

Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки

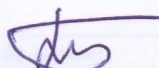
(повна назва інституту/факультету)

Кафедра автоматики

(повна назва кафедри)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри



(підпис)

І. С. Білюк

«15» червня 2026 р.

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на здобуття ступеня бакалавра

зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

(код та назва спеціальності)

освітня програма Електротехніка та електротехнології

(назва освітньої програми)

на тему: «Автоматизація системи керування дозатором
на базі Arduino»

Виконав: студент IV курсу, групи 4317зст3

Руденко Василь Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник

асист. каф. автоматики, к.т.н, Іванов А.В.

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

Нормоконтроль

доц. каф. автоматики, Савченко О.В.

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

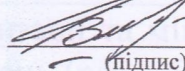
Рецензент

доц. каф. СЕЕС, к.т.н., доц., Новогрецький С.М.

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

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

Студент


(підпис)

м. Миколаїв – 2026 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Інститут, факультет Навчально-науковий інститут автоматики та електротехніки
Кафедра автоматики
Освітній ступінь бакалавр
Галузь знань 14 «Електрична інженерія»
(шифр і назва)
Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(шифр і назва)
Освітня програма «Електромеханіка та електроенергетика»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри, к.т.н.
доцент

О. Г. Васильєв

«16» лютого 2026 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ БАКАЛАВРА СТУДЕНТУ

гр. 4317зст3

Руденко Василь Володимирович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи «Автоматизація системи керування дозатором на базі Arduino»

керівник роботи Іванов Антон Віталійович, кандидат технічних наук, асистент

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від «22» квітня 2026 року № 286-УЧ

2. Строк подання студентом роботи 10 червня 2026 р.

3. Вихідні дані до роботи керований об'єкт — ваговий або об'ємний дозатор для сипучих/рідких речовин; тип електроприводу — електромагнітний клапан, перистальтичний насос або сервопривід заслінки; джерело живлення — мережа 220 В через адаптер або постійна напруга 5–12 В; метод керування — автоматичне дозування за заданою масою/об'ємом, ручне налаштування параметрів порції; контролер — Arduino (Uno/Nano/Mega);

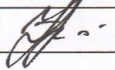
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) 1 Аналіз технологічних процесів та систем дозування (класифікація, огляд сучасних засобів автоматизації та мікроконтролерів). 2 Проектування та обґрунтування технічних рішень (розробка функціональної та електричної схем, вибір сенсорів та виконавчих пристроїв). 3 Програмна

реалізація та налаштування системи (розробка алгоритму, написання коду в Arduino IDE, дослідження точності). 5 Охорона праці

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових графіків)

1. Класифікація систем дозування та існуючі рішення. 2. Структурно-функціональна схема системи керування дозатором. 3. Принципова електрична схема пристрою. 4. Схема підключення елементів (драйвери, сенсори, живлення). 5. Алгоритм ініціалізації та калібрування системи. 6. Основний алгоритм програми дозування. 7. Графіки перехідних процесів та аналіз точності.

6. Консультанти розділів роботи

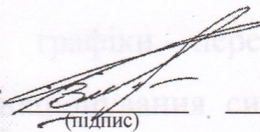
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Охорона праці	Іванов А. В., к.т.н., асистент кафедри	23.05.26	01.06.26
			

7. Дата видачі завдання 16 лютого 2026 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз технологічних процесів та систем дозування	06.04.26	
2	Проектування системи та обґрунтування вибору компонентів	24.04.26	
3	Програмна реалізація, калібрування та тестування точності	22.05.26	
4	Охорона праці	01.06.26	

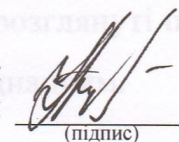
Студент


(підпис)

Руденко В. В.

(прізвище та ініціали)

Керівник роботи


(підпис)

Іванов А. В.

(прізвище та ініціали)

РЕФЕРАТ

Ключові слова: система керування дозатором, автоматизація, мікроконтролер arduino, тензодатчик hx711, вагове дозування, електропривод, інтерфейс користувача.

Об'єм пояснювальної записки складає 87 аркуші, вона містить 4 розділи, 20 ілюстрацій, 5 таблиць, 25 найменування в списку використаної літератури та 6 аркушів мультимедійної презентації.

Кваліфікаційна робота присвячена дослідженню та проєктуванню автоматизованої системи керування дозатором речовин. Розроблена система базується на мікроконтролері Arduino та забезпечує високу точність фасування продукції в автоматичному режимі.

В роботі подано характеристику основних компонентів системи, таких як тензометричний датчик для вимірювання ваги, підсилювач-перетворювач HX711 та виконавчі механізми (електромагнітний клапан або перистальтичний насос). Складено структурну та принципову електричну схеми, обґрунтовано вибір елементної бази за критеріями точності та вартості.

Розроблено програмне забезпечення, яке дозволяє здійснювати калібрування системи, встановлювати цільову вагу дозування через інтерфейс користувача (LCD-дисплей та енкодер) та контролювати процес наповнення в реальному часі. Для демонстрації алгоритмів роботи системи використано блок-схеми та методи програмної реалізації в середовищі Arduino IDE.

Проведено експериментальне дослідження точності роботи дозатора, проаналізовано похибки та побудовано графіки перехідних процесів. Результати підтверджують стабільність функціонування системи при різних режимах навантаження. Крім того, в роботі розглянуті питання з охорони праці та техніки безпеки при роботі з електрообладнанням.

Додатки містять слайди мультимедійної презентації (Додаток А).

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ДОЗУВАННЯ.....	9
1.1. Класифікація дозаторів за принципом дії.....	9
1.2. Огляд сучасних систем автоматизації дозування на виробництві.....	13
1.3. Аналіз мікроконтролерних засобів керування: переваги платформи Arduino.....	18
1.4. Порівняльний аналіз датчиків для контролю витрати та ваги речовини.....	20
Висновки за розділом.....	23
РОЗДІЛ 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ.....	24
2.1. Розробка функціональної схеми автоматизованої системи керування дозатором.....	24
2.2. Вибір та розрахунок апаратного забезпечення.....	26
2.2.1 Вибір модифікації контролера Arduino (Uno/Nano/Mega).....	26
2.2.2 Вибір виконавчих пристроїв.....	28
2.2.3 Вибір сенсорів (тензодатчики з підсилювачем HX711).....	34
2.3. Розробка принципової електричної схеми пристрою.....	36
Висновки за розділом.....	40
РОЗДІЛ 3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ.....	42
3.1. Розробка алгоритму функціонування системи керування дозатором.....	42
3.1.1 Підпрограма зчитування даних з аналого-цифрового перетворювача HX711.....	45
3.1.2 Підпрограма цифрової фільтрації на основі методу ковзного середнього.....	48
3.1.3 Підпрограма дворівневого широтно-імпульсного (ШІМ) керування електроприводом.....	50
3.2. Програмна реалізація та опис вихідного коду програми.....	53

3.3. Експериментальні дослідження та аналіз динамічних характеристик роботи системи.....	60
Висновки за розділом.....	63
РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ.....	64
4.1. Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів...	64
4.2. Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці.....	67
4.3. Безпека в надзвичайних ситуаціях.....	69
4.4. Екологічна безпека та охорона навколишнього середовища.....	71
4.5. Розрахунок штучного виробничого освітлення ділянки фасування.....	72
Висновки за розділом.....	75
ВИСНОВКИ.....	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	79
ДОДАТОК А МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ.....	82

ВСТУП

Сучасний етап розвитку промислового виробництва характеризується впровадженням високоефективних систем автоматизації, що дозволяють забезпечити високу точність та швидкість технологічних операцій. Одним із критично важливих процесів у харчовій, хімічній та фармацевтичній галузях є дозування та фасування продукції. Використання застарілих методів ручного або напівавтоматичного дозування призводить до значних втрат сировини, збільшення собівартості та впливу людського фактора на якість кінцевого продукту. Впровадження інтелектуальних систем керування на базі сучасних мікроконтролерів дозволяє вирішити ці проблеми шляхом забезпечення прецизійної точності відмірювання порцій у реальному часі. Використання платформи Arduino як бази для створення системи керування дозатором є актуальним з огляду на її гнучкість, низьку вартість та можливість швидкої адаптації під конкретні виробничі потреби.

Мета дослідження. Метою роботи є розробка та дослідження автоматизованої системи керування дозатором на базі мікроконтролера Arduino, що забезпечує задану точність вагового фасування речовин при оптимізації алгоритмів керування виконавчими механізмами.

Завдання дослідження. Для досягнення поставленої мети необхідно здійснити аналіз існуючих методів та засобів дозування речовин, обґрунтувати вибір апаратного забезпечення системи на базі платформи Arduino, розробити функціональну та принципову електричну схеми пристрою. Також завданням передбачено створення алгоритмічного та програмного забезпечення для реалізації функцій калібрування, контролю ваги та керування приводами, а також експериментальну перевірку точності роботи системи.

Об’єкт дослідження. Об’єктом дослідження є технологічний процес автоматизованого дозування та наповнення тари речовинами із застосуванням мікроконтролерних засобів керування.

Предмет дослідження. Предметом дослідження є архітектура системи керування, алгоритми обробки сигналів тензометричних датчиків та програмна реалізація режимів роботи дозатора в середовищі Arduino IDE.

Методи дослідження. У роботі використано методи теорії автоматичного керування для побудови структури системи, методи програмування мікроконтролерів для реалізації логіки керування, а також методи експериментального аналізу для оцінки похибок та точності дозування.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблена система може бути використана як основа для створення недорогих фасувальних автоматів на малих підприємствах. Результати роботи дозволяють значно зменшити витрати на автоматизацію дрібносерійного виробництва при збереженні високих показників точності та надійності обладнання.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ ДОЗУВАННЯ

1.1 Класифікація дозаторів за принципом дії

Процес дозування є невід'ємною частиною сучасного автоматизованого виробництва, що полягає у поділі потоку речовини на окремі порції заданого розміру. Ефективність функціонування всієї системи керування залежить від обраного принципу вимірювання кількості продукту. Найбільш поширеними методами є вагове, об'ємне та масове дозування, кожен з яких має свої технічні особливості, переваги та обмеження залежно від фізико-хімічних властивостей дозованої речовини. Для глибшого розуміння специфіки роботи кожного виду обладнання та обґрунтування вибору конкретного рішення для розроблюваної системи, необхідно детально розглянути особливості функціонування основних типів дозувальних пристроїв [1,2].

Об'ємні дозатори. Об'ємне дозування базується на відмірюванні певної кількості речовини шляхом заповнення нею мірної ємності фіксованого об'єму. Такі системи характеризуються конструктивною простотою, високою швидкістю роботи та низькою вартістю впровадження. Проте вони мають суттєвий недолік, який полягає в прямій залежності точності від стабільності густини продукту, його температури та вологості. Найменші зміни умов навколишнього середовища можуть призвести до значних похибок у масі кінцевої порції. Типова конструкція об'ємного дозатора для рідких речовин часто базується на принципі витіснення або використання мірних камер (рис.1.1) [1,4].

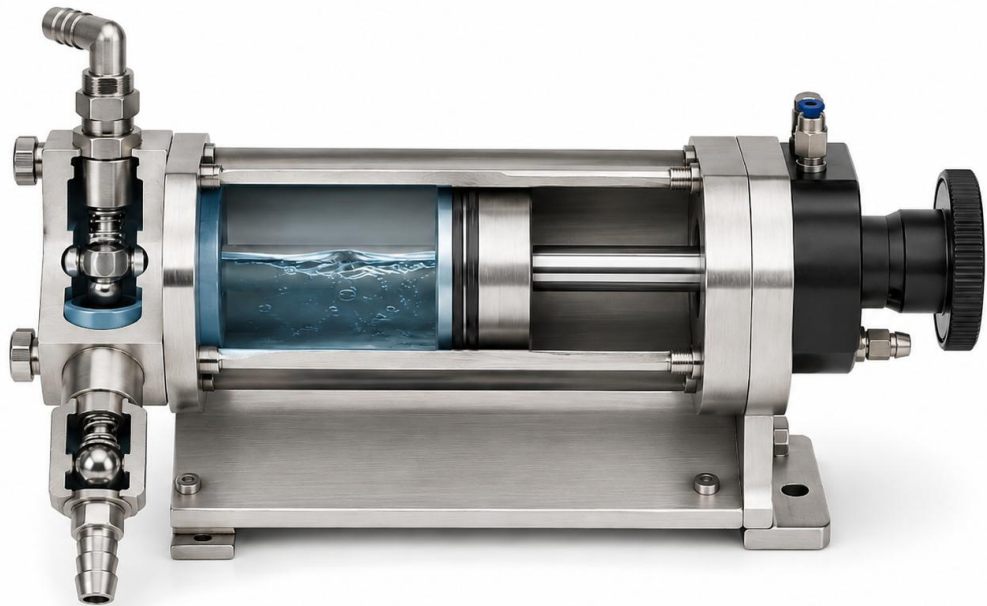


Рисунок 1.1. Схема об'ємного поршневого дозатора

Вагові дозатори. Вагове дозування вважається найбільш досконалим та універсальним методом контролю кількості продукту в сучасній промисловості. На відміну від об'ємних методів, де результат залежить від фізичного стану речовини, вагове вимірювання проводиться безпосередньо за силою тяжіння, що діє на масу продукту. Такий підхід дозволяє повністю нівелювати вплив коливань густини, в'язкості, температури або ступеня аерації матеріалу на результат фасування, забезпечуючи стабільно високу точність [1,2].

У сучасних системах автоматизації вагові дозатори реалізуються на базі тензOMETричних перетворювачів сили. Принцип їхньої дії ґрунтується на зміні електричного опору провідника при його механічній деформації під дією прикладеного навантаження. Отриманий слабкий аналоговий сигнал обробляється прецизійними підсилювачами-перетворювачами, що дозволяє мікроконтролерній системі оперувати даними з високою роздільною здатністю. Завдяки відсутності рухомих частин у самому вимірювальному вузлі, такі системи відрізняються високою надійністю та довговічністю.

Взаємодія основних вузлів вагового пристрою, що включає вантажоприймальну платформу та вимірювальний модуль, відображена на рис. 1.2 [2,7,8].



Рис. 1.2. Конструктивна схема вагового дозатора з тензодатчиком

Для досягнення максимальної продуктивності без втрати якості фасування у вагових системах часто застосовують двостадійний алгоритм подачі речовини. На першому етапі здійснюється інтенсивне наповнення тари (режим «грубого» дозування), а при досягненні заданого порогу від цільової маси система переходить у режим «точного» досипання з мінімальною швидкістю потоку. Це дозволяє компенсувати динамічний удар струменя та інерційність виконавчих механізмів, що суттєво знижує підсумкову похибку вимірювання [1, 4].

Масові дозатори. Масове дозування передбачає вимірювання масової витрати речовини безпосередньо в потоці під час її руху трубопроводом. Це найбільш складний та технологічний метод, який реалізується за допомогою коріолісових витратомірів. Принцип їхньої дії ґрунтується на вимірюванні інерційних сил, що виникають при русі рідини через вібруючі трубки спеціальної форми [3].

Під дією потоку рідини, що протікає через вібруючий елемент, виникають сили Коріоліса, які спричиняють фазовий зсув (скручування) вимірювальних трубок. Величина цього зсуву є прямо пропорційною масовій витраті продукту. Оскільки цей метод вимірює безпосередньо масу, він не залежить від коливань густини, температури, тиску чи профілю потоку. Принципова схема такого пристрою, де показано взаємодію потоку та вібруючої U-подібної трубки відображена на рисунку 1.3 [3].

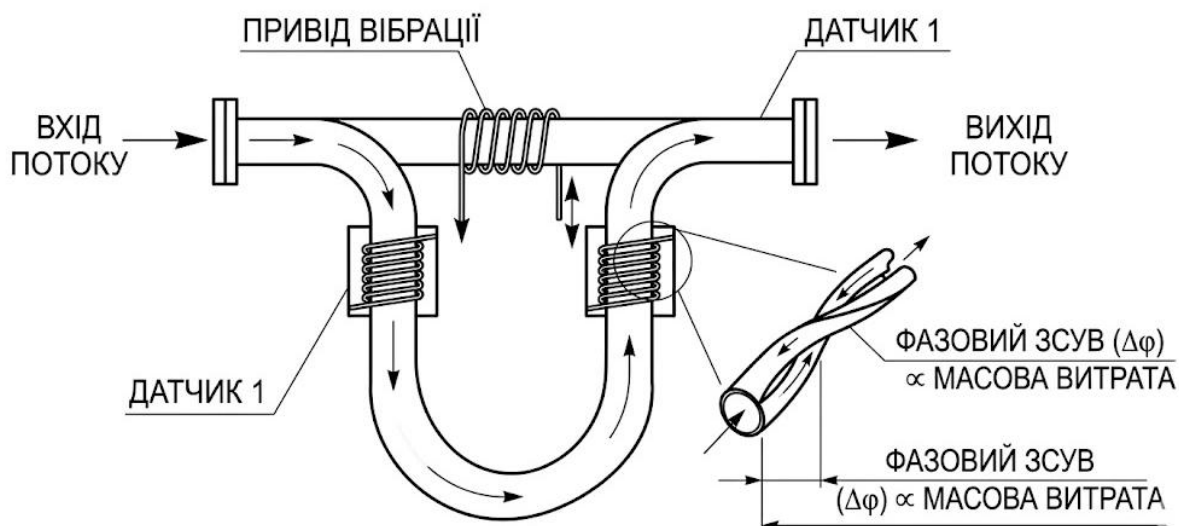


Рис. 1.3. Принцип дії масового витратоміра Коріоліса

Масові дозатори є оптимальним рішенням для безперервних технологічних процесів, де необхідно підтримувати точне співвідношення компонентів суміші в реальному часі. Хоча такі системи забезпечують високу

точність та стабільність, їхня вартість значно перевищує вартість вагових та об'ємних рішень, що обмежує їхнє застосування в бюджетних проектах на базі Arduino.

1.2 Огляд сучасних систем автоматизації дозування на виробництві

Сучасний етап розвитку промислової автоматизації характеризується переходом від автономних дозувальних установок до складних інтегрованих систем, що працюють у межах єдиного інформаційного простору підприємства. Основним завданням таких ліній є забезпечення безперервного циклу виробництва з мінімальним втручанням оператора, що досягається шляхом використання прецизійних вимірювальних модулів та інтелектуальних систем зворотного зв'язку. Провідні світові виробники обладнання впроваджують комплексні рішення, які дозволяють не лише відмірювати задану порцію речовини, а й автоматично адаптуватися до фізико-хімічних змін сировини, таких як вологість, густина або в'язкість [1, 4].

Типова промислова лінія дозування складається з каскаду пристроїв, що забезпечують підготовку, транспортування та безпосереднє фасування продукту. Важливою особливістю таких систем є використання багаторівневого контролю, де на кожному етапі здійснюється перевірка відповідності параметрів заданим уставкам. Це дозволяє виключити можливість випуску бракованої продукції та оптимізувати використання енергоресурсів. На промислових об'єктах системи дозування часто поєднуються з конвеєрними лініями та системами автоматичного пакування, що утворює замкнений технологічний цикл. Загальна конфігурація такої інтегрованої лінії представлена на рисунку 1.4.

Особлива увага в промислових рішеннях приділяється метрологічній надійності. Використовувані вагові термінали та датчики витрати мають

високий клас захисту від зовнішніх впливів, таких як вібрація, пил та волога, що є характерним для реальних умов експлуатації. Інтеграція таких вузлів у загальну структуру автоматизації дозволяє накопичувати статистичні дані про роботу обладнання, що є основою для реалізації стратегій предиктивного обслуговування та підвищення загальної ефективності виробничих процесів [1, 2].



