні чутливого елемента похибка також зростає, а нагадаємо, що коксовий газ містить у собі велику кількість

домішок, зокрема смоли, що не конденсувалися на попередніх етапах очистки.

Застосування даного метода нерентабельне та не відповідає умовам робочого середовища.

Принципом дії витратомірів змінного перепаду тиску полягає у залежності об'єму газу, що проходить газопроводом через вимірювальний пристрій, від зміни тиску. Залежність квадратична: швидкість потоку визначається як квадратний корінь від зміни тиску (ΔP). Принцип дії витратомірів полягає у тому, що у трубопроводі, по якому з деякою швидкістю протікає речовина, роблять штучне звуження потоку (встановлюють, наприклад, діафрагму та підключають до та після неї вимірювальний пристрій) та це призводить до різниці тиску, внаслідок переходу частини потенційної енергії тиск у кінетичну середню швидкість потоку у звуженому перетині підвищується, в результаті чого статичний тиск в цьому перерізі стає менше статичного тиску перед звуження потоку. Чим більше різниця тисків, тим більше витрата речовини та швидкість потоку.

Найбільш поширеними звужуючими пристроями є пристрої трьох типів: сопло, труба Вентурі та діафрагма. Діафрагма - тонкий диск із розташованим на його вісі круглим отвором. Її встановлюють у газопровід так, щоб її вісь як можна точніше збігалася з віссю труби. Остання набула найчастіше використання. Стандартна діафрагма використовується для визначення витрати у трубопроводах понад 50 мм.

На рисунку 1.3 схематично показано як обтікає отвір діафрагми потік газу.

У перерізі А-А починається звуження потоку та внаслідок відбувається збільшення його швидкості. Максимальної швидкості потік досягає у місці найбільшого звуження та стиснення струменя після проходження через діафрагму у перерізі В-В [13].

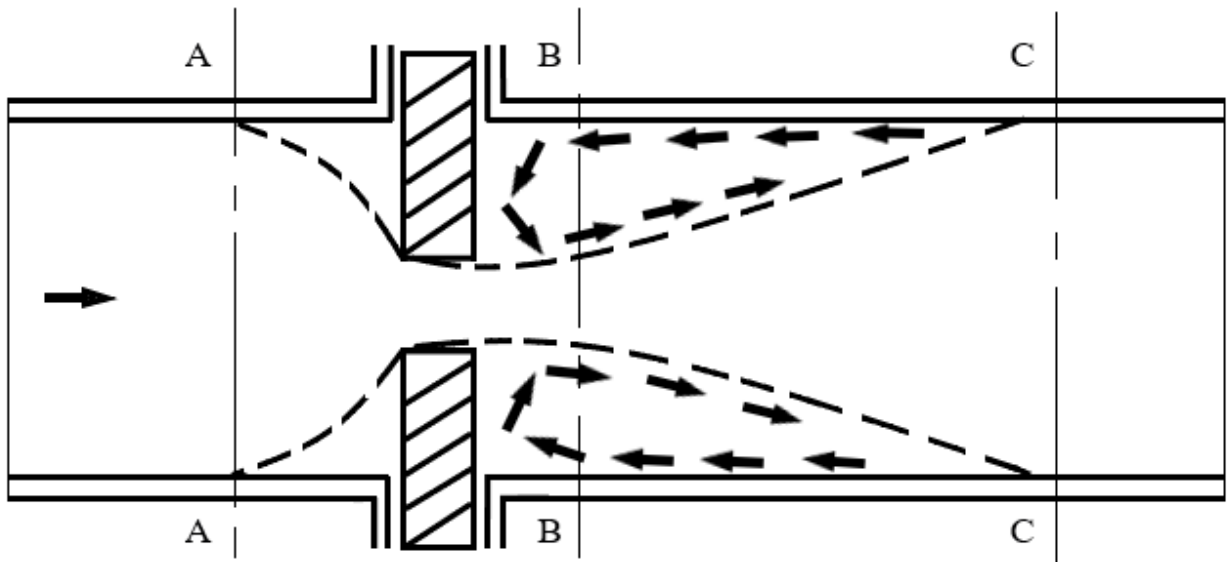


Рисунок 1.3 – Обтікання потоком текучого газу отвору діафрагми

Якщо середовище нестисливе, то у перерізі С – С його середня швидкість буде дорівнювати початковій $v_a = v_c$, що виходить із відомого закону збереження речовини. Однак ми побачимо зниження тиску після проходження отвору діафрагми, різниця тиску ($p_a - p_c$) на перерізі А-А (p_1) із тиском на перерізі С-С (p_2) зазвичай складає 40-90% від перепаду на перерізі В-В ($p_a - p_b$).

Через вплив похибок ряду величин, що входять у формулу для витрати, приведена похибка вимірювання цим методом складає не менше 2%.

Як описувалось вище, між перепадом тиску та витратою існує квадратична залежність. Це є суттєвим недоліком, тому що зменшується діапазон вимірювань витратоміра. При витраті $Q = 25\%$ від Q_{max} перепад буде дорівнювати близько 6% від максимальної границі витрати Q_{max} . Точні вимірювання будуть реалізовані приблизно в діапазоні 30-100% від максимального значення (Q_{max}) [13].

Даний метод має ряд переваг, завдяки чому він отримав широке використання. Прилади, які базуються на методі змінного перепаду тиску можуть використовуватись у різних середовищах, діапазон вимірювання завдяки зміні конструкції приладу має дуже широкий діапазон, вторинний прилад не залежить від вимірюваного середовища та значень витрати, температура та забруднення чутливого елемента не буде давати великі похибки,

у зіставленні з вище розглянутими методами вимірювання.

1.3 Аналіз засобів вимірювання витрати коксового газу

Для того, щоб розробити інформаційно-вимірювальну систему визначення витрати коксового газу необхідно враховувати три параметри, що впливають на результати, а саме: абсолютний тиск, температуру та витрату газу.

У попередньому підрозділі було проведено порівняльний аналіз методів вимірювання витрати газу, у результаті якого було обрано метод змінного перепаду тиску, як самий рентабельний, спроможний виконати поставлене завдання з мінімальною похибкою та високою надійністю всіх елементів, що є елементами вимірювальної системи.

Датчики, принцип роботи яких засновано на перепаді тиску, мають безліч моделей з автоматизованою системою вимірювання, які забезпечують безперервне перетворення вимірювальних величин.

Вимірювальна система, що розробляється у рамках даної магістерської роботи, повинна мати аналогово-цифровий перетворювач та можливість підключення до персонального комп'ютера або системи обробки та обчислення інформації щодо параметрів технологічних процесів. У процесі безперервного вимірювання тиску пристрій повинен давати сигнал постійного струму величиною від 4 до 20 мА. Ця вимога зумовлена тим, що при мінімальних значеннях або значеннях близьких до нуля, пристрій видає сигнал близько 4 мА, що підтверджує його робочий стан.

Проведемо порівняльний аналіз трьох моделей датчиків, які відповідають висунутим вимогам: Rosemount 3051 (Emerson), ПД200-ДД (ОВЕН), Метран-150 (Emerson).

Як можна побачити з таблиці 1.2, одним з найбільш раціональним варіантом вирішення задачі контролю витрати газу по сукупності техніко-економічних показників є використання в указаних цілях – перетворювача

різниці тиску Метран-150 CD.

Таблиця 1.2 - Характеристики електронних датчиків та перетворювачів перепаду тиску різних виробників [7, 8].

Параметри	Найменування		
	Rosemount 3051	ПД200-ДД	Метран-150 CD
Верхня межа вимірювання, кПа	62,0	160,0	63,0
Похибка, %	$\pm 0,14$	$\pm 0,15$	$\pm 0,15$
Робочий тиск, МПа	До 25,0	До 13,0	До 10,0
Вибухозахисне виконання	Так	так	так
Вихідний сигнал, мА	4-20 з HART	4-20	4-20 з HART
Температура вимірюваного середовища, °C	-40...+121	-40...+110	-20...+80
Вартість	Середня	Висока	Середня

Датчики тиску моделі Метран-150 CD призначені для вимірювання різниці тисків. Датчики забезпечують безперервне перетворення тиску в аналоговий вихідний сигнал постійного струму та/або в цифровий вихідний сигнал у стандарті протоколу HART.

Вони можуть бути використані для вимірювання тиску робочих середовищ: рідини, пару або газу.

Метран-150 призначений для роботи у системах автоматичного регулювання, контролю та управління технологічними процесами у різноманітних галузях промисловості, у тому числі й у коксохімічній промисловості.

Датчики даної моделі мають різні конфігурації та варіанти. Матеріали

конструкцій можна обрати, що підходять для різних умов використання перетворювача.

Вибухозахищені датчики призначені для встановлення та роботи у вибухонебезпечних зонах, приміщеннях та установках згідно з вимогами нормативних документів, що регламентують використання електроустаткування у вибухонебезпечних умовах.

Усі модифікації датчика Метран-150 мають єдину конструкцію електронного перетворювача з розширеними функціями з діагностики. У датчику виконуються вимірювання та обробка 64 параметрів. Зовнішній вигляд датчика із фланцевим типом підключення зображено на рисунку 1.4.

Датчики с HART-протоколом можуть передавати інформацію про вимірювану величину у цифровому вигляді по двоканальній лінії зв'язку разом із постійним струмом 4-20 мА. Даний цифровий сигнал може приймати та оброблювати будь-яким пристроєм, що підтримує протокол HART.



Рисунок 1.4 – Датчик тиску моделі Метран-150 CD

Цифровий вихід використовується для зв'язку датчика з портативним ручним HART-комунікатором або з персональним комп'ютером через стандартний послідовний порт та додатковий HART-модем, в цей час виконується обробка даних вимірюваного тиску, налаштування датчика, вибір його основних параметрів, вибір діапазонів вимірювання, корегування «нуля» та інші операції. HART-протокол допускає у системі наявність одразу двох керуючих пристроїв: системі керування та ручного комунікатора. Ці пристрої мають різні адреси, тому Метран-150 може виконувати команди, що надходять з кожного з них.

Таким чином, по двоканальному зв'язку передається два типу сигналів: аналоговий сигнал 4-20 мА та цифровий сигнал у формі синусоїди на базі протоколу HART, який накладається на аналоговий вихідний сигнал датчика, не впливаючи на нього.

1.4 Аналіз методів вимірювального контролю температури коксового газу

Визначення фактичної температури газу із розумним ступенем точності є основним при виборі та розробці механізму очищення та визначенні інших важливих параметрів.

Температура є одним з найважливіших параметрів технологічних процесів та операцій. Температурою називають величину, яка характеризує тепловий стан тіла. Ця величина має деякі принципові особливості, які зумовлюють необхідність існування великої кількості методів та технічних засобів для її визначення.

Сьогодні є два основних способи для вимірювання температур: контактний та безконтактний. У контактних способах відбувається безпосередній контакт досліджуваного об'єкта (середовища) з вимірювальним перетворювачем. Принцип вимірювання реалізовано на приведені до стану теплової рівноваги перетворювача і об'єкта. Цей спосіб має ряд недоліків. Температурне поле об'єкта може спотворюватися при введенні в нього

термоперетворювача. Температура перетворювача завжди відрізняється від дійсної температури об'єкта. А точність вимірювання та вартість приладу вимірювання температури обмежена властивостями матеріалів, з яких виготовлені температурні датчики.

У газовому середовищі можна визначати температуру приладами з контактним і безконтактним способами вимірювання. До контактних, наприклад, можна віднести такі засоби вимірювальної техніки як: термометри розширення, біметалічні термометри, термopара та інші.

Рідинним термометром називають прилад для визначення значення температури, принцип роботи якого засновано на явищі теплового розширення рідини.

Явище теплового розширення рідини описується рівнянням [17]:

$$\Delta V = \beta V \Delta T, \quad (1.2)$$

де β – коефіцієнт об'ємного розширення рідини, $1/K$;

ΔV – зміна об'єму, m^3 ;

ΔT – зміна температури, K .

Рідина в термометрі підіймається завдяки тому, що коефіцієнти об'ємного розширення (β) рідини та скла значно відрізняються: $1,81 \cdot 10^{-4} (^\circ C)^{-1}$ у ртуті; $10,6 \cdot 10^{-4} (^\circ C)^{-1}$ у спирту; $9,16 \cdot 10^{-4} (^\circ C)^{-1}$ у толуолу; $0,25 \cdot 10^{-4} (^\circ C)^{-1}$ у скла.

Для вимірювання температури потрібно занурити в газ резервуар рідинного термометра. Рідина, що знаходиться у герметичній колбі, підніметься або опуститься, тим самим покаже за допомогою проградуєваної шкали поточну температуру газу. Якщо газ повинен бути у герметичному середовищі, можна приварити до нього трубку та заповнити її теплопровідною речовиною, наприклад водою. Занурити резервуар термометру у цю трубку та записати свідчення.

Розглянутий метод має невелику вартість та простий у використанні, що є

безперечними перевагами, але має декілька недоліків: велику тривалість вимірювання, неможливість автоматизації процесу вимірювання та велику кількість факторів у умовах робочого процесу, що можуть ззовні впливають на збільшення похибки.

Термопари набули більш велике поширення у промисловості, тому що можуть бути виконані з різноманітних матеріалів та працювати навіть в умовах екстремальних температур.

Термопари мідь-константан може використовуватися у межах від мінус 200 до 400°C. А деякі види металевих термопар, наприклад виготовлені з хромель-алюмінія, мають верхню межу вимірювання 1200°C. Термопары з благородних металів сьогодні можуть використовуватися у режимі безперервного вимірювання температури газу до температури 2400 - 2800 °C. Працювати у таких екстремальних умовах може, наприклад, термопара реній-вольфрам.

Характеристику деяких термопар виготовлених із різних матеріалів наведено у таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристика термопар

Назва та матеріал виготовлення	Межі вимірювання, °C
Мідь – константан	-200 – 400 °C
Залізо - константан	0 – 800 °C
Хромель - алюмель	0 – 1100 °C
Платина – Pt 8,7% - 13% Ph	0 – 1600 °C
Pt 20% - Ph – Pt 60% - 40% Rh	0 – 1800 °C
Іридій – Ir 40% - 60% Rh	1400 – 2000 °C
Іридій – вольфрам	1000 – 2200 °C
Вольфрам – W – Re	До 2500 °C

Термопара є датчиком температури, який складається з двох металевих провідників (або напівпровідників) з двох різних металів (Метал А та Метал В)

з'єднаних між собою. При нагріванні у контурі виникає термо-ЕРС, а на зовнішніх нез'єднаних між собою кінцях - різниця потенціалів. Якщо зімкнути таку пару у кільце, то отримана електрорушійна сила (ЕРС) буде дорівнювати нулю, а якщо з одного боку залишити розімкнутою, отримаємо ЕРС величиною від десятої частини до одиниць вольт у залежності від матеріалу виготовлення провідників (напівпровідників).

