

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи
бакалавра

на тему: Розробка програмно-технічного комплексу для перевірки датчиків тиску

Виконав: студент 2 курсу, групи ІВТК-4

Спеціальності: 175 «Інформаційно-
вимірювальні технології»

Карпюк В.С

(прізвище та ініціали)

Керівник: доцент кафедри ІВТ

кандидат технічних наук, доцент

Чепюк Л.О.

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

Рецензент: _____

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

Житомир – 2025

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»
Факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки
Кафедра інформаційно-вимірювальних технологій

Спеціальність 175 «Інформаційно-вимірювальні технології»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри інформаційно-
вимірювальних технологій

д.т.н., професор Подчашинський Ю.О.

« _____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ
на кваліфікаційну роботу бакалавра

Студент _____ Карпюк Володимир Сергійович

1. Тема роботи: Розробка програмно-технічного комплексу для перевірки датчиків тиску

Керівник роботи: доцент кафедри ІВТ кандидат технічних наук, доцент
Чепюк Л.О.

затверджена наказом по університету від « 04 » квітня 2025 р. № 132/с

2. Термін здачі закінченої роботи на кафедру « 10 » червня 2025р.

3. Вихідні дані до роботи об'єкт контролю – інформаційно-вимірювальний комплекс, параметр вимірювання – тиск, діапазон вимірювання - від -0,1 до 1,0 Мпа, гранична допустима похибка: не більше $\pm 0,5\%$

Тип системи: комп'ютеризована автоматизована система для перевірки датчиків тиску

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які підлягають розробці) огляд та аналіз методів перевірки датчиків тиску, розробка структурної схеми, розробка принципової схеми, розробка алгоритму та програми роботи системи, розрахунок метрологічних характеристик, оцінка показників надійності роботи системи, безпека життєдіяльності та охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним визначенням обов'язкових креслень) структурна схема, електрична принципова схема, перелік елементів, топологія друкованої плати, блок-схема алгоритму роботи системи

6. Консультанти з кваліфікаційної роботи бакалавра із зазначенням розділів роботи, що їх стосуються

Розділ	Консультант	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв

7. Дата видачі завдання 15 лютого

Календарний план

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Узгодження технічного завдання	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
2	Огляд методів перевірки датчиків тиску	25.02.25 – 15.03.25	Виконано
3	Розробка структурної схеми комплексу	16.03.25 – 15.04.25	Виконано
4	Розробка електричної принципової схеми	16.04.25 – 24.04.25	Виконано
5	Вибір елементної бази і компоновка вузлів	25.04.25 – 09.05.25	Виконано
6	Розробка алгоритму та програми системи	10.05.25 – 24.05.25	Виконано
7	Розрахунок метрологічних характеристик	25.05.25 – 03.06.25	Виконано
8.	Розрахунок надійності	04.06.25 – 15.06.25	Виконано
9	Оформлення пояснювальної записки та презентаційного матеріалу	03.06.25 – 17.06.25	Виконано

Студент

(підпис)

Керівник роботи

Карпюк В.С

(прізвище та ініціали)

Чепюк Л. О.

АНОТАЦІЯ

У даній кваліфікаційній роботі розроблено інформаційно-вимірювальний комплекс для перевірки датчиків тиску. Система побудована на основі мікроконтролера AT89C51 та високоточного аналого-цифрового перетворювача MCP3204. Комплекс дозволяє проводити автоматизовану перевірку тискомірів шляхом порівняння показань еталонного датчика з тестованими зразками. Розроблена апаратно-програмна частина, що забезпечує зчитування, обробку, індикацію та передачу результатів вимірювань. Пристрій може використовуватись у метрологічних лабораторіях і виробничих умовах для забезпечення єдності вимірювань.

Ключові слова: тиск, перевірка, еталонний датчик, мікроконтролер, вимірювальний комплекс.

ABSTRACT

This qualification work presents the development of an information-measuring system for pressure sensor calibration. The system is based on the AT89C51 microcontroller and a high-precision analog-to-digital converter MCP3204. It enables automated verification of pressure gauges by comparing their readings with those of a reference sensor. The hardware and software components were developed to ensure data acquisition, processing, display, and transmission of measurement results. The system can be used in metrological laboratories and industrial settings to ensure measurement traceability.

Keywords: pressure, calibration, reference sensor, microcontroller, measuring system.

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота представлена пояснювальною запискою на 85 сторінках формату А4 та включає вступ, дев'ять розділів основної частини, висновки, список використаних джерел і додатки.

Темою роботи є розробка програмно-технічного комплексу для повірки датчиків тиску, що дозволяє автоматизувати процес повірки та підвищити його точність і ефективність.

У першому розділі визначено технічне завдання: сформульовано цілі, технічні та експлуатаційні вимоги до майбутньої системи.

Другий розділ присвячено аналізу існуючих методів повірки та калібрування, класифікації датчиків тиску та нормативній базі.

У третьому розділі розглянуто приклади існуючих автоматизованих систем калібрування (Fluke, WIKA, Veamex тощо) і зроблено порівняльний аналіз.

Четвертий розділ описує розробку структурної схеми комплексу з урахуванням функціональних вузлів і технічних зв'язків.

У п'ятому розділі детально опрацьовано електричну принципову схему, обрано мікроконтролер AT89C51, АЦП МСР3204, датчики тиску КР61 та КР43, а також створено програму керування.

Шостий розділ містить розрахунок метрологічних характеристик: точності, похибок, швидкодії та надійності вимірювань.

У сьомому розділі проведено аналіз і розрахунок надійності схеми, оцінено ремонтпридатність, довговічність і зберіганість пристрою. Восьмий розділ присвячено розробці друкованої плати, вибору матеріалів та забезпеченню відповідності стандартам.

Останній, дев'ятий розділ, висвітлює питання техногенної та регіональної безпеки, пожежного захисту, ергономіки робочого місця, екології та охорони праці.

Результатом роботи є робочий прототип інформаційно-вимірювального комплексу, який забезпечує автоматизовану перевірку датчиків тиску з можливістю передачі даних на ПК та використанням у лабораторних або виробничих умовах.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	8
1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ.....	11
1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування	11
1.2. Умови експлуатації	11
1.3. Вимоги до технічних характеристик	11
1.4. Вимоги до надійності	11
1.5. Вимоги до конструктивного оформлення	12
2. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОВІРКИ ТА КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВІМІРЮВАННЯ ТИСКУ	13
2.1 Основні поняття та визначення	13
2.2 Види повірок	13
2.3 Висновки до розділу	14
2.4 Нормативні документи у сфері повірки засобів вимірювальної техніки	14
2.5 характеристика об'єкта вимірювання	15
2.6 Одиниці вимірювання тиску	16
2.7 Класифікація вимірювальних перетворювачів тиску	17
2.8 Класифікація датчиків тиску за принципом ді	19
2.9 Класифікація систем для повірки та калібрування датчиків тиску	19
3 АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КАЛІБРУВАННЯ ТИСКУ	21
3.1 Автоматизована система для перевірки та калібрування датчиків динамічного тиску Fluke 7100 Series (США/Європа)	21
3.2 Автоматизовані калібратори тиску	22
3.3 Автоматизована система калібрування датчиків тиску	24
3.4 Автоматизированная система калибровки датчиков давления	25
3.5 Настольный калибратор	27
3.6 Комплект обладнання для повірки засобів вимірювання тиску	29
РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ	33
5. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ	36
5.1 Вибір мікропроцесора	36
5.2 Вибір моделі мікроконтролера	40
5.3 Вибір АЦП	42
5.4 Вибір датчиків тиску	45
5.5 Вибір задатчика тиску	47

					МІВТ.480.001.831 – ПЗ		
Вим	Лист	№ докум.	Підпис	Дата			
Розроб.		Карпюк В.С			Розробка програмно- технічного комплексу для повірки датчиків тиску Пояснювальна записка		
Перевір.		Чепюк Л.О.					
Реценз.							
Н. Контр.		Чепюк Л.О.					
Затверд.		Подчашийский Ю					
					Лім.	Лист	Листів
						7	76
					Державний університет «Житомирська політехніка», гр. ІВТК-4		

5.6 Вибір інтерфейсів зв'язку.....	49
5.7 Проектування принципової схеми пристрою	50
5.8 Розробка програми	54
6. РОЗРАХУНОК НАДІЙНОСТЬ	58
7. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ.....	63
8.КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА	66
8.1 Розробка конструкції.....	66
8.2 Розробка друкованої плати (ДП).....	66
9 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ.....	68
ВИСНОВОК.....	68
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	72

ВСТУП

До основних параметрів, контроль яких є обов'язковим у технологічних процесах практично всіх галузей промисловості, безперечно належить тиск. Це стосується підприємств паливно-енергетичного комплексу, нафтовидобувної та нафтопереробної промисловості, машинобудування, металургії, харчової та медичної промисловості, а також інших галузей народного господарства.

Недостатній контроль цього параметра може призвести до порушення перебігу технологічного процесу на промислових підприємствах, що, у свою чергу, здатне спричинити аварії з тяжкими наслідками. Саме тому сучасна промисловість та наукова сфера гостро потребують точних і надійних приладів для вимірювання тиску.

З розвитком економіки потреба в таких приладах невинно зростає, а разом із цим зростають і вимоги до якісної та своєчасної повірки датчиків тиску. Водночас усе більшого значення набуває автоматизація цього процесу.

Автоматизація — це використання комплексу засобів, які дозволяють здійснювати виробничі процеси без безпосередньої участі людини, але під її контролем. У порівнянні з ручною повіркою автоматизація має низку переваг, серед яких — усунення різноманітних помилок, пов'язаних із суб'єктивними факторами (так званий «людський фактор»). Крім того, автоматизація сприяє підвищенню продуктивності праці. За той час, який витрачається на повірку одного приладу вручну, автоматизований процес дозволяє перевірити кілька пристроїв із мінімізацією кількості помилок.

Сучасні засоби автоматизації, наявні на ринку, за результатами нашого аналізу, або є занадто дорогими й складними у використанні, або не забезпечують необхідної точності вимірювань. Деякі з них не забезпечують належного рівня автоматизації, оскільки потребують ручного регулювання подачі тиску.

Таким чином, розробка простого у використанні, недорогого й точного автоматизованого інформаційно-вимірювального комплексу для повірки

датчиків тиску є актуальним інженерним завданням, розв'язанню якого й присвячена дана випускна кваліфікаційна робота.

Метою роботи є розробка інформаційно-вимірювального комплексу для повірки датчиків тиску згідно з технічним завданням (ТЗ).

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

1. Провести аналіз сучасних методів повірки та калібрування засобів вимірювання тиску;
2. Розробити структурну схему проєктованого пристрою відповідно до отриманого ТЗ;
3. Здійснити обґрунтований вибір елементної бази пристрою;
4. Розробити принципову схему пристрою;
5. Розробити конструкцію пристрою;
6. Провести розрахунок економічної ефективності проєкту;
7. Оцінити безпеку експлуатації розробленого пристрою.

1. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1. Підстава для розробки, призначення та галузь застосування

Підставою для розробки є завдання на дипломне проєктування.

Розроблювана система призначена для автоматизованої повірки датчиків тиску шляхом порівняння показників з еталонним датчиком. Комплекс може застосовуватись у метрологічних лабораторіях та на підприємствах для контролю точності засобів вимірювання тиску.

Необхідно реалізувати структурну схему комплексу, обґрунтувати вибір елементної бази, розробити електричну принципову схему, програмне забезпечення для обробки сигналів і відображення результатів, провести аналіз точності й надійності.

Початок розробки — лютий 2025 р. Завершення розробки — червень 2025 р.

1.2. Умови експлуатації

1.2.1. Температура навколишнього середовища: від 0 до +45 °C

1.2.2. Відносна вологість: не більше 80%

1.2.3. Атмосферний тиск: 600–800 мм рт. ст.

1.2.4. Відсутність хімічно активних речовин

1.2.5. Режим роботи: неперервний

1.3. Вимоги до технічних характеристик

1.3.1. Об'єкт контролю — система повірки датчиків тиску

1.3.2. Параметр вимірювання — тиск у діапазоні: 0...40 МПа

1.3.3. Еталонний датчик — WIKA CPT6400

1.3.4. Індикатор — цифровий дисплей або ПК через інтерфейс

1.3.5. Інтерфейс обміну — USB (FT232R)

1.3.6. Похибка вимірювання — не гірше $\pm 0,1$ %

1.3.7. Живлення — +5 В постійного струму

1.4. Вимоги до надійності

Система повинна бути ремонтпридатною, з можливістю заміни основних елементів. Напрацювання на відмову — не менше 75000 годин.

1.5. Вимоги до конструктивного оформлення

Усі елементи комплексу повинні бути розміщені на стандартній платі. Корпус — герметичний, придатний для експлуатації у лабораторних умовах. Забезпечити екранування цифрової частини та захист ліній живлення.

2. АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ ПОВІРКИ ТА КАЛІБРУВАННЯ ЗАСОБІВ ВИМІРЮВАННЯ ТИСКУ

2.1 Основні поняття та визначення

Повірка засобів вимірювання — це сукупність дій, які виконуються з метою визначення придатності засобу вимірювання (далі — ЗВ) до використання шляхом підтвердження відповідності його характеристик встановленим метрологічним вимогам [2].

Відповідно до Закону України «Про забезпечення єдності вимірювань», повірці підлягають засоби вимірювальної техніки, які підпадають під державний метрологічний контроль і нагляд.

Повірка проводиться відповідно до обов'язкових вимог, встановлених нормативними документами з проведення повірки. У процесі повірки ЗВ здійснюється передача розміру одиниць вимірювань від еталонів до робочих засобів вимірювання, що пов'язано з функціональною взаємодією еталонного та робочого ЗВ або еталона вищого розряду з еталоном нижчого розряду.

2.2 Види повірок

Розрізняють такі види повірок [5]:

- Первинна повірка — повірка, що виконується під час випуску засобів вимірювання з виробництва, після їх ремонту, під час ввезення партій імпортованих ЗВ до країни або під час реалізації.

