

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття освітнього ступеня

бакалавр

(назва освітнього ступеня)

на тему:

«Проектування мікропроцесорної системи

визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз»

Виконав(ла): студент(ка) IV курсу, групи КА-41

спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-

інтегровані технології та робототехніка»

(шифр і назва спеціальності)

		Нестеровський О.В.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Керівник		Трембач Р.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Нормоконтроль		Козбур В.Р.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Завідувач кафедри		Савків В.Б.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)
Рецензент		Корольок Р.І.
	(підпис)	(прізвище та ініціали)

Тернопіль
2026

Факультет прикладних інформаційних технологій та електроінженерії
(повна назва факультету)
Кафедра автоматизації технологічних процесів і виробництв
(повна назва кафедри)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Савків В.Б.
(підпис) (прізвище та ініціали)
« ____ » _____ 2026р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

на здобуття освітнього ступеня бакалавр
(назва освітнього ступеня)
за спеціальністю 174 «Автоматизація, комп'ютерно- інтегровані технології та робототехніка»
(шифр і назва спеціальності)
студенту Нестеровському Олегу Володимировичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Проектування мікропроцесорної системи визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз»

Керівник роботи к.т.н., доцент Трембач Р.Б.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

Затверджені наказом ректора від «14» травня 2026 року № 4/9-231

2. Термін подання студентом завершеної роботи 15 червня 2026 року

3. Вихідні дані до роботи Технічні дані визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз

4. Зміст роботи (перелік питань, які потрібно розробити)

1) аналітична частина; 2) проектна частина;
3) спеціальна частина; 4) безпека життєдіяльності, основи охорони праці.

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень, слайдів)
Презентація кваліфікаційної роботи 12 аркушів формату А4

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота складається з пояснювальної записки та графічної частини (ілюстративний матеріал – слайди). Об'єм графічної частини кваліфікаційної роботи становить 12 слайдів. Об'єм пояснювальної записки складає 68 друкованих сторінок формату А4 (210×297), об'єм додатків – 7 друкованих сторінок формату А4.

Кваліфікаційна робота складається з чотирьох розділів, в яких нараховується 24 рисунків та 16 таблиць з даними. В роботі використано 17 літературних джерел.

В кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуті питання визначення динамічних характеристик поверхні розділу фаз. На основі широкого аналізу сучасних методів вимірювання розроблені методика і технічні засоби вимірювання тиску поверхневого натягу. Розроблені програмні і технічні засоби збору інформації з об'єкту вимірювання, а також розглянутий алгоритм функціонування роботи мікроконтролера.

ЗМІСТ

	с.
Перелік основних позначень і скорочень	5
Вступ	6
1. Аналітична частина	8
1.1 Аналіз методів контролю поверхневого натягу	8
1.2 Аналіз приладів контролю розділу фаз	18
1.3 Постановка задачі	22
2. Проектна частина	24
2.1 Розробка функціональної структури системи	24
2.2 Розробка принципової електричної схеми	42
2.3 Розробка конструкції вимірювального блоку	46
2.4 Розробка програми функціонування мікроконтролера	48
3. Спеціальна частина	51
3.1 Аналіз видів похибок	51
3.2 Розрахунок основної допустимої похибки системи	53
4. Безпека життєдіяльності, основи охорони праці	59
4.1 Аналіз потенційних небезпек і шкідливостей виробничого середовища	59
4.2 Забезпечення нормальних умов праці	60
4.3 Розрахункова частина	64
Висновки	66
Перелік посилань на джерела	67
Додаток А. Програма функціонування мікроконтролера	69
Додаток Б. Розрахунок залежності поверхневого натягу від тиску в капілярі	73

ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ І СКОРОЧЕНЬ

АЦП – аналого-цифровий перетворювач;

Д – давач;

ЕОМ – електронно-обчислювальна машина;

КД – кроковий двигун;

МК – мікроконтролер;

МП – масштабуючий підсилювач;

Р – регістр;

СККД – схема керування кроковим двигуном;

СР – старший розряд.

ВСТУП

Намагання вдосконалювати технології виробництва приводить до створення безперервних процесів, в яких речовини перероблюються при високих тисках, строго визначених температурах, концентраціях і т.п. Забезпечення цих умов в промислових масштабах потребує вдосконалення вимірювальної техніки і автоматичного регулювання. Без застосування новітніх знань з області техніки вимірювання і регулювання немислимий подальший розвиток промисловості і покращення економічних показників виробництва. Кожне виробництво потребує дотримання певних технологічних умов. В противному випадку виникають втрати, які проявляються в вигляді погіршення якості продукції, збільшення витрати сировини і енергії або зниження потужності. Для керування виробничим процесом часто виявляється недостатнім періодичне вимірювання параметрів процесу [1–4]. Може статися, що в момент вимірювання величина приймає значення, яке ще не загрожує нормальному ходу процесу, але змінюється вона настільки швидко, що вже необхідно прийняти певні міри для попередження її відхилення за допустимі межі. В таких випадках необхідно застосовувати автоматичні контрольно-вимірювальні пристрої, які працюють або безперервно, або з короткими інтервалами часу і автоматично вказують або реєструють значення вимірювальної величини.

Для контролю хімічного складу, особливо в хімічній промисловості, все більше значення отримують так звані аналізатори. Ці автоматично діючі пристрої дозволяють отримувати неперервну інформацію про зміни в ході виробничого процесу, що суттєво полегшує управління виробництвом. В даний час найбільше розроблені аналізатори газів, більш важче виконання аналізаторів рідин. Необхідність розробки даних аналізаторів обумовлена технологічними і екологічними проблемами, які виникають при використанні природних ресурсів в технологічних процесах [5–9]. Контроль шкідливих речовин необхідний при викидах природних ресурсів, які брали участь в технологічних процесах, у воду і

атмосферу. Як відомо екологічна проблема з кожним роком стає все гострішою, адже чиста вода і повітря є основою життя живих організмів.

Розробка вимірювальної системи для визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз, який є складовою частиною системи, що аналізується, для визначення шкідливих речовин в навколишньому середовищі необхідна в основному для хімічних підприємств. Даний пристрій повинен автоматично і швидко збирати і передавати інформацію на обробляючий пристій, також повинен аналізувати виміряні дані і виявляти основні аварійні ситуації і сигналізувати про них [10–14]. Також даний пристій повинен працювати в приміщеннях з шкідливими умовами. Розробка даного пристрою дозволить контролювати вміст шкідливих речовин в приміщеннях (навколишньому середовищі) на багатьох підприємствах.

1 АНАЛІТИЧНА ЧАСТИНА

1.1 Аналіз методів контролю поверхневого натягу

1.1.1 Експериментальні аспекти методів лежачої і висячої краплі

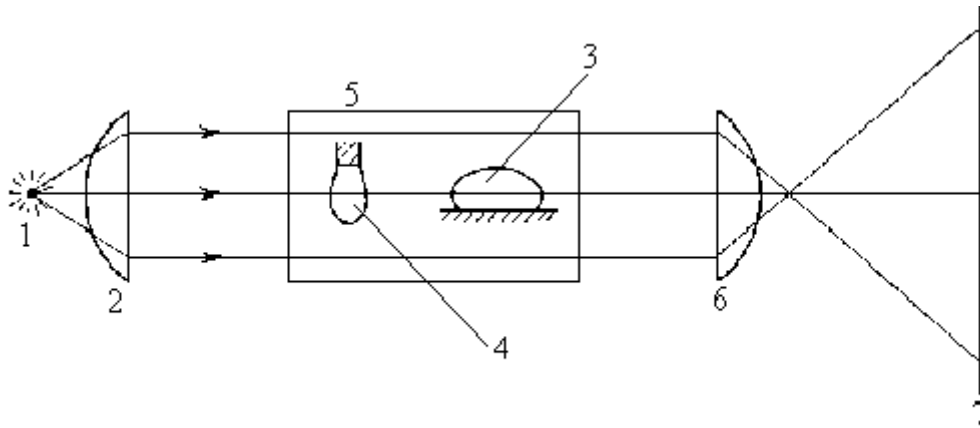
Методи лежачої і висячої краплі в експериментальному відношенні дуже близькі. Хоча вони і відрізняються в способах формування краплі, у головному – забезпеченні умов для одержання гарного зображення краплі і способах виміру координат точок профілю – вони практично не відрізняються. Загальний вид експериментальної установки, що реалізують той чи інший методи, схематично представлений на рисунку 1.1. Головними вузлами її є: джерело світла, колімаційна лінза, комірка з краплею, що знаходиться в ній, комірка оточена газом чи іншою рідиною, лінза, що збільшує зображення краплі, приймач зображення. Як джерело світла використовуються як газорозрядні лампи – ртутні, дугові, так і лампи розжарювання, наприклад звичайні вольфрамові. Як правило, вони забезпечуються фільтрами для одержання монохроматичного світла, а також матовим екраном, що служить для створення рівномірного освітлення й одночасно є тепловим екраном (у якості останнього дуже ефективно може працювати водяний фільтр). У роботі використовувався волоконно-оптичний спосіб підсвічування [15–18]. Істотною умовою одержання зображення краплі, що відповідає меридіональному перетину, є паралельність проходячих променів. Це досягається використанням відповідної колімаційної лінзи. Іноді для цієї мети між джерелами світла і краплею ставиться діафрагма. Комірка, у якій знаходиться крапля, може бути виконана з будь-якого матеріалу, що підходить для досліджуваних систем і умов проведення досліду. Однак невід'ємною частиною комірки повинні бути вікна, виконані з оптичного плоского скла і розташовані перпендикулярно до оптичної осі вимірювальної установки. Як правило, вони виготовляються або з пірексного, або з кварцового скла. Внутрішній обсяг комірки може бути, у принципі, яким завгодно, але звичайно з нижньою границею 1 см^3 . Сталість температури, як правило, забезпечується наявністю в середині термоізолюючої оболонки.

Як було сказано, основне розходження методів лежачої і висячої краплі полягає в способах формування краплі. Висяча крапля утворюється на кінці круглої трубки з добре обробленими краями – це може бути або скляна капілярна трубка, або звичайна гіподермічна голка з нержавіючої сталі. Трубка чи голка, як правило, з'єднані з мікрометричним шприцом для плавного дозування рідини для того, щоб як можна точніше утворити краплю необхідної форми. Лежача крапля може утворитися внаслідок стікання рідини з кінця трубки на тверду поверхню [19–22]. Однак найчастіше лежача крапля утворюється так само, як і висяча крапля – на кінці трубки лише кінчик повернутий вгору. У тих же випадках, коли як об'єкт дослідження виступає бульбашка – втягнута чи витягнута, – розміри трубки вибирається відповідним чином.

Діаметр кінчика трубки зазвичай попередньо вибирається відповідно до необхідної форми краплі (лінія контакту краплі з твердою поверхнею проходить вздовж зовнішнього краю кінця трубки та краю отвору).

Потрібний діаметр кінчика можна, наприклад, оцінити в методі висячої краплі за допомогою графіка рисунок 1.2. При дослідженні систем з наднизьким міжфазним натягом ($\gamma < 10^{-2}$ мН/м), з використанням також висячої краплі з екватором, діаметр кінчика трубки повинний бути порядку 10–20 мкм. Типова комірка для висячої краплі при визначенні міжфазного натягу рідин зображений на рисунку 1.3. Конструкція цієї комірки передбачає можливість переміщення шприца 1 по вертикалі. На початку досліду, після приходу системи в рівновагу, шприц опускається вниз до занурення голки в нижню, важку рідину 4, і в нього всмоктується необхідна кількість рідини. Після цей шприц піднімається на таку висоту, щоб кінець голки знаходився приблизно посередині вікна 2 осередки, і вже в легкій рідині 3 формується крапля рідини 4 [23–25].

Методи лежачої і висячої краплі часто використовуються при одержанні електрокапілярних кривих. Комірка, в якій знаходиться крапля, одночасно є й коміркою електрометра. Приклад такої комірки представлений на рисунку 1.4 (у ній електрокапілярні криві утворювались для поляризованої поверхні нітробензол – вода з однорідним шаром фосфатиділхоліна).



1 – джерело світла; 2 – колімаційна лінза; 3 – лежача крапля; 4 – висяча крапля;
 5 – комірka, в якій знаходиться крапля, яка оточена газом чи іншою рідиною;
 6 – проекційна лінза; 7 – площина відображення.

Рисунок 1.1 – Структурна схема експериментальної обстановки, яка реалізує метод лежачої і висячої краплі

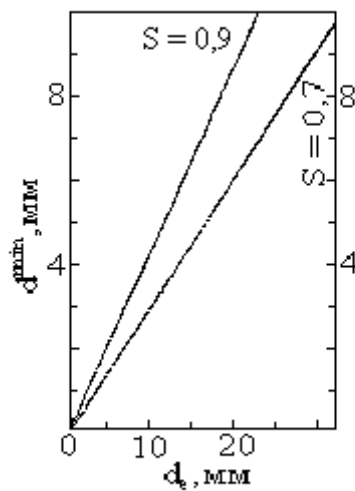
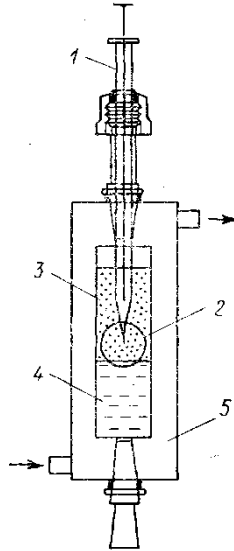


Рисунок 1.2 – Залежність мінімального діаметра кінця трубки d_{min} від екваторіального діаметру краплі d_e



1 – шприц; 2 – вікно; 3 – легка рідина; 4 – важка рідина; 5 – термоізолююча рідина.

Рисунок 1.3 – Схема комірки для визначення міжфазного натягу рідин методом висячої краплі

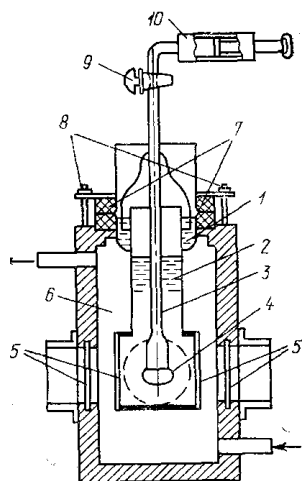
У цьому пристрої трубка 3 з утвореною на її кінці бульбашкою 4 кріпиться ізолювано від корпусу термостата з циркулюючою в ньому водою 6, що дозволяє уникати вібраційних збурювань бульбашки з боку установки. Подібна ізолюваність трубки досягається за рахунок гідравлічного затвора 1 з використанням тієї ж рідини, що і досліджувана 2. Даний затвор охороняє також досліджувану рідину від випаровування і влучення в неї забруднень. Пристрій для формування бульбашки включає шприц 10, з'єднаний із трубкою 3 і краном 9. Одна з головних задач установки для визначення поверхневого натягу методом лежачої чи висячої краплі – одержання чіткого зображення (профілю) краплі з наступним його обмірюванням [26–29].

1.1.2 Методи, які використовують меніски на границі стійкості

Метод максимального тиску в краплі або бульбашці. В основу цього методу покладено формулу Лапласа, по якій легко визначити таку величину як капілярний тиск. Якщо він відомий, то для знаходження поверхневого натягу не потрібно знати всієї форми краплі, а достатньо знати кривизну міжфазної

поверхні в якій-небудь одній точці. Ця ідея реалізована в методі максимального тиску, в якому вимірюється не будь-який, а максимальний тиск при видавлюванні із капіляра краплі або бульбашки. Метод максимального тиску використовується для визначення поверхневого натягу як на границі рідина – газ, так і на границі газ – газ.

Застосування методу максимального тиску на дослідження порівняно повільних процесів адсорбції і поверхневої релаксації (з часом більше 0,1с) не викликає складностей. Однак першої ж спроби перескочити в мілісекундний



1 – гідравлічний затвор; 2 – досліджувана рідина; 3 – трубка; 4 – бульбашка;
5 – вікна; 6 – термоізолююча вода; 7 – ущільнювач; 8 – прижимаючий пристрій;
9 – кран; 10 – шприц.

Рисунок 1.4 – Схема пристрою в методі лежачої краплі з використанням втягнутої бульбашки

діапазон наштотхнулися на серйозні труднощі, зв'язані як з виміром, так і інтерпретацією даних. Справа в тім, що кожному значенню динамічного поверхневого натягу повинний відповідати визначений вік поверхні, знаходження якого і складає основну проблему. Насамперед, мабуть, потрібно вимірювати частоту бульбашок.