Явище, яке лежить у основі принципу роботи всіх термопар називається ефект Зеєбека, на честь його першовідкривача - Томаса Зеєбека.

Принцип роботи термопар для вимірювання температури зображено на рисунку 1.5.

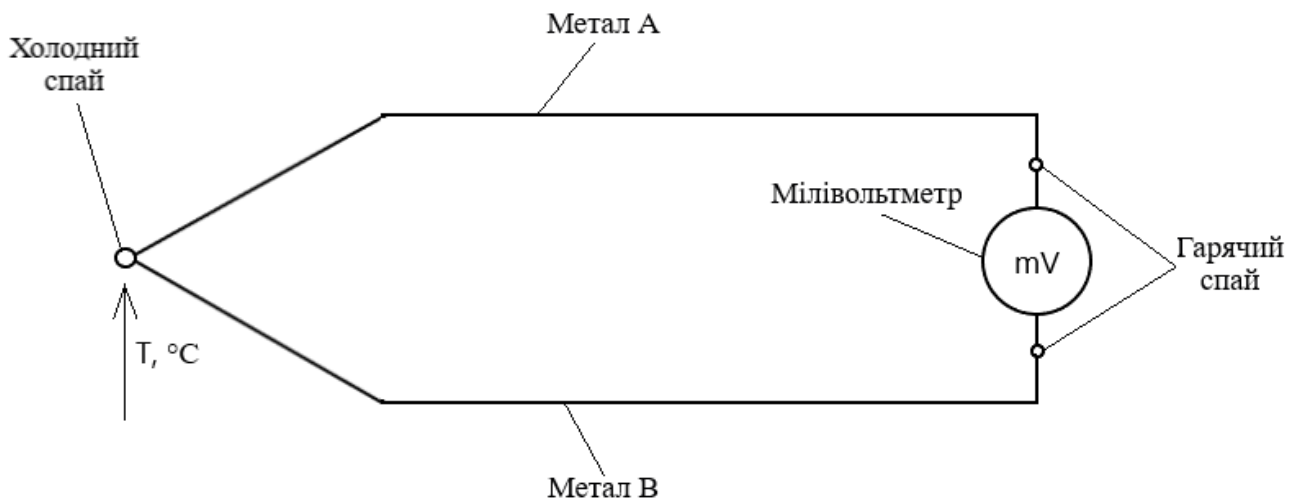


Рисунок 1.5 – Принципова схема вимірювання температури термопарою

Для вимірювання термо – ЕРС, що дає термопара, у коло включають вимірювальний пристрій на вільні кінці термопар або у розрив одного з термоелектродів. Цей пристрій можна вважати третім провідником у колі.

До переваг термопар можна віднести простоту виготовлення, малу теплоємність та короткий час на встановлення рівноваги. Основним недоліком є невелике значення термо-ЕРС, що може давати похибку при вимірюванні низьких температур. Але у наших умовах температура коксового газу після очищення у нормальному режимі роботи може змінюватися від 15 до 45 °C.

Термопару також можна описати як прилад, що має стабільне градування та високу швидкість вимірювання.

1.5 Мета за задачі дослідження кваліфікаційної роботи

Основною метою даної кваліфікаційної роботи полягає у розробці та дослідженні інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очистки, що дозволить покращити показники точності вимірювання та розробити принципову схему компенсації похибок, що спричинені дестабілізуючими факторами.

Для досягнення поставленої мети необхідно розглянути та вирішити такі задачі, як:

- провести аналіз сучасних методів та засобів визначення витрати коксового газу;
- розглянути та виявити фактори, що спричиняють похибки датчиків визначення витрати газових середовищ;
- розробити математичну модель перетворювального каналу витрати з урахуванням дестабілізуючих факторів, провести аналіз впливу цих факторів на точність вимірювання витрати;
- розробити структурну схему первинного перетворювача та його чутливого елемента;
- обрати та дослідити методи компенсації впливу дестабілізуючих факторів на процес вимірювання;
- обґрунтувати складові та обчислити інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очистки.

Висновки

У цьому розділі було проведено:

- порівняльний аналіз та ознайомлення з методами та засобами

вимірювального контролю газових середовищ;

- обрано метод вимірювального контролю витрати коксового газу;
- розглянуто методи оцінки величини температури, тиску, витрати та зміни перепаду тисків, які перетворюються у числове значення витрати коксового газу;
- виконано постановку мети та задачі дослідження кваліфікаційної роботи.

У інформаційно-вимірювальній системі, що розробляється та досліджується у даній кваліфікаційній роботі, має бути контроль температури за допомогою окремого датчика, у дослідженні використовується термопара як контрольний прилад, контроль величини абсолютного тиску та значення різниці перепаду тисків у трубопроводі з вимірювальною діафрагмою.

2 РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ВИМІРЮВАЛЬНОГО КАНАЛУ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ

2.1 Структурна схема Метран 150 вимірювання витрати

Вимірювальна мембрана в є одночасно чутливим елементом датчика і центральним електродом диференціального електричного конденсатора, тому при її прогині і відхиленні від нейтрального вихідного положення під впливом перепаду тиску ($\Delta P = P_1 - P_2$) порушується баланс електричних ємностей суміжних камер вимірювального осередку. Величина цього розбалансу, пропорційного ΔP , і є вихідним вимірювальним сигналом.

Цей сигнал за допомогою мостової або резонансної вимірювальних схем, що живляться змінним струмом від спеціального блоку живлення, нормуючого та аналого-цифрового перетворювачів, наводиться до стандартного цифрового формату і надходить у плату електроніки електронного модуля на наступну обробку. Одночасно з цим сигналом до мікроконтролеру електронного модуля надходить вимірювальна інформація від термоперетворювача ТПС, який відстежує температуру вимірювального блоку, де знаходиться сенсор.

За результатами обробки сигналів, що надходять, мікроконтролер здійснює необхідне коригування статичної характеристики датчика. Таким чином дуже істотно покращує його метрологічні показники.

Висока точність вимірювання датчиком з ємнісним осередком забезпечується за рахунок удосконалення вимірювальних схем та особливостей виготовлення електродів конденсатора за технологіями, прийнятими в оптичній промисловості. Головним недоліком ємнісного методу перетворення є дуже висока чутливість до температури.

На рисунку 2.1 показана структурна схема вимірювання датчиком Метран – 150, де U_p - напруга з виходу каналу вимірювання тиску; U_t – напруга з виходу каналу вимірювання температури; $U_{оп}$ – опорна напруга АЦП; $U_{тп}$ – напруга живлення тензоперетворювача [10]

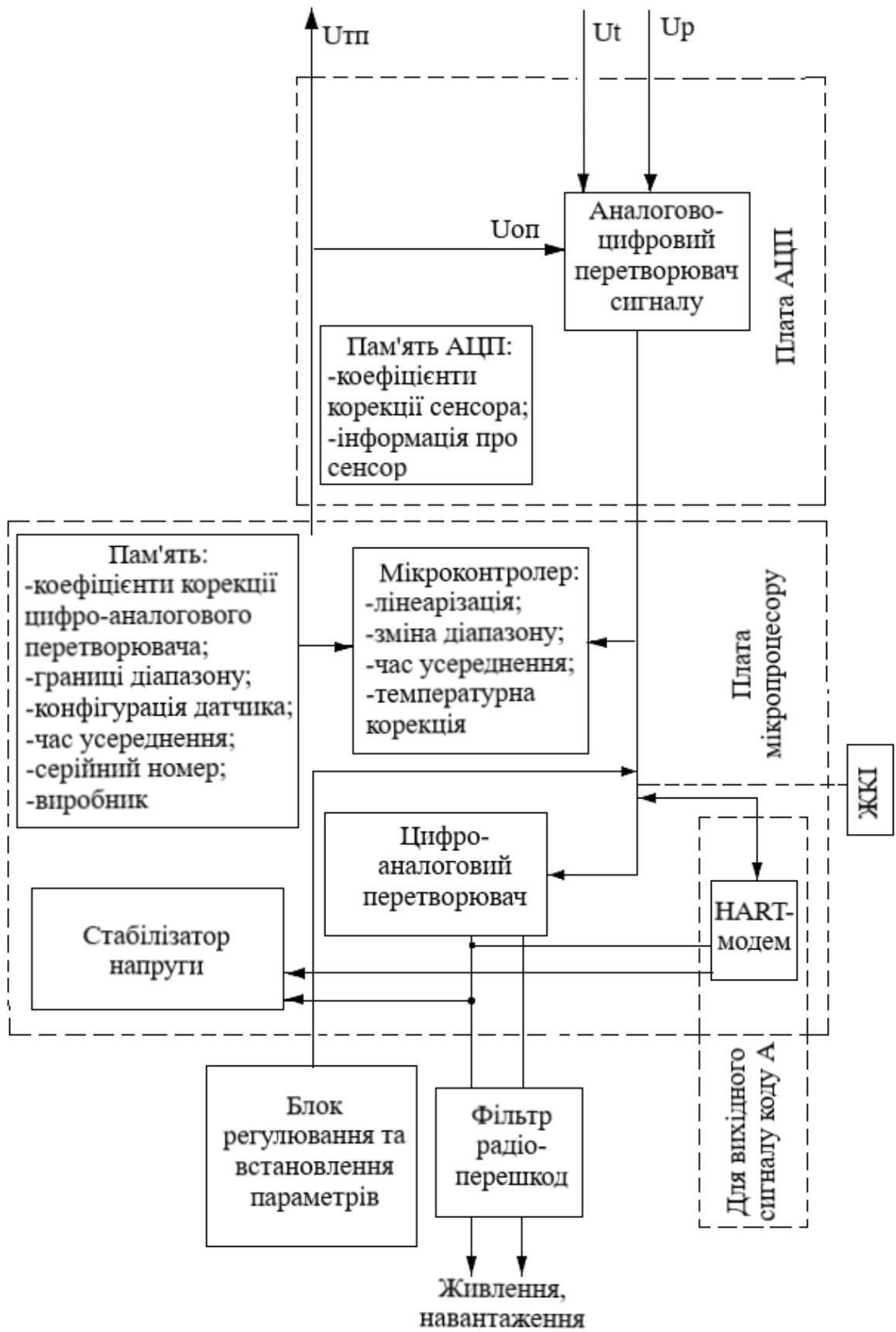


Рисунок 2.1 – Структурна схема електронного перетворювача датчика Метран –

Дестабілізуючими факторами, що мають вплив на результат вимірювання витрати коксового газу за допомогою датчика Метран-150, є температура вимірюваного середовища та надлишковий тиск у газопроводі.

Побудова функції, що виражає залежність величини тиску від цифрових значень сенсору тиску (коду тиску) та датчика температури (коду температури), є однією з основ процесу роботи цифрового датчика витрати.

2.2 Побудова математичної моделі перепаду тиску

З метою дослідження впливу динамічних характеристик вимірювальних перетворювачів тиску і перепаду тиску на вимірюване значення, у даному підрозділі реалізовано розробку математичної моделі вимірювального каналу.

Для побудови математичної моделі вимірювального каналу встановлено такі умови:

- 1) температура коксового газу постійна по довжині вимірювального каналу, а також в межах часу дослідження процесу $T = \text{const}$;
- 2) об'єм камери перетворювача тиску постійний $V_k = \text{const}$;
- 3) молярна маса газу (його склад) постійна $M = \text{const}$ в межах часу дослідження процесу.

Масова витрата газоподібного середовища через з'єднувальні трубки до камери вимірювального перетворювача перепаду тиску визначається залежністю [13]:

$$q_m = \frac{\Delta m_k}{\Delta t}, \quad (2.1)$$

де q_m - масова витрата газоподібного середовища через з'єднувальні трубки до камери вимірювального перетворювача перепаду тиску, кг/с;

Δm_k - зміна маси газоподібного середовища в камері вимірювального перетворювача перепаду тиску за час Δt , кг;

Δt - час, за який змінюється маса газу у камері вимірювального перетворювача перепаду тиску, с.

З варіанту рівняння стану Менделєєва-Клапейрона [13] маса коксового газу в камері вимірювального перетворювача перепаду тиску дорівнює:

$$m_K = \frac{P_K \cdot V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}, \quad (2.2)$$

де m_K - маса газоподібного середовища в камері вимірювального перетворювача перепаду тиску, кг;

V_K - геометричний об'єм камери вимірювального перетворювача перепаду тиску, м³;

P_K - тиск у камері вимірювального перетворювача перепаду тиску, Па;

M - молярна маса газоподібного середовища, кг/кмоль;

z - фактор стисливості, який може бути визначений за одним із методів, розглянутих у ГОСТ 30319.2-96 [12];

R - універсальна газова стала, $R = 8314,51$ Дж/(кмоль·К);

T - абсолютна температура газоподібного середовища, К, формула 2.3:

$$T = 273.15 + t, \quad (2.3)$$

де t - температура газоподібного середовища, °С.

До складу формули (2.2) входить фактор стисливості z , який є функцією тиску газу. Однак зміною величини стисливості на протязі заданого малого приросту часу Δt можна знехтувати, оскільки приріст тиску на протязі Δt також є незначним.

Враховуючи, що $T = const$, $M = const$, $V_K = const$, формулу (2.2) можна записати у вигляді:

$$\Delta m_K = \Delta P_K \cdot A, \quad (2.4)$$

де ΔP_K – зміна тиску в камері вимірювального перетворювача перепаду тиску за елементарно малий проміжок часу Δt , Па;

A – коефіцієнт, який обчислюється за формулою:

$$A = \frac{V_K \cdot M}{z \cdot R \cdot T}, \quad (2.5)$$

Тому що масова витрата може бути представлена, як добуток об'ємної витрати на густину в робочих умовах на основі рівняння (2.1) отримуємо:

$$\frac{\Delta P_K \cdot A}{\Delta t} = q_v \cdot \rho, \quad (2.6)$$

Відповідно до другого закону Ньютона рух газу через з'єднувальну трубку можна описати наступним рівнянням:

$$m \cdot a = F_{\text{прикл}} - F_{\text{протиод}}, \quad (2.7)$$

де m – маса газоподібного середовища у з'єднувальній трубці, кг;

a – прискорення газоподібного середовища в з'єднувальній трубці, м/с²;

$F_{\text{прикл}}$ – сила, яка прикладена до маси середовища у з'єднувальній трубці та приводить її в рух, Н;

$F_{\text{протиод}}$ – сила, яка протидіє руху потоку середовища в з'єднувальній трубці, Н.

