

**КИЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ ТАРАСА
ШЕВЧЕНКА**

**ФАКУЛЬТЕТ РАДІОФІЗИКИ, ЕЛЕКТРОНІКИ ТА КОМП'ЮТЕРНИХ
СИСТЕМ**

Кафедра фізичної електроніки

«На правах рукопису»

Робота допущена до захисту в ЕК
рішенням кафедри фізичної електроніки
від 16 травня 2025 року, протокол № 22
Завідувач кафедри д.ф.м.н., професор
_____Анатолій ВЕКЛИЧ

ДИПЛОМНА РОБОТА МАГІСТРА

на тему:

**«ПРОГРАМНО АПАРАТНИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ КЕРУВАННЯ ПОТОКУ
ГАЗУ ЕЛЕКТРОДУГОВОГО РОЗРЯДУ»**

Виконав:

студент 2-го курсу магістратури
денної форми навчання
спеціальності 105 Прикладна фізика та наноматеріали
ОНП «Прикладна фізика та наноматеріали»
Салієнко Михайло Костянтинович _____

Науковий керівник:

д.ф.-м.н., професор
Веклич Анатолій Миколайович _____

Рецензент:

д.ф.-м.н., старший науковий співробітник
Кукла Олександр Леонідович _____

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів без
відповідних посилань

Студент _____ Михайло САЛІЄНКО

РЕФЕРАТ

Дипломна робота вміщує 33 стор., 8 рис..

ДУГОВИЙ РОЗРЯД, АРГОН, ГАЗОВИЙ ПОТІК, РЕГУЛЯТОР,
МІКРОКОНТРОЛЕР, ПЛАЗМА, ТИСК, ІОНІЗАЦІЯ, ТЕПЛОПРОВІДНІСТЬ,
СТАБІЛІЗАЦІЯ.

У роботі розроблено програмно-апаратний комплекс на базі мікроконтролера ATmega328-A для автоматичного регулювання потоку газу за сигналами з датчиків тиску NH710B. Проведено теоретичний аналіз теплових, електричних та спектральних властивостей аргонової плазми з урахуванням домішок металів. Експериментальна частина пропонує спосіб реалізувати регулятор для стабілізації перепаду тиску, підтримки сталих умов розряду та зменшення енергетичних втрат. Запропоноване рішення може бути використане в лабораторних установках для керованих плазмових процесів.

Зміст

1. Вступ.....	4
2. Актуальність теми.....	4
3. Огляд літератури	5
3.1 Дослідження на кафедрі: профілі плазми та діагностика	5
3.2 Вплив конструктивних параметрів та струму.....	6
3.3 Сучасні підходи до регулювання потоку газу в електродугових системах	7
3.4 Огляд літератури з питань апаратного та програмного керування потоком газу	8
4. Теоретична частина.....	10
4.1 Радіальні розподіли температури та густини електронів	10
4.2 Компонентний склад плазми з домішками парів міді	12
4.3 Теплопровідність та електропровідність плазми.....	13
4.4 Взаємодія газового потоку з дуговим каналом	14
5. Проектування системи регулювання потоку газу.....	16
5.1 Вибір мікроконтролера ATmega328-A.....	17
5.2 Схема підключення компонентів системи	20
5.3 Логіка роботи системи та алгоритми керування.....	25
6. Експериментальна частина	28
7. Висновки	29
8. Джерела	31

1. Вступ

Електродугові розряди відіграють важливу роль у широкому спектрі прикладних технологій, включаючи зварювання, матеріалознавство, хімічний синтез, екологічну очистку газів та керування потоками в аерокосмічних системах. Серед різних робочих газів аргон є одним із найбільш поширених завдяки своїм унікальним фізико-хімічним властивостям — інертності, високій стабільності дуги та доступності. Вплив параметрів потоку аргону, зокрема швидкості і тиску, на характеристики плазми є критичним чинником, що визначає режим роботи дугового розряду, його теплові й електричні властивості, стабільність та ефективність енергетичних процесів.

У контексті сучасних технологічних викликів виникає потреба в глибокому розумінні механізмів взаємодії потоку газу з плазмою для оптимізації умов розряду, покращення стабільності роботи плазмових пристроїв та розробки систем активного керування плазмовими процесами. Одним із перспективних напрямів є застосування регульованих потоків аргону для підвищення стабільності електродугового розряду, покращення ефективності іонізації та зниження енергетичних втрат.

Метою даної роботи є розробка програмно апаратного комплексу для керування потоку газу електродугового розряду шляхом теоретичного аналізу, моделювання, розробки системи регулювання потоку.

2. Актуальність теми

Підвищення ефективності та стабільності електродугових систем є однією з пріоритетних задач у багатьох галузях промисловості та науки. Більшість існуючих установок використовують фіксовані параметри потоку газу, що обмежує можливості адаптивного керування розрядом при змінних умовах роботи. Використання аргону як робочого газу надає додаткові переваги

завдяки його інертності, низькому потенціалу іонізації (15,76 eV) та сприятливим умовам для формування стабільної плазми.

Останні дослідження, показують, що навіть незначні зміни швидкості потоку газу можуть істотно впливати на електричні та теплові характеристики розряду, спричиняючи переходи між тепловими та нетепловими режимами, зміну густини електронів та локальну температуру плазми.

Розробка програмно апаратного комплексу для керування потоку газу електродугового розряду дозволяє не лише підтримувати стабільність розряду, але й активно змінювати режим роботи в залежності від необхідних технологічних умов. Це відкриває можливості для підвищення енергоефективності плазмових процесів, розширення діапазону їх застосування та підвищення якості кінцевої продукції.

Таким чином, дослідження впливу потоку газу аргону на електродуговий розряд має високу наукову новизну та практичну цінність і відповідає сучасним вимогам до розвитку плазмових технологій.

3. Огляд літератури

3.1 Дослідження на кафедрі: профілі плазми та діагностика

У процесі підготовки цієї роботи було проаналізовано ряд публікацій, присвячених дослідженню електродугового розряду в плазмі, а також регулюванню подачі робочого газу. Особливу увагу приділено роботам, виконаним на кафедрі радіофізики, електроніки та комп'ютерних систем КНУ імені Тараса Шевченка — зокрема працям А.М. Веклича, І.І. Бабич та О.С. Мурманцева.

У роботах А.М. Веклича і І.І. Бабича [1, 2] особливу увагу було приділено кількісному вивченню параметрів електродугової плазми. За допомогою

спектроскопічних методів визначено радіальні розподіли температури, електронної густини, а також концентрації металевих домішок. Такі вимірювання проводилися як в аргоновому середовищі, так і у вуглекислому газі. Експериментальні результати показали, що при струмі 3.5 А температура в центрі дуги сягала 8000–8500 К, густина електронів перевищувала $1 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$, а концентрація парів міді досягала $1 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Усі ці параметри істотно впливали на електричні й теплові властивості плазми у поперечному перерізі каналу.

Дослідження також продемонстрували, що теплопровідність плазми з мідними домішками залишається відносно сталою — на рівні $\sim 0.28 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$ — по всьому перерізу каналу. Електропровідність, натомість, різко зростає в центральній частині, що зумовлено підвищеною концентрацією вільних носіїв заряду (електронів та іонів міді). Ці дані стали основою для побудови моделей, що описують енергетичний та масовий перенос у розрядному каналі, і дозволяють об'єктивно оцінити межі стабільного функціонування дуги.

3.2 Вплив конструктивних параметрів та струму

У більш пізніх роботах О.С. Мурманцева [5-6, 10-11, 13-14] основну увагу зосереджено на вивченні впливу макропараметрів дугового розряду на структуру та властивості плазми. Зокрема, досліджувалися такі чинники, як сила струму (в межах 3.5–30 А), матеріал електродів (мідь, сплави Cu-Ni, Cu-W), а також геометричні особливості та орієнтація сопел для подачі аргону (осьова та тангенціальна).

