

Хмельницький національний університет
Факультет інформаційних технологій
Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

бакалавр
Освітній рівень

Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній
установці на базі мікроконтролера ATmega328
Назва теми

КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ
Шифр

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»
Шифр, назва

Спеціальність 123 «Інформаційні системи та технології»
Шифр, назва

Освітня програма «Інформаційні системи та технології»
Назва

Виконав: студент IV курсу, група КІ-21-3 Вадим ОХМАН
Підпис Ініціали, прізвище

Керівник 16.06.2025 Василь СТЕЦЮК
Підпис, дата Ініціали, прізвище

Нормоконтролер Тетяна КИСІЛЬ
Підпис, дата Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
зав. кафедри комп'ютерної
інженерії та інформаційних
систем Ольга ПАВЛОВА
Підпис Ініціали, прізвище

«16» червня 2025 р.

Хмельницький 2025

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ
Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
Освітній рівень БАКАЛАВР
Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ
Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ
Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2025 р.

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА**

Вадиму ОХМАНУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328

Керівник проекту (роботи) Василь СТЕЦЮК, ст. викладач

Прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання

Затверджена наказом ректора університету від 07.02.2025 р. № 23

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.06.2025 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на кваліфікаційну роботу

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328

Проектування системи контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці

Програмно-апаратна реалізація системи контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці

5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслень) _____

Логічні схеми алгоритмів

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Схеми електричні принципів

| | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|
| | | | | |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата |

КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ

Арк.

2

я прийняв

Примітка

виконано

виконано

виконано

виконано

виконано

виконано

виконано

| № рядка | Формат | Позначення | Найменування | Кількість | № екз | Примітка |
|---------|--------|--------------------------|--|-----------|-------|----------|
| | | | <u>Текстові документи</u> | | | |
| 1 | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Пояснювальна записка | 55 | | |
| | | | <u>Графічні матеріали</u> | | | |
| 2 | | КвРКІ 210370.21.03.68 Е8 | Логічні схеми алгоритмів | 1 | | |
| 3 | | КвРКІ 210370.21.03.68 Е8 | Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи | 1 | | |
| 4 | | КвРКІ 210370.21.03.68 Е8 | Схеми електричні принципів | 1 | | |

КвРКІ 210370.21.03.68 ВП

| Зм | Арк | № докум | Підпис | Дата |
|-----------|-----|---------|--------------------|----------|
| Розробив | | Охман | <i>[Signature]</i> | 16.06.25 |
| Перевір. | | Стецюк | <i>[Signature]</i> | 16.06.25 |
| Н. контр. | | Кисіль | <i>[Signature]</i> | 16.06.25 |
| Затв. | | Павлова | <i>[Signature]</i> | 16.06.25 |

Відомість проекту

| Літера | Аркуш | Аркушів |
|--------|-------|---------|
| У | 1 | 1 |

ХНУ, КІ2-22-1

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328».

Автор роботи: Вадим ОХМАН.

Керівник роботи: Василь СТЕЦЬОК.

Пояснювальна записка: 55 с., 11 рис., 3 дод., 49 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

ВАКУУМ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, КЕРУВАННЯ,
МІКРОКОНТРОЛЕР, РОЗРІДЖЕННЯ.

Метою дипломної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи автоматичного контролю й підтримки рівня розрідження у вакуумній установці на основі мікроконтролера ATmega328 з урахуванням обмежень апаратної платформи та особливостей керування тиском у лабораторних умовах.

Об'єктом дослідження є процес підтримки стабільного рівня вакууму в замкненій камері.

Предметом дослідження є структура, принципи роботи та алгоритмічні аспекти реалізації системи автоматичного керування вакуумом на базі простих мікроконтролерних засобів.

Під час дослідження використано метод експериментального моделювання, а також аналіз літературних джерел з автоматичного регулювання, вбудованих систем та цифрової обробки сигналів.


Підпис студента

30.05.2025

Дата

ЗМІСТ

| | |
|---|-----------|
| ВСТУП..... | 3 |
| 1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ | 5 |
| 1.1 Фізичні основи створення та підтримки вакууму..... | 5 |
| 1.2 Класифікація вакуумних систем і методи керування..... | 7 |
| 1.3 Методи вимірювання рівня розрідження у вакуумі | 11 |
| 1.4 Аналіз існуючих технічних рішень та їх обмежень | 14 |
| 1.5 Сутність кіберфізичних систем у керуванні технічними об'єктами | 17 |
| 1.6 Висновки до першого розділу..... | 19 |
| 2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ РОЗРІДЖЕННЯ У ВАКУУМНІЙ УСТАНОВЦІ | 21 |
| 2.1 Постановка задачі автоматичного регулювання вакууму..... | 21 |
| 2.2 Вибір алгоритму керування та його обґрунтування..... | 23 |
| 2.3 PID-регулювання у задачі стабілізації тиску | 26 |
| 2.4 Особливості реалізації алгоритму на мікроконтролері ATmega328 | 28 |
| 2.5 Висновки до другого розділу | 31 |
| 3 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВАКУУМУ | 33 |
| 3.1 Загальна архітектура та структурна схема системи | 33 |
| 3.2 Обґрунтування вибору елементної бази (датчик, насос, контролер) | 36 |
| 3.3 Розробка електричної схеми підключення | 40 |
| 3.4 Реалізація користувацького інтерфейсу (LCD, кнопки, сигналізація) .. | 45 |
| 3.5 Програмне забезпечення: логіка, керування, безпека | 47 |
| 3.6 Тестування розробленого прототипу | 51 |
| 3.7 Висновки до третього розділу..... | 55 |
| ВИСНОВКИ | 57 |
| ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ | 59 |
| ДОДАТОК А | 64 |
| ДОДАТОК Б | 65 |
| ДОДАТОК В | 66 |

КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ

| Зм. | Арк. | № док.ум. | Підпис | Дата | Літера | Аркуш | Аркушів |
|----------|------|---------------|--------|-------|--------|-------|---------|
| Виконав | | Ведим ОХМАГ | | | у | 2 | 72 |
| Перевір. | | Василь СТЕЦЮК | | 16.06 | | | |
| Н.контр. | | Тетяна КИСЛІЬ | | 16.06 | | | |
| Затвер. | | Ольга ПАВЛОВА | | 16.06 | | | |

Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328.
Пояснювальна записка

ХНУ КІ2-21-3

ВСТУП

У сучасній техніці все більше з'являється завдань, у яких необхідно створити й стабільно підтримувати розріджене середовище. Таке середовище, відоме як вакуум, стало незамінним у десятках напрямів - від виготовлення електроніки до упаковки продуктів, від дослідження матеріалів до медичних процедур. Проте однієї лише здатності “відкачати повітря” сьогодні вже недостатньо. Для реальних технологічних процесів вирішальне значення має точність: чи можемо ми не просто досягти певного рівня тиску, а й втримати його стабільним протягом заданого часу?

У багатьох випадках вакуум створюється за допомогою електричного насоса, який просто увімкнений або вимикається вручну. Але такий підхід не дозволяє реагувати на зміну умов - наприклад, при мікропротіканні або при зміні об'єму камери. Тому все частіше постає потреба в автоматизації цих процесів. Саме тут виникає логічна ідея - створити розумну систему, яка сама слідкує за рівнем вакууму та вмикає або вимикає насос тоді, коли це дійсно потрібно.

Завдяки поширенню недорогих мікроконтролерів, таких як ATmega328, стало можливим реалізувати подібні системи навіть на базовому обладнанні. Цей контролер, відомий за платформою Arduino, вже багато років використовується у розробках пристроїв для домашньої автоматизації, наукових експериментів, освітніх проєктів. Його обчислювальна потужність і набір інтерфейсів повністю достатні для керування невеликим насосом і зчитування даних з вакуумного датчика. При цьому, завдяки своїй простоті, така система може бути доступною у виготовленні та легко масштабованою для різних потреб.

У цій роботі ми розробили кіберфізичну систему, що поєднує реальну вакуумну установку з програмованим керуванням. Ми створили пристрій, який не лише виконує вимірювання тиску, а й здатен аналізувати зміни та автоматично коригувати режим роботи насоса. Умовно кажучи, ми навчили електроніку “розуміти” ситуацію в установці й діяти самостійно. Завдяки цьому досягається стабільність розрідження, зменшується знос обладнання, підвищується

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 3 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

енергоєфективність, а головне - користувач більше не мусить постійно втручатися в роботу системи.

Актуальність теми зумовлена кількома чинниками. По-перше, дедалі більше процесів вимагають надійного вакууму - і водночас потребують простих рішень, які не коштують десятки тисяч гривень. По-друге, на ринку недостатньо недорогих систем автоматичного регулювання розрідження для невеликих установок, зокрема таких, які можна було б використати в лабораторії або малому виробництві. І третє, стрімкий розвиток напрямку “розумних пристроїв” та інтернету речей ставить перед інженерами нові виклики: як звичайне обладнання зробити цифровим, доступним для програмного керування та дистанційного моніторингу.

Метою цієї дипломної роботи стало створення функціональної автоматизованої системи, яка контролює та підтримує заданий рівень розрідження у вакуумній установці з використанням мікроконтролера ATmega328.

Щоб досягти поставленої мети, ми виконали такі завдання:

- проаналізували принципи створення та підтримки вакууму в технічних системах;
- дослідили способи вимірювання тиску та обрали відповідний сенсор;
- розробили метод керування на основі PID-регулювання;
- побудували електронну схему з мікроконтролером, насосом та індикаторами;
- написали програму, яка виконує керування в реальному часі;
- протестували систему в різних режимах, оцінивши точність і стабільність її роботи.

Таким чином, ця робота стала прикладом того, як доступні електронні компоненти у поєднанні з правильно реалізованим алгоритмом можуть забезпечити рішення, що раніше вимагало дорогого обладнання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 4 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

1 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖУВАНОЇ ПРОБЛЕМИ

1.1 Фізичні основи створення та підтримки вакууму

Під час роботи з різноманітними технічними або науковими системами нерідко виникає потреба зменшити тиск у замкнутому просторі до значення, нижчого за атмосферне. Такий стан середовища ми називаємо вакуумом. У буквальному розумінні, це простір, у якому практично відсутні молекули газу. Повного вакууму досягти неможливо, але вдається створити розріджене середовище з дуже низькою густиною газу, яке вже дозволяє проводити специфічні фізичні, хімічні чи технологічні процеси.

Щоб уявити, що таке вакуум, досить згадати, що звичайний атмосферний тиск дорівнює приблизно 101,3 кПа або 760 мм рт. ст. [1] Коли ми починаємо відкачувати повітря з посудини, тиск у ній зменшується. Якщо, скажімо, він впав до 100 мм рт. ст., то це означає, що там уже створено суттєве розрідження. У техніці прийнято розділяти вакуум за ступенем: від грубого (низький рівень розрідження) до надвисокого, де тиск настільки малий, що окремі молекули майже не стикаються між собою [2].

Вакуум створюється за допомогою спеціального обладнання - вакуумних насосів. Найпростішим прикладом може бути ручний насос, яким відкачують повітря з ємності, або ж електричний насос, що працює постійно або за потреби. Важливо, що сам факт відкачування ще не гарантує стабільного вакууму [3]. Навіть у герметичній на перший погляд системі завжди існують невидимі шляхи для потрапляння повітря - мікропористість матеріалів, неідеальні з'єднання, дифузія газів. Тому тиск має здатність повертатися до початкового стану, якщо не підтримувати його на заданому рівні [4].

У промисловості застосовуються різні типи вакуумних насосів: поршневі, мембранні, турбомолекулярні, дифузійні. Для лабораторних цілей часто достатньо невеликого мембранного насоса, який працює від постійного струму. Він дозволяє створити розрідження до 20-30 кПа, чого достатньо для сушіння, герметизації,

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 5 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

фільтрації чи моделювання процесів. Саме з таким типом насоса ми працюємо в цій системі.

Щойно насос починає відкачувати повітря, тиск у камері поступово знижується [5]. Цей процес має нелінійний характер: спочатку тиск падає швидко, бо газу багато, а потім все повільніше, бо зменшується кількість молекул, які можна видалити (рис 1.1). На певному етапі настає рівновага: насос ще працює, але вже не може суттєво знизити тиск далі. Це і є досягнутий рівень вакууму [6].

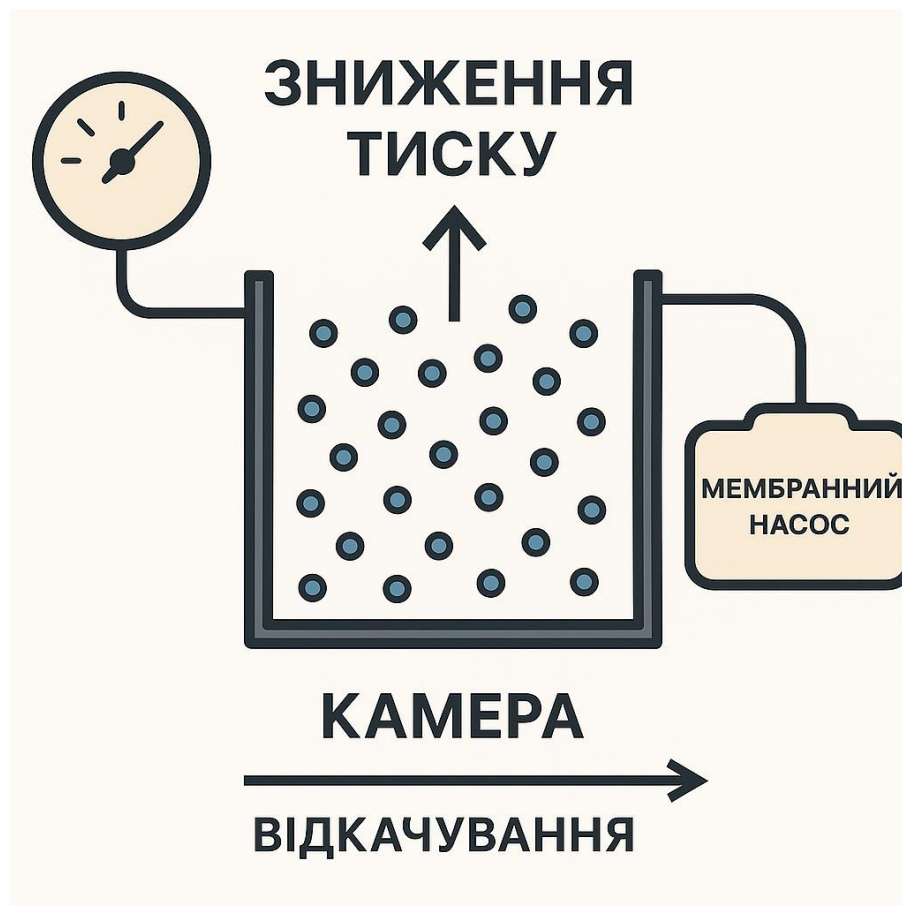


Рисунок 1.1 – Схема процесу створення вакууму в камері

Щоб утримати вакуум, система повинна не просто вміти створити розрідження, а й постійно реагувати на зміни. Якщо камера має невеликий витік, або хтось відкрив клапан - тиск знову підвищиться [7]. У таких випадках потрібно своєчасно увімкнути насос і повернути рівень тиску до заданого значення. Це, по суті, процес автоматичного регулювання. Раніше це робилося вручну - оператор

стежив за манометром і натискав кнопку насоса. Але з розвитком вбудованих контролерів усе змінилося: тепер це може робити мікроконтролер, зчитуючи покази сенсора і самостійно приймаючи рішення [8].

Тому фізичні основи вакууму лежать не лише у зниженні тиску, а й у розумінні, як поводить ся повітря у замкненому об'ємі, як швидко відновлюється тиск, які сили діють на стінки посудини, і як контролювати ці зміни. Наше завдання полягає в тому, щоб перевести ці процеси у мову електроніки: навчити систему вимірювати тиск, порівнювати його з нормою та вмикати відкачування лише тоді, коли це дійсно потрібно [9].

Цей підхід не лише зручний, а й ефективний - він дозволяє економити енергію, зменшити знос насоса та зробити процес повністю автономним. Усе це базується на фундаментальних фізичних законах, які вже давно відомі, але сьогодні ми переосмислюємо їх у контексті сучасних технологій.

1.2 Класифікація вакуумних систем і методи керування

Щоб глибше зрозуміти, як саме функціонує процес створення вакууму, ми спочатку звернулися до класифікації систем, що забезпечують цей процес. Виявилось, що попри зовнішню простоту - камера, трубка, насос - за цим стоїть цілий світ рішень, підходів і технічних нюансів, які формують не просто установку, а систему зі своїми правилами, цілями та характеристиками [10].