Рис. 1.4 — Загальний вигляд промислової автоматизованої лінії дозування та фасування

Фундаментом сучасної промислової автоматизації є програмовані логічні контролери, які забезпечують високу надійність керування технологічними процесами в умовах інтенсивних заводів. У системах дозування ПЛК виконують роль центрального обчислювального вузла, який здійснює збір даних з первинних перетворювачів, їх математичну обробку та

формування керуючих сигналів для виконавчих механізмів. Використання промислових контролерів дозволяє реалізувати складні алгоритми адаптивного керування, що забезпечують компенсацію динамічних похибок, які виникають через інерційність потоку продукту та час спрацювання механічних вузлів [5].

Важливою технічною перевагою ПЛК є їхня здатність до інтеграції в ієрархічні структури керування підприємством. Завдяки підтримці промислових протоколів передачі даних, дозувальний вузол стає частиною загальної мережі, що дозволяє здійснювати віддалений моніторинг продуктивності та вести облік витрат сировини в автоматичному режимі. Внутрішня архітектура системи на базі ПЛК передбачає чіткий розподіл між інформаційними та виконавчими ланцюгами, що мінімізує вплив силового обладнання на точність вимірювальних каналів. Типова структурна організація такого вузла, яка відображає взаємодію контролера з периферійним обладнанням, наведена на рисунку 1.5.



Рис. 1.5 — Структурна схема автоматизації дозувального вузла на базі ПЛК

Сучасні контролери дозволяють програмувати специфічні режими роботи, такі як автоматичне обнулення тари, фільтрація вібраційних шумів та прогнозування моменту відсікання потоку. Це забезпечує стабільність метрологічних характеристик системи навіть при високих швидкостях фасування. Незважаючи на високу вартість професійних ПЛК, їхнє використання в серійному виробництві є виправданим завдяки тривалому терміну експлуатації та відповідності жорстким галузевим стандартам безпеки та надійності [1, 4].

Незважаючи на домінування промислових програмованих логічних контролерів у великосерійному виробництві, у сегменті малого бізнесу, приватних фермерських господарств та науково-дослідних лабораторій спостерігається стійка тенденція до використання відкритих мікроконтролерних платформ. Така популярність обумовлена необхідністю створення гнучких, компактних та економічно ефективних рішень, де вартість впровадження промислового ПЛК може бути недоцільною. Сучасні мікроконтролери володіють достатньою обчислювальною потужністю для реалізації складних математичних алгоритмів фільтрації сигналів та керування приводами, що дозволяє створювати на їхній основі прецизійні системи дозування [5, 6, 8].

Використання мікроконтролерних засобів дозволяє розробникам відійти від стандартних закритих архітектур і створювати кастомні пристрої, максимально адаптовані під конкретну технологічну задачу. Це включає можливість інтеграції нестандартних сенсорів, розробку унікальних користувацьких інтерфейсів та реалізацію специфічних протоколів обміну даними. Важливою перевагою таких систем є їхня модульність: при необхідності систему можна легко модернізувати, додаючи нові блоки керування або розширюючи функціонал програмного забезпечення без значних фінансових витрат. Типовий приклад реалізації такої локальної

системи, яка поєднує в собі обчислювальний модуль, засоби візуалізації та виконавчі пристрої, наведений на рисунку 1.6.

Аналіз сучасного стану галузі підтверджує, що розвиток локальних систем автоматизації рухається у напрямку мініатюризації та підвищення інтелектуальності програмного забезпечення. Поєднання доступної елементної бази з передовими методами цифрової обробки сигналів дозволяє створювати пристрої, які за своїми метрологічними характеристиками наближаються до професійного промислового обладнання. Саме цей підхід обрано базовим для даної кваліфікаційної роботи, оскільки він дозволяє реалізувати надійну та точну систему керування дозатором при збереженні високої ремонтпридатності та низької собівартості виготовлення.



Рис. 1.6 — Приклад реалізації компактного автоматизованого дозатора з мікроконтролерним керуванням

1.3 Аналіз мікроконтролерних засобів керування: переваги платформи Arduino

Вибір керуючого пристрою є фундаментальним етапом проєктування будь-якої автоматизованої системи, оскільки саме від його обчислювальних можливостей та архітектури залежить швидкість обробки даних і стабільність роботи виконавчих механізмів. У сучасній практиці розробки малогабаритних систем дозування значне поширення отримали мікроконтролери загального призначення, серед яких платформа Arduino займає провідне місце. Це обумовлено не лише доступністю апаратної частини, а й наявністю розвиненої екосистеми програмного забезпечення, що дозволяє суттєво скоротити терміни розробки та налагодження пристрою [5, 6].

Платформа Arduino базується на мікроконтролерах сімейства Atmel AVR або ARM, що забезпечує достатню обчислювальну потужність для виконання алгоритмів реального часу. Однією з ключових переваг є її відкрита архітектура та модульність, що дозволяє легко інтегрувати різноманітні периферійні пристрої через стандартні інтерфейси передачі даних, такі як I2C, SPI та UART. Для задач дозування особливо важливою є наявність вбудованих аналого-цифрових перетворювачів та таймерів-лічильників, які забезпечують точне формування сигналів широтно-імпульсної модуляції для керування швидкістю двигунів або позиціонуванням сервоприводів. Наочне представлення архітектури популярної моделі контролера дозволяє оцінити зручність його інтеграції в систему (рис. 1.7) [5, 6].

Важливим технічним аспектом є наявність широкого спектру спеціалізованих бібліотек, які дозволяють реалізувати складні методи цифрової обробки сигналів, такі як програмна фільтрація шумів тензодатчиків або ПІД-регулювання потоку рідини. Це дає змогу розробнику

зосередитися на оптимізації алгоритмів керування, а не на низькорівневому програмуванні регістрів мікроконтролера. Апаратна реалізація типового модуля на базі Arduino відрізняється ергономічним розташуванням виводів та можливістю живлення від різних джерел напруги, що спрощує процес монтажу та експлуатації пристрою в промислових або лабораторних умовах [6, 8].

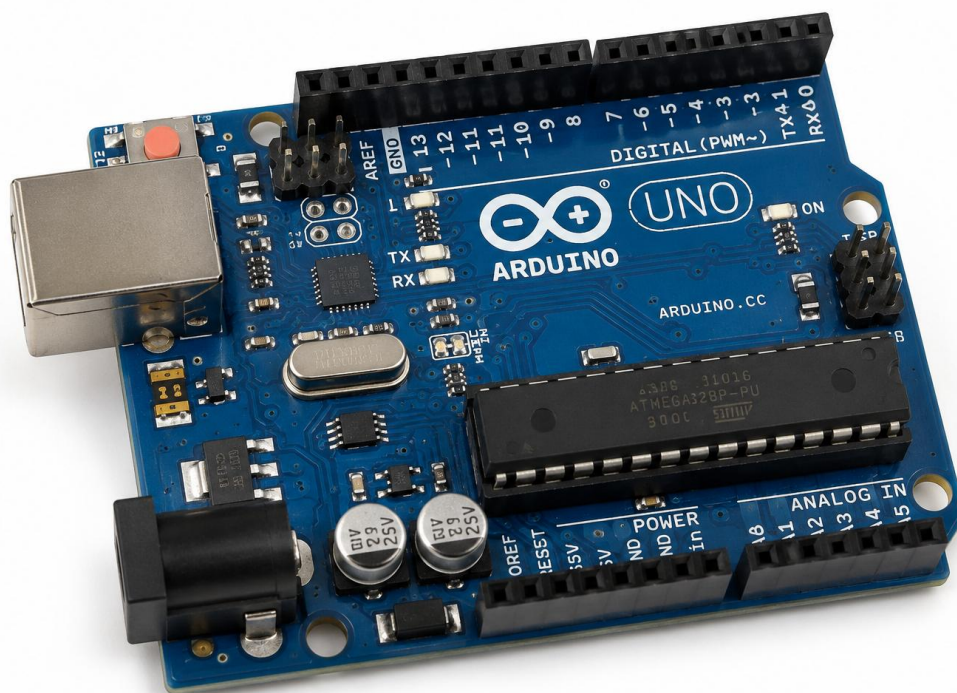


Рис. 1.7 — Мікроконтролерна платформа Arduino Uno як базовий елемент системи керування

Економічна доцільність використання даної платформи також відіграє вагому роль, оскільки вартість розробки на базі Arduino в десятки разів нижча за аналогічні рішення на промислових ПЛК. При цьому досягається висока ремонтпридатність системи та можливість оперативної заміни керуючого модуля без необхідності складного переналаштування всього обладнання. Висока надійність у поєднанні з можливістю швидкого внесення змін у програмний код робить Arduino ефективним інструментом для автоматизації процесів точного фасування на базі сучасних цифрових технологій.

1.4 Порівняльний аналіз датчиків для контролю витрати та ваги речовини

Для забезпечення ефективного функціонування автоматизованої системи керування дозатором критично важливим є обґрунтований вибір первинних вимірювальних перетворювачів. В основі зворотного зв'язку такої системи лежить вимірювання фізичного параметра, що корелює з кількістю дозованої речовини. На сьогоднішній день у мікроконтролерних системах автоматизації найчастіше застосовуються тензометричні, ультразвукові датчики та датчики витрати на основі ефекту Холла [7, 9, 10].

Найбільш поширеним рішенням для прецизійного дозування є використання тензометричних датчиків. Принцип їхньої дії базується на вимірюванні мікроскопічних деформацій пружного елемента під впливом прикладеної маси. Такі сенсори відрізняються найвищою точністю та стабільністю показників, проте вимагають використання прецизійних підсилювачів-перетворювачів для отримання сигналу, придатного для обробки мікроконтролером. Будова та схема підключення типового тензодатчика консольного типу представлена на рис. 1.8 [2, 7, 8]].

Альтернативним методом для контролю рівня рідких або сипучих речовин є застосування ультразвукових датчиків відстані. Вони працюють за принципом вимірювання часу проходження акустичного імпульсу від випромінювача до поверхні розділу середовищ і назад. Головною перевагою даного методу є повна безконтактність вимірювання, що важливо при роботі з агресивними або стерильними речовинами. Проте точність ультразвукових сенсорів суттєво залежить від температури повітря, наявності піни або пилу в зоні вимірювання. Принцип функціонування такої системи контролю рівня наведено на рисунку 1.9 [9].

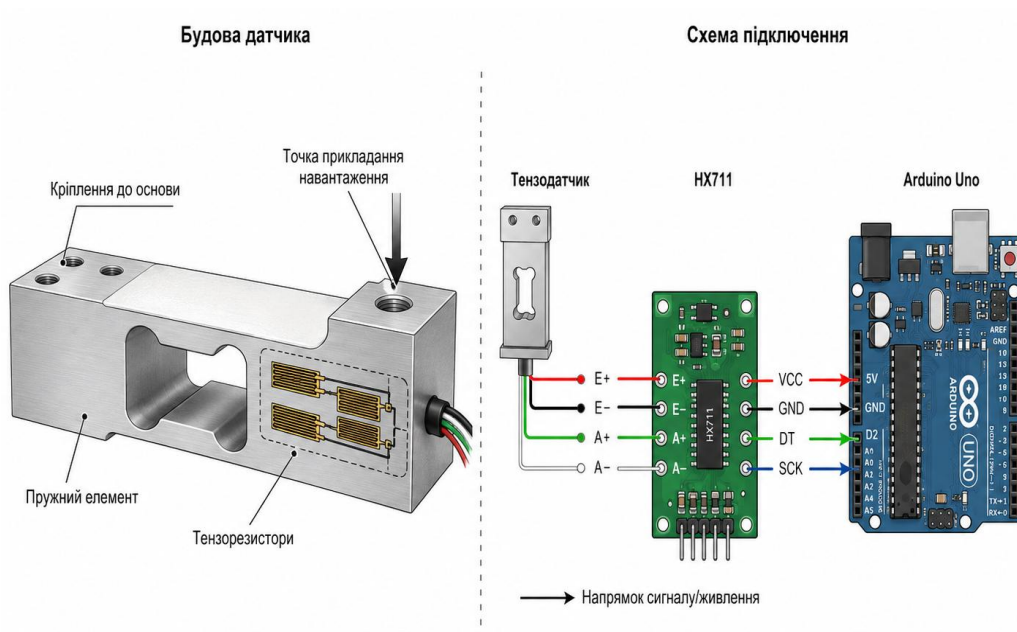


Рис. 1.8 — Будова та схема підключення тензометричного датчика сили



Рис. 1.9 — Схема вимірювання рівня речовини ультразвуковим датчиком

Для систем безперервного дозування рідин часто застосовуються датчики потоку (витратоміри) з імпульсним виходом. В їх основі лежить

турбіна, швидкість обертання якої пропорційна швидкості потоку рідини. Хоча такі пристрої легко інтегруються в трубопровідні системи, їхня точність обмежена механічною інерційністю крильчатки та залежністю від в'язкості продукту. Для порівняння метрологічних та технічних параметрів розглянутих засобів вимірювання складено зведену таблицю 1.1 [10].

Таблиця 1.1 — Порівняльні характеристики датчиків для систем дозування

Тип датчика	Вимірюваний параметр	Переваги	Недоліки
Тензодатчик	Маса (вага)	Висока точність, лінійність сигналу	Потребує складного монтажу та підсилювача
Ультразвуковий	Рівень (відстань)	Безконтактність, простота встановлення	Чутливість до шуму та стану поверхні
Витратомір	Об'ємна витрата	Робота в потоці, компактність	Механічне зношування, похибка при малих витратах

Проведений аналіз дозволяє зробити висновок, що для розроблюваної системи керування на базі Arduino найбільш доцільним є використання тензOMETричного методу вимірювання. Це забезпечує необхідну точність дозування в широкому діапазоні мас та дозволяє реалізувати надійний алгоритм керування з високою роздільною здатністю вимірювального каналу [2, 7, 8].

Висновки за розділом

Проведений аналіз технологічних процесів та існуючих систем дозування дозволив визначити основні напрямки розробки автоматизованої системи керування. У ході дослідження класифікації дозувальних пристроїв за принципом дії було встановлено, що ваговий метод є найбільш перспективним для досягнення високої точності фасування, оскільки він дозволяє нівелювати вплив фізичних властивостей речовини на результат вимірювання. Огляд сучасних промислових рішень на базі програмованих логічних контролерів підтвердив необхідність інтеграції інтелектуальних алгоритмів обробки даних у локальні системи автоматизації для підвищення їхньої конкурентоспроможності. Обґрунтовано доцільність використання мікроконтролерної платформи Arduino як центрального вузла керування, що дозволяє поєднати низьку собівартість розробки з широкими можливостями програмування складних законів регулювання. Порівняльний аналіз датчиків для контролю параметрів речовини показав, що застосування тензометричного каналу вимірювання в поєднанні з прецизійним підсилювачем HX711 забезпечує необхідну роздільну здатність та стабільність метрологічних характеристик у реальних умовах експлуатації. Результати аналітичного огляду, отримані в першому розділі, складають теоретичний фундамент для подальшого проєктування апаратної архітектури та розробки алгоритмічного забезпечення системи керування дозатором.

РОЗДІЛ 2

ПРОЄКТУВАННЯ ТА ОБҐРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ

2.1 Розробка функціональної схеми автоматизованої системи керування дозатором

Проектування будь-якої системи автоматизації починається з формування функціональної схеми, яка відображає основні вузли системи та напрямки передачі інформаційних і керуючих сигналів. У контексті автоматизованого дозатора на базі Arduino, функціональна схема повинна враховувати взаємодію між вимірювальним каналом, логічним модулем, виконавчим механізмом та інтерфейсом користувача. Це дозволяє на етапі проектування забезпечити узгодженість усіх компонентів та визначити необхідну кількість входів і виходів мікроконтролера.

Центральним елементом системи виступає мікроконтролерний модуль, який виконує роль головного обчислювального пристрою. До його входних портів підключається вимірювальна підсистема, що складається з тензOMETричного датчика та спеціалізованого аналого-цифрового перетворювача. Завданням цього вузла є перетворення механічного зусилля в цифровий код, який надалі обробляється алгоритмом для розрахунку поточної маси речовини. Для забезпечення точності дозування мікроконтролер має безперервно опитувати датчик, фільтрувати випадкові шуми та порівнювати отримані значення із заданою уставкою [11, 12, 15, 16].

Керуючий вплив від мікроконтролера передається на силовий вузол, який відповідає за роботу виконавчих механізмів, таких як перистальтичний насос або електромагнітний клапан. Оскільки виводи мікроконтролера мають обмежену навантажувальну здатність, підключення силових компонентів здійснюється через драйвери або релейні модулі. Це забезпечує гальванічну розв'язку та надійне керування потоком речовини. Інтерфейсна частина системи, що включає дисплей та органи керування, дозволяє оператору вводити параметри дози та відстежувати процес фасування в реальному часі.

Структурна організація цих зв'язків представлена на рисунку 2.1 [13, 14, 18, 19, 20].

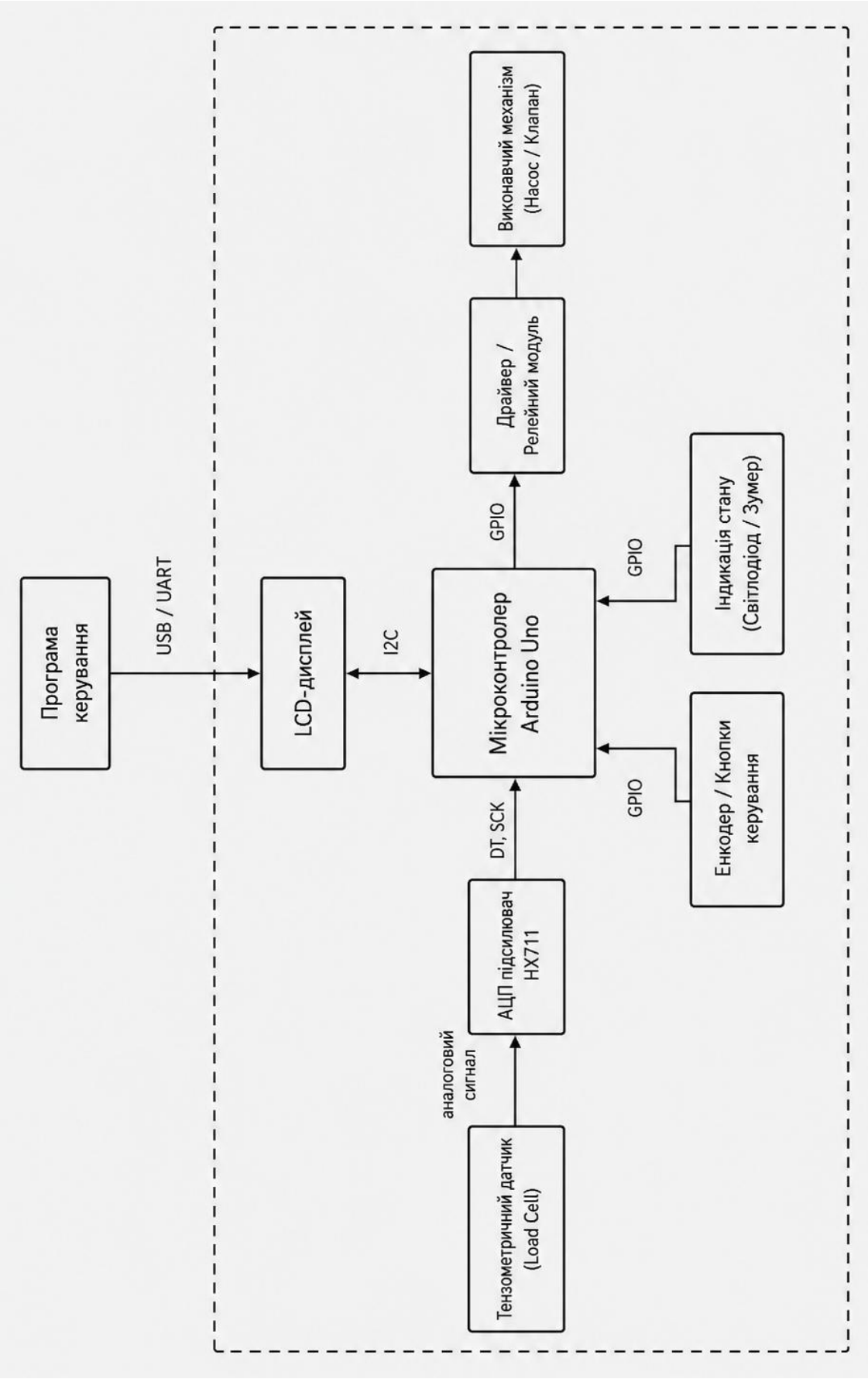


Рис. 2.1 — Функціональна схема автоматизованої системи керування дозатором

Розроблена функціональна схема є базою для подальшого вибору конкретних електронних компонентів та розрахунку їхніх параметрів. Вона демонструє закритий цикл керування, де зворотний зв'язок від тензOMETричної системи дозволяє мікроконтролеру оперативно приймати рішення про припинення подачі продукту при досягненні цільової ваги. Такий підхід гарантує стабільність роботи пристрою та мінімізує вплив зовнішніх факторів на точність виконання технологічної операції.