Електричний метод, придатний для рідин з слабкою електропровідністю (включаючи і воду), полягає в тому, що в рідину вводяться два електроди, один із яких міститься напроти вихідного отвору капіляра. При зіткненні бульбашки з електродом фіксується різке падіння струму в ланцюзі або зміна напруги на

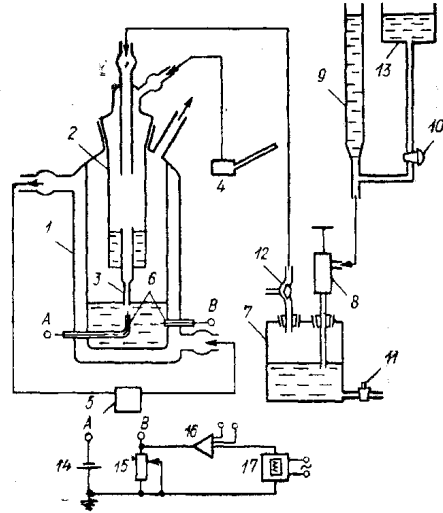
перемінному високоомному опорі. Як приклад на рисунку 1.5 зображена схема установки, що працює на цьому принципі. При напрузі на клеммах А – В 0,1В прилад зафіксував зміну напруги на опорі 15 при формуванні бульбашки у воді з питомою електропровідністю порядку $10^{-4}/\text{Ом}^{-1}\cdot\text{м}^{-1}$. Перетворювач сигналів 16 підсилює лише перемінну (зв'язану з бульбашками) складову цієї зміни напруги. Для реєстрації сигналів використовується швидкодіючий записуючий вольтметр.

Визначений у такий спосіб інтервал часу τ_0 між бульбашками ще не є вік поверхні. Адже нас цікавить тільки час з моменту зародження бульбашки до досягнення максимального тиску (його називають часом життя бульбашки τ) і не цікавить час з моменту досягнення максимального тиску до відриву бульбашки (так названий мертвий час τ_d). Як уже указувалося вище, у момент досягнення максимального тиску чи навіть раніше порушується умова стійкості і бульбашка переходить у стан катастрофічного росту і розвалу. Подібні процеси відбуваються в природі дуже швидко, але в даному випадку для росту бульбашки необхідне повітря, а воно надходить тільки через капіляр, що вимагає визначеного часу.

Метод падаючого меніска. Змусити бульбашку проскочити через отвір можна двома шляхами: збільшити тиск у газовій фазі (що робиться в методі максимального тиску) або зменшити тиск у рідині, підвісивши її, наприклад, у виді стовпа на меніску. Останнє і робиться в методі падаючого меніска. Можна сказати, що метод падаючого меніска є обернений метод до максимального тиску. Теорія обох методів, природно, та сама.

Щоб пояснити принцип методу, проведемо наступний уявний експеримент. Візьмемо трубку, яка звужується до кінця з малим отвором на кінці, що має гострі краї (рисунок 1.6), і, зануривши її спочатку цілком у рідину, будемо витягати з рідини, тримаючи кінцем вгору. Якщо матеріал трубки змочується рідиною, то стовп рідини до пори до часу залишається всередині трубки, а в отворі формується бульбашка, оскільки тиск з боку рідини біля поверхні меніска буде на висоту стовпа рідини менше атмосферного. В міру витягування трубки стовп рідини буде усе вище, тиск рідини в поверхні меніска усе менше, а бульбашка стає усе більше в розмірах і усе сильніше втягується в рідину. По

досягненні максимальної різниці тисків і відповідної їй максимальної висоти стовпа рідини меніск проривається, і стовп обринується. Висота, яка фіксується мабуть, і є $h^{\max}$, що при відомому радіусі отвору дає можливість оцінити поверхневий натяг.



1 – термостатуюча комірка; 2 – випарник; 3 – капіляр; 4 – мікроманометр; 5 – термостат; 6 – платинові електроди; 7 – проміжна ємність; 8 – голчастий регулятор витрати рідини; 9 – мікробюретка; 10, 11 – двохходові крани; 12 – трьохходовий кран; 13 – напірна судина; 14 – елемент харчування; 15 – перемінний опір; 16 – перетворювач-підсилювач сигналів; 17 – швидкодіючий записуючий вольтметр; А і В – клемі, з'єднані з електродами 6

Рисунок 1.5 – Схема установки для визначення динамічного поверхневого натягу методом максимального тиску в бульбашці

Якщо поверхневий натяг міняється в часі, то методику проведення досліду можна змінити: чекати колапсу при заданій висоті стовпа. Вивчивши час життя меніска як функцію висоти стовпа рідини, одержимо повну інформацію про поведінку динамічного поверхневого натягу.

Таким чином, метод падаючого меніска як динамічний метод вигідно відрізняється від методу максимального тиску в бульбашці відразу в двох відносинах. По-перше, довжина капіляра, через який засмоктується повітря при падінні меніска, дуже мала, так що мертвий час у цьому методі практично

дорівнює нулю. По-друге, завдяки тому, що меніск повідомляється з великою поверхнею, час життя бульбашки збігається з віком поверхні. Відпадають відразу дві процедури – визначення мертвого часу і перерахування від часу життя пухирця до віку поверхні, що у методі максимального тиску не тільки трудомісткі, але і вносять трудноконтролюючу похибку. Однак велику свіжу поверхню миттєво створити неможливо, і в методі падаючого меніска виникає проблема невизначеності віку вихідної свіжої поверхні (у момент, від якого ведеться відлік часу), якщо процеси протікають швидше, ніж за секунду. Для більш повільних процесів адсорбції метод дає надійні результати. Прилад, який використовує метод падаючого меніска наведений на рисунку 1.7.

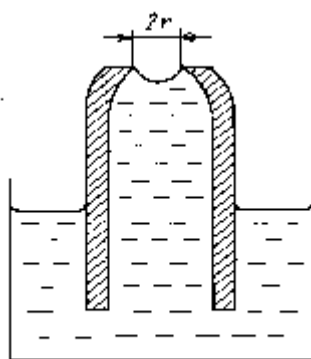


Рисунок 1.6 – Принцип дії падаючого меніска

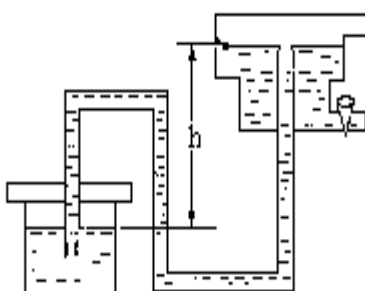


Рисунок 1.7 – Схема приладу з падаючим меніском

Метод падаючого меніска міг би застосовуватися і для статичних вимірювань як метод максимального тиску. Недоліки останнього як статичного методу є в

методі падаючого меніску, але до них додаються вимоги змочування трубки, тобто вимога крайового кута, що зразу звужує можливість застосування.

1.1.3 Спеціальні динамічні методи визначення поверхневого натягу

Метод рідкої завіси. Представимо вільно поточну вертикально вниз рідку плівку між двома направляючими стрижнями, що змочуються, (рисунок 1.8). Якщо на шляху цієї рідкої завіси установити перешкоду (скажемо, стержень, що пробиває завісу), то плівка зруйнується або збережеться. Останнє відбудеться, якщо на кожній ділянці плівки виконується умова

$$2\gamma/vQ < 1, \quad (1.1)$$

де γ – поверхневий натяг; v – середня локальна швидкість завіси; Q – потік маси через одиницю ширини завіси.

При виконанні умови (1.1) завіса зберігається єдиною, якщо перешкода гарно змочується або розбивається на два рукава (рисунок 1.8), якщо перешкода зроблена з матеріалу, що незмочується. Саме останній випадок відкриває можливість виміру динамічного поверхневого натягу.

Для виведення співвідношення, що зв'язує поверхневий натяг γ з кутом α відхилення рукава завіси від вертикалі (рисунок 1.8), використано умову балансу імпульсу.

$$2\gamma = Qv \sin^2 \alpha \quad (1.2)$$

Співвідношення (1.2) було перевірено в експерименті з рідиною (гліцерином) з відомим значенням поверхневого натягу. Зокрема, установлена чітка кореляція між відстанню L , від верхнього краю завіси і кутом α (чим більше L , тим більше швидкість v і тим менше α). Співвідношення (1.2) дозволяє визначити поверхневий натяг в динамічних умовах. Для цього потрібно виміряти швидкість v , потік маси Q через одиницю ширини завіси і кут α . Найбільші труднощі викликає визначення v .

Метод капілярних хвиль. При переході від вертикального струменя до горизонтальної поверхні рідини поведення хвиль на поверхні буде визначатися вже не тільки поверхневим натягом, але і гравітацією. Такі хвилі називають

капілярно-гравітаційними. Для випадку ідеальної чистої рідини першу теорію капілярно-гравітаційних хвиль створив Кельвін. Його теорія приводить до простого співвідношення:

$$v^2 = g\lambda/2\pi + 2\pi\gamma/\rho\lambda, \quad (1.3)$$

де v – фазова швидкість поширення хвилі; g – прискорення сили тяжіння; λ – довжина хвилі; γ – поверхневий натяг; ρ – густина рідини.

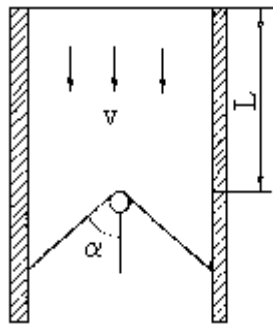
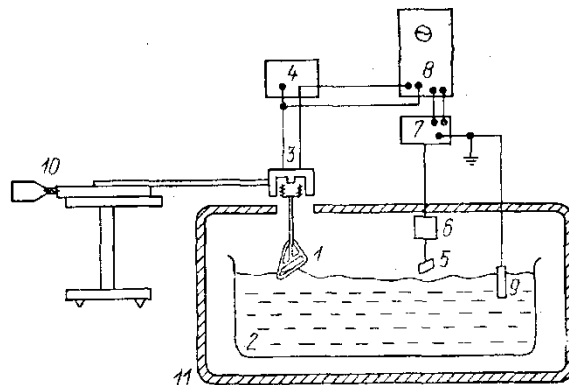


Рисунок 1.8 – Рідка завіса, що зустрічає перешкоду, що незмочується



1 – механічний генератор; 2 – кювети з розчином; 3 – електродинамічний вібратор; 4 – електричний генератор синусоїдального струму низької частоти; 5 – металева пластинка; 6 – підсилювач; 7 – селективний підсилювач; 8 – осцилограф; 9 – платиновий електрод; 10 – мікрометричний гвинт; 11 – повітряний термостат.

Рисунок 1.9 – Схема установки для визначення поверхневого натягу і коефіцієнта загасання капілярних хвиль

З (1.3) видно, що швидкість поширення довгих хвиль визначається гравітацією, а коротких – поверхневим натягом. Ці короткі хвилі і називають капілярними. Потрібно вимірити частоту коливань (звичайно вона задається в досліді) і довжину хвилі (амплітуда коливань передбачається малою).

Як уже відзначалося, формула Кельвіна відноситься до ідеальної рідини. При переході до в'язких рідин і особливо до розчинів ПАР з вязкопружними поверхневими властивостями теорія капілярних хвиль сильно ускладнюється. Як і для струменів, теорія коливань на плоскій поверхні заснована на аналізі гідродинамічних рівнянь. Самі гідродинамічні рівняння діють при довільних частотах і довжинах хвиль, але облік граничних умов між дотичними фазами приводить до встановлення зв'язку між частотою і довжиною хвилі, що дається дисперсійним співвідношенням.

Як приклад на рисунку 1.9 приведена схема установки з детектором капілярних хвиль у виді динамічного конденсатора. Генератором хвиль є скляна трубка, що дотикається поверхні, (або стержень), з'єднана з електродинамічним вібратором, а приймачем хвиль – динамічний конденсатор, однією з обкладок якого є сама досліджувана поверхня (у рідину вноситься заземлений платиновий електрод), а іншою – повітряний електрод, що знаходиться над поверхнею, (металева пластинка, підвішена вертикально й орієнтована своїм нижнім краєм паралельно поверхні і перпендикулярно напрямку руху хвиль). При товщині пластинки менше довжини хвилі (а краще – менше напівхвилі) в результаті коливань поверхні рідини ємність динамічного конденсатора періодично міняється. Виникаючий у його ланцюзі перемінний струм (пропорційний амплітуді хвиль) після посилення подається на осцилограф. Туди ж подається і напруга від електричного генератора, що приводить до появи на екрані осцилографа фігур Ліссажу, що відбивають різницю фаз [30–34].

1.2 Аналіз приладів контролю розділу фаз

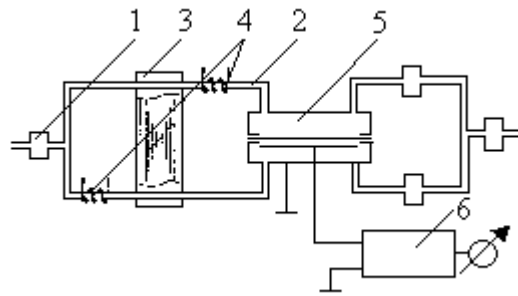
Прикладом приладів контролю розділу фаз є прилади для визначення концентрації шкідливих речовин у виробничому середовищі. Визначення

концентрації через вимірювання вмісту шкідливих речовин у повітрі чи газі здійснюється за допомогою газоаналізаторів. Тому ми проаналізуємо прилади для вимірювання саме цих характеристик.

Газоаналізатор “Оскар”(рисунок 1.10) призначений для визначення вмісту кисню у вимірювальному середовищі. Створюється асиметрія магнітної проникності за рахунок підігріву трубок двома нагрівальними обмотками, розташованими на різних сторонах електромагніту. У трубках з'являється тиск, модульований частотою магнітного поля електромагніту, що вимірюється конденсаторним мікрофоном. По методу вимірювання аналізатор випускається в основному безпосереднього вимірювання і диференціальному варіантах. Газоаналізатор основного варіанту призначений для визначення вмісту кисню в газовій суміші, в якій вміст компонентів - H_2 , CH_4 , CO виключає утворення вибухонебезпечних сумішей. Газоаналізатор диференціального варіанту призначений для визначення вмісту кисню у вимірюваній і порівняльній газових сумішах. При рівних вмістах кисню вихідний сигнал дорівнює нулю. Діапазони вимірювання 0 – 4 і 0 – 40 % об'ємних часток відносяться тільки до диференціального варіанту. Вихідні сигнали 0 – 5, 0 – 20, 4 – 20 мА. Витрата порівняльного газу для диференціального варіанту становить 10 – 15 л/год. Газоаналізатор призначений для роботи при температурі навколишнього повітря 5 – 50 °С і відносної вологості до 80%. Маса газоаналізатора 40 кг.

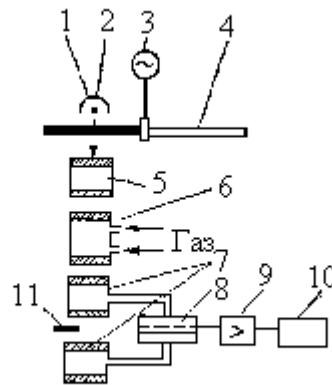
Ще одним прикладом газоаналізаторів є оптико-акустичні газоаналізатори. Дія оптико-акустичних газоаналізаторів(рисунок 1.11) засновано на здатності обумовленого газу поглинати інфрачервоні промені. Цією здатністю володіють усі гази, за винятком одноатомних, а також водню, кисню, азоту і хлору. Кожен газ поглинає інфрачервоне випромінювання тільки у своїх, властивих йому ділянках спектру.

Вимір вмісту газу роблять на підставі оптико-акустичного ефекту, що полягає в тім, що газ, здатний поглинати інфрачервоні промені, при переривчастому опроміненні в замкнутому об'ємі (променепоглиначі) періодично нагрівається і прохолоджується, у результаті чого відбуваються коливання тиску



1 – погасник акустичного удару; 2 – вимірювальні трубки; 3 – електромагніт;
4 – нагрівальні елементи; 5 – конденсаторний мікрофон; 6 – електронний блок.

Рисунок 1.10 – Функціональна схема газоаналізатора “Оскар”



1 – ніхромовий випромінювач; 2 – параболічне дзеркало; 3 – синхронний двигун;
4 – обтюратор; 5 – світлопровід; 6 – робоча кювета; 7 – променеприймач; 8 –
мембрана конденсаторного мікрофона; 9 – підсилювач; 10 – вторинний прилад;
11 – нульова заслінка.

Рисунок 1.11 – Принципова схема оптико-акустичних газоаналізаторів

газової суміші. Коливання тиску сприймаються чуттєвим елементом – мембраною, що є однією з обкладок конденсаторного мікрофона.