- Періодична повірка — повірка засобів вимірювання, які перебувають в експлуатації або на зберіганні. Така повірка здійснюється через встановлені інтервали часу, які називають міжповірочними інтервалами (як правило, вони становлять 0,5; 1 або 2 роки).

- Позачергова повірка — повірка, що проводиться до настання терміну чергової періодичної повірки. Вона є необхідною, наприклад, у разі погіршення метрологічних характеристик ЗВ або підозри на це через порушення умов експлуатації.

- Вибіркова повірка — повірка декількох засобів вимірювання, випадково відібраних із партії. За результатами такої повірки ухвалюється рішення щодо придатності до експлуатації всієї партії.

- Інспекційна повірка — повірка, яку проводить орган державної метрологічної служби в процесі здійснення державного нагляду за станом і застосуванням засобів вимірювальної техніки.

2.3 Висновки до розділу

Методи повірки є способами передачі розміру одиниць фізичної величини від еталонів до засобів вимірювань. Розрізняють такі методи повірки:

- Повірка шляхом порівняння показань ЗВ, що повіряється, з еталонним засобом вимірювання того ж типу без використання компаратора чи іншого приладу порівняння.

- Повірка шляхом порівняння показань повірюваного ЗВ з еталонним засобом вимірювання з використанням компаратора або інших засобів порівняння.

- Повірка шляхом прямого вимірювання повірюваним ЗВ значення фізичної величини, яке відтворюється еталонною мірою.

- Повірка шляхом прямого вимірювання еталонним засобом значення фізичної величини, яке відтворюється повірюваною мірою.

- Повірка шляхом опосередкованого вимірювання величини, яку відтворює міра або повірюваний прилад.

- Повірка шляхом незалежної (автономної) повірки.

У практиці застосовуються методи повірки, що можуть мати свої особливості, але за суттю їх можна звести до одного з перелічених вище методів.

2.4 Нормативні документи у сфері повірки засобів вимірювальної техніки

Для забезпечення єдності вимірювань та належного проведення повірки засобів вимірювальної техніки в Україні застосовуються наступні нормативні документи:

ДСТУ OIML D 20:2008 "Метрологія. Первинна та періодична повірка засобів вимірювальної техніки і контроль процесів вимірювання".

Цей стандарт встановлює загальні вимоги до організації та виконання первинної і періодичної повірки засобів вимірювальної техніки, а також контролю процесів вимірювань. Він визначає критерії придатності засобів вимірювання до подальшої експлуатації.

ДСТУ-Н РМГ 51:2006 "Метрологія. Документи до методик повірки засобів вимірювальної техніки. Основні положення".

Стандарт регламентує порядок розроблення, затвердження та реєстрації документів, що супроводжують методики повірки. Він встановлює вимоги до структури, змісту та оформлення методик повірки для забезпечення їх достовірності та повторюваності.

ДСТУ OIML D 27:2008 "Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки первинна за наявності у виробника системи управління якістю".

У даному стандарті описано процедури повірки засобів вимірювань у випадках, коли виробник має сертифіковану систему управління якістю. Це дозволяє спростити процедури первинної повірки та зменшити навантаження на метрологічні служби.

Варто зазначити, що ряд документів, які застосовувались раніше в межах колишньої державної системи забезпечення єдності вимірювань (такі як ПР 50.2.012-94, ПР 50.2.006-94, МИ 187-86, МИ 188-86), а також ГОСТ 12.3.019-80 "Випробування та вимірювання електричні. Загальні вимоги безпеки", наразі в Україні втратили чинність і не використовуються.

Таким чином, у сучасних умовах метрологічного забезпечення в Україні особливе значення надається актуалізації та гармонізації національних стандартів відповідно до міжнародних норм і рекомендацій.

2.5 Характеристика об'єкта вимірювання

Тиск (р) визначається як відношення сили (F), що діє перпендикулярно до поверхні, до площі цієї поверхні (s), тобто:

$$p=F/s$$

Тиск є одним із найпоширеніших параметрів, які вимірюють у промисловості, і саме його значення значною мірою впливає на перебіг технологічних процесів.

Прийнято розрізняти такі основні види тиску:

1. Абсолютний тиск;
2. Атмосферний тиск;
3. Вакуум (розрідження);
4. Надлишковий тиск.

Абсолютний тиск ($P_{абс}$) — це тиск, відрахований від абсолютного нуля. За точку відліку абсолютного тиску приймають тиск усередині посудини, з якої повністю відкачано повітря. Абсолютний тиск також називають повним тиском, що дорівнює сумі атмосферного та надлишкового тисків:

$$P_{абс} = P_{и} + P_{атм}$$

Атмосферний тиск ($P_{атм}$) — це тиск, який створюється масою стовпа повітря атмосфери Землі.

Вакуум (розрідження) — це різниця між атмосферним і абсолютним тиском:

$$P_{в} = P_{атм} - P_{абс}$$

(Вакуумметричний тиск завжди нижчий за атмосферний.)

Надлишковий тиск ($P_{и}$) — це різниця між абсолютним і атмосферним тиском:

$$P_{и} = P_{абс} - P_{атм}$$

(Надлишковий тиск завжди перевищує атмосферний.)

2.6 Одиниці вимірювання тиску

Одиниця вимірювання тиску залежить від вибраної системи одиниць. У міжнародній системі одиниць (SI) одиницею вимірювання тиску є паскаль (Па), який дорівнює тиску, створеному силою в один ньютон, що діє на площу один квадратний метр (Н/м^2):

$$1 \text{ Па} = 1 \text{ Н/м}^2$$

У практиці вимірювань часто використовуються і позасистемні одиниці тиску, а саме:

- Кілограм на квадратний сантиметр (кгс/см²) або технічна атмосфера: 1 кгс/см² = 98066.5 Н/м²

- Міліметр ртутного стовпа (мм рт. ст.) — тиск стовпа ртуті висотою 1 мм за температури 0°C та прискорення сили тяжіння 980,665 см/с²: 1 мм рт. ст. = 133.322 Н/м²

- Міліметр водяного стовпа (мм вод. ст.) — тиск стовпа води висотою 1 мм за температури 4°C та прискорення 980,665 см/с²: 1 мм вод. ст. = 9.80665 Н/м²

У таблиці 1 наведено основні одиниці вимірювання тиску та їх співвідношення між собою.

Таблиця 2.1

Характеристики: Співвідношення між основними одиницями вимірювання тиску

Одиниця	Па	кгс/см ²	кгс/м ² (мм вод. ст.)	мм рт. ст.
1 Па		$1,0197 \times 10^{-5}$		$7,5006 \times 10^{-3}$
1 кгс/см ²	$9,8066 \times 10^4$		10^4	
1 кгс/м ² (мм вод. ст.)		10^{-4}		$0,73556 \times 10^{-2}$
1 мм рт. ст.		$1,3595 \times 10^{-3}$		

2.7 Класифікація вимірювальних перетворювачів тиску

У складі датчика тиску знаходиться первинний перетворювач тиску, який складається з чутливого елемента та приймача тиску, схеми вторинної обробки сигналу, корпусних деталей різної конструкції та пристрою для виведення сигналу. Основна відмінність між різними приладами полягає у точності реєстрації тиску, яка залежить від принципу перетворення тиску на електричний сигнал. Виділяють такі типи перетворювачів тиску:

- п'єзореzystивні;

- тензометричні;
- індуктивні;
- ємнісні;
- іонізаційні;
- резонансні та інші [9].

2.8 Класифікація датчиків тиску за принципом дії

Оптичні датчики

До оптичних датчиків тиску належать прилади, побудовані на волоконно-оптичному та оптоелектронному принципах вимірювання.

Волоконно-оптичні - Ця група датчиків заснована на використанні оптичного волноводу як чутливого елемента. Такі прилади відрізняються високою точністю та стабільністю до температурних коливань. Вимірювання тиску здійснюється за зміною амплітуди та поляризації світла, що проходить крізь чутливий елемент.

Оптоелектронні - У цих датчиках застосовуються багат шарові прозорі структури, крізь які проходить світло. Під впливом тиску змінюються параметри одного з шарів: або товщина шару, або показник заломлення. Зміни фіксуються фотоелементами, що забезпечує високу точність вимірювань.

Магнітні (індуктивні) датчики

Чутливий елемент представлений Е-подібною пластиною з катушкою всередині та провідною мембраною, яка реагує на тиск. Зміна зазору між пластиною і мембраною призводить до зміни індуктивності завдяки різниці у магнітній проникності матеріалів.

Ємнісні датчики

Найпростіші за конструкцією: складаються з двох електродів, один із яких є мембраною. Зміна тиску деформує мембрану, змінюючи відстань між електродами і, відповідно, ємність конденсатора. Ці датчики здатні фіксувати дуже малі зміни тиску.

Ртутні датчики

Принцип роботи базується на властивостях сполучених посудин. Тиск деформує рівень ртуті, і за висотою стовпа ртуті судять про величину тиску. Це класичний метод, що застосовується для еталонних вимірювань.

П'єзоелектричні датчики

Мають чутливий елемент з п'єзоелектричного матеріалу, який генерує електричний сигнал при деформації. Такі датчики придатні лише для вимірювання динамічного (змінного) тиску, оскільки при постійному тиску деформація не відбувається.

П'єзрезонансні датчики

Засновані на зворотному п'єзоефекті: конфігурація п'єзоматеріалу змінюється під дією електричного струму. Датчик містить резонатор, частота якого змінюється при деформації під дією тиску. Це забезпечує високу точність і стабільність вимірювань.

Резистивні датчики

Також відомі як тензорезистивні. Чутливий елемент — тензорезистор, який змінює опір при деформації. Мембрана деформується під дією тиску, що змінює опір тензорезисторів і викликає зміну електричного струму в колі.

Резонансні датчики

Метод заснований на акустичних чи електромагнітних резонансних процесах. Вони забезпечують високу стабільність та точність, але мають індивідуальні характеристики, тривалий час відгуку і обмеження щодо роботи в агресивних середовищах.

Іонізаційні датчики

Принцип роботи базується на реєстрації потоку іонізованих частинок, подібно до роботи лампових діодів. Вони дуже чутливі до низького тиску (глибокий вакуум), але не можуть працювати при тиску, близькому до атмосферного, і тому застосовуються в комбінації з іншими типами датчиків.

2.9 Класифікація систем для повірки та калібрування датчиків тиску

За призначенням системи для повірки та калібрування датчиків тиску поділяють на такі види:

- Системи, призначені виключно для повірки датчиків тиску (без функції калібрування).
- Системи, призначені як для повірки, так і для калібрування датчиків тиску.

За ступенем автоматизації системи класифікують наступним чином:

- Системи з ручним заданням тиску, де регулювання тиску здійснюється оператором вручну.
- Системи з автоматизованим заданням тиску, в яких процес створення та регулювання тиску відбувається автоматично за допомогою керуючого обладнання.

З АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ КАЛІБРУВАННЯ ТИСКУ

3.1 Автоматизована система для перевірки та калібрування датчиків динамічного тиску Fluke 7100 Series (США/Європа)

Опис системи: Сучасна автоматизована система калібрування динамічного тиску (пульсацій тиску) – це комплексне рішення "під ключ", призначене для точного калібрування та перевірки датчиків тиску в діапазоні 0–10 бар.

Основні компоненти системи:

- Робоча камера з повітрям під тиском
- Прецизійний цифровий манометр високої точності
- Швидкодіючі клапани для регулювання тиску
- Лінійний імпульсний клапан для генерування тимчасових сигналів заданої амплітуди

- Актуатор тиску для динамічних випробувань
- Спеціалізоване ПЗ для аналізу даних у реальному часі

Функціональні можливості:

1. Вимірювання та калібрування динамічного тиску з частотою до 200Гц

Автоматичне побудова графіків залежностей та перевірка лінійності датчиків

2. Генерація звітів із протоколами калібрування
- Підтримка роботи з різними типами датчиків (абсолютний, надлишковий, диференціальний тиск)

Технічні характеристики: Fluke 7100 Series

Параметр	Значення
Діапазон тиску	0–70 МПа (модульна конструкція)
Точність	$\pm 0,025\%$
Максимальний тиск	До 70 МПа
Час наростання імпульсу	< 5 мс
Інтерфейс	HART, Foundation Fieldbus, Ethernet
Габарити	Компактні модулі
Вага	Залежить від конфігурації

Комплектація:

- Основна калібрувальна станція
- Модулі тиску (підбираються під задачі)
- Програмне забезпечення Fluke MET/CAL
- Опційно: ноутбук для керування



Рис. 3.1 Fluke 7100 Series

3.2 Автоматизовані калібратори тиску

Опис системи: Additel 762 (США)

Сучасні автоматизовані калібратори тиску призначені для: Точного відтворення та вимірювання тиску (абсолютного, надлишкового, вакууму)

Калібрування перетворювачів тиску з підтримкою цифрових протоколів

(HART,FoundationFieldbus)

Тестування реле та перевірки стану електричних сигналів (4-20 мА, 0-10 В)

Таблиця 3.2

Технічні характеристики: Additel 762

Параметр	Значення
Діапазон тиску	-100 кПа...70 МПа
Точність	±0.025%
Цифрові інтерфейси	HART, Modbus
Додаткові функції	Автоматичне тестування реле

Функціональні можливості

- Кольоровий сенсорний екран з інтуїтивним інтерфейсом
- Швидкодіюча система клапанів для плавного регулювання тиску
- Вбудовані еталонні модулі високої точності (опційно – барометричний датчик)
- Підтримка HART-протоколу для роботи з "розумними" датчиками
- Автоматична калібрування сенсорів та підстройка токової петлі
- Тестування реле через дискретні входи/виходи
- Гальванічна розв'язка живлення датчиків



Рис. 3.2 Additel 762 (США)

3.3 Автоматизована система калібрування датчиків тиску

Beamex MC6-TT (Фінляндія) з комплексом термостабілізації

Опис системи: Інноваційна модульна платформа для повноцінного тестування датчиків тиску в екстремальних умовах з інтегрованим HART-комунікатором.

