

Міністерство освіти і науки України
Одеський національний політехнічний університет

Інститут штучного інтелекту і робототехніки
Кафедра «Комп'ютерні системи»

Холостенко Олександр Анатолійович,
студент групи АК-151

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА

Інформаційно-вимірювальна система
витрати природного газу
безконтактним акустичним методом

Напрямок підготовки: 123 – “Комп'ютерна інженерія”

Спеціалізація: Спеціалізовані комп'ютерні системи

Керівник:

Нестерюк Олександр Геннадійович,
к.т.н.

Одеса – 2020

Одеський національний політехнічний університет

Інститут, факультет Інститут штучного інтелекту і робототехніки
Кафедра Комп'ютерних систем
Рівень вищої освіти другий, магістр
Освітньо-кваліфікаційний рівень магістр
Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія
(шифр і назва)
Спеціалізація Спеціалізовані комп'ютерні системи

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

“ ___ ” _____ 20__ року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Холостенко Олександр Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Інформаційно-вимірювальна система витрати природного газу безконтактним акустичним методом

Керівник роботи Нестерюк Олександр Геннадійович, к.т.н.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ректора ОНПУ від 16 листопада 2020 року № 467-в

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи магістра.

4. Зміст роботи

1. Аналіз сучасних методів і засобів вимірювання

2. Побудова математичної моделі

3. Розробка інформаційно-вимірювальної системи

5. Перелік ілюстративного матеріалу

Схема електрична принципова

Комп'ютерна презентація

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 16 листопада 2020 року_____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Обґрунтування актуальності теми дослідження	26.10.20р.-29.10.20р.	вик.
2.	Формулювання мети, задачі, об'єкту та предмету досліджень	30.10.20р.-01.11.20р.	вик.
3.	Огляд сучасних методів і засобів вимірювання	02.11.20р.-08.11.20р.	вик.
4.	Класифікація ультразвукових витратомірів	09.11.20р.-11.11.20р.	вик.
5.	Аналіз метрологічних характеристик УЗВ	12.11.20р.-15.11.20р.	вик.
6.	Побудова математичних моделей УЗВ	16.11.20р.-25.11.20р.	вик.
7.	Розробка структурної схеми системи	26.11.20р.-27.11.20р.	вик.
8.	Розробка принципової електричної схеми	28.11.20р.-03.12.20р.	вик.
9.	Розробка алгоритму роботи системи	04.12.20р.-06.12.20р.	вик.
10.	Розробка програмного забезпечення	07.12.20р.-10.12.20р.	вик.
11.	Оформлення кваліфікаційної роботи	11.12.20р.-13.12.20р.	вик.
12.	Передача роботи на перевірку науковому керівнику	14.12.20р.	вик.

Студент _____
(підпис)

Холостенко О. А.
(прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

Нестерюк О. Г.
(прізвище та ініціали)

З М І С Т

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	6
ВСТУП	7
1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ	10
1.1. Метод змінного перепаду тиску	12
1.2. Електромагнітний метод	14
1.3. Турбінний метод	16
1.4. Термоанемометричний метод	18
1.5. Вихровий метод	20
1.6. Ультразвуковий метод	21
1.7. Висновки по розділу 1	28
2. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ	30
2.1. Класифікація ультразвукових витратомірів	30
2.1.1. Класифікація за напрямом ультразвукового випромінювання	30
2.1.2. Класифікація за способом розміщення ПВП	31
2.1.3. Класифікація за кількістю вимірювальних каналів	32
2.1.4. Класифікація за методом вимірювання витрати	33
2.1.5. Класифікація за видом акустичного шляху	34
2.2. Покращення метрологічних характеристик УЗВ	35
2.3. Математична модель ультразвукового одноканального вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ	38
2.4. Математична модель ультразвукового двоканального вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ	43
2.5. Висновки по розділу 2	45
3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	47
3.1. Розробка структурної схеми	47
3.2. Схемотехнічна реалізація	49
3.2.1. Вибір п'єзоелектричних перетворювачів	49
3.2.2. Розробка схеми підсилювача	51
3.2.3. Вибір мікроконтролера	52
3.2.4. Вибір тактових генераторів	54
3.2.5. Розробка схеми управління та скидання мікроконтролера	55
3.2.6. Вибір індикатора	56
3.2.7. Розробка блоку електроживлення	58

	5
3.3. Алгоритмічна реалізація	59
3.4. Програмна реалізація	61
3.5. Висновки по розділу 3.....	62
ВИСНОВКИ	63
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	65
ДОДАТОК А	67
ДОДАТОК Б	68
ДОДАТОК В	71
ДОДАТОК Г	72

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- RTC – годинник реального часу
- ВПВ – вимірювальний перетворювач витрати
- ЗВТ – засоби вимірювальної техніки
- ІВС – інформаційно-вимірювальна система
- МК – мікроконтролер
- ПВП – первинний вимірювальний перетворювач
- ПЕА – перетворювач електроакустичний
- ПЕП – п'єзоелектричний перетворювач
- ТС – текуче середовище
- УЗ – ультразвуковий
- УЗВ – ультразвуковий витратомір

ВСТУП

Актуальність теми. Ситуація, що складається в Україні та світі з забезпеченням паливно-енергетичними ресурсами, потребує контролю за їх використанням в усіх сферах господарства.

Комплексна Державна програма енергозбереження України передбачає:

- удосконалення обліку, контролю за витратами енергоресурсів та створення автоматизованих систем управління їх транспортуванням та споживанням у галузях господарства незалежно від підпорядкованості та форм власності;
- скорочення втрат енергоресурсів на підприємствах побутової сфери, комунального господарства та у житловому секторі.

У Програмі зазначається, що щорічно на житлові, комунальні та побутові потреби витрачається п'ята частина паливних ресурсів та електроенергії і третина теплової енергії, які використовуються в економіці.

Закордонний досвід реалізації політики енергозбереження свідчить про комплексне впровадження енергозберігаючих заходів, зокрема, оснащення всіх енергоприймачів пристроями вимірювання, обліку та регулювання, а також впровадження оплати енергоносіїв, яка відповідає реальним витратам. Така стратегія суттєво впливає на скорочення споживання палива, енергії та інших ресурсів в економіці та невиробничій сфері.

На сьогоднішній день стоїть важливе завдання використання інформаційних технологій для створення національних витратомірів природного газу з метрологічними характеристиками на рівні кращих закордонних аналогів.

Вирішення такого актуального завдання у сфері витратометрії природного газу неможливе без вивчення та глибокого аналізу існуючих методів і засобів вимірювальної техніки витрати текучого середовища у закритих каналах, методів оброблення та подання результатів вимірювань. В першу чергу це стосується таких перспективних методів вимірювання витрат, як електромагнітний, термоанемометричний, ультразвуковий.

Тенденції розвитку витратовиміральної техніки останніх років дозволяють вважати ультразвуковий метод одним із кращих завдяки, зокрема, можливості безконтактного вимірювання будь-яких речовин, надійності приймально-передавальних елементів, зумовленою відсутністю рухомих частин, і, теоретично, необмеженому діапазону вимірювань [5].

Об'єктом дослідження є інформаційно-вимірвальна система витрати природного газу безконтактним акустичним методом в трубопроводах малих діаметрів.

Предметом дослідження є методи і засоби вимірювання витрати текучого середовища.

Метою кваліфікаційної роботи є вирішення науково-технічної задачі розробки та впровадження сучасного методу вимірювання витрати природного газу в трубопроводах діаметром до 40 мм.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- проаналізувати відомі методи і засоби вимірювання та обліку витрати текучих середовищ, сформулювати вимоги, які ставляться до сучасних систем автоматизованого обліку витрат;
- проаналізувати вимірювання витрати природного газу із застосуванням акустичних методів;
- побудувати математичні моделі вимірювання витрати природного газу безконтактним акустичним методом і розробити відповідні алгоритмічні методи підвищення точності вимірювань;
- розробити інформаційно-вимірвальну систему витрати природного газу безконтактним акустичним методом і оцінити її метрологічні характеристики.

Практичне значення отриманих результатів:

- застосування для проектування реального ультразвукового витратоміру результатів досліджень, представлених в даній роботі, для газопроводів малих діаметрів;

– запропоновані рекомендації щодо позиціонування на трубопроводі накладних п'єзоелектричних перетворювачів для забезпечення максимально можливої точності вимірювань.

Публікації. Основні положення та результати кваліфікаційної роботи викладені у публікації матеріалів міжнародної науково-практичної конференції і підготовлені до публікації в науковому журналі.

1. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ І ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ

В залежності від агрегатного стану всі речовини можуть знаходитися в твердому, рідинному і газоподібному станах. Два останніх у гідромеханіці об'єднують поняттям "рідини". Розрізняють також пару як газоподібну речовину з нестійким агрегатним станом. Далі в роботі під терміном "речовина" будемо розуміти певне текуче середовище (ГС) – природний газ, яке переміщується (транспортується) у закритому каналі (трубопроводі).

Витрата – це кількість речовини в одиницях маси (кг/с, кг/год) або в одиницях об'єму ($\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$), яка протікає через переріз трубопроводу за одиницю часу [9].

Одиниці маси дають більш повні відомості про кількість або витрату речовини, ніж одиниці об'єму, тому що об'єм речовин, а особливо газів, залежить від тиску і температури. Тому при вимірюванні об'ємних витрат газів для одержання порівняльних значень результати їх вимірювань приводять до стандартних умов: тиск $P_n = 101,32472$ кПа (762 мм рт. ст.), температура $T = 293,15$ К (20°C), відносна вологість $\phi = 80\%$. За кордоном стандартною температурою вважають $T = 288,15$ К (15°C).

Сучасні цифрові технології дозволяють визначати об'ємну витрату речовини, накопичувати дані щодо кількості речовини за деякий відрізок часу на виході первинного перетворювача будь-якого типу, тому через непринципову відмінність термінів "витратомір" і "лічильник" далі за текстом будемо використовувати термін "витратомір".

Методи вимірювань витрати текучого середовища базуються на перетворенні енергії потоку в інші види енергії, більш зручні для вимірювань, або в електричний сигнал. Тому структуру витратоміра можна подати як сукупність первинного перетворювача (ПП), вимірювального блоку (ВБ) і відлікового пристрою (ВП). Функції вимірювального блоку і відлікового пристрою можуть бути об'єднані у структурі обчислювального пристрою (ОП). Узагальнена структурна схема витратоміра зображена на рис. 1.1 [6].

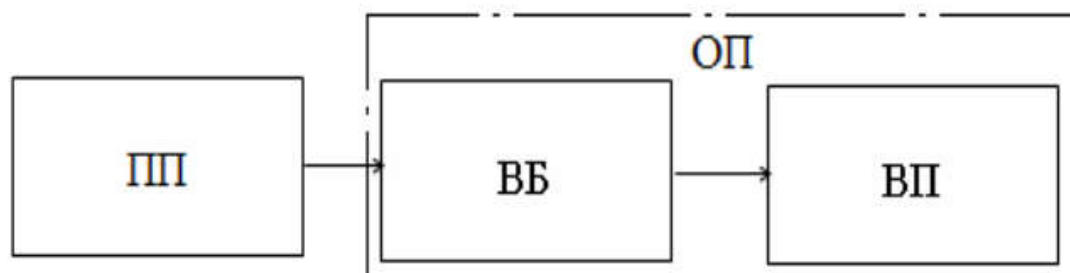


Рисунок 1.1 – Узагальнена структурна схема витратоміра

Аналіз публікацій з питань витратометрії у вітчизняних і закордонних періодичних виданнях та мережі Інтернет дає змогу навести приблизне відсоткове розподілення оприлюднених матеріалів, присвячених найбільш розповсюдженим типам витратомірів за видами фізичних процесів, що лежать в основі їх побудови (рис. 1.2).

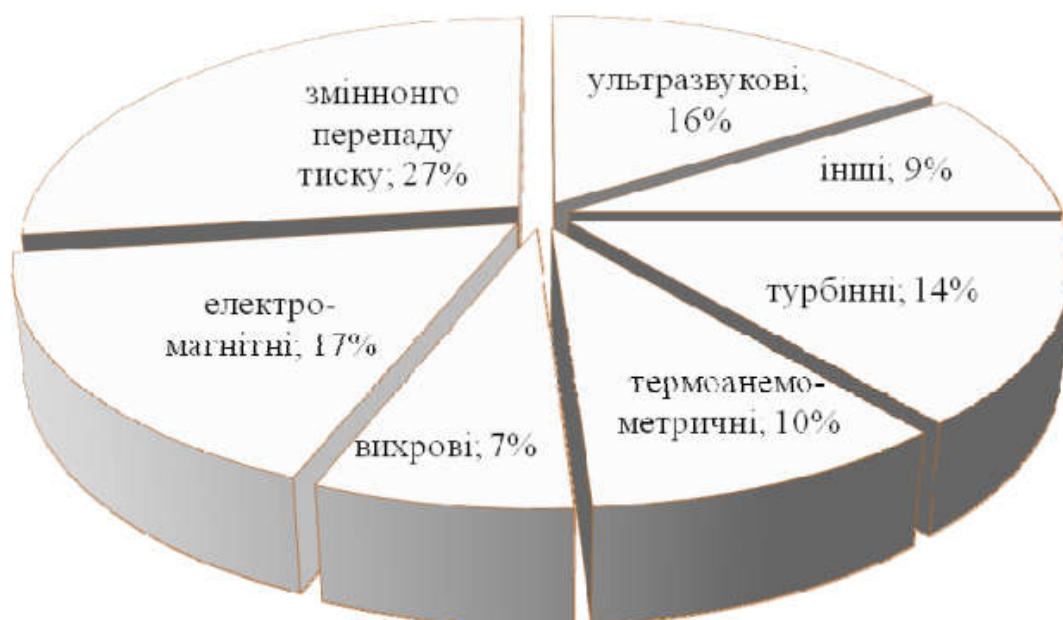


Рисунок 1.2 – Розподілення кількості публікацій, присвячених основним типам витратомірів

Коротко розглянемо і проаналізуємо методи вимірювання витрати текучого середовища, що складають понад 90% усіх згаданих вище, тобто методи змінного перепаду тиску, електромагнітні, турбінні, термоанемометричні, вихрові та ультразвукові методи.

1.1. Метод змінного перепаду тиску

Метод вимірювання витрат за перепадом тиску базується на залежності перепаду тиску в нерухомому, встановленому в трубопроводі, пристрої, що звужується, від витрати вимірюваної речовини. Звужуючий пристрій – наприклад, діафрагма (рис. 1.3) – тонкий диск з круглим отвором уздовж осі труби. Вхідна частина отвору має циліндричну форму, що переходить в конічне розширення. Після перерізу А струмінь звужується і середня швидкість потоку підвищується. Завдяки інерційності струмінь продовжує звужуватися і на деякій відстані після діафрагми. Місце найбільшого звуження знаходиться в перерізі В. Зростання швидкості на ділянці АВ супроводжується зменшенням статичного тиску від початкового значення P_A до мінімального P_B [9].

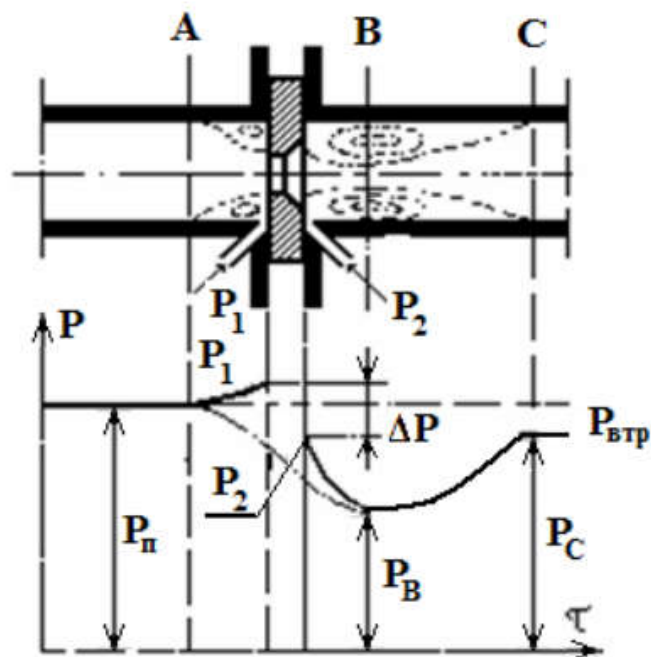


Рисунок 1.3 – Принцип вимірювання витрати за перепадом тиску

Після перерізу В починається розширення струменя, котре закінчується в перерізі С. Цей процес супроводжується зменшенням швидкості до початкової, зростанням статичного тиску до P_C , яке менше початкового P_{II} на величину втрати тиску $P_{ВТР}$ в пристрої, який звужується (рис. 1.3).