За результатами спектроскопічного аналізу виявлено, що зі зростанням струму відбувається не лише підвищення температури центральної зони дуги, але й суттєве розширення області з інтенсивним випромінюванням. При використанні електродів зі сплавів з високою температурою спікання (наприклад, Cu-W) інтенсивність ліній випромінювання нейтральних і

іонізованих атомів зменшується, що свідчить про зниження ерозійних процесів.

Окрему увагу приділено впливу подачі аргону на спектральні характеристики. Згідно з наведеними даними, перехід від осьової до тангенціальної подачі спричиняє формування більш симетричного і стійкого плазмового каналу. Це супроводжується зменшенням ширини спектральних ліній та підвищенням контрастності лінійних профілів. Такий ефект пояснюється стабілізацією дуги за рахунок обертового.

Крім того, встановлено залежність між витратою аргону та положенням температурного максимуму в розрядному каналі. При низьких витратах зона максимальної температури розміщується ближче до анода, тоді як при збільшенні подачі газу вона зміщується в напрямку катода або центру дуги. Ця особливість є критично важливою для оцінки зон нагріву електродів та їхнього зносу.

Загалом результати О.С. Мурманцева та колективу підтверджують, що вибір матеріалу електродів, режиму струму та геометрії подачі аргону має вирішальний вплив на параметри плазми. Це створює підґрунтя для раціонального проектування систем стабілізації дуги, в тому числі — програмно-апаратного програмно апаратного комплексу для керування потоку газу.

3.3 Сучасні підходи до регулювання потоку газу в електродугових системах

У стабільності плазмового дугового розряду одним із ключових чинників є контрольоване постачання робочого газу — як за об'ємною витратою, так і за динамікою подачі. Надмірна або нестабільна витрата призводить до флуктуацій температури плазми, зміни електронної концентрації та, як

наслідок, порушення дугового режиму. Тому в останні роки спостерігається зростання інтересу до створення автоматизованих та апаратно-програмних рішень для точного керування потоком інертного газу, зокрема аргону.

В експериментальних і чисельних дослідженнях[19] показано, що оптимізація параметрів газового потоку — зокрема, швидкості, тиску та напрямку — дозволяє не лише стабілізувати дугу, а й керувати структурою плазмового каналу, зменшити теплові втрати та підвищити однорідність розряду. При цьому особливо важливим є поєднання масових витратомірів із логікою зворотного зв'язку, що дозволяє змінювати режим подачі газу в режимі реального часу залежно від поточних параметрів розряду.

Серед типових технічних рішень — застосування соленоїдних клапанів із широтно-імпульсною модуляцією, вбудованих у контури керування мікроконтролерами. Такі системи дають змогу регулювати подачу газу з точністю до часток літра за хвилину, забезпечуючи адаптацію до змін струму дуги, геометрії електродів та температури плазмоутворюючого середовища. У більш просунутих реалізаціях використовується ПД-регулювання, де потік коригується на основі похибки між заданим і вимірним тиском або масовою витратою.

З технічного погляду, реалізація такого регулятора потребує врахування низки факторів: стабільності джерела живлення, швидкодії виконавчих механізмів (електроклапанів), температурної інерції системи, а також наявності зворотного зв'язку (наприклад, через диференційні датчики тиску).

3.4 Огляд літератури з питань апаратного та програмного керування потоком газу

Стабілізація плазмового розряду за допомогою контрольованої подачі газу є складним технічним завданням, що вимагає поєднання апаратних засобів і

алгоритмічного забезпечення. В літературі розглядаються численні підходи до реалізації таких систем, які базуються на мікроконтролерах, цифрових сенсорах та виконавчих механізмах, що дозволяють регулювати параметри газового потоку в реальному часі.

У технічній документації до мікроконтролера ATmega328P зазначено, що він підтримує необхідні інтерфейси (ADC, UART, I2C, SPI) для зчитування аналогових сигналів з датчиків тиску та забезпечення цифрового керування виконавчими пристроями [21]. Його низьке енергоспоживання та підтримка широкого спектра периферійних пристроїв роблять його придатним для використання у вбудованих системах керування.

Датчик тиску HX710B є прецизійним 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем з вбудованим підсилювачем та фіксованим коефіцієнтом підсилення, що дає змогу зчитувати сигнал з тензодатчиків у межах ± 20 мВ [22]. Він підтримує передачу даних через простий цифровий інтерфейс, що робить його сумісним з низько потужними мікроконтролерами. Завдяки можливості вибору швидкості вимірювання (10 або 40 SPS) та високій точності, датчик є ефективним для контролю змін тиску в системах регулювання газу.

Для візуального контролю параметрів системи використовується LCD-дисплей WC1602A, який підтримує паралельну передачу даних у 4- або 8-бітному режимі та має дві строки по 16 символів [24]. Такий дисплей забезпечує швидке оновлення інформації про тиск, витрату газу або стан системи, що є важливою складовою інтерфейсу оператора.

Кроковий двигун NEMA 17 у поєднанні з драйвером типу TB6600 використовується як виконавчий механізм для зміни положення дросельної заслінки або клапана. TB6600 підтримує налаштування мікрокроків і вихідного струму через DIP-перемикачі, що дозволяє точно налаштувати

механічний привід відповідно до характеристик навантаження [23]. Завдяки ізолюваним входам забезпечується високий рівень захисту від перешкод, що є критичним у промислових умовах експлуатації [25].

4. Теоретична частина

Стабільність електродугового розряду в умовах дії регульованого газового потоку визначається комплексом взаємопов'язаних процесів — іонізацією, емісією з електродів, розподілом електричного струму та втратою тепла через конвекцію. Для забезпечення ефективного керування режимами дугового розряду необхідно мати кількісне уявлення про температурні поля, просторову концентрацію основних плазмових компонентів (електронів, нейтральних та іонізованих атомів), а також про провідність і теплопровідність плазми в зоні розряду. В цьому розділі узагальнено основні положення, що базуються на експериментальних спектроскопічних дослідженнях, виконаних у [2-4], які відповідають умовам, близьким до нашої лабораторної системи.

Розробка програмно-апаратного комплексу для регулювання потоку аргону в електродуговому розряді потребує глибокого аналізу фізичних процесів у плазмі, її теплових, електричних і спектральних характеристик, а також взаємодії газового потоку з дуговим каналом. Описані нижче положення базуються на перевірених експериментальних дослідженнях [2-4].

4.1 Радіальні розподіли температури та густини електронів

У дослідженні [2] за допомогою оптичної емісійної спектроскопії визначено просторову структуру температури та електронної густини в аргоновому електродуговому розряді між мідними електродами при струмах 3.5 А та 30 А. Побудовані радіальні профілі температури $T(r)$ показали, що максимальна температура спостерігається в центральній частині плазмового каналу і сягає ~8500 К при струмі 3.5 А та понад 10 000 К при 30 А. Температура

зменшується до ~ 5000 К на відстані ~ 3 мм від осі, що вказує на різкий тепловий градієнт у плазмоканалі (рис. 6 у джерелі).

Аналогічно, профілі електронної густини $N_e(r)$ мають максимум у центрі дуги: $\sim 1 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ для струму 3.5 А та понад $5 \times 10^{21} \text{ м}^{-3}$ при 30 А. Такий розподіл пов'язаний із високим рівнем локальної іонізації та щільною концентрацією електронів у зоні максимальної температури.