Прикладену силу $F_{\text{прикл}}$ може бути визначена за формулою:

$$F_{\text{прикл}} = (P_{\text{ВХ}} - P_{\text{ФЛ}}) \cdot S_{\text{ЗТ}}, \quad (2.8)$$

де $P_{\text{ВХ}}$ – тиск на вході в з'єднувальній трубці, Па;

$P_{\text{ФЛ}}$ – тиск на вході у фланець, Па;

S_{3T} – площа поперечного перерізу з'єднувальної трубки, м^2 .

Площу поперечного перерізу трубки можна розрахувати через формулу визначення площі кола:

$$S_{3T} = \frac{\pi \cdot D_{3T}^2}{4}, \quad (2.9)$$

де D_{3T} - внутрішній діаметр з'єднувальної трубки, м.

У нашому вимірювальному каналі фланець розглядаємо як циліндричну трубу із довжиною $L_{\PhiЛ}$. Виходячи з цього може бути визначений тиск на вході у фланець $P_{\PhiЛ}$ через рівняння Дарсі-Вейсбаха [14], Па:

$$P_{\PhiЛ} = \lambda_{\PhiЛ} \cdot \frac{L_{\PhiЛ}}{D_{\PhiЛ}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho + P_K, \quad (2.10)$$

де $L_{\PhiЛ}$ – довжина фланцю, м;

$D_{\PhiЛ}$ – діаметр отвору фланцю, м;

v - швидкість потоку газу у лінії, м/с;

$\lambda_{\PhiЛ}$ – коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині фланцю, визначається в залежності від значення числа Рейнольдса;

P_K – тиск у камері вимірювального перетворювача перепаду тиску, Па.

Протидіючу силу потоку газу $F_{протид}$ також можна визначити з рівняння Дарсі-Вейсбаха:

$$F_{протид} = \Delta P \cdot S_{\PhiЛ} = S_{\PhiЛ} \cdot \left(\lambda_{\PhiЛ} \cdot \frac{L_{\PhiЛ}}{D_{\PhiЛ}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho \right), \quad (2.11)$$

де L_{3T} - довжина з'єднувальної трубки, м;

λ_{3T} - коефіцієнт гідравлічного тертя по довжині з'єднувальної трубки, визначається в залежності від величини числа Рейнольдса (Re).

Формула Дарсі-Вейсбаха [18] може описувати турбулентні та ламінарні потоки, оскільки форма залежності різниці тисків від швидкості потоку у цьому рівнянні змінюється залежно від виразу, застосованого для визначення коефіцієнта гідравлічного тертя λ . Якщо застосувати вираз визначення λ для ламінарного режиму руху:

$$\lambda = \frac{64}{Re}, \quad (2.12)$$

де Re – число Рейнольдса.

Формула Дарсі-Вейсбаха приймає вигляд рівняння Пуазейля [15] для ламінарного режиму. Підставивши вирази (2.8), (2.10), (2.11) у рівняння (2.7), із врахуванням того, що $\alpha = dv/dt$, отримаємо диференціальне рівняння швидкості руху коксового газу у лінії:

$$m \cdot \frac{dv}{dt} = (P_{BX} - \lambda_{\phi\lambda} \cdot \frac{L_{\phi\lambda}}{D_{\phi\lambda}} \cdot \frac{v^2}{2} \cdot \rho - P_K) \cdot S_{3T} - (\lambda_{3T} \cdot \frac{L_{3T}}{D_{3T}} \cdot \rho) \cdot S_{3T}. \quad (2.13)$$

Приблизну масу коксового газу можна визначити з формули:

$$m \approx \rho \cdot L_{3T} \cdot S_{3T}, \quad (2.14)$$

а об'ємна витрата зв'язана зі швидкістю залежністю:

$$q_v = S_{3T} \cdot v, \quad (2.15)$$

У результаті отримуємо диференціальне рівняння зміни витрати газу у системі вимірювання перетворювача перепаду тиску:

$$k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K, \quad (2.16)$$

де k_1 , k_2 коефіцієнти, які визначаються за формулами (2.17) та (2.18) відповідно:

$$k_1 = \frac{\rho \cdot L_{3T}}{S_{3T}}, \quad (2.17)$$

$$k_2 = \frac{\frac{\rho}{2} \cdot (\lambda_{\Phi L} \cdot \frac{L_{\Phi L}}{D_{\Phi L}} + \lambda_{3T} \cdot \frac{L_{3T}}{D_{3T}})}{S_{3T}^2}. \quad (2.18)$$

Із виразів (2.17) та (2.18) можна побачити, що коефіцієнти диференціального рівняння (2.16) змінні. Коефіцієнт k_1 залежить від густини газу, яка є функцією тиску у камері перетворювача перепаду тиску P_K , k_2 в свою чергу залежить від коефіцієнта гідравлічного опору з'єднувальної трубки λ_{3T} та фланця $\lambda_{\Phi L}$.

В умовах перепаду тиску потоку, коли витрата газу може змінюватися у широкому діапазоні, коефіцієнт гідравлічного опору λ залежить від числа Рейнольдса (Re), а отже й від витрати q_v , $\lambda = f(Re) = f(q_v)$.

Математична модель перетворювача перепаду тиску матиме вигляд системи диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} A \frac{dP_K}{dt} = q_v \cdot \rho; \\ k_1 \cdot \frac{dq_v}{dt} + k_2 \cdot q_v^2 = P_{BX} - P_K, \end{cases} \quad (2.19)$$

при початкових умовах P_{K0} , q_{v0} , де коефіцієнти A , k_1 , k_2 визначають, відповідно, за формулами (2.5), (2.17) та (2.18). Коефіцієнти k_1 , k_2 є змінними та залежними

від диференційованих параметрів, тому систему рівнянь (2.19) доцільно розв'язувати за допомогою числових методів.

2.3 Аналіз похибки обчислення значень різниці тиску при мікропроцесорній обробці сигналів

Побудуємо структурну схему формування сумарної похибки вимірювання датчика перепаду тиску (див. рис. 2.2).

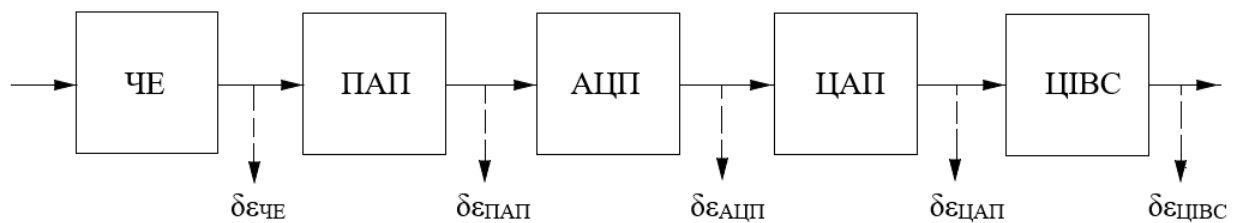


Рисунок 2.2 – Схема формування сумарної похибки датчика перепаду тиску

На схемі датчик представлено у вигляді багатомодульної системи, що має у собі чутливий елемент (ЧЕ), прецизійний аналоговий перетворювач (ПАП), аналогово-цифровий перетворювач (АЦП), цифро-аналоговий перетворювач (ЦАП), цифровий інтерфейс вихідного сигналу (ЦІВС). Похибка на виході кожного елемента складається з суми похибки на вході до модуля та власної похибки. Величину трансформування похибки можна оцінити за допомогою коефіцієнта трансформації ($K_{\text{модуля}}$). Запишемо у вигляді рівняння похибки кожного модуля та сумарну похибку датчика тиску (ДТ):

$$\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}' = \delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}; \quad (2.20)$$

$$\delta\epsilon_{\text{ПАП}}' = \delta\epsilon_{\text{ЧЕ}} K_{\text{ПАП}} + \delta\epsilon_{\text{ПАП}}; \quad (2.21)$$

$$\delta\epsilon_{\text{АЦП}}' = (\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}} K_{\text{ПАП}} + \delta\epsilon_{\text{ПАП}}) K_{\text{АЦП}} + \delta\epsilon_{\text{АЦП}}; \quad (2.22)$$

$$\delta\epsilon_{\text{ЦАП}}' = ((\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}K_{\text{ПАП}} + \delta\epsilon_{\text{ПАП}})K_{\text{АЦП}} + \delta\epsilon_{\text{АЦП}})K_{\text{ЦАП}} + \delta\epsilon_{\text{ЦАП}}; \quad (2.23)$$

$$\delta\epsilon_{\text{ДТ}} = \delta\epsilon_{\text{ЦАП}}' = (((\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}K_{\text{ПАП}} + \delta\epsilon_{\text{ПАП}})K_{\text{АЦП}} + \delta\epsilon_{\text{АЦП}})K_{\text{ЦАП}} + \delta\epsilon_{\text{ЦАП}})K_{\text{ЦІВС}} + \delta\epsilon_{\text{ЦІВС}} \quad (2.24)$$

Основна похибка інтелектуальних датчиків перепаду тиску лежить у діапазоні від 0.05 до 1%, а температурна похибка чутливого елемента може досягати до 15% без температурної корекції.

У результаті застосування температурної компенсації у сучасних інтелектуальних датчиках перепаду тиску можна зменшити величину температурної похибки до 0.09% на кожні 10°C зміни температури [11].

При коректному проектуванні вимірювального модуля та застосуванні конструктивних, схемних або методів, що використовують математичне обчислення, похибку вимірювання за температури у діапазоні від мінус 55 до 80°C (межі вимірювання згідно з керівництвом з експлуатації) можна обчислити за виразом (формула 2.25):

$$\delta\epsilon_{\text{ДТ}} = (((\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}K_{\text{ПАП}} + \delta\epsilon_{\text{ПАП}})K_{\text{АЦП}} + \delta\epsilon_{\text{АЦП}})K_{\text{ЦАП}} + \delta\epsilon_{\text{ЦАП}})K_{\text{ЦІВС}} + \delta\epsilon_{\text{ЦІВС}} \quad (2.25)$$

де $\delta\epsilon_{\text{ДТ}}$ – сумарна похибка датчику перепаду тиску;

$\delta\epsilon_{\text{ЧЕ}}$, $\delta\epsilon_{\text{ПАП}}$, $\delta\epsilon_{\text{АЦП}}$, $\delta\epsilon_{\text{ЦАП}}$, $\delta\epsilon_{\text{ЦІВС}}$ – значення похибок кожного окремого модуля датчику перепаду тиску;

$K_{\text{ПАП}}$, $K_{\text{АЦП}}$, $K_{\text{ЦАП}}$, $K_{\text{ЦІВС}}$ – коефіцієнти трансформації кожного окремого модуля датчику перепаду тиску.

Згідно з формулою 2.25 оцінимо значення похибки вимірювання датчиком перепаду тиску:

$$\delta\epsilon_{\text{ОСН}} + 0.02 \cdot \delta\epsilon_{\text{ТЕМП}} + \delta\epsilon_{\text{ЦАП}} \leq \delta\epsilon_{\text{ОСН}} + 0.5 \quad (2.26)$$

З виразу (формула 2.26) можна прийти до висновку, що температурна

складова похибки значно перевищує основну похибку датчика.

Спираючись на цю інформацію необхідно надалі розвивати методи компенсації температурної похибки.

2.4 Дослідження похибки визначення усередненого значення витрати газу

Для визначення величини витрати методом змінного перепаду тиску існує велика кількість приладів та обчислювачів, які знаходять середнє значення перепаду тиску на звужувальному пристрої, температури та тиску. За цими значеннями пристрої обчислюють значення витрати.

При використанні методу змінного перепаду тиску для визначення величини витрати виникає ряд методичних похибок. Згідно з [13] об'ємна витрата q_v сухого газу в нормальному стані розраховується по формулі:

$$q_v = 0,2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta P \cdot P}{\rho_c \cdot T \cdot K}}, \quad (2.27)$$

де α – коефіцієнт витрати звужуючого пристрою;

ε – поправковий множник на розширення газу на звужуючому пристрої;

d – діаметр отвору звужуючого пристрою;

ΔP – перепад тиску на звужуючому пристрої;

P – абсолютний тиск газу;

T – температура газу;

ρ_c – густина газу при стандартних умовах;

K – коефіцієнт стиснення газу.

Середнє значення об'ємної витрати $\overline{q_v}$ за проміжок часу розраховується у відповідності з формулою (2.27). В залежності від конструкції та апаратної реалізації витратоміра за середніми значеннями перепаду тиску $\overline{\Delta P}$,

температури $\bar{T}$ або за середнім значенням кореня квадратного із перепаду тиску $\sqrt{\Delta P}$, тиску P і температури T . Якщо є необхідність враховують у виразу поправкові коефіцієнти на зміну ε , d , ρ_c і K .

Припустимо, що процеси зміни в часі величин ΔP , P і T та відповідно і q_v є стаціонарними ергодичними та випадковими процесами, то згідно з ергодичною гіпотезою розрахунок $\overline{q_v}$ через значення зміни тиску ΔP , тиску P і температури T відповідає рівнянню:

$$E(q_v) = f[E(\Delta P), E(P), E(T)], \quad (2.28)$$

де $E(\Delta P)$, $E(P)$ і $E(T)$ - математичне сподівання вимірювальних параметрів перепаду тиску, тиску та температури середовища відповідно;

$E(q_v)$ - математичне сподівання витрати.

У даному випадку функція $q_v = f(\Delta P, P, T)$, яка виходить із (2.27), є нелінійною, тому дійсне значення математичного сподівання витрати $E_d(q_v)$ розраховується за допомогою рівняння:

$$E_d(q_v) = f[E(\Delta P), E(P), E(T)] + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial (\Delta P)^2} \sigma(\Delta P)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial P^2} \sigma(P)^2 + \frac{1}{2} \cdot \frac{\partial^2 f}{\partial T^2} \sigma(T)^2, \quad (2.29)$$

де $\frac{\partial^2 f}{\partial (\Delta P)^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial (P)^2}, \frac{\partial^2 f}{\partial (T)^2}$ - квадратні часткові похідні від функції (2.27) по

перепаду тиску, тиску та температурі відповідно;

$\sigma(\Delta P)^2, \sigma(P)^2, \sigma(T)^2$ - дисперсії параметрів перепаду тиску, тиску та температури відповідно.

Значення вказаних похідних визначаються по точках $E(\Delta P)$, $E(P)$ і $E(T)$. Коефіцієнти ε , d , ρ_c і K приймемо за постійну величину (*const*).