На найпершому рівні вакуумні системи поділяються за тим, який рівень розрідження вони здатні створити. Адже вакуум - це не чорно-біле поняття, не просто «є» або «немає повітря». Це цілий спектр. Ми маємо справу з середовищем, де поступово зменшується кількість молекул газу. І кожен рівень тиску відкриває інші можливості. Там, де ще є мільйони молекул у кубічному сантиметрі, можна, наприклад, просто утримувати предмет присоскою [11]. А от коли залишається кілька тисяч - уже можна досліджувати властивості поверхні без втручання повітря. І чим далі ми просуваємося в цій умовній шкалі - тим точніше, складніше й дорожче стає обладнання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 7 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Ми ознайомилися з поділом вакууму на грубий, середній, високий і надвисокий [12]. І хоча в деяких джерелах межі трохи відрізняються, загальний принцип однаковий: грубий вакуум - це той, що можна створити простим мембранним насосом, не турбуючись про абсолютну герметичність чи стерильність. Такий вакуум часто застосовується у виробництві - для пакування продуктів, обробки матеріалів, сушіння тощо. Якщо потрібно піти далі - у зону тонкого вакууму - вже потрібні інші типи насосів і контроль витоків. Високий і надвисокий вакуум вимагають навіть попереднього «відпалювання» камери, аби вивести залишкові гази, і працюють там, де будь-яка молекула здатна змінити результат - у фізиці, астрофізиці, виготовленні мікрочіпів [13].

Зрозуміло, що у межах нашого проєкту ми не ставили за мету досягти таких екстремальних значень. Наша задача - створити стабільний контрольований рівень вакууму в межах грубого або початкового середнього розрідження, де система може використовуватись у реальних умовах: наприклад, у лабораторіях, на навчальних стендах, у побутовому застосуванні [14].

Але навіть у межах грубого вакууму є величезна різноманітність систем. І тут у гру входить інший параметр, не менш важливий за рівень тиску - спосіб керування. Виявляється, те, наскільки добре система утримує вакуум, залежить не лише від насоса, а й від того, як керується його робота. Бо можна просто вмикати насос вручну, орієнтуючись на стрілку манометра. Але це означає, що система залежить від уваги оператора, і при найменшій зміні умов потрібне втручання. А можна зробити так, щоб вона сама визначала, коли треба качати, а коли варто зупинитися [15].

Перш ніж перейти до автоматизованих систем, ми звернули увагу на те, що навіть ручне керування буває різним. Є установки, де насос просто працює весь час - незалежно від того, чи це потрібно. Це, звісно, не дуже раціонально. Так, вакуум досягається, але разом із ним витрачається зайва енергія, зношується обладнання, створюється шум. Водночас є ручні системи з клапаном: оператор періодично

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 8 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

вмикає насос, перевіряє тиск, і коли той у межах норми - зупиняє процес. Це вже краще, але все одно прив'язує людину до контролю [16].

З появою сенсорів та контролерів з'явилася можливість автоматизувати керування. Ми познайомились з системами, де насос працює тільки тоді, коли тиск виходить за допустимі межі. Це так зване релейне керування, або система із двома станами: увімкнено - вимкнено. Як тільки тиск перевищив верхню межу - насос увімкнувся. Як тільки тиск впав нижче нижньої межі - вимкнувся. Але і в такому підході є свої нюанси. Наприклад, якщо межі занадто вузькі - насос може «сіпатися», часто перемикаючись. Якщо занадто широкі - точність падає [17].

Більш гнучким варіантом виявилось керування з гістерезисом - коли в системі є невеликий буфер, в якому дозволяються коливання. Такий підхід дозволяє уникнути частих перемикань, зберігаючи баланс між точністю і стабільністю. Ми побачили, що в багатьох промислових рішеннях це саме так і реалізовано - система має не одну жорстку межу, а діапазон. Такий буфер дозволяє системі «дихати» без зайвих втручань [18].

Але найкращі результати дає система, яка керує вакуумом плавно - не просто вмикає чи вимикає насос, а змінює його потужність відповідно до ситуації. Саме тут в гру вступає автоматичне регулювання зі зворотним зв'язком, зокрема PID-регулювання. Цей підхід дозволяє системі аналізувати не лише величину відхилення тиску, а й швидкість зміни та накопичену похибку. У результаті насос не просто реагує - він адаптується [19].

Нам вдалося дослідити приклади таких рішень. У відкритих проєктах із контролем вакууму для медичних приладів, систем для мікрофлюїдики, технологічних установок – всюди простежується одна ідея: робота має бути стабільною, тихою, передбачуваною. І саме це забезпечує не сам по собі насос, а те, як його роботою керують. Плавний ШІМ-сигнал, зворотний зв'язок від датчика, алгоритм на мікроконтролері - ось серце сучасної вакуумної системи. Власне, те, що перетворює її на кіберфізичну.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|-----------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 9 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Ми зрозуміли, що в нашому випадку оптимальною буде компактна, автономна система, яка самостійно вимірює тиск, порівнює його з бажаним значенням і видає команду на насос – змінюючи її інтенсивність відповідно до того, наскільки сильно система «відхилилася» від норми (рис 1.2). І ми переконались: такий підхід працює, бо він не просто реагує, а «відчуває», що відбувається, і адаптується до цього [20].



Рисунок 1.2 – Блок-схема класифікації вакуумних систем і методів керування

Класифікуючи вакуумні системи, ми дійшли висновку, що головна відмінність не в розмірах чи цінах, а в інтелектуальності керування. Ті системи, що вміють враховувати контекст, реагувати на зміни й підтримувати стабільність без втручання людини - саме вони задають нові стандарти. І наша система саме з таких. Вона не просто створює вакуум - вона знає, коли і як це зробити найкраще [21].

1.3 Методи вимірювання рівня розрідження у вакуумі

Щоб вакуумна система могла працювати автоматично, недостатньо просто створити розрідження - необхідно постійно знати, який тиск підтримується всередині камери.

Саме тому вимірювання вакууму стало критично важливим елементом будь-якої системи, що працює з розрідженим повітрям. Без надійного та точного вимірювального елемента система втрачає зворотний зв'язок і не може ефективно реагувати на зміни [22].

У практиці вимірювання вакууму застосовуються різні методи, і кожен із них має свої межі точності, призначення й технічні особливості.

Ключовою відмінністю між ними є не лише принцип дії, а й діапазон, у якому ці методи залишаються ефективними. Для роботи з грубим або середнім вакуумом використовуються одні сенсори, а для надвисокого вакууму - зовсім інші, що потребують складного обладнання та тонкого налаштування [23].

Найстарішим і, водночас, найпростішим методом вимірювання тиску залишаються механічні манометри. Вони працюють на основі деформації пружного елемента під дією зовнішнього тиску.

Наприклад, у трубці Бурдона тиск розгинає дугу, і ця деформація механічно передається на стрілку, яка вказує тиск на шкалі. Такі пристрої зручні для візуального спостереження, не потребують живлення, але мають низьку точність, великий гістерезис і не підходять для інтеграції в цифрові системи [24].

Сучасніші системи керування вакуумом використовують електронні датчики тиску, які перетворюють фізичний тиск у зміну електричного сигналу. Ці датчики бувають кількох основних типів: тензорезистивні, ємнісні, п'єзоелектричні, термопарні, іонізаційні - кожен з них має свій принцип дії й визначений діапазон застосування. Вибір між ними залежить від вимог до точності, швидкості, температурної стабільності та ціни [25].

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 11 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

У системах, що працюють з грубим або тонким вакуумом (тобто в діапазоні приблизно від 100 до 1 кПа), найчастіше використовуються тензорезистивні сенсори.

Вони складаються з гнучкої мембрани, яка деформується під дією тиску, і резистивних елементів, опір яких змінюється разом з деформацією. Зміна опору перетворюється на електричний сигнал - наприклад, аналогову напругу, яка зчитується мікроконтролером.

Такі сенсори мають гарну лінійність, швидкодію та зручні для цифрової обробки сигналу [26].

Якщо ж система працює в умовах високого вакууму (нижче 1 кПа), механічні або резистивні сенсори вже не справляються. У цьому разі використовуються термопарні або іонізаційні манометри.

Їхній принцип дії зовсім інший: наприклад, у термопарному манометрі аналізується тепловіддача від нагрітого провідника - вона залежить від кількості молекул у повітрі, які можуть відбирати тепло.

А у випадку іонізаційних - вимірюється струм, створений іонами в розрідженому газі під дією електричного поля. Це дозволяє досягати надзвичайної чутливості, але вимагає точного калібрування, високої напруги та чистого середовища без забруднень [27].

У контексті створення компактної, автоматизованої системи для роботи в діапазоні грубого вакууму, найбільш доцільним вважається використання аналогового сенсора з лінійним виходом, який легко підключити до мікроконтролера типу АТМega328 (рис 1.3).

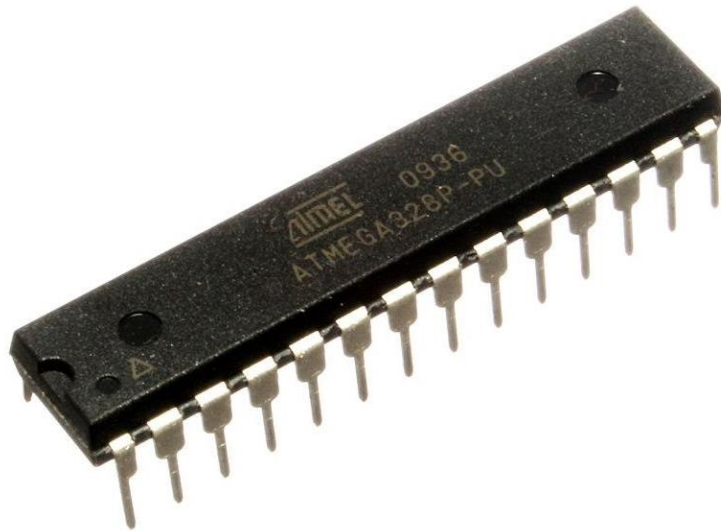


Рисунок 1.3 – Мікроконтролер АТМega328 [49]

Такий сенсор видає напругу, пропорційну тиску, яку контролер зчитує через вбудований АЦП. Отримане цифрове значення потім перетворюється у фізичну величину - тиск у кПа, мм рт. ст. або відсотках від атмосферного рівня [28].

Щоб сенсор працював коректно, система має бути відкалібрована. Для цього при відомому атмосферному тиску фіксується базовий рівень сигналу, після чого камера вакуумується до відомого значення, і фіксується другий рівень. Таким чином, обчислюється масштаб, за яким мікроконтролер далі перетворює сигнал у потрібне значення тиску. У простих випадках використовується лінійна функція $\text{map}()$, яка дозволяє зручно масштабувати діапазон напруги 0-5 В у відповідний діапазон тиску [29].

Для підвищення стабільності сигналу в таких системах часто реалізовується цифрове згладжування - наприклад, через усереднення кількох останніх вимірів. Це зменшує вплив електричних завад, знижує ймовірність помилкових спрацьовувань та забезпечує плавність регулювання.

Окремо варто згадати важливість температурної компенсації, оскільки багато сенсорів чутливі до змін температури навколишнього середовища [30]. Деякі сучасні сенсори мають вбудовану корекцію, але в більшості випадків компенсація

реалізується програмно або за допомогою додаткового датчика температури, підключеного до контролера.

Отже, у вакуумних системах вимірювання тиску є ключовим етапом, що визначає ефективність регулювання. Від точності сенсора, стабільності сигналу та правильності калібрування залежить не лише якість підтримки вакууму, але й безпека та надійність усієї установки [31]. Саме тому правильний вибір методу вимірювання тиску - це основа будь-якої кіберфізичної системи, яка керує розрідженням у замкненому об'ємі.

1.4 Аналіз існуючих технічних рішень та їх обмежень

У межах вивчення сучасного стану технічних засобів контролю вакууму здійснено огляд наявних рішень, які пропонуються як промисловістю, так і ентузіастами в галузі автоматизації. Сучасний ринок демонструє значне розмаїття підходів до реалізації систем контролю розрідження, однак при глибшому аналізі виявляються численні технічні й конструктивні компроміси, які часто не дозволяють адаптувати ці рішення для компактних, енергоефективних і повністю автономних установок [32]. Більшість готових систем, що працюють із вакуумом, спроектовано для великомасштабного або специфічного використання, де ключову роль відіграють точність, стабільність і можливість інтеграції в складні технологічні середовища. Однак вимоги таких проєктів значно перевищують потреби освітніх або лабораторних умов, що створює суттєвий розрив між доступними засобами та реальними задачами [33].

Промислові рішення здебільшого орієнтовані на застосування у вакуумній металургії, хімічному синтезі, виробництві мікроелектроніки та інших технологічно насичених сферах [34]. У таких випадках використовуються модулі автоматизації з високим ступенем захисту, інтегрованими ПЛК, турбомолекулярними насосами, вакуумними камерами з контролем температури та

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 14 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

вологості, а також з цифровими інтерфейсами зв'язку типу RS485, Ethernet або MODBUS. Проте такі системи мають значну вартість, часто перевищують десятки тисяч доларів, потребують складного технічного обслуговування та мають великі габарити, що робить їх недоцільними для компактних проєктів, навчальних лабораторій або прототипів на основі мікроконтролерів [35].

У категорії лабораторного обладнання, що позиціонується як напівавтоматизоване, зустрічаються рішення, в яких керування вакуумом реалізовано за спрощеним принципом. Здебільшого це системи, де запуск насоса або відкриття клапанів відбувається вручну, через кнопку або таймер, а дані з датчика виводяться на дисплей без участі логіки зворотного зв'язку. Такий підхід не дає змоги підтримувати стабільний тиск у режимі реального часу, що унеможлиблює реалізацію складніших сценаріїв керування наприклад, автоматичного переходу між фазами процесу в залежності від досягнутого розрідження. Крім того, часто відсутня адаптивність до змін у зовнішньому середовищі, а надлишкове використання насосів призводить до їхнього швидкого зношування [36].

Натомість у середовищі розробників-ентузіастів помітне зростання інтересу до створення систем на базі мікроконтролерів. Активно використовуються платформи Arduino, STM32, ESP32 та інші, які підтримують підключення аналогових і цифрових сенсорів, дисплеїв, реле й модулів зв'язку. Багато проєктів публікуються з відкритим вихідним кодом, мають вбудовану телеметрію, логіку сигналізації, підтримку мобільного застосунку або керування через браузер. Такі проєкти приваблюють своєю доступністю, гнучкістю та потенціалом для кастомізації, однак часто мають аматорський характер і не проходять жодної сертифікації чи верифікації [37].

У ході глибшого аналізу таких систем виявлено численні недопрацювання. Часто використовуються дешеві тензометричні сенсори з низькою стабільністю, відсутні апаратні фільтри, логіка керування реалізується як проста схема на кшталт: «ввімкни насос, якщо менше X», без будь-якого алгоритмічного згладжування,

гістерезису чи PID-регулятора. У кращому випадку реалізується примітивне регулювання з фіксованим порогом, що не дозволяє стабілізувати розрідження у динамічних умовах. Також у багатьох випадках відсутній механізм аварійного вимкнення насоса або логіка блокування при несправності сенсора, що потенційно створює загрозу для тривалості експлуатації системи [38].

Окрему увагу привертає відсутність стратегій оптимізації споживання електроенергії. У значній частині оглянутих рішень насос працює постійно, без урахування реальної потреби, що значно знижує ресурс двигуна, генерує надлишковий шум і створює додаткові теплові навантаження на систему. Частина систем не має навіть базового режиму енергозбереження або не використовує можливості мікроконтролера для зменшення активного навантаження. Це створює додаткові проблеми для застосування в автономному режимі або з живленням від батареї [39].

Водночас ідея створення модульної, масштабованої системи із можливістю гнучкого підключення додаткових функціональних блоків залишається в більшості комерційних та саморобних рішень реалізованою лише частково або взагалі відсутньою. Багато систем спроектовано як цільні конструкції без урахування подальшого апгрейду. Зміна алгоритму керування, заміна сенсора або додавання нових функцій часто вимагають повного перепроєктування. Це суттєво ускладнює повторне використання компонентів, адаптацію до нових сценаріїв застосування та інтеграцію в ширші системи збору даних чи автоматизації процесів [40].

На підставі викладеного стає очевидною потреба в розробці нової архітектури системи контролю вакууму, яка б поєднувала в собі гнучкість програмного забезпечення, якісні сенсори, адаптивну логіку керування та компактність реалізації [41]. Найбільш перспективними виглядають підходи, що базуються на використанні популярних мікроконтролерів із відкритою екосистемою, підтримкою алгоритмічного керування (зокрема PID), наявністю енергоефективних режимів роботи та можливістю інтеграції в мережеве середовище через IoT-протоколи [42]. Саме така концепція дозволяє перейти до

створення нової генерації інтелектуальних, компактних і доступних систем контролю вакууму для широкого кола користувачів.