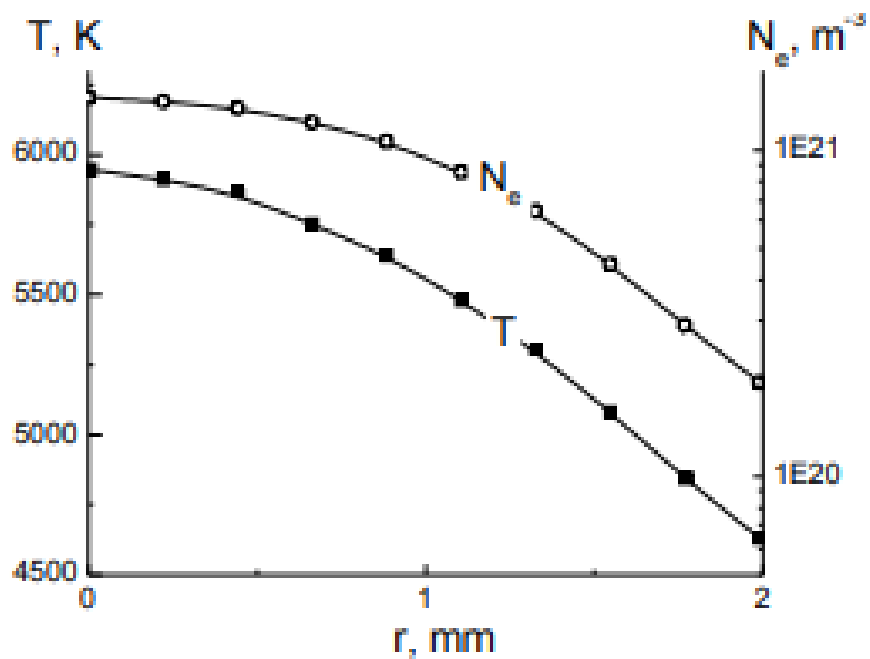


Рисунок 4.1 Радіальні профілі T та N_e для потоку CO_2 при 3,5 А. [2]

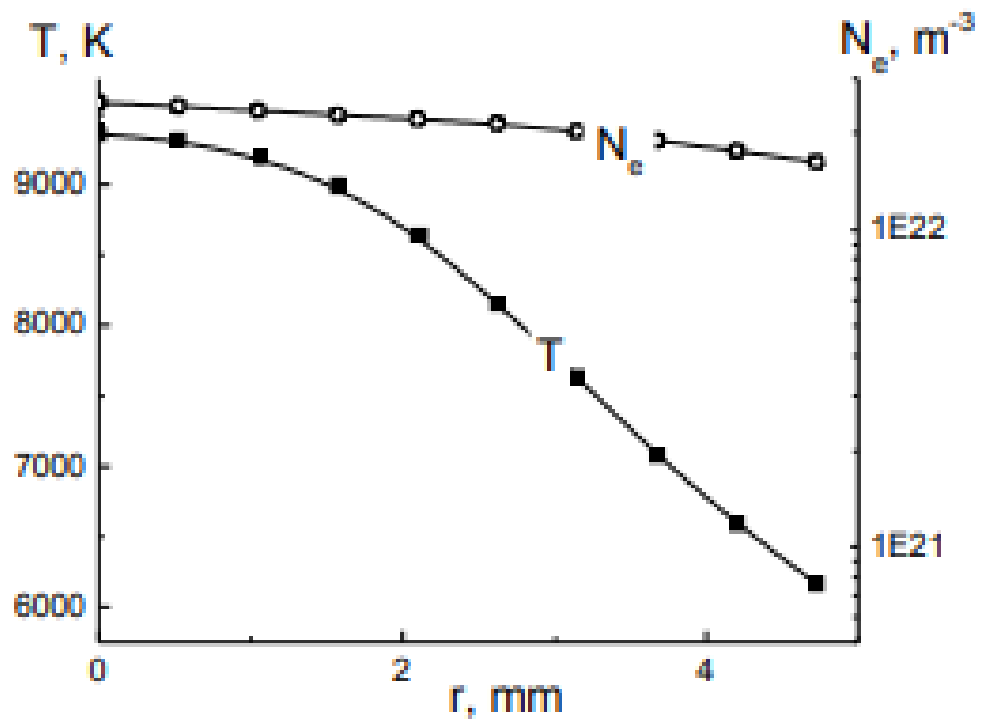


Рисунок 4.2 Радіальні профілі T та N_e для потоку CO_2 при 30 А. [2]

Графіки демонструють, що розміри гарячої області плазми суттєво змінюються зі зростанням струму: зона з високою температурою і густотою електронів розширюється, змінюючи розподіл теплових і електричних навантажень на електроди. Це підтверджує ключову роль струму та геометрії подачі газу в формуванні профілю параметрів у каналі розряду. Такі радіальні профілі є необхідними для чисельного моделювання плазми та оцінки ефективності системи керування подачею аргону.

Ці профілі важливі для визначення зони активного тепло- та масообміну, а також формують основу для розрахунку рівноважного складу плазми. Аналогічні результати отримано при роботі в середовищі CO_2 [2], де температура дещо нижча, а градієнт N_e більш розтягнутий.

4.2 Компонентний склад плазми з домішками парів міді

У статті[4] проведено поглиблений аналіз складу плазми, утвореної в електродуговому розряді між мідними електродами в середовищі CO_2 з

домішками парів міді. Застосовуючи комбінований підхід оптичної емісійної спектроскопії (OES) і лазерної абсорбційної спектроскопії (LAS), автори визначили просторові профілі концентрацій нейтральних атомів міді Cu^0 , однозарядних іонів Cu^+ , а також електронів.

Дослідження показало, що концентрація атомів міді в центральній області каналу сягає $1 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ при струмі 3.5 А. Це в кілька разів перевищує густину нейтрального CO_2 та робить мідь домінуючим компонентом у плазмі. У зоні з максимальною температурою спостерігається також максимум електронної густини (Ne), що пов'язано з інтенсивною іонізацією міді. Іонізовані компоненти Cu^+ сконцентровані ближче до осі дуги, тоді як нейтральні атоми розподілені ширше в поперечному перерізі.

Ці дані дозволяють зробити висновок, що пари електродного матеріалу (міді) мають істотний вплив не лише на оптичні характеристики плазми, а й на її електричну провідність, ступінь іонізації та локальний енергетичний баланс. Результати також дозволяють оцінити тепловий вплив на електроди внаслідок рекомбінаційних процесів на їхній поверхні. Оскільки плазма є в значній мірі металоцентричною, підвищується роль електродного випаровування як джерела носіїв заряду й тепла в об'ємі.

Детальні профілі компонентів у дослідженні [4] можуть бути використані для побудови моделей розряду в реальних умовах експлуатації, що включають мінімальну подачу аргону в змінному навантаженні. Це також підтверджує, що система регулювання витрати повинна враховувати склад плазми утворюючого середовища та реактивність електродних матеріалів

4.3 Теплопровідність та електропровідність плазми

Параметри теплопровідності (κ) та електропровідності (σ) плазми мають фундаментальне значення для опису процесів перенесення енергії та струму в розрядному каналі. Вони визначають теплову рівновагу, розподіл струму,

теплове навантаження на електроди, а також ефективність генерації плазми при заданих електричних і газодинамічних умовах.

У роботі [2] проведено розрахунок $\kappa(r)$ та $\sigma(r)$ на основі експериментально отриманих даних щодо температури, складу та концентрації основних компонентів плазми (включно з мідними домішками). Було встановлено, що теплопровідність у центральній частині каналу при $I = 3.5$ А становить ~ 0.28 Вт/(м·К), практично не змінюючись по радіусу на відстані до 2 мм. Водночас електропровідність демонструє різке зростання в центрі дуги, досягаючи значення ~ 120 С/м. Це пов'язано з високим ступенем іонізації міді, що створює високу концентрацію вільних носіїв заряду.

На периферії плазмового каналу обидва параметри знижуються: електропровідність падає до рівня 10–20 С/м, теплопровідність — до 0.20–0.24 Вт/(м·К). Така поведінка пояснюється зменшенням температури, зниженням густини електронів і домішкових компонентів, а також зростанням впливу нейтрального газу (CO₂ або Ar).

Ці результати мають ключове значення для оцінки локальних втрат енергії в системі, моделювання теплового навантаження на стінки та електроди, а також вибору оптимальних режимів подачі аргону. У реальних умовах застосування системи регулювання витрати газу дозволяє впливати на σ та κ за рахунок керування домішками й температурним профілем, тим самим забезпечуючи контроль над режимом розряду.