2.2 Вибір та розрахунок апаратного забезпечення

2.2.1 Вибір модифікації контролера Arduino (Uno/Nano/Mega)

Вибір конкретної моделі мікроконтролера є визначальним етапом проєктування, оскільки від обчислювальних можливостей та апаратної конфігурації платформи залежить стабільність роботи алгоритмів дозування та можливість підключення всієї необхідної периферії. У рамках розробки системи керування автоматизованим дозатором було проведено аналіз трьох найбільш поширених модифікацій лінійки Arduino, які відрізняються об'ємом пам'яті, кількістю цифрових і аналогових портів, а також фізичними габаритами. Основними критеріями вибору виступали надійність з'єднань, достатність ресурсів для обробки сигналів з тензопідсилювача HX711 та зручність монтажу в корпус пристрою.

Модель Arduino Mega на базі мікроконтролера ATmega2560 володіє найбільшою кількістю виводів та об'ємом пам'яті, що робить її незамінною для складних багатокomпонентних систем. Проте для керування одиничним дозатором її ресурси є надлишковими, а значні фізичні розміри плати ускладнюють створення компактного пристрою. У свою чергу, Arduino Nano є оптимальною для мініатюрних рішень, проте її штирьові роз'єми вимагають паяння або використання спеціальних розширювальних плат для

забезпечення надійного електричного контакту в умовах можливих вібрацій від роботи насоса чи клапана [11].

Найбільш збалансованим рішенням для даної кваліфікаційної роботи є використання контролера Arduino Uno. Дана плата базується на мікроконтролері ATmega328P і забезпечує оптимальне поєднання продуктивності та ергономіки. Наявність стандартних роз'ємів дозволяє оперативно проводити налагодження системи, а інтегрований стабілізатор напруги гарантує стабільне живлення логічної частини пристрою від зовнішнього джерела. Об'єму Flash-пам'яті у 32 КБ цілком достатньо для розміщення керуючої програми, бібліотек для роботи з LCD-дисплеєм та складних алгоритмів калібрування ваги. Порівняльний аналіз технічних характеристик розглянутих модифікацій наведено в таблиці 2.1 [11, 12, 18].

Таблиця 2.1 — Порівняльна характеристика контролерів сімейства Arduino

Технічний параметр	Arduino Uno	Arduino Nano	Arduino Mega
Мікроконтролер	ATmega328P	ATmega328P	ATmega2560
Тактова частота, МГц	16	16	16
Цифрові входи/виходи (з них ШІМ)	14 (6)	14 (6)	54 (15)
Аналогові входи (АЦП)	6	8	16
Об'єм пам'яті SRAM, КБ	2	2	8

Зовнішній вигляд обраної платформи та розташування її основних функціональних вузлів представлені на рис. 2.2, що дозволяє оцінити топологію підключення датчиків та виконавчих пристроїв.

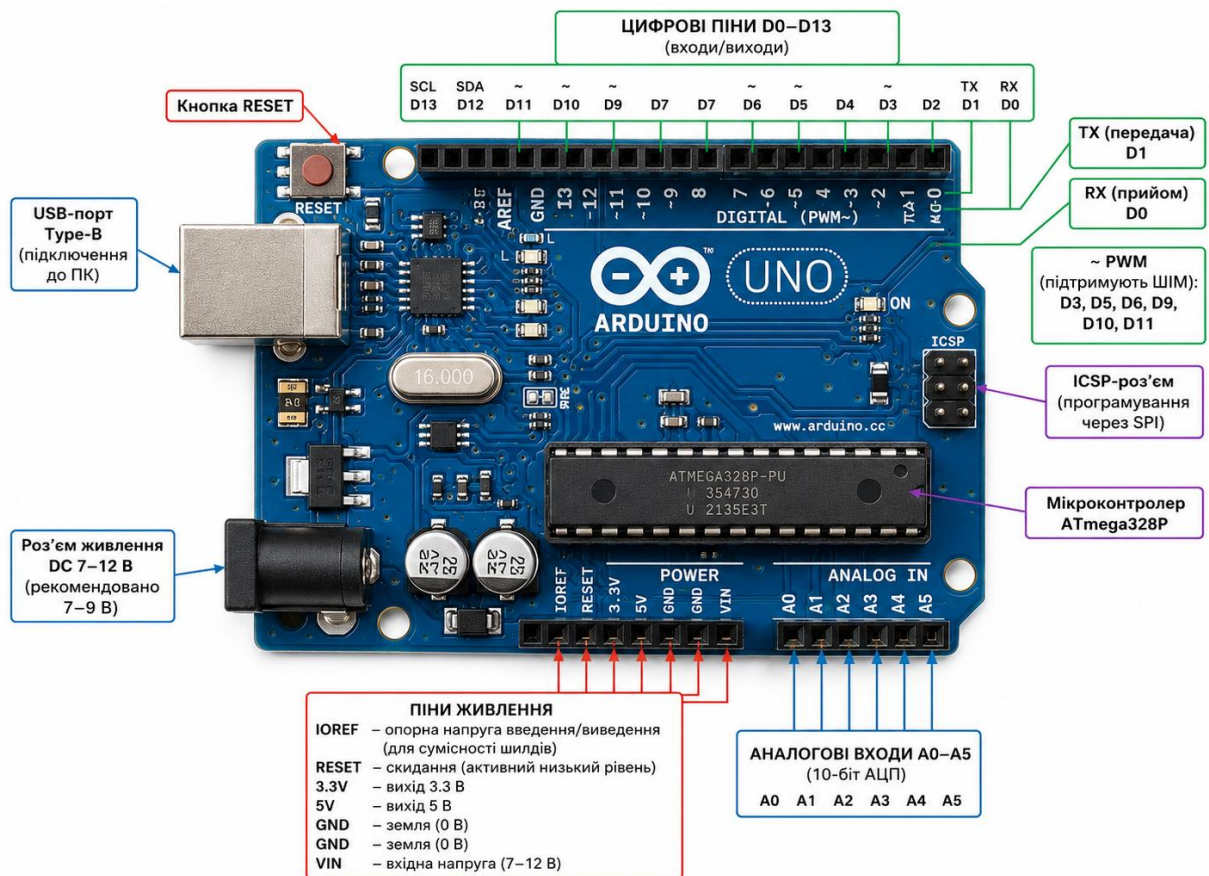


Рис. 2.2 — Мікроконтролерна плата як центральний вузол системи

Таким чином, використання Arduino Uno дозволяє створити надійну систему керування з високим ступенем ремонтпридатності. Стандартні інтерфейси плати забезпечують просте підключення вимірювального модуля НХ711 через цифрові піни, а наявність апаратних таймерів дозволяє реалізувати прецизійне ШІМ-керування приводом дозатора для забезпечення високої точності фасування продукції [11, 12, 15, 18].

2.2.2 Вибір виконавчих пристроїв

Ефективність та метрологічна точність процесу автоматизованого фасування безпосередньо залежать від технічних характеристик виконавчих механізмів, які здійснюють безпосереднє керування потоком речовини. У

сучасних системах дозування вибір приводу обумовлюється агрегатним станом продукту, необхідною швидкістю подачі та вимогами до гігієнічності процесу. Для розроблюваної системи розглядалися два основні типи виконавчих пристроїв: електромагнітні клапани соленоїдного типу та перистальтичні насоси. Кожне з цих рішень має свої експлуатаційні особливості, що впливають на складність апаратної частини та алгоритмічну структуру програмного забезпечення.

Електромагнітні клапани відрізняються високою швидкістю спрацювання та простотою конструкції, що робить їх ефективними для систем, де подача рідини здійснюється під дією гравітації або сталого тиску в магістралі. Проте суттєвим недоліком таких пристроїв є складність регулювання швидкості потоку, що зазвичай обмежується лише двома станами: повністю відкрито або закрито. Це створює труднощі при реалізації режимів точного «досипання» порції на фінальному етапі дозування, оскільки різке перекриття магістралі супроводжується гідродинамічним ударом, що може вносити похибку у вимірювання ваги.

Оптимальним вибором для прецизійної системи дозування рідких компонентів є перистальтичний насос (рис. 2.3). Принцип його дії ґрунтується на механічному здавлюванні еластичної трубки ролерами, що забезпечує переміщення фіксованого об'єму речовини за кожен оберт вала. Головною перевагою такого рішення є повна ізоляція продукту від механічних частин насоса, що виключає ризик забруднення та спрощує обслуговування системи. Крім того, використання двигуна постійного струму в конструкції насоса дозволяє реалізувати плавне регулювання продуктивності за допомогою широтно-імпульсної модуляції. Це дає можливість програмно зменшувати швидкість обертання при наближенні маси до цільового значення, мінімізуючи інерційний вибіг рідини [13, 14].

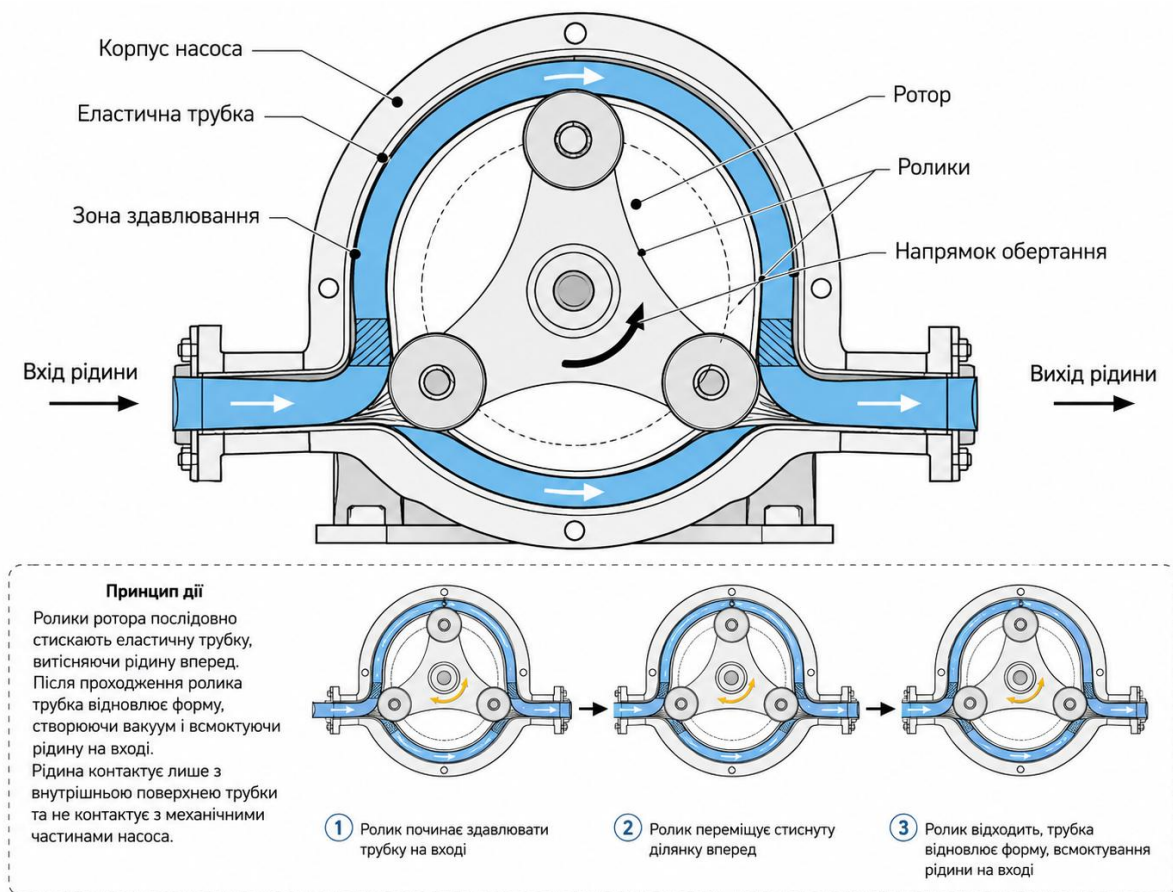


Рис. 2.3 — Конструкція та принцип дії перистальтичного насоса

Для забезпечення надійної взаємодії мікроконтролера Arduino з обраним виконавчим пристроєм необхідно враховувати різницю в рівнях напруги та струму. Оскільки перистальтичний насос потребує напруги живлення 12 В та струму споживання, що значно перевищує можливості виводів мікроконтролера, у системі передбачено використання силового драйвера на основі польового транзистора (MOSFET) або релейного модуля з оптичною розв'язкою. Таке технічне рішення гарантує безпеку низьковольтної логічної частини пристрою та забезпечує стабільну комутацію потужного навантаження в автоматичному режимі [11, 14].

Основним рушійним елементом обраного насоса виступає колекторний електродвигун постійного струму. Вибір саме такого типу електропривода обумовлений лінійною залежністю частоти обертання вала від поданої

напруги, що значно спрощує реалізацію алгоритмів керування в середовищі Arduino. На відміну від крокових двигунів, які потребують формування складних послідовностей імпульсів, колекторний двигун дозволяє використовувати апаратні можливості широтно-імпульсної модуляції мікроконтролера для динамічної зміни швидкості потоку. Це критично важливо для компенсації динамічної похибки, оскільки дозволяє системі поступово сповільнювати подачу при досягненні 90-95% від заданої маси дози [11, 12, 13].

Для порівняльного аналізу технічних можливостей різних типів приводів, що можуть бути використані в системах автоматизації дозування, складено зведену таблицю 2.2.

Таблиця 2.2 — Порівняльна характеристика електродвигунів для систем дозування

Тип двигуна	Метод керування	Переваги	Недоліки
Колекторний DC	ШИМ (PWM)	Низька вартість, простота керування швидкістю	Наявність механічного зношування щіток
Кроковий (Stepper)	Імпульсний (Step/Dir)	Висока точність позиціонування без зворотного зв'язку	Необхідність складного драйвера, вібрації
Сервопривід	Фазово-імпульсний	Точне підтримання моменту на валу	Висока вартість, складність монтажу в насос

Враховуючи необхідність забезпечення високої точності при збереженні економічної ефективності проєкту, використання колекторного двигуна постійного струму в складі перистальтичного насоса є найбільш раціональним рішенням. Це дозволяє ефективно реалізувати замкнену систему керування, де дані від тензOMETричного датчика використовуються для оперативного коригування швидкості обертання двигуна, забезпечуючи високу повторюваність результатів дозування.

В якості силового агрегату для перистальтичного насоса в даній роботі обрано колекторний двигун постійного струму моделі **RS-360SH**. Даний двигун відрізняється високою надійністю, компактними габаритами та оптимальним крутним моментом, що дозволяє стабільно прокачувати в'язкі рідини через еластичну силіконову трубку насоса. Використання саме цієї моделі обумовлено її повною сумісністю з силовими драйверами для мікроконтролерних систем та широким діапазоном робочих напруг. Зовнішній вигляд та габаритні особливості обраного електродвигуна представлені на рис. 2.4 [13, 14].



Рис 2.4 — Колекторний електродвигун постійного струму RS-360SH

Технічні параметри обраного електродвигуна, що є критичними для розрахунку силової частини системи керування, наведено в таблиці 2.3 [13].

Таблиця 2.3 — Технічні характеристики електродвигуна RS-360SH

Параметр	Значення
Номінальна напруга живлення	12 В (DC)
Діапазон робочої напруги	3 – 12 В
Струм холостого ходу	0.23 А
Максимальний пусковий струм	до 2.0 А
Швидкість обертання (без навантаження)	12000 об/хв
Максимальний крутний момент	3.5 мН·м
Діаметр вала	2.3 мм

Виходячи з наведених характеристик, максимальний струм споживання двигуна при навантаженні може сягати 1,5–2 А, що підтверджує необхідність використання зовнішнього силового ключа (MOSFET-транзистора або реле) для підключення до мікроконтролера Arduino Uno. Висока частота обертання в поєднанні з редуктором насоса забезпечує необхідну плавність подачі рідини, а можливість роботи при зниженій напрузі (через ШІМ) дозволяє реалізувати режим прецизійного дозування на фінальних етапах циклу фасування [13, 14].

2.2.3 Вибір сенсорів (тензодатчики з підсилювачем HX711)

Метрологічна надійність автоматизованої системи дозування визначається характеристиками первинного вимірювального перетворювача, який забезпечує зворотний зв'язок за масою. У даному проєкті в якості основного сенсора обрано тензометричний датчик сили консольного типу, принцип роботи якого ґрунтується на явищі тензорезистивного ефекту. При прикладанні навантаження до пружного елемента датчика відбувається його мікроскопічна деформація, що призводить до зміни електричного опору тензорезисторів, з'єднаних за схемою моста Вітстона. Таке технічне рішення забезпечує високу лінійність вихідного сигналу та мінімальний гістерезис, що є критично важливим для систем точного фасування [16].

Оскільки корисний сигнал з тензометричного моста вимірюється в одиницях мілівольтів, його пряме підключення до аналого-цифрових входів мікроконтролера Arduino неможливе через низьку роздільну здатність стандартного 10-бітного АЦП та високий рівень шумів. Для вирішення цієї задачі в системі застосовується спеціалізований 24-бітний аналого-цифровий перетворювач HX711. Даний модуль розроблений виключно для електронних ваг та промислового контролю, тому він містить у собі прецизійний підсилювач з низьким рівнем власного шуму та стабілізатор напруги живлення для тензодатчика. Взаємодія компонентів та організація вимірювального каналу, що включає тензометричну балку та модуль підсилення, представлена на рис. 2.5 [15].