Склад рішення:

1. Головний модуль
 - Багатофункціональний калібратор Beamex MC6 з:
 - Вбудованим барометром
 - 7" сенсорним дисплеєм
 - Підтримкою протоколів HART/Fieldbus
2. Термокомпенсований блок
 - Камери термоциклювання Weiss Technik TCB-150
 - Діапазон: -65°C...+180°C
 - Точність $\pm 0.3^{\circ}\text{C}$
3. Вакуумно-тисковий комплекс
 - Насоси Pfeiffer HiCube 80 Eco (вакуум до 10^{-3} мбар)
 - Гідравлічний генератор тиску Fluke P3000H (до 100 МПа)

Технічні переваги: Точність 0.01% vs 0.05% у російського аналога

Автоматичне тестування 8 датчиків одночасно

Робота в 3 режимах:

- Статична калібрування
- Динамічні пульсації (до 500 Гц)
- Термоциклювання

Типові операції:

1. Механічне завантаження зразків
2. Автоматичне визначення метрологічних характеристик
3. Генерація PDF-звітів з графіками залежностей
4. Валідація результатів відповідно до ISO 9001

Габарити комплексу:

- Основна станція: 600×800×1200 мм
- Вага: 85 кг



Рис. 3.3 Beamex MC6-TT

3.4 Автоматизированная система калибровки датчиков давления

Детальный обзор портативного калибратора тиску Additel CPC-8000

Additel CPC-8000 – це високоточний портативний калібратор тиску, розроблений американською компанією Additel Corporation (США/ЄС). Він призначений для калібрування, тестування та перевірки різних засобів вимірювання тиску, а також роботи з електричними сигналами.



Рис. 3.4 Additel CPC-8000

Основні характеристики:

Діапазон тиску:

- Від -0.1 до 70 МПа (залежно від модуля)
- Підтримує абсолютний, надлишковий та вакуумний тиск

Точність:

- До $\pm 0.01\%$ від повного діапазону (залежно від моделі)
- Стабільність показів завдяки високоякісним сенсорам

Електричні вимірювання:

- Вхід/вихід 4-20 мА, 0-10 В, термопар, RTD (опціонально)
- Підтримка HART-протоколу (для роботи з розумними датчиками)

Додаткові функції:

- Вбудований задатчик тиску (генератор тиску)
- Два незалежні канали (можна вимірювати та генерувати тиск одночасно)
- Автоматичне протоколювання (збереження даних у внутрішній пам'яті)

Інтерфейси:

- USB, Bluetooth (для підключення до ПК/планшету)
- ПО Additel для автоматизованого аналізу даних

Живлення:

- Вбудований акумулятор (до 8 годин роботи)

- Можливість роботи від мережі

Корпус:

- Міцний, захищений від пилу та вологи (IP54)
- Компактний та ергономічний дизайн
- Переваги Additel CPC-8000:

- 1) Вища точність – підходить для еталонних вимірювань.
- 2) Ширший діапазон – можна калібрувати більше типів датчиків.
- 3) Сучасні інтерфейси (Bluetooth, HART) – зручність інтеграції.
- 4) Міжнародна сертифікація (NIST, CE) – визнаний у Європі та США.

- Недоліки:

1. Немає вбудованого ресивера
2. Вища вартість

3.5 Настольный калибратор

1. Основні технічні характеристики WIKA CPC8000

WIKA CPC8000 - це сучасний настільний калібратор тиску німецького виробництва, який пропонує:

Діапазони тиску:

- Абсолютний тиск: 0...25 МПа
- Надлишковий тиск: -0,1...70 МПа
- Вакуум: до -100 кПа

Точність:

- Основна похибка: $\pm 0,01\%$ від діапазону (значно вище, ніж у ЕЛЕМЕР-ПКД-160 з $\pm 0,05\%$)

Додаткові функції:

- Вбудований термометр (для температурної компенсації)
- Підтримка HART-протоколу
- 24 В джерело живлення для підключення датчиків

Інтерфейси:

- USB, Ethernet, Bluetooth
- Спеціалізоване ПЗ WIKA Calibration Management

Таблиця 3.3

Технічні характеристики: WIKA CPC8000

Характеристика	WIKA CPC8000
Точність	$\pm 0,01\%$
Джерело тиску	Зовнішнє джерело (потрібен окремий компресор)
Кількість каналів	1 основний канал (але з більшим діапазоном)
Підключення	Професійні гідравлічні з'єднання
Програмне забезпечення	Повноцінна система керування калібруванням

4. Комплектація та додаткові опції

Для повноцінної заміни рекомендується:

1. Базовий набір:

- WIKA CPC8000 (основний модуль)
- Набір адаптерів для підключення (аналогічний до гребінок

ЕЛЕМЕР)

2. Додаткове обладнання:

- Компресор WIKA CPB5000 (для автономної роботи)
- Набір еталонних датчиків тиску WIKA CPT (аналог ПДЭ-010)

3. Програмне забезпечення:

- WIKA-Cal Software для автоматизації процесів

4. Переваги переходу на WIKA CPC8000

1. Вища точність (в 5 разів точніший за російський аналог)
2. Міжнародне визнання (повна відповідність стандартам DIN EN

ISO)

3. Розширена функціональність:

- Автоматична температурна компенсація
- Вбудована база датчиків
- Можливість створення користувацьких протоколів

4. Надійність:
- Середній термін служби - 10+ років
 - Повний сервісний супровід в Україні



Рис. 3.4 CPC8000

3.6 Комплект обладнання для повірки засобів вимірювання тиску

Автоматизоване робоче місце (АРМ) поверителя на базі Chauvin Arnoux CA 8336 (Qualistar+)

Призначення:

Комплект обладнання призначений для організації робочого місця поверителя під час повірки засобів вимірювання тиску, розрідження та тиску-розрідження.

Опис:

Комплект обладнання на базі аналізатора якості електроенергії Chauvin Arnoux CA 8336 (Qualistar+) дозволяє одночасно повіряти до трьох засобів вимірювання тиску з діапазоном вимірювань до 60 МПа (600 кгс/см²). Система

забезпечує формування, збереження та створення бази протоколів повірки. Для роботи з комплектом необхідний комп'ютер (ноутбук). При підключенні кількох повіркових приладів використовується колектор.

Робочий еталон:

Цифровий манометр, інтегрований у систему СА 8336, відповідає європейським стандартам якості та внесений до реєстрів засобів вимірювань (залежно від країни). Методика повірки затверджена відповідними метрологічними установами (наприклад, європейськими аналогами ВНИИМС).

Функціональні можливості:

- Одночасна повірка до трьох засобів вимірювання тиску.
- Підтримка двох методів повірки (автоматичний та ручний).
- Вибір одиниць вимірювання тиску (кПа, МПа, кгс/см², бар тощо).
- Автоматичне формування, збереження та створення бази протоколів повірки.

- Автоматичний розрахунок похибок та визначення придатності/непридатності засобів вимірювання.

- Простота в експлуатації, інтуїтивний інтерфейс.
- Компактність, портативність, малі габарити.

Основні технічні характеристики:

- Діапазон вимірювань повіркових приладів: від -0,1 до 60 МПа.
- Клас точності повіркових приладів: 0,4; 0,6; 1,0 та нижче.
- Одиниці вимірювання тиску: кПа, МПа, кгс/см², бар тощо.
- Інтерфейс: USB, Bluetooth (залежно від конфігурації).

Склад комплекту обладнання:

- Робочі еталони (цифрові манометри СА 8336) з межею допустимої основної похибки: $\pm 0,06\%$; $\pm 0,1\%$; $\pm 0,15\%$; $\pm 0,2\%$; $\pm 0,25\%$ (залежно від конфігурації).

- Паспорти до робочих еталонів (за кількістю еталонів).
- Посібник з експлуатації робочих еталонів СА 8336 (1 екз.).
- Методика повірки цифрових манометрів (1 екз.).

- Свідоцтва про повірку приладів СА 8336 (за кількістю еталонів).
- Паспорт комплекту обладнання (1 екз.).
- Посібник з експлуатації комплекту обладнання (1 екз.).
- Пристрої для створення тиску (з супровідною документацією, залежно від моделі).

- Компакт-диск із програмним забезпеченням «Qualistar+» для обробки даних повірки (1 шт.).

- Інтерфейсні кабелі (USB – 1 шт., USB-C – 1 шт.).

- Блок живлення для підключення приладів СА 8336 до джерела постійного струму (1 шт.).

- Кейси для транспортування (2 шт.):

- Кейс 1: робочі еталони, інтерфейсні кабелі, блок живлення, компакт-диск із ПЗ, елементи живлення (акумулятори).

- Кейс 2: пристрій для створення тиску, колектор із заглушками, набір перехідників із прокладками, розділювальна камера.

Додаткове обладнання (за замовленням):

- Набір перехідників із прокладками для різних приєднувальних різьб (згідно зі специфікацією).

- Колектор із заглушками (для підключення до 4 приладів, включно з робочим еталоном).

- Ноутбук із попередньо встановленим ПЗ «Qualistar+».

- Розділювальна камера (до 3 шт.).

Переваги:

- Виробництво Франція, відповідність європейським стандартам.

- Висока точність і надійність.

- Сучасне програмне забезпечення з інтуїтивним інтерфейсом.

- Підтримка та сервіс у країнах ЄС і Україні через офіційних дистриб'юторів.



Рис. 3.6 Chauvin Arnoux CA 8336(Qualistar+)

РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ

Вибір методу повірки. Вибір методу повірки обумовлений технічним завданням, з якого випливає, що повірку датчиків КР61 слід проводити з використанням еталонного датчика КР43. Даний метод забезпечує високу точність вимірювань та відповідає вимогам державних стандартів у сфері метрології. Порівняльний метод повірки є найбільш поширеним та надійним способом калібрування датчиків тиску, оскільки дозволяє безпосередньо порівняти показання поверяемого приладу з еталонним зразком.

Опис структурної схеми. Розроблено структурну схему комплексу (див. рисунок 13), на основі якої в подальшому буде розроблятися принципова схема. Структурна схема відображає основні функціональні блоки системи та їх взаємозв'язки, що дозволяє зрозуміти принцип роботи всього комплексу.

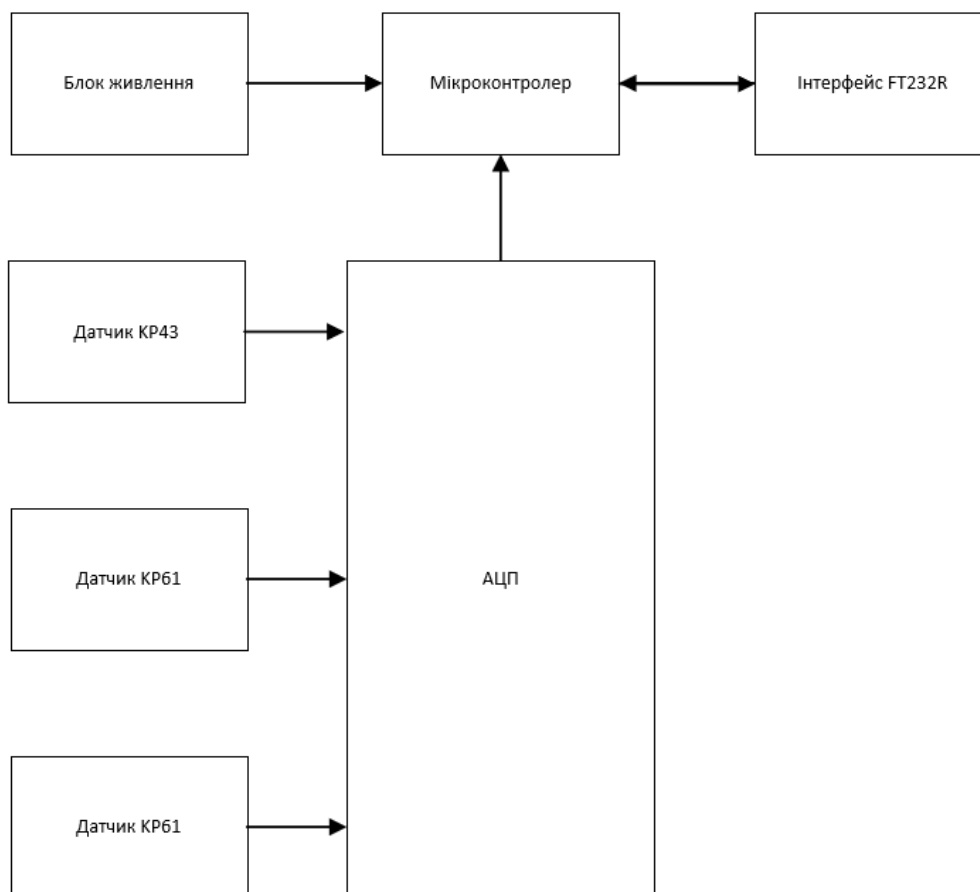


Рис. 4.1 – Структурна схема пристрою

Зі структурної схеми видно, що сигнали, які надходять з датчиків, оцифровуються та потрапляють на пристрій керування. Інтерфейс FT232R

призначений для зв'язку з зовнішніми пристроями та виведення отриманої інформації, зручності при налаштуванні пристрою. Цей інтерфейс забезпечує стабільний та швидкий обмін даними з комп'ютером або іншими зовнішніми системами через USB-з'єднання.

Блок живлення забезпечує електроживлення всієї системи стабілізованою напругою, що є критично важливим для точності вимірювань. Якість електроживлення безпосередньо впливає на стабільність роботи аналогових компонентів схеми, особливо датчиків та АЦП.

Блок датчиків, що реєструють рівень тиску, включає в себе еталонний датчик КР43 та два поверяємих датчика КР61. Еталонний датчик має вищий клас точності та служить опорним елементом для порівняння. Використання двох поверяємих датчиків дозволяє одночасно проводити перевірку декількох приладів, що підвищує продуктивність процесу.

Інформація, знята з датчиків, надходить у систему через блок АЦП (аналого-цифрового перетворювача). АЦП забезпечує перетворення аналогових сигналів від датчиків у цифровий формат з високою роздільною здатністю та мінімальними похибками перетворення. Далі система обробляє отриману інформацію за закладеним в неї алгоритмом та передає результат обробки через інтерфейс FT232R.