4.4 Взаємодія газового потоку з дуговим каналом

Одним з ключових факторів, що впливає на стабільність і просторову структуру електродугового розряду, є витрата та напрям газового потоку. У плазмі динамічних системах газовий потік виконує не лише роль плазмотворювального середовища, але й функцію активного охолоджувача та стабілізатора дуги. Його швидкість, температура, густина та хімічний склад

визначають умови тепловідведення, локальний тиск, рівень турбулентності, а отже — і конфігурацію розряду.

У роботах [2-4] розглянуто вплив направленного газового потоку на структуру дугового каналу та розподіл параметрів у його поперечному перерізі. Встановлено, що зі зростанням швидкості потоку (або його витрати) відбувається звуження центральної зони високої температури й електронної густини. Це зумовлено інтенсивнішим відведенням тепла та зменшенням часу перебування частинок у зоні високого електричного поля.

При малій витраті аргону (до ~ 200 sccm) радіальні профілі температури та N_e є плавними, зі значним розповсюдженням гарячої зони на периферію. Проте при подачі понад 400 sccm спостерігається різке звуження високотемпературної області до центрального каналу діаметром менше 1 мм. Водночас знижується максимальна температура, що свідчить про ефективне конвективне охолодження.

Цей ефект важливий для реалізації короткої, стабільної дуги без значного розширення та коливань у поперечному напрямку. Особливо помітним є вплив напрямку потоку: при тангенціальній подачі відбувається оберտальна стабілізація дуги, а при прямій — її розтягування. У реальних установках, таких як ті, що базуються на плазмотронах або дугових джерелах з соплами, саме витрата та напрямок подачі аргону визначають ефективність втримання плазмового струменя.

Крім того, варіації у витраті газу змінюють розподіл парів металу в об'ємі плазми, що опосередковано впливає на електропровідність. Вищі витрати аргону ведуть до «розбавлення» металевих компонентів і зниження концентрації Cu^0 та Cu^+ . Це знижує іонізаційний потенціал системи й збільшує потребу в компенсації через напругу, що формує зворотний зв'язок між подачею газу й електричними параметрами дуги.

Отже, взаємодія газового потоку з розрядним каналом є не лише побічним фізичним явищем, а й прямим інструментом керування розподілом тепла, струму, іонізації та концентраційного складу плазми. Це підтверджує доцільність реалізації саме програмно-керованого регулятора подачі аргону для підтримки стабільних умов у розрядній зоні.

5. Проектування системи регулювання потоку газу

Враховуючи теоретичний аналіз фізичних процесів у плазмі та вивчені технічні аспекти регулювання газового потоку, на цьому етапі було спроектовано систему, здатну забезпечити стабільну та контрольовану подачу аргону до розрядного електроду. Основною метою є досягнення динамічного керування витратою газу залежно від поточних умов у каналі дуги, з можливістю компенсації змін тиску, температури та навантаження.

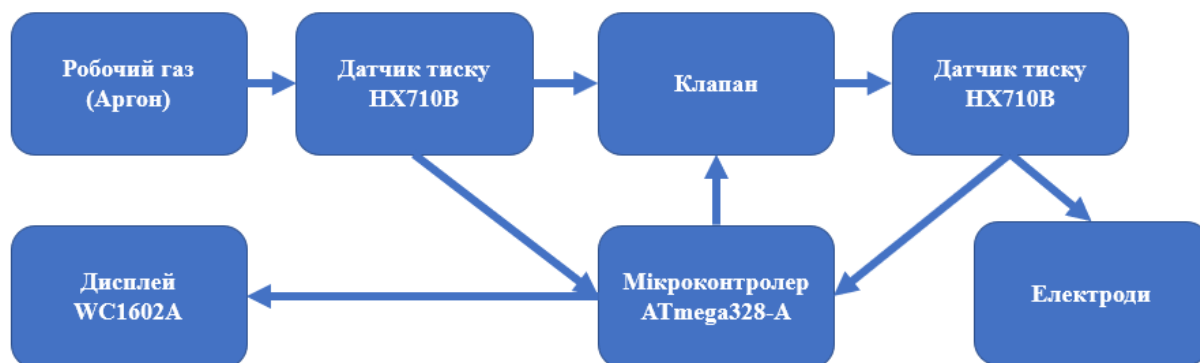


Рисунок 5.1 Функціональна схема системи керування потоком газу.

Система складається з трьох функціональних блоків:

1. вимірювального модуля (датчики тиску HX710B),
2. виконавчого механізму (клапан з кроковим двигуном NEMA17 + драйвер ТВ6600),
3. контролера на мікроконтролері ATmega328-A.

Вхідні дані: два тискові сигнали (до і після регулюючого елемента) зчитуються з HX710B, підключених до SCK (PB1) і DOUT (PC0 та PC1). Мікроконтролер обчислює різницю тиску (Δp) та використовує її для генерації керуючого сигналу. Сигнал надходить до драйвера TB6600: DIR (PC5) визначає напрям, STEP (PD3) генерує імпульси з частотою, що відповідає швидкості зміни положення вентиля.

Була реалізована спрощена форма ПІ-регулятора, яка базується на зміні частоти імпульсів залежно від величини похибки Δp у межах заздалегідь заданого діапазону.

Додатково передбачено:

- функцію автокалібрування при запуску (запам'ятовування початкових значень Δp);
- інтерфейс для виведення значення Δp на дисплей WC1602A у 4-бітному режимі (RS \rightarrow PB4, E \rightarrow PB2, D4–D7 \rightarrow PB1, PB0, PD7, PD6).
- Порт RJ45 для підключення для плати і керування нею.

У наступному підрозділі буде наведено детальний опис електричної схеми, алгоритмів керування і обраних параметрів мікроконтролера. Також буде розглянуто стратегії мінімізації шумів, збереження стабільності при живленні від нестабільних джерел, та можливість розширення системи на інші типи газів чи багатоканальні рішення.

5.1 Вибір мікроконтролера ATmega328-A

Ключовим елементом системи керування регулятором потоку газу є мікроконтролер, який реалізує збір та обробку інформації з датчиків, алгоритми регулювання, а також формує сигнали керування для виконавчих елементів. У межах даної роботи обрано мікроконтролер ATmega328-A, що є

представником 8-бітної лінійки AVR із гарною балансованістю між продуктивністю, функціональністю та простотою реалізації.

ATmega328-A — це енергоефективний мікроконтролер з архітектурою AVR RISC, розроблений компанією Atmel (нині Microchip Technology). Його особливість полягає в оптимальному поєднанні доступної ціни, функціональних можливостей, низького енергоспоживання та широкої підтримки на рівні програмного забезпечення.

Основні технічні характеристики ATmega328-A:

- 8-бітна архітектура AVR;
- Тактова частота до 20 МГц;
- 32 КБ Flash-пам'яті програм;
- 2 КБ SRAM;
- 1 КБ EEPROM;
- 6-канальний 10-бітний АЦП;
- 23 порти введення/виведення загального призначення;
- 3 таймери (2 × 8-бітні, 1 × 16-бітний);
- Підтримка інтерфейсів SPI, I2C (TWI), UART;
- Робоча напруга від 1.8 до 5.5 В;
- Наявність програмованих режимів енергозбереження.

Зазначені характеристики повністю покривають вимоги нашої системи, де необхідно реалізувати:

- зчитування аналогових сигналів із датчиків тиску HX710B;
- формування ШІМ- або імпульсних сигналів для керування драйвером ТВ6600 крокового двигуна;
- вивід текстової інформації на LCD-дисплей WC1602A у 4-бітному режимі;

- контроль за аварійними ситуаціями (втрата зв'язку з сенсорами, нестабільність живлення тощо);
- реалізацію базових регуляторів (в нашому випадку спрощеного ПІ-регулятора).