З урахуванням уточнень маємо:

$$E_D(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta P) \cdot E(P)}{E(T)}} - \frac{k \sqrt{E(P)}}{8 \sqrt{E(P)}} \cdot \frac{\sigma(\Delta P)^2}{\sqrt{[E(\Delta P)]^3}} + \frac{3k \sqrt{E(\Delta P) \cdot E(P)}}{8 \sqrt{[E(T)]^5}} \cdot \sigma(T)^2, \quad (2.30)$$

де k – коефіцієнт, який визначається з формули:

$$k = \frac{0.2109 \cdot \alpha \cdot \varepsilon \cdot d^2}{\sqrt{\rho_c \cdot K}}. \quad (2.31)$$

Виходячи з рівняння (2.30), якщо параметри потоку ΔP , P і T у процесі вимірювання витрати не змінюються, то дисперсії цих параметрів $\sigma(\Delta P)^2, \sigma(P)^2, \sigma(T)^2$ близьаться до нуля, то рівняння (2.30) матиме вигляд:

$$E_D(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta P) \cdot E(P)}{E(T)}}. \quad (2.32)$$

При нестационарності потоку середовища, параметри ΔP , P і T зазвичай змінюються, тому при застосуванні формули (2.32) для визначення середнього значення витрати замість рівняння (2.19) приводить до появи відносної похибки $\delta \bar{q}_v$ значення якої можна визначити за допомогою виразу:

$$\delta \bar{q}_v = \frac{E(q_v) - E_D(q_v)}{E_D(q_v)} \cdot 100\%. \quad (2.33)$$

Якщо виразити дисперсії $\sigma(\Delta P)^2, \sigma(P)^2, \sigma(T)^2$ у відносних одиницях, вираз (2.11) спрощується до вигляду:

$$E_d(q_v) = k \sqrt{\frac{E(\Delta P) \cdot E(P)}{E(T)}} \left(1 - \frac{\sigma(\Delta P)^2}{8} - \frac{\sigma(P)^2}{8} + \frac{3 \cdot \sigma(T)^2}{8}\right), \quad (2.34)$$

де $\sigma(\Delta P)^2 = \frac{\sigma(\Delta P)^2}{[E(\Delta P)]^2}$ – відносна дисперсія перепаду тиску на звужувальному пристрої;

$$\sigma(P)^2 = \frac{\sigma(P)^2}{[E(P)]^2} - \text{відносна дисперсія тиску};$$

$$\sigma(T)^2 = \frac{\sigma(T)^2}{[E(T)]^2} - \text{відносна дисперсія температури}.$$

Розглянувши рівняння (2.34), залежність для розрахунку похибки прийме вигляд:

$$\overline{\delta q_v} = \frac{100}{8 \cdot [\sigma(\Delta P)^2 + \sigma(P)^2 - 3 \cdot \sigma(T)^2]^{-1} - 1}. \quad (2.35)$$

З розрахунків можна зробити висновок, що зміна перепаду тиску ΔP та тиску P зменшують дійсне значення витрати, а коливання температури T навпаки збільшує значення.

Значення відносних дисперсій параметрів потоку $\sigma(\Delta p)^2$, $\sigma(P)^2$ та $\sigma(T)^2$ можуть знаходитися в межах від 0 до 1, однак в результаті проведеного статичного дослідження отримано, що для витратомірів газу значення вказаних дисперсій не перевищують 0,2. Незважаючи на це похибка $\overline{\delta q_v}$ може приймати великі значення.

Висновки

У даному розділі виявлено подальший напрямок удосконалення метрологічних характеристик та функціональних недоліків, які можна

скорегувати. Описано структурну схему датчика вимірювання зміни перепаду тисків Метран – 150 CD.

Реалізовано розробку математичної моделі вимірювального каналу із встановленням умов процесу. Вивели рівняння визначення масової витрати газоподібного середовища через з'єднувальні трубки до камери вимірювального перетворювача перепаду тиску.

Проведено аналіз похибки обчислення значень різниці тиску при мікропроцесорній обробці сигналів. Сумарна похибка вимірювання датчику менша, ніж похибка спричинена впливом температури, саме тому температурна

Розглянуто процес формування відносної похибки вимірювання витрати та виявлено фактори, що призводять до дестабілізації точності вимірювання: до збільшення витрати - температура, та зменшення витрати - абсолютний тиск, дійсного середнього значення витрати за проміжок часу.

Для стаціонарного та нестаціонарного режимів проходження середовища за значеннями математичного сподівання та дисперсії сигналів перепаду тиску та тиску обчислено за формулою (2.35) значення похибки $\delta \overline{q_v}$, яка виникає внаслідок усереднення значень перепаду тиску та тиску.

Визначено подальший напрямок роботи.

3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА РОЗРОБКА МЕТОДІВ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИМІРЮВАННЯ ВИТРАТИ КОКСОВОГО ГАЗУ

3.1 Вимірювальний блок датчика витрати Метран - 150

Для визначення витрати коксового газу після очистки у газовій трубі встановлюється діафрагма, діаметр якої розраховується виходячі з діаметру труби, якою проходить газ, розмір діафрагми розраховується враховуючі величину граничного верхнього значення величини перепаду тиску.

На виході з бензольного відділення діафрагма у газопроводі розрахована на перепад тиску $\Delta P = 100 \text{ кгс/м}^2$.

Нормальні діафрагми у інформаційно-вимірювальній системі звужуючого пристрою застосовують на трубопроводах із діаметром $D \geq 0,05 \text{ м}$, модуль діафрагми знаходиться у межах $0,05 \leq m \leq 0,7$.

Шкалу вторинного приладу для вимірювання витрати коксового газу після очищення розраховано на 160 тис. одиниць. Це означає, що при проходженні через отвір діафрагми 160 тис. $\text{м}^3/\text{год}$ коксового газу на діафрагмі буде створюватися перепад тиску рівний 100 кгс/м^2 . Якщо кількість газу буде меншою, перепад тиску буде меншим відповідно.

Цей перепад тиску сприймає датчик Метран - 150, що має у своїй конструкції 2 камери: плюсову та мінусову, та чутливу мембрану, що їх розділює. Під впливом тиску газу, що потрапляє до камер, датчик може виміряти тиск до та після діафрагми.

Схема вимірювального блока з ємнісним осередком датчика для встановлення на газопровід зображена на рисунку 3.1, на якому: 1 - основа; 2 - мембрана вимірюючого ємнісного осередка; 3 - діелектричні вкладиші; 4 - тонкоплівкові металеві електроди; 5 - розділювальні мембрани; 6 - внутрішній об'єм, заповнений розділювальною рідиною [9].

У якості сенсору у Метран – 150 CD застосовується диференціальний конденсатор.

Зміну значення ємності фіксує електронний блок датчика та електроніка перетворює перепад тиску ΔP у сигнал струму величиною від 4 до 20 мА, який далі передається на вторинний прилад.

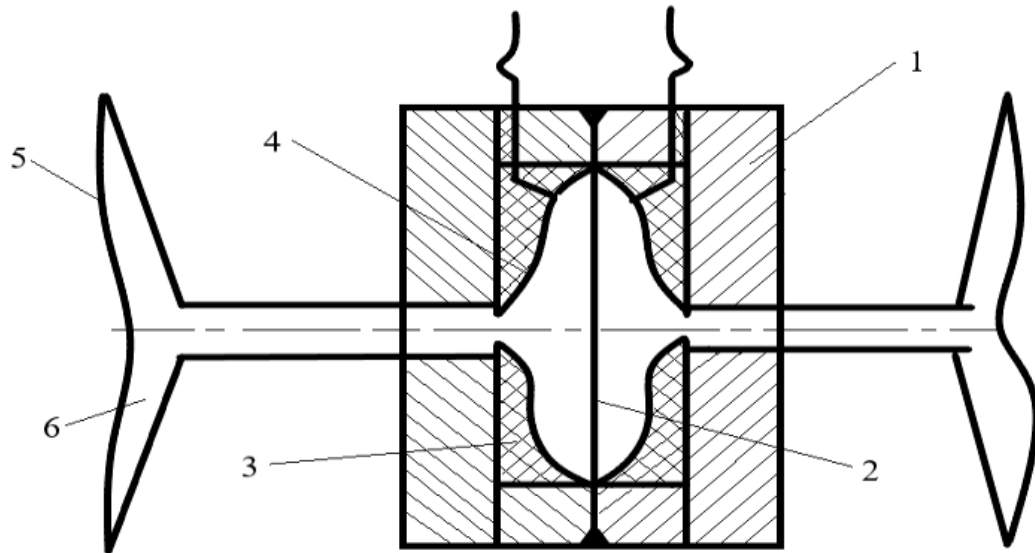


Рисунок 3.1— Схема вимірювального блока з ємнісним осередком датчика Метран – 150 CD

З первинними перетворювачами витрати, такими як діафрагми, труби Вентурі, трубки Піто-Прандтля датчики перепаду з'єднуються за допомогою двох імпульсних трубок [13].

Імпульсні трубки (імпульсна трубна проводка) найчастіше виконують з товстостінної металевої трубки діаметром від 14 до 16 мм. Прокладання імпульсних труб виконується відповідно до РД 50-213-80 - вимог правил вимірювання витрати газів і рідин стандартними пристроями, що звужують. Особлива увага при монтажі імпульсної трубної проводки приділяється наявності та напрямку ухилів, однакової довжини плюсової та мінусової ліній, розташування відборів та вигинів на одному рівні. Тому що неправильний монтаж датчику може спричинити цілий ряд систематичних похибок.

Відбір тисків рекомендовано виконувати у місцях, де швидкість газового потоку найменша, та газопровід не має поворотів, колін або компенсаторів.

Для проведення аналізу складних перетворень фізичних величин у засобах вимірювань доцільно розбити процес перетворення на ряд простих операцій. Кожній операції перетворення відповідає ланка структури, що зображує перетворення одної фізичної величини у іншу (див. рис. 3.2).

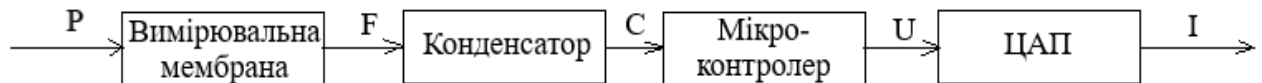


Рисунок 3.2 – Структурна схема перетворення величини

Сутність перетворення у структурній схемі полягає у тому, що газ впливає на тверде тіло, у нашому випадку на вимірювальну мембрану, та до тіла при цьому прикладено зусилля. Це зусилля призводить до зміни положення обкладок конденсатора та виникнення на них електричного заряду. Величину цього заряду можна перетворити у вихідний сигнал напруги та передати його на подальшу обробку.

3.2 Методи компенсації дестабілізуючого фактору вимірювання витрати коксового газу

У другому розділі виявлено найбільший вплив зміни температури на значення похибки вимірювання витрати, саме тому вихідний сигнал датчику потребує розробки температурної компенсації [4].

Температурні похибки датчиків тиску зумовлені багатьма фізичними процесами, що протікають у пристроях при тепловому впливу. Найбільш частими причинами виникнення температурної похибки є зміна коефіцієнту чутливості, зміна опору, зміна модуля пружності мембрани та у деяких випадках зміна лінійних розмірів.

Розглянемо один із способів, що використовується задля вирішення

нашого завдання. Цей спосіб полягає у застосуванні адитивно-логаметричної корекції, що складається з адитивної корекції температурної зміни та опорної і робочих ємностей з послідовним поділом результатів.

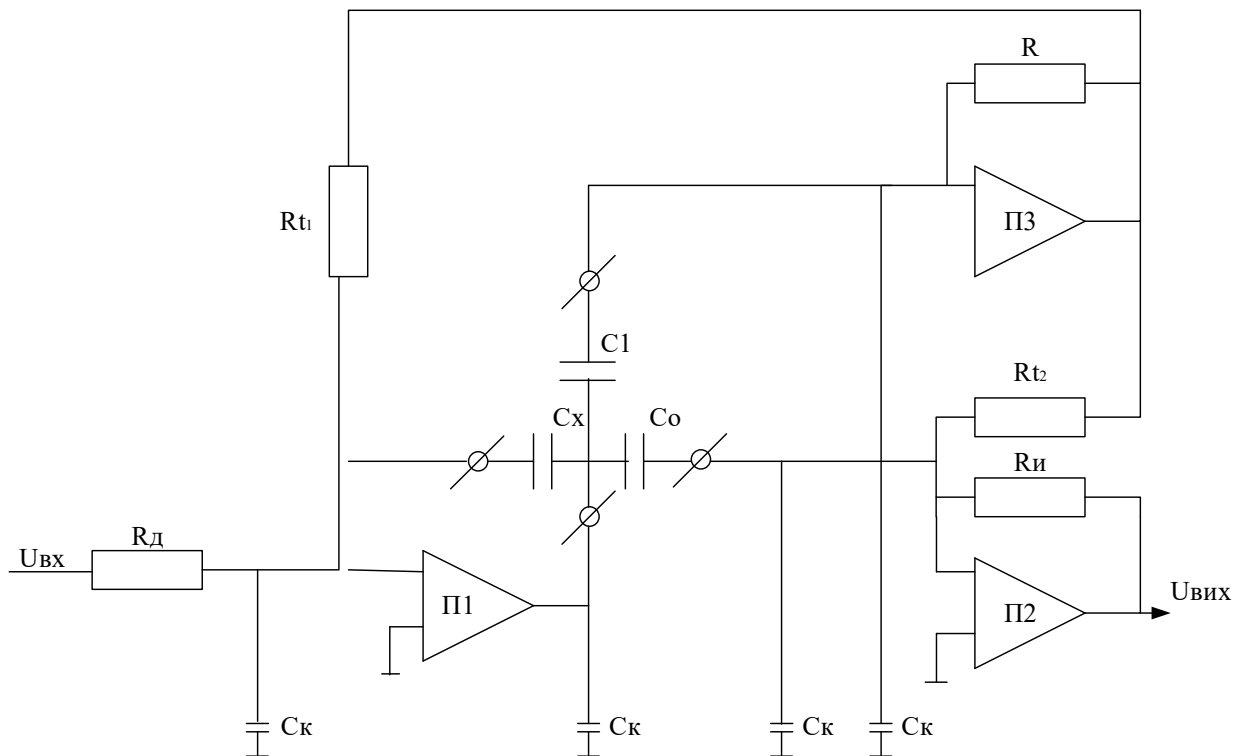


Рисунок 3.2 – Вимірювальна ланка з адитивно-логаметричною корекцією температурної похибки

На рисунку 3.2 зображена схематична реалізація вимірювальної ланки з адитивно-логаметричною корекцією температурної похибки.

