

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

До захисту допущено:

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН

«__» _____ 2025 р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

**за освітньо-професійною програмою «Комп'ютерно-інтегровані
системи та технології в приладобудуванні»**

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

**на тему: «Автоматизований комплекс вимірювання параметрів
природного газу»**

Виконав:

студент IV курсу, групи ПМ-11

Желуденко Богдан Олексійович _____

Керівник:

доцент, к.т.н., доцент

Писарець Анна Валеріївна _____

Рецензент:

доцент, к.т.н., доцент,

Козир Олег Васильович _____

Засвідчую, що у цьому дипломному
проєкті немає запозичень з праць інших
авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____

Київ – 2025 року

ВІДОМІСТЬ ДИПЛОМНОГО ПРОЄКТУ

№ з/п	Формат	Позначення	Найменування	Кількість листів	Примітка
1	A4		Завдання на дипломний проєкт	2	
2	A4	ДП ХХХХ. 00.000 ПЗ	Пояснювальна записка	61	
3	A1	ДП.ПМ-11.04.17.000 СК	Складальний кресленик	1	
4	A1		Робочі кресленики деталей	5	
5	A1	ДП.ПМ-11.04.17.001 СК	Ультразвуковий витратомір	1	
6	A1	ДП.ПМ-11.04.17.000 БСА	Блок схема алгоритму	1	
7	A1	ДП.ПМ-11.04.17.000 ПЕС	Принципова електрична схема	1	

				ДП.ПМ-11.04.17.000		
	ПБ	Підп.	Дата			
Розробн.	Желуденко Б.О.			Відомість дипломного проєкту	Лист	Листів
Керівн.	Писарець А.В.				1	1
Консульт.					КПІ ім. Ігоря Сікорського Каф. АСНК Гр. ПМ-11	
Н/контр.						
Зав.каф.	Киричук Ю.В.					

Пояснювальна записка
до дипломного проєкту
на тему: «Автоматизований комплекс вимірювання параметрів
природного газу»

Київ – 2025 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**

Приладобудівний факультет

Кафедра автоматизації та систем неруйнівного контролю

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

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

Освітньо-професійна програма «Комп'ютерно-інтегровані системи та технології в приладобудуванні»

ЗАТВЕРДЖУЮ

В.о. завідувача кафедри

_____ Галина БОГДАН
« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Желуденку Богдану Олексійовичу

1. Тема проєкту «Автоматизований комплекс вимірювання параметрів природного газу», керівник проєкту Писарець Анна Валеріївна, кандидат технічних наук, доцент, затверджені наказом по університету від 26.05. 2025 р. №1765-с
2. Термін подання студентом проєкту 26 травня 2025 року
3. Вихідні дані до проєкту: вимірюване середовище – природний газ; діапазон вимірюваних витрат, м³/год: $Q_{min} - 50$; $Q_{max} - 350$; перепад тиску при Q_n – не більше 5 кПа; Максимальний робочий тиск вимірюваного середовища – 1.6 МПа; Температура вимірюваного середовища, оС: $+0,1 ? +130$; температура навколишнього середовища, ?С: $-20 ? +85$; допустима відносна похибка, % – 1,0; Ступінь захисту IP66.

4. Зміст пояснювальної записки: Вступ. Огляд існуючих комплексів для вимірювання об'єму газу. Розробка автоматизованого комплексу вимірювання параметрів природного газу. Математична модель системи витратоміра. Моделювання роботи автоматизованого комплексу вимірювання параметрів природного газу. Перелік використаних джерел. Висновки.

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо):

5.1 Автоматизований комплекс вимірювання природного газу. Структурна схема. 1 арк. ф. А2.

5.2 Автоматизований комплекс вимірювання природного газу. Принципова схема. 1 арк. ф. А2

5.3 Витратомір комплексу вимірювання природного газу. Складальний кресленик. 1 арк. ф. А1.

5.4 Робочі кресленики деталей. 1 арк. ф. А1.

5.5 Автоматизований комплекс вимірювання природного газу. Моделювання роботи комплексу. 1 арк. ф. А1.

7. Дата видачі завдання: «01» березня 2024 року.

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
	Формулювання завдання проекту	01.03.2025	
	Проведення аналітичного огляду	15.04.2025	
	Визначення алгоритму роботи	01.05.2025	
	Підбір компонентів	20.05.2025	
	Розробка креслеників	25.05.2025	

Студент

Богдан ЖЕЛУДЕНКО

Керівник

Анна ПИСАРЕЦЬ

Анотація

Зростаючі вимоги до енергоефективності, прозорості обліку енергоресурсів та інтеграції в цифрові системи моніторингу зумовлюють актуальність теми.

На підґрунті аналізу структури та функціональних елементів автоматизованого комплексу вимірювання природного газу запропоновано створити комплекс із використанням ультразвукового перетворювача витрати, оскільки сенсори цього класу мають найкраще поєднання точності, надійності та гнучкості застосування.

Розглянуто методи вимірювання витрати, що набули широкого застосування у системах контролю витрати та кількості природного газу; проаналізовано конструктивні особливості та технічні характеристики сенсорів, що застосовуються для контролю витрати, тиску та температури газу; розроблено 3D-модель ультразвукового однокордого витратоміра; створено модель розміщення електронних обчислюваних компонентів у SolidWorks; здійснено симуляцію роботи комплексу у Wokwi.

Ключові слова: природний газ, вимірювання, автоматизований комплекс.

Annotation

Increasing demands for energy efficiency, transparency in energy resource accounting, and integration into digital monitoring systems highlight the relevance of this topic.

Based on the analysis of the structure and functional elements of an automated natural gas measurement complex, it is proposed to develop a system using an ultrasonic flow transducer, as sensors of this type offer the best combination of accuracy, reliability, and application flexibility.

Various flow measurement methods that are widely used in natural gas flow and volume control systems have been reviewed. The design features and technical characteristics of sensors used for monitoring gas flow, pressure, and temperature have been analyzed. A 3D model of a single-path ultrasonic flowmeter has been developed, along with a model of the electronic computing components layout in SolidWorks. Additionally, a simulation of the system's operation was carried out in Wokwi.

Key words: natural gas, measurement, automated system.

Зміст

ВСТУП.....	12
1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ГАЗУ	14
1.1 Структура та функціональні елементи автоматизованого комплексу вимірювання природного газу	15
1.2 Сенсори, що застосовуються в системах вимірювання параметрів природного газу.....	18
1.3 Перетворювачі витрати	20
1.4 Мікросхеми, що використовуються як контролери	29
1.5 Висновки по розділу 1	31
2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ	32
2.1 Первинний перетворювач тиску.....	33
2.2 Первинний перетворювач температури.....	34
2.3 Програмований логічний контролер (ПЛК).....	36
2.4 Людино-машинний інтерфейс (НМІ).....	38
2.5 Модуль бездротового зв'язку (Wi-Fi).....	39
2.6 Модуль GSM-зв'язку (SIM800L).....	41
2.7 Висновки до розділу 2	43
3. РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА	44
3.1 Математична модель ультразвукового перетворювача витрати... 44	
3.2 Розробка моделі в SolidWorks.....	45
3.2 Висновки до розділу 3	49
4. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ	49
4.1 Розроблення моделі у SolidWorks	52

					<i>ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>						
	Лист	№ докум.	Підпис	Дата							
Розроб.		<i>Желуденко Б.О.</i>			Автоматизований комплекс вимірювання параметрів природного газу			Літ.	Аркуш	Аркушів	
Перев.									1	66	
								<i>КПІ , ПБФ</i>			
Н. Контр.											
Затв.		<i>Писарець А.В.</i>									

4.2 Симуляція роботи комплексу	53
4.3 Висновок симуляції	58
4.4 Висновки до розділу 4	59
ВИСНОВКИ.....	60

					<i>ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>		
	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Автоматизований комплекс вимірювання параметрів природного газу		
Розроб.		<i>Желуденко Б.О.</i>					
Перев.							
Н. Контр.							
Затв.		<i>Писарець А.В.</i>					
					Літ.	Аркуш	Аркушів
						1	66
					<i>КПІ , ПБФ</i>		

УМОВНІ СКОРОЧЕННЯ ТА ТЕРМІНИ

ПЛК (програмований логічний контролер) – електронний пристрій, призначений для автоматичного керування технологічними процесами, що програмується під конкретну задачу.

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) – система диспетчерського управління та збору даних з об'єкта в реальному часі.

HMI (Human Machine Interface) – панель або програмне забезпечення для взаємодії оператора з автоматизованою системою.

MODBUS – індустріальний протокол зв'язку між контролерами та пристроями збору даних, часто використовується для зчитування показників датчиків.

RS-485 – стандарт фізичного рівня послідовного зв'язку, що дозволяє об'єднувати багато пристроїв на одній шині.

4–20 мА – аналоговий сигнал, що використовується для передачі значень від датчика до контролера. Забезпечує стійкість до перешкод.

ESP32 – мікроконтролер з підтримкою Wi-Fi та Bluetooth, який використовується для побудови IoT-пристроїв і моделювання систем автоматизації.

Витратомір – прилад для вимірювання об'ємної або масової витрати газу чи рідини.

Коректор об'єму – пристрій для приведення виміряного об'єму газу до стандартних умов за температурою і тиском.

Pt100 – термометр опору з номінальним опором 100 Ом при 0°C, використовується для точного вимірювання температури.

Ультразвуковий витратомір – прилад, що вимірює витрату газу за допомогою аналізу проходження ультразвукових імпульсів.

Калорійність газу – кількість теплоти, яка виділяється при повному згорянні одиниці об'єму природного газу. Вимірюється в ккал/м³ або МДж/м³.

Wokwi – онлайн-платформа для моделювання Arduino, ESP32 та інших електронних схем у віртуальному середовищі.

OLED-дисплей – дисплей на органічних світлодіодах, який використовується для виводу текстової та графічної інформації.

Логування – процес періодичного збереження поточних значень параметрів у пам'ять пристрою для подальшого аналізу.

Сигналізація – система світлового або звукового оповіщення про вихід параметрів за допустимі межі.

Нормальні умови – температурно-технічна умова для приведення об'єму газу: температура 20 °С та тиск 760 мм рт. ст.

					<i>ДІБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		11

ВСТУП

Сьогодні, в умовах активного розвитку енергетичного сектору, точне вимірювання природного газу набуває особливої актуальності. Природний газ - це стратегічний енергоресурс, який широко використовується в комунальній сфері, промисловості, енергетиці та транспорті. Ефективне управління його споживанням неможливе без надійних, точних та автоматизованих засобів обліку. У зв'язку з цим зростає попит на сучасні автоматизовані комплекси вимірювання параметрів природного газу, що забезпечують не лише облік, а й контроль якості, стану середовища, оперативну передачу та аналіз даних.

Зростання обсягів споживання газу, вимоги до енергоефективності та необхідність зниження втрат у системах розподілу роблять задачі точного обліку особливо критичними. Сучасні облікові системи повинні забезпечувати не лише фіксацію спожитого об'єму, але й можливість переведення його до стандартних умов, моніторинг параметрів середовища (тиску, температури), а також інтеграцію з цифровими платформами обміну даними.

Особливої уваги набуває облік у промислових підприємствах, котельнях, газорозподільчих станціях та на об'єктах генерації теплової енергії, де неточності можуть призводити до значних фінансових втрат. Водночас, автоматизація обліку сприяє зменшенню людського фактору, підвищенню достовірності даних і прозорості обліку енергоносіїв.

Системи вимірювання та обліку природного газу набули широкого застосування у різних галузях — від побутового сектору до стратегічних об'єктів промислової інфраструктури. У комунальному господарстві вони забезпечують точний розрахунок споживання для населення і комерційних споживачів. В енергетиці та промисловості — є невід'ємною частиною автоматизованих систем керування технологічними процесами, де потрібен

					<i>ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		12

безперервний контроль параметрів газу. На магістральних газопроводах — використовуються високоточні витратоміри для комерційного та міждержавного обліку, сертифіковані згідно з міжнародними стандартами. Усі ці системи дозволяють підвищити ефективність використання енергоресурсів, мінімізувати втрати та забезпечити метрологічну достовірність даних [1-3].

					<i>ДІБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		13

1. ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ОБ'ЄМУ ГАЗУ

Автоматизований комплекс вимірювання природного газу є сукупністю взаємопов'язаних технічних засобів, призначених для забезпечення точного, безперервного та достовірного контролю параметрів газового середовища з подальшим приведенням об'ємних показників до стандартних умов.

Автоматизований складається з сукупності функціонально взаємопов'язаних технічних засобів, що забезпечують точне та безперервне вимірювання витрати, тиску, температури та, за потреби, складу газу. Його структура включає:

- Первинні вимірювальні перетворювачі, які здійснюють безпосередній контакт із газовим середовищем та перетворюють фізичні параметри (витрату, тиск, температуру) у електричні сигнали;
- Обчислювальний модуль або контролер, що виконує збір, обробку сигналів, здійснює термобарометричну компенсацію та перерахунок об'єму до стандартних умов;
- Засоби індикації та локального керування, які забезпечують відображення поточних параметрів, аварійних станів;
- Комунікаційні інтерфейси, що забезпечують передачу інформації до SCADA-систем або хмарних платформ через дротові та бездротові канали;
- Модулі живлення та захисту, які гарантують стабільну роботу системи у змінних умовах живлення;
- Програмне забезпечення, яке реалізує алгоритми збору, архівації, візуалізації та аналізу вимірювальної інформації.

Узгоджена взаємодія усіх складових забезпечує безперервний, точний і надійний облік природного газу з можливістю інтеграції в автоматизовані системи управління технологічними процесами.