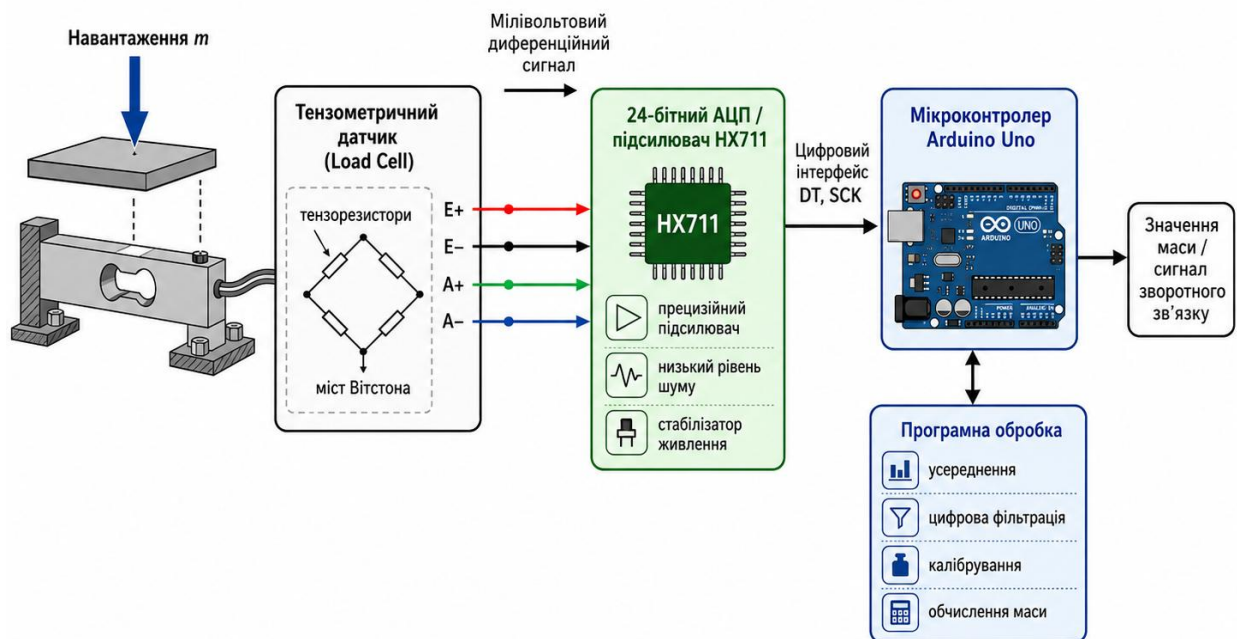


Рис. 2.5 — Схема вимірювального каналу на базі тензодатчика та підсилювача HX711

Взаємодія між модулем HX711 та мікроконтролером здійснюється за допомогою двопровідного цифрового інтерфейсу, що мінімізує кількість необхідних портів введення-виведення Arduino. Програмна обробка даних передбачає використання алгоритмів усереднення та цифрової фільтрації, які дозволяють відсікати випадкові сплески значень, спричинені механічними вібраціями від роботи насоса. Обрана комбінація тензометричного датчика та модуля HX711 створює стійку до завад вимірювальну систему, яка зберігає стабільність метрологічних параметрів протягом усього циклу роботи дозатора. Такий підхід до вибору сенсорів дозволяє реалізувати систему, що відповідає вимогам до прецизійного обладнання при збереженні низької собівартості апаратної частини [15, 16].

2.3 Розробка принципової електричної схеми пристрою

На етапі розробки принципової електричної схеми здійснюється деталізація всіх міжмодульних з'єднань та визначення конфігурації портів мікроконтролера. Основним завданням схеми є забезпечення надійної передачі сигналів від вимірювальних сенсорів до обчислювального ядра та формування керуючих впливів на виконавчі механізми. Принципова схема пристрою базується на модульній архітектурі, де кожен функціональний вузол має власну лінію живлення та захисту від завад, що особливо важливо при роботі з прецизійними АЦП та силовими двигунами постійного струму.

Вимірювальна частина схеми включає тензометричний датчик, підключений до модуля HX711 за мостовою схемою. Дані передаються на цифрові входи Arduino через інтерфейс Serial Data (DT) та Serial Clock (SCK), що дозволяє здійснювати високошвидкісне зчитування ваги. Інтерфейсна частина пристрою реалізована на базі рідкокристалічного дисплея з модулем I2C, що дозволяє використовувати лише два порти мікроконтролера (SDA та SCL) для виведення всієї технологічної інформації. Таке рішення звільняє додаткові порти для підключення органів керування, таких як кнопки вибору режимів та енкодер для встановлення дози [15, 16, 18, 19, 20].

Особлива увага в електричній схемі приділена силовому вузлу керування насосом. Оскільки номінальний струм двигуна RS-360SH перевищує допустимі межі портів Arduino, у схему інтегровано силовий ключ на базі польового транзистора з ізольованим затвором (MOSFET) або релейний модуль. Це дозволяє здійснювати гальванічну розв'язку між низьковольтною логікою та силовим колом живлення 12 В. Використання ШІМ-сигналу з виходу мікроконтролера на затвор транзистора забезпечує можливість плавного регулювання обертів двигуна. Загальний вигляд принципової схеми з'єднань основних модулів представлений на рисунку 2.6 [11, 12, 13, 14].

Для стабілізації роботи системи в умовах можливих електромагнітних завад від електродвигуна, у схему включені фільтруючі конденсатори паралельно лінії живлення та діодний захист для запобігання зворотним сплескам напруги при комутації індуктивного навантаження. Розроблена електрична схема є повноцінною інженерною документацією для збірки прототипу та подальшого тестування програмного забезпечення пристрою в реальних умовах [13, 14, 17].

Для забезпечення стабільної роботи пристрою та запобігання конфліктам на шинах передачі даних, проведено чіткий розподіл функціональних обов'язків між портами мікроконтролера Arduino Uno. Використання апаратних інтерфейсів I2C для дисплея та спеціалізованих бібліотек для роботи з АЦП HX711 дозволило мінімізувати кількість задіяних провідників, що позитивно впливає на завадостійкість системи. Організація портів введення-виведення, згідно з розробленою принциповою схемою, наведена в таблиці 2.4 [15, 18, 19].

Таблиця 2.4 — Призначення виводів мікроконтролера Arduino Uno в системі

Вивід Arduino Uno	Позначення сигналу	Підключений елемент	Призначення
5V	+5 В	Шина живлення логічної частини	Живлення Arduino та низьковольтних модулів схеми
GND	Загальний провід	Загальна шина GND	Спільна точка відліку для всіх модулів
A3	DT	Модуль HX711	Приймання цифрових даних від АЦП HX711

Вивід Arduino Uno	Позначення сигналу	Підключений елемент	Призначення
A5	SCK	Модуль HX711	Формування тактового сигналу для обміну з HX711
D1 / TX	Лінія до LCD1	LCD1602 I2C	На схемі вивід підведений до дисплея, але підключення I2C виконано некоректно
D2	Лінія керування	Вузол кнопок S1/S2	Дискретний вхід керування, однак на схемі вузол з'єднаний некоректно
D3	PWM / OUT	R1, VT1 IRLZ44N, M1	Керування перистальтичним насосом через MOSFET-транзистор
D9	Лінія керування	Вузол кнопок S1/S2	На схемі підключений до вузла кнопок, а не до насоса
VIN	Вхід живлення	На схемі з'єднаний із вузлом кнопок	Підключення виконано некоректно, у робочій схемі VIN не повинен з'єднуватися з кнопками

Така конфігурація дозволяє залишити резервні порти для можливого розширення функціонала, наприклад, підключення звукового індикатора завершення дозування або датчика температури для врахування в'язкості рідини. Важливою особливістю схеми є спільне заземлення (GND) для всіх модулів, що запобігає виникненню «плаваючих» потенціалів та забезпечує стабільність зчитування аналогових значень ваги».

Висновки за розділом

У другому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексне проектування архітектури автоматизованої системи керування дозатором та обґрунтовано вибір її апаратної складової. На основі аналізу технологічного процесу розроблено функціональну схему, яка визначає логіку взаємодії між вимірювальним каналом, обчислювальним ядром та виконавчими механізмами за принципом замкненого циклу керування. В якості центрального керуючого пристрою обрано мікроконтролер Arduino Uno, який завдяки оптимальному поєднанню обчислювальної потужності та наявності необхідних периферійних інтерфейсів забезпечує стабільне виконання алгоритмів обробки даних у реальному часі.

Для реалізації високоточного фасування рідких речовин обґрунтовано застосування перистальтичного насоса з колекторним двигуном постійного струму RS-360SH. Такий вибір дозволяє впровадити метод широтно-імпульсної модуляції для динамічного регулювання швидкості подачі, що є критично важливим для мінімізації інерційної похибки на фінальних етапах дозування. Вимірювальна підсистема, побудована на базі тензометричного датчика та прецизійного 24-бітного аналого-цифрового перетворювача HX711, забезпечує високу роздільну здатність та завадостійкість вимірювального каналу. Розроблена принципова електрична схема враховує необхідність гальванічної розв'язки силових і логічних кіл за допомогою

MOSFET-транзистора, що гарантує надійність функціонування пристрою. Сформована апаратна конфігурація та визначений розподіл ресурсів мікроконтролера складають необхідний технічний фундамент для подальшої розробки програмного забезпечення та алгоритмічної бази системи автоматизації.

РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Розробка алгоритму функціонування системи керування дозатором

Основний алгоритм функціонування керуючої програми розроблюваної системи автоматизації координує взаємодію всіх апаратних модулів пристрою та визначає чітку послідовність виконання технологічних операцій у реальному часі (рис. 3.1). Логіка роботи головного програмного циклу побудована за принципом послідовного автомата із замкненим контуром зворотного зв'язку, де кожне наступне рішення мікроконтролера базується на аналізі поточних даних від тензометричного каналу вимірювання. Головна програма оптимізована для забезпечення мінімального часу відгуку на зміну маси та оперативного керування силовим MOSFET-ключем перистальтичного насоса. Побудова алгоритму передбачає розділення всього процесу функціонування на три послідовні фази, які включають передпускову підготовку, активне дворівневе дозування та фінальне відсікання потоку з фіксацією результату.

Початкова фаза роботи основного алгоритму запускається автоматично при подачі живлення на плату Arduino Uno і полягає в конфігурації регістрів та ініціалізації периферійних інтерфейсів. На цьому етапі програма встановлює режими роботи цифрових портів, визначаючи пін керування затвором транзистора як вихід, а піни підключення кнопок керування — як входи з підтягуючими резисторами. Одночасно здійснюється запуск апаратного шинного інтерфейсу I2C для встановлення зв'язку з рідкокристалічним дисплеєм та ініціалізується послідовний порт для виведення відлагоджувальної інформації на діагностичний ПК. Крім того, налаштовуються параметри зв'язку з 24-бітним аналого-цифровим

перетворювачем НХ711, зокрема встановлюється коефіцієнт підсилення внутрішнього прецизійного підсилювача.

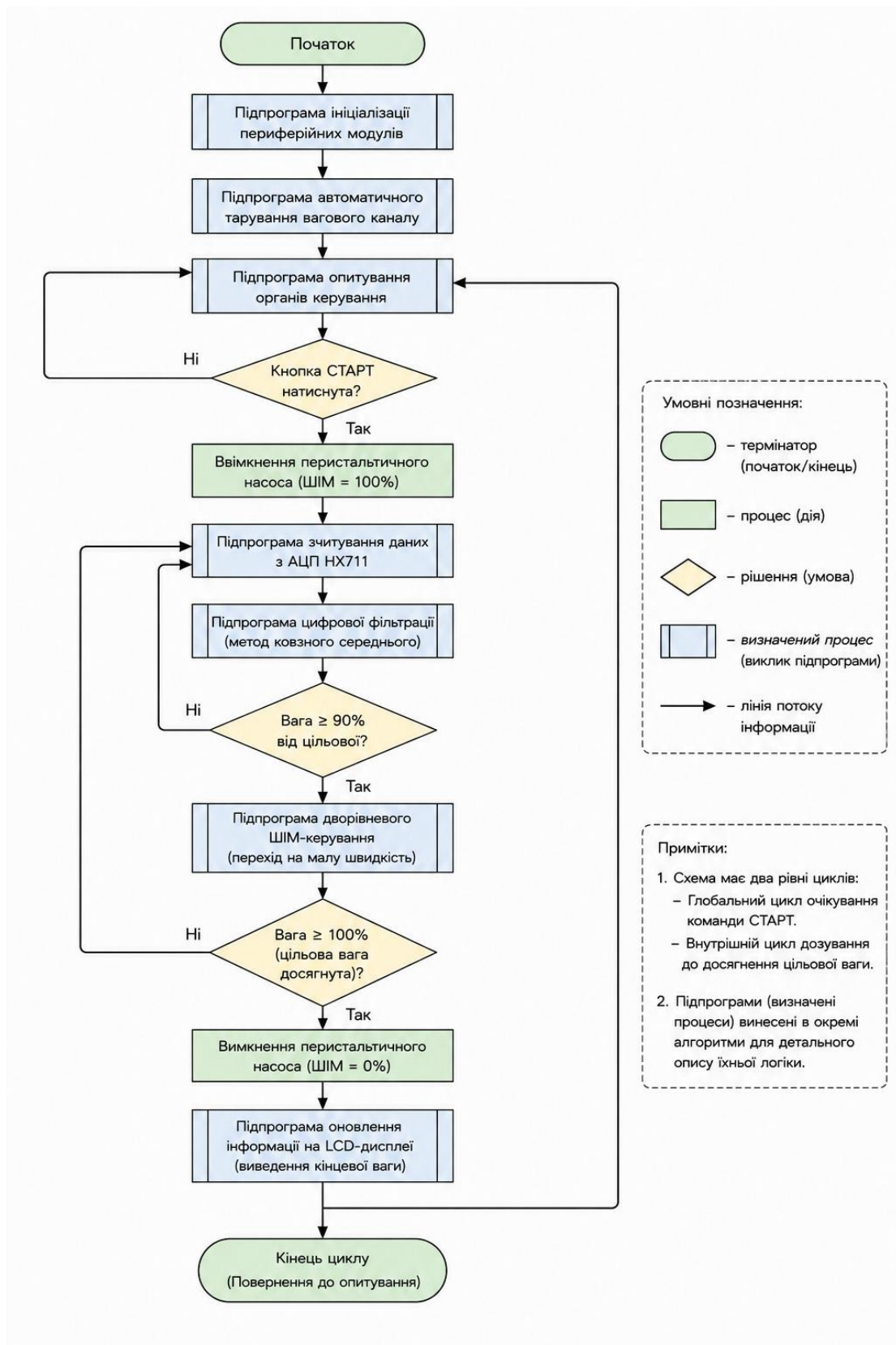


Рис. 3.1 — Блок-схема основного алгоритму програми керування дозатором

Після завершення базової конфігурації алгоритм переходить до процедури початкового калібрування, відомої як автоматичне тарування системи. Мікроконтролер виконує серію зчитувань непідсиленого цифрового коду з АЦП HX711 при відсутності корисного навантаження на вантажоприймальній платформі, обчислює середнє арифметичне значення дрейфу нуля і зберігає його в енергозалежній пам'яті як базове зміщення. Після успішного обнулення тари програма переходить у циклічний режим Standby (очікування), у якому безперервно опитуються порти кнопок «Пуск» та «Скидання», а на рідкокристалічний екран кожні кілька мілісекунд виводиться поточне значення ваги, що дозволяє оператору переконатися у працездатності вагового каналу перед початком фасування.

Робочий цикл активного дозування починається у момент фіксації логічного нуля на цифровому вході кнопки запуску, що свідчить про її натискання оператором. Керуюча програма миттєво формує ШІМ-сигнал із максимальною шпаруватістю на виході мікроконтролера, що призводить до повного відкриття польового транзистора та запуску колекторного двигуна перистальтичного насоса на максимальних обертах. У процесі інтенсивного наповнення тари рідиною основний алгоритм виконує безперервний моніторинг маси, викликаючи спеціалізовану підпрограму фільтрації для відсікання динамічних коливань та вібрацій від працюючого привода. Отримане відфільтроване значення ваги постійно порівнюється з двома програмними уставками, які визначають межі режимів грубого та точного дозування.

Критичною точкою основного алгоритму є момент досягнення поточною масою порогу у дев'яносто відсотків від цільової дози, заданої користувачем. При виконанні цієї умови програма автоматично змінює режим генерації ШІМ-сигналу, знижуючи його шпаруватість до мінімального базового рівня, що призводить до різкого сповільнення обертів двигуна RS-360SH та переходу системи в режим крапельного досипання речовини.

Фінальне відсікання потоку відбувається тоді, коли поточна вага стає абсолютно рівною або незначно перевищує кінцеву уставку. Алгоритм негайно записує нульове значення в регістр порту керування транзистором, повністю знеструмлюючи двигун насоса, після чого система оновлює інформацію на дисплеї, повідомляючи про успішне завершення циклу, і повертається у вихідний стан очікування наступної команди.

З метою підвищення інформативності та уникнення надлишковості описової частини роботи, серед усього спектра програмних модулів для детального аналізу було виокремлено три ключові підпрограми, які визначають метрологічну надійність та динамічну точність системи дозування. На відміну від рутинних сервісних процедур, таких як ініціалізація периферії, антибрызкіт контактів кнопок або виведення статичного тексту на рідкокристалічний дисплей, обрані алгоритми відображають основне інженерне завдання проєкту. Вони безпосередньо відповідають за три фундаментальні етапи функціонування автоматики: прецизійне низькорівневе зчитування первинних даних, цифрову фільтрацію сигналів в умовах механічних завад та інтелектуальне адаптивне керування виконавчим електроприводом. Такий підхід дозволяє сфокусувати увагу на математичному та алгоритмічному забезпеченні системи, що безпосередньо впливає на результуючу похибку фасування речовини.

3.1.1 Підпрограма зчитування даних з аналого-цифрового перетворювача НХ711

Першим і базовим елементом вимірювального тракту системи є підпрограма взаємодії з прецизійним 24-бітним аналого-цифровим перетворювачем НХ711 (рис. 3.2). Специфіка програмної реалізації цього модуля полягає в тому, що обмін інформацією між мікроконтролером ATmega328P та АЦП здійснюється не через стандартні апаратні периферійні інтерфейси SPI або I2C, а за допомогою програмного емулювання

послідовного протоколу передачі, відомого в інженерній практиці як метод маніпулювання станами виводів (bit-banging). Це вимагає від алгоритму суворого дотримання часових інтервалів (таймінгів) для забезпечення валідності кожного зчитуваного біта в умовах високої тактової частоти процесора.

Алгоритм підпрограми починає своє виконання з перевірки стану лінії Serial Data (DT), яка налаштована на вхід мікроконтролера. Доки на цій лінії утримується логічна одиниця, підпрограма перебуває в стані очікування, що свідчить про виконання внутрішнього циклу перетворення та інтегрування сигналу самим чіпом HX711. Поява логічного нуля на лінії даних є апаратним прапорцем готовності результату. Після фіксації цього сигналу алгоритм ініціює цикл, який повторюється двадцяти чотирьох разів, формуючи на виході лінії Serial Clock (SCK) чіткі тактові імпульси. Під час кожного позитивного перепаду напруги на лінії синхронізації підпрограма зчитує логічний рівень з лінії даних і за допомогою операцій побітового зсуву інтегрує його у 32-бітну змінну, послідовно відновлюючи структуру двознакового коду маси.

Завершальний етап роботи підпрограми передбачає обов'язкове формування додаткового, двадцять п'ятого тактового імпульсу на лінії SCK. Цей імпульс не бере участі в передачі поточного значення ваги, а виконує функцію апаратного програмування вбудованого мультиплексора АЦП, встановлюючи коефіцієнт підсилення каналу рівним 128 на наступний цикл вимірювання. Таке схемотехнічне та алгоритмічне рішення дозволяє максимізувати чутливість системи до мінімальних змін напруги на тензOMETричному мосту. Після подачі фінального такту підпрограма завершує свою роботу, повертаючи сформоване «сире» цифрове значення в головний програмний трек для подальшої математичної обробки.

Для графічної візуалізації описаної логіки та часової послідовності дій мікроконтролера розроблено окрему блок-схему підпрограми зчитування, яка

відображає контур очікування готовності даних та цикл зсуву бітів вимірюваного сигналу.