Для реалізації та використання такої схеми нам необхідно знати залежність ємності, робочого C_x та опорного C_o , термозалежного C_t конденсаторів від зміни температури.

Вихідний сигнал вимірювальної ланки розглядаємо як вираз (формула 3.1):

$$U_{вих} = U_{вх} \frac{C_o - \frac{R}{R_{t1}}}{C_x - C_t \frac{R}{R_{t2}}}, \quad (3.1)$$

Згідно з виразом зі зміною значень резисторів R_{t1} та R_{t2} здійснюється налаштування адитивної корекції температурної похибки.

У приведеній схемі усі входні опори операційних підсилювачів мають у собі шунтування ємністю кабелю C_K . Коефіцієнти зворотного зв'язку усіх підсилювачів є комплексними величинами. Із цього маємо, що з кожна з трьох похибок стає комплексною величиною та має фазу та амплітуду. Наявність фазового зсуву зумовлює необхідність забезпечити стійкість ланки, зсув у свою чергу залежить від значень ємностей C_x , C_0 , C_t та C_K у ланці, що містить у собі диференціатор, виконаний на підсилювачі П1 і інтегратор – підсилювач П2.

На рисунку 3.3 можна побачити ще один варіант реалізації адитивно-логометричної корекції температурної похибки, що працює з тією ж самою функцією перетворення (3.1), але має вищу точність проведення процедури компенсації. Значення похибки на операційному підсилювачі П1 визначається тільки параметрами резисторів R , R_{t1} і R_{t2} та самого підсилювача безпосередньо.

Коефіцієнт зворотного зв'язку П2 буду дорівнювати [16]:

$$\beta = \frac{C_x}{C_x + C_0 + C_t + C_K}. \quad (3.2)$$

Коефіцієнт є скалярною величиною, а з цього висновок, що зворотній зв'язок не призводить до фазового зсуву у вихідній напрузі вимірювальної ланки $U_{ВИХ}$.

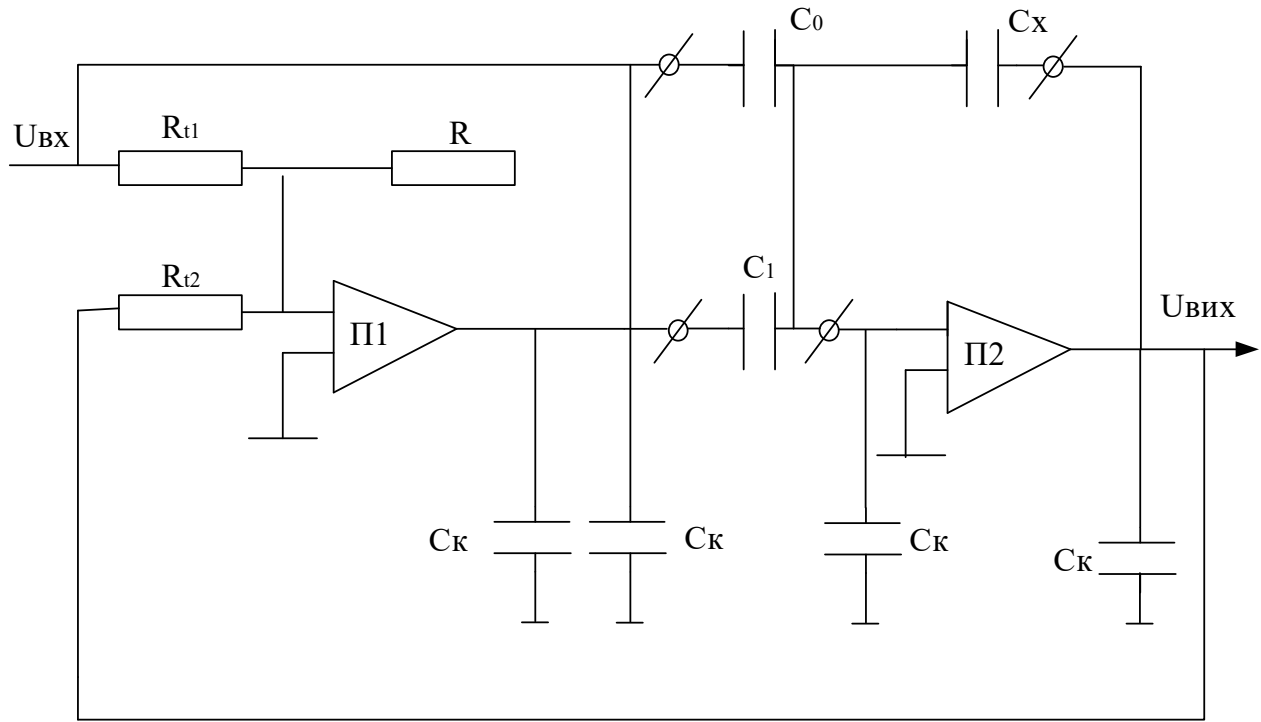


Рисунок 3.3 - Вимірювальна ланка з адитивно-логаметричною корекцією температурної похибка

Задля корекції похибки, що виникла в параметричному перетворювачі ємнісного датчика необхідно мати моделі робочої C_x та опорних C_o ємностей у вигляді лінійної залежності від величини температури:

$$C_x(t^0) = C_x(1 + \alpha_x \cdot t^0), \quad \dots\dots(3.3)$$

$$C_o(t^0) = C_o(1 + \alpha_o \cdot t^0), \quad (3.4)$$

де α_x і α_o – температурні коефіцієнти зміни ємності C_x та опорної ємності C_o . До 200 °С мають приблизно однакове значення.

Модель термозалежної ємності C_t для вимірювальної ланки з адитивно-логаметричною корекцією повинна прийняти вигляд:

$$C_t(t^0) = C_t(1 + \alpha_t \cdot t^0), \quad (3.5)$$

де α_t - температурний коефіцієнт зміни термозалежної ємності C_t .

Так як залежність ємностей від температури мають вигляд нелінійний, результати корекції похибки можна перевірити ступенем адекватності моделей $C_x(t^0)$, $C_0(t^0)$ та $C_t(t^0)$ ємностям C_x , C_0 та C_t .

Висновки

Розглянуто та досліджено застосування адитивно-логометричної корекції, що складається з адитивної корекції температурної зміни та опірної і робочих ємностей з послідовним поділом результатів, задля усунення температурної похибки.

Розглянута вимірювальна ланка датчику перепаду тиску з ємнісним осередком забезпечує мінімізацію температурної похибки. Виконано побудову схеми варіантів реалізації корекції температурної похибки.

Запропонована модель з високою точністю виключає похибку, що виникла через кінцеве значення коефіцієнту підсилення операційного підсилювача. Виведено формулу для обчислення вихідного сигналу вимірювального каналу.

4 РОЗРОБКА ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Градування засобу вимірювання за еталонними значеннями

Під час розробки функціональної схеми вимірювальних каналів системи необхідно передбачити те, що здійснюється градування двох каналів вимірювання. Вихідними електричними сигналами цих сенсорів є сигнали напруги 12-42 В, що надходить з АЦП, а також сигнал струму, який має діапазон зміни 4 до 20 мА.

Градувальна характеристика засобу вимірювання зображує залежність між значеннями величин на вході та на виході засобу вимірювання, що отримана експериментально. Градувальна характеристика може бути подана у вигляді графіку, таблиці або функції залежності [9]. Користуючись цією залежністю можна перевірити правильність використовуваного приладу, порівнявши із заданими еталонними значеннями.

Правильність показань приладу можна розрахувати за формулою 4.1 [6]:

$$\Delta P_n = \frac{Q_n^2}{Q_{max}^2} \cdot \Delta P_{max}, \quad (4.1)$$

де ΔP_n – перепад тиску при витраті Q_n , кгс/м²;

Q_n – об'єм коксового газу, що проходить за годину, м³/год;

Q_{max} – максимальний об'єм коксового газу, що може пройти за годину, м³/год;

ΔP_{max} – максимальний перепад тиску, що може зафіксувати датчик перепаду тиску, кгс/м².

За формулою 4.1 можна провести градувальну характеристику вимірювального приладу.

Шкала вимірювального приладу має мінімальне значення 0, а

максимальне 160 000, тому максимальне значення Q_{max} на шкалі вторинного приладу буде дорівнювати 160 000 м³/год. Максимальний перепад тиску ΔP_{max} , що може визначити прилад при витраті Q_{max} при нормальних умовах, розраховано як 100 кгс/м². Швидкість проходження коксового газу через діафрагму має квадратичну залежність: $\sqrt{\Delta P_n}$.

Значення шкали приладу по яких проводиться градувальна характеристика вимірювального приладу витрати коксового газу Q_n : 0, 20 000, 40 000, 60 000, 80 000, 100 000, 120 000, 140 000, 160 000. Значення величини перепаду тиску ΔP_n , що має бути зафіксоване приладом, за якими проводиться градувальна характеристика розрахуємо за формулою 4.1:

$$\Delta P_1 = \frac{0^2}{160000^2} \cdot 100 = 0 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.2)$$

$$\Delta P_2 = \frac{20000^2}{160000^2} \cdot 100 = 1.56 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.3)$$

$$\Delta P_3 = \frac{40000^2}{160000^2} \cdot 100 = 6.25 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.4)$$

$$\Delta P_4 = \frac{60000^2}{160000^2} \cdot 100 = 14.10 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.5)$$

$$\Delta P_5 = \frac{80000^2}{160000^2} \cdot 100 = 25.0 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.6)$$

$$\Delta P_6 = \frac{100000^2}{160000^2} \cdot 100 = 39.10 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.7)$$

$$\Delta P_7 = \frac{120000^2}{160000^2} \cdot 100 = 56.25 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.8)$$

$$\Delta P_8 = \frac{140000^2}{160000^2} \cdot 100 = 76.56 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.9)$$

$$\Delta P_9 = \frac{160000^2}{160000^2} \cdot 100 = 100.0 \text{ кгс} / \text{м}^2 \quad (4.10)$$

Результати градуювання вимірювального приладу занесемо у таблицю 4.1:

Таблиця 4.1 – Результати градуювання вимірювального приладу витрати коксового газу

№	Значення витрати Q_n , м ³ /год	Значення перепаду тиску ΔP_n , кгс/м ²
1	0	0
2	20 000	1.56
3	40 000	6.25
4	60 000	14.10
5	80 000	25.0
6	100 000	39.10
7	120 000	56.25
8	140 000	76.56
9	160 000	100.0

Побудуємо графік залежності значення витрати газу Q_n від значення зміни тиску газу ΔP_n (див. рис. 4.1).

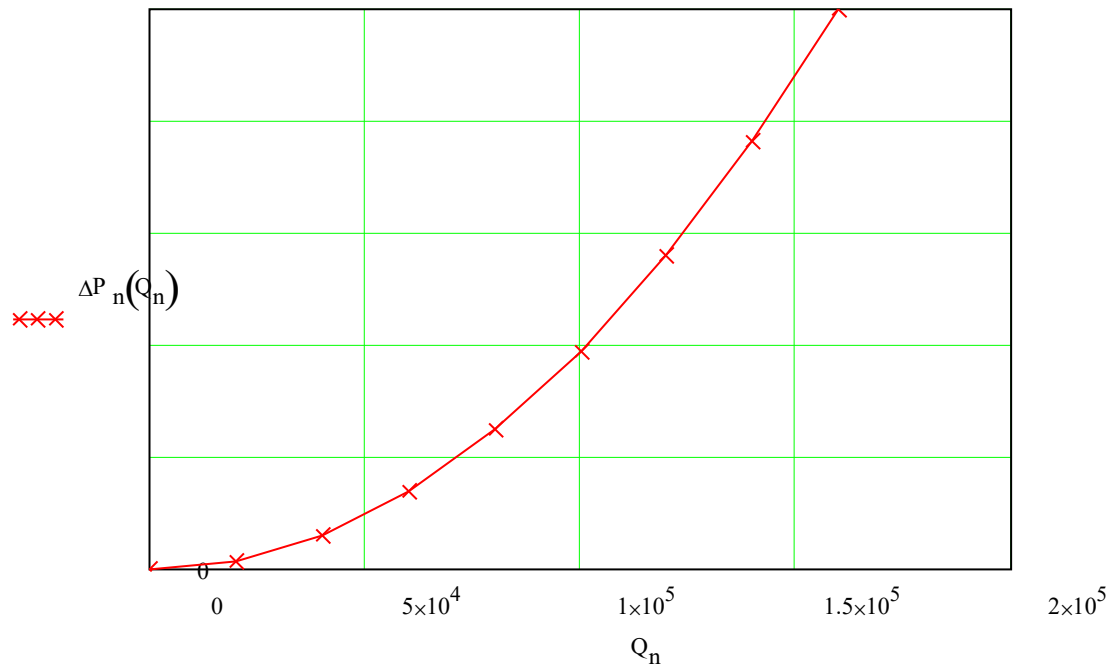


Рисунок 4.1 – Графік градувальної характеристики вимірювального приладу

Додатково проведемо градувальну характеристику значення напруги на виході вимірювального приладу від значення витрати..

Номінальна статична характеристика датчика із функцією перетворення вхідної вимірювальної величини за законом квадратичного корня відповідає вигляду (формула 4.11) [6]:

$$I_n = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cdot \sqrt{\frac{\Delta P_n}{\Delta P_{\max}}}, \quad (4.11)$$

де $I_{\min}$ - нижня границя вихідного сигналу, мА;

$I_{\max}$ – верхня границя вихідного сигналу, мА;

ΔP – вхідна вимірювана величина – перепад тиску, кгс/ м²;

$P_{\max}$ – верхня границя вимірювання значення перепаду тиску, кгс/ м².