Вибір ATmega328-A додатково обґрунтовується практичними міркуваннями. По-перше, це добре документований контролер з великою кількістю готових бібліотек та прикладів для периферії, що значно спрощує розробку. По-друге, мікроконтролер підтримує зручне програмування через ISP-інтерфейс, що прискорює прошивку та налагодження пристрою. По-третє, низьке енергоспоживання та стабільна робота навіть при живленні від нестабільних джерел дозволяють використовувати його в лабораторних та автономних умовах.

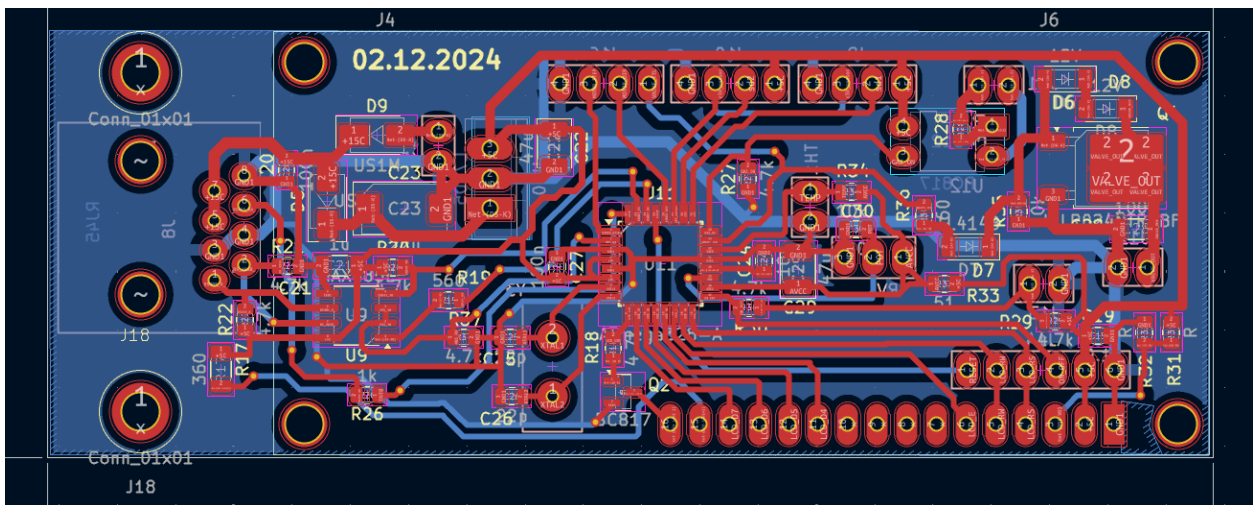


Рисунок 5.2 Візуалізація плати керування з елементами управління подачею газу.

У нашій системі ATmega328-A виступає ядром керування, яке отримує значення з двох датчиків тиску, обчислює перепад тиску, приймає рішення про зміну положення вентиля (напрямок та кількість кроків) і керує NEMA17 двигуном через драйвер ТВ6600. Крім того, мікроконтролер забезпечує індикацію даних на LCD-дисплеї, реалізує автокалібрування при старті,

фільтрацію вхідного сигналу та аварійне вимкнення у разі втрати даних або перевищення порогових параметрів.

Таким чином, АТmega328-А є оптимальним вибором для даної системи, оскільки поєднує необхідний функціонал, стабільність, програмну гнучкість та достатню обчислювальну потужність при малій складності розробки і реалізації.

5.2 Схема підключення компонентів системи

Схема підключення побудована з урахуванням вимог надійності, мінімізації шумів та оптимального використання ресурсів мікроконтролера АТmega328-А.

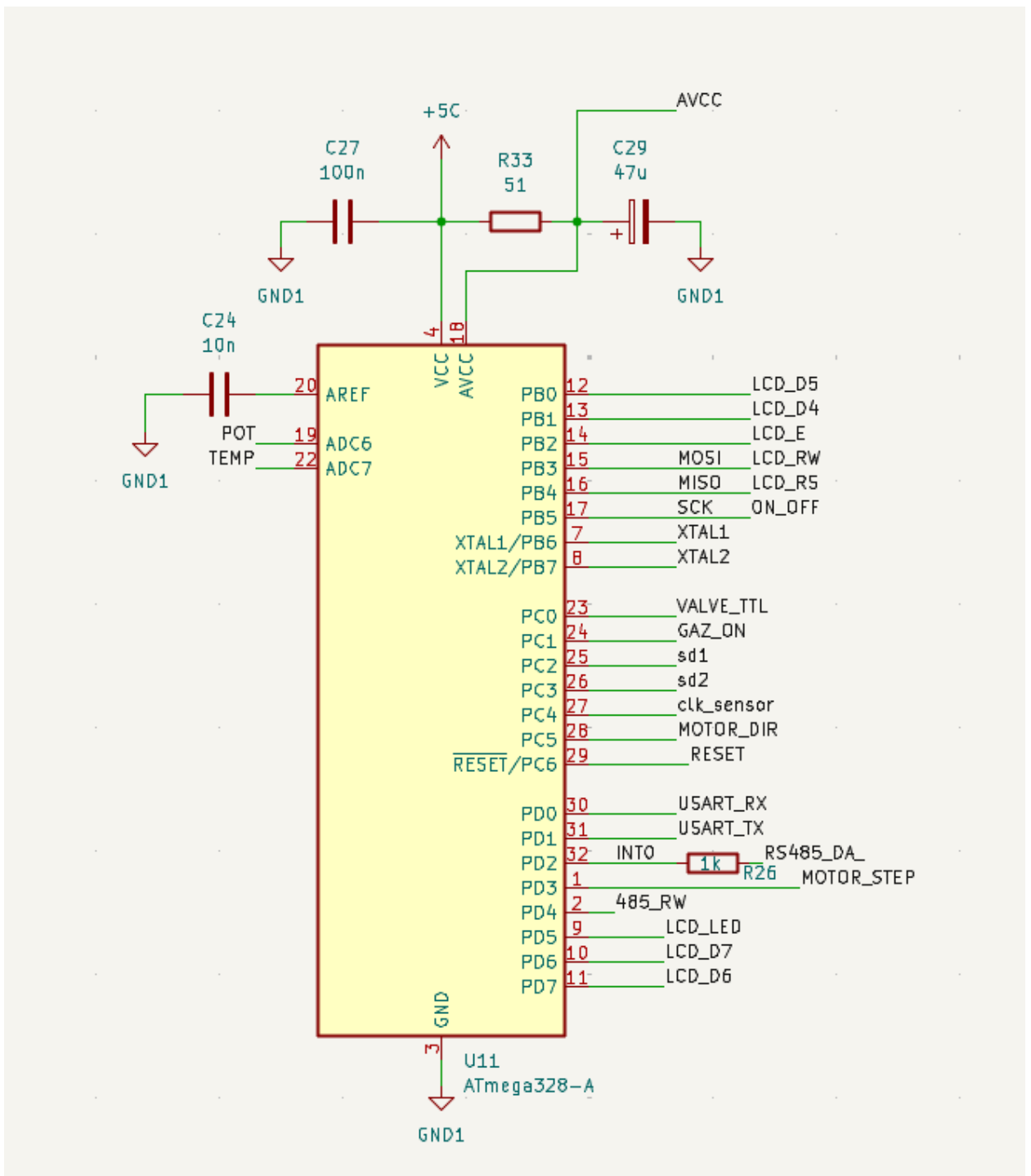


Рисунок 5.3 Схема підключення мікроконтролера ATmega328-A в системі регуляції газового потоку.

Основні компоненти та їх призначення й підключення:

- Датчики тиску NH710B:

- Використовуються для вимірювання тиску газу до та після регулюючого елемента з високою роздільною здатністю (24 біти).
- Перший датчик підключено:
 - SCK — до PC4 (порт синхронізації);
 - DOUT — до PC2 (порт прийому даних).
- Другий датчик підключено:
 - SCK — спільно з першим на PC4;
 - DOUT — до PC3.
- Спільне використання SCK мінімізує кількість необхідних виводів і забезпечує синхронну роботу обох датчиків.
- Для забезпечення надійності на SCK встановлено підтягуючий резистор (≈ 10 кОм), а DOUT має підтягуючий резистор ≈ 100 кОм для підвищення стійкості до перешкод.