В витратомірах звичайно вимірюється перепад тиску не в перерізах А і В (тобто $P_A - P_B$), а безпосередньо до та після звужуючого пристрою (тобто $\Delta P = P_A - P_B$) і рівняння для об'ємної витрати має вигляд:

$$Q = \alpha \cdot \varepsilon \cdot S_0 \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot \Delta P}, \quad (1.1)$$

де α – коефіцієнт витрати, який залежить від так званого модуля звужуючого пристрою $m = S_0/S$ (тут S_0 – площа отвору звужуючого пристрою, а S – площа перерізу трубопроводу, m^2), який визначається за спеціальними графіками;
 ε – поправочний множник (на розширення вимірюваного середовища);
 ρ – густина середовища в перерізі А, $кг/м^3$.

Метод змінного перепаду тиску є фактично єдиним стандартизованим у повному обсязі. Його перевагами є:

- зручність і універсальність;
- уніфікація і взаємозамінність елементів вимірювальної схеми;
- можливість визначення градууювальної характеристики витратоміра розрахунковим шляхом;
- можливість вимірювання витрати речовини при різних температурах і тисках.

Однак, даному методу властиві й серйозні недоліки, основні з яких зумовлені:

- нелінійністю зв'язку об'єкта вимірювання (перепаду тиску) з

- вимірюваним параметром – об’ємом;
- можливістю застосування для вимірювання тільки однофазних текучих середовищ;
 - складністю промислового застосування при невеликих витратах ТС;
 - невеликим діапазоном вимірювання;
 - потребою в наявності достатньо довгих прямих відрізків трубопроводу;
 - обмеженням максимального діаметра трубопроводу;
 - невисокою точністю вимірювань при реальних умовах експлуатації.

1.2. Електромагнітний метод

До найбільш ефективних засобів вимірювання гідродинамічних параметрів рухомих середовищ відносяться засоби, що реалізують електромагнітний метод вимірювання витрат [9].

Електромагнітні витратоміри мають низку переваг:

- покази витратоміра не залежать від в’язкості і густини речовини, наявності непровідних твердих та газоподібних включень;
- шкала приладу лінійна;
- перетворювач витрат практично безінерційний і не створює втрат тиску.

Електромагнітний метод вимірювання витрат базується на фундаментальному законі електродинаміки, згідно з яким під час руху електропровідної рідини у магнітному полі в ній індукується електрорушійна сила (ЕРС) E , пропорційна векторному множенню швидкості U рідини та індукції B магнітного поля:

$$E = [U \cdot B]. \quad (1.2)$$

Вимірюючи цю ЕРС, яка у рідині не залежить від її провідності, за допомогою, зокрема, вимірювальних електродів, що контактують з потоком, при відомому B визначають швидкість рідини і, як наслідок, її витрату. Схема

електромагнітного витратоміра показана на рис. 1.4.

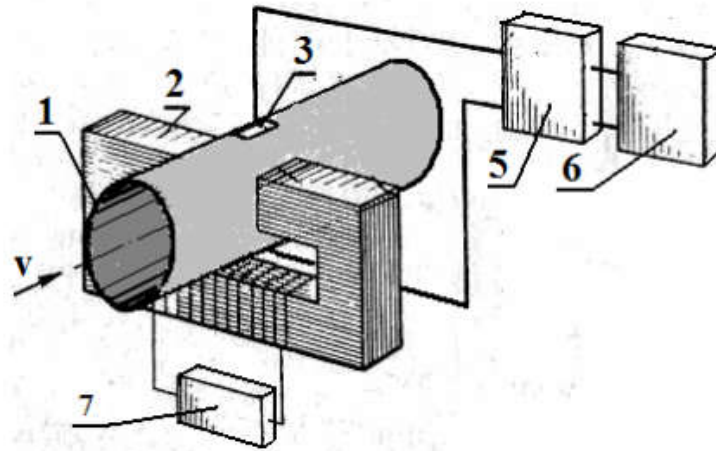


Рисунок 1.4 – Схема електромагнітного витратоміра

В електромагнітному витратомірі (ЕМВ) між полюсами магніту 2 розташований корпус 1 перетворювача з немагнітного матеріалу, який укритий усередині електричною. Через стінку труби в площині, перпендикулярній полюсам магніту 2 і ізолювано від неї введені та на її внутрішній поверхні розміщені електроди 3 і 4 (E_1 і E_2), які знаходяться в електричному контакті з рідиною (електрод 4 (E_2) на рисунку не показано). Силкові лінії магнітного поля спрямовані перпендикулярно до площини, яка проходить через вісь труби і лінію електродів. У відповідності до закону електромагнітної індукції (1.3) між електродами буде наводитись ЕРС. Джерело живлення 7 магніту створює змінне (для зведення до мінімуму поляризації електродів E_1 і E_2) магнітне поле. Вимірювання наведеної ЕРС здійснюється вимірювальним перетворювачем 5 і відображається на відліковому пристрої 6.

Як виявляється, не зважаючи на значні зусилля розробників, сигнал електромагнітних вимірювачів не тільки не залежить від індукованих електричних струмів, як припускалось раніше, а навпаки – цілком визначається цими індукованими електричними струмами $y = \sigma(E + [U-B])$

у вимірюваній рідині і залежить від фізико-хімічних властивостей останньої – її провідності σ .

Щоправда, залежність показників ЕМВ від фізико-хімічних властивостей вимірюваної рідини розробники звели до прийняттого мінімуму за допомогою застосування вимірювальної апаратури з високим вхідним опором. Однак, особливість формування сигналу ЕМВ за рахунок розподілення у вимірювальному середовищі індукованих електричних струмів і на сьогодні залишається принциповим фактором, який обмежує реальні метрологічні можливості електромагнітного методу, які до того ж здатні забезпечувати вимірювання витрати тільки електропровідної рідини і тому цілком непридатні для вимірювання витрат газів.

1.3. Турбінний метод

Витратоміри, принцип дії яких ґрунтується на перетворенні швидкості руху робочого тіла, що обертається під впливом потоку, в пропорційну об'ємну витрату вимірюваного середовища, називають тахометричними. В більшості випадків робоче тіло – перетворювач витрати – це турбіна.

В турбінному витратомірі (рис. 1.5) корпус перетворювача 1 є відрізком труби з двома фланцями, за допомогою яких він з'єднується з трубопроводом. Всередині корпусу встановлені струмовипрямлячі 2 і 4, з'єднані нерухомою віссю, на якій розташована турбіна 3. Частота обертання турбіни, яка пропорційна об'ємній витраті, перетворюється перетворювачем 6 в електричний сигнал або в частоту вихідної напруги, вимірювання яких виконується вимірювальним блоком 5 одним із відомих методів [9].

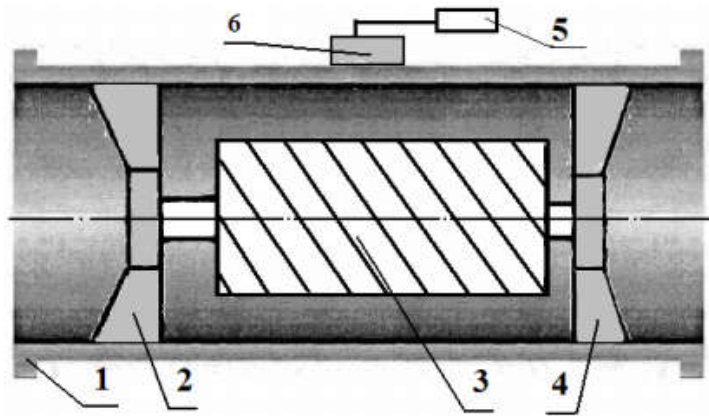


Рисунок 1.5 – Схема турбінного витратоміра

Для кутової швидкості обертання турбіни робоче рівняння витратоміра представлено у вигляді:

$$\Omega = A (Q - Q_{min}), \quad (1.3)$$

де A – коефіцієнт, який залежить від конструктивних параметрів турбінного датчика;

Q_{min} – мінімальна об'ємна витрата (чутливість витратоміра), м³/год;

Q – витрата, необхідна для зсуву турбіни з місця або зміни її усталеної швидкості обертання, м³/год.

Ці обидва параметра (A і Q_{min}) залежать також від структури і гідродинамічних характеристик, в'язкості ТС і визначаються в процесі безпосереднього градування ЗВТ. Це обумовлює основні недоліки турбінних витратомірів і обмежує галузі їх застосування.

Перевагами турбінних витратомірів є:

- можливість вимірювання витрат середовищ в широкому;
- широкий діапазон фізико-хімічних властивостей середовища;
- мала інерційність, що забезпечує вимірювання середніх і миттєвих витрат з мінімальними похибками;
- висока точність

Але таким ЗВТ притаманний і ряд принципових недоліків, які

обумовлені в першу чергу наступним:

- наявністю механічного тертя деталей та складових частин витратоміра;
- чутливістю до механічних забруднень середовища, пневмоударів;
- наявністю опору, в результаті чого виникають втрати тиску;
- більш вузьким діапазоном типорозмірів;
- шумністю.

Все це обмежує широке розповсюдження таких ЗВТ в реальних умовах експлуатації.

1.4. Термоанемометричний метод

Термоанемометричний метод вимірювання витрати використовує відому залежність між кількістю теплоти, що втрачає чутливий елемент (ЧЕ) перетворювача, і швидкістю руху текучого середовища.

Існують два типи термоанемометрів, що принципово відрізняються: термокондуктивні та термоелектричні анемометри [9].

В термокондуктивних анемометрах опір ЧЕ грає основну роль при вимірюванні витрати. Чутливий елемент (тонкий металевий, платиновий або нікелевий, дріт) включають у мостову схему і вимірюють або його опір при постійній потужності, що підводиться, або потужність нагріву при постійній величині опору. Таким чином, реалізація цього типу витратомірів ґрунтується на використанні метода мостових схем.

Термоелектричні анемометри відрізняються від термокондуктивних наявністю додаткового напівпровідникового опору або термопари, що використовують для вимірювання температури біля поверхні чутливого елемента. В приладах цього типу вимірювальний ланцюг може бути фізично відділений від нагрівного і тоді вимірювання проводиться за методом амперметра-вольтметра.

Перевагами термоанемометричних витратомірів є:

- широкий діапазон вимірюваних швидкостей витрати потоку. витрати,

що забезпечується за рахунок алгоритмічного коригування процесу вимірювання: методами аналітичного розрахунку вихідного сигналу чутливого елемента будують сукупність розподілу швидкостей у перерізі потоку і проводять перерахунок інформативного сигналу до потрібного швидкісного діапазону;

- мала величина теплової інерції застосовуваних термоелементів, що забезпечує високу швидкодію при вимірюванні витрат пульсуючих потоків, сумішей речовин і дозволяє використовувати термоанемометричні витратоміри при високоточних вимірюваннях, гідродинамічних випробуваннях та градуюванні витратомірів інших типів;
- можливість урахування теплофізичних параметрів вимірюваного середовища як функцій температури і тиску.

Основними недоліками термоанемометрів вважаються недостатня стабільність градуювання, обумовлена старінням чутливого елемента внаслідок перекристалізації матеріалу, і крихкість чутливого елемента. В процесі експлуатації відбувається неминуче окислення термоелектродів, випарювання з них, дифузія компонентів сплавів. Ці труднощі частково долають шляхом штучного “старіння” ЧЕ та його герметизації, що має виключати контакт чутливого елемента з вимірюваним середовищем.

Термоанемометричні методи вимірювання витрати ТС вважають потенційно найбільш точними і широко розповсюдженими при проведенні наукових досліджень у лабораторних умовах. Однак, в реальних умовах ці ЗВТ забезпечують заявлені похибки лише в чистих потоках з незмінними теплофізичними характеристиками та необхідністю очищення ЧЕ від забруднення, що вкрай обмежує їх використання при натурних вимірах.

1.5. Вихровий метод

Вихровий метод вимірювання витрати заснований на явищі вихроутворення за допомогою гвинтоподібних шнеків або за рахунок обтікання потоком текучого середовища тіл трикутної, циліндричної та інших форм [9].

Вихрові витратоміри розділяються на три суттєво відмінні групи:

- витратоміри, що мають в первинному перетворювачі нерухоме тіло, при обтіканні якого з обох його сторін поперемінно виникають вихори, що зриваються і створюють пульсації тиску;
- витратоміри, в первинному перетворювачі котрих потік закручується та, попадаючи у розширену частину труби, прецесує, створюючи при цьому пульсації тиску;
- витратоміри, в первинному перетворювачі котрих, струмінь, що витікає з отвору, здійснює автоколивання, створюючи також пульсації тиску.

Для дослідження характеристик вихрових витратомірів, окрім числа Рейнольдса (Re), яке характеризує режим течії середовища, служить число або критерій Струхаля (Sh), який характеризує періодичні процеси, що пов'язані з рухом рідини або газу. Критерій Струхаля, який виникає при вивченні обтікання потоком середовища, зокрема, циліндра має вигляд:

$$Sh = f d V^{-1}, \quad (1.4)$$

де f – частота пульсацій тиску газу або рідини в результаті періодичного зриву вихорів, Гц;

d – діаметр циліндра, м;

V – швидкість потоку, м/с.

Оскільки при сталості числа Sh частота f пропорційна V , то вимірюючи цю частоту, можна зробити висновок про швидкість V , і, як наслідок, про

об'ємну витрату середовища. Для отримання лінійної шкали вихрового витратоміра треба, щоб число Sh залишалось постійним у якомога більшому діапазоні чисел Re .

Перевагами вихрових витратомірів є відсутність рухомих частин, простота та надійність перетворювача витрати, незалежність показників від тиску та температури, лінійність шкали, стабільність показників.

Однак, цим ЗВТ притаманна і низка недоліків:

- значна втрата тиску (до 50 кПа);
- обмеження використання при малих швидкостях по причині важкості вимірювання сигналу, який має малу частоту;
- можливість використання лише для труб з діаметром від 25 до 300 мм;
- чимало конструкцій цих витратомірів непридатні для вимірювання забруднених та агресивних речовин.

1.6. Ультразвуковий метод

Ультразвуковий метод вимірювання витрат використовує:

- залежність швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища;
- зміни, які виникають при відбитті ультразвукової хвилі від неоднорідностей вимірюваного середовища, тобто ефект Доплера.

В основу ультразвукового методу вимірювання витрати ТС першої групи покладено фізичне явище геометричного (векторного) додавання середньої швидкості руху V вимірюваного середовища і швидкості c розповсюдження ультразвукової хвилі у цьому середовищі:

$$V_{\Sigma} = V + c . \quad (1.5)$$

Принципова схема ультразвукового витратоміра (УЗВ) наведена на рис. 1.6.

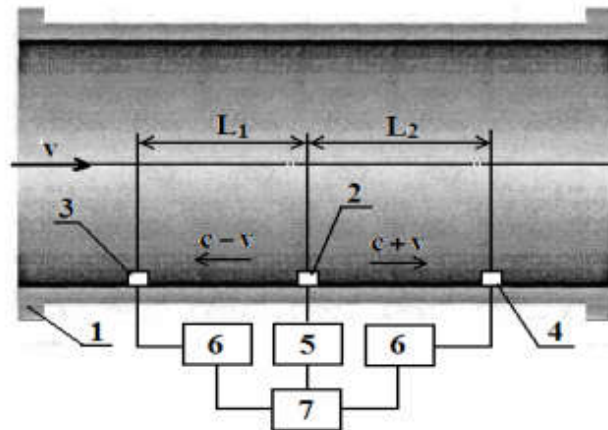


Рисунок 1.6 – Схема витратоміра з послідовним розташуванням п'єзоелементів

Конструктивно УЗВ являє собою відрізок трубопроводу 1, вздовж якого протікає вимірювана речовина, і в якому розташовані п'єзоелементи 2, 3, 4. Генератор ультразвукових коливань 5 збуджує п'єзоелемент 2 [11, 13]. Прийняті п'єзоелементами 3 і 4 сигнали перетворюються та перераховуються пристроями 6 і 7 у різницю між часом розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L_1}{c - v} - \frac{L_2}{c + v}, \quad (1.6)$$

де L_1 та L_2 – відстані між передавальним та приймальними п'єзоелементами, м.

Оскільки симетричність вимірювальної схеми забезпечити складно, застосовують схему з двома п'єзоелементами і комутатором, який по черзі змінює функції п'єзоелементів (випромінювача та приймача).