Значення шкали приладу, за якими проводиться градувальна характеристика вимірювального приладу витрати коксового газу Q_n : 0, 20 000, 40 000, 60 000, 80 000, 100 000, 120 000, 140 000, 160 000. Значення величини перепаду тиску ΔP_n , що має бути зафіксоване приладом, за якими проводиться

градувальна характеристика розраховано за формулою 4.1, значення сили струму I_n розрахуємо за формулою 4.11. Результати градування занесемо у таблицю 4.2:

$$I_1(\Delta P_1) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{0}{100}} = 4.0 \text{ мА} \quad (4.12)$$

$$I_2(\Delta P_2) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{1.56}{100}} = 5.99 \text{ мА} \quad (4.13)$$

$$I_3(\Delta P_3) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{6.25}{100}} = 8.0 \text{ мА} \quad (4.14)$$

$$I_4(\Delta P_4) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{14.1}{100}} = 10.01 \text{ мА} \quad (4.15)$$

$$I_5(\Delta P_5) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{25}{100}} = 12.0 \text{ мА} \quad (4.16)$$

$$I_6(\Delta P_6) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{39.1}{100}} = 14.01 \text{ мА} \quad (4.17)$$

$$I_7(\Delta P_7) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{56.25}{100}} = 16.0 \text{ мА} \quad (4.18)$$

$$I_8(\Delta P_8) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{76.56}{100}} = 18.0 \text{ мА} \quad (4.19)$$

$$I_9(\Delta P_9) = 4 + 16 \cdot \sqrt{\frac{100}{100}} = 20.0 \text{ мА} \quad (4.20)$$

Таблиця 4.2 – Результати градування вимірювального приладу витрати коксового газу

№	Значення витрати Q_n , м ³ /год	Значення перепаду тиску ΔP_n , кгс/м ²	Значення сили струму на виході приладу I_n , мА
1	0	0	4.0
2	20 000	1.56	5.99
3	40 000	6.25	8.0
4	60 000	14.10	10.01
5	80 000	25.0	12.0
6	100 000	39.10	14.01
7	120 000	56.25	16.0
8	140 000	76.56	18.0
9	160 000	100.0	20.0

Графік залежності величини сили струму на виході приладу I_n від значення витрати Q_n на рисунку 4.2.

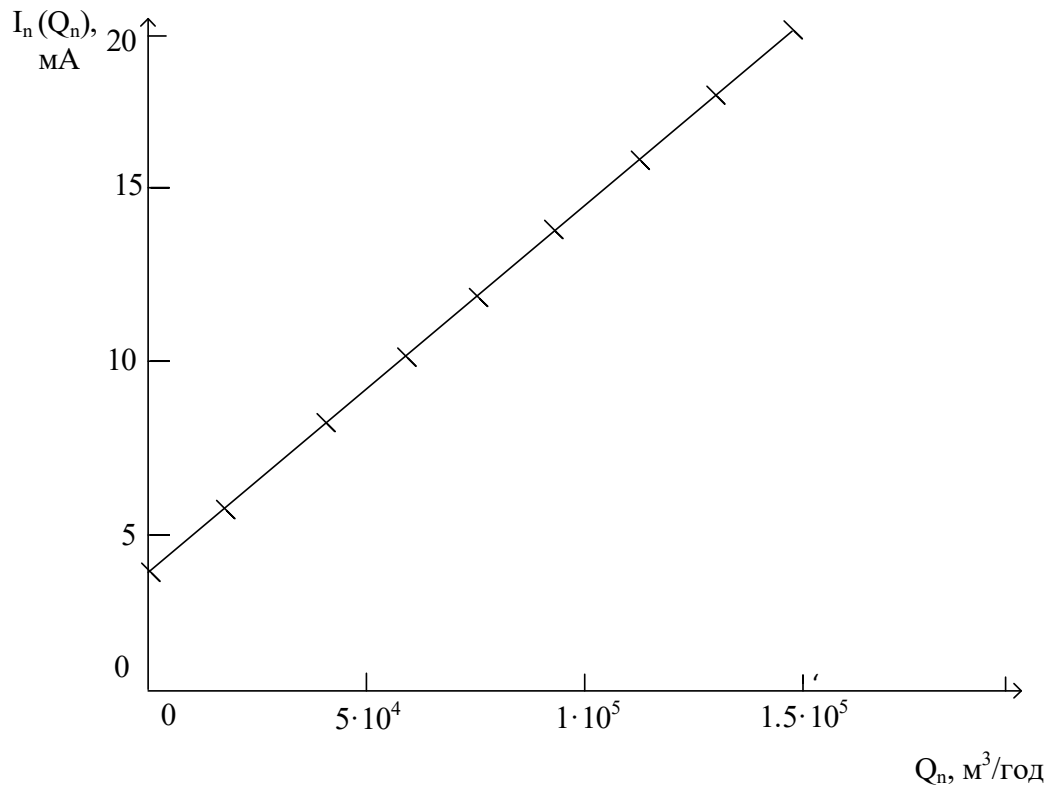


Рисунок 4.2 – Графік залежності сили струму I_n від значення витрати Q_n

При коректному перетворенні фізичної величини перепаду тиску, на виході ми маємо лінійну залежність значення сили струму від витрати газу.

За цими даними можна перевірити чи коректні значення величини передає прилад. Задля збільшення точності процедури перевірки правильності можна використовувати додатковий вторинний прилад та мультиметр.

4.2 Корегування діапазону вимірювання комутатором

Датчик забезпечує можливість зсуву діапазону вимірювання з встановленням нижньої границі вимірювання, зсув «нуля», до будь-якого значення у межах вимірювального діапазону. Верхня межа при цьому менша або дорівнює $P_{\max}$ -максимальне значення вимірювання. Основна похибка для таких датчиків, виражена у відсотках від діапазону вимірювання, повинна не перевищувати значення [6]:

$$\gamma_{зм} = \gamma \cdot \frac{P_{\text{в}}}{P_{\text{в}} \cdot P_{\text{н}}}, \quad (4.21)$$

де $\gamma_{зм}$ - допустима основна похибка приладу зі зміщеним значенням нижньої межі вимірювання, %;

γ - межа допустимої основної похибки при налаштуванні $P_{\text{в}}$ згідно із таблицею 4.1, %;

$P_{\text{в}}$ - верхня межа вимірювання, МПа;

$P_{\text{н}}$ - нижня межа вимірювання, не повинна дорівнювати нулю ($P_{\text{н}} \neq 0$), МПа.

Основну допустиму похибку датчиків перетворення величини за законом квадратичного кореня розраховується у відсотках від верхньої межі вимірювання. У таблиці 4.3 наведені основні технічні характеристики датчика Метран – 150.

Таблиця 4.3 - Основні технічні характеристики датчика Метран-150 [6]

	Технологічний параметр	Значення
1	Похибка γ , %	± 0.075
2	Вплив температури навколишнього середовища, %/10°C від P_{max}	± 0.05
3	Вплив статистичного тиску, %/1 МПа від P_{max}	± 0.015
4	Перевлаштування діапазонів вимірювання	100:1
5	Статичний тиск, МПа	25; 40
6	Температура навколишнього середовища, °C	-55...+80

Граничні значення (рівні обмеження) величини аналогового вихідного сигналу показано у таблиці 4.4 [6]:

Таблиця 4.4 - Граничні значення величини аналогового вихідного сигналу

Вихідний сигнал приладу, мА	Граничні значення вихідного сигналу струму, мА	
	нижнє	Верхнє
4-20	3.85 ± 0.02	21.62 ± 0.16

Налаштування та керування зсуву «нуля» з вихідним сигналом А виконується керуючим пристроєм, роль якого може виконувати пристрій з HART – протоколом.

За допомогою цієї можливості можна корегувати значення вихідного сигналу виключивши похибку, що зумовлює вплив надлишкового тиску у вимірюваному середовищі.

4.3 Градування електронного пристрою вимірювання

Під час моделювання градування використовується багаторівневий сигнал значень перепаду тисків. Цей сигнал сформовано з набору 15 значень перепаду тиску. Число рівнів для градування у даному процесі моделювання дорівнює 15. Процеси переключення з одного рівня на наступний будемо вважати неінформативними та миттєвими.

Графік моделювання багаторівневого сигналу приведений на рисунку 4.3.

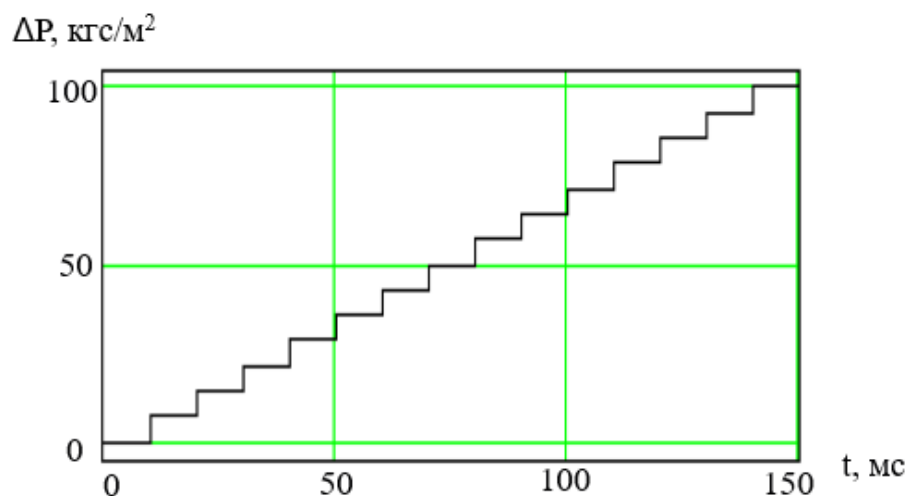


Рисунок 4.3 – Моделювання багаторівневого сигналу

Моделювання процесу перетворення фізичного параметру зміни тиску в ємність, електричний сигнал, його обробка та формування масиву двоїчних кодових комбінацій виконується налаштуванням моделю інформційно-вимірювальної електронної системи. ΔP , кгс/м²

Графіки вихідних напруг моста, підсилювача, що нормує і підсилювача, що узгоджує зображено на рисунках 4.4, 4.5 та 4.6 відповідно. Час збереження значення сигналу в ПВЗ приймаємо 2 мс.

Масив двоїчних кодових комбінацій представлений на рисунку 4.7 при зміні значення перепаду тиску від 0 до 100 кгс/м².

Одночасно з модулюванням багаторівневого сигналу сформовано масив з 15 значень перепаду тиску $\Delta P_{ет}$ (див. рис. 4.7), даний масив використовується в процесі градування, і багаторівневий сигнал перепаду тиску $\Delta P_{виб}$ (рисунок 4.8), що містить стільки ж точок, скільки кодових комбінацій у масиві двоїчних еквівалентів, використовуваний для оцінки точності виконання перетворень