Як джерело інфрачервоного випромінювання використовується хромонікелевий дріт, нагрітий до 700 – 800 °С. Інфрачервоне випромінювання в аналізовану суміш пропускають через вікна, виготовлені із синтетичного корунду чи інших матеріалів, що пропускають це випромінювання. Переривання

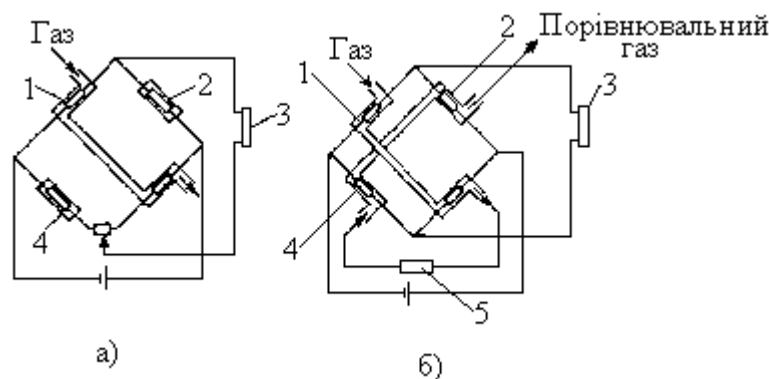
потіку випромінювання виробляється з частотою 5 – 6 Гц. Зміна ємності конденсатора при дії на променепоглинач повного потоку інфрачервоного випромінювання в середньому складає 0,3 пф при зсуві мембрани на 1 мкм. В одноканальній схемі потік від ніхромового випромінювача, нагрітого електричним струмом відбивається від параболічного дзеркала; прямий і відбитий потоки перериваються обтюратором, що обертається синхронним двигуном, проходять через світлопровід, робочу кювету і попадають у прийомні камери оптико-акустичного променепоглинача, розташованого в оптичній послідовності. Прийомні камери заповнені обумовленим газом у суміші з азотом чи аргоном. У першій камері (по ходу потоку) відбувається поглинання інфрачервоного випромінювання, що відповідає переважно центральній смузі спектра, у другий – початку і кінцю смуги. Підвищення тиску дають лише найбільш сильні лінії поглинання центральної смуги спектра, унаслідок чого створюється перепад тисків у камерах, що впливає на мембрану. На виході мікрофона з'являється електричний сигнал змінного струму з частотою 12,5 Гц, амплітуда якого пропорційна вмісту обумовленого компонента аналізованої суміші. Сигнал підсилюється, випрямляється підсилювачем і подається на вторинний прилад. При відсутності аналізованого газу в робочій кюветі пульсації тисків у камерах променепоглинача вирівнюються нульовою заслінкою.

Наступним прикладом газоаналізаторів є термокондуктометричні газоаналізатори (рисунок 1.12). Принцип дії термокондуктометричних газоаналізаторів засновано на вимірюванні теплопровідності газової суміші, що практично однозначно визначається вмістом у ній аналізованого компонента.

Необхідною умовою вимірювання є постійне співвідношення між вмістом невимірюваних компонентів по всій шкалі вимірювача або сталість заданого середнього значення вмісту невимірюваних компонентів. Теплопровідність вимірюється опосередковано шляхом зміни електричного опору чутливого елемента, розміщеного в аналізованій газовій суміші. У газоаналізаторах використовуються прямі та диференціальні схеми вимірювання газу.

У схемі прямого вимірювання аналізована газова суміш проходить через дві робочі камери з чутливими елементами; у двох камерах порівняння чутливі елементи герметично закриті та заповнені газом постійного складу. У схемі диференціального вимірювання аналізована газова суміш проходить через робочі камери, а потім, після попереднього видалення контрольованого компонента пальником або абсорбером, що знаходиться поза межами газоаналізатора, потрапляє в камеру порівняння, яка виконує роль газу порівняння.

Як чутливий елемент використовується платинова опора, що входить до складу плеча вимірювального мосту. При зміні вмісту контрольованого компонента на вимірювальній діагоналі мосту з'являється незбалансована напруга, пропорційна його вмісту [2, 35–38].



1 – робоча камера; 2 – порівняльна камера; 3 – вторинний прилад; 4 – чутливий елемент; 5 – поглинач.

Рисунок 1.12 – Вимірювальні схеми термокондуктометричних газоаналізаторів: а) прямого вимірювання; б) диференціальна

1.3 Постановка задачі

На основі аналізу приладів і методів визначення тиску поверхневого натягу, для покращення визначення динамічних характеристик, потрібно спроектувати таку вимірювальну систему, яка б дозволяла визначати тиск поверхневого натягу використовуючи метод вимірювання залишкового тиску при формуванні меніску

в капілярі. Дана система повинна вимірювати малі тиски, забезпечуючи при цьому потрібну точність. Система визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз, що здійснює вимірювання і обробку даних повинна бути обладнана завадостійкою системою передавання даних. Система вимірювання і обробки даних повинна відповідати таким технічним параметрам:

1 – система повинна передавати інформацію за допомогою стандартного протоколу даних RS – 232;

2 – система повинна забезпечувати вимірювання поверхневого натягу діапазоном $(10 - 100) \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}$;

3 – відстань, на яку буде передаватися інформація повинна становити 10 – 15м;

4 – відносна похибка при вимірюванні тиску поверхневого натягу повинна становити не більше 0.1%;

5 – потужність, яку будуть споживати елементи системи не повинна бути більше 50 Вт;

6 – можливість роботи системи в шкідливих умовах виробництва.

2 ПРОЕКТНА ЧАСТИНА

2.1 Розробка функціональної схеми системи

Функціональна структура складається функціональних елементів, кожен з яких виконує лише певну, притаманну йому функцію. На основі функціональної схеми розробляється електрична принципова схема пристрою. Функціональна схема вимірювального блоку зображена на рисунку 2.1.

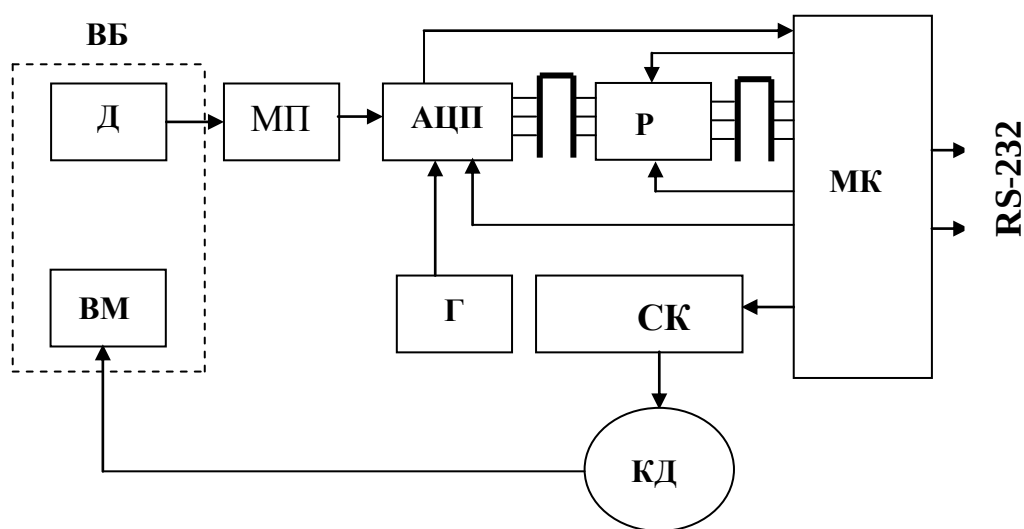
Розглянемо алгоритм роботи функціональної схеми. При ввімкненні пристрою відбувається початкова ініціалізація мікроконтролера МК і він починає виконувати команди програми, починаючи з першої. Тиск, який вимірює давач тиску, перетворюється в аналоговий сигнал. Аналоговий сигнал $0\div 50$ мВ від давача тиску Д подається на масштабуючий підсилювач МП, де підсилюється до напруги $0\div 10$ В.

Аналоговий сигнал $0\div 10$ В подається на аналого-цифровий перетворювач АЦП, на який подаються тактові імпульси з генератора Г і одночасно мікроконтролер подає сигнал на АЦП для його запуску. При подачі 14 тактових імпульсів з генератора, АЦП перетворює аналоговий сигнал в 12-ти розрядний двійковий код. Двійковий код записується в регістр Р при подачі дозволу роботи мікросхем регістрів і наявності сигналу дозволу запису даних в регістр. Дані з регістру записуються в мікроконтролер, порівнюються із значенням гідростатичного тиску у вимірювальному блоці p_{gh} , якщо визначене значення тиску буде рівне значенню p_{gh} , то мікроконтролер подає сигнал в схему керування кроковим двигуном СККД, яка керує роботою крокового двигуна КД. Кроковий двигун пересуває виконавчий механізм ВМ до цих пір, поки виміряний тиск і p_{gh} не зрівняються. Після цього починається формування краплі сталого об'єму. Величиною об'єму керує мікроконтролер через схему керування кроковим двигуном і виконавчий механізм. Після створення краплі постійного об'єму починається процес вимірювання концентрації шкідливих речовин в повітрі. Всі речовини, які знаходяться в повітрі попадають в краплю води і тиск

починає зменшуватися. Процес вимірювання проходить на протязі 5с і дані на комп'ютер передаються за допомогою інтерфейсу RS-232.

Після процесу вимірювання відбувається процес оновлення краплі, яким керує мікроконтролер через схему керування кроковим двигуном і виконавчий механізм. Мікроконтролер кожних 2 хвилини подає команду на АЦП почати новий процес вимірювання концентрації шкідливих речовин в повітрі. Новий процес починається з вимірювання тиску у ВБ, його перетворенні в цифровий код і т.д.

Інтерфейс RS-232 використовується для зв'язку з комп'ютером або іншим зовнішнім пристроєм та передачі даних. Дані в RS-232 передаються в байтах за допомогою послідовного коду. Кожен байт супроводжується стартовим та стоповим бітами. Дані можуть передаватися в будь-якому напрямку (дуплексний режим). Формат переданих даних показано на рисунку 2.2.



ВБ – вимірювальний блок; Д – давач тиску; МП – масштабуючий підсилювач; АЦП – аналогово-цифровий перетворювач; Р – регістр; МК – мікроконтролер; СККД – схема керування кроковим двигуном; ВМ – виконавчий механізм; Г – генератор; КД – кроковий двигун.

Рисунок 2.1 – Функціональна схема системи

Самі дані супроводжуються стартовим бітом, бітом парності (біти парності можуть бути відсутніми) та одним або двома стоп-бітами. Після отримання стартового біта приймач вибирає біти даних з лінії через рівні проміжки часу. Тактові частоти приймача та передавача повинні бути однаковими (допустима різниця не більше 10%). Швидкість передачі по інтерфейсу RS-232C можна вибрати з наступного діапазону: 110, 150, 300, 600, 1200, 2400, 4800, 9600, 19200, 38400, 57600, 115200 біт/с. На рисунку 2.3 показано рівні сигналів в RS-232 на передавальному і приймальному кінцях лінії зв'язку [39–41].

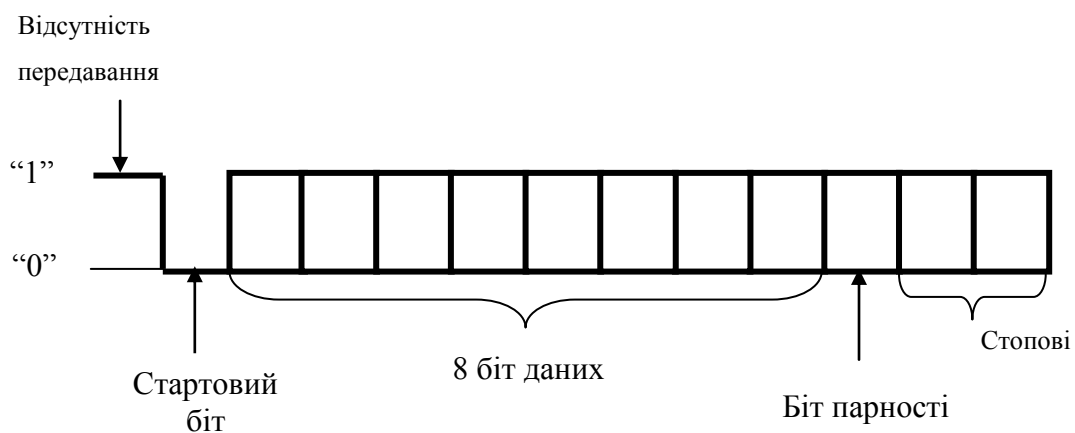


Рисунок 2.2 – Формат даних RS-232

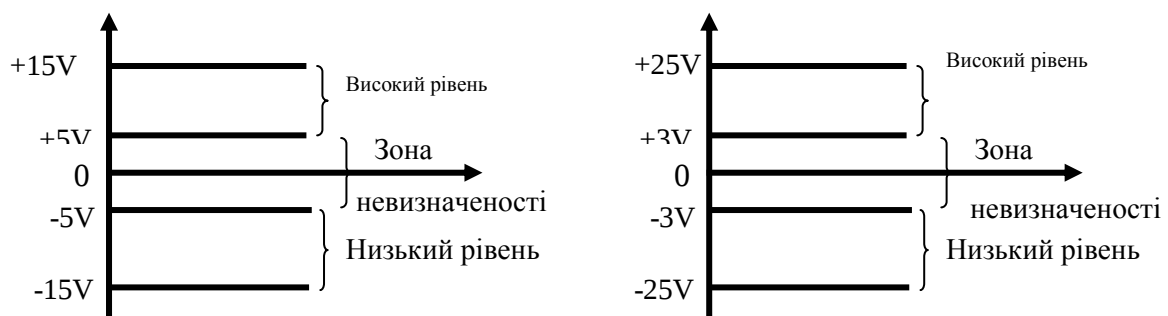


Рисунок 2.3 – Рівні сигналів в RS-232 на передавальному і приймальному кінцях лінії зв'язку

2.1.1 Вибір давача тиску

Потрібний в даній системі давач тиску повинен відповідати наступним вимогам:

- давач повинен бути розрахований на вимірювання малих тисків;
- габарити давача повинні бути як найменшими;
- бажано, щоб на виході давача ми отримували деяку нормовану напругу або струм;
- давач повинен забезпечувати потрібну точність вимірювань.

Розрахуємо діапазон тисків, які буде вимірювати давач при його експлуатації. Давач буде вимірювати залишковий тиск в меніску, який утворюється видавленням краплі з капіляру діаметром $d=0,5$ mm. Залишковий тиск в меніску знаходиться за такою формулою:

$$P = \frac{2 \cdot \sigma}{r}, \quad (2.1)$$

де P – залишковий тиск в меніску, Па;

σ – коефіцієнт поверхневого натягу, кг/м,

r – радіус капіляру.

Для чистою води $\sigma=72.7 \times 10^{-3}$ кг/м, а при наявності в ній шкідливих речовин значення σ зменшується. Тому в чистій воді залишковий тиск буде найбільший. В додатку Б наведено інтерполюючу залежність поверхневого натягу від тиску в капілярі.

Отже, для забезпечення потрібного запасу вимірювання достатньо, щоб давач забезпечував вимірювання в діапазоні 0-1000 Па.

Одними з давачів, що відповідають даним параметрам є давачі фірми EXAR моделі SM5350 і SM5450 [42]. По своїм параметрам і характеристикам дані давачі ідентичні, лише відрізняються типом корпусу. Дані давачі рекомендовані фірмою EXAR для вимірювань низьких тисків з забезпеченням потрібної стабільності, точності, лінійності і динаміки вимірювань.

В таблицях 2.1 і 2.2 наведено деякі параметри даних давачів. Дані параметри визначають вихідні напруги і потрібні для розрахунку масштабуючого підсилювача, з виходу якого нормована напруга буде подаватись на вхід АЦП.

На рисунку 2.4 зображена схема підключення вимірювального моста до вимірювальної системи.

На рисунку 2.5 зображено зовнішній вигляд і розміри давачів SM 5350 і SM5450. Дані давачі відрізняються різними діапазонами вимірювання тисків. В таблиці 3 наведені граничні значення цих діапазонів в різних одиницях вимірювання.

Таблиця 2.1 – Основні параметри давачів SM5350 і SM5450

Параметри	Мінімальний	Номінальний	Максимальний	Одиниці виміру
Напруга живлення	0	5.0	10.0	B
Струм живлення	0	0.5	3.0	mA
Температурна зміна опору	–	27.5	–	Ом/100°C
Опір моста	2.7	3.3	4.0	кОм
Робоча температура	–10	–	85	°C
Гранична температура	–33	–	123	°C

Таблиця 2.2 – Вихідні напруги різних видів давачів SM5350 і SM5450

Граничні тиски	Мінімальна	Номінальна	Максимальна	Одиниці виміру
0.15 psi	25	50	75	mV
0.30 psi	25	50	75	mV
0.80 psi	25	50	75	mV
1.5 psi	25	50	75	mV
3.0 psi	25	50	75	mV

Таблиця 2.3 – Граничні значення діапазонів вимірювання

Діапазон вимірювання	psi	Bar	kPa	Hg (mm)	Ho (дюйм)	Ho (mm)
0.01	0.15	0.010	1.00	7.8	4.152	105.5
0.03	0.3	0.021	2.07	15.5	8.302	210.9
0.06	0.8	0.055	5.32	41.4	22.144	562.3
0.15	1.5	0.100	10.32	77.6	42.52	1024.6
0.30	3.0	0.201	20.68	155.1	83.04	2108.2

Фірма EXAR випускаю ще одну модель давача, який за своїми параметрами підходить для вимірювання потрібного діапазону тиску. Це модель SM5552. Даний давач дозволяє вимірювати тиск від 0 до 1.03 кПа, має температурну компенсацію, герметичний корпус. Основні параметри давача наведені в таблиці 2.4.