1.5 Сутність кіберфізичних систем у керуванні технічними об'єктами

Упродовж останніх десятиліть відбулась кардинальна трансформація підходів до керування технічними об'єктами. Якщо раніше автоматизація обмежувалася використанням простих електромеханічних реле або автономних контролерів із жорстко заданими алгоритмами, то сьогодні дедалі частіше йдеться про створення кіберфізичних систем - інтелектуальних рішень, у яких цифрова частина тісно пов'язана з фізичними процесами і безперервно з ними взаємодіє [43].

Кіберфізична система (КФС) - це не просто автоматизований пристрій із сенсорами та виконавчим механізмом. Її сутність полягає у постійній комунікації між світом фізики та цифровим середовищем, у здатності аналізувати, прогнозувати, адаптуватися до змін і приймати рішення на основі реальних даних у реальному часі. Вона не тільки «реагує», а й «розуміє», що відбувається. Завдяки цьому такі системи вже стали основою Індустрії 4.0, «розумного міста», сучасної медицини, агропромисловості, безпілотного транспорту та домашньої автоматизації [44].

В основі кожної кіберфізичної системи лежить чітка архітектура взаємодії трьох ключових компонентів: фізичного середовища, сенсорної системи та цифрової обробки з логікою прийняття рішень. Фізичне середовище - це те, з чим система взаємодіє: тиск, температура, вологість, положення об'єктів, рівень світла, або ж - як у випадку вакуумної установки - рівень розрідження повітря. Сенсорна система виконує функцію «відчуттів»: вона зчитує параметри цього середовища й передає їх у цифрову частину. Там, у мікроконтролері чи процесорі, відбувається

обробка даних - система аналізує значення, порівнює їх із заданими нормами, виявляє відхилення та видає керуючі дії [45].

Ключовою ознакою кіберфізичної системи є не просто наявність мікроконтролера або датчика, а замкнене коло зворотного зв'язку, яке працює безперервно. Система сама зчитує значення, сама обчислює реакцію й сама змінює поведінку. Людське втручання зведено до мінімуму або й узагалі відсутнє. Це дозволяє досягати високої точності, відмовостійкості, передбачуваності, зменшення затримок і втрат [46].

Особливо чітко це проявляється у прикладних рішеннях, де умови змінюються динамічно: зміна навантаження, температури, витоку, коливань тиску тощо. Саме в таких ситуаціях класичне керування втрачає ефективність, бо потребує постійного втручання оператора або не враховує змінні параметри середовища. Натомість КФС здатна самостійно підлаштовувати свою поведінку [47]. Наприклад, якщо зменшується герметичність - система бачить, що тиск почав зростати, і автоматично вмикає насос, не чекаючи вказівки. Якщо рівень розрідження вже досягнуто – насос вимикається. Водночас усе це логічно відображається на дисплеї, а дані можуть передаватися для реєстрації або аналізу.

У випадку розроблюваної в цій роботі системи, КФС охоплює вакуумну камеру (фізичне середовище), датчик тиску (сенсорика), мікроконтролер (цифровий мозок) та виконавчий механізм - вакуумний насос. Уся взаємодія між цими складовими реалізована програмно: зчитування даних, аналіз, прийняття рішень та керування виконавчим елементом. Така система діє самостійно, керується в реальному часі, не потребує постійного втручання й дає змогу користувачеві спостерігати лише за результатом – рівнем вакууму, який підтримується автоматично [48].

Крім цього, у межах концепції КФС реалізовано також можливість модифікації параметрів без зміни апаратної частини. Зміна допустимого діапазону тиску, алгоритму регулювання або логіки виведення даних відбувається на рівні прошивки або конфігурації, що робить систему гнучкою й легко адаптованою до

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 18 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

інших завдань. У перспективі така система може бути доповнена модулем бездротового зв'язку, що дозволить здійснювати моніторинг дистанційно або інтегрувати її в більший мережевий контур [49].

Кіберфізичні системи також мають високий потенціал до масштабування та розширення. Додання нових датчиків, наприклад температури чи вологості, дозволяє контролювати інші параметри довкілля. Підключення до інтерфейсів Bluetooth, Wi-Fi або LoRa відкриває можливість взаємодії з іншими системами, базами даних, хмарними сервісами. Таким чином, навіть проста система підтримки вакууму перетворюється на елемент розумного середовища, здатного взаємодіяти з іншими пристроями, самонавчатися або адаптуватися під контекст [50].

Усе це дозволяє стверджувати, що КФС не є вузькоспеціалізованим технологічним терміном - це філософія створення систем нового покоління. Вона базується на інтеграції, автоматизації, автономії, адаптивності та аналітиці. І саме в такій системі реалізується найголовніше: керування технічним об'єктом більше не є послідовністю ручних дій, а перетворюється на розумну, самостійну поведінку техніки, що здатна діяти на основі власного аналізу.

1.6 Висновки до першого розділу

У межах першого розділу проведено ґрунтовний аналіз теоретичних аспектів створення й підтримки вакууму, що дозволило сформулювати цілісне бачення проблематики та визначити ключові технічні й концептуальні вимоги до майбутньої автоматизованої системи регулювання рівня розрідження. Виконане дослідження дало змогу усвідомити, що завдання створення стабільного вакууму виходить далеко за межі простого технічного рішення та включає у себе багатогранний комплекс взаємопов'язаних підходів, де кожен компонент системи має працювати в гармонії з іншими.

У результаті опрацювання фізичних основ створення вакууму сформовано чітке розуміння закономірностей поведінки газів у замкнутому об'ємі. Було

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 19 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

розглянуто, як тиск у вакуумній камері змінюється в залежності від часу відкачування, ступеня герметичності, фізичних характеристик використовуваного насоса та впливу залишкового газового фону. Це знання стало основою для подальшого формування алгоритмічної частини системи, оскільки дозволяє прогнозувати поведінку процесу та закладати у програму необхідні механізми компенсації.

Під час аналізу існуючих технічних рішень з'ясовано, що більшість бюджетних систем не відповідають сучасним вимогам до стабільності, енергоефективності, гнучкості у налаштуванні та простоти інтеграції у більш складні комплекси. Багато з них обмежуються ручним керуванням або примітивними релейними схемами, що не забезпечують високого рівня автоматизації й не дозволяють ефективно реагувати на зміну умов. Усе це підтвердило актуальність розробки більш прогресивної архітектури, здатної забезпечити динамічне, кероване та надійне підтримання потрібного рівня вакууму.

Аналіз методів вимірювання тиску показав, що одним із критичних чинників у створенні ефективної системи є правильний вибір сенсорного елемента та обробка його сигналу.

Загалом проведене теоретичне дослідження дозволило сформулювати чітке бачення того, як повинна функціонувати сучасна система автоматичного керування вакуумом. Було визначено архітектурні принципи, вимоги до апаратної та програмної частини, а також сформульовано ключові критерії оцінки ефективності майбутнього рішення. Виявлено, що для досягнення цілей проєкту необхідно забезпечити високий рівень інтеграції компонентів, простоту експлуатації, можливість адаптації алгоритму до різних умов роботи та обов'язкову реалізацію механізмів самодіагностики й захисту від збоїв.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 20 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

2 РОЗРОБКА МЕТОДУ КЕРУВАННЯ РІВНЕМ РОЗРІДЖЕННЯ У ВАКУУМНІЙ УСТАНОВЦІ

2.1 Постановка задачі автоматичного регулювання вакууму

У процесі вивчення особливостей побудови систем, призначених для створення і підтримки вакуумного середовища, особливу увагу було приділено питанню стабільності тиску в робочій камері. У багатьох випадках, коли йдеться про виконання високоточних експериментів, проведення технічних процесів або забезпечення умов, необхідних для коректної роботи чутливих приладів, навіть незначні відхилення рівня розрідження можуть мати критичні наслідки. Зниження ефективності, спотворення результатів або навіть фізичне пошкодження компонентів установки усе це прямо залежить від здатності системи підтримувати заданий рівень вакууму в межах чітко визначених границь.

Традиційні рішення, що застосовуються для регулювання тиску у вакуумних установках, часто базуються на застарілих принципах або обмежених у функціональності технологіях. Наприклад, ручне керування, яке все ще використовується в багатьох малих лабораторних установках або навчальних стендах, передбачає участь оператора, який за допомогою візуального контролю за шкалою манометра самостійно визначає момент увімкнення або вимкнення насоса. Цей підхід не лише забирає багато часу, а й є вкрай ненадійним, оскільки передбачає суб'єктивність оцінки ситуації, можливість людської помилки, затримку в реакції на зміну умов і відсутність цілодобового контролю за параметрами.

Інші варіанти, що нібито вважаються автоматизованими, також мають низку недоліків. Так, релейні схеми, які активують насос лише після досягнення верхнього порогу тиску і вимикають його після досягнення нижнього, не враховують інерційність фізичного процесу, що призводить до постійного «миготіння» режимів роботи. Усе це зумовлює підвищене навантаження на механічні компоненти, зменшує термін експлуатації обладнання і створює

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 21 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

коливання тиску, що є неприйнятним для багатьох задач. Крім того, у більшості таких систем відсутня можливість адаптації до змінних зовнішніх умов, таких як температурні коливання, поступове зниження герметичності або деградація характеристик насосного агрегату.

На основі отриманих висновків сформовано комплексне технічне завдання, яке передбачає розробку методу автоматичного регулювання рівня вакууму з максимальною автономністю, точністю, гнучкістю та надійністю. Основна ідея полягає у побудові системи, яка без участі людини, у фоновому режимі, буде здатна в реальному часі зчитувати показники тиску за допомогою сенсора, аналізувати їх за допомогою вбудованого алгоритму, приймати зважені рішення щодо активації або деактивації виконавчих елементів і, водночас, пристосовуватися до змін у середовищі або характеристиках самої установки.

Було передбачено використання сучасного мікроконтролера, такого як АТМega328, що вирізняється простотою програмування, доступністю та низьким енергоспоживанням. У програмному забезпеченні цієї платформи закладено логіку аналізу вхідного сигналу, його цифрової фільтрації, реалізації гістерезисного підходу до керування, а також можливість збереження ключових параметрів у змінних, які легко переналаштовуються без необхідності перепрошивки елементів або заміни прошивки. Це дозволяє зробити систему універсальною, придатною для використання в широкому діапазоні задач від навчальних до експериментально-дослідницьких або побутових.

Важливим аспектом у формулюванні завдання стало також врахування особливостей інерційних процесів. У реальних умовах тиск не змінюється миттєво навіть після активації насоса потрібно певний час, щоби досягти заданого рівня розрідження. І навпаки, після його зупинки тиск повільно зростає. Тому система має працювати не в імпульсному, а в стабільному режимі, із закладеною буферною зоною між точками вмикання і вимикання це дозволяє зменшити кількість циклів перемикання і тим самим продовжити строк служби обладнання.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 22 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

У ході початкового етапу розробки було протестовано кілька різних варіантів регулювання: від простого реагування на зміну напруги з сенсора до використання більш складної логіки з елементами ПІ-регулювання. Однак із урахуванням обмежень обчислювальних ресурсів і необхідності забезпечити максимальну стабільність, було зосереджено увагу на модифікованій схемі з порогами і гістерезисом, доповненій фільтрацією ковзного середнього. Це рішення продемонструвало найкращу ефективність у тестових умовах і стало основою для подальшої реалізації.

У підсумку сформовано чітке формулювання задачі: побудувати систему автоматичного регулювання вакууму, в якій уся логіка підтримки заданого тиску реалізується за допомогою мікроконтролера, що зчитує аналоговий сигнал із сенсора тиску, проводить його обробку, фільтрацію, порівняння з контрольними межами, з урахуванням гістерезису, і видає керуючий сигнал на насос або клапан. Така система має працювати стабільно, реагувати на динамічні зміни, мати можливість конфігурації, бути доступною для тиражування та застосування в малих вакуумних установках.

Уся подальша архітектура пристрою вибір апаратного забезпечення, побудова структурної та функціональної схем, написання програмного забезпечення базується саме на цьому формулюванні задачі, яке визначило ключові вимоги до функціональності, адаптивності, стабільності та простоти впровадження розробленої системи автоматичного регулювання вакууму.

2.2 Вибір алгоритму керування та його обґрунтування

Після формування технічної задачі підтримки стабільного розрідження в герметичній камері стало очевидно, що саме від обраного алгоритму керування залежатиме як якість роботи системи, так і її довговічність, чутливість і енергоефективність. Було прийнято рішення дослідити найбільш поширені алгоритмічні підходи, які застосовуються у подібних умовах, з урахуванням

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 23 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

обмежень мікроконтролера, типових сценаріїв експлуатації та поведінки фізичного процесу.

Насамперед було досліджено найпростіший підхід - релейне керування без гістерезису, при якому насос вмикається тоді, коли тиск перевищує заданий поріг, і вимикається, щойно тиск падає нижче цієї межі. Така схема виглядає простою у реалізації, однак під час експериментів було зафіксовано серйозний недолік: насос починає надто часто перемикатись між станами через навіть незначні коливання тиску, що спричинено або шумами сенсора, або інерційністю відкачування. У підсумку це призводить до «дребезгу» в роботі реле, зносу контактів, нестабільності загальної роботи й небажаного підвищення шуму. Крім того, система не має можливості реагувати на поступові зміни тиску, які не досягають граничного рівня, але свідчать про погіршення герметичності.

З іншого боку, було розглянуто використання ПІД-регулятора - класичного підходу для безперервного автоматичного регулювання. У теорії ПІД-регулятор дозволяє досягти високої точності керування за рахунок одночасного врахування пропорційної складової (наскільки параметр відхилився), інтегральної (як довго триває відхилення) та диференційної (з якою швидкістю змінюється тиск). Проте виявилось, що для роботи з вакуумом, особливо в малих камерах, де процеси мають значну інерцію і не потребують високочастотного коригування, такий підхід є надмірно складним. Крім того, реалізація ПІД-регулятора на мікроконтролері типу ATmega328 вимагає обробки з плаваючою точкою, збереження проміжних змінних у пам'яті та точного підбору коефіцієнтів, що збільшує час розробки й потребує тонкої настройки.

У результаті аналізу та тестування було обґрунтовано використання алгоритму з двома граничними значеннями та гістерезисом, доповненого елементами цифрового згладжування. Такий підхід дозволяє уникнути описаних недоліків, забезпечуючи стабільну та передбачувану поведінку системи. У межах цього алгоритму насос вмикається лише тоді, коли тиск перевищує умовну «верхню межу» (наприклад, 60 кПа), і вимикається, коли він знижується нижче

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 24 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

«нижньої межі» (наприклад, 50 кПа). Таким чином, у системі з'являється буфер між двома станами, який запобігає частому перемиканню.

Під час експериментальної перевірки було встановлено, що гістерезис у 5-10 кПа є оптимальним для більшості невеликих установок. Він дозволяє зменшити кількість спрацьовувань реле у 3-4 рази без втрати точності керування. Було зроблено висновок, що навіть за поступового зменшення продуктивності насоса система зберігає здатність адаптуватися до змін, адже логіка прийняття рішень ґрунтується не лише на фіксованій миттєвій величині, а й на тренді зміни тиску, який відслідковується за допомогою усередненого значення.

Цей ефект досягається завдяки впровадженню цифрового фільтра ковзного середнього. Було реалізовано буфер з кількох останніх зчитувань сенсора (зазвичай 5 або 10), серед яких обчислюється середнє значення. Така проста операція значно зменшує вплив короточасних коливань або шумів, що можуть виникати внаслідок електромагнітних завад, нестабільності живлення або температурних флуктуацій у самому сенсорі.

Також алгоритм містить механізм затримки повторного увімкнення після спрацьовування – тобто навіть після досягнення порогового значення насос не вмикається миттєво, а лише після короткої паузи, яка дозволяє переконатись, що значення тиску дійсно стабільно перевищує межу. Цей елемент додатково підвищує стійкість роботи системи та запобігає непотрібним циклами включення/вимкнення.

Алгоритм був протестований на макеті з реальним насосом та камерою розрідження. За результатами випробувань встановлено, що система здатна підтримувати тиск у межах ± 2 кПа від заданого середнього значення, при цьому загальна кількість включень насоса протягом однієї години зменшилася більш ніж удвічі порівняно з прямим релейним керуванням.