У цьому випадку електронна схема витратоміра визначає різницю (1.6) наступним чином:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L}{c-V} - \frac{L}{c+V} = \frac{2LV}{c^2} \frac{1}{1-\frac{V^2}{c^2}} \quad (1.7)$$

Якщо прийняти до уваги, що для текучих середовищ $c = (1000 - 1500)$ м/с, а швидкість потоку $V \sim 10$ м/с, то $V^2/c^2 \leq 10^{-4}$ і другим множником у виразі (1.7) завідомо можна знехтувати. Тоді, виразивши швидкість через об'ємну витрату Q (м³/год), отримаємо рівняння вимірювань ультразвукового витратоміра:

$$\Delta t = 2\psi \frac{L}{S c^2} Q, \quad (1.8)$$

де S – площа перерізу потоку, м²;

ψ – коефіцієнт, що враховує розподіл швидкостей у перерізі потоку.

Результат вимірювання – об'ємну витрату – визначимо із виразу (1.8) як функцію об'єкта вимірювання – різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища:

$$Q = \Delta t \frac{S}{2\psi L} c^2 \quad (1.9)$$

П'єзоелементи 2, 3 (рис. 1.6) у відрізьку трубопроводу 1 можна розташувати під кутом θ до напрямку потоку (рис. 1.7). Тоді за аналогією з формулами (1.7) і (1.8) можна записати:

$$\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow} = \frac{L}{c-V \cos\theta} - \frac{L}{c+V \cos\theta} \quad (1.10)$$

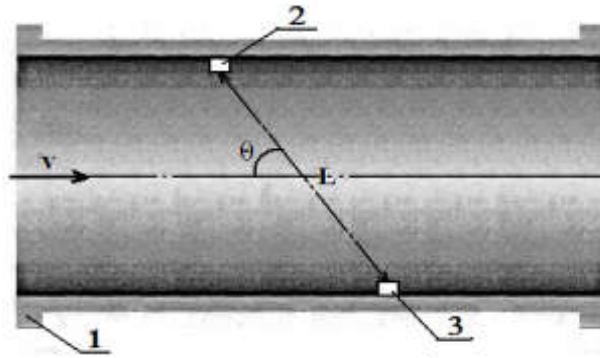


Рисунок 1.7 – Схема витратоміра з двома п'єзоелементами

Розглянуті вище приклади реалізують так званий часово-імпульсний ультразвуковий метод витратометрії [17, 18].

Якщо у формулі (1.10) замість різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку вимірюваного середовища ввести різницю фаз $\Delta\varphi$ прийнятих коливань, випромінених проти і вздовж напрямку потоку, то отримаємо так званий фазовий ультразвуковий метод вимірювання [17, 18].

Якщо у формулі (1.10) замість різниці часу Δt ввести різницю частот Δf прийнятих коливань, одночасно випромінених двома генераторами проти і вздовж напрямку потоку, то отримаємо так званий частотний ультразвуковий метод вимірювання [17, 18].

Сутність ультразвукового методу вимірювання витрати речовини, пов'язаного з ефектом Доплера – доплерівського методу, полягає в тому, що у відрізку трубопроводу 1 (рис. 1.8) неперервний сигнал частоти ω_0 з передавача 2, випромінюваний під деяким кутом, відбивається від неоднорідності текучого середовища і приймається приймачем 3 як сигнал з частотою ω_d .

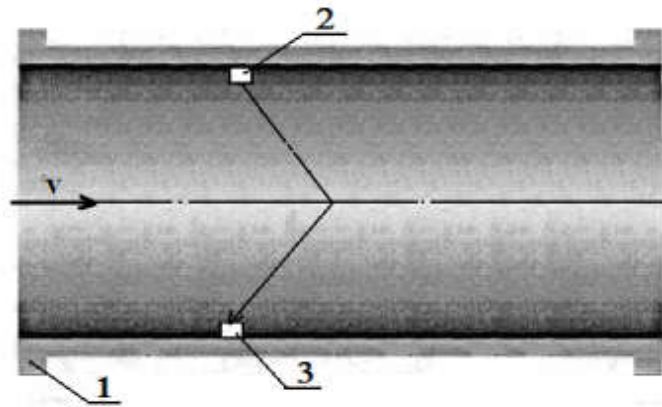


Рисунок 1.8 – Сутність побудови доплерівського витратоміра

Вираз для швидкості розсіювання запишемо наступним чином:

$$V = K \Delta\omega, \quad (1.11)$$

де K – коефіцієнт пропорційності, що залежить від кута нахилу і частоти випромінюваного сигналу;

$\Delta\omega = \omega_D - \omega_0$ – доплерівський зсув частоти сигналу.

Оскільки текуче середовище містить деяку випадково розташовану сукупність розсіювачів, можна говорити про сукупність прийнятих частот ω_{Di} , тобто деякий “доплерівський спектр”.

Для доплерівських витратомірів об’ємна витрата визначається як

$$Q_D = S V, \quad (1.12)$$

де V – середня швидкість потоку, що обчислюється за рівнянням, аналогічним (1.11), в якому замість доплерівського зсуву $\Delta\omega$ використано оцінку $\Delta^* \omega$ “центру тяжіння” “доплерівського спектру” (рис. 1.9) – сукупність частот ω_{Di} , отриманих приймачем від випадково розташованої у вимірюваній речовині сукупності розсіювачів.

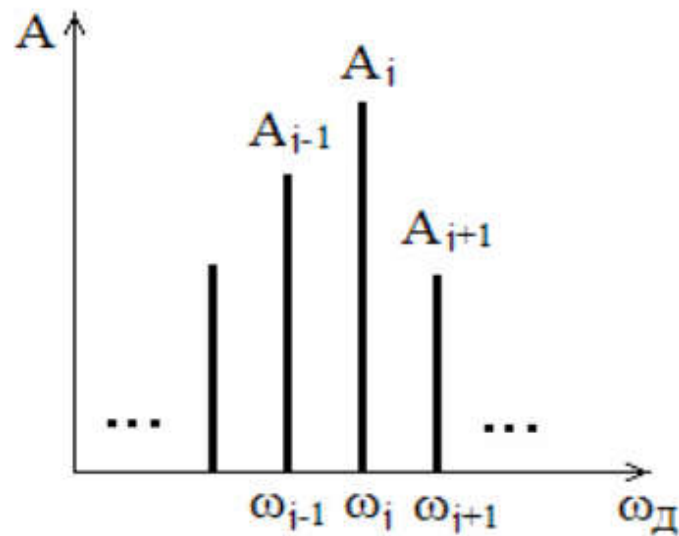


Рисунок 1.9 – “Доплерівський спектр”

Виникає завдання визначення оцінки центру розподілу дискретної випадкової величини (математичного сподівання). Через невизначеність результатів вимірювання алгоритм такого оцінювання потребує дослідження.

Існує також ультразвуковий метод визначення витрати ТС, заснований на вимірюванні зсуву ультразвукової хвилі, спрямованої перпендикулярно до напрямку потоку, вимірюваним потоком. Цей зсув залежить від швидкості вимірюваної речовини. Акустичні коливання випромінює один п'єзоелемент, а приймає один або два п'єзоелементи. Такий метод забезпечує достатній рівень чутливості, але точність вимірювання безпосередньо пов'язана зі станом поверхні труби, що відбиває випромінення.

Переваги ультразвукових витратомірів полягають у наступному:

- теоретично необмежений діапазон вимірювань;
- невисока похибка вимірювання;
- можливість застосування витратомірів для вимірювальних трубопроводів (ВТ) великих діаметрів;
- висока надійність первинного перетворювача, зумовлена відсутністю рухомих частин;

- висока надійність приймально-передавальних елементів;
- можливість безконтактного вимірювання будь-яких ТС;
- здатність відстежувати швидкі зміни швидкості потоку;
- відсутність викривлень потоку вимірюваного середовища та втрати тиску;
- стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу;
- висока чутливість, яка дає змогу виконувати індивідуальне градування;
- можливість вимірювання реверсивних потоків.

Слід відмітити, що оскільки чутливість ультразвукових витратомірів залежить від відношення V/c , можна вважати, що ці ЗВТ більш придатні до вимірювання витрати газів, але акустичний опір газів невеликий, тому ультразвуковим коливанням важко передати енергію, необхідну для переносу хвилі від випромінювача до приймача.

До недоліків розглянутих ультразвукових витратомірів слід віднести:

- залежність швидкості розповсюдження ультразвуку від фізико-хімічних характеристик вимірюваного середовища, що треба компенсувати або враховувати при обробці результатів вимірювань;
- залежність показів від числа Рейнольдса, обумовлену тим, що вимірюється не дійсна середня швидкість потоку, а середня його швидкість вздовж лінії випромінювання ультразвуку;
- паразитні сигнали, які утворюються за рахунок появи ревербераційної хвилі внаслідок відбиттів ультразвуку від границь звукопроводів (п'єзоелементів) і вимірюваного середовища;
- похибки вимірювання, що виникають при обчисленні різниці часів переміщення сигналів вздовж і проти напрямку потоку, які обумовлені асиметрією акустичних каналів, зокрема, в двоканальних витратомірах;
- чутливість до спотворень структури потоку, викликані наявністю місцевих опорів (МО);
- невеликий досвід практичної експлуатації, відсутність статистики з довготривалої стабільності;

- недостатньо розвинута нормативна база;
- відсутність метрологічного забезпечення (калібрування, повірки) УЗВ природного газу.

Відмітимо, що особливістю ультразвукового методу як предметної галузі є достатньо глибоке опрацювання процедур оброблення даних первинних перетворювачів, що використовують залежність швидкості розповсюдження ультразвукової хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища, і недостатньо повна відпрацьованість питань розроблення алгоритмів оброблення даних, отриманих від перетворювачів, заснованих на ефекті Доплера.

1.7. Висновки по розділу 1

Аналіз розглянутих методів вимірювання витрати текучого середовища і загальних характеристик витратомірів, які реалізують ці методи, вказує на те, що за сукупністю порівняльних характеристик найбільш перспективним для розроблення пристроїв вимірювання і обліку витрати ТС будь-якого виду у широких діапазонах витрат, діаметрів трубопроводів, тисків, температур, а також зміни швидкостей потоку є ультразвуковий метод.

Отже, серед проаналізованих методів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах, що використовують різноманітні фізичні явища та ефекти, можна виділити як найбільш перспективний ультразвуковий метод. Його основними перевагами є можливість вимірювання будь-яких ТС, теоретично необмежений діапазон вимірювань, висока надійність первинного перетворювача, стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу.

Особливості ультразвукового методу, який використовує залежність швидкості розповсюдження акустичної хвилі від швидкості та напрямку потоку вимірюваного середовища, визначають доцільність його удосконалення шляхом побудови відповідної математичної моделі з метою

зменшення основної похибки вимірювання за рахунок підвищення точності вимірювання різниці часу проходження зондуючого сигналу проти і вздовж потоку.

Автоматизований облік витрат ТС потребує використання таких ЗВТ, які могли б забезпечити адаптацію до конкретних умов застосування, що визначає ще одне із завдань – розробку нових або удосконалення існуючих спеціальних алгоритмів, відповідного програмного забезпечення, які реалізують ефективні методи обробки даних, для побудови сучасної системи автоматизованого обліку.

2. ПОБУДОВА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ

2.1. Класифікація ультразвукових витратомірів

Різноманіття параметрів, які залежать від швидкості вимірюваного середовища, зумовило велику кількість способів вимірювання затримки проходження сигналу від випромінювача до приймача і назад. З подальшим розвитком витратомірів даного типу перевага надається тим приладам, метрологічні характеристики яких не залежать від умов експлуатації – температури, тиску, концентрації домішок тощо [12, 17].

Ультразвукові витратоміри можна класифікувати наступним чином:

- за напрямом ультразвукового випромінювання,
- за способом розміщення первинного вимірювального перетворювача (ПВП),
- за кількістю вимірювальних каналів,
- за методом вимірювання витрати (принципом роботи),
- за видом акустичного шляху.

2.1.1. Класифікація за напрямом ультразвукового випромінювання

По спрямованості ультразвукового випромінювання витратоміри діляться на дві категорії:

- з прямим направленим випромінюванням – пара ПВП по черзі випромінює вузьконаправлені імпульси в бік один одного. Ця категорія, у свою чергу, поділяється на ті, що розміщені паралельно потоку, та на ті, що розміщені під кутом до потоку;
- з ненаправленим (сферичним) випромінюванням – випромінювач випромінює широконаправлений імпульс, адресований відразу декільком приймачам, розташованим вище і нижче по потоку.

Оцінка метрологічних характеристик:

1. Направлене випромінювання набагато частіше застосовується в промислових зразках витратомірів. Це пояснюється більш простим алгоритмом обчислень швидкості потоку через однозначності відстані, яку проходить зондуєчий імпульс.

2. Схема зі сферичним передавачем в теорії має ряд переваг: простіша конструкція через наявність лише одного випромінювача і декількох приймачів; дана схема дозволяє також проводити одночасне вимірювання швидкості проходження імпульсу проти і по потоку, що знижує чутливість приладу до дрібних коливань поля швидкостей. Однак на практиці подібна схема важко втілюється через складність створення передавача з досить широким кутом випромінювання і рівномірним випромінюванням у всіх напрямках.

2.1.2. Класифікація за способом розміщення ПВП

За способами розміщення ПВП ультразвукові витратоміри поділяються на категорії:

- з зануреними п'єзоелектричними перетворювачами (ПЕП) – ПЕП випускає зондуєчий імпульс безпосередньо в вимірюване середовище;
- з накладними п'єзоелектричними перетворювачами (витратоміри з заломленням) – ПВП встановлюється на стінку трубопроводу і зондуєчий імпульс випускається в стінку трубопроводу і потрапляє в вимірюване середовище, проходячи через стінку трубопроводу.

Оцінка метрологічних характеристик:

1. Найбільшу точність вимірювань забезпечують УЗВ із зануреними перетворювачами, тому що при такому розташуванні між ПВП найменша кількість перешкод для поширення зондуєчого імпульсу і виникає найменша кількість сторонніх шумів.

2. Пристрої з не зануреними ПЕП, як правило, застосовуються в якості накладних УЗВ. Даний тип приладів характеризується простотою установки (не вимагає врізки в трубопровід), проте більш низькою, порівняно із

стаціонарними УЗВ, точністю.

2.1.3. Класифікація за кількістю вимірювальних каналів

УЗВ поділяють також за кількістю каналів вимірювання так званих променів:

- одноканальні (олнопроменеві) – мають два п'єзоелемента, кожен з яких по черзі виконує функції випромінювання і прийому;
- двоканальні (лвопроменеві) – мають два випромінювача і два приймача, які створюють два незалежних акустичних канали; ці канали розташовані або паралельно, або перехрещуються;
- багатоканальні (багатопроневі) – мають більше двох каналів і застосовуються для вимірювання витрати деформованих потоків з метою досягнення підвищеної точності.

Оцінка метрологічних характеристик:

1. Одноканальні витратоміри застосовують для вимірювання витрати газу з розвиненим профілем швидкості і в випадках, коли не потрібно високої точності.

2. Двоканальні УЗВ застосовуються, як правило, на трубопроводах малого і середнього діаметрів у випадках, коли точність одноканального витратоміра є недостатньою.

3. Багатоканальні витратоміри застосовуються в трубопроводах великого діаметра і в випадках, коли профіль потоку істотно деформований і спотворений. Пристрої характеризуються підвищеною точністю вимірювань, меншою чутливістю до асиметрії потоку, яка знижується із збільшенням числа вимірювальних каналів.

2.1.4. Класифікація за методом вимірювання витрати

В даний час відомі три методи вимірювання витрати речовини за допомогою ультразвук (вони вже розглядалися в розділі 1.6):

1. Метод, заснований на різниці швидкості поширення ультразвукових хвиль, спрямованих по потоку і проти нього. Зондуючий імпульс в даному випадку випромінюється по черзі парою п'єзоелементів у напрямку потоку і проти нього. Даний метод реалізується трьома вимірювальними принципами:

1) часово-імпульсний – вимірюється різниця тривалості проходження коротких імпульсів, які спрямовані по потоку і проти нього;

2) фазовий – вимірюється різниця фазових зрушень УЗ коливань, які спрямовані по потоку і проти нього;

3) частотний – вимірюється різниця частот повторення коротких імпульсів або пакетів УЗ коливань, які спрямовані по потоку і проти нього.

2. Метод, заснований на доплерівському зсуві частоти ультразвукового сигналу, відбитого від часток вимірюваного потоку. Передавальний п'єзоелемент випромінює УЗ сигнал у вимірюване середовище. Приймальний п'єзоелемент сприймає відбитий від неоднорідностей потоку сигнал, який має доплерівський зсув частот. Мірою витрати є доплерівська різниця частот випромінюваного і відбитого сигналів.