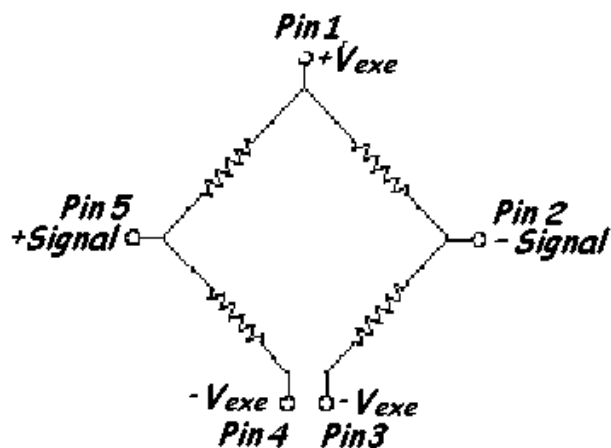


Рисунок 2.4 – Схема підключення вимірювального моста

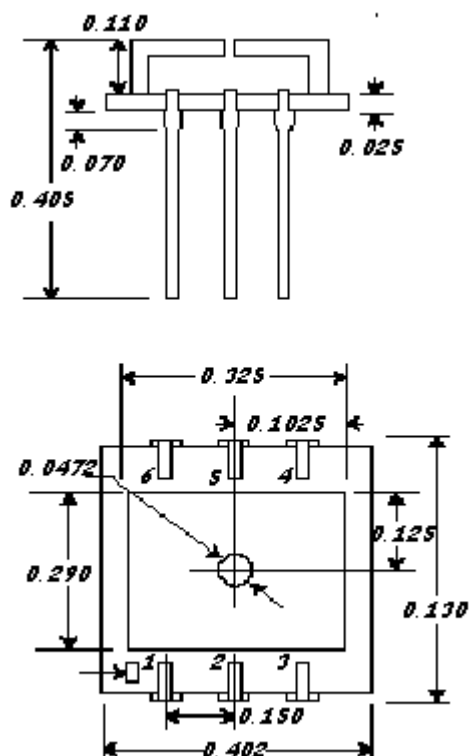


Рисунок 2.5 – Креслення зовнішнього вигляду давачів тиску

Таблиця 2.4 – Основні параметри давача SM5552

Параметри	Мінімальне	Номінальне	Максимальне	Одиниці виміру
Напруга живлення	0	10	20	В
Вихідна напруга	24.5	25	25.5	мВ
Лінійність	-0.30	±0.05	0.30	%
Гістерезис	-0.30	±0.05	0.30	%
Вхідний опір	4.50	8.00	25.00	кОм
Вихідний опір	2.20	2.70	3.80	кОм
Температура калібровки	0		70	°C
Робоча температура	-40		85	°C
Гранична температура	-55		125	°C

На рисунку 2.6 зображена схема підключення давача до вимірювальної системи.

На рисунку 2.7 зображено зовнішній вигляд давача і його габаритні розміри в дюймах. Як і попередні давачі фірми EXAR, давач SM5552 випускається в модифікаціях для вимірювання різних діапазонів тисків. Граничні значення діапазонів наведені в таблиці 2.5 в різних одиницях.

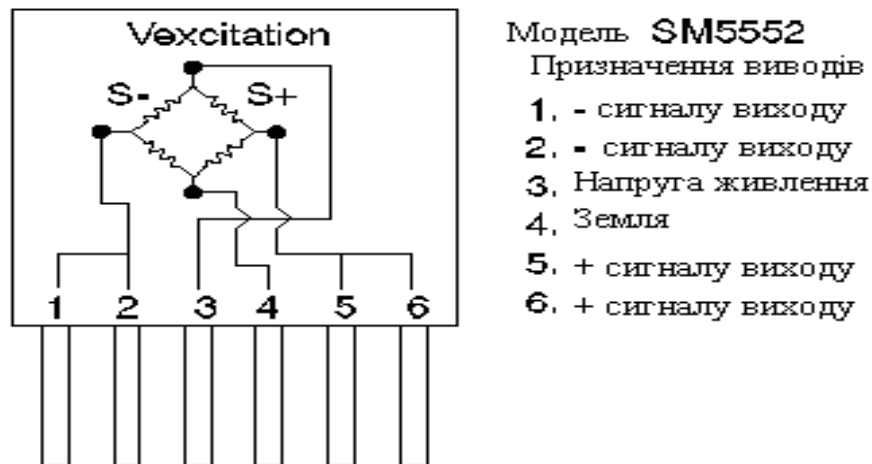


Рисунок 2.6 – Назначения выводов датчика SM5552

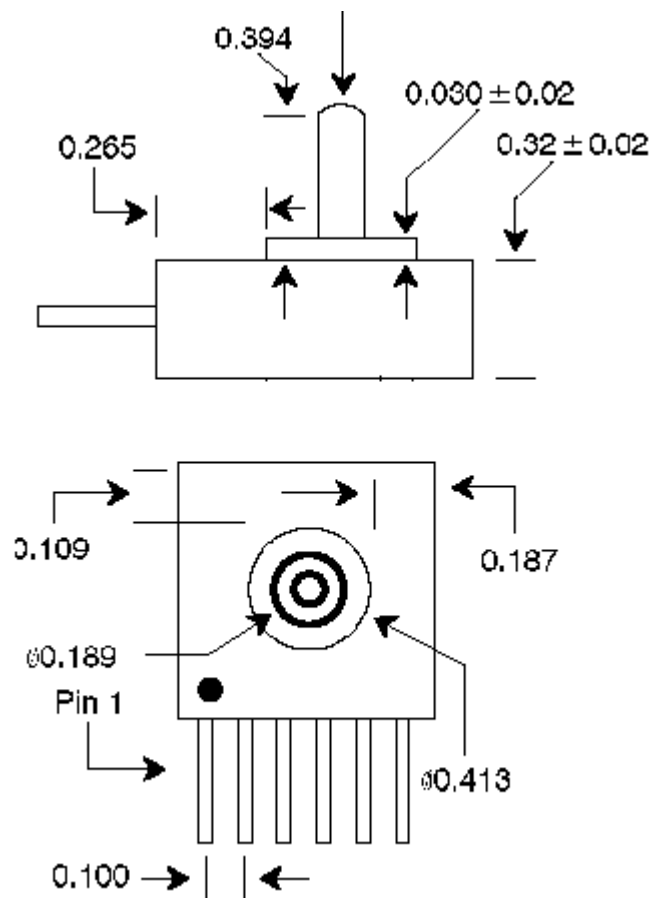


Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд датчика SM5552

Таблиця 2.5 – Граничні значення діапазонів вимірювання

Позначення діапазону	psi	BAR	кПа	Hg (mm)	Но (дюйм)	Но (mm)
0.01	0.15	0.010	1.03	7.8	4.152	105.5
0.03	0.3	0.021	2.07	15.5	8.304	210.9
0.08	0.8	0.055	5.52	41.4	22.144	562.5
0.15	1.5	0.103	10.34	77.6	41.52	1024.6
0.30	3.0	0.207	20.68	155.1	83.04	2109.2

Фірма EXAR Corporation випускає різні моделі давачів низьких тисків. До них відноситься давач SM5652. Даний давач розрахований на вимірювання низьких тисків, має невеликі габарити. Основні параметри даного давача наведені в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні параметри давача SM5652

Параметри	Мініма- льне	Номіна- льне	Макси- мальне	Одиниці виміру
Напруга живлення	0	10	20	В
Дрейф нуля			±2	мВ
Лінійність			0.3	%
Вхідний опір	4		26	кОм
Вихідний опір	2.2		6.0	кОм
Робоча температура	-40		125	°C
Температурна компенсація	0		60	°C
Гранична температура	-55		150	°C
Маса		30		грам

Схема підключення даного датчика до масштабуючого підсилювача зображена на рисунку 2.8. Зовнішній вигляд і габаритні розміри датчика зображені на рисунку 2.9. Даний датчик також випускається для різних діапазонів тиску і для кожного діапазону має своє маркування. В таблиці 5 подані граничні значення діапазонів вимірювання.

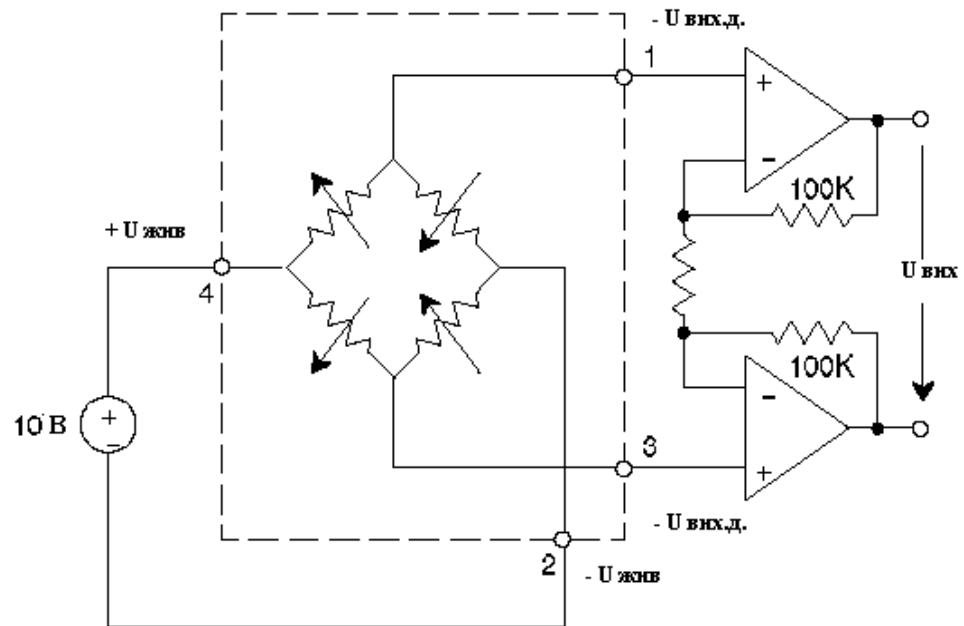


Рисунок 2.8 – Схема підключення датчика SM5652

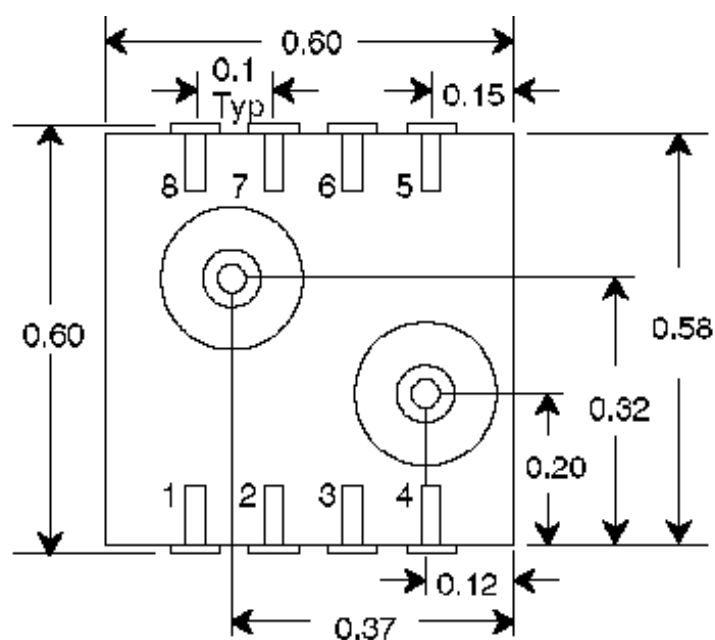
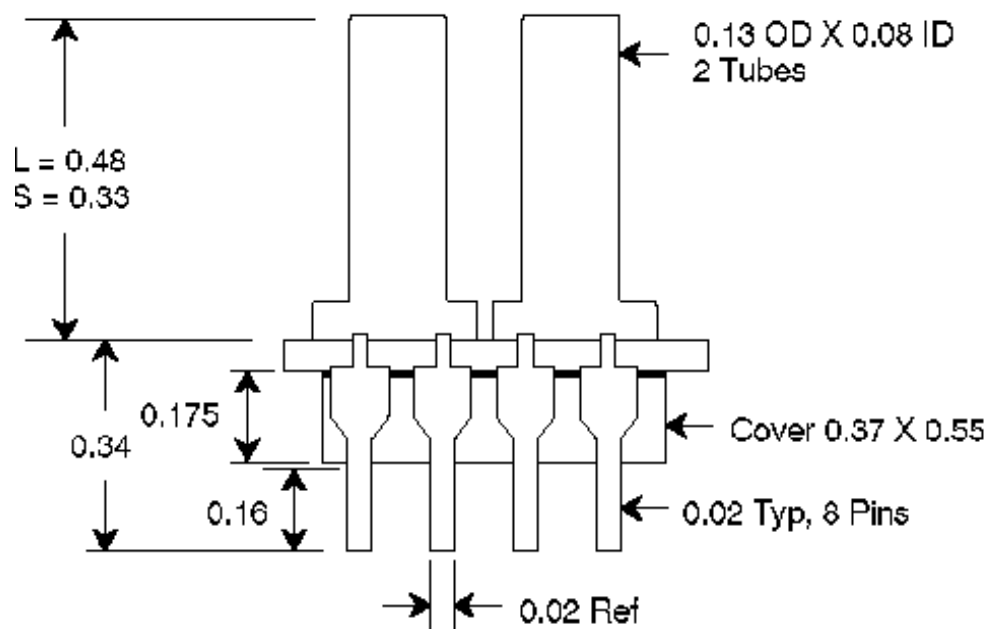


Рисунок 2.9 – Зовнішній вигляд давача SM5652

Останній давач, який за своїми параметрами можна застосувати для роз'язання поставленої задачі, також випускає фірма EXAR. Це модель давача SM5752. Даний давач також призначений для вимірювання низьких тисків, має температурну компенсацію, невеликі габарити корпусу. Основні параметри даного давача наведені в таблиці 2.7.

Таблиця 2.7 – Основні параметри давача SM5752

Параметри	Мінімаль- ний	Номіналь- ний	Максима льний	Одиниці виміру
Напруга нуля	0.46	0.50	0.54	В
Граничне значення виходу	3.92	4.00	4.08	В
Лінійність		0.05	0.3	±%
Напруга живлення	4	5	7.5	В
Рекомендована напруга живлення	4.75	5.00	5.25	В
Робоча температура	-20	25	85	°C
Температурна компенсація	0	25	60	°C
Гранична температура	-55	25	150	°C
Маса		4		грами

Загальний вигляд і габарити даного давача аналогічні як і в SM5652, а призначення виводів таке: 1– не використовується; 2 – заземлення; 3 – не використовується; 4,5,6 – не використовується; 7 –живлення; 8 – вихідний сигнал

Діапазони вимірювання тисків аналогічні давачу SM5652. Для використання зі всіх описаних давачів ми обрали давач типу SM5450-001-G-H, оскільки даний давач повністю відповідає поставленим до нього вимогам. По-перше, він з усіх розглянутих давачів є найменший по габаритах, по-друге при максимальному тиску на виході давача ми отримуємо напругу 50мВ, яку легко нормувати до напруги 10 В, по-третє давач дає точність вимірювання порядку 0,1 %, що є достатнім і по-четверте температурний режим давача дозволяє працювати в широкому діапазоні температур. Отже, при реалізації даної вимірювальної системи буде використано давач фірми EXAR SM5450-001-G-H.

2.1.2 Вибір аналого-цифрового перетворювача

Аналого-цифровий перетворювач являє собою пристрій, який перетворює аналогову напругу в цифровий код. Потім даний код обробляється мікропроцесорним пристроєм.

В нашому випадку АЦП повинен відповідати таким вимогам:

– забезпечувати потрібну точність перетворення і не погіршувати точність вимірювань, яку забезпечує давач;

– забезпечувати потрібну частоту перетворення.

Точність перетворення залежить від розрядності АЦП. Так, 10-розрядне АЦП має 1024 рівнів квантування, що дає нам похибку близько 1 Па, що є дещо недостатньо, тому для даної системи ми виберемо 12-розрядне АЦП. Оскільки процес, який ми вимірюємо є досить тривалий в часі, то практично будь-яке АЦП може забезпечити потрібну частоту перетворення.

Вітчизняною промисловістю виготовляється лише один тип 12-розрядного АЦП. Це AD7570 [24–28]. Тому ми виберемо дане АЦП для реалізації вимірювальної системи. AD7570 являє собою мікросхему в керамічному корпусі з 40-а контактами. Параметри даного АЦП наведені в таблиці 2.8.