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		14

1.1 Структура та функціональні елементи автоматизованого комплексу вимірювання природного газу

Автоматизований комплекс вимірювання природного газу є багаторівневою технічною системою, яка складається з ряду апаратних і програмних модулів. Всі модулі взаємодіють між собою з метою забезпечення точного, безперервного та достовірного обліку фізичних параметрів газового середовища, їх перетворення, аналізу, виведення та передачі. Функціонально система поділяється на кілька ключових підсистем:

- первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори),
- обчислювальні пристрої (вторинні перетворювачі),
- комунікаційні блоки,
- джерела живлення,
- периферійні засоби взаємодії з користувачем,
- програмне забезпечення.

Первинні вимірювальні перетворювачі (сенсори). Це ключові елементи комплексу, які безпосередньо контактують з газовим середовищем і здійснюють фізичні вимірювання параметрів потоку. Сенсори призначені для перетворення таких характеристик, як швидкість потоку, тиск, температура або хімічний склад, у електричні сигнали, які потім передаються до обчислювальних блоків для подальшої обробки [4].

Для контролю тиску зазвичай застосовуються п'єзорезистивні або ємнісні сенсори, які генерують аналоговий сигнал, пропорційний тиску в системі. Їх вибір залежить від діапазону тисків та умов експлуатації.

Температура вимірюється за допомогою термометрів опору (наприклад, Pt100) або термопар. Перші відзначаються високою точністю та лінійністю, другі - широким діапазоном вимірювання [5].

Для визначення якісного складу природного газу (в деяких конфігураціях) можуть застосовуватись спеціалізовані сенсори - інфрачервоні спектрометри або хімічні аналізатори, які дають змогу оцінити вміст метану, вуглеводнів, азоту та інших компонентів.

Вторинні перетворювачі (обчислювальні пристрої). Ці елементи здійснюють прийом сигналів від сенсорів, виконують перетворення аналогових сигналів у цифрову форму, обчислюють значення об'ємної або масової витрати, а також проводять корекцію параметрів з урахуванням температури, тиску та хімічного складу газу.

Залежно від складності системи, в якості вторинних перетворювачів можуть застосовуватись як програмовані логічні контролери (PLC), так і мікроконтролери загального призначення (наприклад, ESP32, STM32, Atmega). У більш складних системах застосовуються промислові обчислювальні модулі зі спеціалізованим програмним забезпеченням для SCADA або енергетичного моніторингу.

У цих блоках реалізуються всі алгоритми перерахунку витрати до стандартних умов, контролю аварійних ситуацій, ведення журналів подій, а також підготовки даних до виведення на екран або передачі в мережу.

Комунікаційні модулі. Вимірювальні комплекси сьогодні повинні бути здатні до інтеграції в більші системи диспетчерського або енергетичного обліку. Для цього використовуються модулі передачі даних різного рівня.

Для локальних промислових мереж застосовуються інтерфейси RS-485, Modbus RTU, CAN або Ethernet, які дозволяють обмін даними з іншими вузлами мережі або SCADA-сервером.

У випадках, коли необхідна віддалена передача даних, використовуються бездротові технології: GSM/GPRS/3G/4G-модулі (наприклад, SIM800L [6,

7]), що дозволяють надсилати дані через стільникову мережу або в хмару. Також можуть використовуватись IoT-рішення на базі NB-IoT або LoRaWAN - для випадків, коли потрібна низька швидкість передачі, але велика автономність і енергоефективність.

Комунікаційні модулі є важливою частиною системи, оскільки забезпечують її інтеграцію в інформаційне середовище підприємства або енергетичного оператора.

Джерела живлення та енергетичні модулі. Для забезпечення стабільної роботи системи використовуються промислові джерела живлення - переважно з напругою 24 В. У складі комплексу можуть бути передбачені імпульсні перетворювачі, що формують напругу 5 В або 3.3 В для живлення логіки, сенсорів та модулів зв'язку [8].

Для захисту електроніки передбачаються обмежувачі перенапруг, запобіжники, фільтри живлення. У разі критичних об'єктів застосовуються акумулятори резервного живлення, суперконденсатори або джерела безперебійного живлення, що забезпечують роботу системи під час відключення мережі.

Периферійні пристрої взаємодії з оператором. Для взаємодії з користувачем у складі комплексу можуть бути передбачені дисплеї (LCD, OLED або HMI-панелі), які дозволяють виводити поточні значення параметрів, повідомлення про помилки, аварії або сервісні стани.

Інтерфейс взаємодії може також включати сенсорні панелі, кнопки для введення налаштувань, індикатори аварій (світлодіоди, зумери), реле зворотного зв'язку тощо. У промислових системах часто використовуються повноцінні HMI (Human-Machine Interface) з можливістю вибору режимів роботи, відображення графіків та меню керування.

Програмне забезпечення є невід'ємною частиною вимірювального комплексу. Вбудоване ПЗ (firmware) реалізує базові алгоритми обчислення, контролю, аварійного реагування та обміну даними. Воно працює

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		17

безпосередньо в контролерах або мікроконтролерах та забезпечує автономну роботу комплексу.

Для розширених функцій використовуються SCADA-системи, які дозволяють відображати інформацію в реальному часі, архівувати дані, здійснювати аналіз споживання, генерувати звіти і формувати системи енергетичного моніторингу підприємства. Вони взаємодіють із вимірювальним комплексом через стандартні протоколи зв'язку (наприклад, Modbus TCP/IP або OPC-UA).

Комплексна взаємодія всіх перелічених компонентів дозволяє системі вимірювання параметрів природного газу забезпечувати точний облік, швидке виявлення аварійних ситуацій, гнучкість у підключенні до цифрових платформ та повну інтеграцію в інфраструктуру енергоменеджменту. Завдяки модульній структурі, такі системи легко адаптуються до специфіки конкретного об'єкту - від побутового рівня до великої промисловості.

1.2 Сенсори, що застосовуються в системах вимірювання параметрів природного газу

У складі сучасних автоматизованих систем контролю та обліку природного газу сенсорні компоненти відіграють ключову роль, оскільки саме вони забезпечують фізичне вимірювання основних параметрів середовища: тиску, температури, витрати, а в окремих випадках - складу газової суміші. Від точності та стабільності роботи сенсорів безпосередньо залежить достовірність подальших обчислень, включаючи перерахунок об'єму до стандартних умов, оцінку витрат енергії та забезпечення безпеки газорозподільної інфраструктури.

Однією з найважливіших груп є *первинні перетворювачі тиску*, які використовуються для вимірювання абсолютного, надлишкового або

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		18

диференціального тиску у трубопроводах, редукційних установках або вхідних вузлах газових систем. Вони можуть бути реалізовані на основі п'єзорезистивного або ємнісного принципу дії, мають аналогові (4–20 мА) або цифрові інтерфейси (I2C, SPI), а також здатні працювати у широкому діапазоні температур і в умовах змінної вологості. Типові представники цієї категорії, такі як Honeywell MPR або Sensirion SDP-серії, забезпечують точність у межах 0,25–1% від повної шкали, що робить їх придатними як для побутового, так і для промислового застосування [9].

Первинні перетворювачі температури. У вимірювальних системах вони необхідні як для контролю температури потоку, так і для здійснення температурної компенсації при розрахунках об'єму та маси газу. Найчастіше застосовуються термометри опору типу Pt100 або Pt1000 [5], які демонструють високу стабільність та точність до $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$. Вони мають лінійну залежність опору від температури, легко калібруються і сумісні з більшістю промислових АЦП. У побутових або спрощених системах також можуть використовуватися напівпровідникові цифрові сенсори (DS18B20, NTC-термістори), які зручно інтегруються до мікроконтролерів без додаткових аналогових підсилювачів.

У ряді розширених рішень також застосовуються *газоаналізатори* - прилади, які дозволяють виявляти концентрацію метану, вуглекислого газу, кисню або інших компонентів у складі природного газу. Вони базуються на різних фізичних принципах: напівпровідниковому, інфрачервоному абсорбційному або електрохімічному. Наприклад, Figaro TGS2611 або Bosch BME688 використовуються для виявлення присутності CH_4 , CO або H_2 , і забезпечують додатковий рівень безпеки або діагностики, особливо у виробничих умовах або лабораторних системах контролю якості газу [10].

Окрім основних параметрів потоку, у складних системах можуть бути застосовані *додаткові сенсори* - вологості, вібрації, положення клапанів тощо. Вони дозволяють реалізувати функції моніторингу стану

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		19

трубопроводів, виявлення витоків, контролю стану арматури або сигналізації про аварійні події. Наприклад, сенсори типу DHT22 забезпечують одночасний контроль температури та вологості, акселерометри (наприклад ADXL345) фіксують вібрації, а датчики Холла - положення елементів керування або клапанів [11].

Основним структурним елементом автоматизованого комплексу вимірювання параметрів природного газу, що визначає якість його роботи, є первинний перетворювач витрати (у складі вимірювача витрати або кількості).

1.3 Перетворювачі витрати

Існують багато методів вимірювання витрати. Для обліку газу найбільш широкого застосування набули прилади та пристрої, що ґрунтуються на методі змінного перепаду тиску, тахометричному, вихровому, силовому та ультразвуковому методах. Вибір методу вимірювання витрати залежить від умов експлуатації, вимог до точності, діапазону вимірюваних витрат та цільового призначення обліку. Кожен клас приладів має свої конструктивні та функціональні особливості, що обумовлюють їх переваги та обмеження.

Метод змінного перепаду тиску. Серед приладів, що реалізують цей метод вимірювання витрати, найбільшого застосування для обліку витрати та об'єму природного газу набули прилади із звужувальними пристроями.

Принцип дії методу змінного перепаду тиску ґрунтується на законі збереження енергії для потоку рідини чи газу, зокрема — на рівнянні Бернуллі. Сутність методу полягає у створенні навмисної звуженої ділянки в трубопроводі (наприклад, встановленням діафрагми, сопла або труби Вентурі), при цьому вимірюється різниця тисків до місця встановлення звужувального пристрою та після нього (рис. 1.1).

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		20

Оскільки величина перепаду тиску прямо пов'язана з витратою газу, можна розрахувати його об'ємну витрату, використовуючи відповідні калібрувальні коефіцієнти та залежності з урахуванням щільності газу, температури, тиску та геометричних параметрів пристрою.

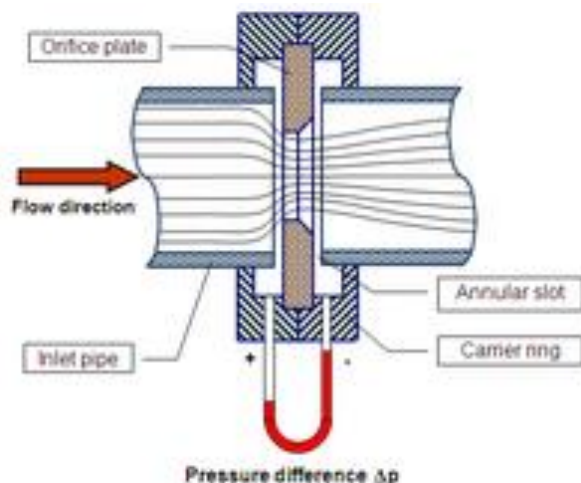


Рисунок 1.1. Метод змінного перепаду тиску

Отже, точність вимірювання залежить від правильності встановлення елементів, відповідності умов експлуатації та регулярного калібрування [12; 13].

Представниками *тахометричного методу* у цій галузі є турбінні, роторні та мембранні лічильники газу.

Турбінні витратоміри. Принцип дії турбінних витратомірів базується на вимірюванні частоти обертання чутливого елемента (ЧЕ). Частота обертання ЧЕ пропорційна швидкості потоку, і відповідно - об'єму газу (рис. 1.2).

Характерними особливостями таких приладів є [14]:

- висока точність вимірювань (до 1 %);
- широкий діапазон вимірюваних витрат;

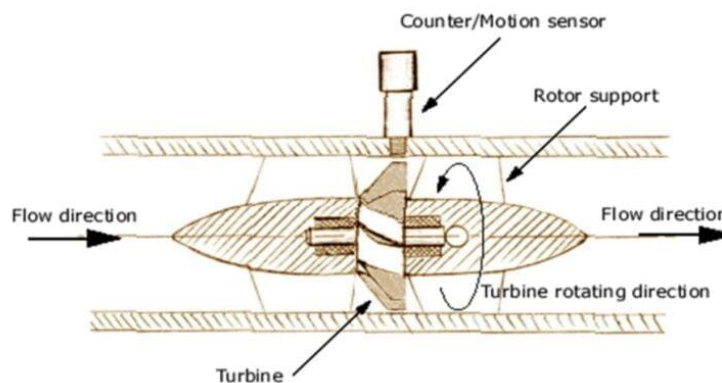


Рисунок 1.2. Турбінний перетворювач

Основними обмеженнями застосування таких приладів є чутливість до механічних домішок і вібрацій, а також необхідність регулярного технічного обслуговування через наявність рухомих елементів [15].

Ротаційні лічильники реалізують принцип вимірювання шляхом обліку циклічних об'ємів газу, які проходять через вимірювальну камеру з двома роторами, що синхронно обертаються (рис. 1.3).

Перевагами приладів цього класу є [15]:

- висока точність вимірювань невеликих витрат;
- компактні розміри, що дозволяє їх встановлення у вузлах обліку з обмеженим простором;
- синхронна робота роторів забезпечує стабільний цикл обліку об'ємів незалежно від тиску в межах робочого діапазону.
- наявність імпульсного виходу - більшість сучасних моделей оснащені магнітним або оптичним датчиком, який формує імпульси, що легко інтегрується в системи автоматизованого збору даних.