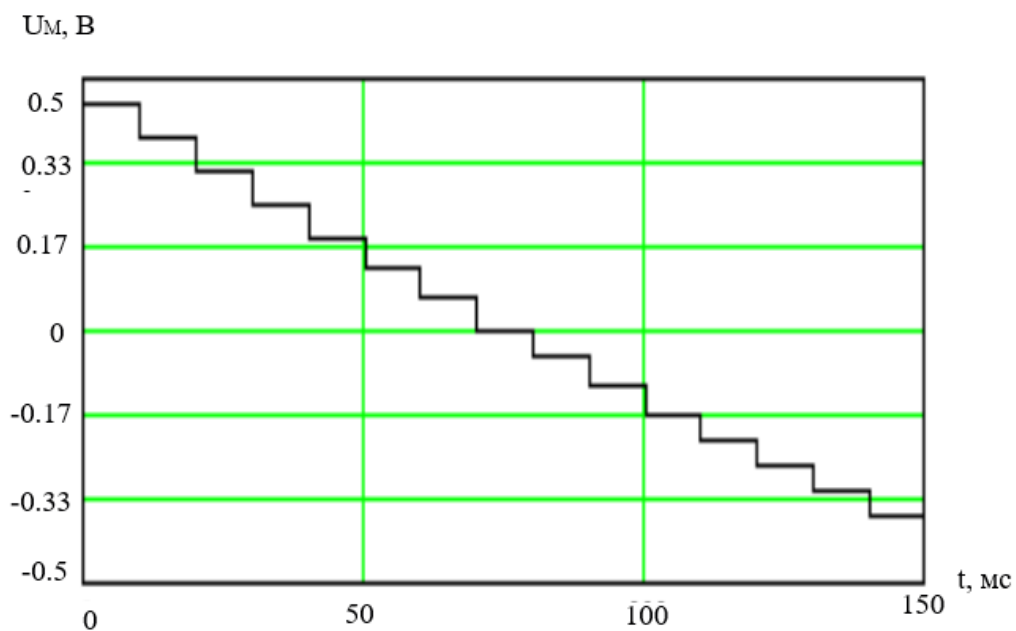


Рисунок 4.4 – Графік напруги на виході моста

Вихід н.п., В

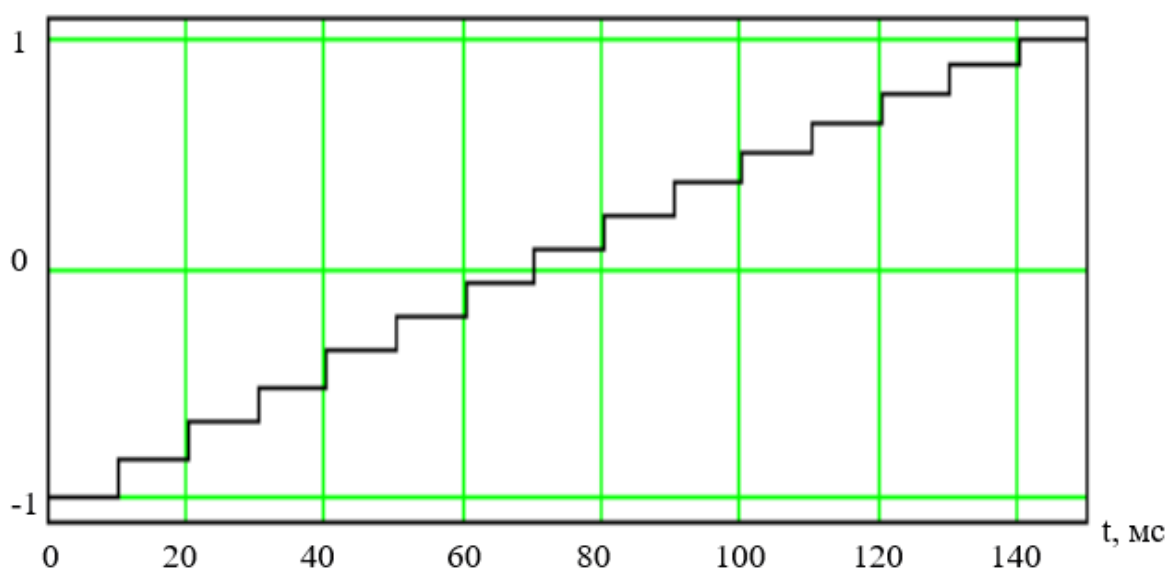


Рисунок 4.5 – Графік напруги на виході підсилювача, що нормує

Вихід с.у., В

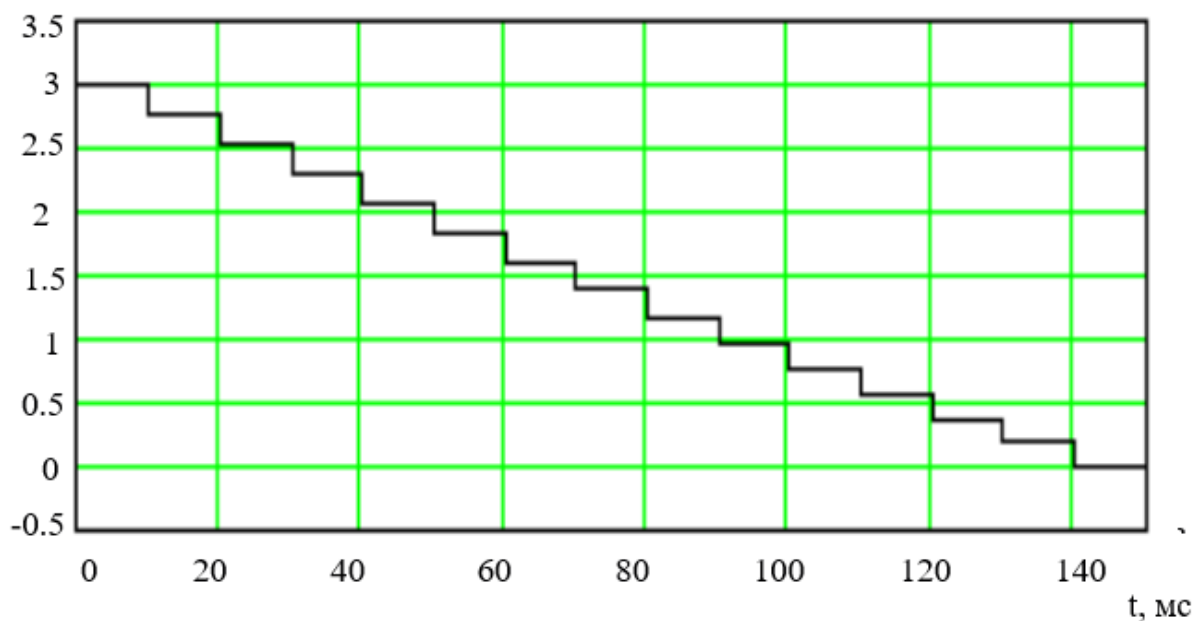


Рисунок 4.6 – Графік напруги на виході підсилювача, що узгоджує

На кожному етапі градуювання обирається одне значення та можна сформувати масив цілих десяткових еквівалентів рівнів градуювання KOD10G. Масиви еталонних значень перепаду тиску та їх цілі десяткові еквіваленти приведені нижче на рисунку 4.7.

KOD2 =		0	$\Delta P_{ВИБ}$ =		0
	0	1111111111		0	0
	1	1111111111		1	0
	2	1111111111		2	0
	3	1111111111		3	0
	4	1111111111		4	0
	5	1111111111		5	0
	6	1110101100		6	7.142657143
	7	1110101100		7	7.142657143
	8	1110101100		8	7.142657143
	9	1110101100		9	7.142657143
	10	1110101100		10	7.142657143
	11	1101011010		11	14.285714286
	12	1101011010		12	14.285714286
	13	1101011010		13	14.285714286
	14	1101011010		14	14.285714286
	15	1101011010		15	14.285714286

Рисунок 4.8 – Масиви еталонних значень перепаду тиску та їх десяткові еквіваленти

При використанні цих двох масивів, одержується градувальний поліном. За методом найменших квадратів можна побудувати характеристику градування. Ступінь апроксимуючого полінома вибираємо $k_{km} = 3$. Коефіцієнти полінома можна отримати за формулою (4.22):

$$A = AX^{-1} \cdot FX \quad (4.22)$$

де AX та FX – матриці значень, що отримані на наступним алгоритмом (див. рис. 4.9 та 4.10).

Матриця AX має розмір 4×4 , а матриця FX 4×1 (див.рис. 4.9 та 4.10).

```

AX :=
  for i ∈ 0..kkm
    for j ∈ 0..kkm
      ax ← 0
      for q ∈ 0..m
        ax ← ax + (KOD10Gq)i+j
      AXi,j ← ax
  AX

```

Рисунок 4.9 - Алгоритм отримання матриці AX

```

FX :=
  for j ∈ 0..kkm
    fx ← 0
    for q ∈ 0..m
      fx ← fx + (Fer)q · (KOD10Gq)j
    FXj ← fx
  FX

```

Рисунок 4.10 - Алгоритм отримання матриці FX

При обчисленні матриць m приймемо 14, ця змінна описує кількість елементів масиву KOD10G.

$$AX = \begin{pmatrix} 15 & 7258 & 5026492 & 3.9579178 \cdot 10^9 \\ 7258 & 5026492 & 3.9579178 \cdot 10^9 & 3.339449983 \cdot 10^{12} \\ 5026492 & 3.9579178 \cdot 10^9 & 3.339449983 \cdot 10^{12} & 2.941110357 \cdot 10^{15} \\ 3.9579178 \cdot 10^9 & 3.339449983 \cdot 10^{12} & 2.941110357 \cdot 10^{15} & 2.666854683 \cdot 10^{18} \end{pmatrix}$$

$$FX = \begin{pmatrix} 750 \\ 215971.428571429 \\ 105228557.142857 \\ 6.254386377 \cdot 10^{10} \end{pmatrix}$$

Проведемо розрахунок значення коефіцієнту A_κ , відповідно залежності (4.22):

$$A_\kappa = \begin{pmatrix} 99.884566966 \\ -0.120203106 \\ 0.000033745 \\ -0.000000011 \end{pmatrix}$$

Градуювальна характеристика будується відповідно до залежності:

$$F(kod) = \sum_{k=0}^3 A_k \cdot kod^k, \quad (4.23)$$

де kod – десяткові числа від 0 до 1023.

Графік градувальної характеристики побудовано на рисунку 4.11.

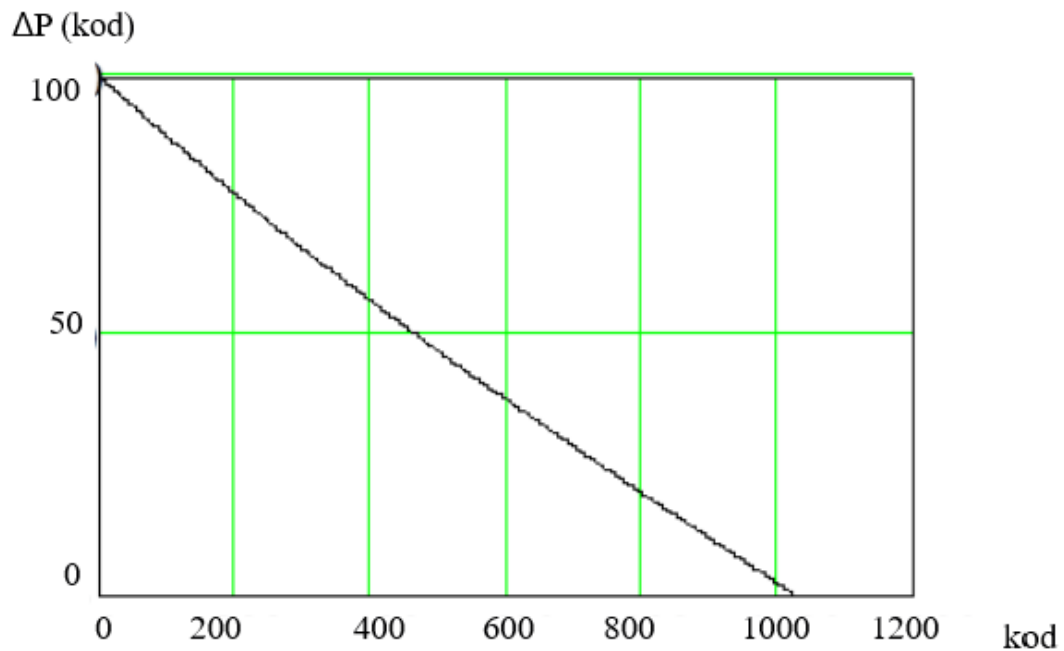


Рисунок 4.11 - Графік характеристики, що градує перепад тиску

З графіку характеристики можна побачити, що перетворення сигналу зміни перепаду тиску ΔP переводиться у значення цифровий коду за лінійною залежністю та має лінійний характер.

4.4 Проектування вимірювального пристрою для визначення надлишкового тиску

У якості датчика переміщення мембрани (зусиль) використовується вимірювальний міст на напівпровідникових тензорезисторів. Даний тип резисторів має на порядок вищий рівень вихідного сигналу на порядок вище, ніж тензорезистори з металевими решітками (≈ 50 мВ/В).

Напівпровідникові резистори дуже підтверджені впливу температури, що може дати велике значення систематичної похибки, однак можна компенсувати цей вплив. Корекція полягає у тому, що конструктивно можна компанувати тензорезистори та термокомпенсуючі елементи, у первинному вимірювальному перетворювачі (ПВП) можна практично виключити вплив температури.

Тензорезистори встановлюють на пружний елемент, що може деформуватися: розтягуватися чи стискатися. У даній систем це пружна вимірювальна мембрана.

До моста вимірювання включено по два тензорезистори, що зприймають на себе деформацію вимірювальної мембрани. Тензорезистори, що випробують деформацію одного напрямку, включені до протилежних плеч моста. R_{T1} і R_{T3} випробують деформацію розтягання, а R_{T2} і R_{T4} – деформацію стиску.

На рисунку 4.12 Показана схема вимірювального моста з тензорезисторами, де $U_{ЖИВ}$ – напруга живлення, В, U_M – напруга на виході мосту, В.

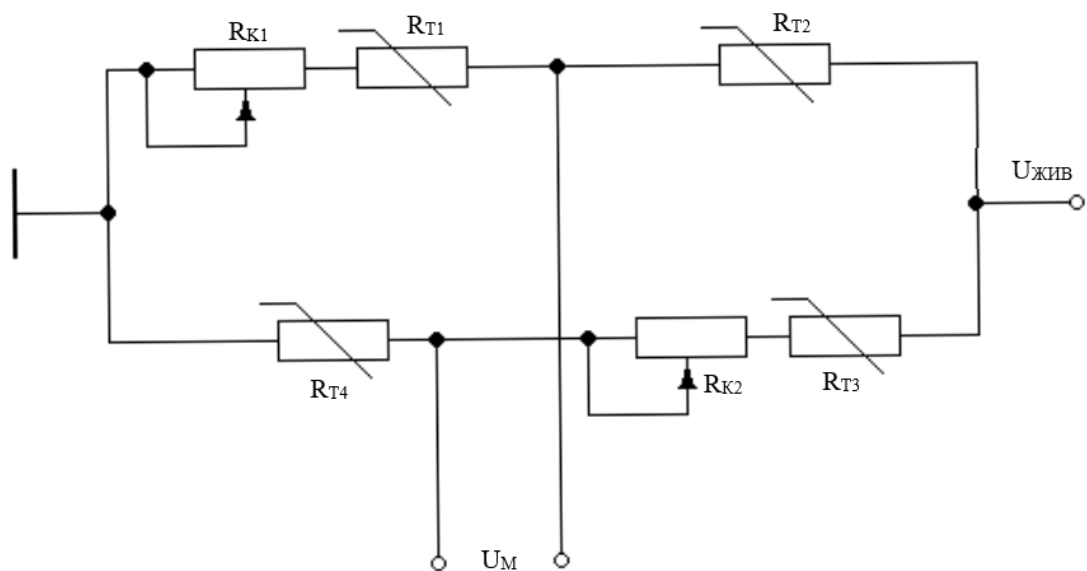


Рисунок 4.12 - Схема вимірювального моста із тензорезисторами

Резистори R_{K1} і R_{K2} призначені для усунення розбалансу моста. Вони обираються змінними для точного встановлення балансу. Деформація тензорезисторів – стиск та розтягування викликає зміну їхнього опору. Зміна опору за постійною напругою живлення моста $U_{ЖИВ}$ викликає зміну вихідної напруги моста U_M .

Міст із тензорезисторами можуть утворювати первинний перетворювач

вхідної величини. Характеристика перетворення є вихідною із структури перетворення вхідної величини, що розглядається у другому та третьому розділі даної роботи у підпунктах 2.1 та 3.1 відповідно.

Характеристика перетворення сила – опір $R(F)$ одного тензорезистора приведена на рисунку 4.13. Силу F розглядаємо у діапазоні зміни від -150 до 150 кН.

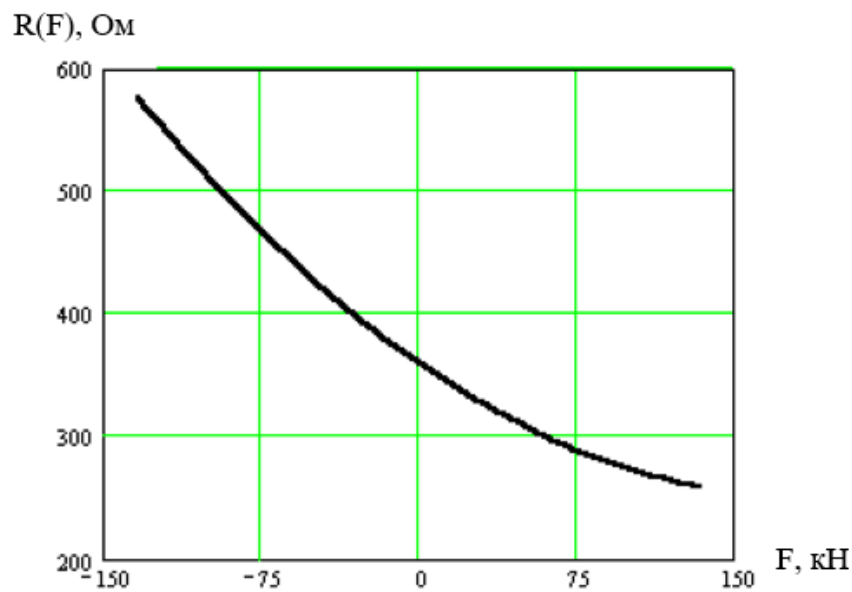


Рисунок 4.13 - Графік характеристики перетворення сила – опір тензорезистора

Перетворювальну характеристику можна описати наступною залежністю:

$$R = R_0(1 + \delta R); \quad (4.24)$$

$$\delta R = ke + ce^2; \quad (4.25)$$

$$\varepsilon = \mu \cdot F, \quad (4.26)$$

де R_0 – номінальний опір тензорезистора при $F = 0$ ($R_0 = 360 \text{ Ом}$);

k, c – коефіцієнти, що залежать від ступеня легування матеріалу

напівпровідника ($k = -110$, $c = 10000$);

ε – деформація;

μ – коефіцієнт пружності матеріалу пружного елемента ($\mu = 0.3 \cdot 10^{-4}$ 1/кН).