Мікроконтролер виконує функції центрального процесора системи, забезпечуючи координацію роботи всіх компонентів, обробку даних та реалізацію алгоритмів перевірки. Поряд з ОЗП, мікроконтролер може оснащуватися вбудованою енергонезалежною пам'яттю для зберігання програми та даних. Разом з тим багато контролерів взагалі не мають шин для підключення зовнішньої пам'яті.

Більш бюджетні типи пам'яті допускають лише одноразовий запис. Пристрої такого типу застосовні в тих випадках, коли програма контролера не буде оновлюватися. Інші типи контролерів мають можливість багаторазового перезапису енергонезалежної пам'яті, що дозволяє оновлювати програмне забезпечення та калібрувальні коефіцієнти.

На відміну від процесорів загального призначення, в мікроконтролерах часто використовується гарвардська архітектура пам'яті, тобто роздільне зберігання даних та команд в ОЗП та ПЗП відповідно. Це підвищує швидкодію системи та забезпечує більш ефективне використання ресурсів пам'яті.

Програмування мікроконтролерів зазвичай здійснюється мовою асемблера або Сі, хоча існують компілятори для інших мов програмування. Спираючись на отримані дані, робимо висновок, що розробляти пристрій необхідно на мікроконтролері, оскільки в нашому випадку це є ідеальним варіантом з точки зору співвідношення функціональності, вартості та надійності.

При складанні структурної схеми був врахований той факт, що для роботи будь-якого мікроконтролера потрібен тактуючий пристрій (кварцовий резонатор). Вибір конкретної моделі кварцового резонатора визначається в залежності від конкретної моделі самого мікроконтролера та необхідної частоти тактування системи.

5. РОЗРОБКА ПРИНЦИПОВОЇ СХЕМИ

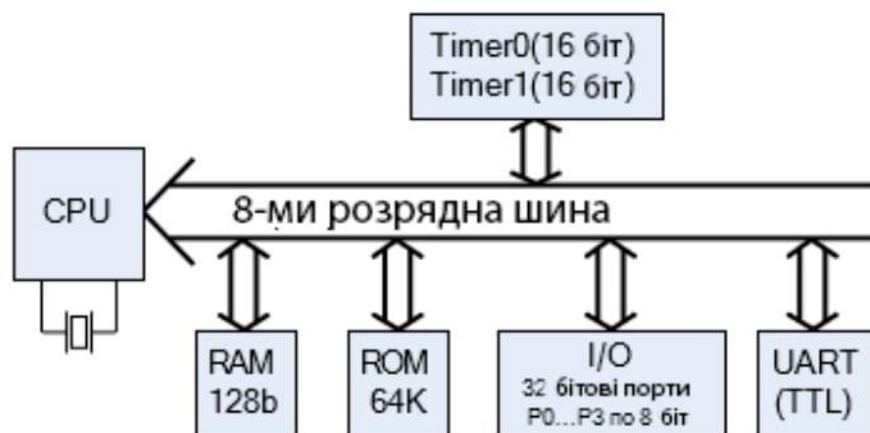
5.1 Вибір мікропроцесора

Розглянемо сімейство мікроконтролерів i8051, оскільки ці мікросхеми відзначаються доступною вартістю. Функціональні можливості цього сімейства досить різноманітні, але для нашої системи достатньо обрати мікроконтролер із базовим функціоналом, адже розроблювана система не має жорстких вимог до мікроконтролера.

Мікроконтролери сімейства i8051 базуються на гарвардській архітектурі, що передбачає окремі шини для пам'яті команд і пам'яті даних. Це 8-бітові мікроконтролери з обмеженням обсягу програмного коду до 64 Кбайт.

На функціональній схемі (див. рисунок 14) зображені основні вузли:

- RAM – оперативний запам'ятовуючий пристрій (пам'ять тимчасових даних), призначений для зберігання даних під час виконання програми;
 - ROM – постійна пам'ять (пам'ять програм), що зберігає інструкції програми;
 - I/O – порти введення/виведення, двонаправлені;
- /1) – 16-бітові таймери-лічильники, які використовуються для вимірювання інтервалів часу, роботи UART, організації ШІМ (широтно-імпульсної модуляції) та підрахунку імпульсів зовнішніх подій;



Р

и

с

.

- UART – апаратний інтерфейс для організації послідовної передачі даних. Мікроконтролер може функціонувати у двох режимах:
- Режим мікропроцесора: передбачає використання 8-бітової мікросхеми з підключенням зовнішньої пам'яті (ОЗП) через зовнішню шину;
- Режим однокристального комп'ютера: усі компоненти, включно з пам'яттю коду, розташовані на одному кристалі.

Після аналізу доступних моделей сімейства i8051 для інформаційно-вимірювального комплексу було обрано мікроконтролер AT89C51 – 8-бітовий КМОП-мікроконтролер із Flash ПЗП.

Відмінні особливості AT89C51:

- Обсяг перепрограмованої Flash-пам'яті: 4 Кбайт, витримує 1000 циклів стирання/запису.
- Сумісність: Повна сумісність із приладами сімейства MCS-51™.
- Діапазон робочих частот: Від 0 Гц до 24 МГц.
- Напруга живлення: 5 В $\pm$ 20%.
- Захист пам'яті: Трьохрівнева блокування пам'яті програм.
- Групи частот: 12 МГц, 16 МГц, 20 МГц, 24 МГц.
- ОЗП: 128 байтів.
- Таймери/лічильники: Два 16-бітові таймери/лічильники подій.
- Лінії введення/виведення: 32 програмовані лінії.
- Джерела переривань: Шість джерел сигналів переривання.
- Послідовний канал: Програмований UART для обміну даними.

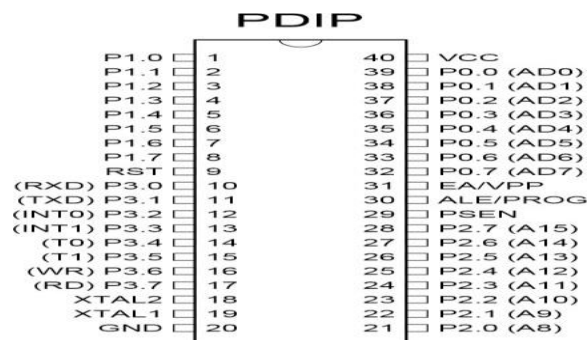


Рис. 5.2 Розташування виводів мікросхеми AT89C51.

Обґрунтування вибору:

Мікроконтролер AT89C51 був обраний завдяки своїй простоті, достатній функціональності для задач перевірки датчиків тиску, а також доступній вартості. Він забезпечує стабільну роботу в інформаційно-вимірювальному комплексі, дозволяючи обробляти дані з датчиків тиску, передавати їх через UART на ПК для подальшої обробки та формування протоколів перевірки. Компактність і низьке енергоспоживання роблять його оптимальним вибором для портативних систем.

Розрахунок елементів:

- Розрахунок цифрового тракту
- Цифровий тракт пристрою призначений для виконання таких функцій:
- Збір даних із вихідних каналів вимірювання сигналів від датчиків

тиску.

Обробка зібраної інформації та обчислення вихідних значень відповідно до робочої формули:

- Виведення результатів на цифровий індикатор.
- Управління роботою допоміжних компонентів схеми.
- Розглянемо вимоги до мікроконтролера для забезпечення цих функцій.
- Визначення розрядності представлення результатів
- Розрядність n_c визначається як кількість бінарних розрядів, що

відводиться для представлення мантиси числа (без урахування розряду знака).

Допустиме відхилення ($\Delta\Delta$) розраховується як:

$$\Delta_{\text{доп}} = \frac{\sigma_{\text{доп}}}{10} = \frac{40}{10} = 4\text{m}$$

Кількість бітів визначається за формулою:

Де

$$n = \left\lceil \log_2 \left(\frac{U_{\text{max}}}{\Delta_{\text{доп}}} \right) \right\rceil = \left\lceil \log_2 \left(\frac{32}{4} \right) \right\rceil = 3$$

U_{max} — максимальне значення вимірюваного параметра (32 одиниці).

Оскільки мікроконтролери зазвичай мають 8-бітну шину даних, для представлення результатів достатньо використовувати однобайтовий формат. Визначення обсягу пам'яті

Обсяг пам'яті розраховується для:

1. Зберігання програмного коду в пам'яті програм (ПЗП).
2. Зберігання проміжних даних, що виникають під час виконання програми (ОЗП).

Обсяг ПЗП визначається за формулою:

$$Q_{\text{ПЗП}} = \lambda \cdot (\sum N_{j_{\text{ком}}})$$

де: $\lambda=1.5$ — коефіцієнт запасу.

Кількість операцій розподіляється наступним чином:

- Додавання — 15 біт;
- Віднімання — 25 біт;
- Множення — 30 біт;
- Ділення — 100 біт;
- Піднесення до степеня — 100 біт;
- Витяг кореня — 50 біт;
- Підпрограма опитування каналів — 50 біт;
- Підпрограма виведення інформації — 50 біт.

Отже:

$$Q_{\text{ПЗП}} = 1.5 \cdot (15 + 25 + 30 + 100 + 100 + 50 + 50 + 50) = 1.5 \cdot 420 = 630 \text{ біт}$$

Обсяг ОЗП розраховується за формулою:

- Результати опитування каналів і датчиків — $16 + 16 = 32$ біт;
- Проміжні результати обчислення робочої формули — $2 \times 30 = 60$ біт;
- Додаткові проміжні дані — 30 біт.

Загальний обсяг ОЗП:

$$Q_{\text{ОЗП}} = 32 + 60 + 30 = 122 \text{ біт}$$

5.2 Вибір моделі мікроконтролера

Крім проведених розрахунків, для вибору конкретної моделі мікроконтролера враховуються додаткові критерії:

1. Наявність аналогових входів: Кількість розрядів і швидкодія АЦП будуть визначені пізніше.
2. Мінімальна вартість: Мікроконтролер має бути якомога дешевшим.
3. Наявність апаратних модулів:
 - Таймер для вимірювання часових інтервалів;
 - Універсальний послідовний приймач-передавач (UART) для передачі даних від системи автоматичного управління.
4. Додаткові вимоги:
 - Наявність вбудованої апаратної підтримки інтерфейсу USB для підключення персонального комп'ютера для налаштування та оновлення програмного забезпечення.
 - Сучасність моделі: Виробники підтримують лише нові моделі (оновлюють бази програматорів), тоді як старі моделі знімаються з виробництва і не сумісні з сучасними компіляторами чи програматорами.

Розрахунок вимог, що висуваються до АЦП

Аналого-цифровий перетворювач (АЦП) призначений для перетворення безперервної величини x у числовий код N . Числовий код подається в обчислювач — АЛУ мікроконтролера. Розрахунок параметрів АЦП здійснюється відповідно до [4].

Помилка АЦП у загальному випадку є випадковою і може бути охарактеризована середньоквадратичним значенням $\sigma_{\text{АЦП}}$ або дисперсією:

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = \sigma_{\text{диск}}^2 + \sigma_{\text{кв}}^2 + \sigma_{\text{дин}}^2$$

де:

$\sigma_{\text{диск}}^2$ -середньоквадратичне значення складової помилки АЦП, що виникає через дискретизацію безперервного сигналу;

$\sigma_{\text{кв}}^2$ -середньоквадратичне значення складової помилки, що виникає через дискретизацію сигналу за рівнем;

$\sigma_{\text{дин}}^2$ -середньоквадратичне значення помилки, що виникає через запізнення вихідного сигналу АЦП на час перетворення.

$$\sigma_{\text{диск}}^2 = \frac{2}{6},$$

$$\sigma_{\text{кв}}^2 = \frac{3}{6}$$

$$\sigma_{\text{дин}}^2 = \frac{1}{6}$$

Максимальний рівень сигналу на вході АЦП однаковий для всіх каналів, оскільки визначається нормуючим підсилювачем, тоді:

$$\sigma_{\text{АЦП}}^2 = (\sigma_{\text{АЦП}} \cdot U_{\text{max}})^2 = (0.001 \cdot 5)^2 = 25 \text{ мкВ}^2$$

Розраховуємо:

$$\sigma_{\text{диск}}^2 = \sigma_{\Delta \text{АЦП}}^2 \cdot \frac{2}{6} = 25 \cdot \frac{2}{6} = 8.3 \text{ мкВ}^2$$

$$\sigma_{\text{кв}}^2 = \sigma_{\Delta \text{АЦП}}^2 \cdot \frac{3}{6} = 25 \cdot \frac{3}{6} = 12.5 \text{ мкВ}^2$$

$$\sigma_{\text{дин}}^2 = \sigma_{\Delta \text{АЦП}}^2 \cdot \frac{1}{6} = 25 \cdot \frac{1}{6} = 4.16 \text{ мкВ}^2$$

Розрахуємо максимальні швидкості зміни сигналу з датчиків тиску, тобто швидкості зміни інформаційних параметрів системи.

Визначимо необхідну кількість розрядів АЦП [10]:

$$n = \lceil \log_2 \left(\frac{U_{\text{max}}}{2 \cdot 3 \cdot \sigma_{\text{кв}}} \right) \rceil = \lceil \log_2 \left(\frac{5}{2 \cdot 3 \cdot 12.5 \cdot 10^{-6}} \right) \rceil \approx 9.36 \approx 10$$

Необхідний час перетворення АЦП можна визначити за формулою:

$$t \leq \frac{\sigma_{\Delta \text{дин}}}{2 \cdot v_x}$$

Знайдемо для каналу вимірювання:

$$\sigma_{\Delta_{\text{дин}}} = 0.065^{\circ}\text{C}$$

Тоді час перетворення даних АЦП в каналі вимірювання складе:

$$\sigma_{\Delta T_{\text{дин}}} = \sqrt{\sigma_{\Delta_{\text{дин}}}^2 \cdot U_{\Delta_{\text{max}}}^2} = \sqrt{4.16 \cdot 10^{-6} \cdot 32^2} = 0.065^{\circ}\text{C}$$

Як видно, вимоги до швидкодії АЦП досить низькі і мають бути не менше 10 розрядів і не менше 1...2 с відповідно.