3. Метод, оснований на геометричному зсуві УЗ сигналу, обумовленому рухом потоку речовини. Ультразвукові хвилі випромінюються у вимірюване середовище по нормалі до напрямку руху потоку. Два прийомних п'єзоелемента встановлюються поруч таким чином, що при нерухомому вимірюваному середовищі інтенсивності коливань, прийнятих кожним п'єзоелементом, рівні. При рухомій речовині ультразвукові хвилі поширюються в напрямку потоку, при цьому інтенсивність ультразвукових коливань на прийомних п'єзоелементах різна. Виміряна різниця сигналів на прийомних п'єзоелементах є мірою витрати потоку речовини. За своєю суттю даний метод відрізняється від часово-імпульсного тим, що вимірюється не час, а геометричний зсув променя.

Оцінка метрологічних характеристик:

1. Для високоточних вимірювань витрати доцільно застосовувати метод, заснований на різниці часів поширення ультразвукових хвиль, направлених по потоку і проти нього.

2. Доплерівський метод найбільш широко застосовується для вимірювання локальних швидкостей, а в галузі вимірювання витрати має обмежені можливості.

3. Внаслідок невеликої чутливості, крутизни градууючої характеристики неможливо отримати високу точність вимірювань методом геометричного зсуву ультразвукової хвилі.

2.1.5. Класифікація за видом акустичного шляху

По виду акустичного шляху витратоміри можна розділити на дві категорії:

- без відображення – зонduючий імпульс від передавача проходить через потік вимірюваного середовища і досягає приймача;
- з відображенням – зонduючий імпульс від передавача перед тим, як досягти приймача, один або більше разів відбивається від внутрішньої стінки вимірювального тракту. Усі відрізки шляху зонduючого імпульсу можуть лежати в одній площині або ні.

Оцінка метрологічних характеристик:

1. Перевагою конструкції з акустичними шляхами без відображень є однозначність визначення довжини шляху зонduючого імпульсу і, як наслідок, більш простий алгоритм обчислень швидкості потоку, а також менша чутливість приладу до сторонніх шумів.

2. Перевагою приладів, в яких зонduючий імпульс один або більше разів відбивається від внутрішніх стінок вимірювального тракту, є їх менша чутливість до дрібних випадкових пульсацій і нерівномірностей поля швидкостей потоку. Недоліками є чутливість до сторонніх шумів і ускладнений алгоритм виділення корисного сигналу.

2.2. Покращення метрологічних характеристик УЗВ

Практика розроблення, дослідження та застосування ультразвукових витратомірів, рівень розвитку елементної бази, зокрема інтегральної та обчислювальної техніки, забезпечують можливість створення багатоцільових засобів вимірювальної техніки, які можуть працювати в автоматизованих вимірювальних системах.

У розділі досліджуються побудовані на базі ультразвукового методу часово-імпульсні витратоміри, що можуть бути реалізованими у вигляді структури, поданої на рис. 1.1. При цьому вважається, що передавальні і приймальні або приймально-передавальні перетворювачі електроакустичні (ПЕА) розміщені під кутом до потоку вимірюваної речовини і утворюють один, два або декілька акустичних каналів.

Загальна похибка ультразвукового методу достатньо глибоко проаналізована при розгляді питань витратометрії. Це визначило підхід до розгляду цього питання і в даному розділі: оскільки теплофізичні параметри ТС в реальних умовах експлуатації змінюються при зміні температури і тиску і, як наслідок, приводять до додаткових похибок при виконанні вимірювань, вважається, що витратоміри, які розглядаються, працюють в ідеальних умовах, що обумовлює можливість урахування при обговоренні конкретного технічного рішення тільки основної складової похибки вимірювання [8].

Основна складова похибки ультразвукового методу вимірювання витрат визначається як сумарна похибка перетворення сигналу в вимірювальному каналі (тракті), тобто сума похибок об'єкта вимірювання (ОВ) – це похибки різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища (середньої швидкості V потоку); похибки визначення площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, кута нахилу акустичного каналу, довжини акустичного каналу; поправочного

коефіцієнту розподілу швидкості у перерізі потоку (коефіцієнту профілю потоку); похибки визначення швидкості ультразвуку в середовищі:

$$\delta_Q = \sqrt{\delta_{\Delta t}^2 + \sigma_S^2 + \delta_\theta^2 + \delta_L^2 + \delta_\psi^2 + 4\delta_c^2}, \quad (2.1)$$

- де δ_Q – основна відносна похибка вимірювання витрат, %;
- $\delta_{\Delta t}$ – відносна похибка визначення різниці часу розповсюдження сигналу, %;
- δ_S – відносна похибка визначення площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, %;
- δ_θ – відносна похибка визначення кута нахилу акаустичного каналу, %;
- δ_L – відносна похибка визначення довжини акустичного каналу, %;
- δ_ψ – відносна похибка визначення коефіцієнту профілю потоку, %;
- δ_c – відносна похибка визначення швидкості ультразвуку, %.

Внесок наведених похибок в основну відносну похибку вимірювання витрат (2. 1) має розподіл, відображений на рисунку 2.1.

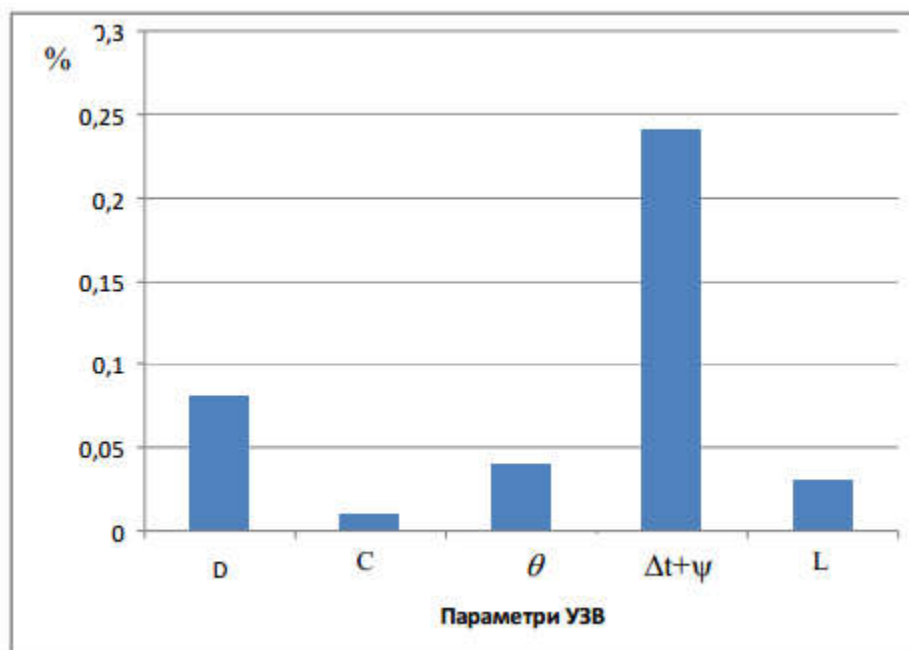


Рисунок 2.1 – Значення складових сумарної відносної похибки

З гістограми видно, що:

- відносна похибка визначення внутрішнього діаметру D , а значить, площини перетину вимірювальної ділянки УЗВ, складає приблизно 0,075%;
- відносна похибка визначення кута нахилу акустичного каналу складає приблизно 0,03%;
- сумарна частка відносної похибки визначення різниці часу розповсюдження сигналу та коефіцієнту профілю потоку досягає 0,25%;
- сумарна частка похибки визначення довжини акустичного каналу не перевищує 0,05%.

Таким чином, на основі виконаного аналізу можна зробити висновок, що покращення метрологічних характеристик УЗВ можливе, в першу чергу, за рахунок зменшення складової в основну похибку вимірювання, яка обумовлена похибками вимірювання різниці часу Δt розповсюдження ультразвукової хвилі проти і вздовж напрямку потоку, а також середньої швидкості V потоку вимірюваного середовища, точність визначення якої обумовлена поправочним коефіцієнтом розподілу швидкості у перерізі потоку (коефіцієнтом ψ профілю потоку).

Отже, покращення метрологічних характеристик витратомірів, робота яких базується на часово-імпульсному ультразвуковому методі, можливе за рахунок зменшення зазначеної складової похибки вимірювання.

Витратоміри, що реалізують часово-імпульсний ультразвуковий метод, розрізняють:

- за кількістю акустичних каналів – на одноканальні, двоканальні та багатоканальні;
- за конфігурацією акустичних каналів – на витратоміри з діаметральним або радіальним розташуванням каналів та на витратоміри з Z-, V-, W-, Δ -схемою акустичних каналів.

З метою удосконалення часово-імпульсного ультразвукового методу вимірювання текучого середовища виникає необхідність аналізу існуючих

моделей витратомірів та розробки рішень і моделей з покращеними характеристиками.

2.3. Математична модель ультразвукового одноканального вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ

Одноканальний часово-імпульсний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища передбачає декілька варіантів реалізації акустичного каналу [5, 7].

На рис. 2.2 наведено первинний перетворювач (ПП) ультразвукового витратоміра, акустичний канал якого утворений накладними приймально-передавальними ПЕА, розміщеними у так званий Z-спосіб під деяким кутом $\alpha_{ТС}$ до осі трубопроводу завдяки призмам.

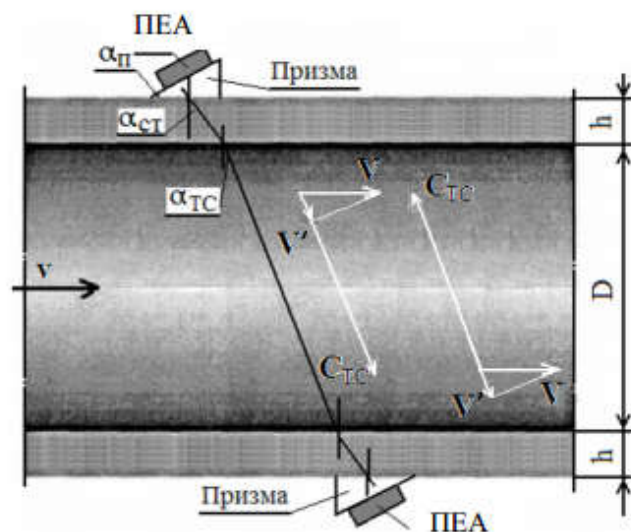


Рисунок 2.2 – Первинний перетворювач УЗВ із Z-схемою акустичного каналу

Безперечною перевагою накладних ПЕА є те, що, по-перше, вони не порушують цілісність трубопроводу і, по-друге, в потік вимірюваного середовища не вноситься ніяка перешкода.

ПЕА працюють по черзі в режимі передавання або приймання акустичного сигналу. Швидкість поширення сигналу C_{TC} геометрично складається зі швидкістю V потоку (рис. 2.2).

Сигнал перетинає трубопровід, проходячи відстань $L = D / \cos \alpha_{TC}$. Час поширення сигналу вздовж потоку в припущенні, що вимірюване середовище тече зліва направо, можна записати у вигляді:

$$t_{\uparrow} = 2 (t_{II} + t_{CT}) + \frac{D}{\cos \alpha_{TC} (C_{TC} + V \sin \alpha_{TC})} , \quad (2.2)$$

де t_{II} – час поширення ультразвуку в призмі, с;

t_{CT} – час поширення ультразвуку в стінці трубопроводу, с;

C_{TC} – швидкість розповсюдження ультразвуку в ТС.

Аналогічно, час поширення сигналу проти потоку можна обчислити за формулою:

$$t_{\downarrow} = 2 (t_{II} + t_{CT}) + \frac{D}{\cos \alpha_{TC} (C_{TC} - V \sin \alpha_{TC})} , \quad (2.3)$$

Взявши різницю $\Delta t = t_{\downarrow} - t_{\uparrow}$ і вирішивши рівняння відносно V , отримаємо:

$$V = \frac{\frac{C_{TC}}{\sin \alpha} (t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{(t_{\downarrow} - t_{\uparrow}) - 4 (t_{II} - t_{CT})} \quad (2.4)$$

У відповідності до закону Снелліуса:

$$\frac{C_{TC}}{\sin \alpha_{TC}} = \frac{C_{II}}{\sin \alpha_{II}} = f(\alpha_{II}, C_{II}) = const \quad (2.5)$$

де C_{II} – швидкість ультразвуку в матеріалі призми, м/с;
 α_{II} – кут між вертикаллю і напрямком вводу ультразвукових коливань в стінку трубопроводу, який дорівнює куту призми, град.

Відповідно до (2.4) та (2.5) остаточно математична модель (рівняння вимірювань) представимо у вигляді:

$$V = \frac{f(\alpha_{II}, C_{II}) (t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{(t_{\downarrow} - t_{\uparrow}) - 4 (t_{II} - t_{CT})} \quad (2.6)$$

Із отриманої математичної моделі одноканального УЗВ випливає, що результат вимірювання:

- по-перше, не залежить від швидкості розповсюдження ультразвуку C_{TC} у вимірюваному середовищі;
- по-друге, оскільки кут призми α_{II} при експлуатації не змінюється, то f , а значить і V , залежать тільки від швидкості ультразвуку C_{II} в матеріалі призми (в призмі, виготовленій з полістиролу, зміна C_{II} в робочому діапазоні температур від 0°C до 50°C не перевищує 0,25%);
- по-третє, величина V визначається тільки результатами вимірювання часових інтервалів.

Таким чином, основна похибка вимірювання витрати Q середовища визначається відносною похибкою вимірювання швидкості речовини δ_V , а швидкість, в свою чергу, згідно з (2.6), обумовлена кінцевою роздільною здатністю θ вимірювача часових інтервалів:

$$\delta_V = \frac{\theta}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Різниця Δt часів розповсюдження сигналів вздовж і проти потоку прямо пропорційна довжині шляху поширення сигналів. Тому при малих діаметрах трубопроводу необхідно довжину шляху поширення сигналу збільшувати. На рис. 2.3 наведено приклади розміщення п'єзоелементів у V-спосіб (рис. 2.3, а) та у W-спосіб (рис. 2.3, б), які дозволяють збільшити довжину акустичного каналу.

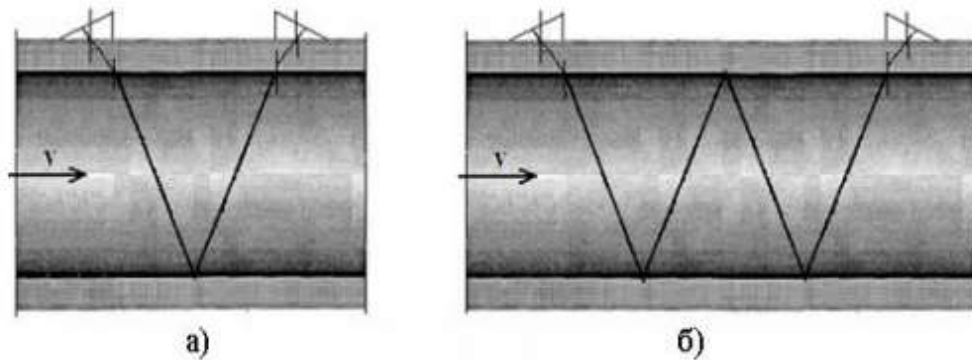


Рисунок 2.3 – Варіанти збільшення довжини акустичного каналу

Розглянуті приклади побудови одноканальних первинних перетворювачів передбачають діаметральне розташування п'єзоелементів акустичного каналу по різні боки труби (рис. 2.2) або з одного боку труби (рис. 2.3), при цьому рівняння вимірювань (2.6) залишається незмінним.