Умовою рівноваги моста є: сила величиною $F_{сер}$ впливає, а опори його плеч будуть рівними. Значення опорів тензорезисторів, які випробують на розтягнення та стиск, будуть мати протилежний знак. Саме тому до моста додаються опори R_{K1} і R_{K2} для компенсації нелінійності та корекції рівноваги моста.

Зміни опорів R_{T1} і R_{T3} однакові і визначаються відповідно до залежності (4.25). Зміни опорів R_{T2} і R_{T4} також однакові, однак, тому що вони випробують деформацію стиску, то:

$$\delta R_{24} = -ke + ce^2, \quad (4.27)$$

тому що

$$\varepsilon = -0.3 \cdot \mu \cdot F. \quad (4.28)$$

У залежність (4.28) вводиться коефіцієнт 0.3 та тому що деформація стиску має знак мінус та її значення менше деформації розтягання.

Для того щоб визначити значення компенсуючих опорів R_{K1} і R_{K2} розрахуємо опори тензорезисторів при величині сили $F_{сер} = 5$ кН.

Для опору R_{T1} :

$$\varepsilon_{13} = \mu \cdot F_{сер} = 0.3 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 1.5 \cdot 10^{-4}, \quad (4.29)$$

$$\delta R_{13} = k\varepsilon_{13} + c\varepsilon_{13}^2 = -110 \cdot 0.00015 + 10000 \cdot (0.00015)^2 = -0.01628, \quad (4.30)$$

$$R_{T1} = R_{T3} = R_0(1 + \delta R_{13}) = 360 \cdot (1 - 0.01628) = 354.14 \text{ Ом}, \quad (4.31)$$

та для опору R_{T2} :

$$\varepsilon_{24} = -0,3 \cdot \mu \cdot F_{cep} = -0.3 \cdot 0.3 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = -4.5 \cdot 10^{-5}, \quad (4.32)$$

$$\delta R_{24} = k\varepsilon_{24} + c\varepsilon_{24}^2 = -110 \cdot (-4.5 \cdot 10^{-5}) + 10000 \times (-4.5 \cdot 10^{-5})^2 = 0.00497, \quad (4.33)$$

$$R_{T2} = R_{T4} = R_0(1 + \delta R_{24}) = 360 \cdot (1 + 0.00497) = 361.79 \text{ Ом}. \quad (4.34)$$

Значення компенсуючих опорів R_{K1} і R_{K2} розрахуємо як:

$$R_{K1} = R_{K2} = R_{T2} - R_{T1} = 361.79 - 354.14 = 7.65 \text{ Ом}. \quad (4.35)$$

Для урівноваження мосту обрано змінні опори R_{K1} і R_{K2} типу СП 3–33 та номіналом 10 Ом.

Напругу живлення вимірювального моста обираємо так, щоб значення струму не перевищувало 10 – 20 мА. Так як при більшому струмі протікаючому через плечі моста будуть нагріватися тензорезистори та давати велику складову похибки вимірювання.

Для збалансованого моста опір плеча буде:

$$R_{II} = R_{T1} + R_{T2} + R_{K1} = 354.14 + 361.79 + 7.65 = 723.58 \text{ Ом} \quad (4.36)$$

З цього розрахуємо напругу живлення моста:

$$U_{жив} = R_{II} \cdot 0.01 = 723.58 \cdot 0.01 = 7.24 \text{ В} \quad (4.37)$$

Значення напруги 7 В не є має широкого використання та не є зручним для обчислення. Є стандартний ряд напруг, до якого це значення не входить, тому зробимо свій вибір на користь меншому, але стандартному значенню

напруги живлення, яке дорівнює 5 вольтам $U_{ЖИВ} = 5$ В. Вибір обґрунтуємо тим, що менше значення зручніше з теплового режиму та напруга буде жити цифрові мікросхеми також, що спрощує задачу вибір номіналів різних напруг для окремих елементів системи.

При $U_{ЖИВ} = 5$ В сила струму буде дорівнювати:

$$I = \frac{U_{ЖИВ}}{R_{\Pi}} = \frac{5}{724} = 6.9 \text{ мА} \quad (4.38)$$

Потужність, яку можна втратити на тензорезисторі дорівнює:

$$P = I^2 \cdot R_{T2} = (6.9 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 361.79 = 17.2 \text{ мВт}. \quad (4.39)$$

Вихідна напруга моста U_M можна розрахувати за формулою:

$$U_M = U_{ЖИВ} \cdot \frac{(R_{T1} + R_{K1}) \cdot (R_{T3} + R_{K2}) - R_{T4} \cdot R_{T2}}{(R_{T1} + R_{K1} + R_{T2}) \cdot (R_{T3} + R_{K2} + R_{T4})}. \quad (4.40)$$

А зміна опору моста виражена у залежності:

$$R_M = \frac{(R_{T1} + R_{K1}) \cdot R_{T2}}{R_{T1} + R_{K1} + R_{T2}} + \frac{(R_{T3} + R_{K2}) \cdot R_{T4}}{(R_{T3} + R_{K2} + R_{T4})}. \quad (4.41)$$

Для побудови моста обираємо напівпровідниковий датчик МК4. Технічні характеристики даного датчику наведено у таблиці 4.5

Таблиця 4.5 – Технічні характеристики датчику МК4

Параметр датчика	Од. вимірювання	Значення
Верхня межа зусилля	кН	

Продовження таблиці 4.5

Робочий коефіцієнт передачі сигналу	мВ/В	20.000±0.001
Номінальне переміщення додатка сили	мм	0.25
Клас точності згідно з ГОСТ 30129	-	С
Число перевірочних інтервалів	одиниць	1000..4000
Категорія точності згідно з ГОСТ 28836-90	-	0.02..0.06
Напруга живлення	В	5 - 12
Вихідний опір	Ом	350±10
Діапазон робочих температур	°С	Від -30 до 40
Діапазон температур збереження	°С	Від -50 до 50
Опір ізоляції	МОм	>5000
Ступінь захисту	-	IP-67

Даний вимірювальний прилад є елементом для коректного визначення витрати газу у трубопроводі. З допомогою тензорезисторного напівпровідникового датчику ми можемо контролювати значення статистичного тиску у трубопроводі та тим самим корегувати значення, які передає на вторинний прилад збору та обробки інформації.

Висновки

У даному розділі досліджено та виконано такі задачі:

- проведення градування засобу вимірювання за еталонними значеннями приладу вимірювання різниці тиску;
- корегування діапазону вимірювання комутатором з підтримною HART – протоколу;

- градування електронного пристрою та його сигналу датчику перепаду тисків;
- проектування додаткового вимірювального пристрою для визначення статистичного тиску.

У підрозділі 4.4 даного розділу було проведено розрахунок вимірювального приладу тиску, поставлено вимоги до засобу та обрано з модельного ряду той, який задовольняє вимогам.

У якості елементів інформаційно–вимірювальної системи було обрано такі компоненти: датчик (витратомір) змінного перепаду тиску моделі Метран – 150 CD, будь-яка термopара, що задовольняє умовам технічного завдання, датчик тиску з напівпровідниковим первинним елементом з тензорезисторним чутливим елементом моделі МК4 та вторинний прилад який працює з протоколом HART, сприймає вхідний сигнал у вигляді сигналу струму у діапазоні 4 – 20 мА, може проводити розрахунки параметрів, що залежать один від одного, реєструвати значення вхідних сигналів та має у технічному виконанні систему моніторингу та сигналізації аварійних станів вимірювальних приладів.

ВИСНОВКИ

Метою даної кваліфікаційної роботи є підвищення точності на етапі проектування, дослідження та розробки інформаційно-вимірювальної системи витрати коксового газу після очистки, що дозволить та розробити принципову схему компенсації похибок, що спричинені дестабілізуючими факторами.

У випускній кваліфікаційній роботі були виконані поставленні задачі. Для досягнення мети було обґрунтовано та розроблено структурну схему інформаційно-вимірювальної системи витрати косового газу. Щоб побудувати структуру системи було проведено дослідження математичних моделей витрати коксового газу, формування відносної та основної похибок вимірювання.

Проведене дослідження математичних моделей дало змогу виявити фактори, що найбільше впливають на процес визначення значення витрати. На основі аналізу структурних систем чутливого елемента первинного перетворювача з ємнісним осередком, обрано структуру, що компенсує вплив температурного фактору на точність вимірювання.

У аналізі процесу формування відносної похибки вимірювання витрати та виявлено фактори, що призводять до її збільшення – температура, та зменшення – абсолютний тиск, дійсного середнього значення витрати за проміжок часу.

У роботі для отримання характеристик процесів було застосовано: математичний аналіз, теорія випадкових процесів та теорія визначення похибок. Завдяки результатам розрахунків було виявлено недоліки системи та її переваги. Проаналізована інформація дала змогу висунути вимоги до компонентів інформаційно-вимірювальної системи.

У процесі дослідження було встановлено, що суттєвий вплив на вимірювання витрати газу датчиком перепаду тиску з ємнісним осередком має температура вимірюваного та навколишнього середовища та надлишковий тиск. Запропоновано ввести компенсацію дестабілізуючого фактору впливу температури до схеми чутливого елемента датчика зміни різниці тисків. Даний

метод компенсації дозволить підвищити точність вимірювання.

Модулювання багаторівневого сигналу допомогло провести градувальну характеристику вихідного сигналу. Визначено алгоритми перетворення значень вихідного сигналу у цифровий код для подальшої обробки інформації.

Калібрування «нуля» дозволяє змінити діапазон вимірювання зміни перепаду тиску, тим самим компенсувати вплив надлишкового тиску та підвищити точність вимірювання. Калібрування та налаштування відбувається пристроєм з підтримкою протоколу HART, який дозволяє перетворити вихідний сигнал з первинних перетворювачів на цифровий сигнал. Це перетворення не впливає на сигнал та не зменшує точність вимірювання.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Коксовый газ – Металургический портал | MetalSpace.ru. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://metalspace.ru/education-career/osnovy-metallurgii/koks/1590-koksovyj-gaz.html> - Назва з титул. екрану.
- 2 Коксовый газ: состав, применение, получение, сжигание. [Электронный ресурс] – режим доступа: <https://www.chemistry-expo.ru/ru/ui/17109/> - Назва з титул. екрану.
3. Вспомогательные устройства – Газовик – промышленное газовое оборудование - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gazovik-gaz.ru/spravochnik/consum/metod.html> – Назва з титул. екрана.
- 4 Кулебякин, В. В. Методы и приборы для измерения расхода жидкостей и газов: навч. посіб. / В. В. Кулебякин - г. Минск: Белорусский национальный технический университет, 2017. – 46 с.
- 3 Вторинні вимірювальні прилади – Вікіпедія – вільна енциклопедія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://uk.wikipedia.org/wiki/Вторинні_вимірювальні_прилади - Назва з титул. екрана.
- 6 Руководство по эксплуатации СПГК.5225.000.00 РЭ, версия 3.7, Датчики давления Метран-150 / АО «ПГ «Метран» - г. Челябинск, 2005, 114 с.
7. ПД200 – ДД Высокоточный датчик давления с индикацией – Контрольно-измерительные приборы и оборудование для автоматизации ОВЕН - [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://owen.ua/ru/datchiki/pd200-vysokotochnyj-datchik-davlenija-s-indikaciej> - Назва з титул. екрана.
8. Измерение расхода – Emerson RU. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.emerson.ru/ru-ru/> – Назва з титул. екрана.
9. Градуировочная характеристика – КИПиС. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.kipis.ru/info/index.php?ELEMENT_ID=4806232 – Назва з титул. екрана.

10. Фетисов, А.В. МЕТРАН - 150. «Как закалялась сталь» / А.В. Фетисов, Г. М. Грудцинов, С. Е. Вазарцев, Г. В. Черкашина //Ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2012. - №8, С. 11-13.

11. Удод, Е. В. Исследование и разработка прецизионных математических моделей преобразования и алгоритмов вычислений значений давления: монография / Е. В. Удод. – Таганрог: Технологический институт Южного федерального университета, 2007. – 225 с.

12. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости. Межгосударственный стандарт. – Минск.: ИПК Издательство стандартов, 1997. – С. 72.

13. Кремлевский, П. П. Расходомеры и счетчики количества вещества: справочник / П. П. Кремлевский; – Изд. 5-е. – СПб.: Политехника, 2004. – 412 с.

14. Большаков, В. Справочник по гидравлике / В. Большаков, Ю. Константинов, В. Попов и др. – К.: Вища школа, 1977. - 279 с.

15. Кулінченко, В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: Підручник.-Київ: Фірма «Інкос», Центр навчальної літератури, 2006. — 616с. ISBN 966-8347-38-2 22. Ф.Д. М.

16. Карпов, В. А. Универсальный измерительный преобразователь для дифференциального емкостного чувствительного элемента / В. А. Карпов, В. А. Хананов // Вестник ГГТУ им. Сухого. – 2014 - №1.

17. Термометри розширення – Файловый архів студентів StudFiles. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://studfile.net/preview/7516745/page:30/> - Назва з титул. екрана.

18. Формула Дарси — Вейсбаха - Вікіпедія — вільна енциклопедія. [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [Формула Дарси — Вейсбаха — Википедия \(wikipedia.org\)](https://uk.wikipedia.org/wiki/Формула_Дарси_—_Вейсбаха) - Назва з титул. екрана.

ДОДАТОК А

Охорона праці та безпека під час надзвичайних ситуацій 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:

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

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:

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

де n – кількість працюючих;

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

Визначимо надходження тепла від електричного освітлення за формулою:

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

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:

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

де F – площа віконних прорізів ($3 \times 2,5 = 7,5 \text{ м}^2$);

g_2 – кількість тепла, що надходить через 1 м^2 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 всім 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:

$$h = h_0 - h_p = 3,5 - 0,4 = 2,8 \text{ м.}$$

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

3) Визначимо рекомендовану відстань між світильниками

$$L = 0,7 \cdot h = 0,7 \cdot 2,8 = 2,0 \text{ м.}$$

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 ($\Phi_{\text{л}}$) визначається за формулою:

$$\Phi_{\text{л}} = \frac{E \cdot K_3 \cdot S \cdot Z}{N \cdot n \cdot \eta},$$

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 $i = 2,5$, $P_{\text{стелі}} = 70\%$, $P_{\text{стін}} = 50\%$)

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:

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