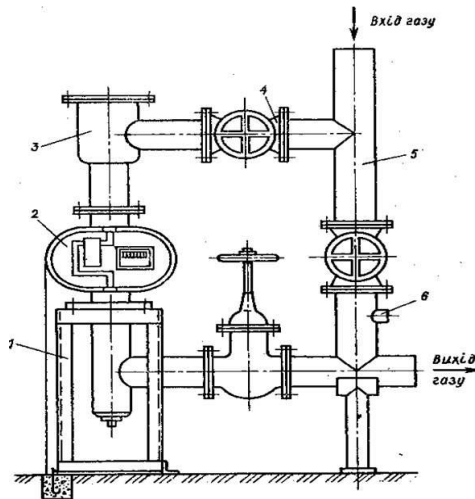


Рисунок 1.3. Ротаційний лічильник

Водночас їх продуктивність є обмеженою, а наявність механічних частин зумовлює поступовий знос у процесі експлуатації.

Мембранні (діафрагмові) лічильники. Принцип дії: газ із вхідного трубопроводу потрапляє у корпус приладу, поділений на дві або чотири вимірювальні камери, розділені гнучкими мембранами. Переміщення мембран викликається перепадом тиску між вхідною та вихідною частинами приладу, що виникає в результаті надходження та виходу газу з камер (рис. 1.4).

Рух мембран через тяги або важелі передається на маховик або кулачковий механізм, який обертає лічильний механізм. Кожен повний цикл переміщення мембран відповідає точно визначеному об'єму газу (наприклад, 1 літру), тому підрахунок кількості циклів дозволяє визначити загальний спожитий об'єм [16; 17].

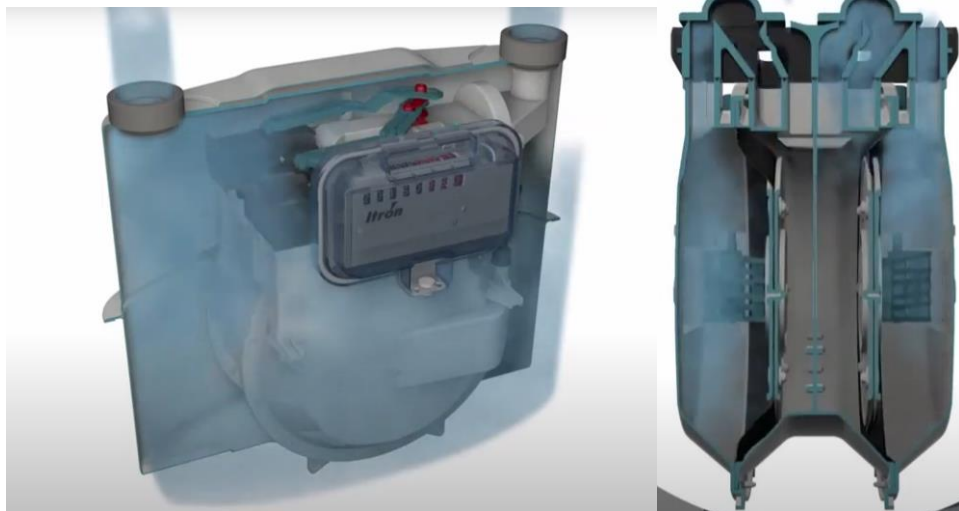


Рисунок 1.4 Мембранний лічильник

Перевагами приладів цього класу є:

- Незалежність від електроживлення - уся механіка працює за рахунок енергії самого газового потоку, що дозволяє експлуатувати прилад у будь-яких умовах без зовнішніх джерел живлення.
- Стійкість до короточасних перевантажень. Завдяки об'ємному принципу роботи конструкція не критична до незначних гідравлічних імпульсів або вібрацій у системі.
- Сумісність з автоматизованими системами. Багато моделей мають можливість оснащення імпульсними виходами для інтеграції в системи дистанційного зчитування або телеметрії.
- Висока точність при низьких витратах. Завдяки конструкції з об'ємними камерами, лічильники забезпечують стабільний облік навіть за мінімального газоспоживання, що є критичним для побутових та малих комерційних споживачів.

Ультразвукові витратоміри. Принцип дії базується на вимірювання об'ємної витрати шляхом визначення часу проходження ультразвукових сигналів між двома сенсорами - у напрямку потоку та проти нього. Різниця в часі дозволяє розрахувати середню швидкість потоку, а отже й об'єм газу (рис. 1.5).

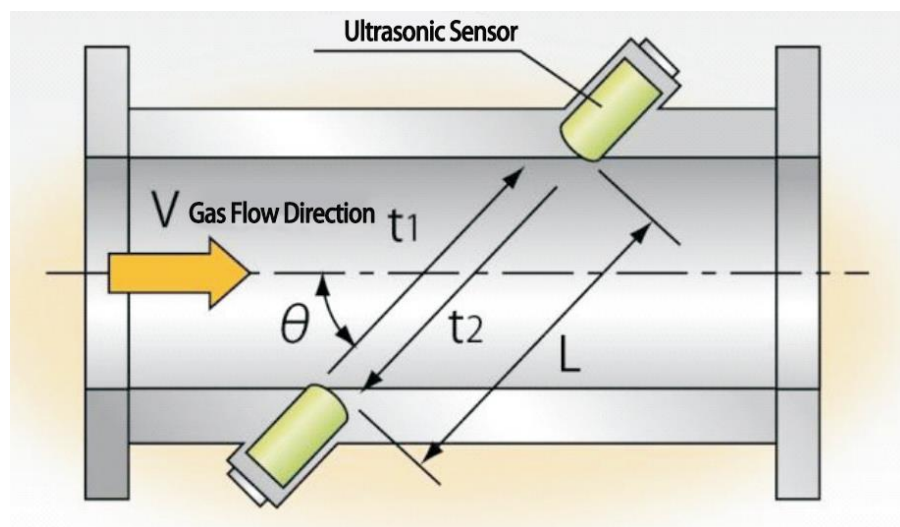


Рисунок 1.5 Ультразвуковий перетворювач витрати

Перевагами приладів цього класу є [18; 19]:

- висока точність, що може досягати 0,5 %;
- низькі втрати тиску;
- відсутність рухомих частин;
- можливість встановлення на трубопроводах великого діаметру, зокрема у промислових вузлах обліку та магістральних газопроводах.

Єдиним суттєвим обмеженням застосування таких приладів є відносно висока вартість, а також необхідність точного монтажу та калібрування.

Коріолісові витратоміри реалізують пряме вимірювання масової витрати шляхом пропускання газу через вигнуту вібруючу трубку. Під час проходження потоку виникає ефект Коріоліса, який змінює фазу вібрацій трубки. Вимірюванням цієї зміни, можна точно визначити масову витрату, а також густину газу [20; 21].

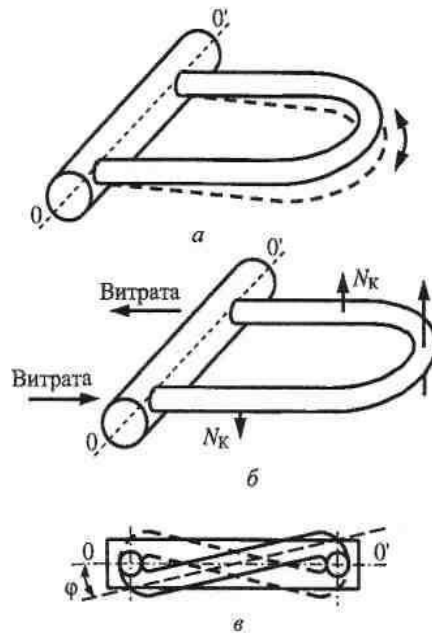


Рисунок 1.6 Коріолісові перетворювачі витрати

Перевагами приладів цього класу є:

- Безпосереднє вимірювання масової витрати - на відміну від об'ємних витратомірів, коріолісові прилади здійснюють пряме вимірювання масової витрати, що виключає необхідність додаткової температурно-тискової компенсації. Це особливо важливо для точного обліку газу в умовах змінної густини або нестабільного складу.

- Відсутність необхідності у прямих і заспокійливих ділянках трубопроводу. Завдяки принципу вимірювання, коріолісові витратоміри практично не чутливі до гідравлічних збурень потоку (турбулентність, пульсації, зворотні течії), що дає змогу зменшити монтажні вимоги та габарити вузла обліку.

- Високий ступінь надійності і стійкість до зовнішніх впливів. Конструкція з відсутністю механічних обертових частин забезпечує високу зносостійкість, тривалий ресурс роботи і мінімальні експлуатаційні витрати.

Усі наведені класи витратомірів застосовуються в системах обліку природного газу, і вибір конкретного рішення залежить від багатьох

чинників: необхідної точності, специфіки технологічного процесу, вартості, наявності обслуговуючого персоналу та засобів метрологічного контролю (табл. 1.1, табл. 1.2).

Таблиця 1.1 Особливості застосування методів вимірювання витрати

Метод вимірювання	Типові прилади	Точність	Переваги	Обмеження	Області застосування
Змінного перепаду тиску	Витратоміри зі звужувальними пристроями	$\pm 1,5\%$ до $\pm 2\%$	Простота конструкції, низька вартість, довготривале використання	Чутливість до зміни складу, необхідність прямих ділянок, середня точність	Промислові трубопроводи, магістральні лінії
Тахометричний	Турбінні, ротаційні, мембранні лічильники	$\pm 1\%$ до $\pm 2\%$	Широкий діапазон витрат, сумісність з автоматикою	Знос деталей, чутливість до домішок, потреба в обслуговуванні	Облік у ЖКГ, малі промислові об'єкти
Ультразвуковий	Elster Q.Sonic, KROHNE, Siemens	$\pm 0,5\%$ до $\pm 1\%$	Безконтактність, висока точність, низькі втрати тиску	Висока вартість, вимоги до встановлення, складність калібрування	Комерційний та промисловий облік, SCADA
Масовий (Коріолісовий)	Micro Motion, Siemens Sitrans F	$\pm 0,1\%$ до $\pm 0,5\%$	Пряме вимірювання маси, не потребує компенсацій	Висока ціна, складна електроніка, чутливість до вібрацій	Промисловість, складні процеси, змінна густина газу

Таблиця 1.2 Характеристики витратомірів газу з DN50

	Q.Sonic -3	Micro Motion CMF050	ALTOSO NIC V12	Thermatel TA2	FLAWSIC500	RVG G250
Виробник	Honeywell [22]	Emerson [23]	KROHN E [24]	Magnetrol [25]	SICK [26]	Elster [27]
Країна	Бельгія	Америка	Німеччина	Бельгія	Німеччина	Німеччина
Метод вимірювання	Ультразвуковий	Коріолісовий	Ультразвуковий	Термоанемометричний	Ультразвуковий	Тахометричний (Турбінний)
Діапазон витрат, м³/год	50–650	0,7-1000 (кг/год)	50-1000	14,5-1450 (кг/год)	0,9-870	25-650
Діапазон температури, °C	-20 до +60	-50 до +205	-40 до +80	-45 до +200	-25 до +70	-25 до + 60
Робочий тиск, МПа	до 10	до 25	до 16	до 1,05	до 10	До 10
Похибка	±0,1%	±0,1%	±0,15%	±1% + 0,5%	±0,5%	±1,5%
Інтерфейси	Modbus, HART, Profibus	HART, FF	Modbus, HART	4–20 мА	M-Bus, Modbus	Імпульсний вхід, 4–20 мА

На сучасному етапі найбільш ефективними вважаються ультразвукові витратоміри, які мають найкраще поєднання точності, надійності та гнучкості застосування. Для специфічних завдань (масова витрата, густина) - доцільно застосовувати коріолісові витратоміри. Прилади, побудовані на тахометричному методі, залежно від первинного перетворювача застосовуються як у побутовій сфері, так і на промислових об'єктах.

1.4 Мікросхеми, що використовуються як контролери

Основою більшості сучасних автоматизованих систем вимірювання природного газу є мікроконтролер – спеціалізована інтегральна схема, яка виконує функції центрального керуючого елемента. Саме мікроконтролер забезпечує зчитування сигналів від сенсорів тиску, температури, витрати, координує обробку інформації, реалізує алгоритми нормалізації, керує інтерфейсами зв'язку та забезпечує взаємодію з користувачем або зовнішніми системами обліку [28].

Серед широкого спектру доступних рішень виділяються кілька основних платформ, які використовуються у промислових та лабораторних вимірювальних комплексах. Однією з найбільш поширених серій є STM32 від компанії STMicroelectronics - 32-бітні мікроконтролери, побудовані на архітектурі ARM Cortex-M. Вони вирізняються високою енергоефективністю, потужними можливостями для обробки аналогових і цифрових сигналів, а також широкою підтримкою інтерфейсів (UART, I2C, SPI, CAN, Ethernet). Ці мікросхеми мають вбудовані АЦП високої точності, підтримку реального часу, а деякі моделі – навіть апаратне шифрування, що робить їх придатними для використання у промислових умовах з підвищеними вимогами до безпеки та надійності [29].

Для задач, пов'язаних із передачею даних у бездротові мережі або розгортанням IoT-рішень, часто застосовуються мікроконтролери ESP32 від компанії Espressif Systems. Ці мікросхеми об'єднують у собі два ядра Tensilica LX6 та інтегровані модулі Wi-Fi і Bluetooth, що дозволяє реалізувати автономні пристрої збору та передачі даних без потреби в додаткових модулях зв'язку. ESP32 відзначається великою кількістю цифрових та аналогових входів/виходів і добре підходить для розробки бездротових вузлів моніторингу, лічильників та сенсорних мереж з віддаленим доступом.

					ДІПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		29

Для менш ресурсоемних задач активно застосовуються мікроконтролери ATmega328 та ATmega2560, які набули популярності завдяки платформі Arduino. Це 8-бітні рішення з достатньою кількістю портів введення/виведення, підтримкою базових інтерфейсів зв'язку та простотою програмування. Їх доцільно використовувати в допоміжних модулях збору первинної інформації або в лабораторних макетах, де не потрібна складна цифрова обробка [30].