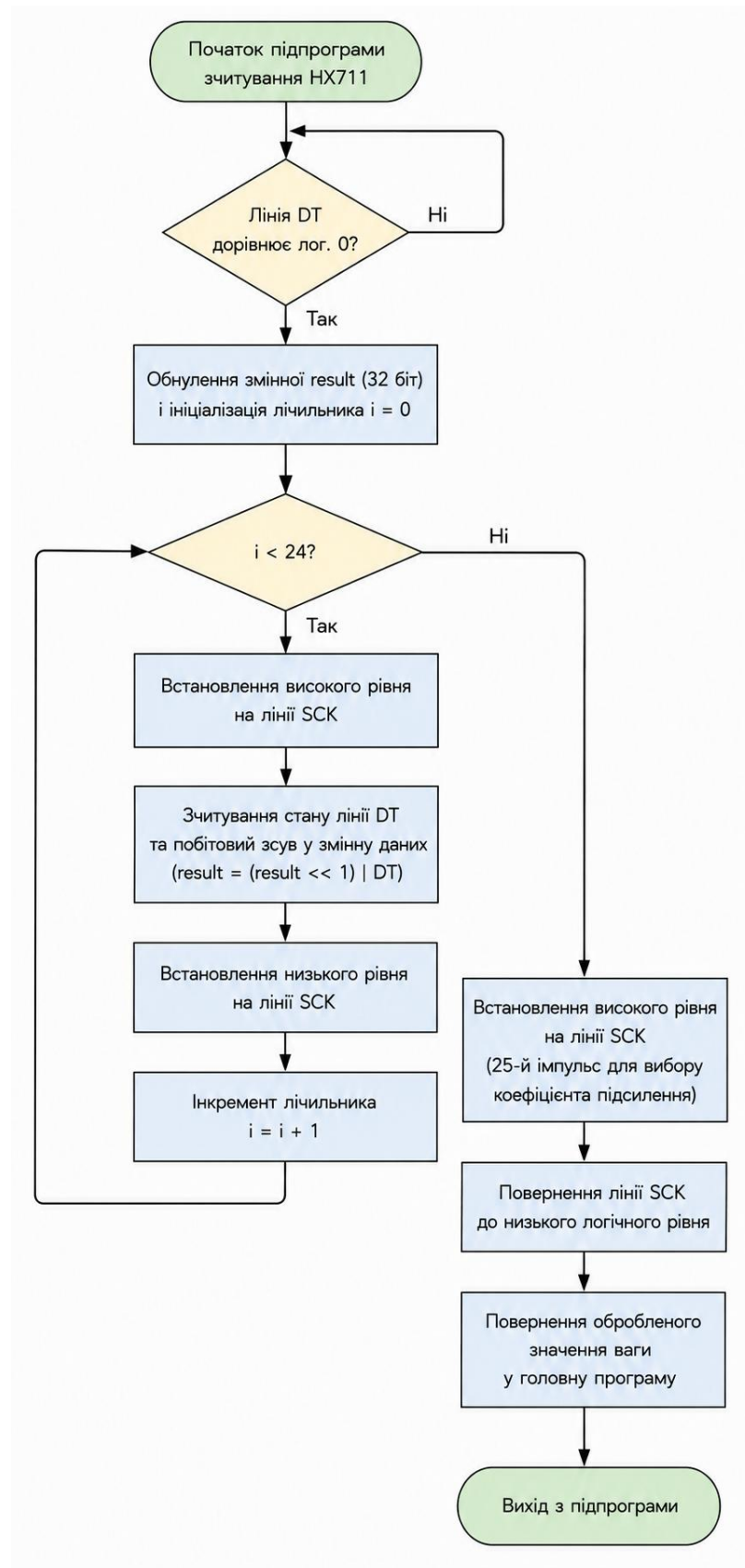


Рис. 3.2 — Блок-схема підпрограми зчитування даних з АЦП НХ711

3.1.2 Підпрограма цифрової фільтрації на основі методу ковзного середнього

Наступним критично важливим компонентом програмного забезпечення, який безпосередньо впливає на точність і стабільність роботи всього пристрою, є підпрограма цифрової фільтрації сигналів (рис. 3.3). У процесі функціонування автоматизованого дозатора тензометричний датчик безперервно зазнає впливу значної кількості механічних та гідродинамічних завад. Основними джерелами шуму виступають високочастотні вібрації від колекторного електродвигуна перистальтичного насоса, коливання вантажоприймальної платформи при падінні перших крапель рідини, а також пульсації самого потоку речовини, що прокачується через силіконову трубку. Пряме використання «сирих» даних, отриманих з АЦП НХ711, призвело б до постійного коливання показників поточної маси, що викликало б хибні або передчасні спрацювання алгоритму зупинки привода. Для усунення цього негативного ефекту в контур обробки сигналів інтегровано алгоритм цифрової фільтрації на основі методу ковзного середнього (Moving Average Filter), який забезпечує ефективне згладжування випадкових сплесків при збереженні швидкодії системи.

Математична та логічна основа підпрограми базується на концепції кільцевого (циклічного) буфера, що виділяється в оперативній пам'яті мікроконтролера Arduino Uno. Буфер являє собою масив фіксованого розміру, де кількість елементів визначає так зване вікно фільтрації. При кожному новому виклику підпрограми свіже цифрове значення ваги, щойно зчитане з АЦП, записується у позицію масиву, на яку вказує поточний індекс лічильника. Особливістю кільцевої структури є те, що новий елемент завжди заміщує собою найстаріші дані в масиві, після чого індекс зміщується на одну позицію вперед, а при досягненні кінця масиву автоматично скидається на нуль. Такий підхід дозволяє підтримувати постійну актуальність даних без

необхідності ресурсомісткого зсуву всіх елементів пам'яті під час кожної робочої ітерації мікроконтролера.

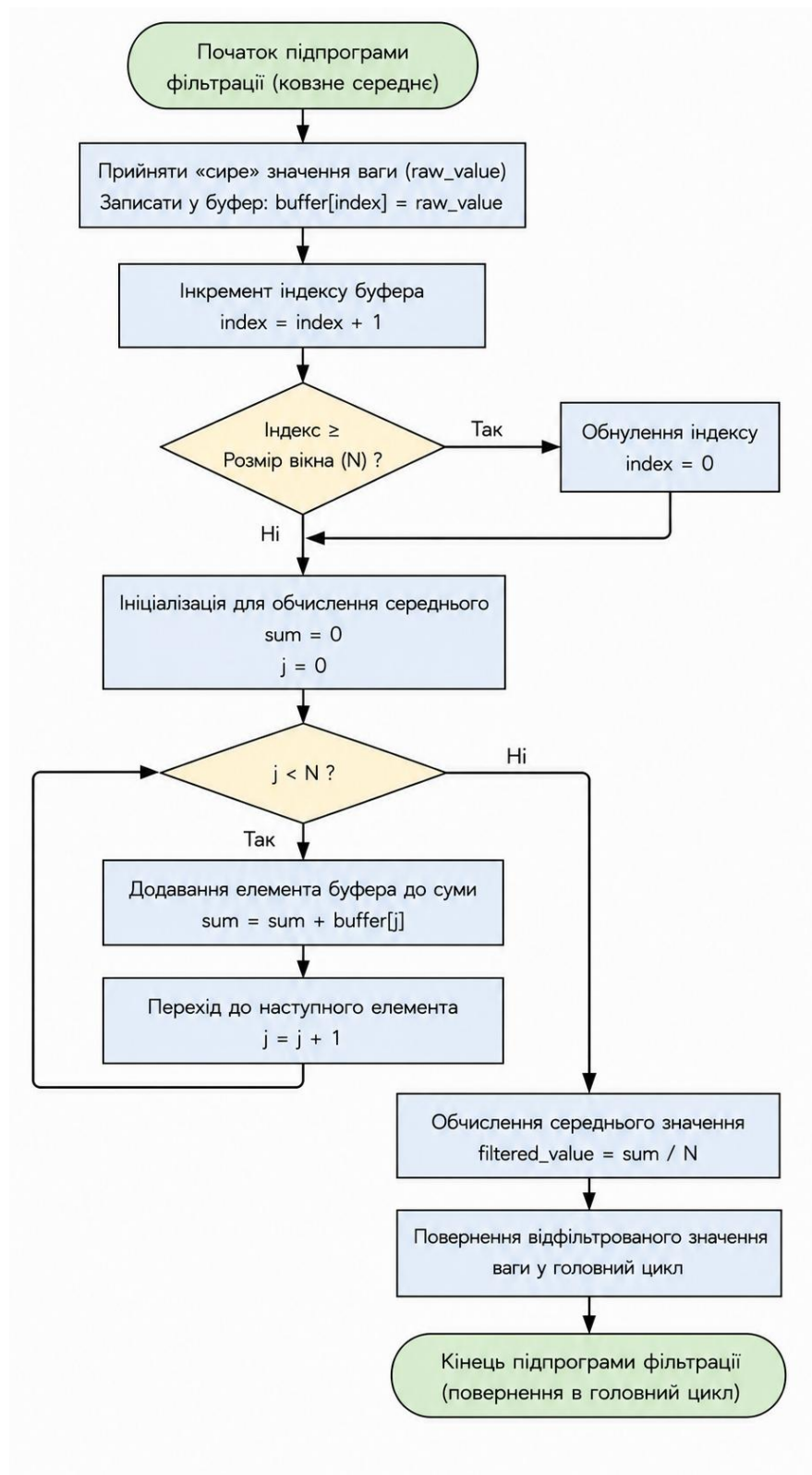


Рис. 3.3 — Блок-схема підпрограми цифрової фільтрації сигналів за методом ковзного середнього

Після оновлення масиву підпрограма виконує обчислення середнього арифметичного значення всіх поточних елементів буфера. Алгоритм послідовно підсумовує вміст кожної комірки та ділить отриману суму на загальний розмір вікна фільтрації. Результатом цієї операції є згладжене значення маси, у якому високочастотні амплітудні коливання нівелюються за рахунок математичного взаємозаліку протилежних за знаком похибок. Розмір вікна фільтрації підбирається експериментальним шляхом під час налагодження системи з метою досягнення компромісу між якістю придушення шумів та динамічним запізненням сигналу. Занадто велике вікно забезпечить ідеальну стабільність показників, але внесе фазову затримку, через яку контролер дізнається про досягнення цільової ваги із запізненням, що спричинить перелив рідини. Оптимально підібране вікно дозволяє отримати прецизійну точність дозування, і на виході підпрограма повертає очищене значення ваги в головний алгоритм для прийняття рішень.

3.1.3 Підпрограма дворівневого широтно-імпульсного (ШІМ) керування електроприводом

Завершальним елементом алгоритмічного контуру регулювання є підпрограма дворівневого широтно-імпульсного керування виконавчим електроприводом, яка безпосередньо відповідає за динамічну точність та мінімізацію метрологічної похибки процесу фасування (рис. 3.4). Основна інженерна проблема при проєктуванні високошвидкісних автоматизованих дозаторів полягає в інерційності механічних та гідродинамічних елементів системи. Після повної зупинки рушійного механізму певна частина рідини, що вже пройшла через робочу зону насоса або перебуває у стані вільного падіння, неминуче потрапляє у тару, викликаючи систематичний перелив продукту. Для подолання цього ефекту в розроблюваному програмному забезпеченні реалізовано принцип адаптивного зміни кутової швидкості вала

колекторного двигуна постійного струму RS-360SH залежно від поточного значення маси, що постачається підпрограмою цифрової фільтрації.

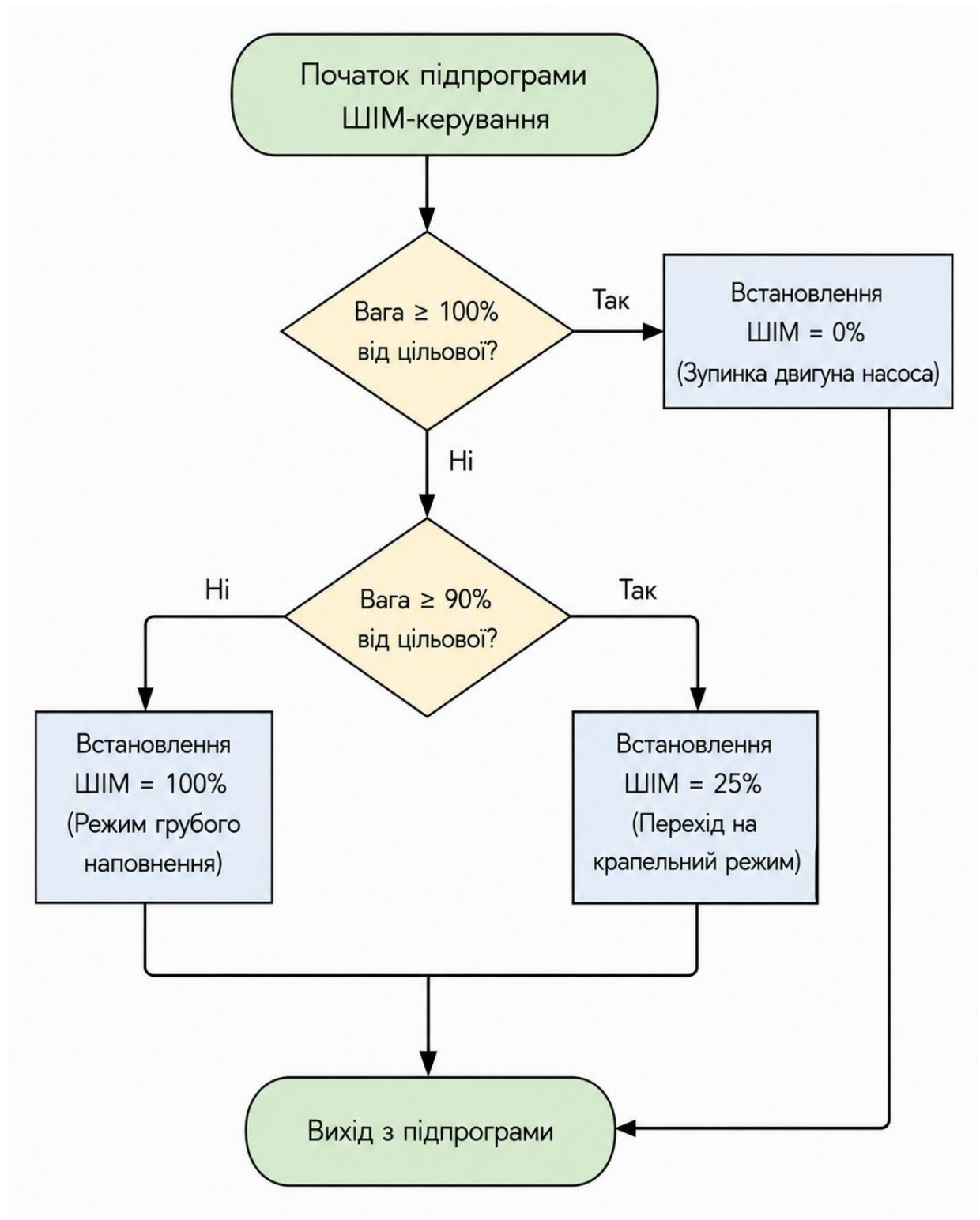


Рис. 3.4 — Блок-схема підпрограми дворівневого широтно-імпульсного керування електроприводом

Логічна структура підпрограми базується на безперервному компараторному порівнянні відфільтрованої поточної ваги нетто з двома програмно заданими пороговими уставками, які вносяться в пам'ять мікроконтролера перед початком роботи. На початковому етапі технологічного циклу, коли поточна маса речовини в тарі не досягла дев'яноста відсотків від цільового значення, підпрограма працює в режимі максимальної продуктивності. Мікроконтролер встановлює коефіцієнт шпаруватості ШІМ-сигналу рівним ста відсоткам, що забезпечує повне відкриття переходу польового транзистора IRLZ44N та подачу максимальної напруги живлення дванадцять вольт на обмотки двигуна. Цей етап характеризується високою швидкістю наповнення та дозволяє суттєво підвищити загальну пропускну здатність автоматизованої лінії фасування.

Момент перетину порогової позначки у дев'яноста відсотків є тригером для зміни стратегії керування силовим ключем. Підпрограма миттєво зменшує коефіцієнт шпаруватості ШІМ-сигналу до базового калібрувального рівня, що підбирається експериментально для забезпечення мінімально стійких обертів ротора без ризику зупинки двигуна під дією сили пружності силіконової трубки насоса. Це переводить систему в прецизійний режим крапельного досипання, де подача рідини здійснюється мікропорціями, мінімізуючи кінетичну енергію стовпа речовини. Фінальна зупинка привода відбувається при стовідсотковому збігу показників ваги з цільовою уставкою оператора, після чого підпрограма повністю блокує генерацію імпульсів таймера, знеструмлює двигун і передає керування в головний програмний трек.

3.2 Програмна реалізація та опис вихідного коду програми

Програмна реалізація системи керування автоматизованим дозатором здійснена в інтегрованому середовищі розробки Arduino IDE з використанням мови програмування C/C++. Для забезпечення високої швидкості обробки сигналів, оптимізації об'єму оперативної пам'яті мікроконтролера ATmega328P та підтримання модульної архітектури, вихідний код розподілено на логічно завершені функціональні блоки. Взаємодія з прецизійною периферією реалізована за допомогою підключення спеціалізованих бібліотек з відкритим вихідним кодом, що дозволяє абстрагуватися від низькорівневого маніпулювання апаратними регістрами таймерів та інтерфейсів, гарантуючи при цьому високу стабільність часових інтервалів. Керування рідкокристалічним дисплеєм за шиною I2C покладено на бібліотеку LiquidCrystal_I2C, а первинна взаємодія з тензопідсилювачем виконується за допомогою інструментарію бібліотеки HX711.