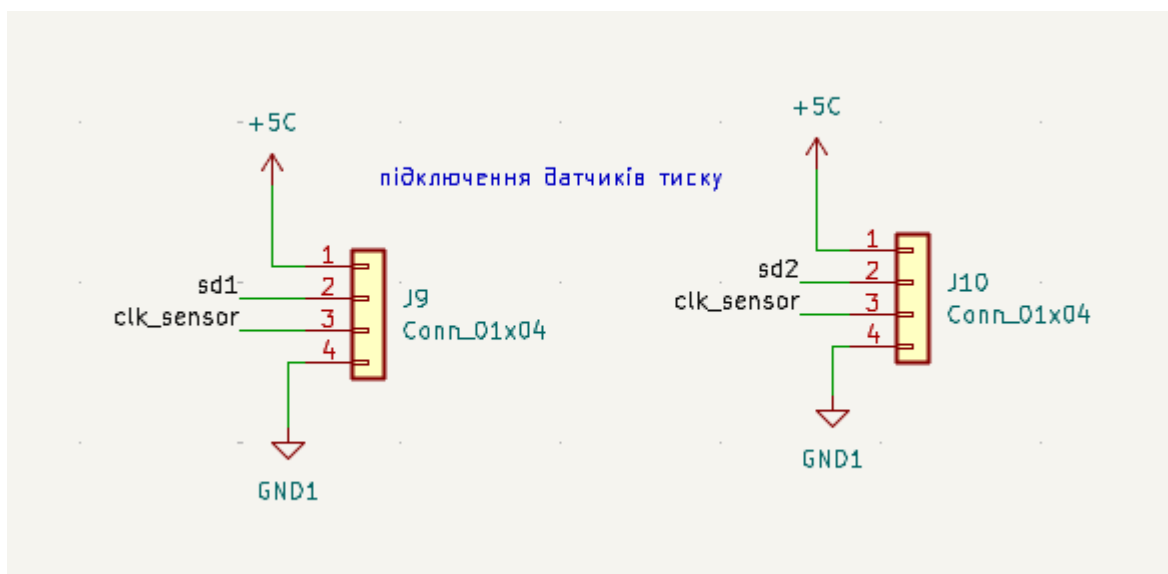


Рисунок 5.4 Підключення датчиків тиску HX710V до мікроконтролера через конектори J9 та J10.

- **Дисплей WC1602A (4-бітний режим):**
 - Призначений для виведення інформації про стан системи: перепад тиску, аварійні повідомлення, режим роботи.

- Підключення дисплея здійснюється через мінімальний набір ліній даних для економії виводів мікроконтролера:
 - RS — PB4 (вибір режиму команди/дані);
 - RW — PB3 (заземлено для фіксації на запис);
 - E — PB2 (керуючий імпульс читання/запису);
 - D4 — PB1;
 - D5 — PB0;
 - D6 — PD7;
 - D7 — PD6.
- Живлення дисплея організоване стабілізованим 5 В джерелом через окрему розв'язку для мінімізації шумів.

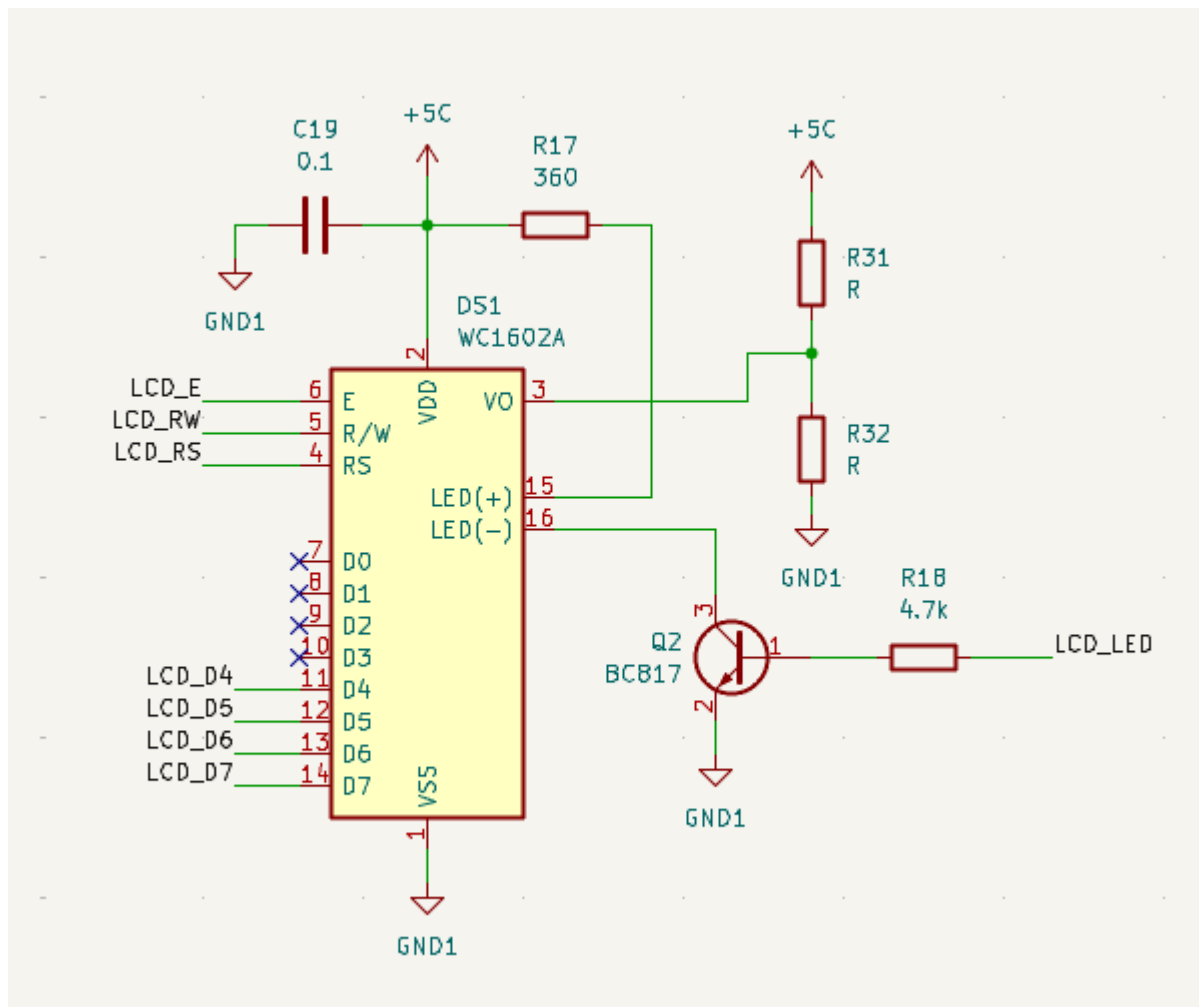


Рисунок 5.5 Принципова схема підключення LCD-дисплея WC1602A з керуванням підсвічування через транзистор.

- **Драйвер крокового двигуна ТВ6600:**
 - Забезпечує керування кроковим двигуном NEMA17, що механічно регулює витрату газу.
 - Підключення:
 - DIR — PC5 (задає напрям обертання клапана);
 - STEP — PD3 (формує імпульси кроків);
 - EN — за замовчуванням підключено до GND (постійно активний), може бути керовано окремо для безпечної зупинки.
 - Живлення драйвера організоване окремо від логіки: 12–24 В для двигуна, що забезпечує високу стабільність роботи навіть при великих навантаженнях.