У промислових системах, де критичною є наявність надійного мережевого зв'язку, стабільності в широкому температурному діапазоні та високошвидкісної обробки даних, ефективно застосовуються мікроконтролери серії LPC від NXP, побудовані на ядрах ARM Cortex-M0/M3/M4. Вони підтримують інтерфейси Ethernet, USB, CAN, оснащені апаратною підтримкою DSP-операцій і добре зарекомендували себе у ролі обчислювальних вузлів SCADA-систем або мережевих шлюзів для енергетичних об'єктів.

Для автономних застосувань, де критичним є споживання енергії, використовуються мікроконтролери серії MSP430 від Texas Instruments. Ці 16-бітні мікросхеми характеризуються надзвичайно низьким енергоспоживанням (в режимі очікування - одиниці або десятки наноампер), наявністю інтегрованих аналогових модулів та таймерів. Вони застосовуються у пристроях, що працюють від батарей або джерел енергії навколишнього середовища - наприклад, у важкодоступних точках контролю.

Загалом вибір мікроконтролера для вимірювального комплексу залежить від низки факторів: необхідної швидкодії, складності обчислень, кількості та типу підключених сенсорів, вимог до інтерфейсів зв'язку, умов експлуатації та рівня енергоспоживання. У рамках даного дипломного проєкту доцільним є використання STM32 або ESP32, як таких, що

забезпечують оптимальний баланс між продуктивністю, функціональністю, комунікаційними можливостями та вартістю реалізації прототипу [23].

1.5 Висновки по розділу 1

Ефективність функціонування автоматизованої системи вимірювання параметрів природного газу значною мірою залежить від якості сенсорної частини. Найчастіше використовуються комбінації сенсорів тиску, температури та витрати. Вибір конкретного сенсора повинен базуватись на аналізі властивостей робочого середовища, необхідної точності вимірювань, умов експлуатаційного використання, (зокрема, енергоспоживання та типу інтерфейсу).

Ретельно підібрана сенсорна база забезпечує основу для створення надійної, адаптивної та точної вимірювальної системи, здатної інтегруватися у сучасні автоматизовані комплекси обліку та диспетчеризації.

На підґрунті аналізу структури та функціональних елементів автоматизованого комплексу вимірювання природного газу запропоновано створити комплекс із використанням ультразвукового перетворювача витрати, оскільки перетворювачі цього класу мають найкраще поєднання точності, надійності та гнучкості застосування.

2. РОЗРОБКА СХЕМИ ВИМІРЮВАННЯ

Принцип роботи автоматизованого комплексу ґрунтується на зчитуванні фізичних параметрів газу за допомогою відповідних сенсорів (рис. 2.1). Виміряні сигнали надходять до обчислювального пристрою, де здійснюється їхнє перетворення, обробка, корекція, а також математичне перерахування фактичного об'єму до стандартних умов (температура +20 °С, тиск 760 мм рт. ст.) [31]. У разі виявлення виходу параметрів за межі допустимих значень автоматично формується сигнал тривоги, який може бути використаний для оповіщення персоналу або активації аварійних заходів.

Комплекс передбачає локальне відображення інформації на панелі оператора, а також можливість інтеграції з зовнішніми системами диспетчеризації, обліку або архівації даних. Завдяки цьому забезпечується не лише контроль за споживанням газу, але й оперативне реагування на нестандартні ситуації, формування звітності, аналіз динаміки споживання та оптимізація енергетичних процесів.

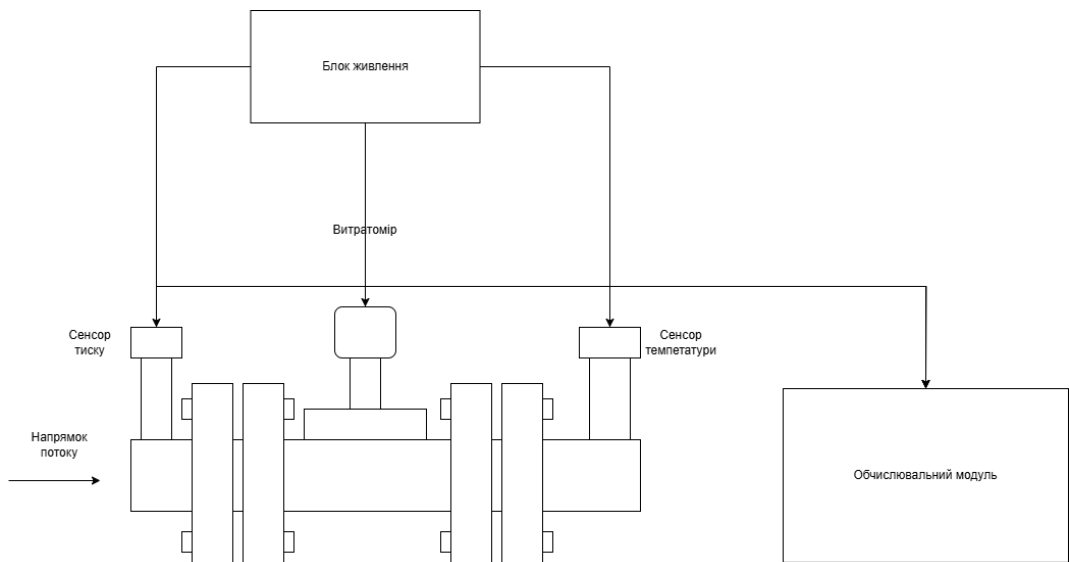


Рисунок 2.1. Структурна схема

2.1 Первинний перетворювач тиску

Для вимірювання надлишкового тиску в системі транспортування природного газу у даному проєкті використовується п'єзорезистивний сенсор тиску з аналоговим виходом типу 4–20 мА. Такий підхід дозволяє реалізувати надійне, точне та стабільне зчитування значень тиску у промислових умовах. Обраний сенсор працює в межах вимірювального діапазону від 0 до 1,6 МПа, що є типовим для газорозподільчих мереж низького та середнього тиску.

Прикладом такого сенсора є WİKA A-10 [32], один із найбільш поширених приладів у галузі промислових вимірювань, або його вітчизняний аналог - ПТ-01, який відповідає схожим метрологічним характеристикам (рис. 2.2).

Принцип дії п'єзорезистивного сенсора полягає у зміні опору тензорезистивного елемента при деформації мембрани під тиском газу. Ця зміна опору перетворюється на аналоговий електричний сигнал, який, після відповідного перетворення (наприклад, за допомогою шунта), може бути оброблений контролером або мікроконтролером системи.



Рисунок 2.2. WİKA A-10 [30]

Сигнал у форматі 4–20 мА є промисловим стандартом і забезпечує високу завадостійкість та стабільність при передачі даних навіть на значні відстані. Мінімальне значення 4 мА також дозволяє реалізувати самодіагностику

лінії: обрив проводу легко розпізнається як вихід сигналу за допустимий діапазон.

Сенсор є повністю сумісним як із промисловими ПЛК, так і з контролерами типу Arduino або ESP32, через використання зовнішнього шунтового резистора для перетворення струмового сигналу у напругу, яку згодом зчитує аналоговий вхід. Це спрощує інтеграцію навіть у лабораторних чи прототипних рішеннях, не вимагаючи дорогого обладнання.

Фізично сенсор має три основні виводи: VCC (подача живлення, зазвичай 12 або 24 В постійного струму), GND (загальна земля) та OUT - аналоговий вихід сигналу 4–20 мА. При правильному монтажі та калібруванні сенсор забезпечує стабільні вимірювання в широкому температурному діапазоні та може працювати в умовах підвищеної вологості або забруднення.

2.2 Первинний перетворювач температури

У складі автоматизованого комплексу обліку природного газу одним з критичних елементів є датчик температури, що дозволяє враховувати температурні коливання середовища та здійснювати коректне приведення об'єму газу до стандартних умов. Для цього в проєкті використовується термометр опору Pt100 [4], який характеризується високою точністю, стабільністю та довготривалою надійністю (рис. 2.3).



Рисунок 2.3. PT100 [31]

Такий сенсор базується на зміні електричного опору платиногого провідника залежно від температури: зокрема, Pt100 має номінальний опір 100 Ом при 0°C, і ця залежність є лінійною в діапазоні від -50 до +150 °C, що робить його придатним для промислового застосування.

Для забезпечення високої точності вимірювань та зручної інтеграції з цифровими системами керування, Pt100 підключається до спеціалізованого перетворювача сигналу - MAX31865, який виконує роль інтерфейсного модуля. MAX31865 дозволяє здійснювати прецизійне вимірювання опору термопари та перетворює аналоговий сигнал на цифрове значення, яке передається контролеру за допомогою SPI-інтерфейсу (Serial Peripheral Interface). Така архітектура забезпечує високий рівень захисту від перешкод, швидке опитування сенсора та можливість безпосереднього підключення до мікроконтролерів або ПЛК без необхідності зовнішнього АЦП.

Фізично сенсор має такі основні контакти: F+ / F- - підключення самого елемента Pt100 (двопровідна або чотирипровідна схема), VIN / GND - лінії живлення перетворювача, а також цифрові сигнали CS (chip select), SDI (data in), SDO (data out), CLK (тактовий сигнал), що реалізують обмін по SPI-протоколу.

Використання сенсора Pt100 класу А у поєднанні з MAX31865 дозволяє досягти точності до $\pm 0,1$ °C, що є критично важливим для об'єктивного розрахунку приведенного об'єму газу відповідно до стандартних умов ($t = 20$ °C). Це, у свою чергу, забезпечує правильне комерційне або технологічне обліковування природного газу, а також можливість інтеграції у метрологічно атестовані системи.

Таким чином, температурний модуль у складі комплексу виконує не лише функцію вимірювання, а є складовою системи компенсації параметрів середовища. Це підвищує точність загальної системи, робить її відповідною до вимог галузевих стандартів та забезпечує стабільну роботу в умовах експлуатації з широким температурним діапазоном.

					<i>ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		35

2.3 Програмований логічний контролер (ПЛК)

Центральною керуючою ланкою в автоматизованому комплексі вимірювання природного газу є програмований логічний контролер, який забезпечує обробку сигналів із сенсорів, виконання обчислень, реалізацію логіки аварійного реагування та комунікацію з іншими модулями системи. У рамках даного проєкту обрано Controllino MINI [33, 34] - мікропроцесорний пристрій з відкритою архітектурою, що побудований на базі мікроконтролера Atmega328P. Контролер повністю сумісний із середовищем Arduino IDE, що значно полегшує розробку, налагодження та модернізацію програмного забезпечення.

Controllino MINI [32-34] поєднує у собі гнучкість системи керування на основі Arduino та промислову надійність, зокрема, має вбудовані цифрові та аналогові входи/виходи, гальванічну розв'язку, захист від перенапруги, а також підтримку модулів зв'язку, включаючи RS-485, SPI, I2C та UART (рис. 2.4). Завдяки цьому контролер може ефективно працювати в системах моніторингу, управління й диспетчеризації навіть в умовах промислових завод.

У рамках автоматизованого комплексу, контролер виконує кілька важливих функцій:

- збір даних із сенсорів тиску, температури та витрати - відповідно через аналоговий, цифровий або SPI-інтерфейси;
- перерахунок об'єму газу до стандартних умов, з урахуванням температурної та тискової компенсації;
- реалізує логіку обробки імпульсів, що надходять з витратоміра, дозволяючи обчислювати об'єм газу в реальному часі.

Зокрема, при виявленні критичних значень параметрів (наприклад, перевищення допустимої температури або тиску), система активує аварійну

сигналізацію, а також передає інформацію на дисплей або по бездротовому каналу (Wi-Fi, GSM тощо).



Рисунок 2.4. Controllino MINI [33, 34]

Усе це дозволяє будувати як локальні автономні рішення, так і системи, інтегровані до SCADA або хмарних платформ.

У проєкті передбачене наступне функціональне використання пінів:

- A0 - аналоговий вхід для зчитування сигналу від сенсора тиску (через шунт з 4–20 мА на 0–5 В);
- D2 - цифровий вхід, який приймає імпульсні сигнали з витратоміра;
- D10–D13 - цифрові лінії SPI-інтерфейсу, що використовуються для підключення до MAX31865 та зчитування даних з температурного сенсора Pt100;
- D6 - лінія керування передачею/прийомом на шині RS-485, у разі підключення до модулів з Modbus RTU;
- D7 - цифровий вихід для керування візуальною або звуковою аварійною індикацією (наприклад, світлодіод або бубер);
- VCC / GND - живлення та загальна земля контролера та периферійних пристроїв.

Завдяки такій архітектурі, Controllino MINI [33, 34] виступає як гнучкий і масштабований обчислювальний блок, що об'єднує всі компоненти комплексу в єдину логічну систему, здатну забезпечити надійний контроль, точний облік і своєчасне реагування на критичні ситуації.

2.4 Людино-машинний інтерфейс (НМІ)

У складі автоматизованого комплексу обліку природного газу важливу роль відіграє людино-машинний інтерфейс (НМІ), який забезпечує візуалізацію параметрів процесу, індикацію станів системи. У даному проєкті для реалізації НМІ застосовується сенсорна панель Weintek [35], що дозволяє організувати зручну взаємодію між користувачем (оператором або обслуговуючим персоналом) та вимірювальною частиною системи.

Weintek [35] - це промислова панель управління з підтримкою кольорового графічного інтерфейсу, яка може працювати в режимі локального дисплея або бути частиною SCADA-мережі. Через порт RS-485 або UART панель обмінюється даними з програмованим логічним контролером (ПЛК), що забезпечує двосторонню комунікацію: як передачу поточних вимірювань, так і отримання команд від оператора. Інтерфейс передачі даних може реалізовуватись із використанням протоколу Modbus RTU, який є галузевим стандартом для промислових пристроїв (рис. 2.5).

Функціонально панель виконує виведення в реальному часі таких параметрів, як температура газу, тиск у трубопроводі, миттєва витрата, а також результати обчислень приведенного об'єму або енергетичної цінності. У разі виявлення аварійної ситуації (вихід параметра за допустимий діапазон) на екрані автоматично відображається ALARM-повідомлення, що дає змогу оператору оперативно реагувати на подію. Крім цього, НМІ дозволяє реалізувати опціональне введення граничних значень, меж регулювання або команд керування режимами роботи.