5.3 Вибір АЦП

Після вивчення представлених на ринку АЦП, вибір зупинився на моделі MCP3204 компанії Microchip Technology. Основними його перевагами є використання послідовного каналу передачі перетворених даних та його 4-канальність.

Дамо короткий опис використовуваної моделі.

MCP3204 — послідовний 12-бітний аналого-цифровий перетворювач зі вбудованим пристроєм вибірки та зберігання (УВХ). Можна працювати в режимі двох псевдо-диференціальних входів або в чотирьохканальному режимі.

Режим роботи вибирається подачею певної послідовності імпульсів на відповідний вхід.

Зв'язок з АЦП має простий послідовний інтерфейс, сумісний з протоколом

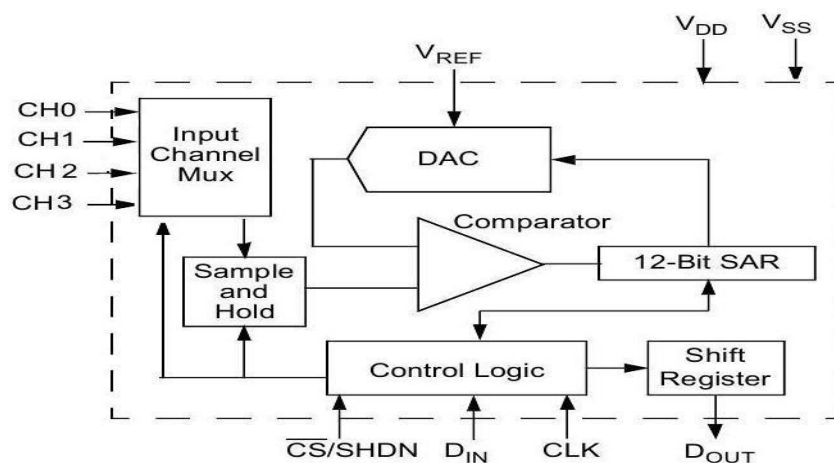


Рис. 5.3 Функціональна схема MCP3204

МСР3204 працює в широкому діапазоні напруг (3.7 В - 6.5 В). Функціональна схема МСР3204 представлена на малюнку 16.

Для організації передачі даних між АЦП і мікроконтролером необхідно знати часові характеристики АЦП при послідовному підключенні (див. малюнок 17).

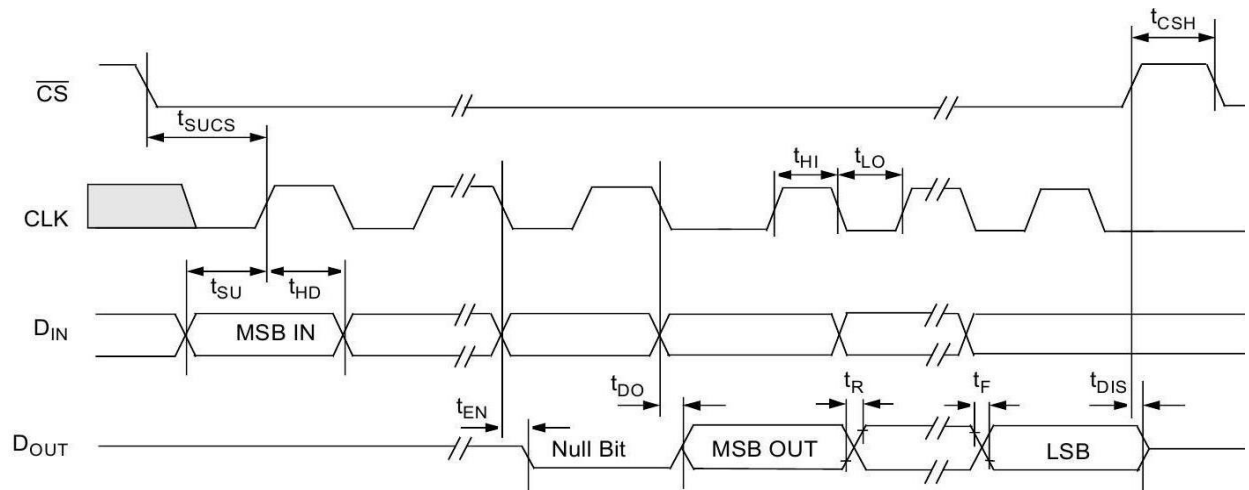


Рис. 5.4 Тимчасові характеристики МСР3204

Часові характеристики, представлені на малюнку 3.4, відображають якісну сторону процесу передачі. Для повноти картини необхідно мати також уявлення про кількісну сторону процесу передачі.

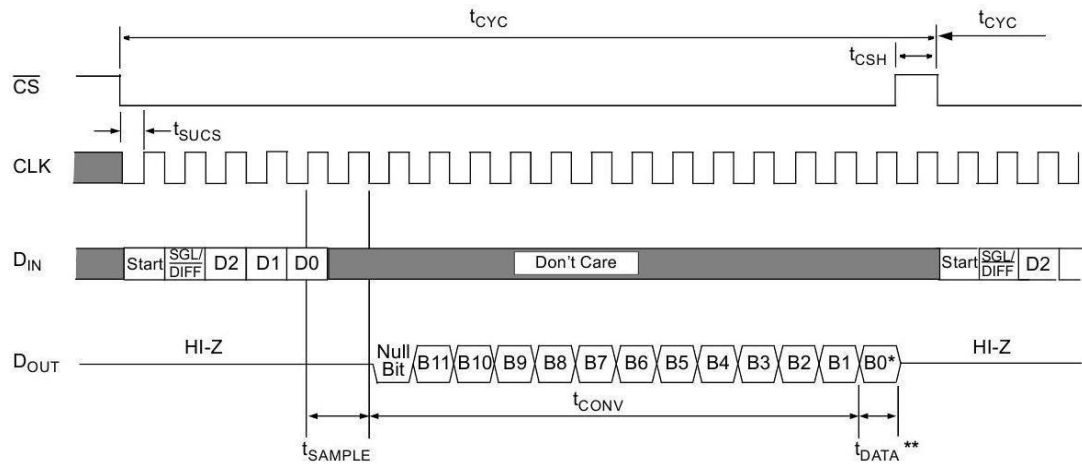
Розглянемо призначення виводів МСР3205:

- DGND: Загальний провід («земля») цифрової частини схеми.
- AGND: Загальний провід («земля») аналогової частини схеми.
- CH0-CH3: Входи для подачі аналогового сигналу. Кожна пара каналів може бути запрограмована для використання як у режимі двох незалежних каналів, так і в режимі єдиного псевдо-диференціального входу.
- CLK: На цей вхід необхідно подавати послідовність імпульсів, щоб ініціалізувати процес перетворення, а також синхронізувати кожен біт перетвореної інформації (цифрового коду).
- DIN: Цей вхід використовується для вибору одного з каналів шляхом подачі на нього певної послідовності імпульсів.

- DOUT: Цей вихід необхідний для послідовного виведення перетворених АЦП даних.

: Використовується для ініціалізації вибору мікросхеми АЦП.

Деталізована схема процесу перетворення представлена на малюнку 18.



Р

и

Формула перетворення АЦП має вигляд:

$$\text{Digital Output Code} = 4096 \cdot \left(\frac{V_{\text{IN}}}{V_{\text{REF}}} \right)$$

де:

- Digital Output Code — кодова послідовність на виході АЦП після перетворення;

V_{IN} — величина аналогового вхідного сигналу, В;

V_{REF} — опорна напруга, В.

Деталізована схема процесу перетворення

В якості джерела опорної напруги зручно використовувати (а також рекомендується використовувати) стабілізатор напруги MCP1541, який працює в діапазоні напруг живлення 4.3...5.5 В і має на виході стабілізовану напругу 4.096 В.

Мікросхема здатна віддавати в навантаження струм до 2 мА, коли власне споживання становить 100 мкА.

Максимальна початкова помилка встановлення $\pm 1\%$. Діапазон робочих температур від мінус 40 до +85 °С.

Вибір датчиків тиску

Інформаційно-вимірювальний комплекс для повірки датчиків тиску

Об'єкти повірки

Таблиця 4.3

Технічні характеристики: цифрові манометри КР61

Параметр	Характеристика
Призначення	Моніторинг допоміжних ліній, перевірка герметичності, візуалізація тиску
Типи	КР61Р (надлишковий тиск), КР61V (вакуум)
Діапазони вимірювань	• 0...1 МПа (10 кгс/см ²) • -101 кПа...0 • -1...0.6; 1.5; 3; 5; 9; 15; 24 кгс/см ²
Похибка	±1% повної шкали ±1 розряд
Живлення	12–28 В DC ±10%, пульсація ≤10%, ≤10 мА
Частота вимірювання	2 Гц
Дисплей	Рідкокристалічний, 3½ розряду, 7 сегментів
Захист корпусу	
Температура експлуатації	-40...+50°C (виконання У2), -10...+60°C (виконання Т2)
Вологість	35–85% RH (без конденсату)
Вібростійкість	10–55 Гц, амплітуда 1.5 мм або 10G
Ударостійкість	100 м/с ² (10G), по 3 удари на кожную вісь
Точність індикації	±2% від повної шкали ±1 розряд (при 25 ±3°C)
Температурна похибка	±2% FS у межах 0–50°C
З'єднання	
Кабель	Маслостійкий Ø1.5 мм ²
Вага	≈ 60 г (з кабелем 2 м) / 40 г (з роз'ємом M8 4pin)



Еталонний засіб

Таблиця 4.3

Технічні характеристики: Манометр КР43

Параметр	Характеристика
Призначення	Високоточне вимірювання надлишкового, вакуумного, мановакуумного тиску
Типи	КР43С (комбінований), КР43V (вакуум), КР43Р (надлишковий)
Діапазони вимірювань	• 0...0.16; 0.25; 0.4; 0.6; 1; 1.6; 2.5; 4; 6; 10; 16; 25; 40; 60; 100; 160; 250; 400; 600; 1000; 1600; 2500 кгс/см ² • -1...0 кгс/см ² • -1...0.6; 1.5; 3; 5; 9; 15; 24 кгс/см ²
Похибка	±0.06%; ±0.1%; ±0.15%; ±0.25% (залежно від моделі)
Живлення	12–24 В DC ±10%, пульсація ≤10%, ≤40 мА
Вихідний сигнал	2 NPN виходи (відкритий колектор), макс. 125 мА, макс. 30 В DC (КР43С/V), 24 В DC (КР43Р)
Аналоговий вихід (напруга)	1–5 В ±2.5% FS, лінійність ±1% FS, навантаження ≥1 кОм
Аналоговий вихід (струм)	4–20 мА ±2.5% FS, навантаження 50–600 Ом
Дисплей	РК-дисплей: основний (червоний/зелений), допоміжний (помаранчевий), оновлення 5 раз/сек
Повторюваність	±0.2% FS ±1 розряд
Гістерезис / режими	Гістерезис / віконний режим, налаштується
Час відгуку	≤2.5 мс (фільтр: 25–1500 мс)
Захист від КЗ	Є
Захист корпусу	
Температура експлуатації	• УХЛЗ.1: -10...+70°C • У2: -40...+70°C • ТЗ: -10...+70°C
Вологість	35–85% RH (без конденсату)
Вібростійкість	10–55 Гц, амплітуда 0.35 мм (група N2)
Ударостійкість	100 м/с ² (10G), по 3 удари на кожну вісь
Матеріали	Корпус – алюмінієвий сплав, тримач – латунь
З'єднання	
Кабель	Маслостійкий Ø1.5 мм ²

Вага

≈ 80 г (з кабелем 2 м)



Рис. 5.7 Манометр КР43

5.5 Вибір датчика тиску

Як датчик тиску обрано цифровий контролер тиску СРС 3000



Рис. 5.8 СРС 3000.

Застосування:

- Автоматичне створення та прецизійне вимірювання тиску під час калібрування та перевірки засобів вимірювання тиску: манометрів, вимірювальних перетворювачів надлишкового, абсолютного та диференціального тиску в лабораторних умовах.

Особливості:

- Діапазони створення/вимірювання тиску: Від -100 кПа до 7,0 МПа.
- Межа допустимої основної похибки вимірювання: $\pm 0,025\%$ від верхньої межі вимірювань (ВПВ).
- Дисплей: Сенсорний ЖК-дисплей із україномовним інтерфейсом.

- Режим роботи: Плавне підвищення тестового тиску без перевищення заданої точки.

Таблиця 4.3

Технічні характеристики: Діапазони створення та вимірювання надлишкового тиску з відповідними межами допустимої основної похибки

Діапазони створення/вимірювання надлишкового тиску	Межа допустимої основної похибки вимірювання
-40...40 кПа	0...160 кПа
-60...60 кПа	0...250 кПа
-100...100 кПа	0...400 кПа
-0,1...0,3 МПа	0...0,6 МПа
-0,1...0,5 МПа	0...1 МПа
-0,1...0,9 МПа	0...1,6 МПа
0...40 кПа	0...2,5 МПа
0...60 кПа	0...4,0 МПа
0...100 кПа	0...6,0 (7,0) МПа

Примітка:

- Опція барометричного сенсора дозволяє вимірювати та контролювати абсолютний тиск. Діапазон абсолютного тиску розраховується як сума діапазону надлишкового тиску та 0,1 МПа (наприклад, для діапазону 0...60 кПа надлишкового тиску діапазон абсолютного тиску становить 0...160 кПа).

- Опція барометричного сенсора також забезпечує можливість контролю від'ємного надлишкового тиску в діапазоні від -100 кПа (для діапазонів із ВПВ 100 кПа і вище) або з нижньою від'ємною межею, що дорівнює ВПВ для діапазонів із ВПВ 100 кПа і нижче (наприклад, -60...60 кПа).

Додаткові відомості:

- Пам'ять та інтерфейси: Вбудована пам'ять для зберігання результатів вимірювань, інтерфейси RS232 та Ethernet для підключення до ПК і роботи з програмним забезпеченням EasyCal.

- Одиниці вимірювання: Па, кПа, бар, МПа, кгс/см², кгс/м², мм рт. ст., psi тощо, а також одиниця, визначена користувачем.