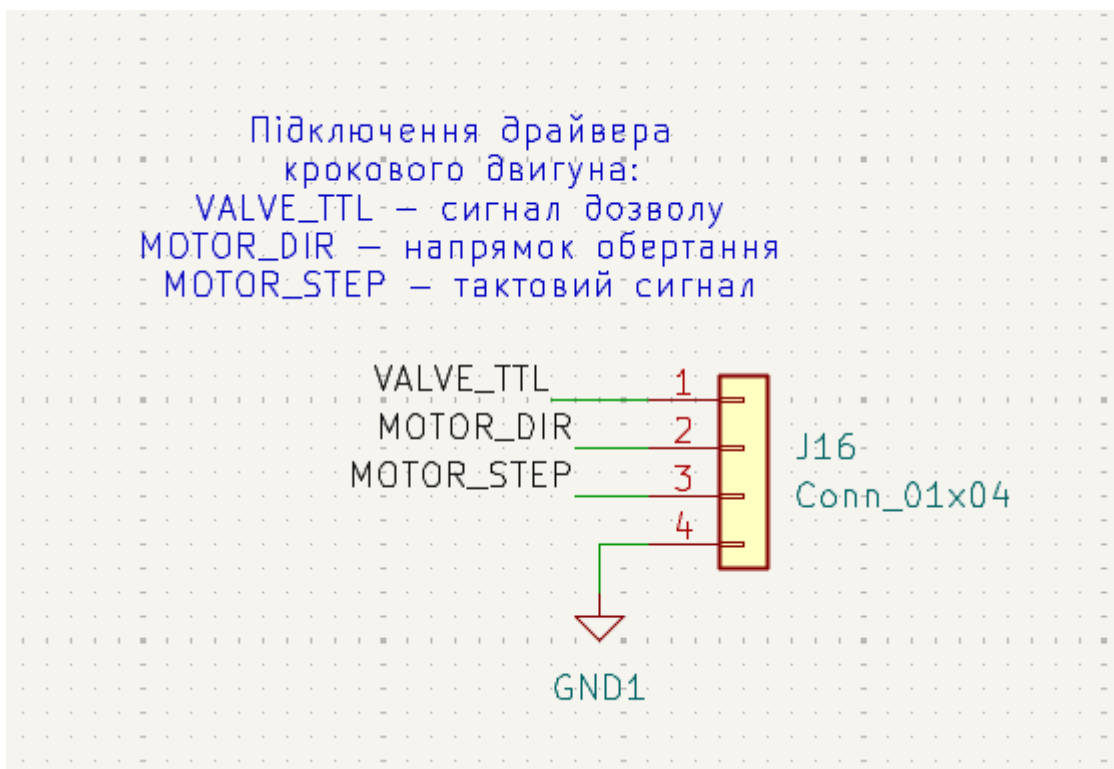


Рисунок 5.6 Підключення драйвера крокового двигуна.

- **Мікроконтролер ATmega328-A:**
 - Отримує дані з обох сенсорів, обробляє їх для обчислення Δp (різниці тиску);

- Приймає рішення про збільшення або зменшення витрати газу;
- Формує керуючі сигнали для крокового двигуна;
- Виводить результати на дисплей;
- Реалізує аварійні стани та процедури автокалібрування при запуску.
- **Живлення і захист:**
 - АТmega328-А та периферія працюють на напрузі 5 В із стабілізованого джерела;
 - Живлення для ТВ6600 і двигуна організоване окремо для фізичної роздільності силової та логічної частин;
 - Кожна лінія даних має захист підтягуючими резисторами й шунтувальними конденсаторами для фільтрації високочастотних перешкод.

Особливу увагу приділено розташуванню елементів на платі:

- силові та логічні траси фізично розділені;
- мінімізовано довжину ліній SCK і DOUT для зменшення вразливості до електромагнітних наводок;
- використано локальне екранування критичних ділянок кабелів.

Така схема підключення дозволяє реалізувати стабільну і надійну роботу системи навіть у присутності зовнішніх шумів, коливань напруги або змін навантаження.

У наступному підрозділі буде докладно описано логіку роботи системи, алгоритми аналізу даних і прийняття рішень мікроконтролером.

5.3 Логіка роботи системи та алгоритми керування

Основною функцією мікроконтролера АТmega328-А в системі є аналіз поточного стану тиску газу та регулювання витрати через зміну положення

регулюючого вентиля. Логіка роботи побудована за принципом постійного циклічного опитування датчиків, обробки даних і генерування керуючих команд для виконавчого механізму.

Процес роботи системи складається з наступних основних етапів:

Автокалібрування при запуску:

- При подачі живлення мікроконтролер проводить короткочасне зчитування обох датчиків тиску для фіксації початкових значень.
- Різниця початкових показників записується як базова нульова точка (Δp_0).
- Це дозволяє врахувати можливі похибки сенсорів або вплив атмосферного тиску.

Циклічне зчитування даних:

- Датчики тиску опитуються незалежно, з невеликою затримкою між операціями (затримка близько 10 мс для стабілізації).
- Використовується синхронний режим читання даних з HX710B.
- Результати вимірювання конвертуються у цифрове значення тиску за допомогою заводських коефіцієнтів.

Обчислення перепаду тиску (Δp):

- Різниця між upstream і downstream тиском визначається як: $\Delta p = p_{\text{вхід}} - p_{\text{вихід}}$
- Значення Δp порівнюється з еталонним значенням $\Delta p_{\text{еталон}}$ (встановлюється залежно від цільової витрати).

Прийняття рішення:

- Якщо $\Delta p > \Delta p_{\text{еталон}} + \text{допуск}$: необхідно зменшити витрату газу (закриття вентилля).
- Якщо $\Delta p < \Delta p_{\text{еталон}} - \text{допуск}$: необхідно збільшити витрату газу (відкриття вентилля).
- Якщо Δp в межах допуску: вентиль залишається у поточному положенні.

Генерація керуючих сигналів:

- Напрямок обертання крокового двигуна задається через DIR.
- Кількість імпульсів (кроків) і їх частота визначається величиною відхилення Δp від $\Delta p_{\text{еталон}}$.
- Для малих відхилень частота імпульсів менша, для великих - більша, що реалізує примітивну адаптивну ПІ-регуляцію без складних обчислень.

Відображення стану:

- Поточне значення Δp виводиться на дисплей WC1602A.
- У разі аварійних ситуацій (наприклад, втрата сигналу з одного із сенсорів) на дисплеї виводиться попередження.

Аварійне відключення:

- Якщо протягом заданого часу (наприклад, 2 секунди) не вдається зчитати дані хоча б з одного сенсора, мікроконтролер переводить систему в безпечний режим:
 - Вимикається сигнал STEP;
 - Двигун зупиняється;
 - На дисплеї виводиться повідомлення про помилку.

Оновлення еталонного значення:

- За потреби (наприклад, за командою користувача або при зміні режиму) значення $\Delta p_{\text{еталон}}$ може бути оновлено без перезавантаження системи.

Така логіка роботи забезпечує:

- безперервний моніторинг стану потоку газу;
- швидку реакцію на зміну умов;
- стабільну підтримку заданого режиму;
- високу надійність завдяки контролю аварійних ситуацій.

У наступному розділі буде розглянуто експериментальну частину роботи системи, тестування режимів та аналіз отриманих результатів.

6. Експериментальна частина

Для перевірки працездатності та ефективності розробленої системи автоматичного регулювання потоку аргону було здійснено побудову експериментальної стендової установки. Основною метою досліджень стало визначення точності підтримання перепаду тиску, оцінка швидкості реакції системи на зовнішні збурення, аналіз стабільності функціонування та оцінка поведінки системи у випадках аварійних ситуацій. Стендова установка була спроектована таким чином, щоб забезпечити умови максимально наближені до реального застосування в електродугових процесах.

До складу експериментальної системи входили джерело робочого газу — балон з аргоном, обладнаний редуктором, трубопровідна частина з керамічними ущільненнями для мінімізації втрат, тискові сенсори НХ710В, встановлені на вході та виході вентиля, виконавчий механізм на основі крокового двигуна NEMA17, драйвер керування ТВ6600, мікроконтролер АТmega328-А із запрограмованою логікою керування, а також дисплей WC1602А для оперативного моніторингу параметрів.