Рисунок 2.5. Weintek [35]

З точки зору підключення, панель має стандартні контакти: VCC / GND для живлення, DI / RO - для прийому і передачі даних (через RS-485 або UART), а також DE / RE - лінії керування напрямком передачі, необхідні для роботи з напівдуплексним протоколом RS-485.

Завдяки застосуванню сенсорного інтерфейсу, кольорової графіки та гнучкої конфігурації екранів, HMI-панель значно підвищує зручність користування системою, зменшує ймовірність помилок обслуговуючого персоналу та дозволяє забезпечити повноцінний контроль над об'єктом без потреби в підключенні до комп'ютера або сервера. Вона також може слугувати точкою доступу для локального перегляду трендів параметрів, архівів подій або періодичних звітів, що робить її важливою складовою сучасної системи обліку газу.

2.5 Модуль бездротового зв'язку (Wi-Fi)

Для забезпечення віддаленого доступу до даних вимірювального комплексу та інтеграції з сучасними системами диспетчеризації у проєкті використовується Wi-Fi-модуль ESP8266-01 (ESP-01) [36]. Це компактний та енергоефективний модуль зв'язку, що дозволяє реалізувати як пряме підключення до локальної мережі, так і організацію бездротової точки доступу. Завдяки підтримці протоколів HTTP та MQTT, модуль здатен надсилати показники (температуру, тиск, витрату, об'єм, енерговитрати) на

веб-сервер, SCADA-хост, мобільний застосунок або в хмарну інфраструктуру для архівації, візуалізації та подальшої обробки (рис. 2.6).

ESP-01 [36] побудований на базі мікросхеми ESP8266 від компанії Espressif Systems, яка має вбудований процесор Tensilica L106 (80–160 МГц), вбудований Wi-Fi-модуль IEEE 802.11 b/g/n, а також 1 МБ флеш-пам'яті. Завдяки цьому модуль може працювати автономно або як віддалений вузол обміну даними, приєднаний до контролера через UART-інтерфейс (TX/RX). Така конфігурація дозволяє організувати двосторонню передачу інформації з мінімальними апаратними затратами.

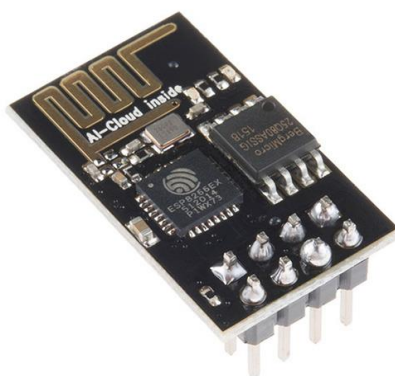


Рисунок 2.6. ESP-01 [36]

В проєкті ESP-01 використовується для збору результатів вимірювання (отриманих із ПЛК або мікроконтролера) та їх публікації в мережі. Можливе створення локального веб-інтерфейсу, доступного через браузер, або ж передача інформації на віддалений сервер через MQTT-брокер. Окрім цього, модуль може бути сконфігурований як точка доступу (SoftAP) для прямого підключення смартфона або ноутбука без потреби у зовнішній мережі.

Фізичне підключення ESP-01 [36] до керуючої системи передбачає чотири основні виводи: VCC (3.3 В живлення), GND (загальна земля), TX (передача даних до контролера) та RX (приймання команд від контролера). Усі сигнали логічно сумісні з TTL-рівнями 3.3 В, тому при роботі з мікроконтролерами, які використовують 5 В, потрібне використання

резистивного дільника або логічного рівневого перетворювача для захисту приймача RX.

Завдяки своїй простоті, низькій вартості та широкій підтримці з боку розробників, ESP-01 [36] є ідеальним рішенням для організації бездротового телеметричного доступу, що суттєво підвищує функціональність системи та відкриває можливості для її подальшого розширення в напрямку IoT-платформ або хмарного моніторингу.

2.6 Модуль GSM-зв'язку (SIM800L)

У складі автоматизованого комплексу вимірювання природного газу важливим функціональним елементом є модуль GSM-зв'язку, який забезпечує дистанційну передачу даних через мобільну мережу. Для реалізації цієї функції в проєкті використовується модуль SIM800L, який підтримує стандарти GSM/GPRS та дозволяє надсилати дані як у форматі SMS, так і через інтернет-протоколи (HTTP, TCP/IP, FTP). Такий модуль слугує резервним або альтернативним каналом зв'язку, особливо у випадках, коли Wi-Fi або провідне підключення недоступні або ненадійні.

Модуль SIM800L [37, 38] підтримує чотиридіапазонні мережі GSM (850/900/1800/1900 МГц), що дозволяє використовувати його в більшості регіонів України та світу (рис. 2.7). Він має можливість обміну даними з мікроконтролером через UART-інтерфейс (послідовний зв'язок TX/RX), забезпечуючи просту інтеграцію з такими платформами, як Arduino, ESP32, STM32 або ПЛК із UART-портами. За допомогою AT-команд здійснюється конфігурація, надсилання повідомлень, ініціація HTTP-запитів, встановлення з'єднання по TCP тощо.

Модуль може працювати у кількох режимах:

- SMS-режим - для надсилання аварійних повідомлень (наприклад, при витоку, перевищенні тиску, високій температурі);

- GPRS-режим - для регулярної передачі показників на віддалений сервер (через HTTP або MQTT-протоколи);
- Виклики (опціонально) - для аварійного сповіщення у вигляді голосового сигналу.



Рисунок 2.7. SIM800L [37, 38]

Для живлення SIM800L [37, 38] потребує напругу 3.4–4.4 В DC, оптимально - 4.0 В. Особливу увагу необхідно приділити джерелу живлення, оскільки в режимі передачі струм споживання може досягати 2 А, що потребує використання стабільного джерела з відповідним запасом по струму. Існують версії з вбудованими антенами, проте для більшої стабільності зв'язку доцільно використовувати зовнішню антену з SMA-роз'ємом.

Основні контакти модуля:

- VCC - подача живлення (4.0 В постійного струму);
- GND - загальна земля системи;
- TX - передача даних (з модуля до мікроконтролера);
- RX - прийом даних (від мікроконтролера);
- RST - лінія скидання (перезапуск модуля при зависанні);
- NET - індикатор стану мережі (моргає при підключенні до мережі GSM).

Завдяки широкому набору функцій та стандартному інтерфейсу, модуль SIM800L [37, 38] дозволяє реалізувати автономний моніторинг і аварійну сигналізацію у реальному часі. Це суттєво підвищує надійність комплексу вимірювання природного газу в умовах польової експлуатації, забезпечуючи стабільний канал зв'язку незалежно від локальної інфраструктури зв'язку. Такий підхід є критично важливим у системах, що працюють на віддалених об'єктах (газорозподільчі станції, резервуари, вузли комерційного обліку), де централізований зв'язок або мережа Wi-Fi відсутні.

2.7 Висновки до розділу 2

Створено структурну схему автоматизованого комплексу вимірювання параметрів природного газу; обґрунтовано функціональні елементи комплексу:

- Первинний перетворювач тиску;
- Первинний перетворювач температури;
- Програмований логічний контролер (ПЛК);
- Людино-машинний інтерфейс (HMI);
- Модуль бездротового зв'язку (Wi-Fi);
- Модуль GSM-зв'язку (SIM800L);

розглянуто їх технічні характеристики.

3. РОЗРОБКА УЛЬТРАЗВУКОВОГО ВИТРАТОМІРА

3.1 Математична модель ультразвукового перетворювача витрати

Принцип роботи ультразвукового витратоміра ґрунтується на вимірюванні часу поширення акустичних імпульсів в напрямку потоку та проти нього (рис. 3.1). Знаючи різницю часу, можна визначити швидкість потоку, а з неї - об'ємну витрату газу.

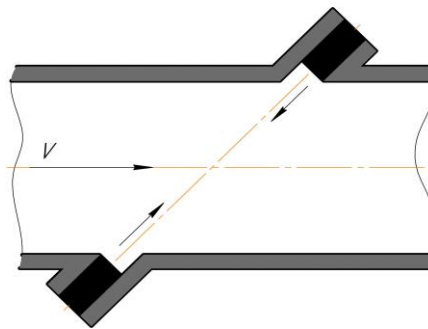


Рисунок 3.1. До принципу дії [39]

Час проходження сигналу за потоком:

$$t_1 = \frac{L}{c + v_i \cdot \cos \varphi}, \quad (3.1)$$

де L - довжина звукового шляху; c - швидкість звуку у вимірюваному середовищі; v - швидкість потоку газу (м/с); φ - нахил ультразвукового сигналу відносно осевого напрямку потоку.

Час проходження сигналу проти потоку

$$t_2 = \frac{L}{c - v_i \cdot \cos \varphi}. \quad (3.2)$$

Швидкість потоку визначаємо за різницею часу проходження ультразвукових імпульсів за і проти потоку

$$v_i = \frac{l_p}{2 \cos \varphi} \frac{\Delta t}{t_1 t_2}. \quad (3.3)$$

У такому разі для об'ємної витрати отримуємо:

$$Q = A * v. \quad (3.4)$$

де А - площа поперечного перерізу трубопроводу.

З урахуванням (3.3) вираз (3.4) набуває виду

$$Q = A * \frac{L}{2 \cos \varphi} * \frac{\Delta t}{t_2 * t_1}$$

Отриманий вираз описує статичну характеристику перетворення для ультразвукового перетворювача витрати.

3.2 Розробка моделі в SolidWorks

Для візуалізації було розроблено 3D-модель ультразвукового однохордового витратоміра DN50 у середовищі SolidWorks (рис. 3.2). Розроблено складальний кресленик витратоміра.

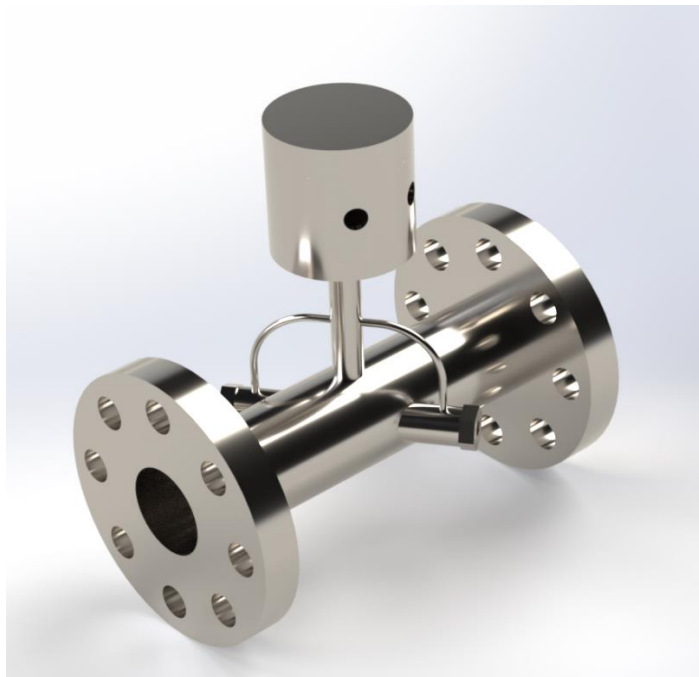


Рисунок 3.2. Модель ультразвукового витратоміра

3.3 Моделювання течії газу через вимірювальну ділянку

					ДІПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		45

Внутрішню частину корпусу перетворювача витрати створено у вигляді ділянки трубопроводу.

Для проведення моделювання задано наступні початкові умови:

- Витрата: $Q = 0.01389 \text{ м}^3/\text{с}$ ($50 \text{ м}^3/\text{год}$);
- Внутрішній діаметр: $D = 50 \text{ мм} = 0.05 \text{ м}$;
- Робоче середовище: природний газ, густина $\rho = 0.72 \text{ кг/м}^3$;
- Температура: $T = 293 \text{ К}$ (20°C);
- Тиск на вході: $p = 1 \text{ атм} = 101325 \text{ Па}$.

Результати моделювання у вигляді розподілу швидкості у поперечному перерізі та втрати тиску за довжиною корпусу приладу наведено на рис. 3.3 та рис. 3.4.

Розрахунок середньої швидкості потоку.

Обчислимо площу поперечного перерізу:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{3.1416 * (0.05)^2}{4}$$

Середня швидкість потоку:

$$v = \frac{Q}{A};$$

$$v = \frac{0.01389}{0.001963} = 7.07 \text{ м/с.}$$

Коефіцієнт Рейнольдса (визначення режиму руху потоку).

В'язкість природного газу приймаємо як $\mu \approx 1.1 \cdot 10^{-5} \text{ Па} \cdot \text{с}$

$$Re = \frac{\rho * v * D}{\mu} = \frac{0.72 * 7.07 * 0.05}{1.1 * 10^{-5}}$$

$$Re \approx 23100$$

Отже, потік є турбулентним, що відповідає реальним умовам експлуатації.