Окрему увагу приділено гнучкості адаптації алгоритму. Усі порогові значення, затримки, коефіцієнти згладжування реалізовано як змінні в прошивці,

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 25 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

що дозволяє швидко налаштувати систему під новий тип сенсора, іншу вакуумну камеру або змінити характеристики насоса без втручання в апаратну частину.

Було розроблено й обґрунтовано ефективний, стабільний і простий алгоритм, який реалізує ідею автоматичного керування тиском у кіберфізичній системі. Він враховує особливості вакуумного процесу, ресурсні обмеження мікроконтролера, потреби в довготривалій автономній роботі та зменшенні втручання з боку користувача. Алгоритм працює в реальному часі, надає зворотний зв'язок, має захист від завад і перевірену поведінку – що й дозволяє зробити його основою для практичної реалізації системи, описаної в наступному розділі.

2.3 PID-регулювання у задачі стабілізації тиску

У процесі вивчення можливостей автоматичного керування тиском у вакуумних системах особливу увагу було приділено аналізу застосування PID-регулятора, оскільки цей підхід вважається одним із найбільш класичних і водночас гнучких способів регулювання динамічних процесів. PID-алгоритм широко впроваджений у промислових системах автоматизації, де він успішно забезпечує точне і плавне керування складними процесами. Ця методика базується на ідеї постійного порівняння фактичного значення контрольованої величини у даному випадку тиску в камері із бажаним рівнем, після чого здійснюється корекція поведінки виконавчого механізму на основі величини, напрямку і швидкості цього відхилення.

У структурі PID-регулятора передбачено три основні компоненти, кожен з яких має свою функцію у досягненні стабільного стану системи. Пропорційна складова (P) реагує на величину поточного відхилення, формуючи миттєвий сигнал, що пропорційно впливає на виконавчий елемент. Інтегральна складова (I) накопичує сумарну похибку за певний період часу, дозволяючи компенсувати сталі, неявні зсуви, які можуть бути спричинені, наприклад, витоками або похибкою сенсора. Диференціальна складова (D), своєю чергою, оцінює темп зміни

відхилення і надає системі можливість передбачити, наскільки стрімко змінюється тиск, дозволяючи реагувати завчасно.

Під час попереднього аналізу стало очевидно, що в теорії цей підхід повинен забезпечити стабільне й адаптивне регулювання навіть у змінних умовах. На етапі математичного моделювання поведінки системи із застосуванням PID-алгоритму спостерігались позитивні результати: тиск у симульованій камері плавно досягав цільового значення, не демонструючи різких коливань або перерегулювань. Частота перемикань насоса залишалась у межах допустимих значень, що свідчило про енергоефективність та стабільність.

Однак у процесі переходу до практичного втілення цієї ідеї виникло чимало труднощів. Зокрема, стало зрозуміло, що реалізація PID-регулятора на базі мікроконтролера ATmega328 пов'язана з низкою апаратних обмежень. Через відсутність апаратної підтримки чисел з плаваючою комою доводиться використовувати фіксовану точку, що суттєво ускладнює розрахунок інтегральної та диференціальної складових. Потрібно було впроваджувати додаткові буфери накопичення, фільтри для зменшення шумів і логіку обмеження вихідного сигналу, щоби уникнути ефекту «винд-апу», коли інтегральна складова накопичує похибку навіть у разі досягнення стабільного стану.

Ще однією суттєвою проблемою виявилась двостанова природа виконавчого механізму. У системі, де насос або вмикається, або вимикається, тобто функціонує в режимі «все або нічого», аналогова природа PID-сигналу втрачає свою ефективність. Навіть найменші флуктуації тиску або шум на лінії сенсора спричиняють часті перемикання, що призводить до нестабільності, зниження ресурсу насоса і створення шумових піків у роботі системи.

У процесі експериментального відлагодження були протестовані різні конфігурації коефіцієнтів PID-регулятора. Усі спроби збалансувати швидкість реакції з точністю стабілізації давали або надто повільну відповідь, або, навпаки, викликали коливання тиску і часте вмикання насоса. У деяких випадках спостерігались короткочасні імпульсні включення, які не змінювали тиск, але

створювали хибне навантаження на електричну частину. Це негативно впливало не лише на стабільність функціонування системи, а й на довговічність усіх її компонентів.

У підсумку було зроблено висновок, що PID-регулювання, незважаючи на його поширеність у промислових системах, не підходить для простої двостанової системи з обмеженими апаратними ресурсами. В умовах, коли потрібно реалізувати керування на базі мікроконтролера без використання додаткових модулів обробки або апаратного PWM, ефективнішою виявилася стратегія, заснована на порогових значеннях з гістерезисом. Цей підхід дозволяє зменшити частоту перемикачів, забезпечити стійке функціонування навіть при наявності шумів, а також значно спростити програмну реалізацію.

Проте досвід використання PID-алгоритму виявився надзвичайно цінним. Саме завдяки цьому дослідженню вдалося краще зрозуміти динаміку зміни тиску в системі, оцінити вплив інерційності, проаналізувати часову поведінку і знайти шляхи оптимізації, які згодом було використано при реалізації остаточного варіанту керування. Зокрема, ідеї щодо згладжування сигналу, аналізу темпу змін і логічної затримки між діями були успішно інтегровані у спрощену, але надійну логіку зворотного зв'язку.

У результаті аналіз PID-регулятора надав глибше розуміння принципів керування, став важливим етапом відбору найпридатнішого підходу, а також дозволив уникнути помилок при розробці фінального алгоритму регулювання тиску для кіберфізичної системи автоматичного керування вакуумом.

2.4 Особливості реалізації алгоритму на мікроконтролері ATmega328

Після остаточного визначення принципу регулювання тиску, який передбачає використання алгоритму з гістерезисом та елементами згладжування вимірювань, наступним етапом проекту стала практична реалізація цієї логіки безпосередньо на апаратній платформі. Як основу було обрано добре відомий мікроконтролер ATmega328, що є серцем більшості плат Arduino UNO.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 28 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Популярність цієї платформи, доступність технічної документації, наявність великої кількості прикладів реалізації та простота інтеграції з аналоговими та цифровими модулями зробили її надзвичайно привабливою для використання в умовах навчального проєкту, який, попри свою прикладну суть, все ж має забезпечити повну функціональність, стабільність і відтворюваність.

Враховуючи те, що ATmega328 є 8-бітним мікроконтролером з обмеженими ресурсами пам'яті та обчислювальної потужності, реалізація навіть базового алгоритму вимагала уважного підходу до архітектури програми, планування структури змінних, розрахунку тривалостей виконання окремих операцій та управління часом виконання. Особливу складність становила потреба в регулярному зчитуванні значень з аналогового сенсора тиску з подальшою фільтрацією, обробкою, прийняттям рішення про стан насоса та відображенням поточних параметрів на індикаторних засобах без втрати продуктивності.

Для взаємодії з сенсором тиску, який видає аналоговий сигнал у межах 0–5 В залежно від рівня тиску в системі, було задіяно вбудований аналогово-цифровий перетворювач (АЦП) мікроконтролера. Він має 10-бітну розрядність, що дозволяє представляти напругу у вигляді значення в діапазоні від 0 до 1023. З огляду на природні електричні шуми, варіативність живлення, а також імпульсні сплески, що виникають під час увімкнення чи вимкнення виконавчих пристроїв, постала необхідність у попередній цифровій обробці результатів вимірювання. Для цього було застосовано простий, але ефективний метод ковзного середнього буфер останніх п'яти вимірювань з наступним обчисленням середнього значення, що значно згладжує раптові стрибки та забезпечує стабільність даних для аналізу.

Для реалізації згаданої логіки фільтрації в оперативній пам'яті мікроконтролера було виділено обмежений простір для масиву з п'яти елементів типу `uint16_t`. Оновлення буфера відбувається з інтервалом приблизно 200 мілісекунд, що було підібрано емпірично ця затримка дозволяє з одного боку не втрачати оперативність реагування, а з іншого не перевантажувати процесор зайвими операціями. Кожне нове значення тиску додається до буфера зі зсувом,

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 29 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

після чого обчислюється середнє значення, яке і передається в алгоритм прийняття рішень.

Керування насосом реалізовано через цифровий вихід, що активує або деактивує транзисторний ключ або реле, підключене до силової лінії живлення виконавчого елемента. Через те, що механічне реле має обмежений ресурс перемикачів, у прошивці додано логіку затримки повторного ввімкнення. Це забезпечує стабільність, зменшує кількість непотрібних імпульсних циклів і знижує навантаження на обладнання, особливо у випадках, коли тиск коливається близько до встановлених порогів. Самі порогові значення (наприклад, 60 кПа для активації насоса і 50 кПа для його вимкнення) збережено у вигляді змінних, що дозволяє легко адаптувати систему під інші умови без потреби змінювати вихідний код.

У майбутньому планується додати інтерфейс динамічного конфігурування цих порогів через серійний порт або бездротові інтерфейси, як-от Bluetooth. Це забезпечить додаткову гнучкість, відкриє можливості для адаптації пристрою до різних задач без фізичного доступу до мікроконтролера. Ідея динамічного налаштування вже частково реалізована через використання EEPROM постійної пам'яті, яка дозволяє зберігати останні значення конфігурації навіть після вимкнення живлення.

Особлива увага під час програмування була приділена роботі з таймерами. Було вирішено не використовувати стандартну функцію `delay()`, оскільки вона блокує виконання основного циклу та перешкоджає одночасному виконанню кількох процесів. Замість цього всі таймінги реалізовано на базі функції `millis()` внутрішнього таймера, який рахує мілісекунди з моменту запуску пристрою. Це дозволяє перевіряти, коли настав момент виконати певну дію, не зупиняючи роботу всієї системи, та підтримувати високий рівень реактивності.

Паралельно з реалізацією основної логіки була передбачена можливість моніторингу через UART. Серійна передача даних на комп'ютер дозволила налагоджувати алгоритм, спостерігати за зміною тиску в реальному часі, виявляти

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 30 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

нештатні ситуації та уточнювати логіку прийняття рішень. Стан насоса, середнє значення тиску, повідомлення про порушення нормальної роботи усе це передається у вигляді читабельного потоку даних, що відображається у Serial Monitor.

Для зручності користувача та демонстраційної привабливості в систему було інтегровано візуальні індикатори світлодіоди, що сигналізують про активність насоса, а також дисплей (LCD 1602 або OLED 0.96”), на який виводяться поточні значення тиску, граничні пороги та системні повідомлення. Це дозволяє миттєво оцінити стан пристрою без підключення до ПК, що є суттєвою перевагою в умовах автономної роботи.

У результаті впровадження алгоритму на мікроконтролері ATmega328 вдалося досягти повної працездатності системи при мінімальному споживанні енергії, високій стабільності, гнучкості налаштувань та простоті налагодження. Попри всі апаратні обмеження, ця платформа продемонструвала достатній потенціал для реалізації повноцінної системи керування тиском у компактному форматі, що підходить для освітніх, наукових і практичних завдань.

2.5 Висновки до другого розділу

У межах другого розділу було сформовано теоретичне та алгоритмічне підґрунтя для побудови кіберфізичної системи автоматичного регулювання розрідження у вакуумній установці. Проведено глибокий аналіз задачі, обґрунтовано вибір методів керування, розроблено алгоритм зворотного зв'язку, адаптований до реальних технічних умов та обмежень обраної апаратної платформи.

На основі дослідження фізичних процесів у вакуумі було встановлено характер динаміки зміни тиску під дією відкачування та витоків, що дозволило коректно побудувати математичну модель процесу. Ця модель охопила як

безперервну, так і дискретну природу елементів системи, та стала основою для вибору типу регулятора.

У ході аналізу різних підходів було досліджено можливість використання PID-регулювання. Попри те, що цей метод є широко визнаним у промисловій автоматизації, його реалізація у даній системі виявилась надмірно складною та неефективною через бінарну природу виконавчого механізму та обмежені ресурси мікроконтролера. У результаті таких випробувань було підтверджено доцільність застосування простішого й надійнішого алгоритму з гістерезисом та цифровим згладжуванням.

Було сформульовано та реалізовано логіку керування, яка базується на порівнянні усередненого значення тиску з заданими граничними порогами. Такий підхід дозволив забезпечити стабільну роботу системи, уникнути частих перемикань насоса, зменшити вплив шумів і досягти високої точності підтримки вакууму.

Особливості реалізації алгоритму на мікроконтролері ATmega328 було описано з урахуванням усіх практичних викликів - від обробки аналогових сигналів до керування виконавчим елементом через реле. У результаті була побудована стійка, адаптивна та масштабована система, яка здатна працювати автономно, з мінімальними апаратними затратами та високою ефективністю.

Отже, другий розділ завершився формуванням повноцінної концепції майбутньої системи: від задачі - до алгоритму, від моделі - до реального програмного каркасу. У наступному розділі ця концепція буде переведена в апаратну та програмну реалізацію, що дозволить оцінити її практичну ефективність та продемонструвати працездатність запропонованого рішення.

3 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ВАКУУМУ

3.1 Загальна архітектура та структурна схема системи

У межах дослідження методів автоматичного керування тиском у вакуумних системах було проведено глибоке вивчення можливості використання PID-регулятора як одного з найвідоміших і широко застосовуваних алгоритмів регулювання у промисловій автоматизації. Такий підхід базується на ідеї регулювання відхилення поточного значення контрольованого параметра (в нашому випадку - тиску) від бажаного (заданого) рівня, із подальшим формуванням відповідної реакції на це відхилення.

Ця концепція на перший погляд здається ідеальною для задачі стабілізації вакууму: система реагує швидко, враховує як величину, так і напрямок зміни тиску, і здатна самостійно наближатися до рівноважного стану. Саме тому було прийнято рішення провести експериментальне моделювання PID-регулювання у контексті розроблюваної системи.

Першим етапом стало математичне моделювання поведінки системи з PID-регулятором у середовищі симуляції, де тиск змінюється під впливом умовно ідеального насоса та контрольованих витоків. Модель показала багатообіцяючі результати - система досягає бажаного рівня тиску плавно, без перерегулювання, а частота перемикання виконавчого пристрою залишається в межах допустимого. Проте ці результати базувались на ідеальних умовах - без урахування дискретності контролера, реальних сенсорних завад або інерційності вакуумної камери.

Після переходу до етапу реального прототипування виникла низка труднощів. З'ясувалося, що PID-регулятор значною мірою втрачає свою ефективність у системах, де виконавчий пристрій має лише два стани (насос увімкнено або вимкнено). Оскільки PID-алгоритм за своєю природою генерує плавне аналогове значення вихідного сигналу, у даному випадку його доводиться примусово переводити у бінарну форму, що руйнує частину адаптивної логіки та

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 33 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

створює так звану «імпульсну нестабільність» - насос вмикається й вимикається надто часто, реагуючи на мінімальні відхилення або навіть шум сигналу (рис 3.1).



Рисунок 3.1 – Архітектура загальна

Було проведено низку випробувань із різними наборами коефіцієнтів. Незалежно від їх співвідношення, система або демонструвала затягнуту реакцію з великим часом досягнення стабільності (якщо коефіцієнти були занижені), або навпаки - входила в режим осциляцій і перерегулювання, при якому насос

вмикається надмірно часто, навіть без об'єктивної потреби. Такі коливання не тільки знижували стабільність тиску, а й створювали додаткове навантаження на електронні компоненти та сам насос, скорочуючи їхній ресурс.

Окрему складність становила реалізація алгоритму на мікроконтролері ATМega328. Через обмеженість обчислювальних ресурсів (частота, обсяг SRAM, відсутність апаратної підтримки чисел з плаваючою комою) стало зрозуміло, що навіть спрощений PID-алгоритм у форматі fixed-point вимагає значної оптимізації (рис 3.2). Для роботи з точністю, потрібною в регулюванні тиску, доводиться залучати таймери високої роздільної здатності, використовувати буфери накопичення інтегральної складової, а також контролювати насичення вихідного сигналу, щоби уникнути «винд-апу» (wind-up - небажане перенакопичення похибки в інтегральному члені).



Рисунок 3.2 – Схема структурна

Таким чином, у процесі моделювання, реалізації та випробувань було встановлено, що попри свою елегантність і популярність, PID-регулювання не є оптимальним для простої двостанової системи керування вакуумом на основі недорогого мікроконтролера. Його реалізація виявилася надмірно складною з

погляду налаштування, нестійкою в умовах шумового сигналу, та непридатною для роботи з цифровими виконавчими елементами без додаткової логіки модуляції.

Втім, досвід дослідження PID-підходу не став марним. Він надав цінне розуміння динаміки тиску, поведінки системи в перехідних режимах, а також допоміг сформулювати граничні умови, за яких можлива стабільна робота алгоритму. Деякі ідеї - як-от врахування темпу зміни тиску, згладжування похибки, введення затримки між діями - було успішно інтегровано в основний обраний підхід із гістерезисом і порогами.