Можна зробити висновок про зворотно-пропорційну залежність відносної похибки вимірювання швидкості середовища δ_v , (а значить і витрати δ_Q) від кількості відбиттів ультразвукового випромінювання, тобто із збільшенням кількості відбиттів похибка вимірювання швидкості середовища зменшується на їх кількість:

$$\delta_{v_n} = \frac{\theta}{\Delta t_n} = \frac{\theta}{\Delta t} \quad (2.8)$$

На рисунках 2.4, 2.5 наведені графіки залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища δ_V від n (рис. 2.4) та від θ для різної кількості відбиттів n (рис. 2.5):

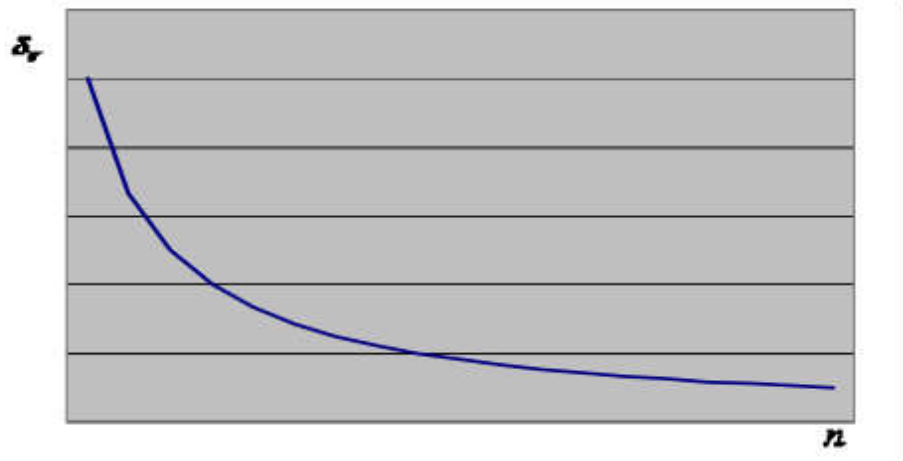


Рисунок 2.4 – Графік залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища від кількості відбиттів

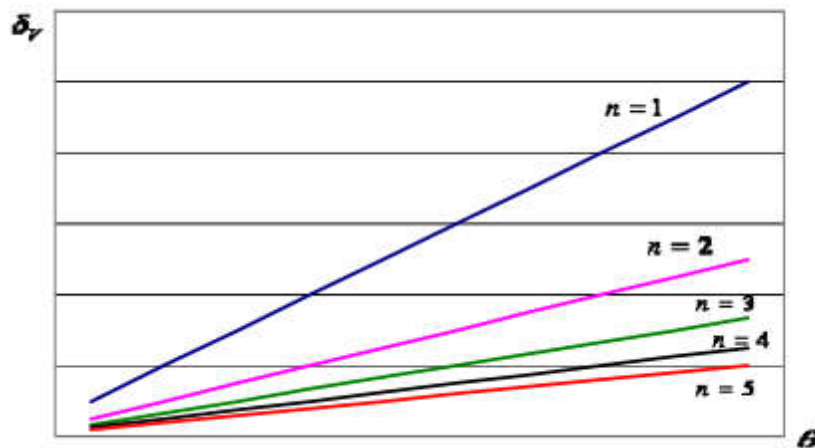


Рисунок 2.5 – Графік залежності похибки вимірювання швидкості руху середовища для різної кількості відбиттів

Залежність відносної похибки вимірювання витрати середовища δQ_n від часу розповсюдження сигналу Δt для витратоміру з багаторазовим відбиттям ультразвукового випромінювання дана має вигляд:

$$\delta Q_n = \frac{\partial Q_n}{\Delta t} = \frac{\delta Q}{n} \quad (2.9)$$

Цю підтверджує раніше зроблений висновок (2.8) про те, що відносна похибка вимірювання швидкості потоку та витрати середовища УЗВ обумовлена похибкою вимірювання часу розповсюдження ультразвукового сигналу і може бути зменшена у кількість разів, яка дорівнює кількості відбиттів цього сигналу у трубопроводі.

2.4. Математична модель ультразвукового двоканального вимірювального перетворювача швидкості текучих середовищ

Для побудови первинного перетворювача двоканального часово-імпульсного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості (а значить і витрати) текучих середовищ достатньо забезпечити взаємоперпендикулярне діаметральне розташування акустичних каналів, де приймально-передавальні п'єзоелектричні перетворювачі розміщені з одного боку або по різні боки труби [5, 7].

Час поширення сигналу вздовж і проти потоку обчислюють, як відмічалось раніше, за формулами:

$$t_{\uparrow} = (t_{\uparrow 1} + t_{\uparrow 2})/2 \quad (2.10)$$

$$t_{\downarrow} = (t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2})/2 \quad (2.11)$$

де $t_{\uparrow 1}$, $t_{\uparrow 2}$, $t_{\downarrow 1}$, $t_{\downarrow 2}$ – результати спостереження часу поширення сигналу вздовж і проти потоку, виміряні відповідно у першому і другому каналах.

Розраховані за (2.10) і (2.11) значення відповідних часів поширення ультразвукових сигналів підставимо у рівняння вимірювання для хордового розташування вимірювальних каналів, яке має вигляд:

$$V = \frac{C_{TC}}{\sin \alpha} \frac{(t_{\downarrow} - t_{\uparrow})}{(t_{\downarrow} + t_{\uparrow})} \quad (2.12)$$

В результаті отримаємо математичну модель – рівняння вимірювання для двоканального часово-імпульсного ультразвукового вимірювального перетворювача швидкості:

$$V = \frac{C_{TC}}{\sin \alpha} \frac{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} - t_{\uparrow 1} - t_{\uparrow 2})}{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} + t_{\uparrow 1} + t_{\uparrow 2})} \quad (2.13)$$

Із отриманої математичної моделі двоканального УЗВ випливає, що результат вимірювання визначається як результатами вимірювання часових інтервалів, так і швидкістю розповсюдження ультразвуку C_{TC} у вимірюваному середовищі.

При відомій площі S поперечного перерізу каналу вимірювання об'ємна витрата визначається за формулою:

$$Q = S V \quad (2.14)$$

Підставивши (2.12) у (2.13), отримаємо:

$$Q = \frac{S C_{TC}}{\sin \alpha} \frac{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} - t_{\uparrow 1} - t_{\uparrow 2})}{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} + t_{\uparrow 1} + t_{\uparrow 2})} \quad (2.15)$$

Тепер підставимо замість S формулу обчислення площі круга і отримаємо остаточну формулу визначення об'ємної витрати природного газу у двоканальній системі вимірювання:

$$Q = \frac{\pi D^2 C_{TC}}{4 \sin \alpha} \frac{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} - t_{\uparrow 1} - t_{\uparrow 2})}{(t_{\downarrow 1} + t_{\downarrow 2} + t_{\uparrow 1} + t_{\uparrow 2})} \quad (2.16)$$

де α – кут вводу ультразвукових коливань у ТС – природний газ,
 D – внутрішній діаметр газопроводу,
 C_{TC} – швидкість розповсюдження ультразвуку в природному газі.

Обчислення у такий спосіб дозволяє зменшити основну абсолютну похибку вимірювання витрати в порівнянні з одноканальним первинним перетворювачем приблизно в $\sqrt{2}$ разів.

2.5. Висновки по розділу 2

Велика кількість і різноманітність конструкцій і схем УЗВ викликані постійним вдосконаленням ультразвукового методу як найбільш перспективного методу вимірювання витрати речовини. Ті чи інші конструкції спеціально створювалися для певних умов. Так, наприклад, накладні УЗВ просто незамінні у випадках, коли необхідно проводити облік енергоносія без зупинки технологічного процесу. А багатоканальні УЗВ характеризуються високою точністю вимірювання, але при цьому мають велику вартість.

В розділі розглянуто та удосконалено математичні моделі часово-імпульсного одноканального та двоканального ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища – природного газу. Ці моделі визначають методи розрахунків об'ємної витрати текучого середовища, придатні для втілення у вимірювальному блоці витратоміра.

Запропоновано до реалізації:

- одноканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища із діаметральним розміщенням акустичних каналів, який дозволяє за рахунок багаторазового відбиття сигналу зменшити відносну похибку вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища у кількість разів, пропорційну кількості перетинань сигналом перерізу трубопроводу;
- двоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який передбачає обробку результатів вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища і, як результат, зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку приблизно у 1,4 рази.

Виходячи з класифікації УЗВ, оцінки метрологічних характеристик, а також з побудованих математичних моделей для інформаційно-вимірювальної системи витрати природного газу в трубопроводах малих діаметрів виберемо пристрої, які об'єднують в собі такі якості:

- реалізують часово-імпульсний вимірювальний принцип,
- мають два вимірювальних канали;
- мають накладні п'єзоелектричні перетворювачі, тобто безпосередньо не контактують з вимірюваним середовищем.

Таким чином, в розробці інформаційно-вимірювальної системи витрати природного газу безконтактним акустичним методом в трубопроводах малих діаметрів зупинимо свій вибір на часово-імпульсному двоканальному ультразвуковому методі вимірювання витрати текучого середовища з накладними первинними перетворювачами.

3. РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ

3.1. Розробка структурної схеми

Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи представлена на рис. 3.1.

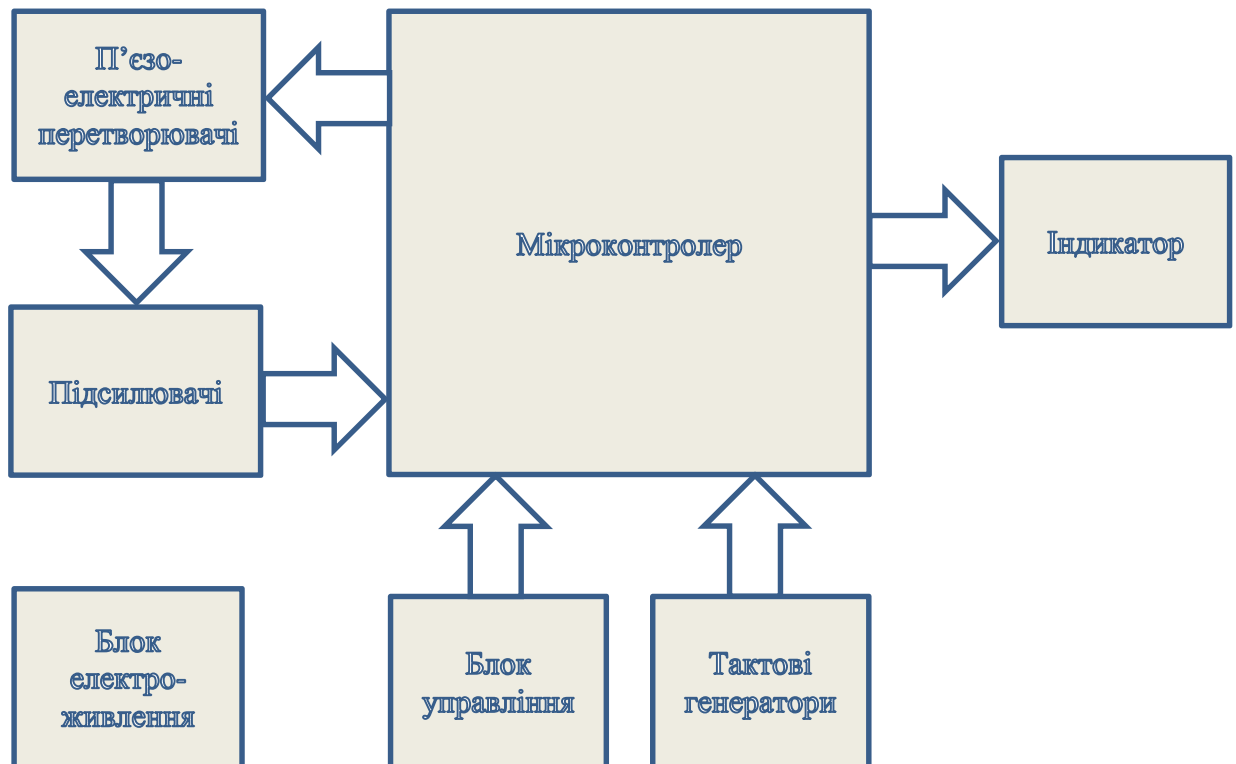


Рисунок 3.1 – Структурна схема інформаційно-вимірювальної системи

Система працює наступним чином. Функцію первинних перетворювачів сигналу виконують п'єзоелектричні перетворювачі (ПЕП).

Мікроконтролер (МК) виконує функції і вимірювального блоку, і відлікового пристрою.

МК генерує зондуючі імпульси, які подаються на п'єзоелектричні перетворювачі.

Під дією зондуючих імпульсів ПЕП-передавачі випромінюють ультразвуковий сигнал у вимірюване середовище, а ПЕП-приймачі приймають їх, перетворюють в електричний сигнал і через підсилювач надсилають до МК.

За рахунок застосування алгоритмічних методів оброблення даних, МК обчислює час проходження імпульсів за та проти потоку газу в трубопроводі і, відповідно, його витрату.

На індикатор виводиться поточне значення витрати і накопичений обсяг споживання.

За допомогою блоку управління можна зчитати дані про споживання за вибраний період.

Тактові генератори забезпечують роботу системи з необхідною тактовою частотою, включаючи годинник реального часу.

Блок електроживлення забезпечує необхідну напругу живлення компонентів системи.

3.2. Схемотехнічна реалізація

3.2.1. Вибір п'єзоелектричних перетворювачів

Принцип дії п'єзоелектричних перетворювачів заснований на п'єзоелектричному ефекті – явищі виникнення електричної поляризації під дією механічної напруги.

Розглянемо коротко умовну класифікацію ультразвукових ПЕП за різними ознаками [11, 16].

За кутом введення коливань:

- прямі перетворювачі вводять та (або) приймають коливання за нормаллю до поверхні об'єкта в точці вводу;
- похилі перетворювачі вводять та (або) приймають коливання в напрямках, відмінних від нормалі до поверхні об'єкту.

За способом розташування випромінювача та приймача УЗ сигналу:

- суміщені ПЕП, де один і той же п'єзоелемент працює як в режимі випромінювання, так і в режимі прийому;
- роздільно-суміщені перетворювачі, де в одному корпусі розміщені два п'єзоелемента, один з яких працює в режимі випромінювання, а другий – в режимі прийому.

За частотою коливань:

- високочастотні УЗ ПЕП умовно можна обмежити діапазоном 4–5 МГц. Таку частоту зазвичай застосовують для об'єктів розміром порядку 20мм;
- середньочастотні УЗ ПЕП з діапазоном частот 1,8–2,5 МГц. Перетворювачі з даним діапазоном частот застосовуються для контролю об'єктів більшого розміру;
- низькочастотні УЗ ПЕП з діапазоном частот 0,5–1,8 МГц використовуються для контролю об'єктів з високим коефіцієнтом затухання.

Для нашої інформаційно-вимірювальної системи мають бути застосовані контактні, похилі, суміщені, високочастотні перетворювачі, так як вони повинні встановлюватись на трубопровід малого діаметру і випромінювати сигнал під певним кутом до осі трубопроводу, при цьому обмеженість місця установки перетворювачів вимагає їх суміщеного виконання.

Отже, виберемо для нашої схеми п'єзоелектричні перетворювачі П121-5-55-d25 з такими характеристиками:

- кут призми – 55 градусів;
- ефективна частота 5 МГц;
- відношення сигнал/шум 16 дБ;
- діаметр контролюємої труби 25 мм;
- габаритні розміри 25 x 20 x 20 (мм).

Зовнішній вигляд перетворювача П121-5-55-d25 зображений на рис. 3.1, а схема підключення – на рис. 3.2. Даний перетворювач має роз'єм Lemo, який через відповідний коаксіальний кабель підключається до роз'єму BNC на модулі мікроконтролера.



Рисунок 3.1 – Зовнішній вигляд п'єзоелектричного перетворювача

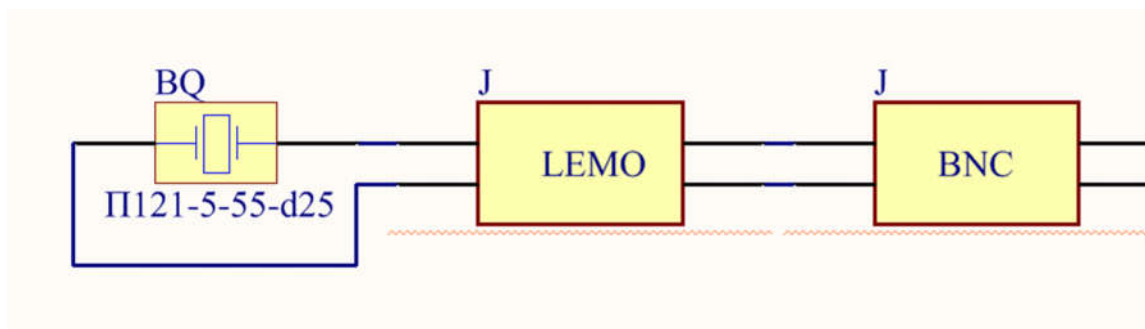


Рисунок 3.2 – Схема підключення п'єзоелектричного перетворювача

Так як у нас двоканальна вимірювальна система, то на кожний канал буде задіяно по два перетворювача, при цьому кожен з них в певний момент часу буде працювати і як випромінювач, і як приймач УЗ сигналу.