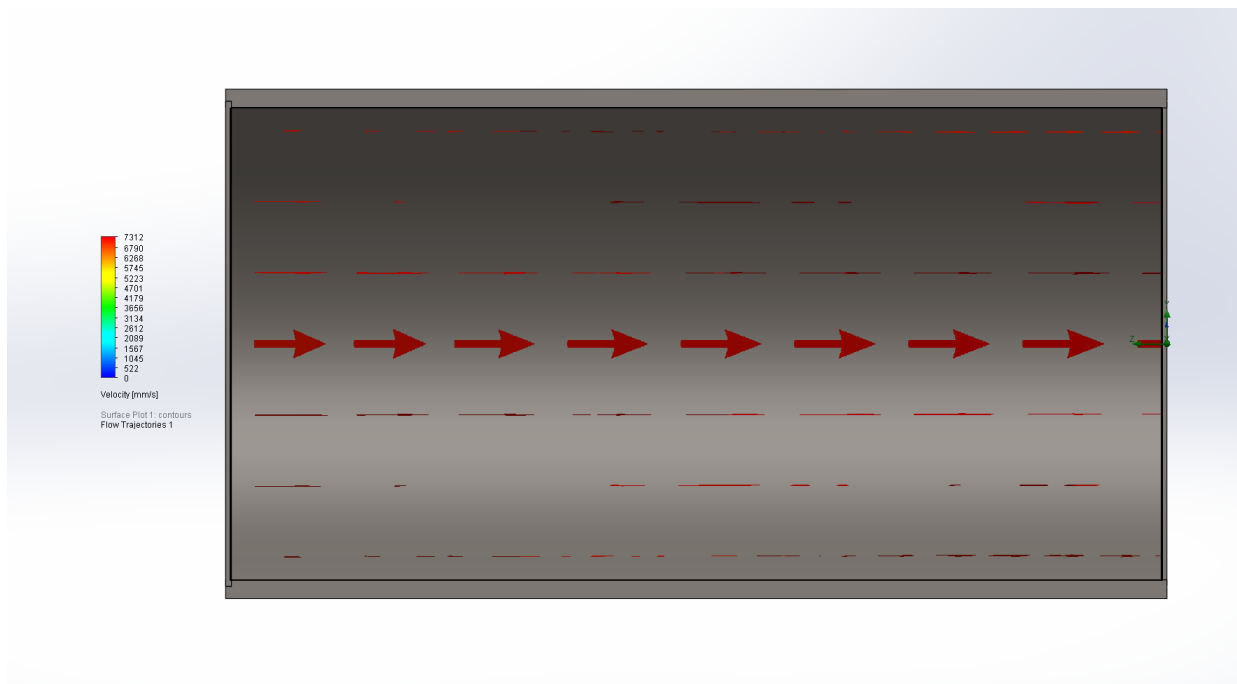


Рисунок 3.3. Кольорова карта розподілу швидкостей по перерізу труби

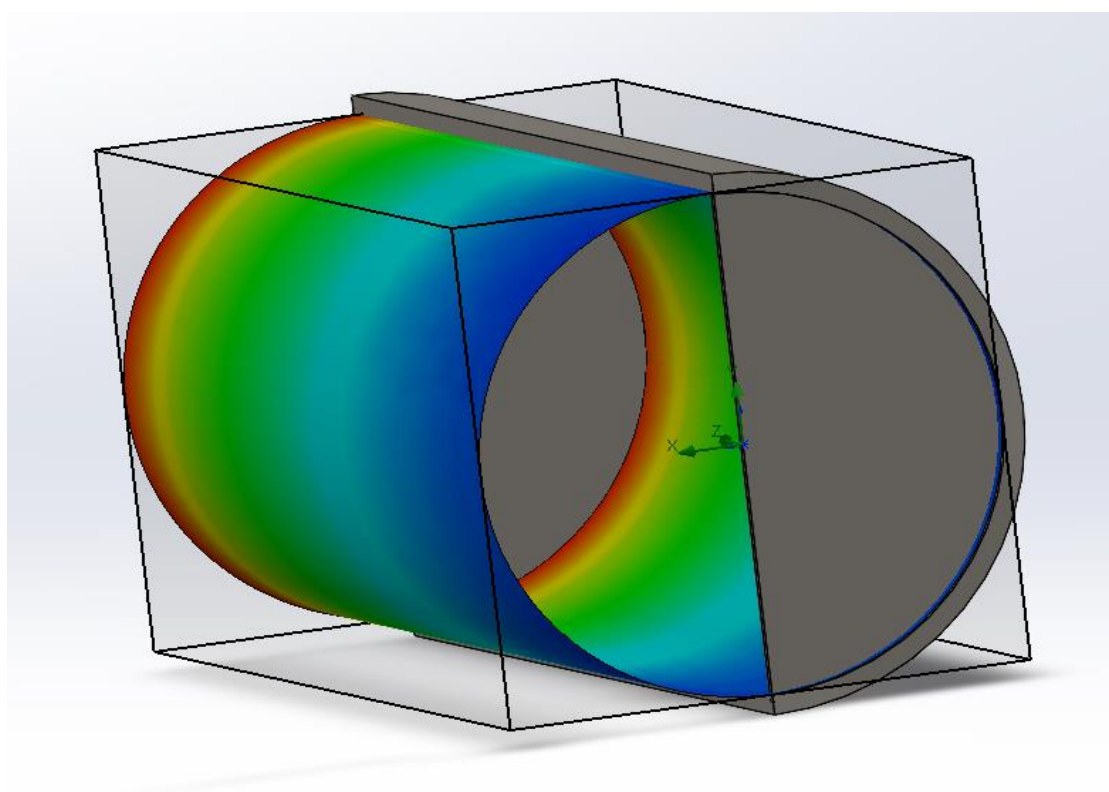


Рисунок 3.4. Падіння тиску за довжиною корпусу приладу

Основні результати симуляції окреслюються наступним:

- Середня швидкість по перерізу: ~ 7.07 м/с (відповідає розрахунковій);

					ДІБ ПМ1104.00.00 ПЗ		
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата			47

- Максимальна локальна швидкість (в центрі потоку): ~ 7.5 м/с;
- Падіння тиску на довжині 0.5 м: $\sim 6.8\text{--}7.0$ Па;
- Розподіл швидкостей – симетричний, ламінарна структура з ознаками турбулентності на стінках;
- Обтікання внутрішньої геометрії – без зон рециркуляції, що підтверджує коректність побудови гідравлічного тракту.

Результати моделювання підтверджують правильність гідравлічного розрахунку системи для обраної витрати. Крім того, симуляція дозволяє виявити потенційні зони збурення потоку, що є критично важливим при встановленні ультразвукових витратомірів, чутливих до турбулентності.

Аналогічні дослідження здійснено для витрат 125, 200, 275 та 350 м³/год, що дозволило отримати відповідність між втратами тиску та витратою (рис. 3.5, рис. 3.6).

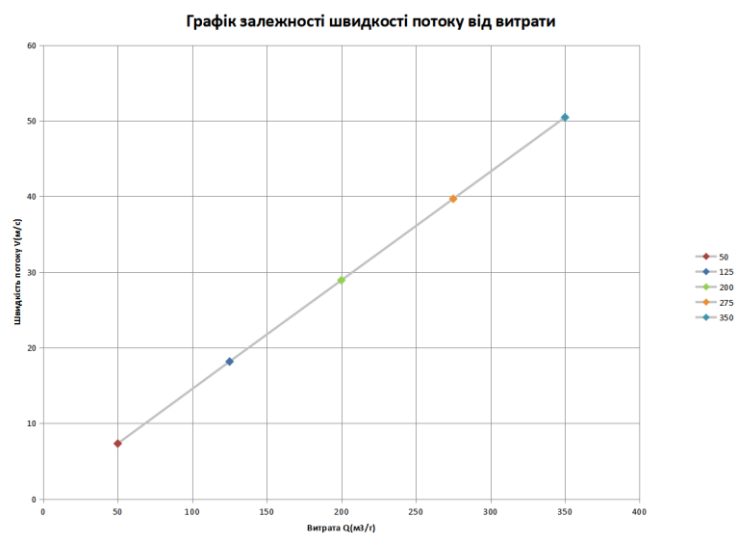


Рисунок 3.5. Зміна середньої швидкості потоку від витрати

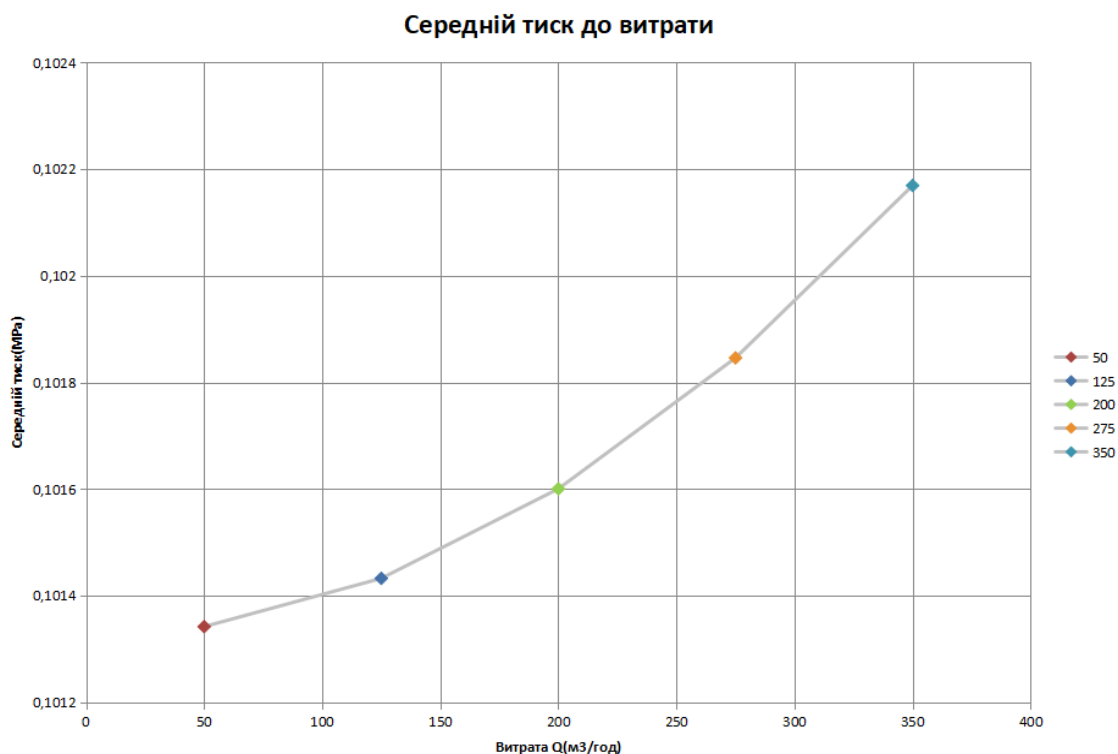


Рисунок 3.6. Втрати тиску на первинному перетворювачі

3.2 Висновки до розділу 3

Розроблено 3D-модель ультразвукового однохордового витратоміра. Здійснено математичне та імітаційне моделювання функціонування ультразвукового перетворювача витрати, що дозволило визначити статичну характеристику перетворення та оцінити втрати тиску.

4. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ЗБОРУ ТА ПЕРЕДАЧІ ІНФОРМАЦІЇ

Системи збору та передачі інформації в автоматизованому комплексі вимірювання природного газу є критично важливою складовою. Вони забезпечують безперервний моніторинг, обробку та збереження параметрів потоку газу, а також оперативну передачу цих даних до центрів управління чи обліку.

Способи локального та віддаленого зберігання інформації:

- Вбудовані флеш-накопичувачі в обчислювальних пристроях;
- Хмарні сервери для централізованого архівування;
- Системи резервного копіювання з багаторівневою структурою доступу.

Функціями системи збору та передачі інформації у створюваному комплексі є:

- Візуалізація стану системи в зручному інтерфейсі;
- Генерація тривог при виході параметрів за межі норми;
- Формування звітів та експорт даних;
- Можливість інтеграції з іншими ІТ-системами (ERP, MES).

Механізми захисту даних:

- Аутентифікація користувачів і пристроїв;
- Шифрування трафіку (SSL/TLS);
- Використання VPN для захищеного з'єднання;

Сучасні системи підтримують адміністрування через веб-інтерфейс або мобільний додаток. Це дозволяє:

- Віддалено вносити зміни в налаштування;
- Отримувати аварійні сповіщення;
- Вести онлайн-моніторинг параметрів у будь-який момент часу.

Основною функцією комплексу є отримання в реальному часі достовірних даних про витрату, тиск і температуру природного газу, їх обробка, аналіз та передача результатів на зовнішні системи відображення чи зберігання.

Сучасні комплекси такого типу характеризуються високим ступенем автоматизації, мінімальним втручанням оператора в процес вимірювання, гнучкою архітектурою, можливістю масштабування та адаптації до різних об'єктів. Вони є ключовим елементом у забезпеченні енергоефективного, безпечного та контрольованого споживання природного газу.

					<i>ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		50

Основна логіка приладу пов'язана з програмованим логічним контролером. У реальному виробі доцільно застосувати Controllino MINI [33; 34], але для візуалізації та симуляції у Wokwi обрано STM32. До основного логічного модулю йде підключення усіх перелічених компонентів. Роль ПЛК Приймати сигнали з сенсорів (температури, тиску, витрати), обробляти їх за логікою (наприклад, обчислення об'єму газу за стандартних умов), передавати дані на дисплей або у SCADA, контролювати аварійні ситуації.

Методика підключення компонентів.

Всі елементи (табл. 4.1) з'єднуються через аналогові/цифрові входи/виходи, або цифрові інтерфейси (Modbus, RS-485). Електричну та структурну схеми системи вимірювання газу наведено на рис. 4.1, рис. 4.2.