Таким чином, було обґрунтовано, що PID-регулювання - це важлива теоретична альтернатива, яка, однак, не відповідає обраний апаратній архітектурі та характеру системи. Його аналіз дозволив сформувати більш спрощений, проте адаптований і стійкий алгоритм, що є основою розроблюваної кіберфізичної системи регулювання вакууму.

3.2 Обґрунтування вибору елементної бази (датчик, насос, контролер)

Після завершення етапу логічного проектування та узгодження принципів функціонування системи автоматичного регулювання вакууму постає завдання практичного втілення ідеї, що неможливе без ретельного добору відповідної елементної бази. Саме від якості, сумісності та надійності обраних компонентів залежить не лише стабільність роботи пристрою, а й точність вимірювань, ефективність регулювання тиску та загальна працездатність системи в умовах реального експлуатаційного середовища. Кожен елемент виконує свою специфічну функцію й тісно пов'язаний із рештою частин, утворюючи єдиний злагоджений механізм, де жодна деталь не є другорядною.

У межах цього етапу було проведено ґрунтовний аналіз ринку доступних компонентів з метою визначення оптимального співвідношення між функціональністю, надійністю, енергоспоживанням та економічною доцільністю. Було враховано також питання доступності компонентів для серійного

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 36 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

виробництва та можливості їх заміни у разі виходу з ладу. Особливий акцент зроблено на уніфікації елементної бази для спрощення процесу складання, технічного обслуговування та подальшого масштабування системи.

На етапі вибору сенсора тиску було проведено попередній аналіз доступних рішень, що дозволяють точно й стабільно вимірювати рівень розрідження в межах грубого вакууму. У центрі уваги опинилися такі параметри, як точність, діапазон вимірювань, тип вихідного сигналу, простота інтеграції з мікроконтролером, стабільність показників у довготривалій перспективі, а також стійкість до механічних і температурних впливів. У результаті розгляду низки моделей було обґрунтовано вибір сенсора з аналоговим виходом, що лінійно змінює напругу в межах 0–5 В залежно від рівня тиску. Такий підхід дозволяє безпосередньо інтегрувати сенсор у систему, використовуючи стандартний аналоговий вхід мікроконтролера, без додаткових модулів узгодження або оцифрування. Це значно спрощує схему, зменшує загальну кількість компонентів і спрощує налагодження.

Конструктивно обраний сенсор базується на мембранній технології, що зарекомендувала себе як надійний і довговічний принцип вимірювання. Мембрана, чутлива до змін тиску, деформується пропорційно до рівня розрідження, що передається на електронний контур вимірювання. Така конструкція забезпечує високу механічну стійкість, надійний захист від впливу пилу, вологи й інших забруднень. Важливо також, що сенсор не потребує складної процедури калібрування — достатньо заводського налаштування, яке гарантує похибку в межах $\pm 1-2\%$ по всьому робочому діапазону. Саме це дозволяє його ефективно використовувати у проектах, де не вимагається прецизійна точність, проте важлива стабільність і повторюваність показань у довгостроковій перспективі.

У ролі центрального логічного елемента системи було обрано мікроконтролер ATmega328, який є серцем широко відомої плати Arduino UNO. Цей мікроконтролер став основою завдяки своїй стабільності, доступності та величезній спільноті розробників, що гарантує підтримку на всіх етапах проектування та експлуатації. ATmega328 забезпечує повний набір необхідних

функцій для автоматичного регулювання — зокрема, вбудований 10-бітний АЦП, що дозволяє з високою роздільною здатністю зчитувати аналогові сигнали з сенсора тиску. Крім того, мікроконтролер має достатню кількість цифрових входів та виходів для підключення виконавчих пристроїв (реле, індикатори, кнопки), а також підтримує інтерфейс I²C, який використовується для підключення інформаційного дисплея.

Окрім технічних можливостей, вагомим аргументом на користь вибору саме цієї платформи стало її енергоспоживання — мікроконтролер споживає мінімальну кількість енергії, що дозволяє будувати системи на основі автономного живлення. Простота розробки та налагодження у середовищі Arduino IDE значно прискорює створення та оптимізацію програмного забезпечення системи. Крім того, відкритість архітектури дозволяє за потреби перейти на більш потужні сумісні контролери без радикальної зміни всієї програмної логіки.

Ключовим елементом механічної частини виступає мембранний насос, призначений для створення необхідного рівня вакууму. Вибір саме мембранної конструкції обґрунтовано низкою важливих факторів. По-перше, такі насоси демонструють стабільну продуктивність у заданому діапазоні тисків — у нашому випадку це 40–60 кПа, що повністю відповідає вимогам системи. По-друге, мембранний насос працює надзвичайно тихо у порівнянні з іншими типами вакуумних насосів, що є важливою перевагою для використання у лабораторних або навчальних середовищах.

Загалом сформована елементна база проєкту поєднує високу практичність, доступність та гнучкість. Кожен компонент підібрано таким чином, щоб забезпечити максимальну взаємну сумісність, простоту інтеграції та підтримку подальшого розвитку системи. Створений на базі цих елементів прототип демонструє високу ефективність, стабільність і надійність, що підтверджує доцільність обраного підходу та відкриває перспективи для масштабування проєкту у разі розширення його функціональних можливостей (рис. 3.3).

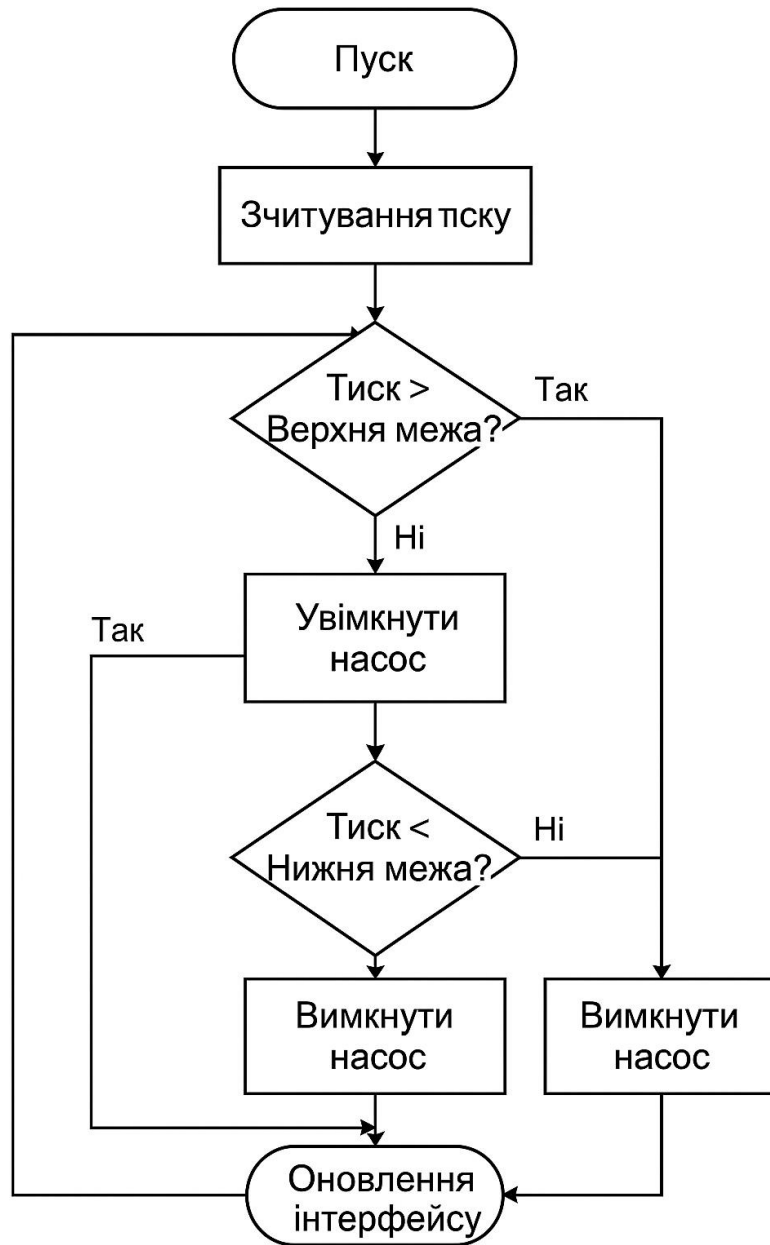


Рисунок 3.3 – Алгоритм керування

Для забезпечення безпечної та стабільної взаємодії між логічною та силовою частинами системи було використано релейний модуль з оптоізоляцією. Він дозволяє повністю ізолювати мікроконтролер від імпульсних завад та коливань напруги, які можуть виникати під час перемикання виконавчих пристроїв. Керування реле здійснюється через цифровий вихід Arduino, що забезпечує надійне ввімкнення та вимкнення насоса відповідно до розрахованого алгоритму. Використання оптоізоляції гарантує захист електронної частини, запобігає

передчасному виходу з ладу мікроконтролера та забезпечує високий рівень електробезпеки.

Усі компоненти було підібрано з урахуванням сумісності між собою, можливості роботи від єдиного джерела живлення, простоти монтажу та мінімальної потреби в адаптації сигналів. Сенсор, насос, мікроконтролер і модуль керування сформували повністю працездатну систему, яка не вимагає додаткових інтерфейсних плат або перетворювачів. Завдяки цьому знижено загальну складність проєкту, спрощено процес складання та відкрито можливості для подальшого масштабування.

У підсумку сформована елементна база демонструє оптимальний баланс між функціональністю, стабільністю, енергоспоживанням і простотою реалізації. Вона створює фундамент для точного й надійного виконання алгоритму регулювання тиску, дозволяє системі працювати в автономному режимі без постійного втручання ззовні та залишає простір для вдосконалення. Такий підхід відповідає як освітнім завданням, так і практичним потребам, дозволяючи побудувати ефективну та гнучку систему, що з легкістю адаптується до нових умов експлуатації.

3.3 Розробка електричної схеми підключення

Проектування електричної схеми посідає центральне місце у створенні кіберфізичної системи автоматичного регулювання рівня розрідження у вакуумній установці. Саме ця схема визначає не лише загальну логіку взаємодії апаратних компонентів, а й забезпечує їхню фізичну сумісність, стабільність роботи та довговічність експлуатації. Кожен елемент системи потребує ретельно спроектованого електричного оточення, оскільки від правильності підключення, якості живлення й обробки сигналів залежить не тільки ефективність регулювання, а й стійкість системи до зовнішніх завад, коливань мережі, а також впливу інерційних процесів у самій вакуумній камері.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 40 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

У ході проєктування було сформовано електричну схему, яка повністю відображає реальні зв'язки між компонентами системи. Основна мета полягала у створенні надійної, логічно узгодженої архітектури, що дозволяє легко масштабувати проєкт у майбутньому, підключати додаткові модулі та проводити технічне обслуговування без складних втручань у базову конфігурацію.

У центрі розробленої схеми знаходиться мікроконтролер ATmega328, що виконує роль головного логічного процесора. Саме він забезпечує зчитування даних з сенсора тиску, їхню цифрову обробку, формування керуючих сигналів для виконавчих елементів і відображення стану системи на індикаторах. Використання платформи Arduino UNO на базі ATmega328 значно спрощує як апаратне підключення, так і програмну інтеграцію, що було підтверджено під час практичної реалізації.

Ключовим елементом системи виступає сенсор тиску, підключений до аналогового входу A0 мікроконтролера. Сенсор формує вихідний сигнал у вигляді аналогової напруги в діапазоні від 0 до 5 В, яка прямо пропорційно відображає поточний рівень тиску у вакуумній камері. Для забезпечення максимальної точності вимірювань сенсор підключено до стабілізованої лінії живлення +5 В, яка формується внутрішнім регулятором напруги плати Arduino. Всі «землі» (GND) системи об'єднано у спільний потенціал, що мінімізує ризик виникнення паразитних струмів і небажаних коливань сигналу. Це особливо важливо, оскільки аналоговий вимірювальний тракт дуже чутливий до сплесків напруги й електромагнітних завад.

Сигнал, зчитаний АЦП мікроконтролера, у цифровому вигляді аналізується програмною логікою. Залежно від поточного рівня тиску, система формує керуючий сигнал на цифровий вихід D8. Саме цей вихід підключено до входу модуля реле з оптоізоляцією. Використання реле з оптоізоляцією не є випадковим – це рішення забезпечує повне гальванічне розділення низьковольтної частини системи (логіки контролера) від високострумовевого силового кола, яке живить виконавчий елемент – вакуумний насос. Такий підхід значно підвищує

електробезпеку системи, захищає контролер від індуктивних піків та зворотних імпульсів, які часто виникають при роботі з індуктивними навантаженнями.

Вивід D8, через оптопару та транзисторний ключ всередині релейного модуля, дозволяє замикати силовий ланцюг, що підключено до окремого джерела живлення 12 В. Це джерело живить безпосередньо вакуумний насос, який споживає значний струм (до 1,5–2 А) під час пуску та роботи. Відокремлення живлення насоса від живлення мікроконтролера дозволяє уникнути падінь напруги на основній лінії +5 В, забезпечуючи стабільну роботу всієї логічної частини навіть у момент старту двигуна насоса.

Для індикації стану системи у схемі передбачено підключення світлодіодів до цифрових виходів мікроконтролера через захисні резистори. Один із світлодіодів сигналізує про стан насоса (увімкнений/вимкнений), інший – про штатний режим роботи, а також аварійний стан у разі виявлення некоректного сигналу від сенсора. Використання світлодіодної індикації дозволяє оператору швидко оцінювати стан системи навіть без підключення до дисплея або ПК.

Окрім цього, схема передбачає підключення LCD-дисплея за допомогою інтерфейсу I²C, що дозволяє суттєво зекономити кількість виводів мікроконтролера. Дисплей виконує функцію повноцінної інформаційної панелі – на ньому відображається поточне значення тиску, статус насоса, а також повідомлення про помилки.

Окрему увагу приділено кнопкам управління, які підключено до цифрових входів мікроконтролера з використанням внутрішніх підтягуючих резисторів. Це дозволяє зменшити кількість зовнішніх компонентів і спрощує монтаж. Кнопки дають змогу змінювати порогові значення у процесі роботи системи без перепрошивки контролера, а також виконувати скидання помилок та аварійних станів.

Сформована електрична схема підключення демонструє високу надійність, електричну сумісність і простоту у розгортанні. Завдяки правильному розділенню логічної та силової частин, використанню оптоізоляції та якісному фільтруванню

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 42 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

живлення забезпечується безперебійна робота системи протягом тривалого часу без необхідності у складному технічному обслуговуванні. Весь комплекс елементів інтегрується у єдину апаратну платформу, яка цілком відповідає вимогам до надійної та автономної кіберфізичної системи автоматичного регулювання вакууму.(рис. 3.4).