3.2.2. Розробка схеми підсилювача

Під впливом ультразвукових коливань, створених у текучому середовищі ПЕП-випромінювачем під дією зондуєчого імпульсу, ПЕП-приймач генерує електричний сигнал. Але так як акустичний опір газів невеликий, то ультразвуковим коливанням важко передати енергію, необхідну для переносу хвилі від випромінювача до приймача. З цієї причини амплітуда сигналу, створеного приймачем, невелика і складає приблизно $100 \div 200$ мВ і цей сигнал необхідно підсилити.

Схема підсилювача напруги на операційному підсилювачі NE5534P, включеному за неінвертуючою схемою, зображена на рис. 3.3.

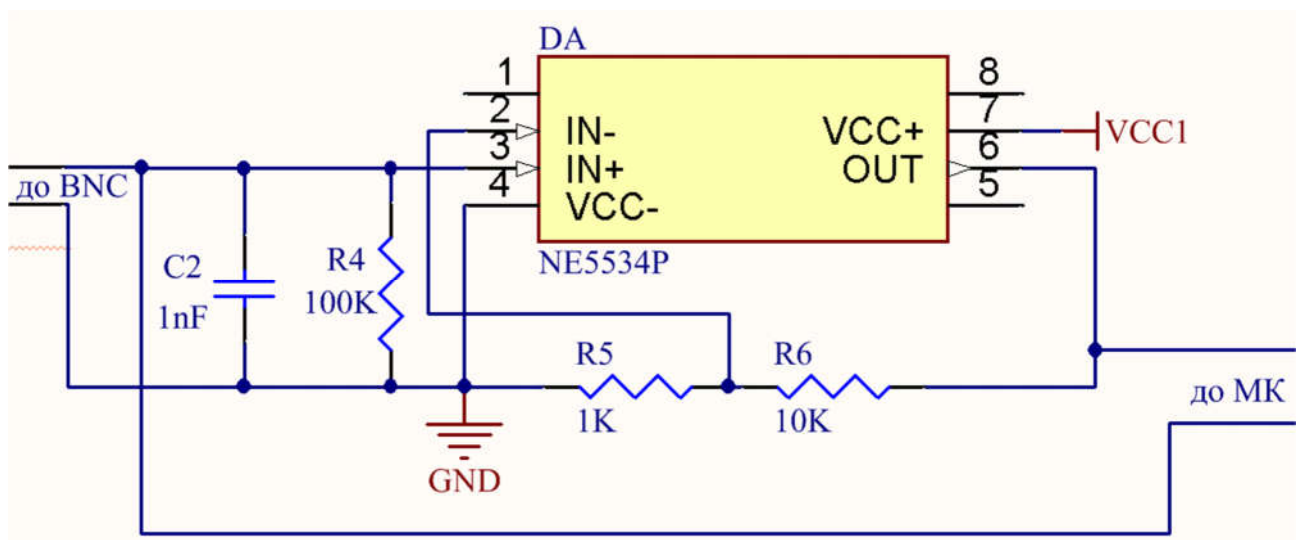


Рисунок 3.3 – Схема підсилювача сигналу

В цій схемі підсилюваний сигнал подається на неінвертуючий вхід операційного підсилювача, а сигнал з виходу через дільник напруги подається на

інвертуючий вхід. Коефіцієнт підсилення за такою схемою визначається за формулою:

$$k = 1 + \frac{R6}{R5} = 1 + \frac{10k}{1k} = 11 \quad (3.1)$$

Робоча частота операційного підсилювача NF5534P така ж як і робоча частота перетворювача і складає 5 МГц.

Так як в нашій двоканальній системі кожен з чотирьох перетворювачів в певний момент часу буде працювати як приймач, то і підсилювачів має бути теж чотири.

3.2.3. Вибір мікроконтролера

В проектуємій ІВС застосуємо мікроконтролер з кількістю портів, достатньою для задіяних периферійних пристроїв. Система має бути швидкодіюною, тому що частота кожного з чотирьох п'єзоелектричних перетворювачів складає 5 МГц.

Зупинимо свій вибір на мікроконтролері STM32F100RBT6B, який виготовляється компанією STMicroelectronics. Даний елемент буде центральним в нашій системі – його схема підключення зображена на рис. 3.4 [2].

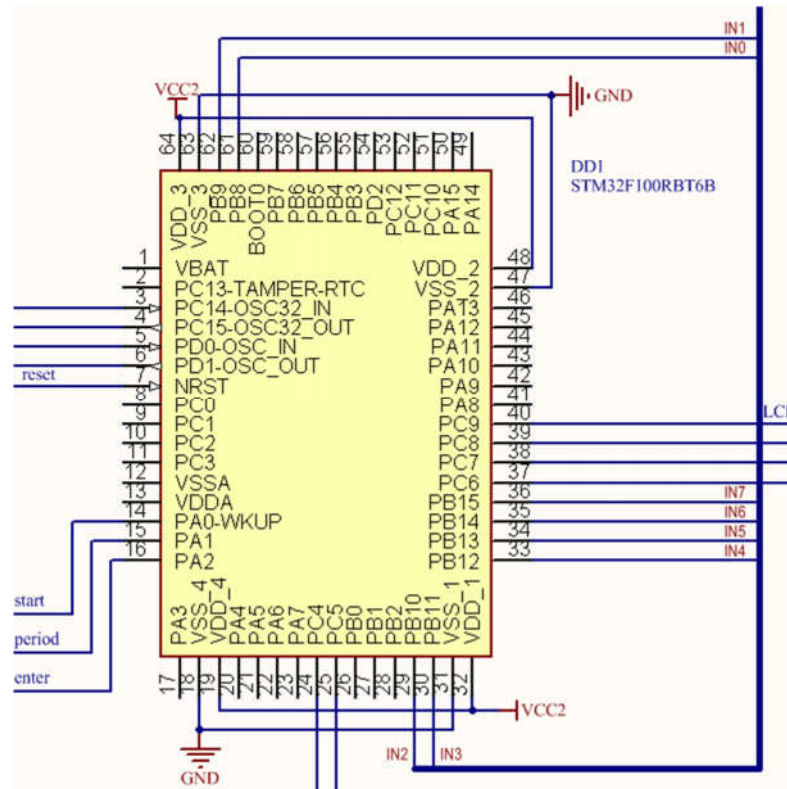


Рисунок 3.4 – Схема підключення мікроконтролера STM32F100RBT6B

Мікроконтролер виконаний в корпусі LQFP-64. Основою контролера є ядро ARM Cortex-M3. Максимальна частота ядра 24 МГц. Об'єм пам'яті програм складає 128 кБ, тип пам'яті програм FLASH, об'єм оперативної пам'яті 8 кБ.

Кількість входів-виходів мікроконтролера 51 – це 16-розрядні порти А, В, С та три лінії порту D. Ще в нього досить розвинена периферія, є АЦП і ЦАП.

Мікроконтролер має 12 таймерів, інтерфейси I2C, IRDA, LIN, SPI, UART, USART. Діапазон напруги електроживлення контролера складає 2...3,6 В.

Лінії PB8÷ PB15 порту В підключені до каналів вимірювання: чотири підключення напряму до перетворювачів через BNC і чотири до виходів підсилювачів напруги.

Ініціалізація та запуск обчислення часу проходження імпульсів через вимірюване середовище виконується кнопкою START, яка підключена до виводу PA0.

Кнопки PERIOD та ENTER підключені до виводів PA1 та PA2 відповідно. Цими кнопками задається період споживання, інформацію по якому треба вивести на LCD-індикатор.

Виводи PC4÷PC9 порту C підключені до LCD-індикатора для виведення інформації про поточний обсяг витрати газу та накопичений.

Напруга електроживлення величиною 3,3 В подається на виводи 19, 32, 48, 64 мікроконтролера. Виводи 18, 31, 47, 63 мікроконтролера підключені до загального проводу.

3.2.4. Вибір тактових генераторів

Схема тактових генераторів IBC наведена на рис. 3-5.

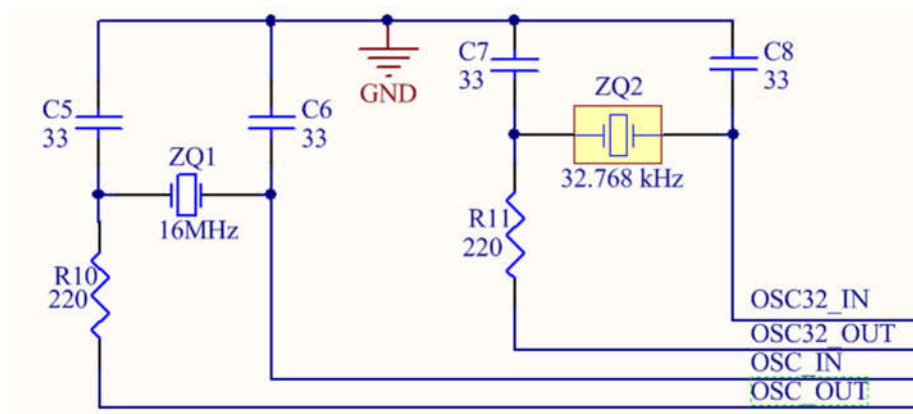


Рисунок 3.5 – Схема тактових генераторів

Тактова частота 16 МГц задається кварцовим резонатором ZQ1. Елементи C5, C6, R10 забезпечують роботу тактового генератора із заданою частотою. Один вивід ZQ1 підключений до входу мікроконтролера OSC_IN, а другий через резистор R10 – до виходу мікроконтролера OSC_OUT.

В доповнення до тактового генератора запроектовано задаючий генератор для годинника реального часу RTC, який вбудований в мікроконтролер STM32F100RBT6B. Цей генератор виконаний на кварцовому резонаторі ZQ2,

який задає частоту 32,768 кГц, та елементах C7, C8, R11. Один вивід ZQ2 підключений до входу мікроконтролера OSC32_IN, а другий через резистор R11 – до виходу мікроконтролера OSC32_OUT.

Годинник реального часу використовується для задання відповідності періодів споживання фактичним періодам.

3.2.5. Розробка схеми управління та скидання мікроконтролера

Схема ініціалізації та скидання мікроконтролера наведена на рис. 3.6.

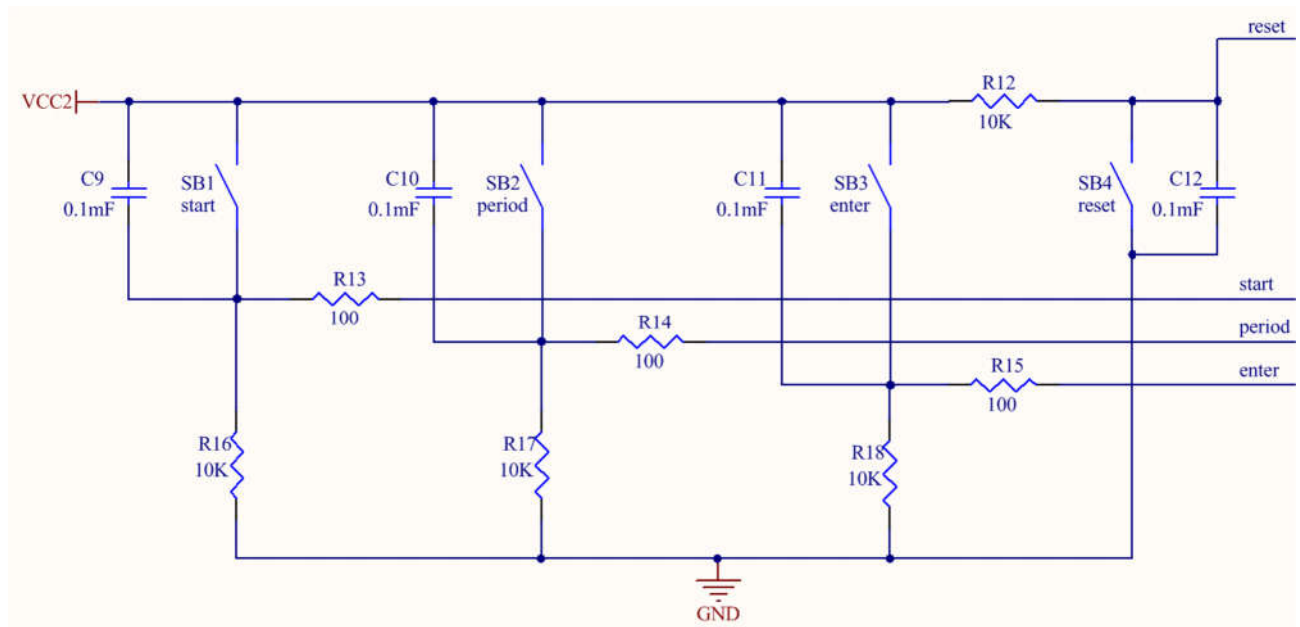


Рисунок 3.6 – Схема управління та скидання мікроконтролера

Схема ініціалізації мікроконтролера побудована на елементах SB1, C9, R13, R16. Після підключення пристрою до електроживлення на вході PA0-WKUP мікроконтролера встановлюється логічний нуль і система знаходиться в режимі очікування до моменту натиснення на кнопку START. Після натиснення на кнопку START на вхід PA0-WKUP подається логічна одиниця і система переходить в режим обчислення часу проходження імпульсів через вимірюване середовище.

На елементах SB2, C910, R14, R17 побудована схема вибору періоду споживання природного газу.

На елементах SB3, C911, R15, R18 побудована схема підтвердження та вводу вибраного періоду споживання.

Схема скидання мікроконтролера побудована на елементах SB4, R12, C12. Після підключення пристрою до електроживлення на вхід NRST мікроконтролера через резистор R12 подається логічна одиниця і система знаходиться в звичайному робочому режимі. При натисненні на кнопку RESET на вхід NRST подається логічний нуль і відбувається скидання контролера.

3.2.6. Вибір індикатора

Для виведення візуальної інформації в якості периферійного пристрою виберемо широко застосовуваний рідкокристалічний індикатор HD44780 виробництва компанії HITACHI. Блок-схема внутрішнього улаштування індикатора наведена на рис. 3.7.

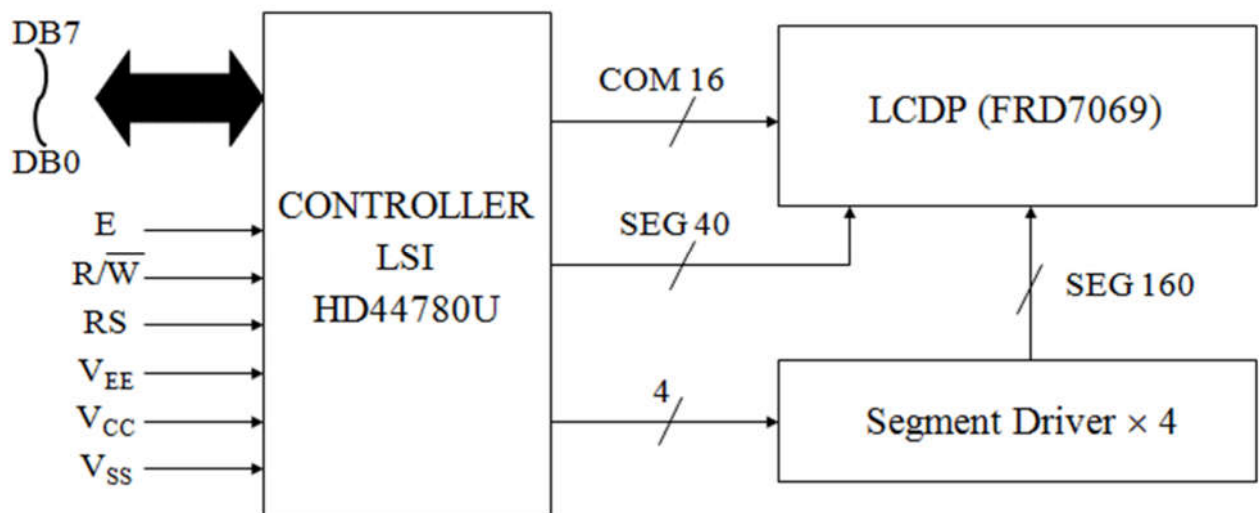


Рисунок 3.7 – Блок-схема індикатора HD44780

Основою індикатора є рідкокристалічна матриця, подаючи напругу на елемент якої ми можемо спостерігати крапку на екрані, або піксель. Матриця складається з певної кількості знакоміць, які згруповані по рядкам та стовбцям.

HD44780 має два рядки по 16 знакоміць. Кожне знакомісце може бути матрицею 5x8 або матрицею 5x10. Для першого випадку внутрішня пам'ять містить 208 символів, а для другого – 32.

Вибраний LCD-індикатор має власну систему команд, може працювати як на вхід, так і на вихід. В нашому проекті масив даних тільки подається на індикатор, при цьому ніякі дані з індикатора зчитуватись не будуть. Такий режим роботи забезпечується подачею логічного нуля на вивід R/W.