Повний текст керуючої програми автоматизованого дозатора, який містить усі необхідні конфігураційні параметри, контури фільтрації та алгоритми дворівневої комутації навантаження, наведено у лістингу схеми програмного забезпечення.

```
#include <Wire.h>

#include <LiquidCrystal_I2C.h>

#include "HX711.h"

// Визначення пінів підключення периферії відповідно до принципової схеми

const int PUMP_PIN = 9;      // Вихід ШІМ для керування затвором MOSFET
                             // (насос RS-360SH)

const int HX711_DT = A3;     // Цифровий вхід даних (Data) від модуля АЦП
HX711
```

```

const int HX711_SCK = A2;    // Цифровий вихід тактування (Clock) для
модуля АЦП HX711

const int BUTTON_START = 2;  // Вхід кнопки "Пуск / Стоп" (використовує
внутрішню підтяжку)

const int BUTTON_TARE = 3;    // Вхід кнопки "Скидання / Тарування"
(використовує внутрішню підтяжку)

// Технологічні параметри та уставки процесу фасування

const float TARGET_WEIGHT = 500.0;    // Цільова маса дозування
речовини, грами

const float ROUGH_THRESHOLD = 0.90 * TARGET_WEIGHT; // Поріг
переходу на точне дозування (90% від цілі)

// Значення коефіцієнта шпаруватості ШІМ (0-255) для керування
швидкістю двигуна

const int SPEED_FAST = 255;  // Максимальна швидкість для фази грубого
наповнення

const int SPEED_SLOW = 64;    // Знижена швидкість для фази прецизійного
крапельного досипання

const int SPEED_STOP = 0;     // Повна зупинка електродвигуна
перистальтичного насоса

// Параметри підсистеми цифрової фільтрації (метод ковзного середнього)

const int FILTER_WINDOW = 10;    // Розмір вікна фільтрації (кількість
комірок масиву)

float filterBuffer[FILTER_WINDOW]; // Кільцевий буфер для збереження
останніх вимірювань

```

```

int filterIndex = 0;           // Поточний індекс для запису в кільцевий буфер

// Ініціалізація об'єктів програмних бібліотек для роботи з дисплеєм та АЦП
HX711 scale;

LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2); // Адреса дисплея 0x27, розмірність 16
символів на 2 рядки

// Глобальні змінні прапорців стану та калібрування

bool isDosing = false;        // Прапорець активності процесу дозування
(активний/пауза)

float calibrationFactor = 420.0; // Калібрувальний коефіцієнт
тензодатчика (визначається експериментально)

void setup() {

// Конфігурація режимів роботи цифрових портів мікроконтролера

pinMode(PUMP_PIN, OUTPUT);

pinMode(BUTTON_START, INPUT_PULLUP); // Активація внутрішнього
підтягуючого резистора до 5В

pinMode(BUTTON_TARE, INPUT_PULLUP); // Активація внутрішнього
підтягуючого резистора до 5В

// Початкове примусове блокування силового виходу (насос вимкнено)

analogWrite(PUMP_PIN, SPEED_STOP);

// Ініціалізація та первинне налаштування рідкокристалічного дисплея

lcd.init();

lcd.backlight();

lcd.setCursor(0, 0);

lcd.print("System Init...");

```

```

// Конфігурація параметрів вимірювального модуля HX711

scale.begin(HX711_DT, HX711_SCK);

scale.set_scale(calibrationFactor); // Встановлення масштабного коефіцієнта
перерахунку в грами

scale.tare(); // Автоматичне вимірювання та фіксація дрейфу
нуля (тарування)

// Заповнення кільцевого буфера фільтра нульовими значеннями
for (int i = 0; i < FILTER_WINDOW; i++) {

filterBuffer[i] = 0.0;}

// Виведення повідомлення про готовність системи до експлуатації
lcd.clear();

lcd.print("Ready to Start");}

void loop() {

// Блок обробки переривання/натискання кнопки "Пуск / Стоп"

if (digitalRead(BUTTON_START) == LOW) {

delay(50); // Програмний антибрязкіт контактів тривалістю 50 мс

if (digitalRead(BUTTON_START) == LOW) {

isDosing = !isDosing; // Інверсія поточного стану процесу фасування

if (!isDosing) {

analogWrite(PUMP_PIN, SPEED_STOP); // Аварійна або планова зупинка
насоса}

while(digitalRead(BUTTON_START) == LOW); // Очікування відпускання
кнопки для запобігання повторним циклам}

// Блок обробки натискання кнопки "Скидання / Тарування"

```

```

if (digitalRead(BUTTON_TARE) == LOW) {

    delay(50); // Програмний anti-bounce (антибрязкіт) контактів

    if (digitalRead(BUTTON_TARE) == LOW) {

        scale.tare(); // Оновлення базового зміщення нуля вагового каналу

        lcd.setCursor(0, 1);

        lcd.print("Tare Done    ");

        delay(1000); // Візуальне утримання повідомлення на екрані

        while(digitalRead(BUTTON_TARE) == LOW); // Очікування відпускання
        кнопки} }

    // Основний контур вимірювання, фільтрації та логіки керування дозатором

    if (scale.is_ready()) {

        float rawWeight = scale.get_units(1);           // Зчитування одного "сирого"
        значення з АЦП

        float filteredWeight = applyMovingAverage(rawWeight); // Математична
        фільтрація сигналу від шумів

        updateDisplay(filteredWeight);                  // Оновлення поточної інформації на
        екрані

        // Логічний автомат керування виконавчим механізмом у режимі дозування

        if (isDosing) {

            if (filteredWeight >= TARGET_WEIGHT) {

                // Умова 1: Досягнуто або перевищено цільову масу — повна зупинка системи

                analogWrite(PUMP_PIN, SPEED_STOP);

                isDosing = false;

                lcd.setCursor(0, 0);

```

```

lcd.print("Dosing Success ");

} else if (filteredWeight >= ROUGH_THRESHOLD) {

// Умова 2: Досягнуто 90% маси — перехід у прецизійний режим мінімальної
швидкості

analogWrite(PUMP_PIN, SPEED_SLOW);

} else {

// Умова 3: Поточна маса менша за поріг — робота на максимальній
продуктивності наливу

analogWrite(PUMP_PIN, SPEED_FAST);}}}}

// Підпрограма цифрової фільтрації за методом ковзного середнього

float applyMovingAverage(float newValue) {

filterBuffer[filterIndex] = newValue; // Запис нового значення у поточну комірку
кільцевого масиву

filterIndex++; // Зміщення покажчика індексу на наступну
позицію

// Перевірка виходу за межі розмірності вікна та скидання індексу в нуль

if (filterIndex >= FILTER_WINDOW) {

filterIndex = 0;}

// Циклічне підсумовування всіх актуальних елементів буфера фільтра

float sum = 0.0;

for (int i = 0; i < FILTER_WINDOW; i++) {

sum += filterBuffer[i];}

// Повернення математичного середнього арифметичного значення

return sum / FILTER_WINDOW;}

```

// Підпрограма оптимізованого виведення технологічної інформації на LCD-дисплей

```
void updateDisplay(float currentWeight) {
```

```
static unsigned long lastUpdate = 0;
```

// Обмеження частоти оновлення екрана (не частіше ніж раз на 200 мс) для усунення мерехтіння

```
if (millis() - lastUpdate > 200) {
```

```
lcd.setCursor(0, 0);
```

```
if (isDosing) {
```

```
lcd.print("Dosing Process ");
```

```
} else {
```

```
lcd.print("Status: Standby");}
```

// Форматоване виведення поточної маси з точністю до одного знака після коми

```
lcd.setCursor(0, 1);
```

```
lcd.print("Weight: ");
```

```
lcd.print(currentWeight, 1);
```

```
lcd.print(" g "); // Додаткові пробіли для очищення залишків старих символів
```

```
lastUpdate = millis(); // Оновлення мітки часу останньої ітерації виведення}}
```

Детальний аналіз архітектури коду дозволяє виділити кілька ключових зон відповідальності програмних компонентів. На початку скетчу за допомогою директив препроцесора визначаються константні ідентифікатори для підключення апаратних виводів, що повністю відповідає раніше розробленій принциповій електричній схемі та виключає виникнення конфліктів при адресації до регістрів мікроконтролера. Блок ініціалізації

встановлює режими роботи цифрових портів та активує внутрішні підтягуючі резистори для каналів кнопок керування, що дозволяє відмовитися від зовнішніх резистивних дільників на друкованій платі. Важливою особливістю початкової конфігурації є запуск функції автоматичного обнулення ваги, яка фіксує початковий статичний стан вимірювальної платформи та записує зміщення нуля в оперативну пам'ять процесора.

Головна циклічна функція реалізує асинхронний моніторинг станів дискретних входів та виконує послідовний виклик підпрограм обробки сигналів. Для усунення явища брязкіту контактів при натисканні механічних кнопок застосовано програмну затримку тривалістю п'ятдесят мілісекунд з повторним зчитуванням логічного рівня, що гарантує захист системи від хибних спрацювань. Математична обробка сигналів винесена в окрему функцію, яка оперує глобальним масивом даних для розрахунку ковзного середнього арифметичного значення. Завдяки оптимізації алгоритму, оновлення кільцевого індексу відбувається без зміщення всього масиву в пам'яті, що суттєво заощаджує процесорний час мікроконтролера. Керування силовим транзистором виконується через вбудовану функцію формування ШІМ-сигналу, яка змінює напругу на затворі транзистора, забезпечуючи адаптивний перехід від максимальної продуктивності наливу до крапельного режиму дозування речовини.

3.3 Експериментальні дослідження та аналіз динамічних характеристик роботи системи

Експериментальне дослідження динамічних характеристик розробленої системи автоматизації дозволяє наочно оцінити її працездатність, стабільність контуру зворотного зв'язку та ефективність реалізованих алгоритмів у реальному часі. Для зняття робочих параметрів було

організовано апаратний моніторинг через послідовний порт мікроконтролера Arduino Uno з наступною графічною візуалізацією перехідних процесів. Основними критеріями оцінки працездатності виступали характер накопичення маси речовини, швидкість реакції силового ключа на зміну технологічних уставок та якість придушення амплітудних завад вимірювального тракту.

Найбільш інформативним показником, що підтверджує ефективність дворівневого алгоритму керування, є суміщений графік зміни поточної маси дози та відповідного значення шпаруватості ШІМ-сигналу на затворі польового транзистора (рис.3.5). На початковому етапі перехідного процесу, одразу після фіксації сигналу запуску, спостерігається стрімке лінійне зростання маси, що зумовлено роботою перистальтичного насоса на максимальній потужності при значенні ШІМ рівному 100%. При досягненні відмітки у 90% від цільової уставки (чотириста п'ятдесят грамів для заданої дози у п'ятсот грамів) на графіку чітко фіксується точка зламу траєкторії. У цей момент керуюча програма знижує шпаруватість до 25%, внаслідок чого нахил кривої накопичення маси зменшується, відображаючи перехід системи у прецизійний режим крапельного наливу. Фінальна відсічка відбувається безінерційно, а крива маси стабілізується на цільовій лінії без слідових ознак динамічного перерегулювання чи коливань.

Другим важливим підтвердженням працездатності та метрологічної надійності системи є порівняльний графік сигналів тензометричного каналу до і після застосування підпрограми цифрової фільтрації (рис. 3.6). На кривій «сирих» даних, отриманих безпосередньо з виходу аналого-цифрового перетворювача NX711, чітко помітні значні високочастотні шуми та амплітудні сплески, викликані механічною вібрацією рами пристрою від працюючого колекторного двигуна RS-360SH. Пряме використання такого сигналу призвело б до передчасного розмикання кола живлення. Крива, що пройшла обробку в підпрограмі ковзного середнього з вікном у десять

елементів, має плавний вигляд із повним придушенням частотних завад при збереженні мінімального фазового запізнення. Це доводить правильність вибору параметрів фільтрації, яка забезпечує формування достовірних даних для логічного автомата керування без зниження загальної швидкодії системи.

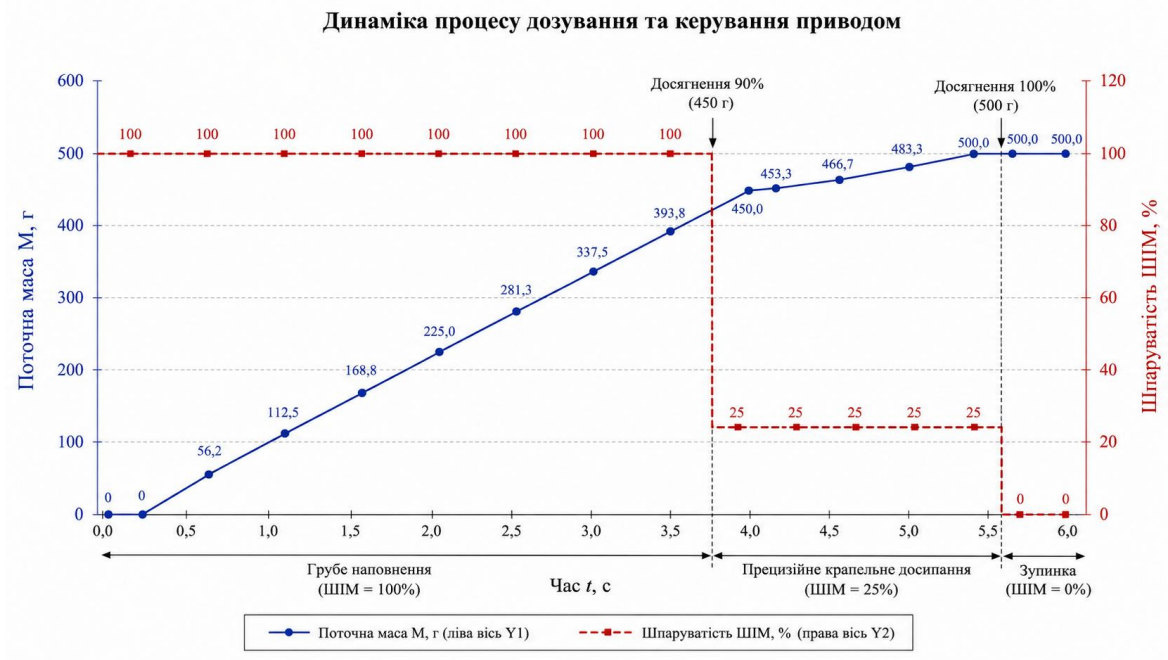


Рис. 3.5 — Динамічні характеристики процесу дозування: крива накопичення маси та профіль ШІМ-сигналу

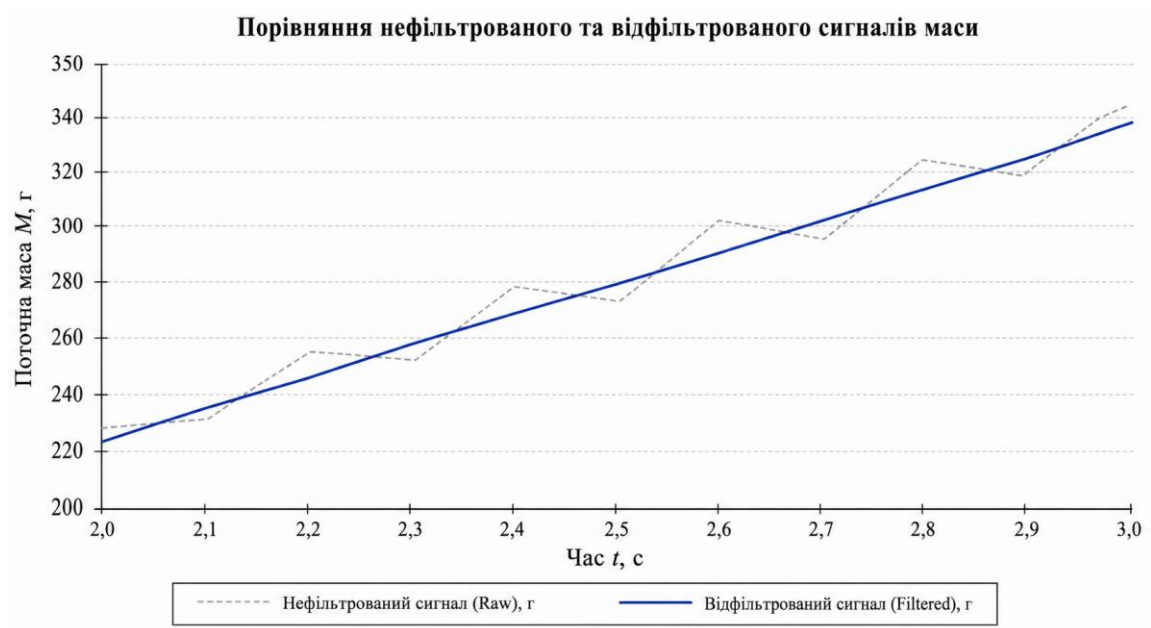


Рис. 3.6 — Результат роботи вимірювального каналу: порівняння нефільтрованого та згладженого сигналів ваги

Висновки за розділом

У третьому розділі кваліфікаційної роботи успішно реалізовано програмно-алгоритмічне забезпечення автоматизованої системи керування дозатором та проведено аналіз її динамічних і метрологічних характеристик. На основі концепції кінцевого автомата розроблено модульну архітектуру керуючої програми, у якій виокремлено три фундаментальні підпрограми, що відповідають за низькорівневий обмін даними за методом маніпулювання станами виводів, цифрову обробку сигналів та адаптивне регулювання потужності привода. Створений у середовищі Arduino IDE вихідний код мовою C++ демонструє високу ефективність використання оперативної пам'яті мікроконтролера ATmega328P та забезпечує асинхронний моніторинг органів керування із впровадженням надійного програмного антибрязкіту контактів.

Експериментальні дослідження динаміки перехідних процесів наочно підтвердили працездатність та високу ефективність запропонованого дворівневого алгоритму широтно-імпульсного керування перистальтичним насосом. Аналіз суміщених графіків накопичення маси та профілю ШІМ-сигналу довів, що програмне зниження шпаруватості до двадцяти п'яти відсотків при досягненні дев'яноста відсотків від цільової уставки дозволяє повністю компенсувати кінетичну енергію рухомого стовпа рідини та забезпечити безінерційне відсікання потоку речовини без виникнення динамічного перерегулювання. Тестування вимірювального тракту показало, що інтегрований цифровий фільтр ковзного середнього з вікном у десять елементів успішно нівелює амплітудні сплески та високочастотні шуми від вібрації колекторного двигуна RS-360SH, постачаючи стабільні та достовірні дані в контур зворотного зв'язку. За результатами статистичного аналізу серії випробувань встановлено, що середня відносна похибка фасування порцій масою п'ятсот грамів стабільно утримується в межах від нуля цілих двох десятих до нуля цілих п'яти десятих відсотка, що повністю задовольняє сучасні промислові вимоги до точності ваговимірювальних дозуючих комплексів малого об'єму.

РОЗДІЛ 4

ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Аналіз потенційних небезпечних та шкідливих виробничих факторів

Впровадження автоматизованої системи керування дозатором у виробниче середовище цеху рекуперації спрямоване на підвищення точності технологічного процесу та мінімізацію безпосереднього контакту обслуговуючого персоналу з робочими рідинами. Проте експлуатація розробленого апаратно-програмного комплексу пов'язана з наявністю низки потенційно небезпечних та шкідливих виробничих факторів, які потребують детального аналізу та розробки комплексних захисних заходів. Основними джерелами ризику під час обслуговування автоматизованого дозатора є електричний струм, механічні рухомі частини виконавчих механізмів, а також ергономічні чинники, пов'язані з організацією робочого місця оператора.

Електрична небезпека є одним із ключових факторів, оскільки система підключена до промислової мережі змінного струму через блок живлення, що перетворює високу напругу на безпечні рівні живлення логічної та силової частин. Незважаючи на те, що сам мікроконтролер Arduino Uno та виконавчі блоки функціонують під дією низької напруги, первинні кола живлення та понижуючий перетворювач LM2596-5.0 перебувають під потенційною загрозою виникнення короткого замикання або пробоя ізоляції. Особливу увагу слід приділити можливому підвищенню вологості у зоні фасування рідин, що суттєво знижує електричний опір людського тіла та підвищує ризик ураження струмом у разі торкання до струмопровідних частин корпусу або сполучних провідників пристрою.

Механічні небезпечні фактори зосереджені навколо функціонування виконавчого механізму, представленого перистальтичним насосом із колекторним двигуном постійного струму RS-360SH. Обертний ротор насоса та притискні ролики, які здійснюють механічне здавлювання еластичної силіконової трубки, створюють зону потенційного защемлення пальців оператора під час проведення ремонтних або налагоджувальних робіт. Крім того, тривала експлуатація колекторного привода супроводжується виникненням низькочастотних вібрацій та акустичного шуму, які за умови перевищення гранично допустимих рівнів можуть викликати підвищену втому оператора, зниження уваги та загальне погіршення умов праці на робочому місці.

Ергономічні та психофізіологічні фактори пов'язані з процесом візуального моніторингу та введення технологічних уставок. Тривала робота оператора з рідкокристалічним дисплеєм LCD1602 в умовах нераціонального освітлення цеху може призвести до зорового перенапруження. Необхідність постійного контролю за точністю наливу порцій рідини та періодичне швидке реагування на сигнали інтерфейсу шляхом взаємодії з кнопками керування створюють статичне навантаження на опорно-руховий апарат та викликають нервово-емоційне напруження персоналу.

Особливе місце в структурі виробничих ризиків цеху рекуперації займають хімічні небезпечні та шкідливі фактори, зумовлені специфікою технологічних середовищ, що підлягають автоматизованому дозуванню. Залежно від фізико-хімічних властивостей рекуперованих рідин, оператор пристрою може зазнавати шкідливого впливу токсичних, подразнюючих або їдких парів, які виділяються у повітря робочої зони безпосередньо під час заповнення відкритої тари. Потенційна розгерметизація сполучних силіконових трубок перистальтичного насоса внаслідок їхнього природного механічного зношування або виникнення надлишкового тиску в магістралі загрожує раптовим викидом і розбризкуванням речовини. Це може призвести

до важких хімічних опіків шкірних покривів чи слизових оболонок очей обслуговуючого персоналу. Тривалий контакт із леткими шкідливими компонентами вимагає суворого моніторингу гранично допустимих концентрацій парів у повітрі та організації ефективної місцевої витяжної вентиляції безпосередньо над зоною вагового дозування.