- Живлення: Мережеве, 220 В/50 Гц.

- Діапазон робочих температур: 0...50 °С.
- Габаритні розміри: 259×350×148 мм.
- Робоче середовище: Сухий, некорозійний газ (рекомендується азот).
- Штуцер: 6 мм Swagelok.
- Маса: Приблизно 7,1 кг.
- Сертифікація: Контролери CPC-3000 пройшли випробування для затвердження типу в Державному реєстрі засобів вимірювань (сертифікат у процесі оформлення, перевірка вже проводиться).

5.6 Вибір інтерфейсів зв'язку

FT232R(AM) (рисунок 22) це мікросхема — асинхронний однокристальний двонаправлений перетворювач USB — інтерфейс послідовний (RS232, RS422, RS485). FT232R включає в себе стабілізатор напруги, USB приймач-передавач, UART контролер та буфери, частотний помножувач, а також інші функціональні вузли, які роблять її готовим рішенням для швидкої та недорогої модернізації системи з COM портом для роботи з USB інтерфейсом.

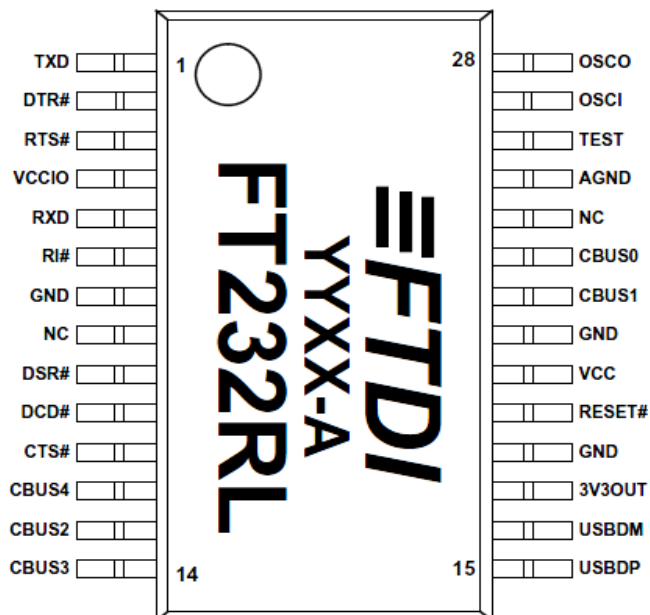


Рис. 5.9 – Цоколівка мікросхеми FT232R

FT232R є сумісним зі специфікаціями USB 1.1 та USB 3.0

Характеристики та особливості мікросхеми FT232R:

- одночіповий перехідник з USB в асинхронний послідовний інтерфейс передачі даних (UART);
- протокол USB повністю реалізований в мікросхемі; інтерфейс UART підтримує режими передачі 7 і 8 біт даних, 1 і 2 стопових біти, різні режими контролю парності;
- підтримка керування потоком даних програмного X-On / X-Off та апаратного;
- швидкості передачі від 300 бод до 3 мегабод для RS422 / RS485 / TTL та від 300 бод до 1 мегабод для RS-232;
- безкоштовні VCP (віртуальний COM-порт) та D2XX (DLL) драйвери для розробників;

5.7 Проектування принципової схеми пристрою

Детальний опис використаних елементів буде надано в наступних розділах. Для живлення мікроконтролера використовується напруга +5В.[15]

Вбудовані в мікроконтролер ПЗП зручні ще тим, що у разі необхідності можна заборонити читання записаної в них програми. Внутрішнє ОЗП мікроконтролера має ємність не менше 128 байт.

Між виводами "XTAL1" і "XTAL2" підключається кварцовий резонатор. Частота кварцу обрана 11 МГц, оскільки висока робоча частота необхідна для того, щоб УП встигав виконувати всі необхідні дії з підтримки обміну даними. У цьому випадку забезпечується обмін даними з мінімумом помилок. Відомо з практики, що при використанні кварцового резонатора такого номіналу, значення конденсаторів C1 і C2 слід вибирати в межах 15-30пФ. Виходячи з цього вибираємо C1=C2=27пФ. На вхід "ЕМА" УП слід подати напругу живлення, що вкаже мікроконтролеру на необхідність роботи з внутрішньою пам'яттю програм.

На рисунку 23 представлена типова схема підключення мікросхеми FT232R до порту USB. Як можна бачити з цього рисунку, при такому

підключенні мікросхема отримує живлення по шині USB. При живленні від USB струм споживання не повинен перевищувати 100 мА на один пристрій.

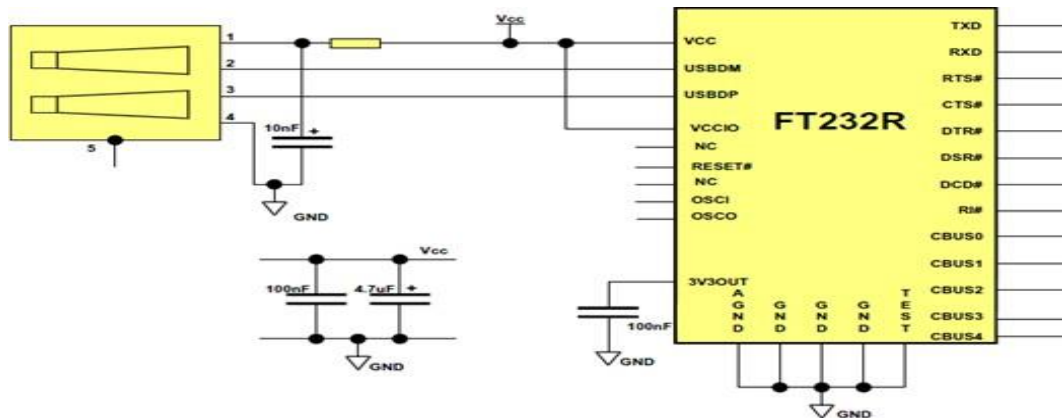


Рис. 5.10 – Підключення мікросхеми FT232R до порту USB

При підключенні до хосту кількох пристроїв на базі FT232R кожному з них призначається свій віртуальний COM порт, а серійні номери, VID і PID USB, рядки з коротким описом пристрою повинні бути попередньо запрограмовані в ЕСПЗП. Програмування пам'яті здійснюється безпосередньо в схемі по USB інтерфейсу за допомогою спеціальної утиліти, яку можна завантажити з сайту виробника.

Вибір елементів принципової схеми

Для зручності розрахунку доцільно розбити схему на три частини: вимірювальна, приймально-передавальна та мережевий блок живлення.

Розрахунок вимірювальної частини. АЦП вимірює сигнал в діапазоні від 0 до V_{ref} , де V_{ref} – опорна напруга АЦП. Виберемо в якості джерела V_{ref} напругу живлення мікроконтролера.

Розрахунок приймально-передавальної частини.

Опір портів мікроконтролера, сконфігурованих як вхід, становить 100 МОм[6]. Вхідний опір мікросхеми FT232 становить 5 МОм[8]. Тому ними можна знехтувати в розрахунках, вважаючи їх нескінченно великими.

Для захисту вихідних ліній контролера використовуємо струмообмежувальні резистори. З [9] граничний струм виводу контролера дорівнює 10 мА

$$I = 10 \text{ мА}$$

$$R_4 = \frac{U_{\text{num}}}{I} = \frac{5}{10 \times 10^{-3}} = 500\Omega (560\Omega \text{ E24})$$

Нормуючий підсилювач виконаємо на операційному підсилювачі К140УД7, який має наступні параметри[15]:

- диференціальний коефіцієнт підсилення

$$K_{\phi} = 50 \times 10^{-3}$$

- питомий температурний дрейф напруги зміщення дорівнює 6мкВ/°С;
- температурний дрейф різниці вхідних струмів дорівнює 0,4 нА/°С;
- номінальна напруга живлення $E_n = 15\text{В}$.

$$U_{\text{вих.оу.ос}} = U_{\text{вх. } \phi} = 0,08\text{В}$$

$$\Delta T = 40^\circ\text{С}$$

Визначимо номінал резистора: (3.15)

$$R_{27,28} = \frac{U_{\text{num}} - U_{\text{nad}}}{I_{\text{д}}} = \frac{5 - 1.1}{10 \times 10^{-3}} = 640 - 125 = 515\Omega (515\Omega, \text{ряд E24})$$

Номінал резистора R1 дорівнює $R_2 = R_4$.

Розрахуємо необхідну потужність для блоку живлення:

поживання мікроконтролера при частоті роботи 12 МГц становить 9 мА. Отже, споживана потужність PDS1 дорівнює:

$$P_{\text{DS1}} = I_{\text{DS1}} \cdot U_{\text{num}} = 9 \times 10^{-3} \cdot 5 = 45\text{мВт}$$

поживання датчиків становить не більше 0,6 Вт, відповідно загальне споживання не перевищить 2,4 Вт.

поживання індикатора становить 120 мА:

$$P_{\text{HG1}} = I_{\text{HG1}} \cdot U_{\text{num}} = 120 \times 10^{-3} \cdot 5 = 600\text{мВт}$$

$$P_{\text{R1}} = \frac{(U_{\text{num}})^2}{R_1} = \frac{5^2}{10 \times 10^3} = 0.5\text{мВт}$$

поживання інших елементів оцінимо із запасом в 10мА

умарна споживана потужність $P_{\text{сум}}$ дорівнює:

$$P_{\text{сум}1} = P_{\text{DS1}} + P_{\text{DA1}} + P_{\text{HG1}} + P_{\text{QM}} + P_{\text{DT}} = 600 + 120 + 10 + 2400 = 3130 \text{ мВт}$$

умарна споживана потужність $P_{\text{сум}}$ визначається в цьому випадку споживанням датчиків і не перевищить 3,2 Вт

аксимальний вихідний струм стабілізатора

$$I_{\text{DA5}} = \frac{P_{\text{сум}}}{U_{\text{num}}} = \frac{3.2}{5} = 0.64 \text{ А}$$

Розрахунок джерела живлення. Розрахуємо джерело живлення з паралельною стабілізацією напруги. Напруга вторинної обмотки трансформатора дорівнює 8В (діюче значення). Напруга стабілізації стабілітрона – VD9 = 7,5 В.

Напруга на конденсаторі C5 складе:

$$U_{\text{cs}} = (8 - U_{\text{most}}) \cdot \sqrt{2} = 9.52 \text{ В}$$

(3.19) де $U_{\text{міст}}$ – падіння напруги на діодному мосту.

Встановимо максимальну величину пульсацій вихідної напруги $\Delta U = 150$ мВ.

Визначимо максимальний струм дільника

$$I_{\text{max}} = P_{\text{сум}} / U_{\text{num}2} = 3.2 / 7.5 = 0.31 \quad (3.20)$$

Розрахуємо ємність конденсатора

$$C_1 \cdot \frac{1_{\text{max}} T / 2}{\Delta U} = \frac{0.3 \times 10^{-2}}{150 \times 10^{-3}} = 1773 \times 10^{-6} \text{ Ф} (2200 \text{ мкФ})$$

Визначимо загальну потужність, споживану блоком управління (лінія 5В)

Максимальний вихідний струм стабілізатора

$$I_{\text{DA2}} = \frac{P_{\text{сум}}}{U_{\text{num}}} = \frac{730}{5} = 144,2 \text{ мА}$$

Можна зробити висновок, що обраний стабілізатор напруги LM7805 задовольняє даній навантажувальній здатності.

5.8 Розробка програми

Вибір середовища для розробки та мови програмування

Програма для роботи мікроконтролера написана мовою Assembler для 8-бітних RISC-мікроконтролерів сімейства AVR компанії Atmel (тепер частина Microchip Technology).

Розробка та налагодження програми для пристрою здійснювалися в інтегрованому середовищі розробки AVR Studio, яке забезпечує зручний інструментарій для програмування, симуляції та відлагодження коду для AVR-мікроконтролерів.

Розробка алгоритму роботи

На рис.4.11 представлена блок-схема алгоритму функціонування мікроконтролера в пристрої вимірювання тиску.

У блок-схемі використано такі умовні позначення:

- N – лічильник вибірок, змінна, яка зберігає поточну кількість виконаних вибірок струму та напруги;
- K – лічильник часу, змінна, що відображає інтервал часу між моментами збереження вимірених даних у EEPROM із кроком 5,12 секунди.

Опис роботи алгоритму: Після подачі живлення мікроконтролер виконує ініціалізацію портів введення-виведення, переводячи їх у високоімпедансний стан, налаштовує та запускає таймер. Таймер відлічує час між вибірками. У разі переповнення таймера генерується запит на переривання, що активує підпрограму керування АЦП.

Після ініціалізації таймера мікроконтролер налаштовує АЦП і обнуляє змінні K і N, і не перевищить значення N - 4096, що відповідає 256 періодам із 16 вибірками в кожному. Після цього виконується визначення рівня тиску, послідовні обчислення та виведення результату на дисплей.