Таблиця 4.1 Перелік компонентів

Пристрій	Тип сигналу	З'єднання з ПЛК
Ультразвуковий витратомір	Modbus RTU / 4–20 мА	RS-485 або аналоговий вхід
Сенсор тиску	4–20 мА	Аналоговий вхід (AI) ПЛК
Сенсор температури	Pt100	Аналоговий вхід
НМІ панель	Modbus / Ethernet	Послідовне або мережеве з'єднання
Сигналізація	Цифровий вихід	DO (digital output) ПЛК

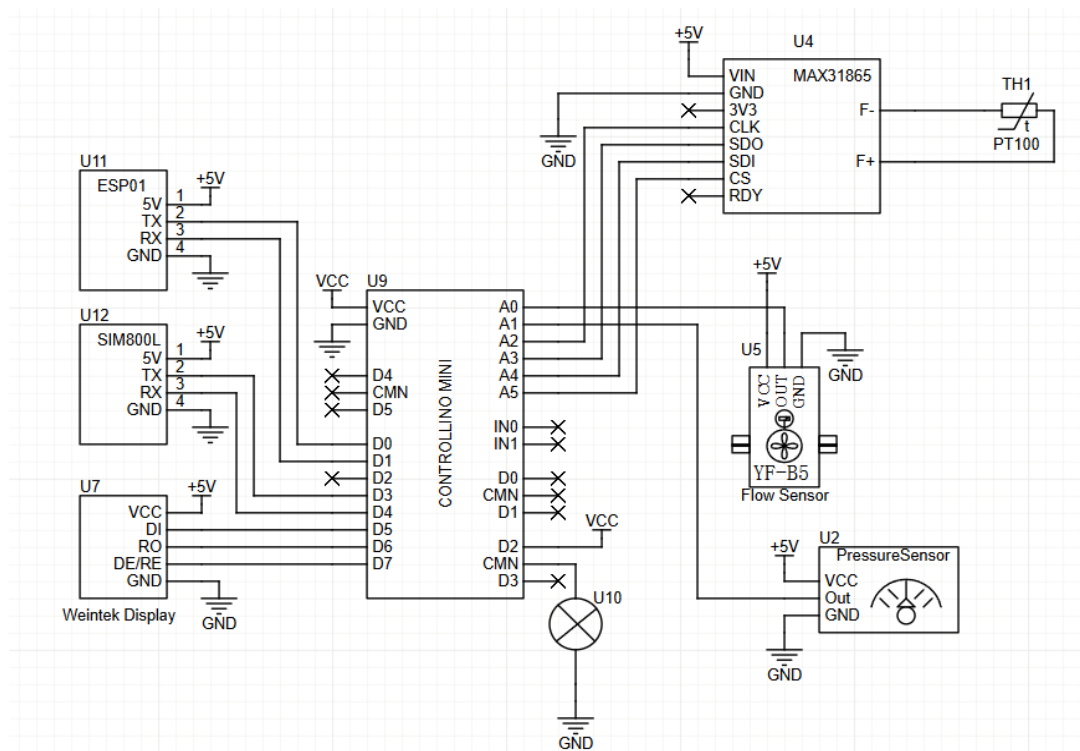


Рисунок 4.1. Електрична схема

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.2. Структурна схема

4.1 Розроблення моделі у SolidWorks

Для візуалізації реального приладу елементи встановлено на DIN рейку (використовується для кріплення різного електричного обладнання, зокрема автоматичних вимикачів, ПЗВ, реле та інших модульних пристроїв, в електричних щитах, розподільних шафах та інших монтажних панелях) в електричний щиток для монтування будь де. У щитку знаходиться ПЛК Controllino MINI [33; 34], окремим блоком монтується блок з НМІ дисплеєм Weintek [35], модулем SIM800L та ESP01 [36]. Також було зроблено рендер для гарного відображення матеріалів (рис. 4.3). Знизу на рейці розміщено ПЛК зверху блок з дисплеєм (під дисплеєм розташовані плати).

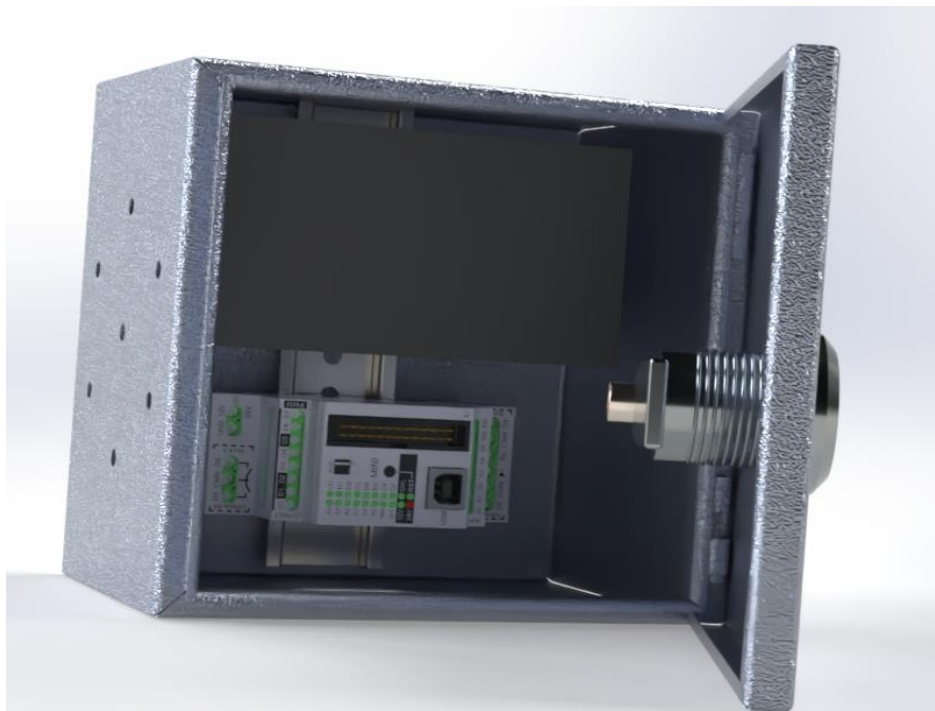


Рисунок 4.3. Модель розміщення електронних обчислюваних компонентів

4.2 Симуляція роботи комплексу

Виконаємо візуалізацію роботи комплексу у Wokwi, але для реалізації необхідно замінити ПЛК на ESP32 для функціонування та спрощення системи симуляції.

Додамо компоненти:

- ESP32 буде виступати у ролі ПЛК у даній симуляції;
- 3 потенціометри для симуляції вхідних даних (температури, витрати газу, тиску);
- дисплей - 16/2 I2C для виведення обчислених даних;
- світлодіод для симуляції сигналізації.

Отже описуємо логіку приладу. Маючи 3 потенціометри ми задаємо вхідні дані температури, витрати газу, тиску. Підключаючи їх до ESP32. Далі проводимо обчислення об'єму і виводимо усі дані на дисплей.

Наступним кроком ми програмуємо сигналізацію під потрібні нам значення. До прикладу якщо температура газу >40 або <10 градусів, тиск >110 або <90 кПа, витрата більше 90 кубічних метрів, то маємо спрацювання сигналізації.

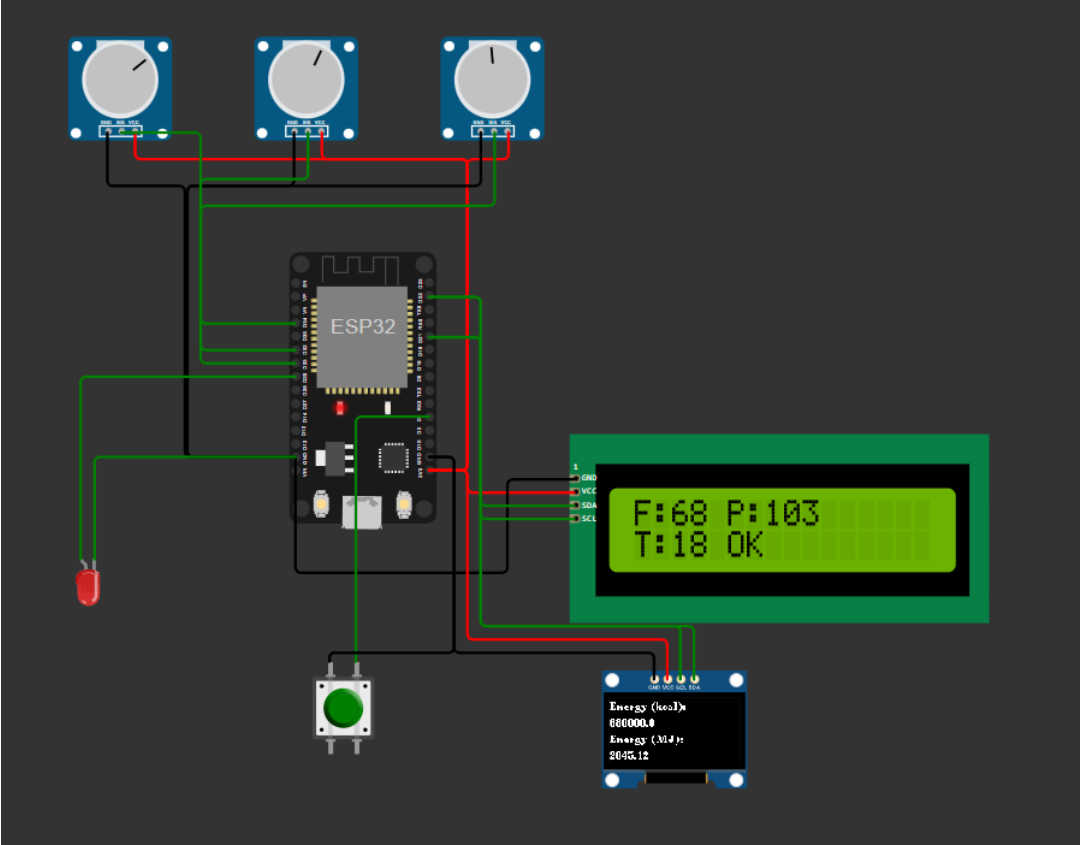


Рисунок 4.4. Працююча симуляція

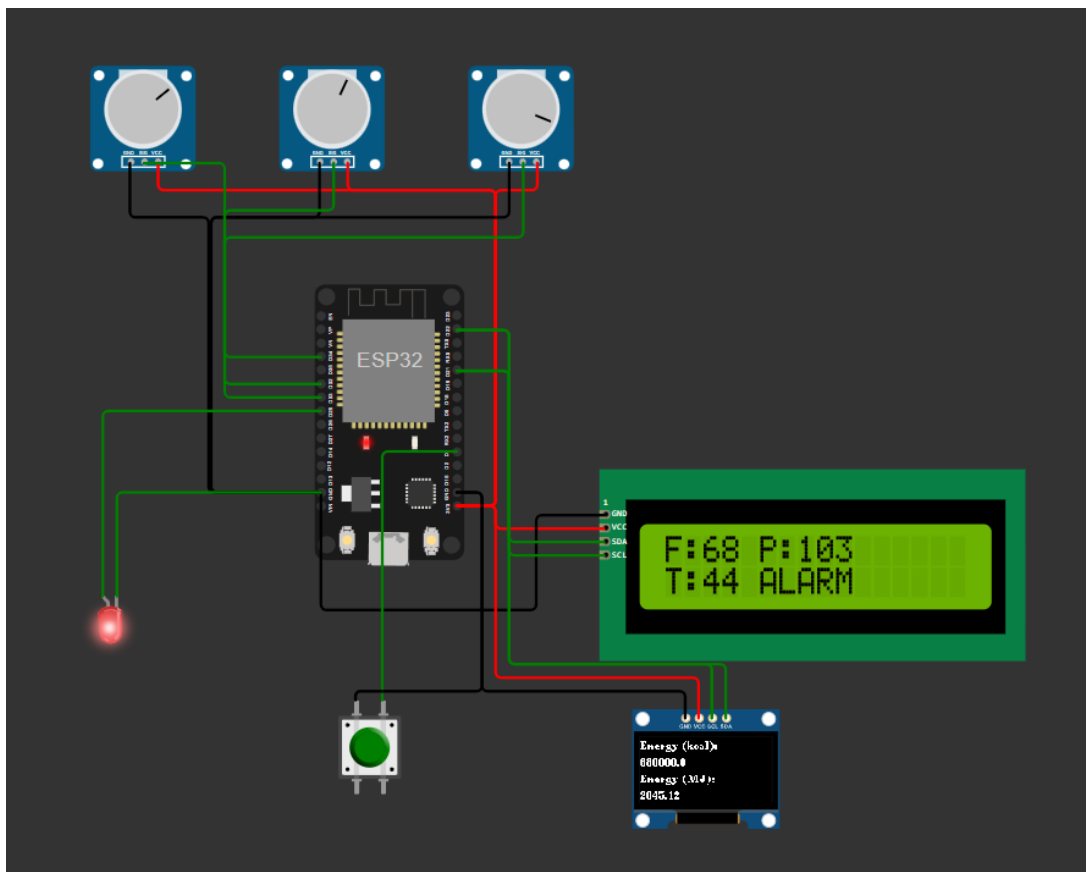


Рисунок 4.5. Працююча сигналізація

Передача даних по Wi-Fi

Через обмеженість Wokwi візуалізувати це майже не можливо, але зроблено рішення, при якому дані відправляються на сервер по Wi-Fi.

Створено точку доступу з STM32:

```
WiFi.softAP("GasMonitorAP", "12345678");
Serial.println("WiFi started. Connect to: GasMonitorAP");
```

Пояснення дії:

Використовується функція WiFi.softAP(), яка створює режим точки доступу (Access Point) на ESP32.

Назва мережі: "GasMonitorAP"

Пароль: "12345678"

Після запуску користувач може підключитися до цієї мережі і зайти на сторінку моніторингу за IP-адресою 192.168.4.1

Це дозволяє віддалено без доступу до приладу відслідковувати показники у реальному часі з оновленням в 1 с. Що відповідно дозволяє розуміти стан системи та завчасно приймати потрібні рішення у певній ситуації.

Логуювання показників

Після додавання обміну даних через точку доступу, ми отримали гарну можливість бачити дані комплексу, але створення альтернативного методу збереження даних є основою безпеки та надійності комплексу.

Реалізацію цього методу вирішено зробити у вигляді імітації збереження даних на SD-карту у Wokwi.

Алгоритм збереження даних:

Кожні 5 секунд нові показники (витрата, тиск, температура) записуються в пам'ять (в масив logData[]) - імітація логуювання, як на SD-карту.