Таблиця 2.8 – Основні параметри АЦП AD7570

Параметри	Мінімальний	Максимальний
Число розрядів	12	
Нелінійність, %	-0.05	0.05
Диференціальна нелінійність, %	-0.1	0.1
Абсолютна похибка перетворення в кінцевій точці шкали, МР	-127	127
Вихідна напруга низького рівня, В		0.3
Вихідна напруга високого рівня, В	2.4	
Струм споживання I_{cc1} , мА		3
Струм споживання I_{cc2} , мА	5	

АЦП забезпечує нормальне функціонування при частоті меншій 250 кГц. Перетворювач працює від двох джерел живлення: $U_{cc1}=(5\div 15)V\pm 5\%$ і $U_{cc2}=15V\pm 5\%$. Гранично допустимі і граничні значення параметрів даного перетворювача наведено в таблиці 2.9.

Схема включення даної мікросхеми в режимі АЦП зображена на принциповій електричній схемі вимірювальної системи, яка входить до графічної частини.

Таблиця 2.9 – Гранично допустимі і граничні значення параметрів АЦП

Параметри	Гранично допустимі		Граничні	
	Min	Max	Min	Max
Опорна напруга U_{ref} , В	-10.29	10.29	-15	15
Вхідна напруга високого рівня, В	-2.4	5.25	2.4	17
Вхідна напруга низького рівня, В	0	0.4	0	0.4
Напруга високого рівня на вході порівняння і вході Цикл, В	10	15.75	10	17
Вихідний струм високого рівня мА	–	0.04	–	0.04;1
Вхідний струм низького рівня, мА	–	0.4	–	0.4;3

2.1.3 Вибір мікропроцесорного пристрою

Висока продуктивність сімейства мікроконтролерів PIC16Cxx обумовлена значною кількістю архітектурних властивостей, притаманних RISC-мікропроцесорам. Із самого початку PIC16Cxx будувались на основі Гарвардської архітектури, де програма і дані мали доступ до відокремлених областей пам'яті по відокремлених шинах. Це поширило можливості класичної нейманівської архітектури, де програма та дані мають спільну пам'ять із спільною шиною доступу. Відокремлення програмної шини від шини даних дозволило змінити традиційну 8-розрядну довжину слова команди, яка була обумовлена байтовою організацією даних. Слово команди має довжину 14 біт, що дозволило забезпечити виконання команди на протязі одного циклу команди. 14-розрядна пам'ять програм забезпечує доступ до неї через 14-розрядну шину на протязі одного циклу. Двостадійна конвеєрна обробка реалізує перекривання операцій читання та виконання двох команд одночасно. Відповідно, всі 35 команд виконуються на протязі одного циклу, за винятком команд розгалуження.

Регістр файлу пам'яті даних PIC16Cxx можуть адресуватись прямим і непрямым шляхом. Всі регістри спеціальних функцій, включно із програмним лічильником РС, відображені в пам'яті даних. Система команд PIC16Cxx є ортогональною (симетричною), що дозволяє виконувати будь-яку операцію з будь-яким регістром із використанням будь-якого способу адресації.

Ортогональність та відсутність “ спеціальних оптимальних ситуацій ” роблять програмування контролерів PIC16Cxx простим, але тим не менш ефективним.

Пристрої PIC16Cxx містять 8-розрядний АЛП і робочий регістр (акумулятор). АЛП виконує арифметичні та булеві функції між даними в акумуляторі та будь-якому з регістрів файлу. АЛП здатний виконувати команди додавання, віднімання, логічні команди та команди зсуву. Якщо інакше не вказано, арифметичні команди оперують із двома операндами, представленими в доповнюючому коді. Двооперандні команди, як правило, один з операндів розміщують в регістрі W. Другий операнд розміщується в регістрі файлу або є безпосередньо вказаною константою. В однооперандних командах операнд може розміщатись або в регістрі W, або в регістрі файлу. Регістр W є 8-розрядним регістром, недоступним для адресації, який використовується АЛП для виконання операцій. В залежності від виконання команди АЛП може впливати на стан прапорців C, DC і Z в регістрі STATUS. Біти C та DC виступають як біти позики та тетрадної позики відповідно. Основним елементом схеми є мікроконтролер PIC16F876 фірми Microchip Technology Incorporated. В таблиці 10 наведені його основні технічні параметри.

Таблиця 2.10 – Параметри мікроконтролера PIC16F876

Параметр	PIC16F876
Максимальна тактова частота	DC = 20 МГц
FLASH пам'ять програм (14-розрядних слів)	8 К
Пам'ять даних (байт)	368
EEPROM пам'ять даних (байт)	256
Переривань	13
Порти вводу/виводу	Порт А, В, С
Таймери	3
Модулі послідовного інтерфейсу	MSSP, USART
Модуль 10-розрядного АЦП	5 каналів
Інструкцій	35

В таблиці 2.11 описано призначення виводів мікроконтролера PIC16F876.

Таблиця 2.11 – Призначення виводів мікроконтролера PIC16F876

Позначення виводу	№ виводу	Тип I/O/P	Тип буфера	Опис
1	2	3	4	5
OSC1/CLKIN	9	O	ST/CMOS	Вхід генератора/вхід зовнішнього тактового сигналу
OSC2/CLKOUT	10	I/P	–	Вихід генератора
MCLR/V _{PP}	1	I/O	ST	Вхід скидання мікроконтролера або вхід напруги програмування
Двонаправлений порт вводу/виводу PORTA.				
RA0/AN0	2	I/O	TTL	A0/ аналоговий канал 0
RA1/AN1/	3	I/O	TTL	A1/ аналоговий канал 1
RA2/AN2/V _{REF-}	4	I/O	TTL	A2/ аналоговий канал 2/ вхід від'ємної опорної напруги
RA3/AN3/V _{REF+}	5	I/O	TTL	A3/ аналоговий канал 3/ вхід додатної опорної напруги
RA4/T0CKI	6	I/O	ST	A4/ вхід зовнішнього тактового сигналу для TMR0
RA5/-SS/AN4	7	I/O	TTL	A5/ аналоговий канал 5/ вхід вибору мікросхеми в режимі SPI
Двонаправлений порт вводу/виводу PORTB.				
RB0/INT	21	I/O	TTL/ST	B0/вхід зовнішніх переривань
RB1	22	I/O	TTL	B1
RB2	23	I/O	TTL	B2
RB3/PGM	24	I/O	TTL	B3/ вхід для режиму низьковольтного програмування

Продовження таблиці 2.10

1	2	3	4	5
RB4	25	I/O	TTL	Перебивання по зміні рівня вхідного сигналу
RB5	26	I/O	TTL	Переривання по зміні рівня вхідного сигналу
RB6/PGC	27	I/O	TTL/ST	Переривання по зміні рівня вхідного сигналу/ для внутріш-ньосистемного відлагодження ICD/ тактовий вхід в режимі програмування.
RB7/PGD	28	I/O	TTL/ST	Переривання по зміні рівня вхідного сигналу/ для внутріш-ньосистемного відлагодження ICD/ вивід даних в режимі програмування.
Двонаправлений порт вводу/виводу PORTC.				
RC0/T1OSO/T1C KI	11	I/O	ST	C0/ вихід генератора TMR1/ вхід зовнішнього тактового сигналу для TMR1
RC1/T1OSI/CCP 2	12	I/O	ST	C1/ вхід генератора для TMR1/ вивід модуля CCP2
RC2/CCP1	13	I/O	ST	C2/ вивід модуля CCP2
RC3/SCK/SCL	14	I/O	ST	C3/ вхід-вихід тактового сигналу в режимі SPI і I ² C
RC4/SDI/SDA	15	I/O	ST	C4/ вхід даних в режимі SPI/ вхід-вихід даних в режимі I ² C
RC5/SD0	16	I/O	ST	C5/ вихід даних в режимі SPI
RC6/TX/CK	17	I/O	ST	C6/ вивід передавача USART
RC7/RX/DT	18	I/O	ST	C7/ вивід приймача USART
V _{SS}	8,19	P	—	Спільний вивід для внутрішньої логіки і портів вводу/виводу
V _{DD}	20	P	—	Додатня напруга живлення для внутрішньої логіки і портів вводу/виводу

Як генератор тактових імпульсів для мікроконтролера використовується зовнішній кварцовий генератор, зібраний з використанням мікросхем DD1.1,

DD1.2 та DD1.3, резисторів R3 та R4, а також кварцового резонатора ZQ1. Частота імпульсів генератора задається кварцовим резонатором і становить 1 МГц. Імпульси подаються на вхід зовнішнього тактового генератора (висновок 9) мікроконтролера.

У звичайному режимі мікроконтролер отримує дані від АЦП кожні 2 хвилини. Отримані дані записуються в пам'ять мікроконтролера.

Таймер 1 (TMR1) використовується для створення 2-хвилинної затримки після отримання даних. Модуль TMR1 – це 16-бітний таймер-лічильник, що складається з двох 8-бітних регістрів, TMR1H та TMR1L, які можна записувати та зчитувати. Таймер 1 вмикається в режимі лічильника встановленням біта TMR1CS. Загальна частота без дільника становить $F_{osc}/4=250$ кГц ($F_{osc}=1$ МГц). Оскільки Таймер 1 має 16 біт, він збільшується на частоті 65536 Гц.

Синхронно-асинхронний передавач USART використовується для прийому/передачі даних до пункту керування через систему зв'язку.

Для реалізації процедури прийому наступні біти регістра RCSTA повинні бути встановлені в "1".

- SPEN – увімкнення послідовного порту;
- CREN – безперервний прийом.

Для реалізації процедури передачі наступні біти регістра TXSTA повинні бути встановлені в "1".

- TXEN – увімкнення передачі;
- BRGH – опція високої швидкості;
- TRMT – біт стану регістра черги передачі (TSR заповнений).

Ми встановлюємо швидкість передачі даних USART на 9600 біт/с. Після визначення високошвидкісних бітів (TXSTA, BRGH = 1) ми визначаємо значення регістра SPBRG за формулою:

$$9600 = \frac{F_{osc}}{16(SPBRG + 1)}, \quad (2.2)$$

Підставивши значення $F_{osc} = 1$ МГц, обчислюємо значення $SPBRG \approx 06h$ та вводимо його в регістр SPBRG – регістр генератора швидкості USART.

Розглянемо послідовність передачі даних за допомогою USART. Ядром передавача є регістр зсуву TSR, який отримує дані з буфера передачі TXREG. Дані завантажуються в регістр TXREG згідно з програмою. Після передачі стоп-біта попереднього байта, нове значення TXREG завантажувється в TSR (якщо є) на останньому машинному такті циклу BRG.

2.1.4 Вибір крокового двигуна

Кроковий двигун використовується для видавлювання рідини з вимірjuвальної камери. За допомогою гвинтового редуктора обертальний рух валу двигуна перетворюється в поступальний рух поршня. Гвинт вибраний з кроком різьби 0,5мм, тобто за один повний оберт вала поршень переміститься на 0,5 мм. Двигун повинен мати невеликий крок обертання, якомога менші габарити і масу і розвивати достатнє зусилля для обертання гвинта редуктора. Даним вимогам відповідає двигун ШД 10/100. Це кроковий двигун з активним ротором і з чотирма обмотка збудження.

Знайдемо відстань на яку переміститься поршень при поверненні двигуна на один крок. Повний оберт складає 360° , а 15° становлять $1/24$ повного оберту. Отже, відстань дорівнює $0,5/24$ мм тобто $\approx 0,0208$ мм.

2.2 Розробка принципової електричної схеми

Для розробки повної принципової електричної схеми пристрою необхідно вибрати елементи схеми і розрахувати масштабуючий підсилювач. Розрахуємо параметри і виберемо елементи, що входять до масштабуючого підсилювача. Як відомо порогова напруга, яка знімається з виходу давача при граничному значенні тиску, дорівнює 50 мВ. На вході АЦП дана напруга повинна мати значення 10 В. Отже, ми можемо визначити коефіцієнт підсилення K , який повинен мати масштабуючий підсилювач.

Для реалізації масштабуючого підсилювача виберемо стандартну схему на основі операційного підсилювача [12, 13, 29–31]. Коефіцієнт підсилення знаходиться за наступною формулою:

$$K = \frac{(R_2 + R_1)}{R_1} \quad (2.3)$$

Знаючи потрібний коефіцієнт підсилення і задавши один з резисторів можна знайти опір другого. Нехай $R_1=1$ кОм. Тоді ,

$$R_2 = K \cdot R_1 - R_1 = 200 \cdot 1 - 1 = 199 \text{ кОм}$$

Отже, маючи параметри , виберемо елементи, які будуть використовуватись в схемі. В якості операційного підсилювача виберемо мікросхему К140УД14 і резистори марки МЛТ-0.125 з відповідними значеннями опорів.

Оскільки в якості схеми керування кроковим двигуном буде використовуватись стандартна схема без будь-яких доповнень і переробок, то її опис тут ми наводити не будемо.

Розглянемо тепер блок живлення даного вимірювального блоку. Для живлення всіх схем нам потрібні такі напруги 5 В, 10 В, ± 15 В. Для отримання цих напруг ми використали стандартний блок живлення з двох полярним живленням потужністю 25 Вт [24, 26–32].

Розглянемо тепер роботу принципової електричної схеми (рис.2.10). Спочатку розглянемо процес вимірювання, оцифровування та зчитування оцифрованих даних мікроконтролером. Напруга, яка пропорційна вимірюваному тиску, подається на масштабуючий підсилювач, який реалізований на мікросхемі DA1.

Тут проходить підсилення по напрузі і підсилений сигнал подається на АЦП вивід 24 мікросхеми DA6. На вхід 33 DA6 подається опорна напруга $U_{ref}=10\text{В}$, а на вхід 21 – тактові імпульси, які потрібні для перетворення. Тактові імпульси подаються з виводу 6 мікросхеми DD1 генератора прямокутних імпульсів, який побудований за допомогою логічних елементів мікросхеми DD1, резисторів R3, R4 і резонатора кварцового ZQ1. Резистор R3 з'єднується з резонатором ZQ1 і з входом 1 мікросхеми DD1. Другий кінець резистора R3

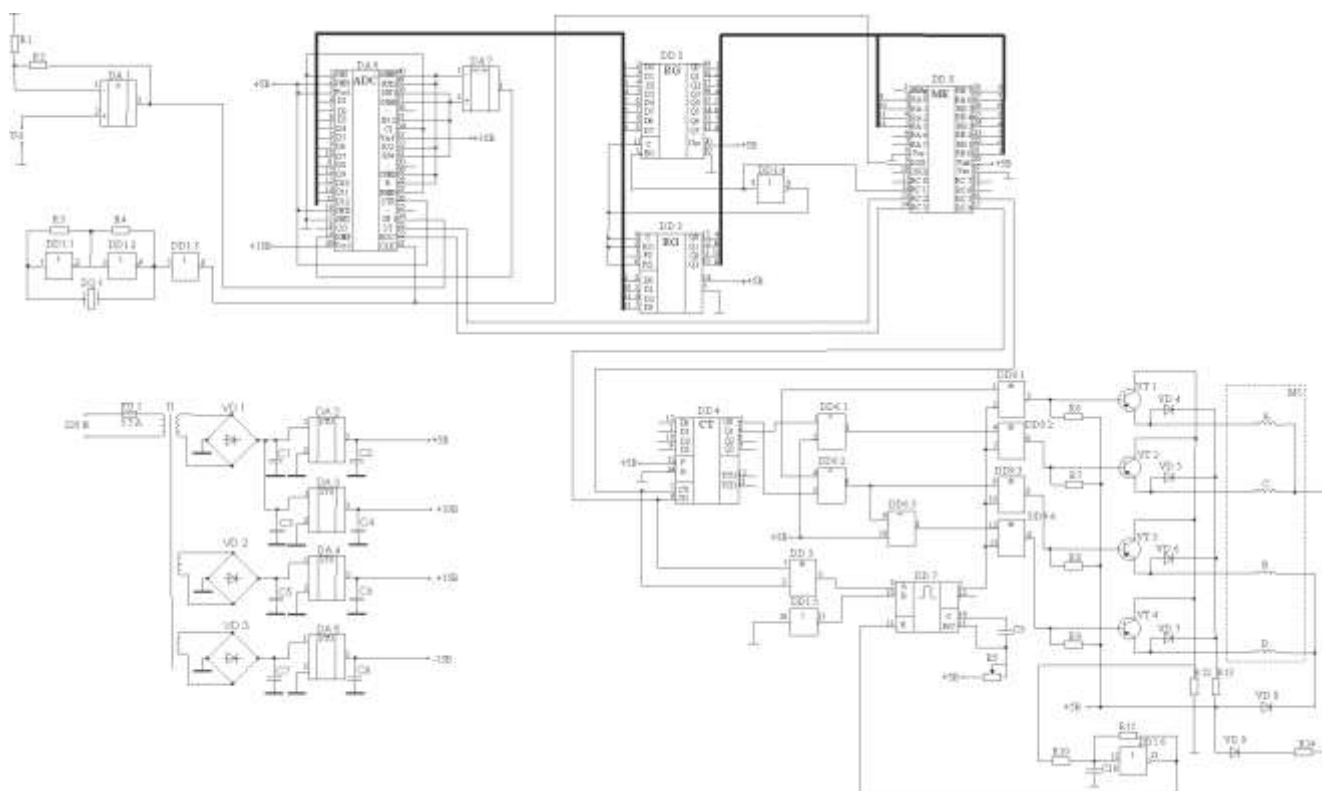


Рисунок 2.10 – Принципова електрична схема

з'єднюється з резистором R4 і з виводами 2 і 3 мікросхеми DD1. Другий кінець резистора R4 з'єднюється з виводами 4 і 5 мікросхеми DD1 і з резонатором кварцовим ZQ1. В той момент, коли необхідно отримати оцифроване значення тиску поверхневого натягу, він подає на вихід 14 одиничний сигнал, який поступає на вхід 23 DA6 і відбувається запуск процесу перетворення. В той момент, коли процес завершився, на виході 22 DA6 з'являється одиничний рівень, що показує про завершення перетворення аналогового сигналу в цифровий. На виходах 4 – 15 АЦП формується 12-ти розрядний двійковий код. Цей код по шині

даних записується в регістри, які виконані на мікросхемах DD2 і DD3. Для запису даного коду в регістри DD2 і DD3 на їх входи (1, 11 мікросхеми DD2 і 6, 8, 9 мікросхеми DD3) подається сигнал дозволу запису, який подається з виводу 12 мікросхеми мікроконтролера DD8. Сигнал дозволу запису даних записує 8 молодших біт записується в регістр DD2 на виходи 2 – 9 і записує 4 старших біти в регістр DD3 на виходи 2 – 5. Двійковий код на виходах мікросхем DD2 і DD3 записується в PORTA – 4 старших біти (CP), в PORTB записується 8 молодших біти. Мікросхема мікроконтролера перетворює паралельний двійковий код в послідовний. Послідовний код протоколу RS – 232, який також формує мікроконтролер, передається на віддаль 10 – 15м з виводів 17 і 18 (RC6 і RC7) мікросхеми DD8. З виводів 15 і 16 (RC4 і RC5) мікросхеми DD8 одиничні сигнали подаються на схему керування кроковим двигуном. В залежності на який вивід буде подаватися сигнал, кроковий двигун буде робити крок вперед або назад.