Індикатор HD44780 може працювати в 4-бітному і 8-бітному режимах. Ми будемо його використовувати в 4-бітному режимі. Робоча частота індикатора складає 2 МГц.

Схема підключення HD44780 вказана на рис. 3.8.

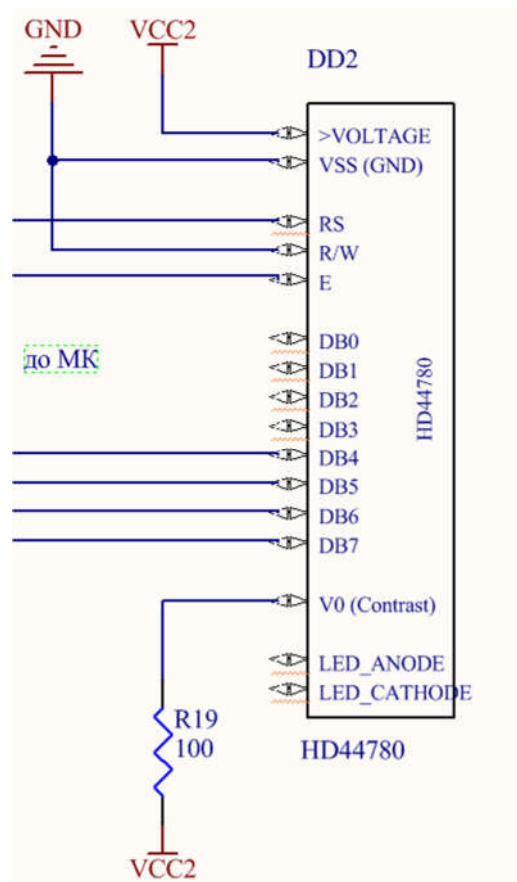


Рисунок 3.8 – Схема підключення індикатора HD44780

По шині DB4...DB7 на індикатор передаються дані з мікроконтролера. Виводи RS, E призначені для управління передачею даних та команд до індикатора. Як зазначалось вище, індикатор буде працювати в 4-бітному режимі.

В 4-бітному режимі через виводи DB4...DB7 спочатку будуть передаватися старші чотири біти даних або команди, а потім молодші чотири біти. Виводи DB0...DB3 залишаться не задіяними.

Індикатор HD44780 дозволяє виконувати регулювання контрастності, використовуючи дільник напруги при підключенні напруги живлення до виводу V_0 . В нашій схемі буде забезпечуватись фіксований рівень контрастності шляхом підключення виводу V_0 до VCC через резистор R19 номіналом 100 Ом.

В індикаторі HD44780 реалізована можливість підсвітки. Для цього призначені виводи A (анод) та K (катод). Ми не будемо використовувати цю можливість і виводи A, K залишаться не підключеними.

Напруга живлення індикатора HD44780 складає від 2,7 до 5,5 В, що відповідає вихідним даним на проект. На індикатор, як і на всі інші активні елементи схеми, подається напруга 3,3 В.

3.2.7. Розробка блоку електроживлення

Схема блоку електроживлення ІВС наведена на рис. 3.9.

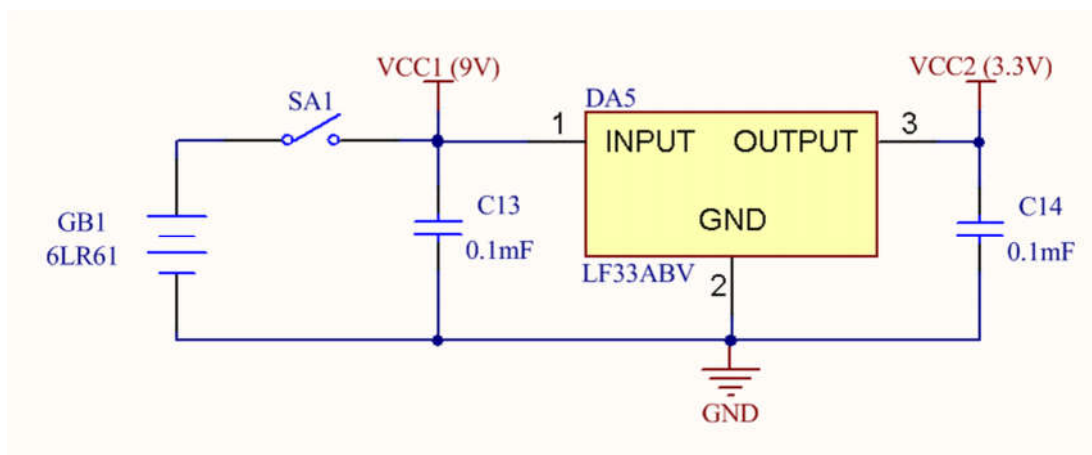


Рисунок 3.9 – Схема блоку електроживлення

Електроживлення інформаційно-вимірювальної системи здійснюється від батареї типу 6LR61 на напругу 9 В.

На операційні підсилювачі подається напруга 9 В, а на мікроконтролер та індикатор 3,3 В.

Для перетворення напруги живлення від батареї в напругу живлення МК та індикатора вибрано інтегральний стабілізатор LF33ABV виробництва компанії STMicroelectronics. Це лінійний нерегулюємий стабілізатор напруги, який має вихідну напругу 3.3 В, вихідний струм 0,5 А і виконаний в корпусі TO220AB.

Вимикач SA1 використовується для вимикання електроживлення пристрою на той час, коли система не задіяна у вимірюваннях.

3.3. Алгоритмічна реалізація

Автоматизований облік витрати текучого середовища за допомогою часово-імпульсного ультразвукового методу витратометрії передбачає використання отриманих даних про різницю між часом розповсюдження ультразвукової хвилі проти t_{\downarrow} і вздовж t_{\uparrow} напрямку потоку вимірюваного середовища та їх оброблення у відповідності зі спеціальними алгоритмами. Тобто ультразвуковий метод вимірювання з накладними первинними перетворювачами для отримання кінцевого результату вимірювання та його подання передбачає застосування алгоритмічних методів оброблення даних з виходу первинного перетворювача.

Опишемо алгоритм роботи мікроконтролера як центрального елемента інформаційно-вимірювальної системи з точки зору визначення швидкості потоку природного газу і, як наслідок, його об'ємної витрати.

Виводи PA0-WKUP, PA1, PA2 мікроконтролера STM32F100RBT6B налаштовані як входи і до них підключені кнопки START, PERIOD, ENTER відповідно.

Виводи PB8÷PB15 підключені до елементів вимірювальних каналів.

Важливо те, одночасно можуть бути включені тільки два виводи МК – один на вихід і другий на вхід для генерації зондуючого імпульсу і прийняття у відповідь підсиленого від п'єзоелемента-приймача відповідно. Інші шість виводів від схем відключені. Так по чергово скануються обидва канали в обох напрямках. Так за одну ітерацію циклу буде отримано чотири значення часу проходження імпульсів через вимірюване середовище, які передаються параметрами в функцію обчислення обсягу витрати, функція повертає відповідне значення, яке записується в певну комірку пам'яті і виводиться на індикатор

Виводи PC4...PC9 мікроконтролера налаштовані як виходи і виконують функцію передачі даних та команд на індикатор HD44780.

При включенні електроживлення ІВС система переходить в стан WAITING. На індикатор в цей час в перший рядок виводиться запис "Waiting", а в другий запис "Press start".

При натисненні на кнопку START система переходить в режим обчислення часу проходження імпульсів через вимірюване середовище – режим. На індикаторі протягом роботи системи в першому рядку буде зліва поточна дата, а справа дійсне значення витрати природного газу в дм^3 . В другому рядку по замовчуванню буде виведений обсяг витрати природного газу за весь час роботи ІВС.

При необхідності зчитування даних про витрату газу за певний період часу (за рік, або за місяць року) треба натиснути одночасно кнопки PERIOD та ENTER. Шляхом послідовного вибору за допомогою кнопки PERIOD відповідних цифр з підтвердженням вибору кожної короткочасним натисненням кнопки ENTER задається період споживання з чотирьох (рік) або шести (рік та місяць) цифр, після чого тривалим натисненням ENTER період підтверджується і в другому рядку замість накопиченого обсягу буде виведено обсяг витрати за заданий період на 10 с. Потім система автоматично повертається в звичайний режим роботи.

3.4. Програмна реалізація

Програмне забезпечення мікроконтролера STM32F100RBT6B розроблене на мові програмування C із застосуванням як стандартних бібліотек, так і бібліотек, розроблених для конкретних умов апаратної реалізації. Зокрема, застосування широко розповсюдженого індикатора HD44780 дало змогу використати заголовочний файл `hd44780_drv.h` та файл `hd44780_drv.c` з функціоналом для цього індикатора.

Для забезпечення роботи мікроконтролера написані такі функції:

- `GPIO_Init` – ініціалізація портів
- `RTC_Init` – ініціалізація годинника реального часу,
- `TIM2_Init` – ініціалізація таймера 2 для захоплення вхідних імпульсів,
- `TIM6_Init` – ініціалізація таймера 6 для визначення проміжку часу між зондуємим та вхідним імпульсом,
- `TIM2_IRQHandler` – обчислення проміжку часу між генерацією зондуємим імпульсу та надходженням підсиленого,
- `TIM6_DAC_IRQHandler` – обробка переривань таймера 6,
- `volumeFormula` – обчислення поточного обсягу витрати за проміжок часу між зондуємим та вхідним імпульсом.

Для роботи індикатора HD44780 використовуються такі функції:

- `lcd_init` – ініціалізація LCD,
- `lcd_out` – виведення сповіщень на LCD,
- `lcd_set_xy` – встановлення координат курсора LCD,
- `lcd_send` – виведення даних на LCD,
- `lcd_delay` – реалізація затримки індикації.

Лістинг програми наведений в додатку Г.

3.5. Висновки по розділу 3

В даному розділі розроблена структурна схема ІВС та описаний загальний порядок роботи системи.

Розроблена принципова електрична схема системи, описані її окремі функціональні модулі та визначений порядок їх роботи. За схемою реалізований двоканальний принцип вимірювання витрати природного газу.

Описаний алгоритм роботи ІВС в цілому з точки зору визначення параметрів $t_{\uparrow 1}$, $t_{\uparrow 2}$, $t_{\downarrow 1}$, $t_{\downarrow 2}$ для формули визначення об'ємної витрати газу (2.16).

Описана програмна реалізація визначення об'ємної витрати природного газу.

ВИСНОВКИ

Серед досліджених методів вимірювання витрати текучого середовища у закритих каналах, що використовують різноманітні фізичні явища та ефекти, можна виділити як найбільш перспективний ультразвуковий метод. Його основними перевагами є можливість вимірювання будь-яких ТС, теоретично необмежений діапазон вимірювань, висока надійність первинного перетворювача, стабільність метрологічних і експлуатаційних характеристик протягом тривалого часу.

В даній кваліфікаційній роботі розглянуто та удосконалено математичні моделі часово-імпульсного одноканального та двоканального ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища – природного газу. Запропоновано до реалізації двоканальний ультразвуковий метод вимірювання витрати текучого середовища, який передбачає обробку результатів вимірювання швидкості потоку вимірюваного середовища і, як результат, зменшення абсолютної похибки визначення часу поширення сигналу вздовж і проти потоку приблизно у 1,4 рази.

З метою розробки інформаційно-вимірювальної системи витрати природного газу безконтактним акустичним методом в трубопроводах малих діаметрів зупинимо свій вибір на часово-імпульсному двоканальному ультразвуковому методі вимірювання витрати текучого середовища з накладними первинними перетворювачами як самому оптимальному для визначених завдань умов реалізації.

Слід відмітити, що автоматизований облік витрат текучого середовища потребує використання таких засобів вимірювальної техніки, які могли б забезпечити адаптацію до конкретних умов застосування, що визначає ще одне із завдань – розробку нових або удосконалення існуючих спеціальних алгоритмів, відповідного програмного забезпечення, які реалізують ефективні методи обробки даних, для побудови сучасної системи автоматизованого обліку.

Враховуючи результати виконаних досліджень, розробки інформаційно-вимірювальної системи та беручи до уваги суттєві переваги безконтактного ультразвукового методу вимірювання витрати текучого середовища перед іншими ЗВТ, можна зробити висновок про перспективність ультразвукового методу в плані можливості створення на його основі сучасного витратоміру природнього газу з високими метрологічними характеристиками.

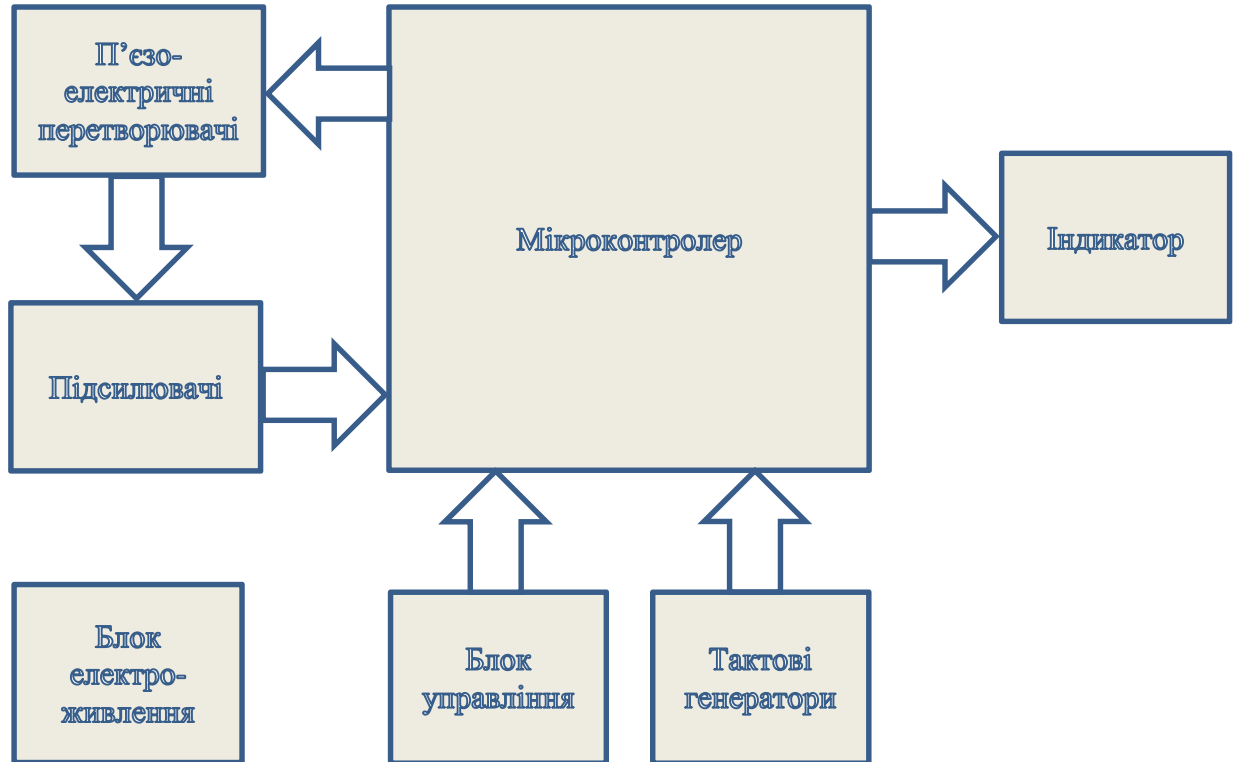
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Малахов В. П. Проектування мікропроцесорних систем / В. П. Малахов, Д. П. Яковлев. – Одеса: Астропрінт, 2002. – 214 с.
2. Ядро Cortex – М3 компанії ARM. Полное руководство / Джозеф Ю; пер. с англ. А.В. Евстифеева. – М.: Додэка-XXI, 2012. – 552 с.
3. Библиотека для работы с HD44780 [Електронний ресурс] : Режим доступу: <http://easystm32.ru/indication/24-library-for-hd44780/>.
4. Акустичний спосіб вимірювання швидкості та напрямку потоку рідини або газу і пристрій для його здійснення [Електронний ресурс] : Режим доступу: <http://uapatents.com/6-76062-akustichnijj-sposib-vimiryuvannya-shvidkosti-ta-napryamu-potoku-ridini-abo-gazu-i-pristriij-dlya-jjogo-zdijjsnennya-varianti.html>
5. Стеценко А.А. Науково-технічна база системи вимірювання та обліку витрат текучого середовища/ А.А. Стеценко// 36. наук. праць Харк. ун-ту Повітряних Сил. — Харків, 2013. — Вип. 3 (36). — С. 193-198.
6. Недзельський С.Д. Система обліку речовин на базі ультразвукових витратомірів/ С.Д. Недзельський, А.А. Стеценко// Системи обробки інформації.— 2013. — Вип. 6 (1 і 3). — С. 110-113.
7. Стеценко А.А. Принципы построения многоканального ультразвукового расходомера/ А.А. Стеценко, В.Л. Сорокопут// Энергетика Татарстана. — 2014. — № 2. — С. 42—45.
8. Дослідження похибки ультразвукових витратомірів за умов спотвореної структури потоку на основі CFD-моделювання/ С. Пістун, Ф. Матіко, В. Роман [та ін.] // Метрологія та прилади. — 2014. — № 4. — С.13-23.
9. Повх И.Л. Теоретическая гидромеханика / И.Л. Повх. — Л.: Машиностроение, 1976. — 504 с.
10. Большаков В.Б. Створення мобільного еталона передавання одиниці витрати рідини/ В.Б. Большаков, Н.І. Косач, Р.В. Стеценко// Український метрологічний журнал. — 2009. — № 3. — С. 46-52.