Живлення системи було організоване окремо для логічної частини та силових елементів. Логічні кола працювали від стабілізованого джерела 5 В, тоді як для драйвера двигуна використовувалось окреме джерело 12 В. Такий розподіл дозволив зменшити вплив імпульсних навантажень на роботу мікроконтролера та датчиків.

7. Висновки

В результаті виконаної роботи було розроблено програмно апаратний комплекс для керування потоку газу з метою дослідження плази електродугового розряду. Розроблена система поєднує високоточні датчики тиску HX710B, мікроконтролер ATmega328-A, кроковий двигун з драйвером TB6600 та LCD-дисплей, що забезпечує як автономну роботу, так і зручність спостереження за параметрами процесу в режимі реального часу.

У межах теоретичного аналізу було показано, що стабільність та ефективність електродугового розряду тісно пов'язані зі складними тепловими, електричними та газодинамічними процесами в плазмі. Радіальні розподіли температури та електронної густини, компонентний склад плазми з домішками металів, а також поведінка параметрів теплопровідності та електропровідності свідчать про ключову роль подачі аргону як регулюючого фактора. Зокрема, спрямований і кількісно контрольований газовий потік суттєво змінює структуру плазмового каналу, що в свою чергу впливає на тепловий режим, іонізацію та стабільність дуги.

У технічному аспекті було обґрунтовано вибір основних компонентів системи: ATmega328-A обрано завдяки його функціональній насиченості, доступності та простоті реалізації; HX710B — як недорогий, але достатньо функціональний інтерфейс для вимірювання тиску; NEMA17 і TB6600 — як перевірена комбінація для виконавчого вузла з надійним керуванням.

До перспектив розвитку варто віднести розширення функціональності системи шляхом впровадження цифрової ПД-регуляції, використання більш точних масових витратомірів, а також розробку інтерфейсу для взаємодії з зовнішніми керуючими системами через RJ-45.

Отже, результати роботи мають як прикладне, так і наукове значення, та можуть бути використані як база для подальших досліджень у сфері стабілізації плазмових процесів і точного регулювання газових потоків.

8. Джерела

1. Boretskij, V., Cressault, Y., Teulet, Ph., & Veklich, A. N. (2011, September). Plasma of electric arc discharge in carbon dioxide with copper vapours. In *XIXth Symposium on Physics of Switching Arc*.
2. Babich, I.L., Boretskij, V.F., & Veklich, A.N. (2008). Plasma of electric arc discharge between copper electrodes in a gas flow. *Problems of Atomic Science and Technology*, (14), 171-173.
3. Semenyshyn, R.V., Veklich, A.N., Babich, I.L., & Boretskij, V.F. (2014). Spectroscopy peculiarities of thermal plasma of electric arc discharge between electrodes with Zn admixtures. *Advances in Space Research*, 54(6), 1235-1241.
4. Babich, I.L., Boretskij, V.F., Veklich, A.N., & Semenyshyn, R.V. (2014). Spectroscopic data and Stark broadening of Cu I and Ag I spectral lines: Selection and analysis. *Advances in Space Research*, 54(6), 1254-1263.
5. Veklich, A., Bartlova, M., Boretskij, V., Murmantsev, A., Ninyovskij, V., & Ivanisik, A. (2023). Plasma Properties of Electric Arc Discharge Burning Between Cu-W Composites Electrodes. *Plasma Physics and Technology*, 10(2), 132-135.
6. Murmantsev, A., Veklich, A., Baeva, M., Boretskij, V., & Ninyovskij, V. (2023). Investigation of Plasma Parameters Using OES and Spectra Simulations. *Plasma Physics and Technology*, 10(2), 103-106.
7. Murmantsev, A., Ninyovskij, V., Veklich, A., & Boretskij, V. (2023). Investigation of underwater discharge plasma with metal vapor admixtures. *Applied Nanoscience*.
8. Murmantsev, A. (2023). Investigation of Spatial Distribution of Metal Vapours Admixtures in the Plasma of an Electric Arc Discharge. *Problems of Atomic Science and Technology*, 4(146), 139-141.

9. Murmantsev, A., Veklich, A., & Boretskij, V. (2022). Optical emission spectroscopy of plasma of electric spark discharge between metal granules in liquid. *Applied Nanoscience*.
10. Murmantsev, A., Veklich, A., Boretskij, V., Fesenko, S., & Kleshych, M. (2023). Diagnostics of Plasma of Electric Arc Discharge Between Asymmetric Single-Component Cu and Ni Electrodes. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(143), 117-121.
11. Murmantsev, A., Veklich, A., Boretskij, V., Fesenko, S., Kleshych, M., & Tolochin, O. (2023). Investigation of Thermal Plasma of Arc Discharge Between Novel Composite Cu-W Materials. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1(143), 74-78.
12. Ninyovskij, V., Murmantsev, A., Veklich, A., & Boretskij, V. (2022). Plasma spectroscopy of electric spark discharge between silver granules immersed in water. *ENERGETIKA*, 68(1), 107-114.
13. Murmantsev, A., Veklich, A., Boretskij, V., Fesenko, S., Kleshych, M., Ninyovskij, V., & Cressault, Y. (2022). Diagnostics of Thermal Plasma with Cu and Ni Vapour Admixtures. *Problems of Atomic Science and Technology*, 6(142), 149-153.
14. Murmantsev, A., Veklich, A., Boretskij, V., Kleshych, M., Fesenko, S., & Bartlova, M. (2022). Peculiarities of Interaction of Cu-W Composite Materials with Thermal Arc Discharge Plasma. *Problems of Atomic Science and Technology*, 6(142), 134-138.
15. Murmantsev, A., Veklich, A., Kleshych, M., Fesenko, S., & Boretskij, V. (2021). Peculiarities of optical emission spectroscopy of Copper-Chromium-air plasma. *Astronomische Nachrichten*.
16. Veklich, A., Fesenko, S., Murmantsev, A., & Boretskij, V. (2021). Estimation of the Role of Radiation in the Plasma of Electric Arc Discharge Between Cu-C Composites. *Problems of Atomic Science and Technology*, 5(137), 157-160.

17. Murmantsev, A., Veklich, A., & Boretskij, V. (2021). Spectroscopy Peculiarities of Electric Arc Discharge Plasma with Iron Vapours. *Problems of Atomic Science and Technology*, (131), 171-175.
18. Murmantsev, A., Veklich, A., Boretskij, V., Bartlová, M., Dostát, L., Píška, J., Šimek, D., & Tolochyn, A. (2021). Composite Cu-Cr Materials Under Thermal Action of Electric Arc Discharge Plasma. *Problems of Atomic Science and Technology*, (131), 98-101
19. Baeva, M., Boretskij, V. F., Gonzalez, D., Methling, R., Murmantsev, O., Uhrlandt, D., & Veklich, A. (2021). Unified modelling of low-current short-length arcs between copper electrodes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 54(2), 025203
20. Richard, F., Cormier, J. M., Pellerin, S., & Chapelle, J. (1996). Physical study of a gliding arc discharge. *Journal of Applied Physics*, 79(5), 2245-2250.
21. Microchip Technology Inc. (2018). *ATmega328/P: AVR® Microcontroller with picoPower® Technology*.
22. Avia Semiconductor. (n.d.). *HX710(A/B): 24-Bit ADC with Built-in Temperature Sensor (HX710A) / 24-Bit ADC with (DVDD-AVDD) Voltage Difference Detection (HX710B)*.
23. PBC Linear. (n.d.). *Data Sheet - Stepper Motor Support*.
24. WINCOM TECH CO., LTD. (n.d.). *WC1602A*.
25. Bulk Man 3D. (n.d.). *TB6600 Stepper Motor Driver BM3D-v1.1*.
26. Shao, S., Xu, B., & Zhong, Y. (2022). Study of Different Management Mechanisms for Distributed Energy Resources. *Journal of Physics: Conference Series*, 2401(1), 012005.