Блок живлення виконаний за допомогою трансформатора T1, вторинна обмотка якого з'єднується з діодними мостами VD1, VD2 і VD3. Діодні мости з'єднуються з виводом 1 мікросхем підсилювачів, які виконані на мікросхемах DA2 – DA5. Мікросхеми підсилювачів DA2 і DA3 з'єднуються з одним діодним мостом. До виходів 1 і 3 мікросхем DA2 – DA5 під'єднують конденсатори C1, C3, C5, C7 до виводу 1 і C2, C4, C6, C8 до виводу 2. Відповідно з виводу 3 кожної мікросхеми DA2 – DA5 ми отримуємо напругу живлення +5В, +10В, +15В і –15В відповідно.

Схема керування складається з мікросхем DD1.5, DD1.6, DD4, DD5, DD6, DD7, DD9, DD10, резисторів R5 – R14, транзисторів VT1 – VT4, діодів VD4 – VD9, конденсаторів C9 і C10.

Транзистори VT1 – VT4 використовуються як підсилювачі, після яких напруга подається на обмотки крокового двигуна А, В, С, D.

Ми розглянули роботу пристрою при виконанні певних елементарних операцій. Повне послідовне функціонування пристрою здійснюється за допомогою програми, яка виконується мікросхемою мікроконтролера і

складається з елементарних операцій, описаних вище. Саму програму наведено в додатку А.

2.3 Розробка конструкції вимірювального блоку

Конструктивно даний пристрій складається з наступних складових частин:

- давача тиску;
- капіляр;
- прокладка;
- ємність;
- поршень;
- шток;
- корпус;
- вимірювальна камера;
- механізм сполучення з кроковим двигуном.

Давач тиску призначений для вимірювання тиску поверхневого натягу і для передачі виміряного значення на віддаль. Аналоговий вихідний сигнал давача тиску становить 0 – 50 мВ. Давач кріпиться зверху різьбовим з'єднанням до вимірювальної камери. На виході давача ми отримуємо аналоговий сигнал постійної напруги, який пропорційний значенню тиску поверхневого натягу.

Капіляр призначений для створення на його кінці краплі постійного об'єму. Тиск поверхневого натягу краплі подається через вимірювальну камеру до давача тиску. Капіляр кріпиться до вимірювальної камери різьбовим з'єднанням через прокладку. Радіус капіляра становить 0.8мм.

Ємність вимірювального блоку призначена для знаходження в ній рідини, з якої буде формуватися досліджувана крапля. Об'єм ємності становить 870мм³. Вона кріпиться до корпусу вимірювального блоку за допомогою різьбового з'єднання.

Поршень вимірювального блоку призначений для перекриття каналу подачі рідини з ємності блоку в корпус, а з корпусу вимірювальна рідина подається у

вимірювальну камеру і для формування краплі постійного об'єму. Поршень переміщається вліво або вправо в корпусі блоку в залежності від сигналу, який поступає на схему керування кроковим двигуном. Поршень виготовляється відповідної форми, для усунення прокручування внаслідок перетворення обертального руху в поступальний. Переріз поршня зображений на рисунку 2.11.

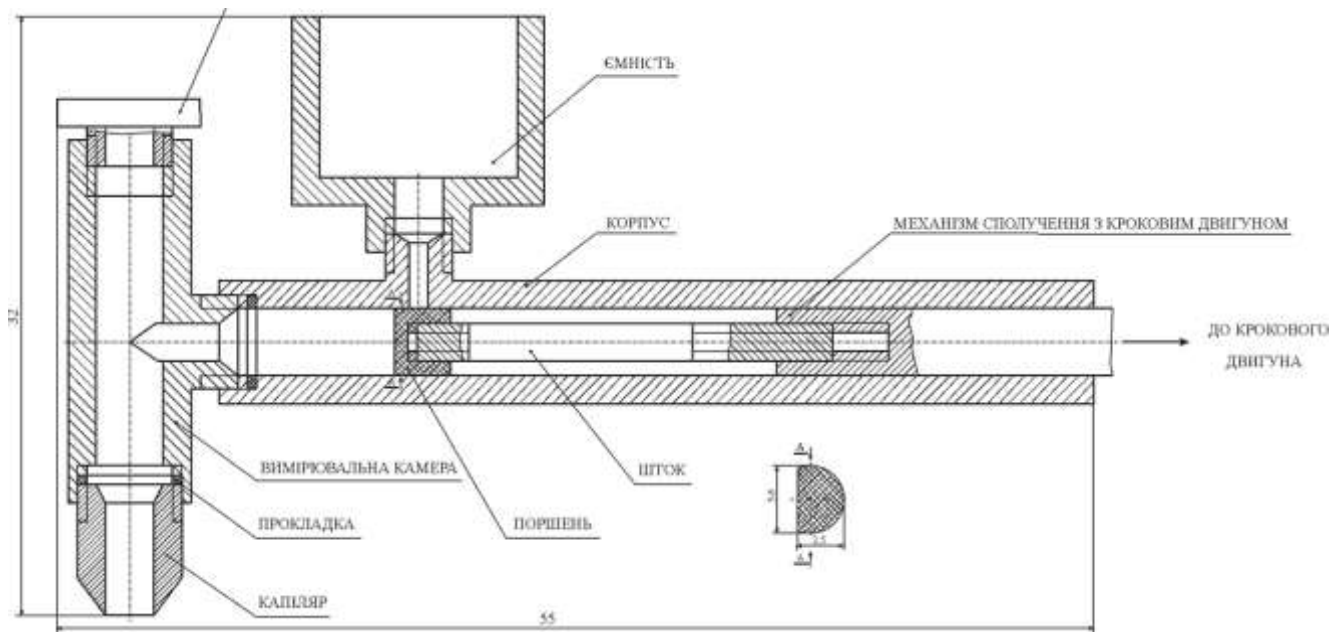


Рисунок 2.11 – Конструкція вимірювального блоку

Шток призначений для з'єднання поршня з механізмом сполучення з кроковим двигуном. Він різьбою кріпиться до поршня і до механізму сполучення. Різьба, яка з'єднує шток з механізмом сполучення має крок 0.5мм. Розмір різьби вибраний таким чином, щоб забезпечити переміщення поршня на потрібну віддадь (1 оберт двигуна переміщає поршень на 0.5мм). Вимірювальна камера призначена є проміжною ланкою, до якої кріпиться давач, капіляр і корпус вимірювального блоку. Саме по внутрішній порожнині вимірювальної камери тиск подається до давача тиску.

Ланка сполучення з кроковим двигуном призначена для перетворення обертового руху крокового двигуна в поступальний рух поршня.

2.4 Розробка програми функціонування мікроконтролера

Дана програма необхідна для адекватного функціонування всіх блоків пристрою і правильного керування цими блоками мікроконтролером, який є управляючим елементом пристрою. Програма також необхідна для задання функцій, які повинен виконувати даний пристрій.

Дана програма записується в пам'ять програм, і оскільки вона виконується мікроконтролером безпосередньо в процесі роботи, то вона записується в пам'ять в кодах команд мікроконтролера. Представлена в такому вигляді програма складається з нулів і одиниць або шістнадцяткових чисел і є дуже важко зрозумілою. Для кращого сприйняття таких програм використовуються мнемонічні команди, які являють собою мову асемблера для мікроконтролера. Програми в основному пишуть за допомогою мнемонік, а потім спеціальні програми переводять мнемоніки в машинні коди відповідного процесора і після цього їх можна записувати в пам'ять програм. Тому програму для даного пристрою ми також будемо писати за допомогою мнемонічних команд. Дана програма є досить складною і вона задіює такі блоки мікроконтролера: таймер-лічильник подій 1, блок послідовного інтерфейсу і порти мікроконтролера. В програмі використовуються команди переносу, команди умовного переходу та інші. Блок-схема алгоритму функціонування наведена на рисунку 2.12.

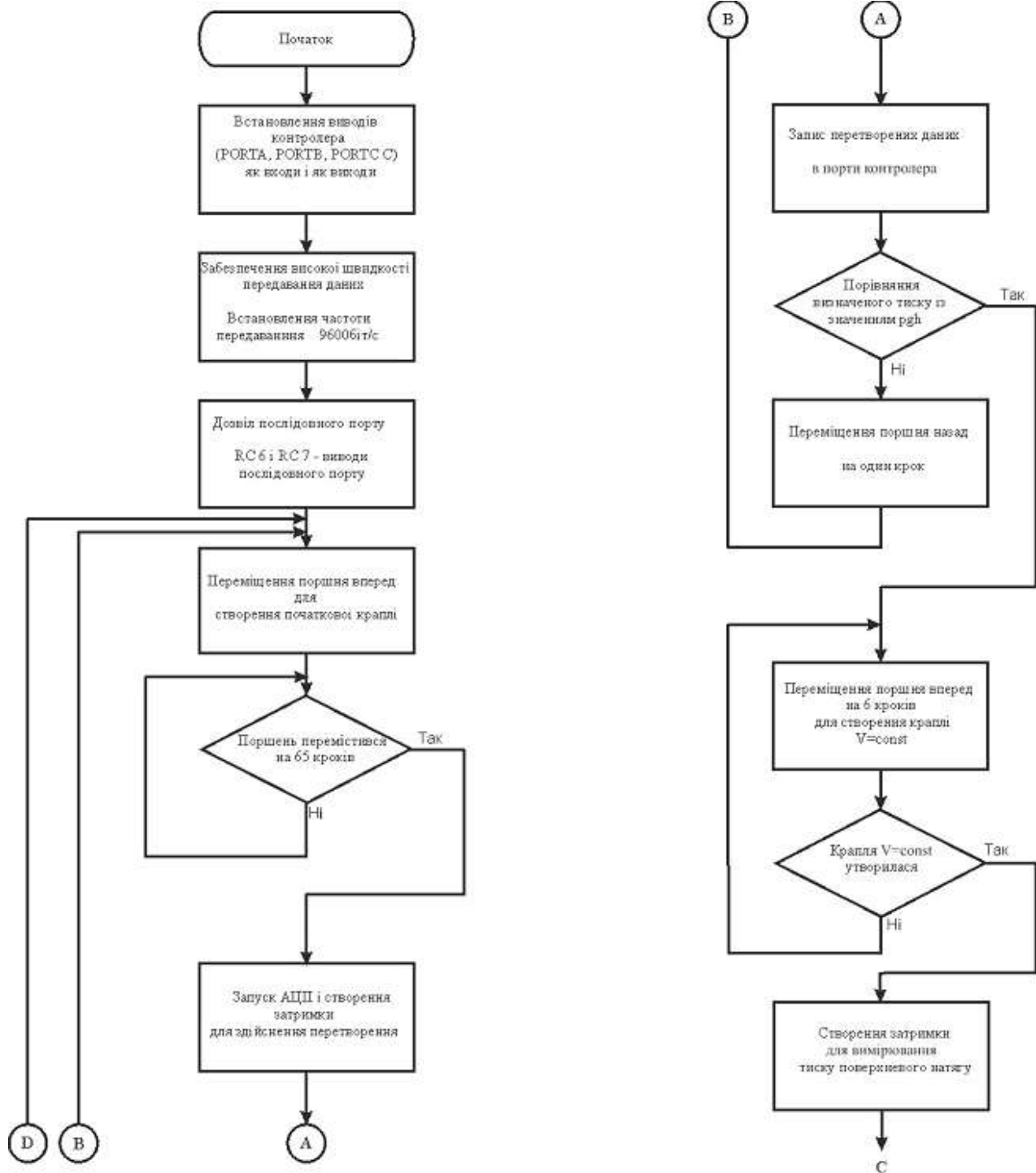


Рисунок 2.12 - Блок-схема алгоритму функціонування

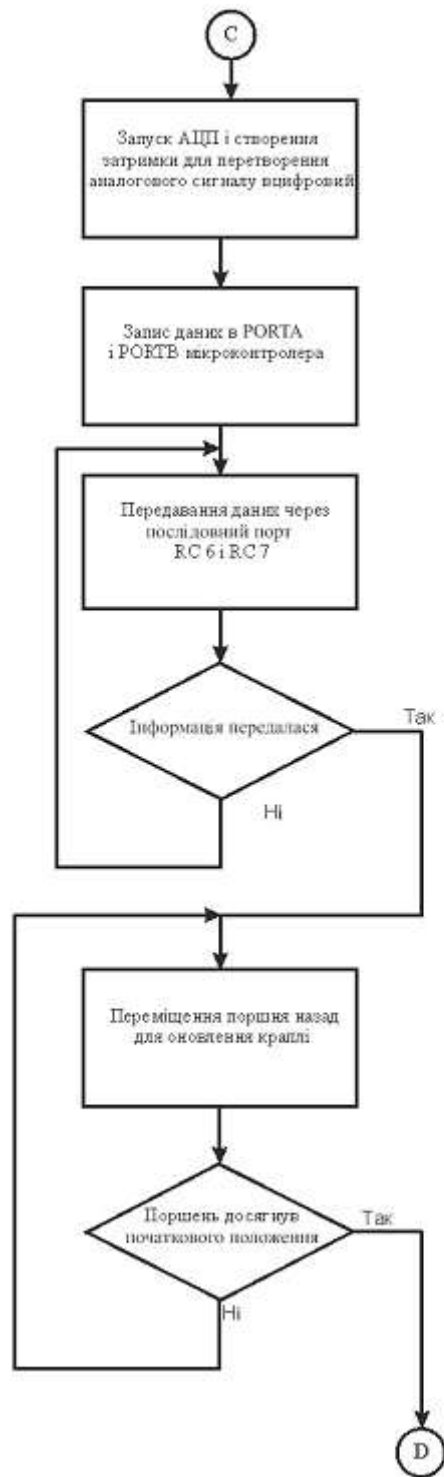


Рисунок 2.12 - Блок-схема алгоритму функціонування

3 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

3.1 Аналіз видів похибок

Забезпечення високої точності вимірювань – важке завдання, і вирішення її належить сфері метрологічного забезпечення. Дослідника, чи технолога цікавить в кінцевому результаті похибка отриманих ними результатів вимірювання. Проте ця похибка складається з багатьох складових. Різновидність прояву похибок та причин їх виявлення викликало необхідність поділу цих складових на певні типи.

Похибка результату вимірювань – це відхилення результатів вимірювання від істинного (дійсного) значення вимірюваної величини.

Аналізуючи причини виникнення похибок, необхідно в першу чергу виділити ті з них, які суттєво впливають на результат вимірювання.

В залежності від форми вираження розрізняють абсолютну і відносну похибки. Абсолютною називають похибку, яка показує на скільки результат вимірювання відрізняється від істинного значення вимірюваної величини [13].

Тобто

$$\Delta = A - X_{\text{ист}}, \quad (3.1)$$

де Δ - абсолютна похибка вимірювань; A – результат вимірювання; $X_{\text{ист}}$ – істинне значення вимірюваної величини.

Абсолютна похибка виражається в тих же одиницях, що й вимірювальна величина.