11. Ультразвуковые расходомеры и система учета на их основе/ В. Близнюк, В. Костылев, В. Сорокопут [и др.] // Современные технологии автоматизации. — М.: СТА—Пресс, 1998. — № 2. — С. 56-57.
12. Цейтлин В.Г. Техника измерения расхода и количества жидкостей, газов и паров/ В.Г. Цейтлин. — М.: Изд-во стандартов, 1981. — 359 с.
13. Хамидулин В.К. Ультразвуковые контрольно–измерительные устройства и системы/ В.К. Хамидулин. — Л.: Изд-во , 1989. — 248 с.
14. Власюк Я.М. Реалізація концепції створення сдиної системи обліку природного газу в Україні/ Я.М. Власюк, І.С. Кисіль, О.С Середюк// Методи та прилади контролю якості. — Івано-Франківськ, 2005. — № 13. — С. 61-65.
15. Измерения в промышленности: справочник/ под ред. П. Профоса. — В 3 томах. — Т. 1. Теоретические основы. — М.: Металлургия, 1990. — 496 с.
16. Мейзда Ф. Электронные измерительные приборы и методы измерений; пер. с англ. / Ф. Мейзда. — М.: Мир, 1990. — 535 с.
17. Коробко И.В. Ультразвуковой метод измерения расхода и количества жидкостей и газов/ И.В. Коробко, А.Н. Дидковская, П.К. Кузьменко [Электронный ресурс]. — Режим доступа: <http://www.c-o-k.com.ua/content/view/376>.
18. Ультразвуковая расходометрия: как и зачем повышать точность измерений/ С.И. Покрас, А.И. Покрас, И.С. Покрас [и др.] / [Электронный ресурс]. — Режим доступа: www.sempal.com
19. Бурдун Г.Д. Основы метрологии/ Г.Д. Бурдун, Б.Н. Марков. — М.: Изд- во стандартов, 1985. — 256 с.
20. Вострокнутов Н.Н. Цифровые измерительные устройства: Теория погрешностей, испытания, поверка/ Н.Н. Вострокнутов. — М.: Энергоатомиздат, 1990. — 208 с.

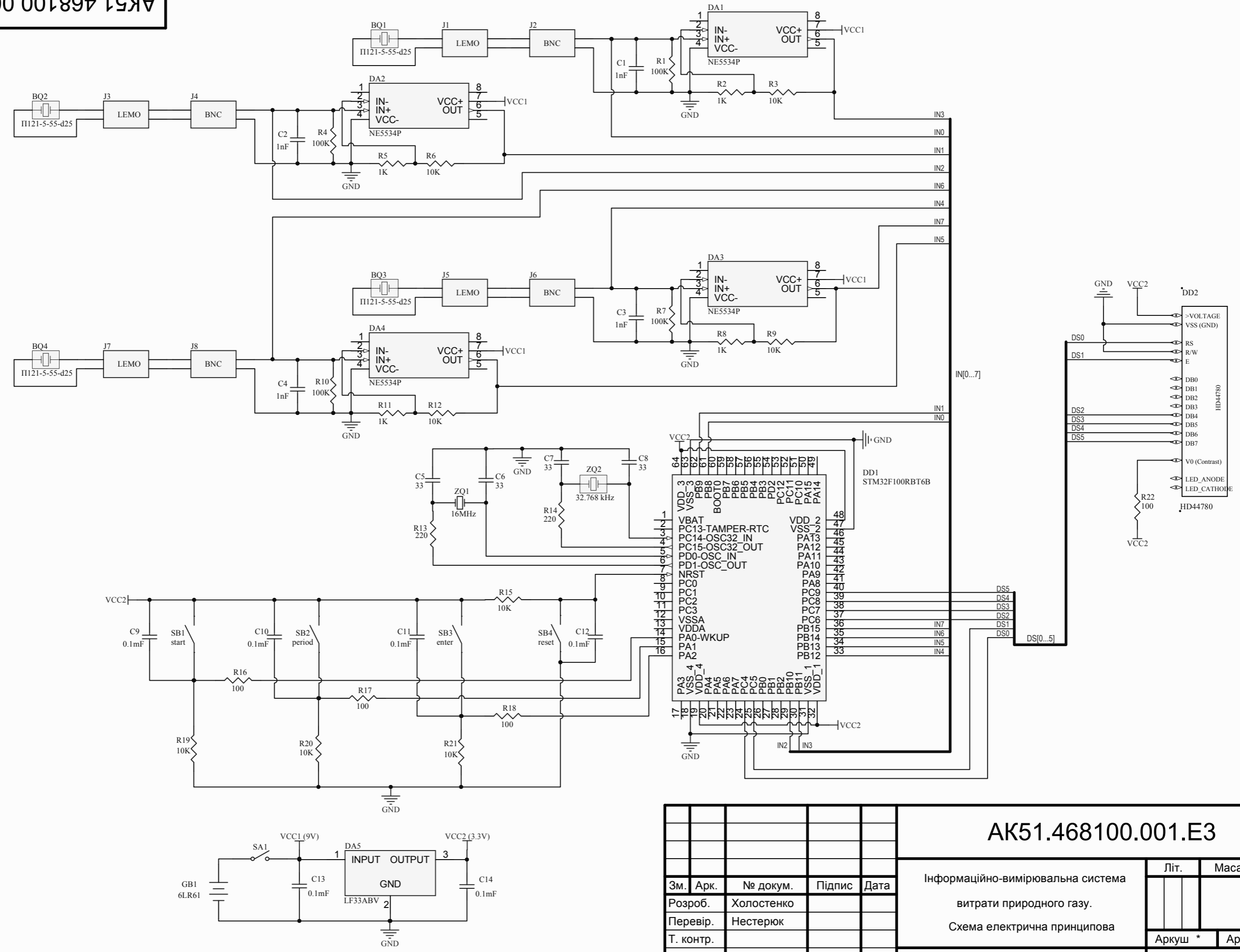
ДОДАТОК А

СТРУКТУРНА СХЕМА



Перш. застосув.
 Довідн. №
 Підп. і дата
 Інв. № дубл.
 Взам. інв. №
 Підп. і дата
 Інв. № підл.

AK51.468100.001.E3



AK51.468100.001.E3

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата
Розроб.	Холостенко			
Перевір.	Нестерюк			
Т. контр.				
Н. контр.				
Затверд.	*			

Інформаційно-вимірвальна система
 витрати природного газу.
 Схема електрична принципова

Літ.	Маса	Масштаб
Аркуш *	Аркушів *	

ОНПУ.ІКС.КС.АК151

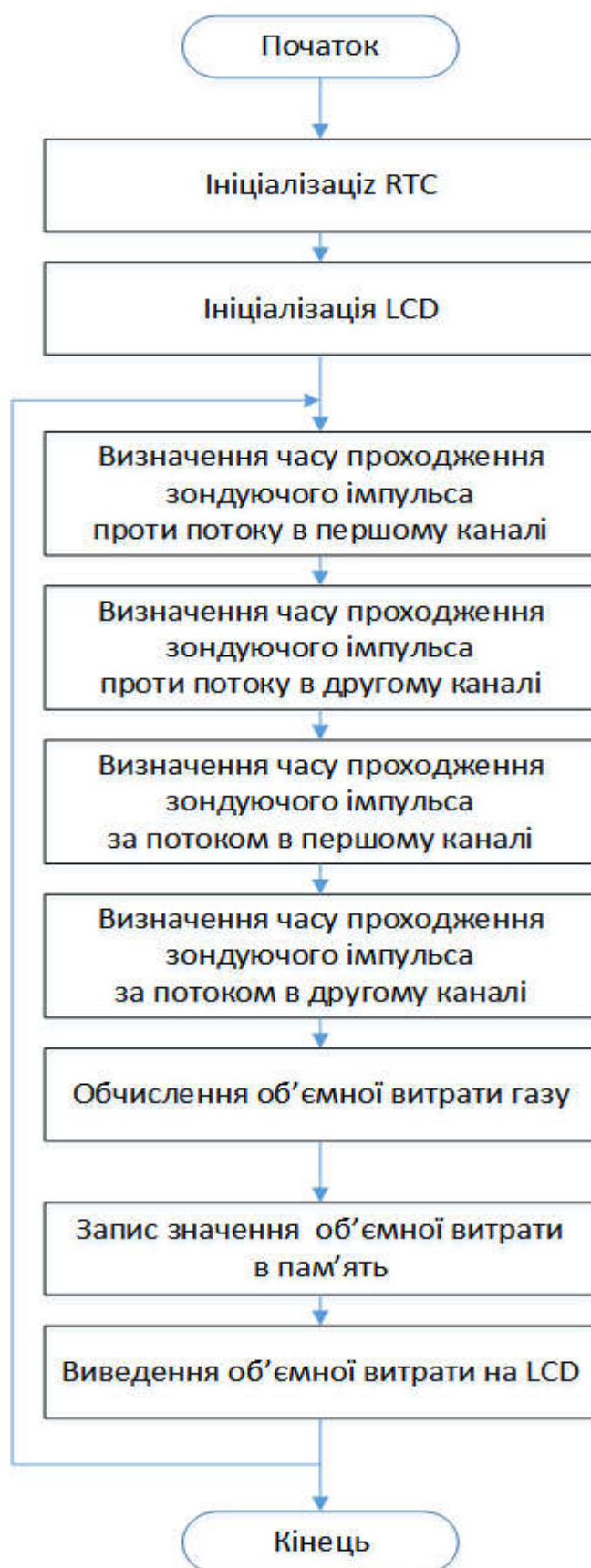
Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
	Батареї		
GB1	6LR61	1	
	Вимикачі		
SA1	SW-SPST	1	
	Кварцові резонатори		
ZQ1	HC-49S 16МГц	1	
ZQ2	Y3215 32.768 kHz	1	
	Кнопки		
SB1-SB	LTL613	4	
	Конденсатори		
C1-C4	SIM C1206 1нФ	4	
C5-C8	SIM C1206 33пФ	4	
C9-C14	SIM C1206 0,1мкФ	6	
	Мікросхеми		
DD1	STM32F100RBT6B	1	
DD2	HD44780	1	
DA1-DA4	NE5534P	4	
DA5	LF33ABV	1	

					AK51.468100.001.E3			
Зм.	Арк.	№ докум	Підпис	Дата	Інформаційно-вимірювальна система витрати природного газу. Перелік елементів	Лім	Аркуш	Аркушів
Розроб.	Холостенко О.А.							
Перевір.	Нестерюк О.Г.							
Н. контр.								
Затверд.								
						ОНПУ.ІКС.КС.АК151		

Позначення	Найменування	Кількість	Примітки
	П'єзоелементи		
BQ1-BQ4	П121-5-55-d25	4	
	Резистори		
R1, R4, R7, R10	J1-0603 100кОм	4	
R2, R5, R8, R11	J1-0603 1кОм	4	
R3, R6, R9, R12, R15, R19-R21	J1-0603 10кОм	8	
R13, R14	J1-0603 220	2	
R16-R18, R22	J1-0603 100	4	
	Роз'єми		
J2, J4, J6, J8	BNC	4	

ДОДАТОК В

АЛГОРИТМ



```

1  #include "hd44780_driver.h"
2
3  void lcd_delay(void) {
4      volatile uint32_t tmpvar;
5      for (tmpvar=4000;tmpvar!=0;tmpvar--);
6  }
7
8  void lcd_init() {
9      LCD_PORT->CRH |= LCD_PORT_CRH_S;
10     LCD_PORT->CRL |= LCD_PORT_CRL_S;
11     LCD_PORT->CRH &= ~(LCD_PORT_CRH_C);
12     LCD_PORT->CRL &= ~(LCD_PORT_CRL_C);
13     lcd_set_4bit_mode();
14     lcd_set_state(LCD_ENABLE,CURSOR_ENABLE,NO_BLINK);
15     lcd_clear();
16     lcd_send(0x06,COMMAND);
17 }
18
19 void lcd_set_user_char(uint8_t char_num, uint8_t * char_data) {
20     uint8_t i;
21     lcd_send(((1<<6) | (char_num * 8)), COMMAND);
22     for (i=0;i<=7;i++) {
23         lcd_send(char_data[i],DATA);
24     }
25     lcd_send((1<<7), COMMAND);
26 }
27
28 void lcd_set_xy(uint8_t x, uint8_t y) {
29     if (y==0) {
30         lcd_send( ((1<<7) | (x)),COMMAND);
31     } else {
32         lcd_send( ((3<<6) | (x)),COMMAND);
33     }
34 }
35
36 void lcd_out(char * txt) {
37     while(*txt) {
38         lcd_send(*txt,DATA);
39         txt++;
40     }
41 }
42
43 void lcd_clear(void) {
44     lcd_send(0x01,COMMAND);
45 }
46
47 void lcd_set_state(lcd_state state, cursor_state cur_state,
cursor_mode cur_mode) {

```



```

48     if (state==LCD_DISABLE) {
49         lcd_send(0x08,COMMAND);
50     } else {
51         if (cur_state==CURSOR_DISABLE) {
52             if (cur_mode==NO_BLINK) {
53                 lcd_send(0x0C,COMMAND);
54             } else {
55                 lcd_send(0x0D,COMMAND);
56             }
57         } else {
58             if (cur_mode==NO_BLINK) {
59                 lcd_send(0x0E,COMMAND);
60             } else {
61                 lcd_send(0x0F,COMMAND);
62             }
63         }
64     }
65 }
66
67 void lcd_set_4bit_mode(void) {
68     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BC | LCD_DB6_BC | LCD_DB5_BC |
69     LCD_DB4_BC | LCD_CD_BC | LCD_EN_BC);
70     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB5_BS);
71
72     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BS;
73     lcd_delay();
74     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BC;
75     lcd_delay();
76
77     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BC | LCD_DB6_BC | LCD_DB5_BC |
78     LCD_DB4_BC | LCD_CD_BC | LCD_EN_BC);
79     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB5_BS);
80
81     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BS;
82     lcd_delay();
83
84     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BC | LCD_DB6_BC | LCD_DB5_BC |
85     LCD_DB4_BC | LCD_CD_BC | LCD_EN_BC);
86     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BS);
87
88     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BS;
89     lcd_delay();
90     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BC;
91     lcd_delay();
92 }

```

```

93 void lcd_send(uint8_t byte, dat_or_comm dc) {
94
95     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BC | LCD_DB6_BC | LCD_DB5_BC |
LCD_DB4_BC | LCD_CD_BC | LCD_EN_BC);
96
97     if (dc) {
98         LCD_PORT->BSRR=LCD_CD_BS;
99     }
100
101     if (byte & 0x10) {
102         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB4_BS;
103     }
104     if (byte & 0x20) {
105         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB5_BS;
106     }
107     if (byte & 0x40) {
108         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB6_BS;
109     }
110     if (byte & 0x80) {
111         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB7_BS;
112     }
113
114     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BS;
115     lcd_delay();
116     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BC;
117     lcd_delay();
118
119     LCD_PORT->BSRR=(LCD_DB7_BC | LCD_DB6_BC | LCD_DB5_BC |
LCD_DB4_BC );
120
121     if (byte & 0x01) {
122         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB4_BS;
123     }
124     if (byte & 0x02) {
125         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB5_BS;
126     }
127     if (byte & 0x04) {
128         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB6_BS;
129     }
130     if (byte & 0x08) {
131         LCD_PORT->BSRR=LCD_DB7_BS;
132     }
133
134     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BS;
135     lcd_delay();
136     LCD_PORT->BSRR=LCD_EN_BC;
137     lcd_delay();
138 }

```