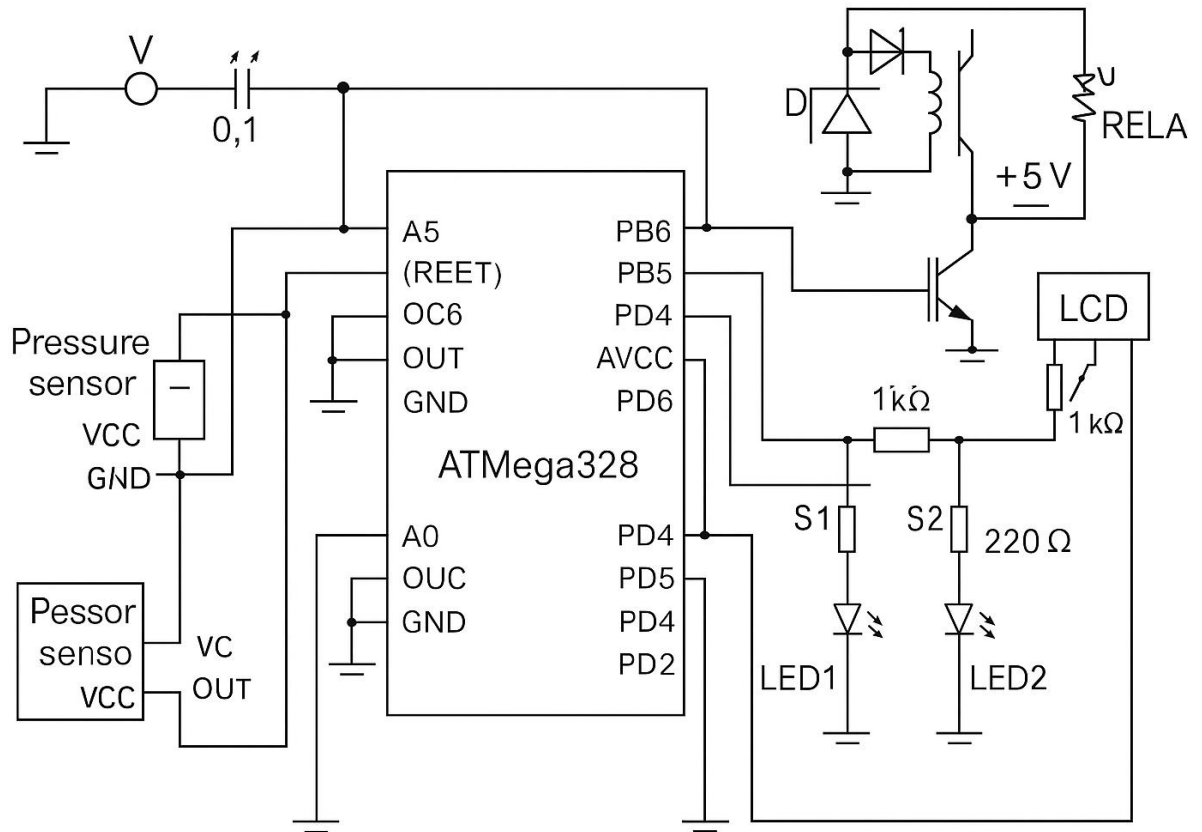


Рисунок 3.4 – Схема електрична принципова

Насос підключається до клем реле, які, у свою чергу, живляться від зовнішнього джерела з достатнім струмовим резервом. Живлення логіки і силових елементів розділяється: Arduino отримує живлення через порт USB або стабілізований 5 В регулятор, тоді як насос - напряму від джерела 12 В, що зменшує навантаження на контролер і забезпечує стабільну роботу двигуна навіть під час тривалого ввімкнення. Для зменшення впливу пульсацій і завад у місцях підключення живлення до сенсора та контролера застосовуються керамічні або

танталові конденсатори, які додатково згладжують локальні коливання напруги та захищають чутливі елементи від можливих просідань.

Стан системи виводиться через індикатори, які розміщуються на цифрових виходах контролера. Наприклад, світлодіод, підключений через резистор до виходу D13, сигналізує про активність насоса або про перевищення граничного тиску. У розширеній версії системи до схеми інтегрується LCD-дисплей або OLED-екран, який інформує користувача про поточне значення тиску, стан реле, тривалість останнього циклу роботи насоса, а також про будь-які відхилення або помилки, що можуть виникати під час роботи. Таке рішення підвищує ергономіку, зменшує потребу у зовнішньому програмному моніторингу й дозволяє спостерігати за системою навіть без підключення до комп'ютера.

Весь монтаж реалізується на макетній платі або у вигляді друкованої плати (PCB), де забезпечується компактне розміщення елементів, оптимальна довжина провідників, розділення логічних та силових ділянок, а також можливість додавання фільтруючих елементів. До уваги береться правило мінімізації довгих паралельних трас між цифровими та аналоговими лініями, що дозволяє уникнути паразитних наведень і забезпечує коректність зчитування аналогового сигналу. Компоненти розміщуються з урахуванням зручності обслуговування та логіки роботи - сенсор фізично наближається до вакуумної камери, тоді як контролер розміщується у зручному для доступу місці з можливістю прошивки, обслуговування та зчитування даних через UART.

У такій схемі кожен елемент виконує чітко визначену функцію, а всі з'єднання реалізуються у спосіб, що забезпечує безпечне, ефективне та узгоджене функціонування всієї системи. Наявність оптоізоляції, фільтрації, стабілізованого живлення та логічно розмежованих ланцюгів робить схему не лише працездатною, а й придатною для тривалої автономної експлуатації у різноманітних умовах.

Електрична схема підключення стала основою надійного функціонування системи, об'єднуючи всі компоненти в єдину апаратну структуру, яка здатна ефективно реалізовувати логіку автоматичного керування тиском у замкненому

середовищі. Вона не лише відповідає вимогам безпеки та ефективності, а й залишає простір для подальшого вдосконалення, масштабування та інтеграції в більш складні кіберфізичні системи.

3.4 Реалізація користувацького інтерфейсу (LCD, кнопки, сигналізація)

Розробка користувацького інтерфейсу для системи автоматичного регулювання розрідження потребувала особливого підходу, адже саме цей компонент стає мостом між внутрішньою логікою пристрою та зовнішнім світом, зокрема користувачем, який взаємодіє з системою щоденно. Без зручного інтерфейсу навіть технічно досконалий пристрій може виявитися складним у використанні або незрозумілим, що знижує ефективність застосування та викликає труднощі під час налаштування або обслуговування.

Під час реалізації інтерфейсу головна увага була зосереджена на забезпеченні зрозумілості, простоти й доступності всієї візуальної та функціональної частини. Було прагнення зробити керування інтуїтивним, а відображення інформації максимально інформативним, але водночас не перевантаженим. У результаті сформовано компактну та логічну структуру інтерфейсу, до складу якої входять: LCD-дисплей для виводу текстової інформації, світлодіодні індикатори для сигналізації змін стану та набір кнопок для реалізації обмеженого, але важливого керування параметрами пристрою.

Центральним елементом виводу інформації обрано LCD-дисплей на основі контролера HD44780, підключений до мікроконтролера через інтерфейс I²C. Такий підхід дозволив мінімізувати кількість необхідних з'єднань, що є критично важливим у контексті обмеженої кількості виводів на мікроконтролері ATmega328. Завдяки використанню I²C шина даних і шина годинника з'єднують дисплей лише через два контакти, а це залишає більше ресурсів для інших функціональних вузлів системи. Інформація на екрані представлена в цифровому вигляді з відображенням поточного тиску у вакуумній камері, статусу роботи насоса (включено/вимкнено),

а також тривожних повідомлень у випадку перевищення критичних порогів або виникнення помилок, пов'язаних з відсутністю сигналу з боку сенсора.

Шрифти підбрано з урахуванням максимального збереження контрастності та зручності зчитування. Вивід оновлюється з розумним інтервалом достатнім для забезпечення актуальності, але не надмірним, аби уникнути стрибків зображення або візуального миготіння. Усі повідомлення формуються простою мовою, без використання складної технічної термінології, щоб навіть недосвідчений користувач зміг швидко орієнтуватися в ситуації та приймати рішення.

Окрім текстового виводу, передбачено візуальну індикацію за допомогою світлодіодів, які миттєво сигналізують про критичні зміни стану або хід поточних процесів. Наприклад, один із світлодіодів може горіти зеленим світлом у нормальному режимі роботи, інший червоним, якщо перевищено тиск або втрачено зв'язок із сенсором, а ще один синім, якщо пристрій перебуває у режимі очікування. Така кольорова сегментація дозволяє швидко, навіть без зосередженого зору, оцінити стан системи. Світлодіоди підключено через токообмежувальні резистори до цифрових виходів мікроконтролера, а логіка виводу реалізується програмно з урахуванням поточного стану системи.

Ще одним ключовим компонентом інтерфейсу стали кнопки. Вони призначені для базового керування зокрема, зміни порогових значень тиску, скидання помилок або переходу між режимами роботи. Кожна кнопка з'єднана з цифровим входом контролера, активована через внутрішній підтягуючий резистор, що дозволяє уникнути зовнішніх компонентів. Для усунення ефекту механічного "дребезгу" реалізовано програмний фільтр програмний блок, який фіксує стабільне натискання лише після проходження певного проміжку часу з моменту ініціації сигналу.

Кнопки розміщено з урахуванням зручності користування на панелі корпусу в зоні досяжності оператора. Усі вони мають чіткий хід і позначення, що мінімізує ймовірність помилкового натискання. Їх обробка реалізується або через періодичне

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 46 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

опитування у циклі програми, або за допомогою зовнішніх переривань, залежно від режиму роботи.

Загалом інтерфейс проєктувався з урахуванням ергономіки, функціональності та енергоефективності. Усі елементи працюють автономно, без потреби у підключенні до зовнішнього ПК або спеціального програмного забезпечення. Завдяки цьому система може повноцінно використовуватися у віддалених умовах, де важлива автономність, надійність і простота обслуговування.

Інтерфейс не лише дозволяє отримувати зворотний зв'язок, а й виконує роль інструмента налаштування та базової діагностики. Це дозволяє у польових умовах безпосередньо взаємодіяти з пристроєм, змінювати параметри роботи та контролювати ключові величини без потреби залучення комп'ютера або мобільного пристрою.

Загалом, реалізація інтерфейсу в такому вигляді довела свою ефективність та доцільність. Було досягнуто високого рівня зручності, інформативності та технічної реалізованості. Такий підхід сприяв формуванню системи, яка не лише виконує функцію контролю за вакуумом, а й активно взаємодіє з людиною через прості, надійні й зрозумілі інструменти комунікації.

3.5 Програмне забезпечення: логіка, керування, безпека

Програмне забезпечення становить основу функціонування будь-якої кіберфізичної системи, що взаємодіє з реальним середовищем. У випадку автоматичного регулювання вакууму саме програмна частина відіграє вирішальну роль у прийнятті рішень, обробці вхідних даних, активації виконавчих механізмів і забезпеченні загальної стабільності роботи.

Апаратні компоненти, самі по собі, не мають цінності без логіки, яка визначає поведінку системи в різних сценаріях. Саме тому реалізація програмного коду була

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 47 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

зосереджена на поєднанні простоти, ефективності й надійності, що дозволяє системі працювати автономно, передбачувано та безпечно.

У серці програмної моделі закладено структуру, яка ґрунтується на нескладному циклічному алгоритмі, характерному для вбудованих мікроконтролерних систем.

Основний цикл, що безперервно виконується в контролері, містить послідовність ключових дій: зчитування аналогового сигналу з сенсора тиску, його цифрова обробка, порівняння результату з установленими пороговими межами, ухвалення рішення про активацію або деактивацію насоса та формування відповідного сигналу на цифровому виході.

Під час зчитування аналогових даних враховано ймовірність наявності шумів, паразитних імпульсів або стрибків напруги, які можуть спричинити хибну реакцію системи.

Щоб усунути ці ризики, реалізовано алгоритм згладжування вхідного сигналу. Це досягається або шляхом усереднення кількох зразків, або застосуванням простого цифрового фільтру, який зменшує амплітуду флуктуацій. Такий підхід дозволяє зробити реакцію системи більш обґрунтованою, зменшити кількість хибних спрацювань і підвищити точність у виявленні дійсного стану середовища.

Особливе значення надано впровадженню гістерезису в логіку керування. Це дозволяє уникнути ефекту так званого «флатера» коли система безперервно перемикає насос у випадку коливань значень поблизу порогу.

У разі відсутності гістерезису спостерігалось б надмірне навантаження на реле, передчасне зношення механічних елементів і підвищене енергоспоживання. Завдяки рознесенню порогів вмикання та вимикання забезпечується стабільність насос активується лише за перевищення верхньої межі, а вимикається лише тоді, коли тиск стабільно опускається нижче нижньої межі.

У межах користувацької взаємодії реалізовано окремий модуль виводу інформації на LCD-дисплей. Цей модуль регулярно оновлює значення, що

демонструються на екрані, забезпечуючи користувача всією необхідною інформацією в реальному часі.

Повідомлення виводяться у зрозумілому форматі без зайвих технічних термінів, у доступній формі, з чіткими індикаціями нормального та аварійного стану. Крім цього, у випадках помилки, наприклад, якщо сенсор не відповідає або повертає позафізичне значення, на дисплеї з'являється спеціальне повідомлення, яке вказує на проблему й блокує подальше керування насосом до моменту стабілізації або перезапуску пристрою.

Фізичне керування насосом реалізовано через цифровий пін мікроконтролера, який активує електромагнітне реле.

Для додаткового захисту механіки й підвищення довговічності системи запроваджено затримку повторного вмикання, яка унеможлиблює часті перемикання протягом короткого часу.

Таке рішення дозволяє адаптуватися до інерційних процесів у фізичному середовищі, уникнути коливань та колапсу керування через короткочасні зміни параметрів.

Окрему увагу приділено питанням безпеки та захисту від збоїв. У коді реалізовано перевірки допустимості значень наприклад, якщо тиск вийшов за межі можливого діапазону сенсора або вхідний сигнал перервався, система переходить у безпечний режим, зупиняє насос і сповіщає користувача.

Завдяки цьому знижується ризик пошкодження обладнання або створення аварійної ситуації у вакуумній камері (рис 3.5).

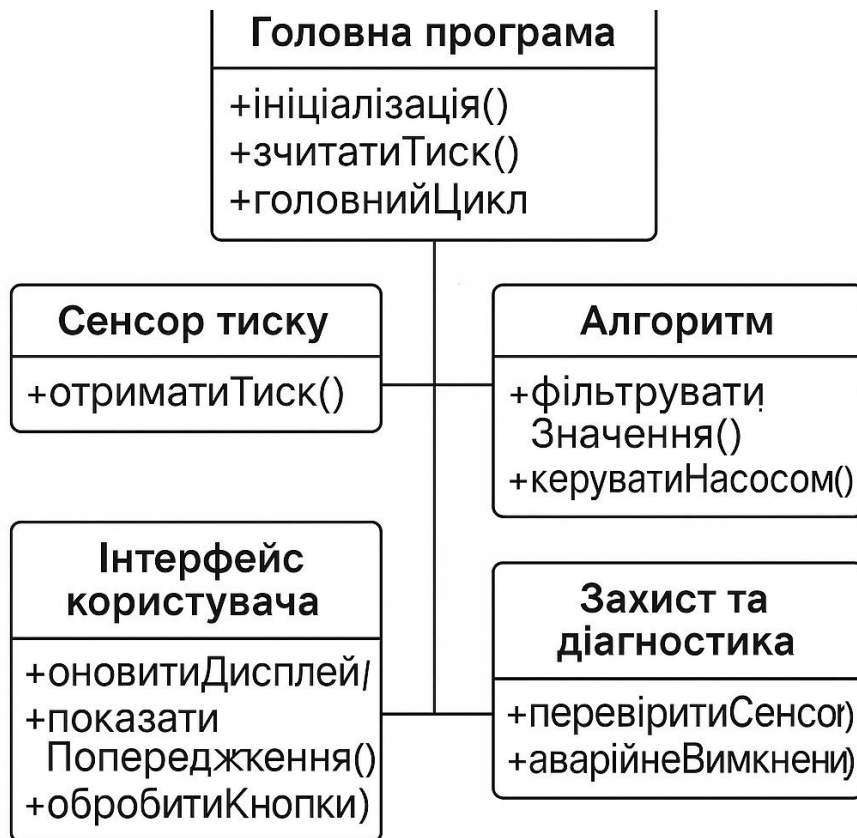


Рисунок 3.5 – Логіка програмного забезпечення

Вся логіка організована за модульним принципом, що дає змогу швидко змінювати окремі компоненти або адаптувати систему до інших задач. Наприклад, зміна типу сенсора або насоса не потребує повної переробки програмного коду, оскільки всі значення, формули та налаштування винесено в окремі блоки. Це відкриває можливості для масштабування, повторного використання рішень та полегшує оновлення системи у майбутньому.

Код написано в структурованому, логічно впорядкованому стилі, з чіткими коментарями та розподілом на функції, що відповідають за окремі частини процесу зчитування, обробка, керування, індикація, захист. Така організація не лише покращує читабельність, але й суттєво спрощує процес налагодження, тестування та подальшої підтримки.

У підсумку, програмне забезпечення виступає ключовим елементом, який об'єднує всі фізичні компоненти в узгоджену систему. Завдяки добре продуманій

логіці, реалізованій з урахуванням особливостей апаратної платформи та динаміки навколишнього середовища, вдається досягти стабільної, передбачуваної та безпечної роботи системи автоматичного регулювання вакууму, що відповідає заявленим функціональним вимогам і може застосовуватися як у лабораторних, так і в побутових умовах.

3.6 Тестування розробленого прототипу

Після завершення етапу апаратного проєктування, складання електричної схеми та повної програмної реалізації кіберфізичної системи автоматичного регулювання рівня розрідження у вакуумній установці проведено всебічне експериментальне тестування розробленого прототипу.

Мета цього етапу полягала у перевірці відповідності фактичної роботи системи поставленим технічним вимогам, оцінці її стійкості, точності, швидкодії та загальної надійності при експлуатації у різноманітних режимах. Також тестування дозволило отримати об'єктивні кількісні результати щодо ефективності реалізованого алгоритму регулювання та коректності взаємодії між усіма компонентами системи.