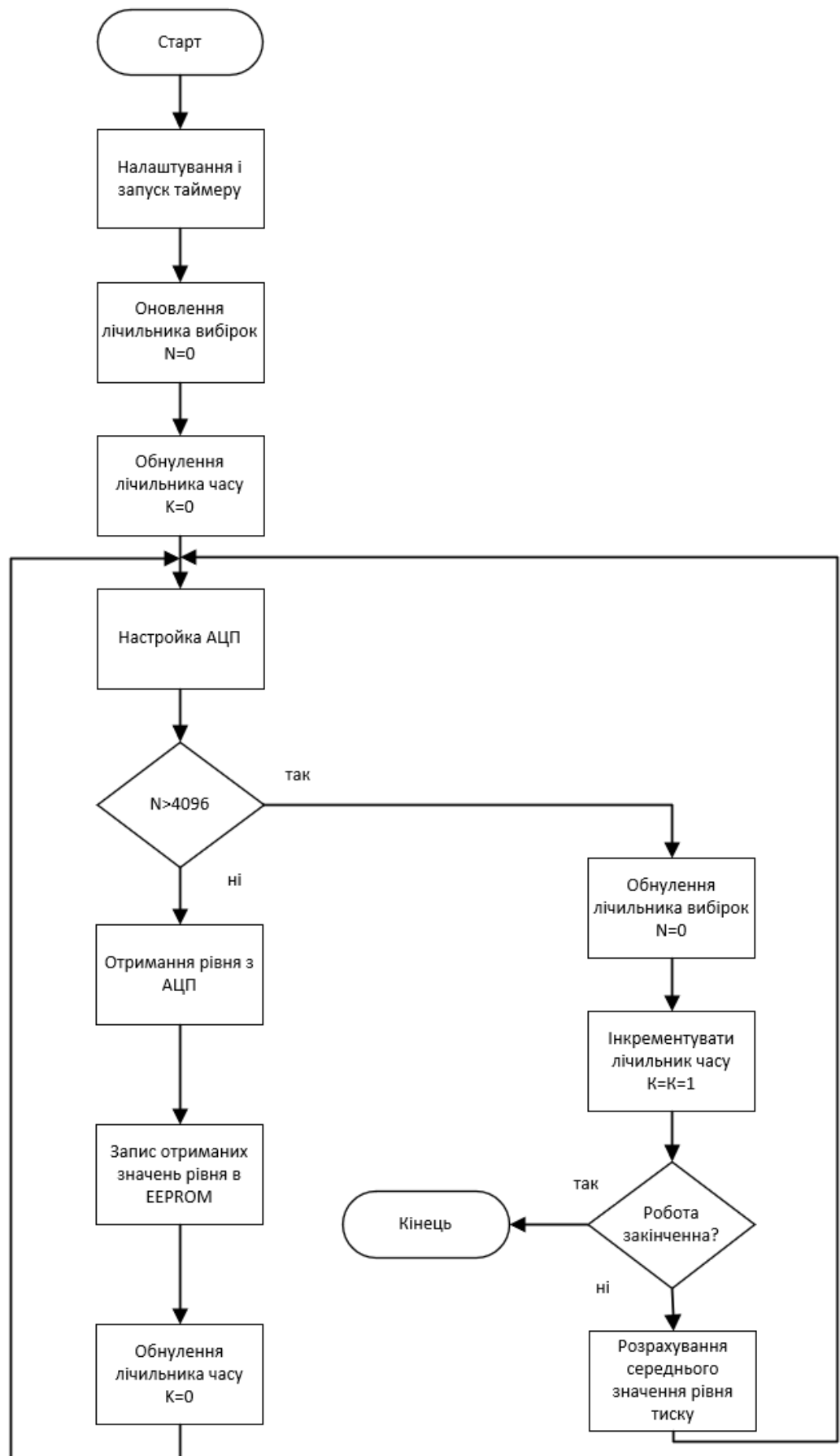


Рис.5.11 Блок-схема роботи системи.

Підпрограма таймера

На Рис.5.12 представлена блок-схема підпрограми обробки переривань від таймера. Ця підпрограма активується при переповненні таймера і забезпечує своєчасне виконання вибірок даних із АЦП, що дозволяє підтримувати необхідну частоту вимірювань.



Рис.5.12 Блок-схема підпрограми таймера.

Підпрограма прийому даних

На Рис.5.13 представлена блок-схема підпрограми обробки переривань від UART (приймання даних). Ця підпрограма відповідає за прийом вхідних даних через UART-інтерфейс, їх обробку та збереження для подальшого використання в основному алгоритмі.

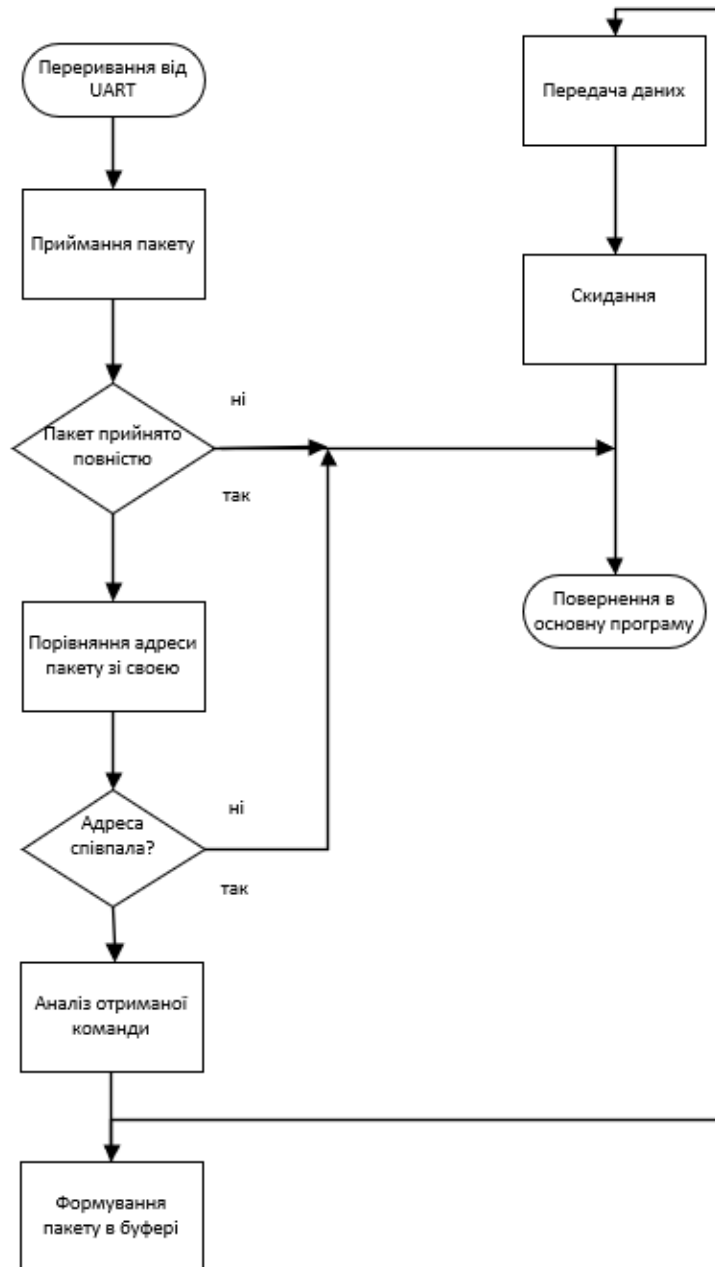


Рис.5.13 Блок-схема підпрограми прийому даних.

6. РОЗРАХУНОК ПОКАЗНИКІВ НАДІЙНОСТІ

Надійність вимірювального комплексу є критичним показником, особливо з огляду на складність сучасних систем, що містять десятки електронних елементів. Збої в роботі навіть одного компонента можуть порушити функціонування всього приладу, тому оцінка надійності — важливий етап при проектуванні.

Під надійністю розуміється здатність пристрою зберігати працездатність упродовж заданого періоду експлуатації. Основними її складовими є:

- Довговічність — робота без серйозних пошкоджень;
- Ремонтопридатність — можливість обслуговування;
- Зберіганість — здатність до збереження характеристик у періоди бездіяльності.

Найчастіше аналіз зосереджений на безвідмовності — здатності функціонувати без збоїв протягом визначеного часу. Вона оцінюється через такі показники:

- Імовірність безвідмовної роботи (P);
- Інтенсивність відмов (λ) — кількість збоїв на годину;
- Середній наробіток до відмови ($T_{\text{ср}}$).

Види відмов бувають:

- раптові — несподівані збої;
- поступові — повільне погіршення параметрів.

Для наближеної оцінки використовуються статистичні й емпіричні методи. Розрахунок може виконуватись за формулами, у яких враховується кількість елементів, інтенсивність відмов та вплив навантаження й температури. Припускається, що елементи працюють незалежно, без резервування, з однаковою ймовірністю відмов.

Отримані показники дозволяють зробити висновки про ресурс роботи системи, виявити критичні компоненти та прийняти рішення щодо резервування або заміни.

На основі цих припущень ймовірність безвідмовної роботи складної нерезервованої системи визначається за формулою:

$$P_C = \prod_{i=1}^N P_i(t) = e^{-\sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda_i \cdot t}$$

t — час роботи, год;

N — кількість груп елементів;

n_i — кількість елементів у групі;

λ_i — інтенсивність відмов групи елементів, год⁻¹

Інтенсивність відмов системи розраховується за формулою:

$$\lambda_C = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda_i$$

Середній час наробітку до відмови визначається як:

$$T_{CP} = \frac{1}{\lambda_C} \text{ (год)}$$

Отже, ймовірність безвідмовної роботи системи розраховується за формулою:

$$P_C = e^{-\frac{t}{T_{CP}}}$$

Для обчислення інтенсивності відмов групи елементів необхідно знати склад груп і середньостатистичне значення інтенсивності відмов елементів групи в заданих умовах експлуатації:

$$\lambda_i = \lambda_{0i} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot K_4 \cdot \alpha_i(t_k, K_H)$$

де:

λ_{0i} номінальна інтенсивність відмов елементів групи, год⁻¹

K_1, K_2 — коригувальні коефіцієнти впливу механічних факторів;

K_3 — коригувальний коефіцієнт впливу вологості;

$\alpha(t_k, K_H)$ — коригувальний коефіцієнт залежно від температури поверхні компонента (t_k) і коефіцієнта електричного навантаження (K_H).

Система працюватиме в лабораторних умовах, тому коефіцієнти K_1, K_2, K_3 приймаються рівними 1. Таким чином, інтенсивність відмов системи становить:

$$\lambda_c = \sum_{i=1}^N n_i \cdot \lambda_{oi} \cdot \alpha_i(t_k, K_H)$$

Коефіцієнт розраховується K_{Hi} за такими формулами:

Для резисторів:

$$K_H = \frac{p_p}{p_H}$$

Для конденсаторів:

$$K_H = \frac{U_p}{U_H}$$

Для транзисторів:

$$K_H = \frac{P_k}{P_{k\text{доп}}}$$

Для напівпровідникових діодів:

$$K_H = \frac{U_0}{U_{0\text{доп}}}$$

Для аналогових і цифрових мікросхем, що працюють у номінальному режимі, приймаємо $K_H=1$.

Коригувальні коефіцієнти $\alpha(t_k, K_n)$ визначаються за графіками. Температуру компонентів приймаємо рівною 35 °С. Результати розрахунків інтенсивностей відмов елементів наведено в таблиці 3.

Таблиця 6.2

Технічні характеристики: інтенсивностей відмов елементів

Елемент	Позначення	Кількість елементів	K_n	Середня інтенсивність відмов λ_p (10^{-6} 1/год)	Інтенсивність відмов з урахуванням зовнішніх умов λ' (10^{-6} 1/год)	$\alpha(t_i, K_n)$	Інтенсивність відмов у робочому режимі λ_i (10^{-6} 1/год)
Конденсатори	$C_1 - C_{13}$	13	0,3	0,2	0,15	0,31	0,31
Мікросхеми	DD_1	7	1	0,01	0,01	0,01	0,07
	$DA_1 - DA_6$	—	1	0,01	0,01	0,01	—
Кварцовий резонатор	ZQ_1	1	1	0,05	0,05	0,05	0,05
Резистори	$R_1 - R_{16}$	16	0,5	0,05	0,03	0,03	0,09
Діоди	$VD_1 - VD_9$	9	0,1	0,05	0,04	0,045	0,45
Паяні з'єднання	—	160	1	0,01	0,01125	—	—
Індикатори	$HL_1 - HL_4$	4	1	0,25	0,25	0,01	0,25

Сума інтенсивностей відмов елементів у робочому режимі за таблицею становить

$$\lambda_c = 1,22 \times 10^{-6} \text{ год}^{-1}$$

Інтенсивність відмов елементів системи в цілому:

$$\lambda_c = 10.27 \times 10^{-6} \text{год}^{-1}$$

Розрахуємо середній час наробітку до відмови:

$$T_{cp} = \frac{1}{\lambda_c} = \frac{1}{10.27 \times 10^{-6}} \approx 97323 \text{год}$$

Отже, ймовірність безвідмовної роботи системи протягом 1000 годин становить:

$$P_c = e^{-\frac{1000}{97323}} \approx 0.999$$

7. РОЗРАХУНОК ПОХИБОК ВИМІРЮВАННЯ

При раціонально спланованій методиці вимірювань та ретельному виконанні операцій результат вимірювань відхиляється від істинного значення вимірюваної величини. Це відхилення називається похибкою.

Величина похибки є ключовим показником точності, яка слугує основною оцінкою якості роботи вимірювальної системи. Аналіз похибок розроблюваної вимірювальної системи можна проводити за допомогою структурної схеми, що дозволяє визначити внесок кожного перетворювального блоку в загальну похибку.

Похибки класифікуються за причинами та умовами їх виникнення на основні та додаткові. Основна похибка зумовлена неідеальністю характеристик вимірювальної системи та відображає відхилення фактичної функції перетворення від номінальної в нормальних умовах. Додаткова похибка виникає через відхилення умов експлуатації від стандартних значень.

Основна похибка включає адитивну та мультипликативну складові. Мультипликативна похибка пов'язана зі зміною коефіцієнтів перетворення системи. При незначних змінах можна ігнорувати члени другого та вищих порядків малості, тоді відносна зміна коефіцієнта перетворення вимірювача дорівнює відносній мультипликативній похибці:

$$\gamma_{\text{МП}}^2 = \left(\frac{\Delta K}{K}\right)^2 = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\Delta K_i}{K_i}\right)^2 = \left(\frac{\Delta K_{\text{ПИП}}}{K_{\text{ПИП}}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_y}{K_y}\right)^2 + \left(\frac{\Delta K_{\text{АЦП}}}{K_{\text{АЦП}}}\right)^2$$

$$\gamma_{\text{М/І}} = \sqrt{\sum_{i=1}^H \gamma_i^2} = \sqrt{\gamma_{\text{ПИП}}^2 + \gamma_y^2 + \gamma_{\text{АЦП}}^2}$$

де:

ΔK - абсолютна похибка коефіцієнта перетворення вимірювача;

γ_i - похибка джерела опорної напруги

ΔK_i - абсолютна похибка коефіцієнта перетворення i -го блоку;

відносна похибка коефіцієнта перетворення i -го блоку.