Відносна похибка вимірювань представляє собою відношення абсолютної похибки вимірювання до істинного значення вимірюваної величини. Відносну похибку визначають в процентах за формулою:

$$\delta = \frac{A - X_{\text{ист}}}{X_{\text{ист}}} \cdot 100 = \frac{\Delta}{X_{\text{ист}}} \quad (3.2)$$

До похибок засобів вимірювання належать інструментальні похибки, методичні похибки.

Інструментальні похибки є в кожному засобі вимірювань, вони можуть бути визначені при його випробуваннях і занесені в паспорт на цей засіб.

Методичні похибки – це такі похибки, які пов'язані з вибраним методом вимірювань даної величини.

Залежно від умов та режиму вимірювання розрізняють статичні та динамічні похибки вимірювальних приладів. Статична – це похибка, яка не залежить від швидкості зміни вимірюваної величини з часом. Статичні похибки вимірювальних приладів виникають, коли з її допомогою змінюється постійна величина. Динамічна – це похибка, яка залежить від швидкості зміни вимірюваної величини з часом. Виникнення динамічних похибок зумовлене інерційністю елементів вимірювальної ланки вимірювального засобу, тобто перетворення у вимірювальній ланці відбувається не миттєво, а потребує певного часу.

Динамічною похибкою засобу вимірювання є різниця між похибкою засобу вимірювання в динамічних умовах та його статичною похибкою, яка відповідає значенню величини в даний момент часу.

Залежно від характеру виявлення, можливості усунення та причини виникнення розрізняють систематичні та випадкові похибки. Систематичні похибки – це складові похибки вимірювання, які постійно або закономірно змінюються під час повторних вимірювань однієї й тієї ж величини.

Причинами систематичної складової похибок вимірювань (системних помилок) є: відхилення параметрів фактичного вимірювального приладу від розрахункових значень, зазначених у схемі; дисбаланс певних частин вимірювального приладу відносно осі обертання, що призводить до додаткового обертання через зазори в механізмі; помилки калібрування або зміщення деяких шкал; знос робочих поверхонь деталей вимірювального приладу; старіння деталей; несправності вимірювального приладу тощо.

Ззовні систематичну похибку неможливо виявити. Виявити її можна тільки при повірці шляхом порівняння робочих засобів вимірювання з зразковими.

Випадковою називають складову похибки, яка змінюється випадково при повторному вимірюванні однієї і тієї ж величини. Випадкова похибка виникає,

коли одночасно працює кілька джерел, кожне з яких впливає на результат вимірювання невідомим чином, а сумарний вплив усіх джерел може бути досить великим, тобто це похибка, знак або величину якої неможливо передбачити [11].

Поряд з систематичною та випадковою похибками існує ще і прогресуюча похибка. Прогресуюча похибка змінюється в часі і ця зміна залежить від зміни характеристик окремих елементів засобу вимірювання.

Систематичне відхилення експериментальних даних від вибраної характеристики засобу вимірювання називають похибкою адекватності.

Проте є також і похибка градування, яка залежить від тих похибок взірцевих засобів вимірювання за допомогою яких здійснювалося експериментальне градування робочого засобу вимірювання.

Похибки засобу вимірювань, які залежать від величини вхідного сигналу називаються мультиплікативними, а ті що не залежать – адитивними.

Ультразвуковий рівнемір складається з багатьох блоків і однією з складових похибок системи є похибка квантування.

3.2 Розрахунок основної допустимої похибки системи

Оскільки розроблювана нами система складається з ряду блоків та вузлів, то і основна допустима похибка буде теж складатись з складових похибок її блоків і вузлів. Значення цієї похибки може суттєво залежати від зовнішніх факторів, які впливають на роботу системи.

На практиці вимірювань часто постає задача визначення сумарної (результуючої) похибки по відомих значенням складових цієї похибки.

Знаходження сумарної систематичної похибки по відомих систематичним похибкам сумуючих складових не викликає труднощів. В цьому випадку при розрахунку приймають $r=0$, якщо випадкові складові можна рахувати невідомими, або рівними одиниці з знаком плюс або мінус, якщо помітна кореляція між сумуючими випадковими складовими похибки. Розглянемо більш детально сумування випадкових похибок [13].

Будемо вважати, що результуюча похибок вимірювань складається з n випадкових складових, які мають нормальний закон розподілу. Знаючи довірочну імовірність і інтервал довіри для кожної складової похибки, можна знайти середньоквадратичне відхилення кожної із них за формулою:

$$\sigma_i = \frac{\delta_{im}}{Zp_i} \quad (3.3)$$

де Zp_i - коефіцієнт, взятий з таблиць для нормального розподілу і відповідної довірочної імовірності P_i .

Якщо імовірність довіри для всіх складових однакова і рівна P , тоді використовують вираз (3.3) дістанемо:

а) для корельованих складових:

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sum_{i=1}^n \pm \delta_{im}}{Z_p} \quad (3.4)$$

де знак $\pm$ означає, що для складових з позитивною кореляцією σ_i і δ_{im} потрібно брати з знаком плюс, а для складової з негативною кореляцією – з знаком мінус;

б) для незалежних складових ($r_{ij}=0$):

$$\sigma_\Sigma = \frac{\sqrt{\sum \delta_{im}^2}}{Z_p}. \quad (3.5)$$

Похибка, що виникає при об'єднанні нормально розподілених компонентів, має такий самий нормальний розподіл. Тому інтервал довіри сумарної похибки з імовірною довірою P може бути знайдений як:

$$\delta_\Sigma = \pm Z_p \sigma_\Sigma \quad (3.6)$$

де δ_Σ - границя інтервалу довіри сумарної похибки.

З врахуванням (3.4) (3.5) вираз (3.6) матиме вигляд:

а) для корельованих складових:

$$\delta_\Sigma = \pm \sum \pm \delta_{im} \quad (3.7)$$

б) для незалежних складових:

$$\delta_\Sigma = \pm \sqrt{\sum \delta_{im}^2} \quad (3.8)$$

Якщо в виразі (3.6) всі складові мають позитивну кореляцію, тоді

$$\delta_{\Sigma} = \pm \sqrt{\delta_{im}} \quad (3.9)$$

Сумування похибок по виразу (3.8) називається арифметичним сумуванням, а по виразу (3.9) – геометричним сумуванням.

Дійсні значення коефіцієнтів кореляції по абсолютному значенню можуть знаходитись в границі від 0 до 1, тому арифметичне сумування звичайно дає завищені значення похибки.

Сумування випадкових похибок при їх законах розподілу, які відрізняються від нормальних.

Складність знаходження сумарної похибки в цьому випадку полягає в тому, що закон розподілу сумарної похибки залежить від конкретних видів і характеристик законів розподілу сумарних складових. Наприклад, при складанні двох незалежних похибок, які мають рівномірні закони розподілу з однаковими дисперсіями, результуюча похибка буде розподілятися по трикутному закону. Якщо ці рівномірні закони мають різні дисперсії, тоді результативний закон буде мати вид у вигляді трапеції. Тому для встановлення інтервалу довіри сумарної похибки необхідно в кожному конкретному випадку шукати методами теорії імовірності результуючий закон розподілу по відомим законам сумування складових.

Можливі приблизні способи визначення інтервалу довіри похибки без встановлення результативного закону розподілу. Перший базується на центральній граничній теоремі: якщо число сумуючих незалежних складових достатньо велике, тоді результуючий закон розподілу близький до нормального і в якості коефіцієнту $k_{\Sigma}^{(p)}$ можна приймати z_p . Другий – при сумуванні незалежних складових, які мають закон розподілу.

Розподіл похибок ЗВ на основі центральної граничної теореми теорії імовірності мають бути завжди близькі до нормативного розподілу. Але більш детально випробування фактичного розподілу похибок системи показали, що закони розподілу похибок різноманітні. Це різко ускладнює призначення верхньої і нижньої границі лінії похибки, а тому і всю методику створення суджень про

положення лінії похибки системи в границях нормуючих границь і умов виходу частини смуги похибки за нормуючі границі.

Це більше ускладнюється ще тим, що форма закону розподілу в поперечному січенні смуги різна не тільки для систем різних типів, але може суттєво відхилятися у окремих видах систем одного і того самого типу. І більш того, навіть у даному виді систем вона може змінюватися по довжині смуги похибки, тобто мати одну форму при $x=0$ і поступово набирати зовсім іншу форму до кінця смуги.

Більш детальним дослідженням цієї властивості граничних квантилів при $P_d=0,9$ показали, що інтегральні криві багатьох класів симетричних розподілів в області 0,05 і 0,95 квантилів перетинаються між собою хоча і не строго в одній точці, зате в дуже вузькому інтервалі. Тому з похибкою в $0,05\sigma$, що в більшості технічних розрахунків, похибка з імовірністю $P_d=0,9$ може бути визначена як $\Delta_{0,9}=1,6\sigma$, а верхні і нижні границі можна знайти по формулам.

Таким чином, при використанні для оцінки випадкової складової похибки з $P_d=0,9$ оцінки $\Delta_{0,9}=1,6\sigma$ довірочна імовірність виходу похибки за симетричні границі буде мати значення $P_d=0,95$, так як вихід за нижню границю буде практично відсутній.

$$\delta_z = \frac{\Delta_\Sigma}{U_{нвих}} \quad (3.10)$$

$$\Delta_\Sigma = Z \cdot \sigma_\Sigma, \quad (3.11)$$

де σ_Σ – сумарне середньо - квадратичне відхилення(СКВ) похибок;

$U_{нвих}$ – номінальне значення вихідної напруги;

Z- коефіцієнт Ст'юдента (коефіцієнт довіри), який по нормальному закону розподілу рівний $Z=1,96$.

$$\sigma_\Sigma = \sqrt{\sum \sigma_i^2}, \quad (3.12)$$

де σ_i - СКВ похибок окремих елементів і яке рівне

$$\sigma_i = \frac{\Delta_i}{Z}, \quad (3.13)$$

де

$$\Delta_i = \delta_i \cdot U_n \quad (3.14)$$

Вхідною інформацією при розрахунку сумарної похибки приладу є похибка кожного функціонального блоку, з якої він складається.

Наведемо значення похибок кожного функціонального блоку системи:

- похибка давача тиску – 0,1 % ;
- похибка масштабуючого підсилювача – 0,5%;
- похибка генератора – 0,1% ;
- похибка АЦП – 0,05% ;
- похибка регістрів – 0,05% ;
- похибка крокового двигуна – 0.5%;
- похибка мікроконтролера – 0,05% .

Розрахунок значень абсолютних похибок окремих блоків приладу наведено нижче:

$$\Delta_1 = 0,001 \cdot 5 = 0,005 \text{ В}$$

$$\Delta_2 = 0,005 \cdot 15 = 0,075 \text{ В}$$

$$\Delta_3 = 0,001 \cdot 5 = 0,005 \text{ В}$$

$$\Delta_4 = 0,0005 \cdot 5 = 0,0025 \text{ В}$$

$$\Delta_5 = 0,0005 \cdot 5 = 0,0025 \text{ В}$$

$$\Delta_6 = 0,005 \cdot 5 = 0,025 \text{ В}$$

$$\Delta_7 = 0,0005 \cdot 5 = 0,0025 \text{ В}$$

Знайдемо СКВ кожної ланки згідно (3.13):

$$\sigma_1 = \frac{0,005}{1,96} = 0,0025,$$

$$\sigma_2 = \frac{0,075}{1,96} = 0,038,$$

$$\sigma_3 = \frac{0,005}{1,96} = 0,0025,$$

$$\sigma_4 = \frac{0,0025}{1,96} = 0,001,$$

$$\sigma_5 = \frac{0,0025}{1,96} = 0,001,$$

$$\sigma_6 = \frac{0,025}{1,96} = 0,013,$$

$$\sigma_7 = \frac{0,0025}{1,96} = 0,001.$$

Знаючи похибку кожного блоку, знайдемо СКВ похибок згідно (3.3):

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{0,0025^2 + 0,038^2 + 0,0025^2 + 0,001^2 + 0,001^2 + 0,013^2 + 0,001^2} = 0,04$$

Знайшовши СКВ, знайдемо сумарну відносну похибку рівнеміру за формулами (3.3), (3.4):

$$\Delta_{\Sigma} = 0,04 \cdot 1,96 = 0,0784$$

Прийнявши, що вихідна напруга системи – 25В, знайдемо:

$$\delta_{\Sigma P} = \frac{0,0784}{25} \cdot 100\% = 0,3\%.$$

Таким чином сумарна похибка системи складає 0, 3%, що є достатньою для роботи системи.

4 БЕЗПЕКА ЖИТТЄДІЯЛЬНОСТІ, ОСНОВИ ОХОРОНИ ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпек і шкідливостей виробничого середовища

Спроектowana система контролю екологічних показників призначена для експлуатації в стаціонарному режимі, зокрема для контролю та аналізу шкідливих викидів у відстійниках. До працівників шкідливих професій можна віднести чергових інженерів та операторів насосного цеху, які працюють в умовах підвищеного шуму та вібрацій. Враховуючи специфіку їх роботи, будуть наведені вимоги та рекомендації стосовно режиму праці та відпочинку, освітленості та вентиляції приміщень, і ін. [16].

При встановленні, налагоджуванні і експлуатації системи контролю екологічних параметрів існує потенційна небезпека отримання травм, ураження електричним струмом, отруєння випарами хімічних речовин.

Основними причинами одержання травм працівниками є :

- недотримання вимог і правил техніки безпеки при монтажі, налаштуванні і експлуатації системи контролю екологічних параметрів;
- пошкодження ізоляції проводки, поява напруги на корпусах електрообладнання при відсутності захисного заземлення і занулення;
- поява напруги на відключених струмопровідних частинах, де працюють люди, внаслідок помилкового ввімкнення;
- випадкове ввімкнення обладнання на якому виконуються роботи.

Основними заходами попередження нещасних випадків є:

- дотримання працівниками вимог техніки безпеки;
- виконання всіх робіт згідно регламентів;
- захисне заземлення і занулення установок і агрегатів;
- використання тільки сертифікованих матеріалів при монтажі системи.

Метеорологічні умови на робочому місці визначаються передусім кліматографічними особливостями місцевості. Шкідливі виробничі фактори: підвищена або понижена температура в робочій зоні, підвищений рівень шуму та вібрації в виробничому приміщенні.

Виробничий шум – це комплекс звуків, які змінюються по висоті та амплітуді. Рівень інтенсивності звуку вимірюється в децибелах і визначається логарифмом відношень інтенсивностей

$$L_i = 10 \cdot \lg(I/I_0), \quad (4.1)$$

де I – сила даного звуку певної частоти;

I_0 – сила того ж звуку на порозі чутливості.

Порогом чутливості називається максимальна сила звуку, яка відчувається людиною з нормальним слухом.

При високому рівні гучності шум шкідливо впливає на нервову систему людини і її органи слуху, що викликає роздратування, втому, послаблення уваги, зниження роботоздатності і глухість. Це приводить до нещасних випадків і до значного зниження продуктивності праці.

Вібрація та механічні трясіння характеризуються періодичними коливаннями дозвукової частоти. При перекачуванні рідини трубопроводами — це сили, що виникають на насосних станціях, при роботі перекачувальних агрегатів, роботі нагнітачів. В багатьох випадках шум і вібрації діють одночасно і з одного джерела.

Для боротьби з шумом та вібрацією приймають захисні заходи при будівництві об'єктів (використовують звукопоглинаючі матеріали), особливо при будівництві операторних та щитових, при проектуванні і їх експлуатації (усунення причин шуму або послаблення його в джерелі).

На основі даних, зібраних під час переддипломної практики та з літературних джерел, для конкретних виробничих умов, визначено та проаналізовано основні потенційні небезпеки та шкідливості. Ці дані зібрані в таблицях 4.1 та 4.2.

4.2 Забезпечення нормальних умов праці

Забезпечення здорових і безпечних умов праці у виробничій сфері досягається при проектуванні, за рахунок дотримання діючих нормативних

документів, а для існуючих об'єктів – шляхом порівняння фактичних значень з нормативними і при виявленні відхилень розробкою та впровадженням заходів зі створення умов праці згідно вимог нормативних документів [16].

При високій температурі повітря знижується увага, з'являється поспішливість і необачність; при низькій - зменшується рухомість кінцівок внаслідок інтенсивної тепловіддачі організму. Впливає на тепловіддачу організму і вологість повітря: нормально при температурі біля 18° С вологість повинна знаходитися в межах від 35 до 70%. При меншій відносній вологості повітря рахується сухим, при більшій – з підвищеною вологістю.

Таблиця 4.1 – Потенційно небезпечні виробничі фактори

Виробничий об'єкт	Небезпечний фактор (технологічна операція)	Фактичне значення	Нормативне значення	Характер дії на людину
Електро-двигун насосної установки	Вібрація загальна	83 дБ $f_{с.г.}=63\text{Гц}$	109 дБ $f_{с.г.}=63\text{Гц}$	Швидка втомлюваність біль в суглобах
	Шум	80 дБ $f_{с.г.}=63\text{Гц}$	92 дБ $f_{с.г.}=63\text{Гц}$	Втрата слуху, головний біль, втомлюваність
	Електричний струм	$I=75\text{А}$ $U=380\text{В}$	$I=0.1\text{А}$ $U=42\text{В}$	Зупинка дихання, зупинка серця

Це від'ємно впливає на організмі людини. Сухе повітря приводить до підвищеного випаровування і внаслідок цього з'являється сухість слизових оболонок і шкіри. Дуже вологе повітря, навпаки, послаблює випаровування. Дані про характеристики метеорологічних умов у виробничих приміщеннях наводяться в таблиці 4.3.