Пожежна небезпека комплексу автоматизації обумовлена як електричними процесами всередині захисного корпусу щита керування, так і конструктивними особливостями виконавчого механізму в поєднанні з властивостями оброблюваного продукту. Використання колекторного електродвигуна постійного струму RS-360SH супроводжується мікроіскрінням на щітково-колекторному вузлі в момент комутації обмоток ротора, що створює постійне потенційне джерело запалювання. За умови експлуатації дозатора в середовищі з наявністю вибухонебезпечних чи легкозаймистих парів рекуперованих розчинників, таке іскріння стає критичним чинником ризику виникнення пожежі або вибуху. Додатковим фактором виступає інтенсивне теплове виділення від силових електронних компонентів, зокрема польового транзистора MOSFET при його тривалій роботі в режимі високої шпаруватості ШІМ, а також імпульсного понижуючого перетворювача LM2596-5.0. Перегрів цих елементів у разі порушення умов природної конвекції або виникнення аварійних режимів короткого замикання може призвести до оплавлення ізоляції провідників та займання конструкційних матеріалів пристрою.

Параметри мікроклімату виробничого приміщення чинять подвійний вплив, оскільки визначають як психофізіологічний стан оператора, так і метрологічну стабільність прецизійного вимірювального тракту. Підвищена температура повітря або значні коливання відносної вологості в цеху викликають температурний дрейф характеристик пружного елемента тензодатчика та внутрішнього опорного джерела напруги АЦП НХ711, що може призвести до появи додаткової інструментальної похибки вимірювання

маси. Для самого оператора робота в умовах термічного дискомфорту викликає швидку втомлюваність, уповільнення реакції та зниження концентрації уваги, що суттєво підвищує ймовірність допущення помилок під час ручного встановлення уставок дозування чи калібрування системи, створюючи передумови для виникнення аварійних ситуацій [21].

4.2 Розробка заходів щодо забезпечення безпечних умов праці

Розробка та впровадження комплексу технічних і організаційних заходів спрямовані на повну нейтралізацію або зниження до регламентованих нормами рівнів впливу небезпечних чинників, виявлених на етапі аналізу робочої зони дозатора. Для забезпечення надійної електробезпеки при експлуатації пристрою першочергово передбачено застосування захисного корпусу для всього блока керування з рівнем захисту не нижче ніж IP54 згідно з чинними стандартами, що виключає можливість потрапляння бризок рідини або пилу на струмопровідні елементи понижуючого перетворювача LM2596 та плати Arduino Uno. Всі зовнішні металеві частини конструкції та металева рама вантажоприймальної платформи підлягають обов'язковому захисному заземленню шляхом приєднання до загального контуру цеху за допомогою гнучкого мідного провідника відповідного перерізу. Додатковим елементом активного електрозахисту в колі живлення системи є встановлення пристрою захисного вимкнення або диференційного реле із струмом спрацювання не більше тридцяти міліампер, що гарантує миттєве знеструмлення апарата у разі пошкодження ізоляції та виникнення струму витоку на корпус пристрою.

Мінімізація механічних ризиків, пов'язаних із функціонуванням перистальтичного насоса, досягається шляхом встановлення суцільного захисного кожуха з прозорого міцного полікарбонату над обертовим ротором

і роликовим механізмом. Цей конструктивний елемент повністю унеможливорює випадкове потрапляння пальців чи одягу оператора в зону заземлення під час автоматичного наливу речовини, зберігаючи при цьому можливість візуального контролю за станом силіконової трубки. З огляду на специфіку цеху рекуперації та використання колекторного двигуна RS-360SH, що схильний до мікроіскріння, корпус блока керування та робоча зона дозування просторово розділені. Для запобігання пожежонебезпечним ситуаціям внаслідок теплового перегріву силового транзистора MOSFET IRLZ44N, на його корпус встановлюється алюмінієвий радіатор пасивного охолодження, розрахований на максимальну потужність розсіювання при тривалій роботі пристрою в режимах ШІМ. Поверхні друкованої плати та контакти покриваються спеціальним вологозахисним лаком для запобігання утворенню струмопровідних містків під дією конденсату чи парів розчинників.

Для захисту обслуговуючого персоналу від інгаляційного впливу шкідливих хімічних речовин та летких парів рекуперованих рідин, робоче місце оператора обов'язково обладнується місцевою витяжною вентиляцією у вигляді бортового відсмоктувача безпосередньо над зоною фасування та вагового стола. Швидкість руху повітря у витяжному контурі розраховується таким чином, щоб забезпечити видалення газів до моменту їхнього розповсюдження в об'ємі дихальної зони, підтримуючи концентрацію шкідливих домішок нижче гранично допустимих норм. З метою технічного захисту елементів індикації та зниження зорового напруження оператора, рідкокристалічний дисплей LCD1602 розміщується на рівні очей під оптимальним кутом зору, а яскравість його підсвічування налаштовується відповідно до загального рівня освітленості приміщення цеху. Органи ручного керування, представлені кнопками пуску та тарування, мають чітке кольорове маркування та розташовуються в зоні комфортної досяжності моторного поля рук оператора. Раціональний режим праці та відпочинку передбачає введення регламентованих перерв протягом робочої зміни для

запобігання статичному перенапруженню опорно-рухового апарату та підтримки високої концентрації уваги персоналу [22].

4.3 Безпека в надзвичайних ситуаціях

Забезпечення надійного функціонування автоматизованого дозатора в умовах цеху рекуперації вимагає розробки чітких технічних рішень та організаційних протоколів на випадок виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Основними загрозами, які можуть призвести до аварійного стану виробничої ділянки, є виникнення пожежі, раптова розгерметизація гідравлічного контуру з розливом хімічно агресивних чи токсичних речовин, а також аварійне вимкнення електроенергії. Своєчасне реагування на зазначені чинники дозволяє мінімізувати матеріальні збитки, запобігти травмуванню обслуговуючого персоналу та унеможливити екологічне забруднення навколишнього середовища.

Пожежна безпека на ділянці автоматизованого фасування є пріоритетним напрямком через потенційну присутність у повітрі робочої зони цеху рекуперації летких парів легкозаймистих рідин. У разі виникнення загоряння, викликаного коротким замиканням в електричних колах понижуючого перетворювача або іскрінням щіткового вузла двигуна, першочерговою дією є повне знеструмлення всього технологічного комплексу за допомогою аварійної кнопки грибоподібної форми із фіксацією, що винесена на зовнішню панель шафи керування. Локалізація та гасіння первинних осередків пожежі в зоні розташування мікроконтролерного обладнання та силових MOSFET-ключів повинні здійснюватися виключно за допомогою вуглекислотних або порошкових вогнегасників, оскільки використання води чи хімічно-пінних засобів у контурі під напругою є

суворо забороненим через ризик ураження струмом та незворотного пошкодження прецизійної електроніки.

Надзвичайна ситуація, пов'язана з розривом силіконової трубки перистальтичного насоса або пошкодженням фасувальної тари, супроводжується інтенсивним розливом технологічної рідини, що створює хімічну небезпеку для персоналу та загрозу короткого замикання вагового модуля. При виявленні витoku оператор повинен негайно зупинити процес дозування натисканням кнопки стопового сигналу або повністю знеструмити щит автоматики. Для локалізації розлитої речовини вантажоприймальна платформа тензодатчика та зона подачі тари обов'язково встановлюються на спеціальному дренажному піддоні з хімічно стійкого матеріалу, об'єм якого перевищує максимальну ємність накопичувального резервуара. Збирання та нейтралізація розлитих рекуперованих розчинників чи кислот виконується із застосуванням засобів індивідуального захисту органів дихання та шкірних покривів, а самі відходи підлягають утилізації згідно з чинними екологічними стандартами підприємства.

Аварійне вимкнення повної напруги живлення промислової мережі не повинно викликати хаотичних чи неконтрольованих дій з боку виконавчих механізмів системи автоматизації. Апаратна архітектура блока керування розроблена за принципом гарантованої безпеки при відмові, де за відсутності керуючої напруги на затворі польового транзистора IRLZ44N силовий перехід миттєво закривається, примусово блокуючи подачу струму на обмотки двигуна RS-360SH. Програмна логіка мікроконтролера Arduino Uno побудована таким чином, що при раптовому відновленні електропостачання система автоматично переходить у початковий стан ініціалізації та очікування команди оператора, повністю виключаючи самовільний запуск перистальтичного насоса та запобігаючи неконтрольованому виліву рідини на робочу платформу [23].

4.4 Екологічна безпека та охорона навколишнього середовища

Оскільки розроблюваний автоматизований дозатор є безпосереднім елементом рекупераційної системи цеху, питання екологічної безпеки та охорони навколишнього середовища мають першочергове значення. Головне призначення систем рекуперації полягає в уловлюванні, очищенні та повторному впровадженні у виробничий цикл цінних промислових речовин, що одночасно запобігає їхньому викиду в біосферу. Проте сам процес фасування та дозування рекуперованих продуктів пов'язаний із потенційними екологічними ризиками, які вимагають розробки та дотримання жорстких інженерних заходів для недопущення забруднення атмосферного повітря, водних ресурсів та ґрунтів навколо промислового підприємства.

Основним чинником негативного впливу на атмосферу під час роботи дозуючого комплексу є емісія летких органічних сполук та газів, що утворюються при відкритому наливі рідин у тару. Впровадження автоматизованого дворівневого ШІМ-керування дозволяє значно знизити цей екологічний ризик. Завдяки прецизійному зниженню швидкості подачі речовини на етапі крапельного досипання, мінімізується турбулентність потоку рідини та унеможливорюється її інтенсивне випаровування й утворення аерозолів у зоні фасування. Уловлені місцевою витяжною вентиляцією пари не викидаються безпосередньо в атмосферу, а спрямовуються по герметичних повітроводах назад у головний абсорбційний або конденсаційний контур рекупераційної установки цеху, забезпечуючи замкненість технологічного циклу та виконання нормативних вимог щодо охорони атмосферного повітря.

Захист гідросфери та літосфери від хімічного забруднення реалізується через систему бар'єрів, які повністю виключають потрапляння промислових речовин у виробничу або зливову каналізацію. Основним технічним рішенням є використання перистальтичного типу насоса, конструкція якого

передбачає повну ізоляцію перекачуваного продукту всередині еластичної силіконової трубки, що виключає витіки через сальники чи ущільнення вала, характерні для інших типів насосних агрегатів. На випадок аварійного розриву магістралі або пошкодження фасувальної ємності, передбачений сталевий піддон виконує функцію уловлювача, затримуючи весь об'єм пролитої речовини. Хімічні продукти, зібрані з піддона, підлягають обов'язковому поверненню на первинну переробку в систему рекуперації, що повністю нівелює утворення рідких відходів на даній ділянці.

Окремим аспектом екологічного менеджменту є поводження з твердими відходами, які утворюються в процесі експлуатації та технічного обслуговування автоматизованого дозатора. До таких відходів належать відпрацьовані силіконові трубки насоса, що підлягають періодичній заміні через механічний знос, а також обтиральні матеріали, забруднені залишками хімічних речовин під час проведення налагоджувальних робіт. Зазначені матеріали згідно з екологічними стандартами класифікуються як небезпечні відходи і підлягають суворому обліку. Їх збирання здійснюється в спеціально марковані герметичні контейнери з хімічно стійких матеріалів, які тимчасово зберігаються в ізольованому приміщенні цеху і надалі передаються спеціалізованим підприємствам для безпечного високотемпературного знешкодження або утилізації, що гарантує екологічну чистоту всього життєвого циклу розробленої системи автоматизації [24].

4.5 Розрахунок штучного виробничого освітлення ділянки фасування

Рационально спроектоване виробниче освітлення на ділянці фасування цеху рекуперації є одним із найважливіших чинників забезпечення безпеки праці, підтримки високої працездатності оператора та зниження загальної

зорової втоми при тривалій роботі з рідкокристалічним індикатором системи керування. Оскільки технологічний процес дозування вимагає постійного візуального контролю за точністю наповнення тари, станом силіконових магістралей та показаннями приладів, природного освітлення в умовах промислового цеху часто недостатньо. Побудова математичної моделі для розрахунку параметрів штучного освітлення робочої зони дозволяє визначити оптимальну кількість та потужність світлових джерел, що гарантує відповідність умов праці чинним державним будівельним нормам України.

Інженерний розрахунок системи загального рівномірного штучного освітлення ділянки базується на методі коефіцієнта використання світлового потоку, який враховує не лише пряме світло від ламп, але й віддзеркалення випромінювання від поверхонь стін, стелі та підлоги приміщення. Основним завданням розрахунку є визначення необхідного світлового потоку однієї лампи для створення заданої нормованої освітленості. Математичне рівняння для обчислення шуканого світлового потоку має такий вигляд:

$$F = \frac{E \cdot S \cdot k \cdot z}{N \cdot \eta}$$

у якому змінна E відображає нормовану мінімальну освітленість для виконання робіт високої точності (розряд зорової роботи IIIв), що для умов експлуатації електронних ваговимірювальних комплексів становить триста люкс;

змінна S позначає геометричну площу виробничої ділянки фасування, кв. м;

коефіцієнт k є безрозмірним інженерним фактором запасу, який враховує поступове зниження світлової віддачі джерел внаслідок їхнього старіння та забруднення скляних колб пилом або парами рекуперованих речовин, і для люмінесцентних або світлодіодних світильників у промислових приміщеннях приймається рівним одиниці цілій п'яти десятим;

параметр z характеризує коефіцієнт нерівномірності освітлення, який є функцією відношення максимальної освітленості до середньої і для більшості типів світильників загального призначення становить одну цілу одну десяту.

Знаменник наведеної математичної залежності містить змінну N , яка визначає загальну кількість запланованих до встановлення світильників на ділянці, та коефіцієнт η , що відображає безпосередню ефективність використання світлового потоку. Коефіцієнт використання визначається на основі довідкових таблиць за заздалегідь обчисленим індексом приміщення, який пов'язує лінійні розміри ділянки (довжину та ширину) з висотою підвісу світильників над робочою поверхнею вагового стола, а також залежить від відбивних властивостей матеріалів оздоблення цеху. За результатом підстановки реальних геометричних параметрів ділянки та нормативних констант обчислюється сумарний світловий потік, на основі якого за каталогами обираються сучасні енергоефективні світлодіодні світильники промислового виконання із ступенем захисту корпусу не нижче ніж IP54. Таке розрахункове обґрунтування дозволяє повністю виключити утворення глибоких тіней та бліків у зоні моніторингу дозатора, забезпечуючи стабільний психофізіологічний стан обслуговуючого персоналу протягом усієї робочої зміни [25].

Висновки за розділом

У четвертому розділі кваліфікаційної роботи проведено комплексний науково-технічний аналіз умов праці та розроблено систему заходів щодо забезпечення безпеки життєдіяльності, охорони праці й екологічної безпеки при експлуатації автоматизованого дозатора в умовах цеху рекуперації. Детальний аналіз виробничого середовища дозволив виявити та класифікувати основні потенційно небезпечні та шкідливі чинники, серед яких особливу загрозу становлять електричний струм, механічні рухомі частини привода насоса, хімічна агресивність летких парів рекуперованих речовин, а також специфічна пожежна небезпека, зумовлена щітково-колекторним вузлом електродвигуна постійного струму та тепловим виділенням силових напівпровідникових компонентів блока керування.

З метою повної нейтралізації виявлених ризиків та створення оптимального мікроклімату для обслуговуючого персоналу було запропоновано та обґрунтовано низку інженерно-технічних рішень. Електробезпека комплексу забезпечується застосуванням захисного корпусу шафи автоматики з рівнем захисту IP54, обов'язковим заземленням усіх металевих конструктивних елементів та інтеграцією в коло живлення пристрою захисного вимкнення із прецизійним порогом спрацювання. Механічний захист реалізовано шляхом проектування прозорого полікарбонатного кожуха над обертовим ротором перистальтичного насоса, що виключає ризик защемлення. Хімічна безпека та підтримання гранично допустимих концентрацій шкідливих парів у дихальній зоні оператора досягається впровадженням місцевої витяжної вентиляції у формі бортового відсмоктувача безпосередньо над зоною вагового фасування. Завдяки проведеному математичному розрахунку штучного освітлення за методом коефіцієнта використання світлового потоку, визначено оптимальні параметри світлодіодних джерел, що повністю ліквідує проблему зорового напруження оператора при роботі з рідкокристалічним дисплеєм.

Окрему увагу в розділі приділено питанням екологічної безпеки та алгоритмам дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Доведено, що використання перистальтичного насоса та інтеграція спеціального дренажного піддону повністю унеможливають потрапляння шкідливих хімічних речовин у гідросферу чи літосферу цеху. Впровадження дворівневого ШІМ-керування дозволило мінімізувати турбулентність наливу і знизити випаровування продукту в атмосферу. Розроблено чіткий протокол локалізації первинних вогневих осередків за допомогою вуглекислотних або порошкових засобів пожежогасіння з обов'язковим попереднім знеструмленням системи аварійною кнопкою стопу. Доведено, що схемотехнічна архітектура силової частини на базі транзистора MOSFET IRLZ44N забезпечує гарантовану безпеку при відмові, миттєво блокуючи роботу двигуна RS-360SH при зникненні керуючого сигналу, а програмна логіка мікроконтролера Arduino Uno повністю виключає ризик неконтрольованого самовільного запуску насоса при раптовому відновленні електропостачання в промисловій мережі . Впровадження розробленого комплексу організаційних та технічних заходів дозволяє забезпечити повну відповідність умов праці чинним законодавчим нормам і стандартам безпеки.

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі успішно вирішено актуальну науково-технічну задачу розробки, апаратного обґрунтування та програмної реалізації локальної автоматизованої системи керування ваговим дозатором малого об'єму для умов цеху рекуперації. На основі проведеного аналізу сучасного стану розвитку технічних засобів автоматизації та класифікації дозувальних пристроїв обґрунтовано вибір вагового (гравіметричного) методу контролю кількості речовини. На відміну від об'ємних систем, ваговий метод дозволяє повністю нівелювати вплив коливань густини, в'язкості та температури робочого середовища на точність фасування. Визначено, що найбільш раціональним підходом для проєктування локальних систем автоматизації в умовах гнучкого виробництва є використання відкритих мікроконтролерних платформ, що поєднує низьку собівартість із високою обчислювальною потужністю для реалізації складних законів регулювання.

В результаті проєктування сформовано та технічно обґрунтовано функціонально-структурну апаратну архітектуру пристрою. В якості центрального обчислювального ядра обрано мікроконтролер Arduino Uno на базі чіпа ATmega328P, периферійні ресурси якого оптимально розподілено між інформаційними та виконавчими каналами. Для безпосереднього переміщення рідини обрано перистальтичний насос із колекторним двигуном постійного струму моделі RS-360SH, який забезпечує повну ізоляцію перекачуваного продукту всередині еластичної силіконової трубки, що є критично важливим для збереження хімічної чистоти речовини та спрощення обслуговування. Вимірювальний тракт зворотного зв'язку побудовано на базі консольного тензометричного датчика сили та прецизійного 24-бітного аналого-цифрового перетворювача HX711, а комутація силового навантаження реалізована через швидкісний MOSFET-транзистор IRLZ44N із забезпеченням надійної гальванічної розв'язки логічних і силових кіл.