Отже, для визначення загальної похибки вимірювального приладу необхідно обчислити відносні похибки кожного блоку.

Похибка первинного вимірювального перетворювача

Похибка первинного вимірювального перетворювача визначається похибкою датчика, яка становить 0,25%.

$$K_{\text{ацп}} = \frac{N}{U_{BX_{\text{ацп}}}} = \frac{N_{\text{MAX}}}{U_0}$$

де U_0 — напруга джерела опорного напруження

Похибка АЦП

Коефіцієнт перетворення аналого-цифрового перетворювача (АЦП) послідовного наближення розраховується за формулою:

$$\frac{\Delta K_{\text{АЦП}}}{K_{\text{АЦП}}} = \frac{\Delta N_{\text{max}}}{N_{\text{max}}} + \frac{\Delta U_0}{U_0} \Rightarrow \gamma_{\text{АЦП}} = \sqrt{\gamma_{\delta}^2 + \gamma_{U_0}^2}$$

де:

γ_{δ} похибка дискретизації;

γ

похибка джерела АЦП пов'язана з напругою дискретизації, яка залежить від рівня квантування:

$$\gamma_{\text{АЦП}} = \gamma_{\delta} = \frac{1}{N_{\text{max}}} \Rightarrow \gamma_{\text{АЦП}} = \frac{1}{1024} \cdot 100\% = 0.0977\%$$

Загальна мультипликативна похибка

Отже, відносна мультипликативна похибка вимірювального приладу становить:

$$\gamma_{МП} = \sqrt{0.0707^2 + 0.25^2 + 0.0977^2} = 0.496\%$$

Адитивна похибка

Адитивна похибка, яка виникає через накладання перешкод на корисний сигнал, обумовлена дрейфом "нуля" операційних підсилювачів та АЦП. Результируюча адитивна похибка, приведена до входу, розраховується як:

$$\gamma_A = \frac{\delta Y_y}{X \cdot K_y} + \frac{\delta Y_{АЦП}}{X \cdot K_y \cdot K_{АЦП}}$$

$$\delta_{Yy} = 6 \text{ mV} = 0,006\text{В}$$

$$\delta U_{АЦП} = 6 \text{ mV} = 0,006\text{В}$$

$$K_y = 1;$$

$$K_{АЦП} = 100$$

$$X = 6\text{В}$$

$$\gamma = \frac{0.006}{6 \cdot 1} + \frac{0.006}{6 \cdot 1 \cdot 100} = 0.001 + 0.00001 = 0.00101$$

8.КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНА ЧАСТИНА

8.1 Розробка конструкції

Розроблений комплекс призначений для повірки датчиків тиску. Цей пристрій відповідає конструкторсько-технологічним, експлуатаційним, надійнісним і економічним вимогам, оптимальне поєднання яких забезпечує ключові характеристики обладнання: надійність, точність показань і допустимі умови використання.

У додатку Б наведено загальний ескіз конструкції. Корпус приладу має розміри $90 \times 100 \times 30$ мм. На передній панелі розташовані вимикач живлення та роз'єм USB. На бічній панелі розміщено три роз'єми для підключення датчиків тиску та один роз'єм для підключення задатчика тиску. Усередині корпусу встановлена друкована плата.

У додатку В подано ескіз оригінальної деталі — бічної панелі. Товщина її стінки становить 2 мм.

8.2 Розробка друкованої плати (ДП)

Проектування друкованої плати є критичним етапом створення вимірювального пристрою. Основна мета — забезпечити компактне, надійне й ефективне електричне з'єднання елементів у межах заданих габаритів, з урахуванням механічних і теплових навантажень.

Основні вимоги до ДП:

- Відсутність дефектів: здуття, тріщин, відшарувань.
- Висока механічна міцність та ізоляційна стійкість.
- Друковані провідники повинні бути рівними, без пошкоджень, із захисним покриттям.
- Товщина плати — у межах від 0,2 до 6,4 мм; обрана товщина — відповідно до ДСТУ ГОСТ 6357:2023 .

- Елементи мають витримувати кілька перепайок (до 5 разів для навісних, 3 — для мікросхем).

Розміри плати 80×75 мм відповідають ДСТУ EN 61188-1:2018, клас точності — 3-й (середня щільність монтажу). Усі монтажні отвори мають контактні майданчики; для першого виводу — квадратної форми.

Основні етапи проєктування:

- Вибір матеріалу (склотекстоліт СФ2-35Г).
- Визначення габаритів і типу плати.
- Розміщення елементів і трасування з урахуванням електричних зв'язків.
- Забезпечення можливості ремонту й заміни елементів.
- Підготовка виробничої документації.

Проєкт виконано в середовищі Р-CAD 2006, з дотриманням вимог ДСТУ EN 61082-1:2015. Всі з'єднання виконуються пайкою, що гарантує надійність у роботі.

9 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ

У процесі розробки й експлуатації програмно-технічного комплексу для повірки датчиків тиску особливе значення має дотримання вимог нормативних документів з охорони праці, техногенної безпеки та ергономіки. Основною метою є створення безпечного та комфортного середовища праці відповідно до положень Закону України "Про охорону праці", ДСН 3.3.6.042-99, ДСТУ 2293-99, ДСТУ 12.0.003-2015, ДСТУ 12.1.004-91 та інших профільних нормативів.

Робота оператора або повірника проводиться у лабораторних умовах із підвищеними вимогами до електробезпеки, мікроклімату та захисту від шкідливих виробничих факторів. Згідно з ДСН 3.3.6.042-99, до основних шкідливих чинників належать: електромагнітне випромінювання від комп'ютерної техніки, статична електрика, підвищена яскравість монітора, шумове навантаження від лабораторного обладнання, а також несприятливі мікрокліматичні умови.

Температурний режим і вологість регламентуються ДСН 3.3.6.042-99: у приміщеннях з ПК температура повітря має бути в межах 22–24 °С взимку, 23–25 °С влітку, відносна вологість — 40–60%, швидкість руху повітря — до 0,2 м/с. Для забезпечення нормативної освітленості, відповідно до ДБН В.2.5-28:2018 та ДСТУ EN 12464-1:2017, рівень освітленості на робочій поверхні повинен становити 300–500 лк, при цьому рекомендується використовувати люмінесцентні або LED-світильники з температурою світла 4000–5000 К.

Згідно з ДСТУ 12.2.032-78, екран монітора має розташовуватись на відстані не менше 65–70 см від очей користувача, а оптимальний кут огляду складає 15–20°. Робоче місце повинно бути обладнане відповідно до ДСТУ ISO 9241-5:2007, що регламентує вимоги до ергономіки: регульоване крісло, підставка під ноги, стіл висотою 700–750 мм.

У конструкції комплексу передбачені заходи для попередження електротравматизму згідно з ДСТУ 12.1.019-2009: захисне заземлення, запобіжники, наявність індикації живлення та вимикачів з розривом фази. Для

пристроїв, що працюють під тиском, дотримуються норми "Правил експлуатації посудин, що працюють під тиском". Заборонено перевищувати тиск, зазначений у технічній документації. Демонтаж елементів дозволяється лише після стравлювання залишкового тиску до рівня ≤ 50 кПа.

Робота за ПК віднесена до легкої праці категорії 1а (відповідно до ДСН 3.3.6.042-99). Тривалість безперервної роботи за комп'ютером без перерв не повинна перевищувати 1 години. Після цього обов'язкова регламентована перерва 10–15 хвилин згідно з Наказом МОЗ №59 від 14.01.1997 р..

У разі виникнення надзвичайної ситуації (пожежа, коротке замикання, витік повітря під тиском), необхідно діяти згідно з ДСТУ 12.4.026-2001 і ДСТУ 3860-2003 — передбачити наявність вогнегасника (тип ВП-5 або ВВК-2), плану евакуації та інструкції з пожежної безпеки.

Додатково враховано екологічні вимоги відповідно до ДСТУ ISO 14001:2015 — мінімізація електроспоживання, безпечна утилізація електронних компонентів і батарей, уникнення токсичних матеріалів.

Таким чином, дотримання зазначених нормативів і стандартів дозволяє забезпечити безпечні умови праці, підвищити ефективність виконання метрологічних робіт та запобігти виникненню аварійних ситуацій під час експлуатації комплексу.

ВИСНОВОК

У рамках цієї випускної кваліфікаційної роботи було проведено детальний аналіз літературних джерел та нормативно-технічної документації, що стосуються питань повірки та калібрування засобів вимірювання. У процесі аналізу було вивчено об'єкт вимірювання, досліджено сучасні автоматизовані системи для повірки та калібрування, а також визначено їхні ключові особливості та недоліки.

На основі отриманих даних було розроблено структурну та принципову схеми інформаційно-вимірювального комплексу, призначеного для точного контролю технологічних параметрів. Проведено вибір і розрахунок елементів схеми, а також створено конструкцію друкованої плати для реалізації комплексу.

У результаті було створено автоматизований інформаційно-вимірювальний комплекс, який забезпечує високу точність вимірювань, передачу даних для подальшого аналізу та зберігання, а також відповідає сучасним вимогам до надійності, безпеки та ергономіки. Розроблений комплекс може бути ефективно застосований у лабораторних умовах для забезпечення якісного контролю технологічних процесів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. KP61 Series Pressure Display Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pressure-sensors.eu/wp-content/uploads/2018/06/Pressuren-display-KP61-English-P-1.pdf>
2. KP43 Series Pressure Sensor Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://pressure-sensors.eu/wp-content/uploads/2018/03/Pressure-sensor-KP43-English-P.pdf>
3. WIKA CPT6400 Reference Pressure Sensor Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://docs.rs-online.com/d403/A700000009881140.pdf>
4. Precision Hand-Held Pressure Indicator CPH6400 Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://calright.com/wp-content/uploads/2018/03/16262.pdf>
5. AT89C51 8-Bit Microcontroller Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.keil.com/dd/docs/datashts/atmel/at89c51_ds.pdf
6. MCP3204 12-Bit ADC Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/Product Documents/DataSheets/21298e.pdf>
7. Fluke 7100 Series Calibration System User Guide [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://assets.tequipment.net/assets/1/26/Documents/7100.pdf>
8. Additel 762 Automated Hydraulic Pressure Calibrator Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.additel.com/download/datasheet/762_automated_hydraulic_pressure_calibrator.pdf
9. WIKA CPC8000 High-End Pressure Controller Datasheet [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.wika.ca/upload/DS_CT2801_en_um_28901.pdf

10. Beamex MC6 Multifunction Calibrator Brochure [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.beamex.com/app/uploads/2024/06/mc6-brochure.pdf>
11. ДСТУ OIML D 20:2008 «Метрологія. Первинна та періодична повірка...» [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=77182 (дата звернення: 05.06.2025)
12. ДСТУ-Н РМГ 51:2006 «Метрологія. Документи до методик повірки...» [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=53608 (дата звернення: 06.06.2025)
13. ДСТУ OIML D 27:2008 «Метрологія. Повірка засобів вимірювальної техніки...» [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=69286 (дата звернення: 07.06.2025)
14. ISO 9001:2015 Quality Management Systems — Requirements [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/62085.html> (дата звернення: 10.06.2025)
15. International Vocabulary of Metrology (VIM). 3rd Ed., JCGM 200:2012 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_200_2012.pdf (дата звернення: 12.06.2025)
16. ISO/IEC Guide 98-3:2008 (GUM) Uncertainty of Measurement — Part 3 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://www.bipm.org/documents/20126/2071204/JCGM_100_2008_E.pdf (дата звернення: 14.06.2025)
17. Thompson M. Pressure Sensors: Design and Application. Oxford: Butterworth-Heinemann, 1997. – 280 p.
18. Fraden J. Handbook of Modern Sensors. 5-th Ed. Springer, 2020. – 663 p.

19. Morris A. S., Langari R. Measurement and Instrumentation: Theory and Application. 2-nd Ed. Academic Press, 2016. – 704 p.
20. Kutz M. (ed.) Handbook of Measurement in Science and Engineering. Vol. 1. Wiley, 2012. – 1000 p.
21. Zyglar A. Calibration: A Technician's Guide. ISA, 2021. – 320 p.
22. Beamex. Calibration Essentials: Pressure (eBook) [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://blog.beamex.com/pressure-calibration-ebook>
23. O'Connor P., Newton H. Practical Reliability Engineering. 6-th Ed. Wiley, 2020. – 528 p.
24. Ristić L. (ed.) Sensor Technology and Devices. Springer, 2022. – 450 p.
25. Danfoss. KP Thermostats and Pressure Switches Catalogue [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://store.danfoss.com/en/p/060L110066>
26. Kita Sensors. KP43 Digital Pressure Switch Specification [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://en.kita.com.tw/products_detail/152.htm
27. Microchip Technology. Technical Brief TB3346 – Using ADCC Modes of PIC16F17/18146 MCUs [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/MCU08/ApplicationNotes/TB3346-ADCC-Modes-PIC16F17-18146-MCUs-in-Apps-DS90003346.pdf>
28. Beamex. User Guide for External Pressure Measurement Modules [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.beamex.com/app/uploads/2016/10/User-Guide-for-External-Pressure-Measurement-Modules.pdf>
29. Additel Corporation. ADT762 Product Overview [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://additel.com/product-detail.html/762-hydraulic-pressure-portable-automatic-calibrator>

30. ISO/IEC 17025:2017 General Requirements for the Competence of Testing and Calibration Laboratories [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://www.iso.org/standard/66912.html> (дата звернення: 18.06.2025)

31. МПУ 003/04-2014 Рекомендації. Метрологія. Манометри, вакуумметри, мановакуумметри, напороміри, тягоміри і тягонапороміри показуючі та самописні. Методика повірки.

32. Карпюк В.С., Подчашинський Ю.О., Чепюк Л.О. Розробка інформаційно-вимірювального комплексу для повірки датчиків тиску. Тези Всеукраїнської науково-практичної онлайн-конференції аспірантів, молодих учених та студентів, присвяченої Дню науки, 12–17 травня 2025 року. Житомир : «Житомирська політехніка», 2025. С. 41. URL: <https://conf.ztu.edu.ua/wp-content/uploads/2025/06/2.pdf>