Для створення та підтримання необхідних санітарно-гігієнічних умов виробничих приміщень застосовується опалення та вентиляція, характеристика

яких наводиться в таблиці 4.4. Нормативна зорова робота передбачає створення на робочих місцях освітлення згідно санітарних норм і правил, значення наводяться в таблиці 4.5.

При недостатньому природному освітленні використовують загальне освітлення – при якому в денний час використовується одночасно природне і штучне освітлення.

Таблиця 4.2 – Характеристика шкідливих речовин

Назва речовини	ГДК — гранично допустима концентрація даної речовини		Перша допомога при отруєнні
	В робочій зоні мг/л	Середньодобова в атмосфері населених пунктів мг/м ³	
Сірководень	10	0,008	
Ацетон	200	0,35	Свіже повітря, міцний солодкий чай чи кава.
Бензин	300	5	20-30 крапель валеріани

Таблиця 4.3 – Нормативні характеристики метеорологічних умов у виробничих приміщеннях

Виробниче приміщення	Категорія важких фізичних робіт	Період року	Температура °С	Відносна вологість, %	Швидкість руху повітря, м/с
Відстійник	І І	Теплий	20÷22	40÷70	0.2÷0.3
		Холодний	17÷19	40÷70	0.2÷0.3

Таблиця 4.4 — Характеристика системи вентиляції

Виробниче приміщення	Вид вентиляції	Вентиляційне обладнання	Кратність повітрообміну 1/год
Відстійник	Механічна місцева	Кондиціонери повного кондиціювання повітря	10

Штучне освітлення застосовується для освітлення робочих поверхонь в темний період доби чи при недостатньому природному освітленні. Створюється воно штучними джерелами світла (лампами). Так як робота з вимірювальною системою зводиться до 1 годин в день, причому не підряд, а по кілька хвилин (для технічної перевірки і виявлення візуальних пошкоджень), то особливих рекомендацій по роботі з системою для чергового інженера не потрібно. Для розміщення системи слід вибирати місце, де її буде добре видно.

Таблиця 4.5 — Характеристика штучної освітленості робочих місць

Виробниче приміщення	Розряд та підрозряд зорової роботи	Освітленість, Лк				Тип світильників
		Загальна	Комбінована	Аварійна	Евакуаційна	
Відстійник	Будь-яка	60	70	5	2	НСП 21

При виконанні робіт, що супроводжуються впливом шкідливих факторів на організм працівників використовуються індивідуальні і групові засоби захисту, перелік яких міститься в таблиці 4.6.

Під час роботи чергового інженера через нервову навантаженість знижується увага і зорове сприйняття, занижена м'язова активність. Для зниження монотонності в роботі, перерви відпочинку потрібно супроводжувати вправами для рук та розминки хребта, особливо шийних хребців і м'язів.

Таблиця 4.6 — Перелік засобів захисту

Назва виробництва, обладнання, шкідливий фактор	Вид та призначення засобу захисту	Назва засобу захисту	Професія працівника
Відстійник: насосні установки	Індивідуальний метод захисту	1) ІЗЗ “Беруші” для захисту від шуму 2) ІЗЗ ВЦНИИОТ для захисту від шуму 3) Респіратор Р-1 для захисту від шкідливих випарів	Інженер по обслуговуванню системи

4.3 Розрахункова частина

Для уникнення шкідливого впливу завад на роботу схеми необхідно передбачити і розрахувати заземлення системи.

Вихідними даними для розрахунку заземлення є:

- напруга живлення приладу – 220В, потужність < 50 ВА;
- опір заземлення повинен складати $R < 4 \text{ Ом}$.

В якості заземлення використовується труба:

- довжина – $L=2\text{м}$.
- діаметр – $d=0.075 \text{ м}$.
- глибина заземлення – $t=1\text{м}$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту ρ складає для суглинків $150 \text{ Ом}\cdot\text{м}$; коефіцієнт використання заземлювача $K_b=0.8$.

Визначимо опір розтікання струму з одного заземлювача, який розташовано вертикально за формулою:

$$R_1 = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot 4} \cdot \ln \frac{2 \cdot L}{d} + 0.5 \cdot \ln \frac{4 \cdot t + L}{4 \cdot t - L}, \quad (4.2)$$

де $L=2\text{м}$ – довжина заземлювача;

$d=0.075\text{м}$ – діаметр заземлювача;

$t=1\text{м}$ – глибина залягання заземлювача.

З формули (4.2) маємо:

$$R_1 = \frac{150}{2 \cdot 3.14 \cdot 4} \cdot \ln \frac{2 \cdot 2}{0.075} + 0.5 \cdot \ln \frac{4 \cdot 1 + 2}{4 \cdot 1 - 2} = 27.03 \text{ Ом.}$$

визначимо необхідну кількість паралельно з'єднаних заземлювачів за формулою

$$n = \frac{R_s}{R \cdot k_b}, \quad (4.3)$$

де $k_b=0.8$ – коефіцієнт використання заземлювачів.

З формули (4.3)

$$n = \frac{27}{4 \cdot 0.8} = 8.43.$$

Вибираємо, що необхідно 9 заземлювачів. Визначимо опір горизонтального заземлювача, який використовується для з'єднання електродів розміщених вертикально, враховуючи, що він має форму смуги прямокутного січення і виконаний із сталі:

$$R_r = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot 4} \cdot \ln \frac{2 \cdot l}{b \cdot t}, \quad (4.4)$$

де $b=0,1\text{м}$ – ширина горизонтального заземлювача;

$l=1,05 \cdot 1.5 \cdot 9=14.175$ – довжина горизонтального електрода при розташуванні вертикальних електродів в один ряд:

$$R_r = \frac{150}{4 \cdot \pi \cdot 4} \cdot \ln \frac{2 \cdot 14.175}{0.1 \cdot 1} = 7.49 \text{ Ом.}$$

Визначимо загальний опір розтікання струму заземлювача, який використовується для забезпечення заземлення комплексу за формулою:

$$R_i = \frac{R_b \cdot R_{ri}}{R_r \cdot k_u + R_b \cdot n \cdot k_b}. \quad (4.5)$$

Розрахувавши,

$$R_i = \frac{27 \cdot 7.49}{7.49 \cdot 0.5 + 27 \cdot 9 \cdot 0.8} = 1.02 \text{ Ом}$$

бачимо, що необхідний рівень опору заземлення досягнуто.

ВИСНОВКИ

В даній кваліфікаційній роботі бакалавра розроблено систему визначення динамічних характеристик поверхонь розділу фаз. Дана система забезпечує визначення тиску поверхневого натягу поверхні розділу фаз. В процесі виконання дипломного проекту отримані наступні результати:

- розроблена функціональна схема системи;
- розроблено вимірювальний блок, який формує краплю постійного об'єму;
- розроблена принципова електрична схема вимірювальної системи;
- розроблена Assembler-програма функціонування мікроконтролера;
- розроблений алгоритм функціонування вимірювальної системи.

Програмне забезпечення мікроконтролера забезпечує збирання інформації, її переробку і передачу на віддаль.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ НА ДЖЕРЕЛА

1. Малько О.Г., Кісіль І.С., Малько А.О. Характеристики меніску типу лежача крапля в околі максимального тиску. Методи і прилади контролю якості. – 2008. - №21
2. Пилипенко О. І. Поверхневі явища та дисперсні системи : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання зі спеціальності 161 – Хімічні технології та інженерія / О. І. Пилипенко; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 276 с.
3. Бойко В. І. Основи технічної електроніки: У 2 кн. Кн.2 Схемотехніка: підручник / Бойко В. І., Гурій А. М., Жуйков В. Я. та ін. – К. : Вища школа, 2007. – 510 с.
4. Структурна схема та принцип роботи мікросхеми ШІМ-контролера з додатковою зворотним зв'язком по струму. – Режим доступу:<http://ua.nauchebe.net/2015/04/strukturna-sxema-ta-princip-roboti-mikrosxemi-shim-kontrolera-z-dodatkovoyu-zvorotnim-zvyazkom-po-strumu/>
5. Ревко А.С. Широтно-імпульсна модуляція в квазірезонансних перетворювачах / А. С. Ревко, Д. М. Брика // Технічна електродинаміка. Тематичний випуск: Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 5. – 2006. – С. 125-128.
6. Хіль М. І. Підвищення якості імпульсних джерел живлення РЕА. / М. І. Хіль, Д. Г. Єгоров, О. В. Шевченко // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля №17(188) – 2012. – С. 228-233.
7. The basics of active power factor correction [Електроний ресурс] / LAZAR's power factor correction guide – 2013, 2017 Lazar Rozenblat. All rights reserved. Режим доступу: <http://www.powerfactor.us/active.html>
8. Texas Instruments [Електроний ресурс] / TL494 Pulse-Width-Modulation Control Circuits. Режим доступу: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tl494.pdf>
9. Мироненко П.С. Стенд для перевірки працездатності низькочастотних інерціальних модулів / П.С. Мироненко, О.М. Павловський // Вісник НТУУ «КПІ» Серія «Приладобудування» – 2018. –№56 (2), с. 7-13.

10. Трембач Р.Б. Теорія електричних та магнітних кіл. Навчальний посібник / Р.Б. Трембач–Тернопіль: ТНЕУ, 2015.
11. Трембач Р.Б., Шовкун О.П. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Інформаційно – вимірювальні системи” Модуль І. «Вимірювальна техніка» – Тернопіль: ТНТУ., 2024. – 67 с.
12. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка” Модуль 3. «Імпульсна техніка, вторинні джерела живлення, основи цифрової електроніки» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 26с.
13. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання до виконання лабораторних робіт з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка ” Модуль 4. «Мікросхемотехніка» – Тернопіль: ТНТУ, 2024. – 44с.
14. Житецький В.Ц. Основи охорони праці.- Львів: Афіша, 2000.- 350 с.
15. Коноваленко І. В. Платформа .NET та мова програмування C# 8.0 : навч. посіб. / І. В. Коноваленко, П. О. Марущак. – Тернопіль : В. А. Паляниця, 2020 – 320 с. <http://library.megu.edu.ua:8180/jspui/handle/123456789/4115>
16. Проектування мікропроцесорних систем керування: навчальний посібник / І.Р. Козбур, П.О. Марущак, В.Р. Медвідь, В.Б. Савків, В.П. Пісьціо. – Тернопіль: Вид-во ТНТУ імені Івана Пулюя, 2022. – 324 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39189>
17. Капаціла Ю.Б., Савків В.Б. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 60 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48495>
18. Капаціла Ю.Б., Шовкун О.П. Конструкторсько-технологічна практика. Методичні вказівки для здобувачів освітнього ступеня «бакалавр» спеціальності «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2025. 22 с.
19. Козбур І.Р., Методичні вказівки до виконання лабораторної роботи «Дослідження частотних характеристик неперервних лінійних систем», по

- курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – с. 16. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39207>
20. Козбур І.Р., «Дослідження часових характеристик неперервних лінійних систем», по курсу «Теорія автоматичного управління», для студентів 3 курсу спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Авт.: Козбур І.Р., Козбур Г.В. Марущак П.О., Савків В.Б. – Тернопіль: ТНТУ, ФПТ, каф. АВ, – 2022. – 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/39206>
21. Автоматизація виробничих процесів. Навчальний посібник для технічних спеціальностей вищих навчальних закладів. / Я.І. Проць, В.Б. Савків, О.К. Шкодзінський, О.Л. Ляшук. Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 344 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/123456789/1551>
22. Методичні вказівки по роботі з програмним симулятором "AVR simulator IDE" з курсу "Мікропроцесорні та програмні засоби автоматизації" / укл. : В.Р. Медвідь, В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 21 с.
23. Моделювання нелінійних систем керування у пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур, Г.В. Козбур, Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2019. - 19 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28057>
24. Моделювання систем керування в пакеті MATLAB SIMULINK, методичні вказівки до виконання лабораторної роботи по курсу «Комп'ютерні методи дослідження систем автоматичного управління», для студентів 4 курсу спеціальності 6.050201 «Системна інженерія» / укл. : І.Р. Козбур, Г.В. Козбур, Р.І. Михайлишин. – Тернопіль : ТНТУ, 2019. - 23 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/28056>
25. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Multisim. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу

"Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо . - Тернопіль : ТНТУ Імені Івана Пулюя, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26404>

26. Проектування та аналіз електричних схем в програмному середовищі Proteus VSM. Методичні вказівки до самостійної роботи студентів з курсу "Проектування мікропроцесорних систем керування технологічними процесами" / укл. : В.Р. Медвідь , В.П. Пісьціо. - Тернопіль : ТНТУ, 2018. - 26 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/26397>
27. Методичні вказівки до курсового проектування з курсу "Проектування систем автоматизації" / Савків В.Б., Шкодзінський О.К., Пісьціо В.П. Тернопіль : ТНТУ, 2025. 128 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48646>
28. Лабораторний практикум з проектування та моделювання роботи електропневматичних схем у середовищі програмного пакету «FluidSIM Pneumatics» з курсу «Технічні засоби автоматизації» / укл. : О.К. Шкодзінський. – Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2020. - 32 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/31418>
29. Трембач Р.Б., Медвідь В.Р. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни “Електроніка і мікросхемотехніка”. – Тернопіль: ТНТУ ім. І. Пулюя, 2024. – 53 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/44635>
30. Аналіз стійкості і якості електромеханічної слідкуючої системи. : Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Теорія автоматичного управління», для здобувачів спеціальності 174 «Автоматизація, комп’ютерно-інтегровані технології та робототехніка» освітньо-професійних програм «Комп’ютерно-інтегровані системи автоматики та робототехніки», «Комп’ютеризовані системи управління та прикладне програмування». / укл. І.Р. Козбур, В.П. Пісьціо, В.Б. Савків, П.С. Федорів. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. – 67 с
31. Методичні вказівки для написання розділу «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» в кваліфікаційних роботах здобувачів освітнього рівня „бакалавр”. Для студентів всіх форм навчання рівень вищої освіти перший

(бакалаврський)/ укл.: О. Я. Гурик , І. Б. Окіпний. – Тернопіль: ТНТУ імені Івана Пулюя, 2021. - 20 с.

32. Навчально-методичний посібник до практичних заняття з дисципліни «Безпека життєдіяльності, основи охорони праці» для студентів освітнього ступеня бакалавр усіх спеціальностей та форм навчання / Укладачі : О. Я. Гурик, І. Б. Окіпний, В. С. Сенчишин, С. Ю. Мариненко, О. І. Король. Тернопіль : ТНТУ імені Івана Пулюя, 2025. 123 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/48496>
33. Безпека в надзвичайних ситуаціях. Методичний посібник для здобувачів освітнього ступеня «магістр» всіх спеціальностей денної та заочної (дистанційної) форм навчання / укл.: Стручок В. С. Тернопіль: ФОП Паляниця В. А., 2022. 156 с.
34. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 1 [навчальний посібник]. Львів : «Магнолія 2006», 2013. 256 с.
35. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д., Пасічник В. В. Комп'ютерні мережі. Книга 2. [навчальний посібник]. Львів : "Магнолія 2006", 2014. 312 с.
36. Микитишин А. Г., Митник М. М., Стухляк П. Д. Телекомунікаційні системи та мережі. Тернопіль: Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя, 2017. 384 с.
37. Буров Є., Митник М. Комп'ютерні мережі. (у 2-х томах). Львів, Магнолія, 2018.
38. Комплексна безпека інформаційних мережевих систем. Навчальний посібник для студентів спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» / А. Г. Микитиший, М. М. Митник, О. С. Голотенко, В. В. Карташов. – Тернопіль: ФОП Паляниця В.А., 2023. – 324 с.
<https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42625>
39. Конспект лекцій з дисципліни «Комп'ютерні системи штучного інтелекту» для студентів спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форми здобуття освіти / уклад. І. С. Дідич. // ТНТУ. – 2025. – С. 92. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/50293>

40. Пилипець М. І. Правила заповнення основних форм технологічних документів : навч.-метод. посіб. / Уклад. Пилипець М. І., Ткаченко І. Г., Левкович М. Г., Васильків В. В., Радик Д. Л. Тернопіль : ТДТУ, 2009. 108 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/42995>
41. Паламар М. І., Стрембіцький М. О., Паламар А. М. Проектування комп'ютеризованих вимірювальних систем і комплексів : навч. посіб. Тернопіль : ТНТУ, 2019. 150 с.
42. Савків В.Б., Капаціла Ю.Б., Михайлишин Р.І. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи бакалавра спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології». Тернопіль.: Видавництво ТНТУ. 2021. 50 с. <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/35172>