При натисканні кнопки:

ESP32 читає останні 5 записів із масиву і виводить їх у Serial Monitor

Це внутрішній локальний вивід - тобто не по мережі, а просто в консоль. Це дозволяє мати альтернативний доступ до останніх показників без доступу до Wi-Fi мережі.

```
=== LAST 5 LOGS ===
1) Flow: 87.0 | Pressure: 97.0 | Temp: 28.0
2) Flow: 87.0 | Pressure: 97.0 | Temp: 28.0
3) Flow: 79.0 | Pressure: 97.0 | Temp: 28.0
4) Flow: 64.0 | Pressure: 91.0 | Temp: 9.0
5) Flow: 67.0 | Pressure: 105.0 | Temp: 11.0
=====
```

Рисунок 4.6. Приклад логуювання показників

Розрахунок калорійності газу

					ДІПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		56

Для оцінки енергетичної ефективності газу у системі реалізовано розрахунок калорійності газу на основі об'ємної витрати.

Обчислення проводиться за формулою:

$$E = Q * V$$

де Q - теплота згоряння природного газу (10,000 ккал/м³)

10,000 ккал/м³ - це середнє стандартне значення для метану (CH₄), який є основною складовою природного газу.

V - витрата газу (м³/год)

Результат також переводиться за співвідношенням:

$$1 \text{ ккал} = 4.184 \text{ кДж.}$$

Переведення у МДж/год

$$E_{MJ} = E_{kcal} * 0.004184.$$

Отримані значення енергії виводяться на OLED-дисплей для моніторингу в режимі реального часу (рис. 4.8).

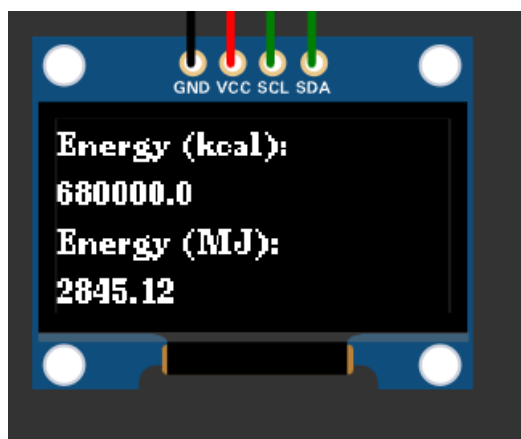


Рисунок 4.7. OLED-дисплей з виведенням значень енергії

надається за запитом до авторів

Рисунок 4.8. Блок-схема алгоритму

4.3 Висновок симуляції

У ході реалізації проєкту було створено повнофункціональну симуляцію автоматизованого комплексу вимірювання параметрів природного газу, яка охоплює ключові аспекти промислового обліку та моніторингу:

Вимірювання основних параметрів - витрата ($\text{м}^3/\text{год}$), тиск (кПа), температура ($^{\circ}\text{C}$) - реалізовано за допомогою потенціометрів, що моделюють відповідні датчики.

Централізоване керування реалізовано на базі ESP32, що виконує функцію контролера з обробкою та логікою сигналізації.

Візуальний моніторинг забезпечено через:

- LCD1602 для базових параметрів;
- OLED SSD1306 - для відображення енергетичної цінності газу в реальному часі.

Розрахунок приведенного об'єму газу та енергетичного еквіваленту (ккал та МДж) дозволяє оцінити теплотворну потужність газу, що особливо важливо у промисловому застосуванні.

Wi-Fi-модуль реалізує точку доступу та вбудований веб-сервер, через який можна переглядати поточні значення сенсорів.

Сигналізація (через LED) активується при виході будь-якого параметра за межі безпечних значень.

Логування показників кожні 5 секунд із збереженням останніх 5 записів та можливістю їх виведення через кнопку в Serial Monitor.

Симуляція була реалізована у середовищі Wokwi, що дозволило протестувати роботу апаратної частини, логіки та взаємодії з користувачем без використання фізичних компонентів.

У результаті, було побудовано модульну, масштабовану та інформативну систему, яка може бути адаптована для реального застосування - як у

					ДІПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		58

промисловому обліку газу, так і у побутових лічильниках з інтелектуальними функціями.

4.4 Висновки до розділу 4

У цьому розділі проєкту окреслено функції системи збору та передачі інформації у створюваному комплексі; розроблено електричну та структурну схеми; модель розміщення електронних обчислювальних компонентів у SolidWorks; здійснено симуляцію роботи комплексу у Wokwi; опрацьовано алгоритм збереження даних; розроблено алгоритм розрахунку калорійності газу на основі об'ємної витрати.

					<i>ДІПБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		59

ВИСНОВКИ

При виконанні дипломного проєкту розроблено автоматизований комплекс вимірювання природного газу, що забезпечує високоточний, надійний і безперервний облік параметрів газового середовища. Головний зміст отриманих результатів може бути окреслений наступним:

1. Проаналізовано структуру та функції елементів комплексу, методи вимірювання витрати газу, конструктивні особливості та технічні характеристики первинних перетворювачів тиску та температури газу.
2. Запропоновано створення комплексу з використанням ультразвукового методу вимірювання витрати, оскільки перетворювачі цього класу характеризуються високою точністю, надійністю та можливістю інтегрування до систем збору та передачі інформації.
3. На підґрунті розробленої 3D-моделі ультразвукового однохордового витратоміра, здійснено математичне та імітаційне моделювання функціонування ультразвукового перетворювача витрати.
4. Здійснено симуляцію роботи комплексу у Wokwi.

					<i>ДІБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		60

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Кодекс газорозподільних систем. Затверджено постановою Національної комісії, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг 30.09.2015 № 2494. Зареєстровано в Міністерстві юстиції України 06 листопада 2015 р. за № 1379/27824.

2. Правила обліку природного газу під час його транспортування газорозподільними мережами, постачання та споживання. Введені наказом Мінпаливенерго України №618 від 27.12.2005 р. та зареєстровані в Міністерстві юстиції України 26.01.2006 р. за №67/11941.

3. РМУ 037-2015. Рекомендація. Метрологія. Вузли обліку природного газу з лічильниками та коректорами. Метод та основні принципи вимірювань, характеристики та загальні вимоги.

4. Типи датчиків тиску. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uk.sinoanalyzer.com/news/types-of-pressure-transmitters/>

5. Терморезистор PT100 – Mini-Tech [Електронний ресурс]. – Доступно: [De Gidts en Feldman \(ENG\)](#)

6. SIM800L Hardware Design – MakerHero [Електронний ресурс]. – Доступно: makerhero.com

7. SIM800L GSM/GPRS Module – Nettigo [Електронний ресурс]. – Доступно: nettigo.eu

8. SCADA – Вікіпедія. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uk.wikipedia.org/wiki/SCADA>

9. I2C Wikipedia [Електронний ресурс]. Доступно: <https://uk.wikipedia.org/wiki/I2C>

10. ПАРАД-ДНЕПР [Електронний ресурс]. Доступно: <https://parad.com.ua/ua/p1444271721-tgs2611-c00-figaro.html>

11. ARDUINO UA [Електронний ресурс]. Доступно: <https://arduino.ua/prod301-datchik-vlajnosti-i-temperatyri->

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		61

dht22?srsId=AfmBOoqDif4mNMkdllLdLtA4u5-
7RhYpDryLRf_k9r69dxhZj5w8BtO3P

12. ДСТУ ГОСТ 8.586.1:2009 Метрологія. Вимірювання витрати та кількості рідини й газу із застосуванням стандартних звужувальних пристроїв. Частина 1. Принцип методу вимірювання та загальні вимоги (ГОСТ 8.586.1-2005 (ИСО 5167-1:2003), IDT; ISO 5167-1:2003, NEQ) [Електронний ресурс]. Доступно: <http://online.budstandart.com>

13. Автоматизація технологічних процесів у нафтовій та газовій промисловості [Текст]: навч. посіб. / Г. Н. Семенцов, Я. Р. Когуч, Я. В. Куровець, М. М. Дранчук. – Івано-Франківськ, Україна: ІФНТУНГ, 2015. – 301 с.

14. Honeywell Elster TRZ2 Turbine Gas Meter — Технічна специфікація [Електронний ресурс]. Доступно: <https://process.honeywell.com/content/dam/process/en/campaigns/pmc/trz2-and-sm-ri-x-turbine-gas-meters/documents/hon-ia-pmc-trz2-data-sheet.pdf>

15. Elster TRZ2 Turbine Gas Meter — Інформаційна сторінка [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.mwatechnology.com/products/elster-trz-turbine-gas-meter/>

16. ПОЛТАВА Сервісгаз Принцип роботи мембранного лічильника газу [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.poltavaservicegas.shop/princip-roboti-membrannogo-lichilnika-gazu/>

17. УКРГАЗ Мембранні лічильники газу [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ukrgazkom.com/catalog/diaphragm-gas-meters/>

18. Вікіпедія Ультразвуковий витратомір [Електронний ресурс]. Доступно: https://uk.wikipedia.org/wiki/Ультразвуковий_витратомір

19. Q.Sonic 3 Path Ultrasonic Flow Meter [Електронний ресурс]. Доступно: https://controlsupplychain.com/wp-content/uploads/manuals_pdf/american-meter-company/Q.Sonic-3-Path.pdf

					ДПБ ПМ1104.00.00 ПЗ	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		62

20. АВТОМАТИК СЕРВІС УКРАЇНА “Витратоміри прилади контролю витрати” [Електронний ресурс]. Доступно: https://asu-tp.shop/ua/g101408195-rashodomer-dlya-resheniya?gad_source=1&gad_campaignid=21886626683&gclid=Cj0KCQjw9O_BBhCUARIsAHQMjS5aj9r-CxAXuk6FHZy3bYPEaLyw7UvNrKB293OJ4aArFAEALw_wcB

21. TGE System Масові витратоміри (Коріолісові) [Електронний ресурс]. Доступно: <https://tgesystem.com.ua/products/natural-gas-accounting/masovi-vitratomiri-koriolisovi.html>

22. Honeywell [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.honeywell.com/us/en>

23. Emerson [Електронний ресурс]. Доступно: <https://www.emerson.com/en-us/catalog/micro-motion-sku-cmf050m?fetchFacets=true#facet:&partsFacet:&modelsFacet:&facetLimit:&searchTerm:&partsSearchTerm:&modelsSearchTerm:&productBeginIndex:0&partsBeginIndex:0&modelsBeginIndex:0&orderBy:&partsOrderBy:&modelsOrderBy:&pageView:list&minPrice:&maxPrice:&pageSize:&facetRange:&>

24. KROHNE [Електронний ресурс]. Доступно: <https://krohne.com/en/products/flow-measurement/flowmeters/ultrasonic-flowmeters/altosonic-v12>

25. Magnetrol Thermatel TA2 [Електронний ресурс]. Доступно: https://triada.com.ua/ua/device/21-magnetrol-termodifferencialnyy_massovyy_rashodomer_thermatel_ta2.html

26. SICK FLOWSIC500 [Електронний ресурс]. Доступно: <http://sick.in.ua/produksiya/rashodomery-gaza-dlya-promyshlennyh-izmerenij/dlya-transportirovki-gaza-i-promyshlennyh-izmerenij-s-povyshennoj-tochnostyu/flowsic-500/>

27. RGV and RGV-ST [Електронний ресурс]. Доступно: <https://prod-edam.honeywell.com/content/dam/honeywell->

[edam/pmt/hps/products/pmc/gas/distribution/rotary-meters/rvg-st/pmt-hps-gas-distribution-rotary-meters-rvg-st-datasheet.pdf](https://www.edam/pmt/hps/products/pmc/gas/distribution/rotary-meters/rvg-st/pmt-hps-gas-distribution-rotary-meters-rvg-st-datasheet.pdf)

28. Романчук Р. О. “Особливості та загальні характеристики мікроконтролерів STM32”, в *VI Міжнар. студентська наук. – техн. конф. "ПРИРОДНИЧІ ТА ГУМАНІТАРНІ НАУКИ. АКТУАЛЬНІ ПИТАННЯ"*, Тернопіль, 2023, с. 167-168. [Електронний ресурс]. Доступно: https://elartu.tntu.edu.ua/bitstream/lib/41140/1/Zbirnyk_2023.pdf

29. Arduino UA [Електронний ресурс]. Доступно: <https://arduino.ua/art99-mikrokontrolleri-semeistva-stm32?srsId=AfmBOooVcxIMklJswbVQXWKzWbMKRX2oJUCJamuJ2SSorYD5aAO901Kb>

30. Архітектура новітніх мікроконтролерів: Програмування мікроконтролерів сімейства ARM: Навчальний посібник для студентів спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Автор: А.О. Новацький–Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017,138 с. [Електронний ресурс]. Доступно: <https://ist.kpi.ua/wp-content/uploads/2017/05/ПОСІБНИК-ARM-.pdf>

31. ДСТУ ISO 13443:2015[Електронний ресурс]. Доступно: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=64355

32. WIKA A-10 Pressure Transmitter – WIKA [Електронний ресурс]. – Доступно: wika.com

33. Controllino MINI – Industrial Shields [Електронний ресурс]. – Доступно: industrialshields.com

34. Controllino MINI – Universum Venture [Електронний ресурс]. – Доступно: [universum-venture](https://universum-venture.com)

35. Weintek HMI – Pin Assignment [Електронний ресурс]. – Доступно: dl.weintek.com

36. ESP-01 WiFi Module – CBA [Електронний ресурс]. – Доступно: academy.cba.mit.edu

37. SIM800L Hardware Design – MakerHero [Електронний ресурс]. –
Доступно: makerhero.com

38. SIM800L GSM/GPRS Module – Nettigo
[Електронний ресурс]. – Доступно: nettigo.eu

39. Писарець А. В., Поліщук С. О. Вимірювання кількості теплової енергії із застосуванням ультразвукового методу, Вісник Київського політехнічного інституту. Серія Приладобудування, вип. 53(1), с. 56–61, 2017

					<i>ДІБ ПМ1104.00.00 ПЗ</i>	
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		65