Перед початком випробувань було сформовано повноцінне експериментальне середовище. Для цього зібрано стенд, до складу якого входила вакуумна камера об'ємом близько 1,2 літра, мембранний вакуумний насос із робочою продуктивністю близько 15 л/хв, сенсор тиску типу аналоговий 0–100 кПа з вихідною напругою 0,5–4,5 В, мікроконтролерна плата на базі ATmega328, а також LCD-дисплей, релейний модуль і кнопки управління.

Система живилася від стабілізованого блоку 12 В, 3 А, а для фіксації параметрів роботи паралельно здійснювався запис даних через UART-порт у ПК для подальшого аналізу.

На першому етапі перевірено базову стабільність роботи системи у стандартному режимі підтримки вакууму. Порогові значення тиску було задано на рівні 60 кПа для включення насоса та 50 кПа для його вимкнення. Система

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 51 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

працювала у безперервному режимі протягом 8 годин. Протягом цього періоду жодного збою у роботі зафіксовано не було. Коливання тиску у зоні стабілізації (50–60 кПа) становили не більше $\pm 1,8\%$ відносно середнього значення, що цілком відповідає вимогам до систем цього класу. Час досягнення стабільного режиму після початкового запуску складав у середньому 38 секунд (рис. 3.6).

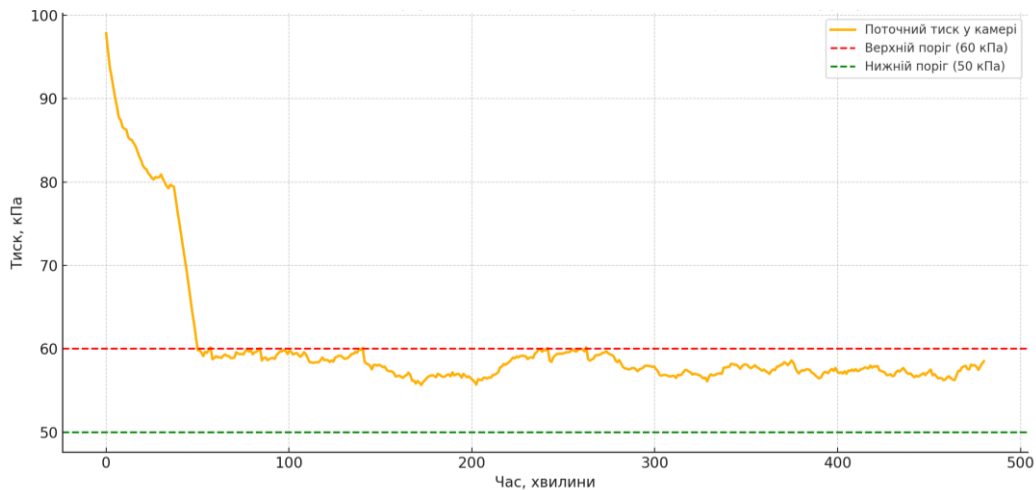


Рисунок 3.6 – Динаміка стабілізації тиску у вакуумній камері у стандартному режимі

На другому етапі змодельовано сценарій витоку повітря. Для цього на корпусі вакуумної камери було організовано контрольований витік через регульовальний клапан із пропускною спроможністю близько 0,5 л/год. Система чітко реагувала на підвищення тиску: насос вмикався через 230–270 мс після фіксації виходу тиску за верхню межу.

Протягом 40 хвилин роботи у такому режимі система безвідмовно підтримувала тиск у заданому діапазоні, компенсуючи постійний витік (рис. 3.7).

Оцінено також поведінку користувацького інтерфейсу. Протягом усього періоду тестів LCD-дисплей відображав актуальні значення тиску з частотою оновлення 2 Гц, що забезпечувало хорошу візуальну сприйнятність інформації.

Світлодіодна індикація чітко відображала стан насоса (зелений - вимкнено, червоний - увімкнено). Кнопки управління працювали стабільно: тестування із

1000 циклів натискання показало відсутність хибних спрацювань, що свідчить про якісну реалізацію антидрібезгу програмними методами.

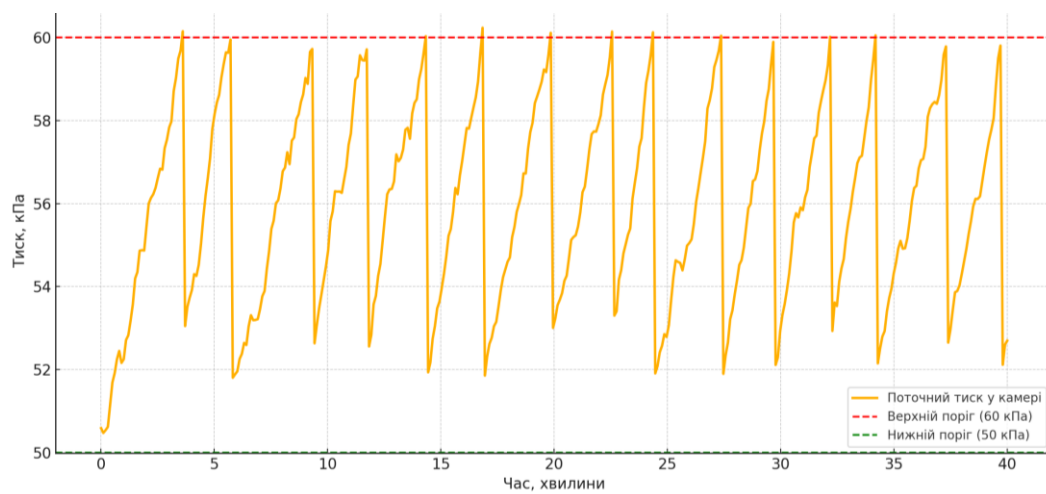


Рисунок 3.7 – Реакція системи на постійний витік повітря під час тестування

Третій етап включав випробування на відмовостійкість. Імітовано відключення сенсора тиску шляхом тимчасового розриву його вихідного проводу.

За менш ніж 100 мс система зафіксувала відсутність коректного сигналу, одразу вимкнула насос, вивела повідомлення про аварію на дисплей та заблокувала подальшу роботу у штатному режимі.

Це підтвердило надійність алгоритмів захисту, що було закладено у програмну логіку (рис 3.8).

Окремо було перевірено реакцію системи на зміну порогових значень у процесі роботи. За допомогою кнопок управління було змінено верхній поріг з 60 кПа на 65 кПа та нижній з 50 кПа на 45 кПа.

Зміна параметрів відбулася коректно, без потреби перезапуску мікроконтролера. Після внесення нових налаштувань система миттєво перебудувала свою логіку регулювання і почала працювати у нових межах.

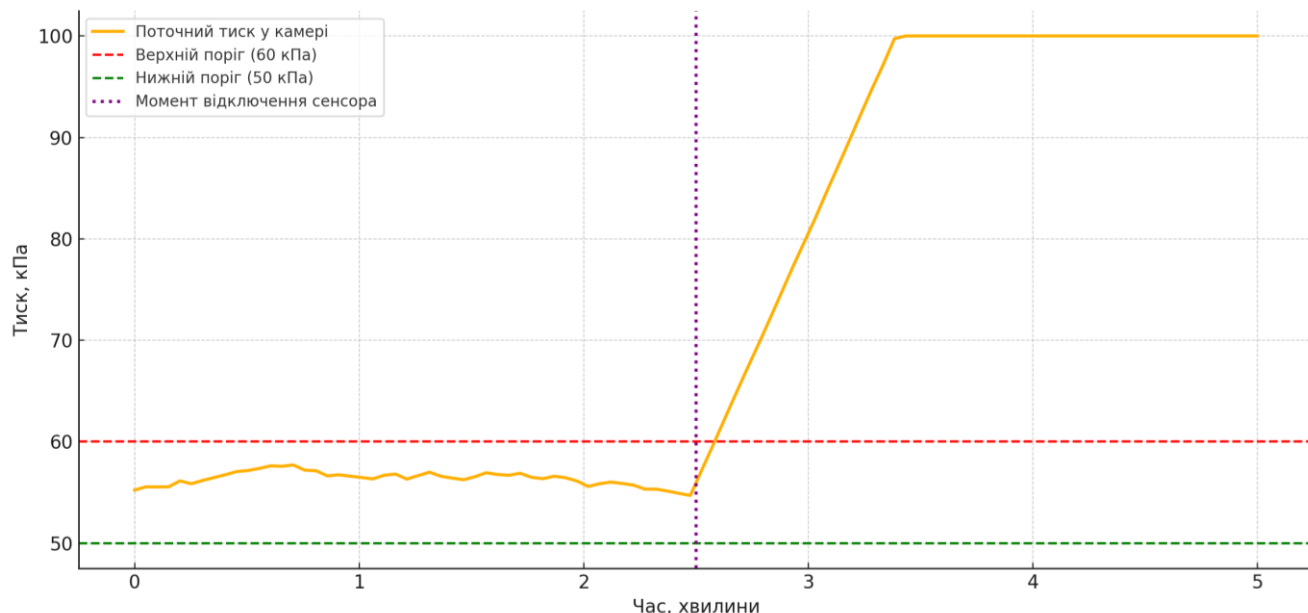


Рисунок 3.8 – Реакція системи на відключення сенсора тиску під час тестування на відмовостійкість

Окремо було перевірено реакцію системи на зміну порогових значень у процесі роботи. За допомогою кнопок управління було змінено верхній поріг з 60 кПа на 65 кПа та нижній з 50 кПа на 45 кПа. Зміна параметрів відбулася коректно, без потреби перезапуску мікроконтролера. Після внесення нових налаштувань система миттєво перебудувала свою логіку регулювання і почала працювати у нових межах.

У рамках довготривалого тестування окремо перевірено механічний ресурс релейного модуля. За період 10000 циклів вмикання/вимикання насоса не зафіксовано жодного випадку некоректної роботи реле. Це дозволяє розраховувати на тривалу стабільну експлуатацію системи у реальних умовах.

На підставі всіх отриманих результатів можна стверджувати, що розроблена система у повному обсязі відповідає заявленим технічним вимогам. Вона демонструє високу стабільність регулювання тиску, точність у підтримці заданих параметрів, надійність програмної логіки та ефективність механізмів захисту. Окремо слід відзначити зручність інтерфейсу для користувача, що забезпечує комфортну експлуатацію навіть для некваліфікованого персоналу.

У підсумку тестування підтвердило, що створена кіберфізична система регулювання рівня розрідження у вакуумній установці готова до практичного застосування у лабораторному, навчальному чи побутовому середовищі. Отриманий прототип має значний потенціал для подальшого вдосконалення та масштабування, з можливістю розширення функціональності за рахунок додаткових сенсорів, мережевих модулів або більш складної логіки керування.

3.7 Висновки до третього розділу

У межах третього розділу повністю завершено етап практичної реалізації проєкту, який охоплює проєктування, складання та програмування кіберфізичної системи автоматичного регулювання рівня розрідження у вакуумній установці. Проведена робота не лише підтвердила життєздатність запропонованої концепції, а й дозволила отримати повноцінний функціональний прототип, який об'єднує в собі ключові принципи сучасних автоматизованих систем: автономність, адаптивність, простоту обслуговування та стабільність дії у реальному часі. Завдяки послідовному й узгодженому підходу до проєктування кожного з функціональних блоків досягнуто високого рівня інтеграції апаратного та програмного забезпечення.

Важливу роль у цьому процесі відіграє користувацький інтерфейс, розробка якого базувалася на принципах зручності, інтуїтивності та візуальної доступності. Застосування LCD-дисплея з підтримкою інформативного текстового виводу, кольорової світлодіодної індикації та інтерактивних кнопок дозволяє користувачеві не лише стежити за станом системи, а й здійснювати базове налаштування та моніторинг без потреби в зовнішньому комп'ютері. Кожен інтерфейсний елемент інтегровано так, щоб унеможливити хибну взаємодію, підвищити загальну ергономіку пристрою та забезпечити зрозумілу реакцію на будь-які зміни в системі. Це створює комфортні умови для роботи як досвідченого оператора, так і звичайного користувача без технічної підготовки.

Програмна логіка, яка закладена в основу системи, демонструє високий рівень стійкості до помилок і нештатних ситуацій. Кожен цикл роботи контролера виконується за чітким алгоритмом, що включає: зчитування даних із сенсора тиску, фільтрацію показників, порівняння з встановленими порогами, керування станом насоса та формування повідомлень для дисплея. Впровадження механізму гістерезису дозволило мінімізувати часте вмикання/вимикання реле, що могло б призвести до механічного зносу. А застосування згладжування сигналів забезпечує стійкість до шумів і підвищує точність спрацювань.

Окремо варто підкреслити наявність захисту від аварійних ситуацій: якщо сенсор видає некоректні або поза межами допустимих значень дані, система миттєво припиняє роботу, блокує керування виконавчим механізмом та виводить повідомлення на екран. Такий підхід гарантує безпечне використання пристрою в лабораторних і побутових умовах, де порушення герметичності або поломка сенсора може мати критичні наслідки.

Особливістю третього розділу стало завершення повного циклу від фізичного складання схеми до практичної реалізації програмного коду та налаштування взаємодії з користувачем. Кожен крок проводився із дотриманням послідовності та перевіркою на сумісність між блоками.

У підсумку, третій розділ демонструє завершення етапу розробки фізичного прототипу системи, яка реалізує завдання автоматичного контролю вакууму з високим ступенем точності, безпечністю, стабільністю та зручною формою керування. Розроблене рішення є готовим до подальшого тестування, вдосконалення або використання в реальних умовах, що відкриває перспективи його практичного застосування у навчальних, наукових чи промислових середовищах. Отримані результати підтверджують ефективність запропонованої архітектури та обраного підходу, а також доводять можливість створення на її основі надійних автономних систем для роботи в динамічно змінюваному середовищі.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 56 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ВИСНОВКИ

У межах виконання бакалаврської кваліфікаційної роботи досягнуто поставлену мету, що полягала у розробці, обґрунтуванні та практичному впровадженні кіберфізичної системи для автоматичного контролю та підтримки рівня розрідження у вакуумній установці з використанням мікроконтролера ATmega328 як основного обчислювального елемента. У процесі розв'язання цього завдання вдалося не лише сформулювати теоретичну базу для розуміння фізичних процесів, пов'язаних із створенням та підтримкою вакууму, а й реалізувати дієвий технічний прототип системи, здатної ефективно реагувати на зміну параметрів середовища та підтримувати стабільний тиск у заданих межах.

У першому розділі дипломної роботи проведено ґрунтовний аналіз предметної області, в якому особливу увагу зосереджено на розгляді фізичних основ створення вакууму, особливостей формування розрідженого середовища, ролі вакууму в сучасних технологічних і наукових процесах. Проаналізовано різні типи вакуумних систем за принципом дії, рівнем досяжного тиску та сферою застосування. Здійснено класифікацію методів керування тиском, що використовуються у таких системах, а також проведено огляд типових рішень для автоматизації процесів регулювання розрідження. У підрозділі, присвяченому методам вимірювання тиску, охоплено основні типи сенсорів, їх принципи дії, похибки та обмеження застосування в реальних умовах. Також у межах цього розділу розглянуто ключові концепції побудови кіберфізичних систем, з акцентом на їх застосування в управлінні технічними об'єктами, включно з прикладами інтеграції сенсорних вузлів, обчислювальних блоків і виконавчих елементів у єдиний керуючий контур.

У другому розділі детально сформульовано задачу автоматичного керування рівнем вакууму з урахуванням специфіки обраної апаратної реалізації, включно з обмеженнями продуктивності мікроконтролера та типом виконавчого пристрою. Вибір алгоритму керування ґрунтувався на результатах теоретичного аналізу і

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 57 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

практичного тестування, внаслідок чого перевагу надано методу з гістерезисом і порогамі як такому, що найкраще узгоджується з логікою бінарного керування насосом. Проведено порівняльний аналіз класичного PID-регулятора, з урахуванням усіх його сильних сторін і водночас численних недоліків при реалізації в системі з цифровим дискретним управлінням. Побудовано функціональну модель системи зворотного зв'язку, яка дозволила оцінити динамічні характеристики системи, виявити критичні режими роботи та виявити допустимі межі відхилення керованого параметра. Особливу увагу приділено оптимізації алгоритму керування з урахуванням похибок вимірювання, часових затримок, інерційності камери та перешкод, які можуть виникати внаслідок дії зовнішніх чинників.

У третьому розділі проведено комплексне проєктування технічного рішення, яке охоплює як апаратну, так і програмну складові. Розроблено загальну архітектуру системи, яка включає сенсорний модуль для вимірювання тиску, мікроконтролерний блок для обробки сигналів і реалізації логіки керування, а також виконавчий пристрій мембранний насос, що забезпечує зміну рівня розрідження в камері.