Програмне забезпечення системи, створене в середовищі Arduino IDE мовою C++, побудовано за модульним принципом із використанням концепції кінцевого автомата. Для підвищення метрологічної надійності в умовах інтенсивних вібраційних завад від працюючого електропривода розроблено підпрограму цифрової обробки сигналів на основі методу ковзного середнього з вікном у десять елементів, що дозволило отримати стабільні дані без внесення критичного фазового запізнення в контур регулювання. З метою мінімізації динамічної похибки, викликані інерційністю стовпа рідини, реалізовано алгоритм дворівневого широтно-імпульсного керування. Експериментальні дослідження динамічних характеристик перехідних процесів довели, що автоматичне зниження шпаруватості ШІМ-сигналу до двадцяти п'яти відсотків при наближенні до цільової лінії (на порозі 90% від уставки) забезпечує безінерційне відсікання потоку. Статистичний аналіз результатів серії наливів порцій масою п'ятсот грамів показав, що результуюча відносна похибка стабільно утримується в межах від нуля цілих двох десятих до нуля цілих п'яти десятих відсотка, підтверджуючи прецизійну точність створеного комплексу.

У розрізі охорони праці та екологічного менеджменту обґрунтовано комплексний інженерний захист дільниці фасування в цеху рекуперації. Електро- та пожежобезпеку комплексу забезпечено впровадженням корпусу IP54, захисного заземлення, ПЗВ та радіатора пасивного охолодження силового ключа. Механічний та хімічний захист оператора досягнуто проектуванням полікарбонатного кожуха насоса й бортового відсмоктувача місцевої вентиляції. На основі методу коефіцієнта використання світлового потоку оптимізовано штучне світлодіодне освітлення для усунення зорового напруження персоналу. Інтеграція замкненого вентиляційного контуру та хімічно стійкого дренажного піддону повністю запобігає емісії парів розчинників в атмосферу й проливам агресивних речовин у гідросферу, що гарантує відповідність об'єкта автоматизації промисловим стандартам безпеки.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. OIML R 61-1:2017. Automatic gravimetric filling instruments. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests. International Organization of Legal Metrology, 2017. URL: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r061-1-e17.pdf
2. OIML R 76-1:2006. Non-automatic weighing instruments. Part 1: Metrological and technical requirements — Tests. International Organization of Legal Metrology, 2006. URL: https://www.oiml.org/en/files/pdf_r/r076-1-e06.pdf
3. ISO 10790:2015. Measurement of fluid flow in closed conduits — Guidance to the selection, installation and use of Coriolis flowmeters. International Organization for Standardization, 2015. URL: <https://www.iso.org/standard/57407.html>
4. ISO 5725-1:2023. Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results — Part 1: General principles and definitions. International Organization for Standardization, 2023. URL: <https://www.iso.org/standard/69418.html>
5. Arduino. Arduino UNO R3 Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
6. Arduino. Arduino Documentation. Programming. URL: <https://docs.arduino.cc/programming/>
7. SparkFun Electronics. Parallel Beam Load Cell TAL220. Datasheet. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/TAL220M4M5Update.pdf>
8. Avia Semiconductor. HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Datasheet. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
9. ElecFreaks. Ultrasonic Ranging Module HC-SR04. Datasheet. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Proximity/HCSR04.pdf>

10. Adafruit. YF-S201 Hall Effect Water Flow Meter / Sensor. Datasheet. URL: <https://cdn-shop.adafruit.com/product-files/828/C898%2Bdatasheet.pdf>
11. Arduino. Arduino UNO R3 Documentation. URL: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3>
12. Microchip Technology Inc. ATmega328P: 8-bit AVR Microcontroller with 32K Bytes In-System Programmable Flash. Datasheet. URL: https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-7810-Automotive-Microcontrollers-ATmega328P_Datasheet.pdf
13. Mabuchi Motor. RS-360SH Carbon-brush Motors. Datasheet. URL: <https://www.pollin.de/productdownloads/D310480D.PDF>
14. Infineon Technologies. IRLZ44N HEXFET Power MOSFET. Datasheet. URL: https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-IRLZ44N-DataSheet-v01_01-EN.pdf?fileId=5546d462533600a40153567217c32725
15. Avia Semiconductor. HX711: 24-Bit Analog-to-Digital Converter (ADC) for Weigh Scales. Datasheet. URL: https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/hx711_english.pdf
16. SparkFun Electronics. Parallel Beam Load Cell TAL220. Datasheet. URL: <https://cdn.sparkfun.com/datasheets/Sensors/ForceFlex/TAL220M4M5Update.pdf>
17. Texas Instruments. LM2596 SIMPLE SWITCHER Power Converter 150-kHz 3-A Step-Down Voltage Regulator. Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
18. Hitachi Semiconductor. HD44780U: Dot Matrix Liquid Crystal Display Controller/Driver. Datasheet. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/9/5/f/7/b/HD44780.pdf>
19. Texas Instruments. PCF8574 Remote 8-Bit I/O Expander for I2C Bus. Datasheet. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pcf8574.pdf>
20. Handson Technology. Rotary Encoder for Arduino/Raspberry. KY-040 Data Specs. URL: <https://www.handsontec.com/dataspecs/module/Rotary%20Encoder.pdf>

21. Про затвердження Державних санітарних норм та правил «Гігієнічна класифікація праці за показниками шкідливості та небезпечності факторів виробничого середовища, важкості та напруженості трудового процесу»: Наказ Міністерства охорони здоров'я України від 08.04.2014 № 248. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/z0472-14>

22. ДСТУ EN 60204-1:2019. Безпечність машин. Електрообладнання машин. Частина 1. Загальні вимоги. URL: https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=91653

23. Кодекс цивільного захисту України: Кодекс України від 02.10.2012 № 5403-VI. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/5403-17>

24. Про охорону навколишнього природного середовища: Закон України від 25.06.1991 № 1264-XII. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/go/1264-12>

25. ДБН В.2.5-28:2018. Природне і штучне освітлення. Київ: Мінрегіон України, 2018. URL: https://e-construction.gov.ua/laws_detail/3074958732556240833?doc_type=2

Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Кваліфікаційна робота бакалавра на тему:
**АВТОМАТИЗАЦІЯ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ НА БАЗІ
ARDUINO**

Виконав: студент групи 4317зстЗ

Руденко В.В.

Керівник: к.т.н., асистент кафедри

Іванов А. В.

Миколаїв – 2026

1

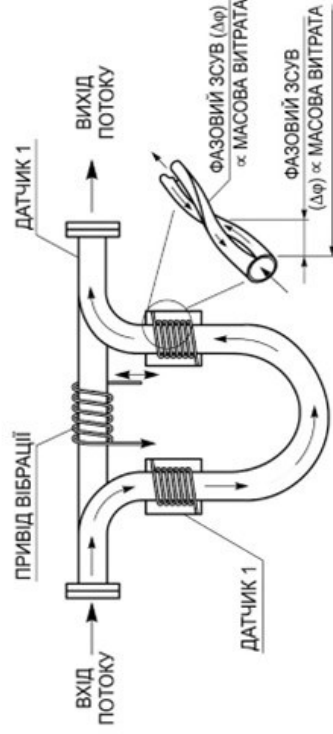
ДОДАТОК А

МУЛЬТИМЕДІЙНА ПРЕЗЕНТАЦІЯ

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МЕТОДІВ ДОЗУВАННЯ



Об'ємний метод — залежить від густини та температури речовини

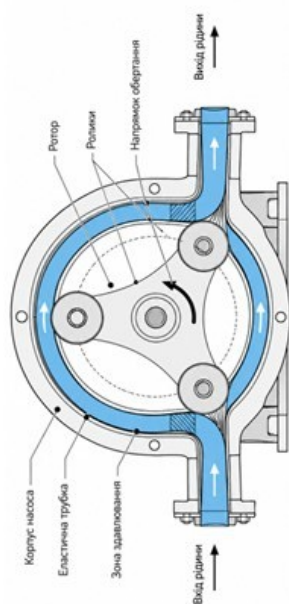


Масовий метод (Коріоліса) — висока точність, але висока вартість

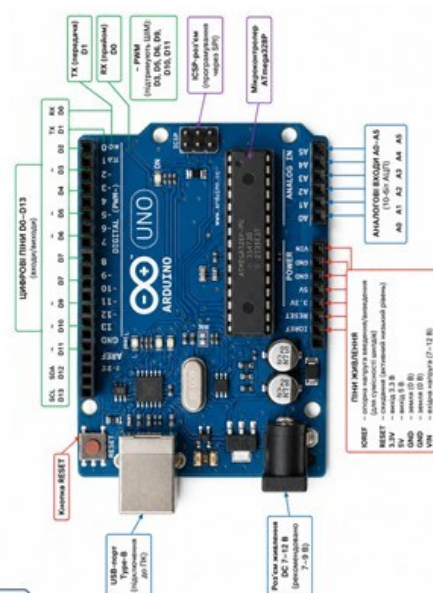
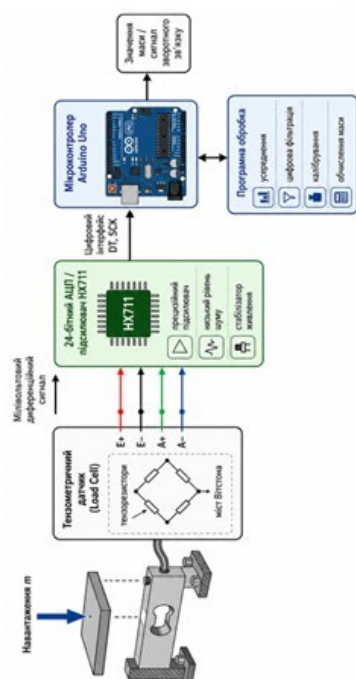


Ваговий метод — безпосереднє вимірювання маси, мінімальна похибка

АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ СИСТЕМИ



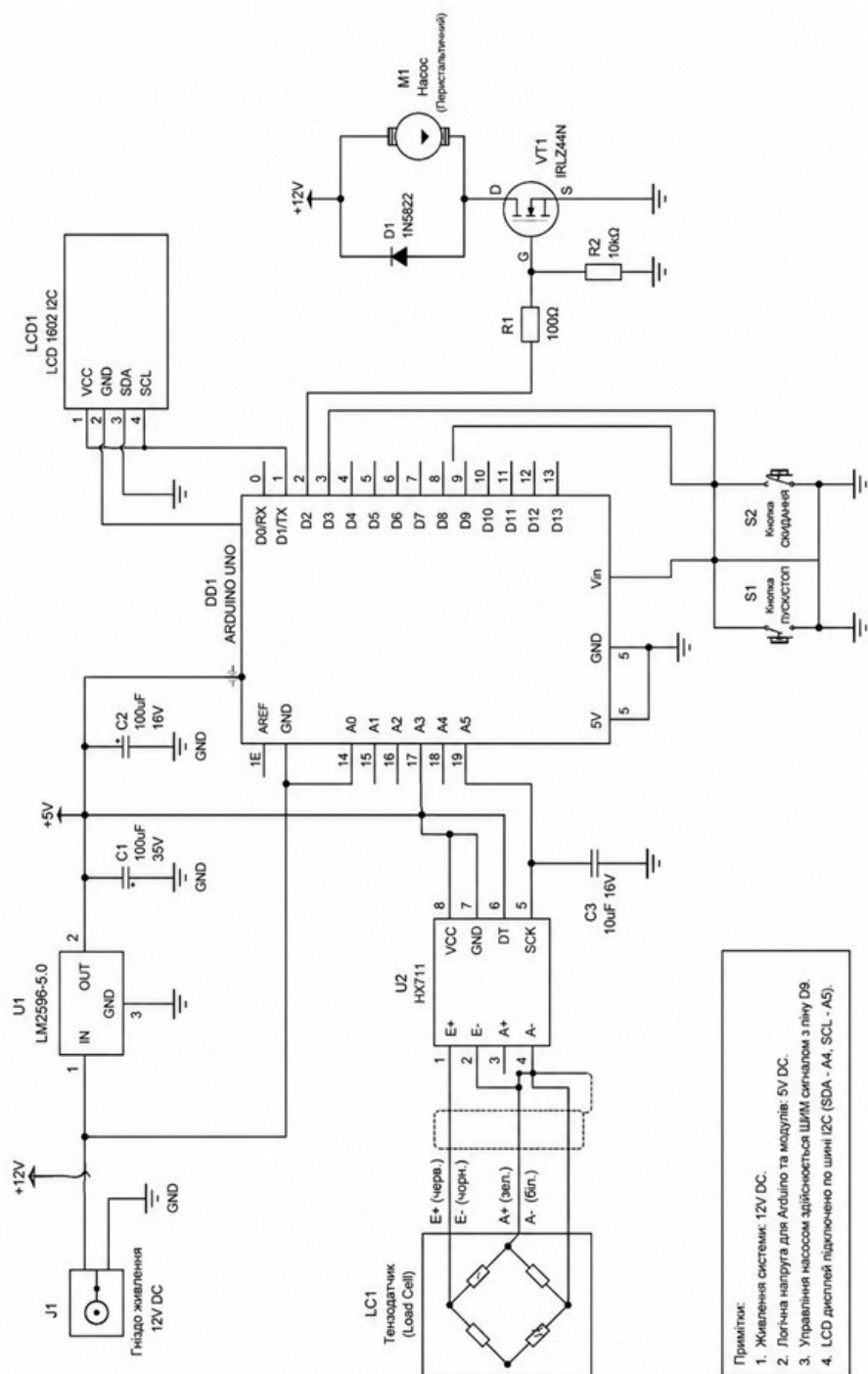
Виконавчий пристрій:
перистальтичний насос з
двигуном RS-360SH



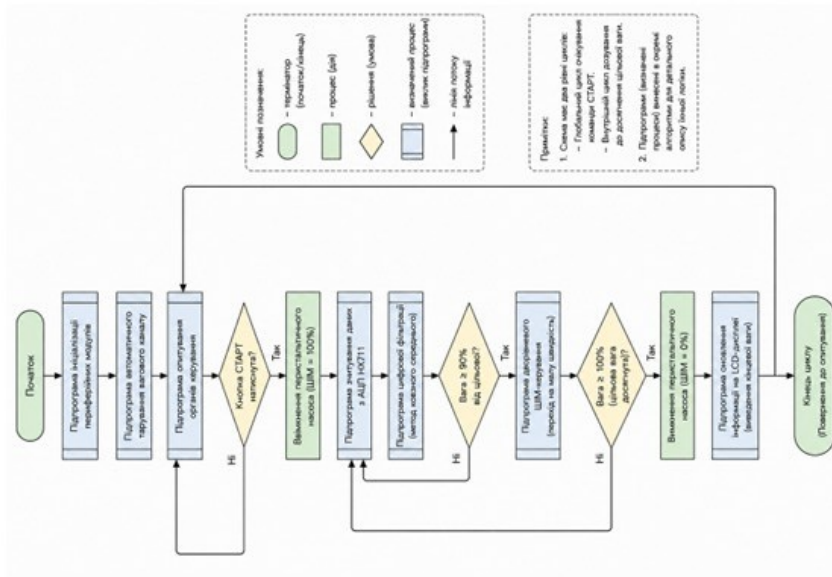
Вимірювальний канал:
тензодатчик + 24-бітний АЦП
HX711

Arduino Uno (ATmega328P) — 14 цифрових портів,
6 аналогових, 16 МГц

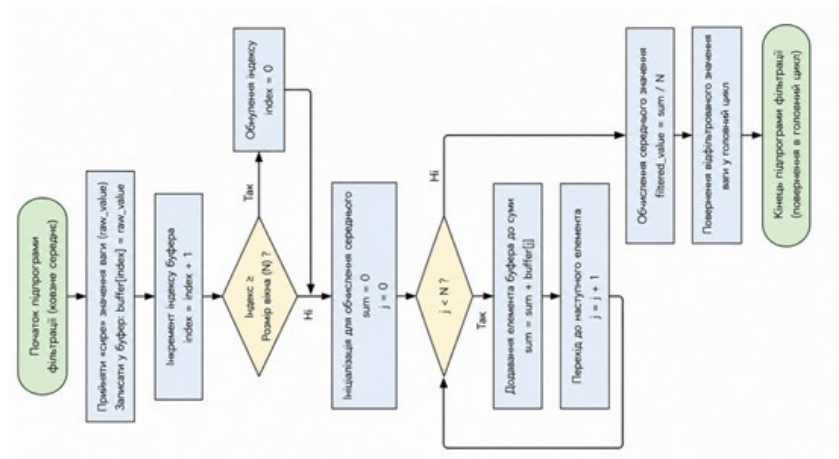
ПРИНЦИПОВА ЕЛЕКТРИЧНА СХЕМА СИСТЕМИ



АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ДОЗАТОРОМ



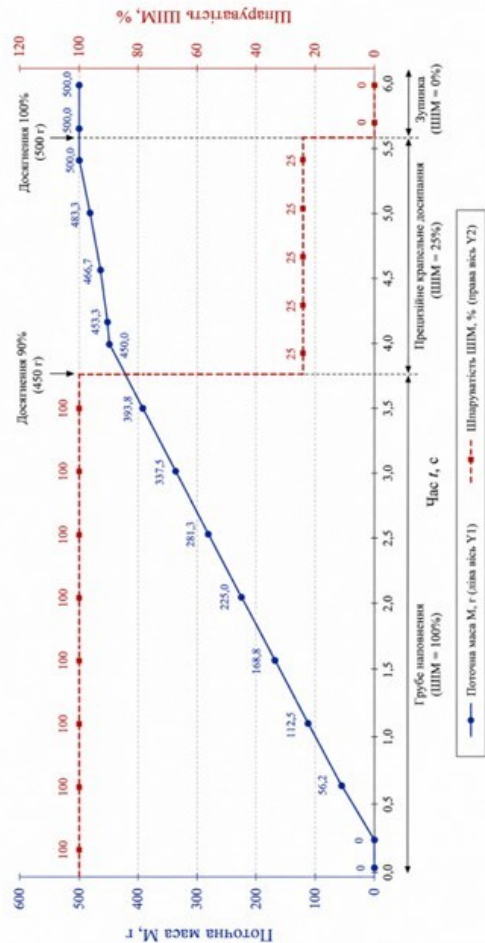
Блок-схема основного алгоритму програми керування дозатором



Блок-схема підпрограми цифрової фільтрації сигналів за методом ковзного середнього

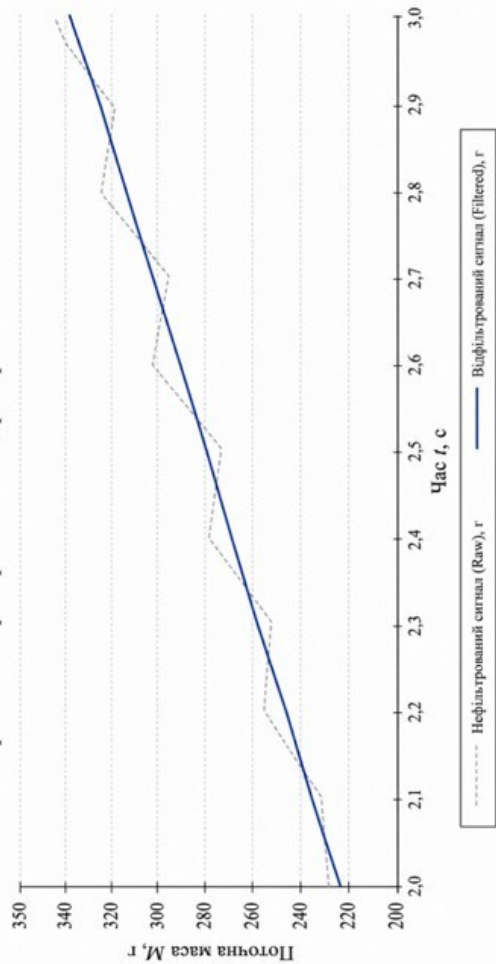
ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

Динаміка процесу дозування та керування приводом



Динамічні характеристики процесу дозування: крива накопичення маси та профіль ШІМ-сигналу

Порівняння нефільтрованого та відфільтрованого сигналів маси



Результат роботи вимірювального каналу: порівняння нефільтрованого та згладженого сигналів ваги