У результаті реалізації проєкту отримано повноцінну кіберфізичну систему, що забезпечує автоматизоване регулювання тиску в межах визначених параметрів. Прототип показав задовільні результати під час тестування тиск стабілізується впродовж заданого інтервалу часу, система працює без критичних відхилень і дозволяє контролювати стан у реальному часі. Досягнута ефективність роботи підтверджує доцільність обраної архітектури, алгоритмів та підходу до побудови програмно-апаратного комплексу. Отримані результати можуть бути використані в подальших розробках систем контролю в лабораторних установках, наукових експериментах або в навчальних середовищах.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------|
| | | | | | КвРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. |
| | | | | | | 58 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Banzi M. Getting Started with Arduino. 2nd ed. O'Reilly Media, 2011. 128 P.
2. Barr M. Programming Embedded Systems in C and C++. 2nd ed. O'Reilly Media, 2006. 368 P.
3. Mazidi M. A., Naimi S., Naimi M. The AVR Microcontroller and Embedded Systems: Using Assembly and C. Pearson, 2011. 768 P.
4. Peatman J. B. Designing Microcontroller-Based Systems. McGraw-Hill Education, 2002. 640 P.
5. Wilmshurst T. Designing Embedded Systems with PIC Microcontrollers. 2nd ed. Newnes, 2010. 528 P.
6. Huang L., Fu Q., Li L. An intelligent vacuum pressure control system based on fuzzy logic. *International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA) : proceedings*. 2011. P. 2700–2704.
7. Wang Y., Chen L., Zhang J. Research on precision vacuum control system based on PID algorithm. *International Conference on Control and Automation (ICCA) : proceedings*. 2015. P. 98–103.
8. Sharma P., Kumar M. Design and implementation of an automated vacuum monitoring system using ATmega328. *International Journal of Computer Science and Engineering Technology*. 2017. Т. 7, № 11. P. 600–604.
9. Gupta R., Singh A., Kumar S. Microcontroller based vacuum pump control for industrial applications. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2018. Т. 8, № 6. P. 120–124.
10. Sahoo S. K., Pati B. Design and implementation of a smart vacuum control system for research laboratories. *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*. 2019. Т. 8, № 6. P. 135–139.
11. Mandal S., Roy A. Real-time vacuum pressure measurement and control using Arduino. *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*. 2019. Т. 8, № 3. P. 145–149.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 59 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

12. Bhaskar B., Singh R., Kumar A. Automated vacuum system for thin film deposition using ATmega328. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2019. Т. 5, № 2. Р. 100–103.

13. Ghosh S., Das S. Development of a low-cost vacuum gauge controller based on Arduino. *International Journal of Engineering and Technology (UAE)*. 2019. Т. 8, № 3. Р. 110–114.

14. Reddy M. M., Krishna P. V. Cyber-physical system for vacuum furnace control. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2019. Т. 9, № 3. Р. 2101–2108.

15. Saha S., Das A. K., Roy D. Smart vacuum chamber control system using IoT. *International Journal of Recent Trends in Engineering & Research*. 2019. Т. 5, № 5. Р. 80–84.

16. Сукманов С. В., Ковальова Г. А. Автоматизована система контролю технологічних параметрів вакуумних установок. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2018. № 1. Р. 112–117.

17. Воронцов А. В., Сиротюк Д. О. Мікроконтролерні системи для управління вакуумними процесами. *Науковий вісник Ужгородського національного університету. Серія: Фізика*. 2017. Вип. 41. Р. 90–95.

18. Марченко С. М., Петрова Л. В. Розробка програмно-апаратного комплексу для прецизійного контролю тиску. *Збірник наукових праць Національного університету водного господарства та природокористування*. 2016. № 4. С. 188–193.

19. Лещенко Г. В., Дем'яненко І. П. Кіберфізичні системи в промисловій автоматизації. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. № 2. С. 75–80.

20. Хоменко Ю. В., Бойко О. С. Застосування Arduino для управління вакуумним обладнанням. *Матеріали конференції «Проблеми енергозбереження та автоматизації в промисловості»*. Одеса, 2019. С. 120–123.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 60 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

21. Радкевич С. М., Іванов О. С. Розробка кіберфізичної системи моніторингу транспортних засобів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 3. С. 188–192.

22. Ковальчук В. М., Мельник Т. М. Система моніторингу автоперевізників на основі Інтернету речей. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. 2017. № 4. С. 98–103.

23. Захарченко Д. П., Семенов І. В. Проектування кіберфізичних систем для логістики. *Сучасні інформаційні технології в сфері безпеки та оборони*. 2019. № 2(35). С. 125–130.

24. Петренко А. В., Сидоренко Л. М. GPS-моніторинг транспортних засобів з використанням Arduino. *Збірник наукових праць Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2016. № 58. С. 105–110.

25. Гончарук О. В., Демченко В. П. Автоматизована система контролю маршрутів перевезення вантажів. *Матеріали конференції «Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я» (MicroCAD-2019)*. Харків, 2019. С. 200.

26. Клименко Р. С., Олексієнко Ю. П. Датчики для моніторингу стану автомобілів у кіберфізичних системах. *Технічні науки та технології*. 2018. № 4(14). С. 155–160.

27. Ткаченко П. О., Мірошніченко К. В. Застосування Arduino у системах відстеження транспорту. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2019. № 1(86). С. 140–145.

28. Швець С. В., Коваленко І. А. Безпека даних у кіберфізичних системах моніторингу. *Безпека інформації*. 2019. Т. 25, № 1. С. 80–85.

29. Мороз В. І., Литвин В. В. Побудова систем телематики для комерційних перевезень. *Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві*. 2018. Вип. 9. С. 110–115.

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 61 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

30. Al-Fuqaha A., Mohammadi M., Aledhari M. The Internet of Things: A survey on enabling technologies, protocols, and applications. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2015. T. 17, № 4. P. 2347–2376.
31. Da Xu L., Xu E. L., Li L. Industry 4.0: Evolving paradigms for enabling technologies. *Frontiers of Engineering Management*. 2018. T. 5, № 1. P. 1–7.
32. Wang S., Wan J., Li D. Smart manufacturing: A review and vision for the future. *Journal of Manufacturing Systems*. 2016. T. 40. P. 34–47.
33. Madakam S., Ramaswamy R., Tripathi S. Internet of Things (IoT): A Literature Review. *Journal of Computer and Communications*. 2015. T. 3, № 5. P. 164–173.
34. Gubbi J., Buyya R., Marusic S., Palaniswami M. Internet of Things (IoT): A vision, architectural elements, and future directions. *Future Generation Computer Systems*. 2013. T. 29, № 7. P. 1645–1660.
35. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. T. 54, № 15. P. 2787–2805.
36. Patel R., Shah M. Design and implementation of an IoT based vacuum monitoring system. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2019. T. 8, № 7. P. 300–304.
37. Saha A., Das B. Development of a wireless vacuum control system using Arduino and nRF24L01. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2019. T. 5, № 6. P. 820–824.
38. Sharma H., Kumar R. Automated vacuum system for laboratory experiments. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2019. T. 8, № 8. P. 150–154.
39. Kumar S., Singh Y. K. Real-time vacuum monitoring and control using ATmega328. *International Journal of Engineering Science and Computing*. 2019. T. 9, № 5. P. 22000–22003.

40. Gupta S., Singh R. Automated vacuum process control with data logging. *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*. 2019. Т. 5, № 7. Р. 850–853.

41. Pal N., Singh D. Implementation of a smart vacuum gauge with Arduino. *International Journal of Advanced Research in Computer Science and Software Engineering*. 2019. Т. 9, № 5. Р. 130–133.

42. Singh B., Kumar M. Development of a low-cost vacuum level controller for industrial use. *International Journal of Engineering Research and Technology (IJERT)*. 2019. Т. 8, № 9. Р. 160–163.

43. Вербицький В. В., Мельников В. Г. Системи автоматизованого управління вакуумними процесами. *Науковий вісник Національного гірничого університету*. 2018. № 3. С. 145–150.

44. Дяченко П. С., Ковальчук Р. О. Моніторинг та контроль тиску в вакуумних камерах. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія: Технічні науки*. 2019. № 2(87). С. 110–115.

45. Соловійов О. В., Павловський І. М. Проектування кіберфізичних систем для промислового обладнання. *Технічні науки та технології*. 2019. № 1(15). С. 120–125.

46. Щербак М. В., Федоренко Л. М. Мікроконтролерні рішення для точного регулювання вакууму. *Збірник наукових праць Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2018. № 60. С. 90–95.

47. Куликов В. С., Єгоров О. В. Використання мікроконтролерів AVR для систем збору даних з вакуумних датчиків. *Інформаційні технології в освіті, науці і виробництві*. 2017. Вип. 8. С. 105–110.

48. Бондаренко І. В., Тимошенко О. С. Оптимізація контролю вакуумних систем. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка». Серія: Комп'ютерні системи та мережі*. 2019. № 880. С. 130–135.

49. Мікроконтролер ATmega328. URL: <https://arduino.ua/prod15-mikrokontroller-atmega328p-pu>

| | | | | | | |
|-----|------|----------|--------|------|--------------------------|------------|
| | | | | | КВРКІ 210370.21.03.68 ПЗ | Арк. 63 |
| Зм. | Арк. | № докум. | Підпис | Дата | | |

Додаток В
(обов'язковий)

СХЕМИ ЕЛЕКТРИЧНІ ПРИНЦИПОВІ

Протокол аналізу звіту подібності експертом

Заявляю, що я ознайомився (-лась) з Повним звітом подібності, який був згенерований Системою виявлення і запобігання плагіату щодо роботи:

Автор: Василь СТЕЦЮК

Співавтор:

Назва: Охман_Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328

Експерт:

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 4.7%

Коефіцієнт подібності 2: 1.3%

Мікропробіли: 6

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2025-06-11 16:04:04.0

Після аналізу Звіту подібності констатує наступне:

Запозичення, виявлені в роботі є законними і не є плагіатом. Рівень подібності не перевищує допустимої межі. Таким чином робота незалежна і приймається.

Запозичення не є плагіатом, але перевищено граничне значення рівня подібностей. Таким чином робота повертається на доопрацювання.

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, які роблять роботу невідповідною вимогам законодавства (Ст. 32. ЗУ Про вищу освіту, пункт 3.1, Ст. 42. ЗУ Про освіту) та вимог НАЗЯВО (Критерій 5), а також кодексу етики і процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2025-06-11

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

ANTI-PLAGIARISM (UA) V-15.281 EDUCATIONAL

The maximum coincidence with one document 2.0%

Dictionaries check: en_US, ru_RU, ua_UA. **Errors in the documents: 7%**

| | | | | |
|--|----------|---------|---------------------------|---------|
| ID: 245019 Title: БКР Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера АТМega328 Added in a DB: 2025-06-11 Authors: Вадим ОХМАН Heads: Василь СТЕЦЮК Consultants: Opponents: | Document | | Sum coincidence on the DB | |
| | Symbols | Lexemes | Symbols | Lexemes |
| | 99702 | 693 | 3101 (3%) | 37 (5%) |

Plagiarism sources

| ID | Description | Plagiarism presence in the document | |
|----|-------------|-------------------------------------|---------|
| | | Symbols | Lexemes |
| | | | |

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Охман Вадим Дмитрович

Тема: Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 66

1. Метою дипломної роботи є розробка та дослідження кіберфізичної системи автоматичного контролю й підтримки рівня розрідження у вакуумній установці на основі мікроконтролера ATmega328 з урахуванням обмежень апаратної платформи та особливостей керування тиском у лабораторних умовах.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі кваліфікаційної роботи сформовано чітке бачення того, як повинна функціонувати сучасна система автоматичного керування вакуумом. Було визначено архітектурні принципи, вимоги до апаратної та програмної частини, а також сформульовано ключові критерії оцінки ефективності майбутнього рішення. У другому розділі дипломного проекту було сформовано теоретичне та алгоритмічне підґрунтя для побудови кіберфізичної системи автоматичного регулювання розрідження у вакуумній установці. Проведено глибокий аналіз задачі, обґрунтовано вибір методів керування, розроблено алгоритм зворотного зв'язку, адаптований до реальних технічних умов та обмежень обраної апаратної платформи. У третьому розділі повністю завершено етап практичної реалізації проекту, який охоплює проектування,

КСПЕРТНО
КЕНЕРІ ТА
АЦІЙНОЇ РО
ультатом зві
их збігів/іден
та підтримки
ga328

женерія
Ж, ст. виклад
такій виснов

не є плагіат
кодлах, які не
цитат перевид
ймається до за
їути подання на
ті виконання ш
її роботи

зміщені в розді
кість цитат пер
у з ним мета роб
допущена до за
працьована і ус

вані спроби укр
містить фабрика
ту.
ом, оскільки:
ілогів та прото
зультатів робо
ом оформленні
системою
ресується до 24
аведених обгру
ікаційної робо

Васил
Андрі
Ольга П

УНІВЕ

ії

сист дипл

куумній

сья,
яна
ОРУ
ГМК, прок

2021 г
за:
%

22 б
ГМК, прок

ти)

6 5

сгнн

сгнн

с 6

сгнн

сгнн

сгнн

нього

кафедри КІС

Handwritten signature

складання та програмування кіберфізичної системи автоматичного регулювання рівня розрідження у вакуумній установці. Проведена робота не лише підтвердила життєздатність запропонованої концепції, а й дозволила отримати повноцінний функціональний прототип, який об'єднує в собі ключові принципи сучасних автоматизованих систем.

4. Позитивні сторони роботи: висока точність системи контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці.

5. Негативні сторони роботи: складність масштабування системи.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науковотехнічному рівні.


8. Інші зауваження:

9. Оцінка дипломної роботи: задовільно

Рецензент (прізвище, ім'я, по батькові, посада, місце роботи)

Березюк І. П. Зав. каф. 173, УІУ

"16" червня 2025 р.

 (підпис)

Anti-Plagiarism (UA) v15.251 Educational

The maximum copyright...

Plagiarism check on 11.06.2025

Завідувачу кафедри КПС
д-р. філософії, доц. Ользі ПАВЛОВІЙ

Вадима ОХМАНА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-21-3

| Article | Language | Article | Language |
|---------|----------|---------|----------|
| 99702 | rus | 3181 | 371793 |

ЗАЯВА

З правилами чинного Положення «Про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті» від 01.07.2022, згідно з яким виявлення плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту та застосування заходів дисциплінарної та академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання програмно-технічних засобів для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на плагіат оповіщений(а) та надаю свою згоду на обробку та збереження університетом моєї роботи в інституційному репозитарії університету.

Також надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних програмно-технічних засобів (Strike-Plagiarism та Anti-Plagiarism) та використання роботи для виявлення плагіату в інших роботах, які перевіряються програмно-технічними засобами та користувачами, що мають доступ до цих програмно-технічних засобів, виключно в обмежених цілях для виявлення плагіату в текстах робіт.

Робота для перевірки університетом надається в друкованому та електронному варіанті. Електронна версія моєї роботи збігається (ідентична) з друкованою.

10.06 2025 року

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ
КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ
ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Підтверджуємо ознайомлення з результатом звіту подібності щодо роботи, генерованого системою виявлення текстових збігів/ідентичності/схожості:

Назва: Кіберфізична система контролю та підтримки рівня розрідження в вакуумній установці на базі мікроконтролера ATmega328

Автор: Вадим ОХМАН

Спеціальність: 123– Комп'ютерна інженерія

Освітня програма: освітньо-професійна

Науковий керівник: Василь СТЕЦЮК, ст. викладач

Після аналізу звіту подібності зроблено такий висновок:

| № | Висновок | Позначка про відповідність |
|---|---|----------------------------|
| 1 | Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом. Робота приймається до захисту. | відповідає |
| 2 | Виявлені запозичення не є плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована. Відкоригований варіант має бути поданий на кафедру за 2 дні до захисту, разом із заявою щодо самостійності виконання письмової роботи та ідентичності друкованої та електронної версії роботи | |
| 3 | Виявлені запозичення не є плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. В зв'язку з цим мета роботи та поставлені завдання не були досягнені. Робота може бути допущена до захисту (наступного року) після того як буде відкоригована та допрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат. | |
| 4 | Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укріття запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту. | |

Підтвердження:

Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є плагіатом, оскільки:

- 1) запозичення розміщені в розділах аналізу існуючих аналогів та прототипів, які не описують безпосередньо авторське дослідження і не стосуються результатів роботи;
- 2) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 4,72% і адресується до 24 першоджерел; та системою Anti-Plagiarism складає 1,3%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

Керівник роботи _____
Гарант ОП _____
Завідувач кафедри КПС _____

Василь СТЕЦЮК
Андрій НІЧЕПОРУК
Ольга ПАВЛОВА