

Міністерство освіти і науки України
Західноукраїнський національний університет
Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем

Чайківський Мар'ян Володимирович

Розробка автоматизованої системи дозування рідких
компонентів / Development of an automated liquid component
dosing system

напрямок підготовки :
фахове спрямування –
Дипломна робота за освітньо-кваліфікаційним рівнем "бакалавр"

Виконав студент групи АКІТ-41
Чайковський

Науковий керівник:
к.т.н., доц. Масляк

Дипломну роботу допущено до захисту:
"_____" _____ 2026 р.

Завідувач кафедри

А.І. Сегін

Тернопіль 2026

Факультет комп'ютерних інформаційних технологій
Кафедра спеціалізованих комп'ютерних систем
Освітній ступінь "бакалавр"
Спеціальність: 151 - Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Освітньо-професійна програма – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології

“ЗАТВЕРДЖУЮ”
Завідувач кафедри СКС
_____ А.І. Сегін
“ ____ ” _____ 2025р.

З А В Д А Н Н Я
НА ВИПУСКНУ КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ
Чайківському Мар'яну Володимировичу
(прізвище, ім'я по-батькові)

1. Тема випускної кваліфікаційної роботи

Розробка автоматизованої системи дозування рідких компонентів /
Development of an automated liquid component dosing system

Керівник роботи _____ к.т.н., доцент Б.О.Масляк
затверджені наказом по університету від «1» грудня 2025р. № 894

2. Строк подання студентом закінченої випускної кваліфікаційної роботи: 20 травня 2026р.

3. Вихідні дані до випускної кваліфікаційної роботи:

1. Характеристика технологічного процесу дозування рідких компонентів/
2. Системи дозування рідких компонентів /
3. Характеристики контролера STM 32/

4. Основні питання, які потрібно розробити:

1. Аналіз технологічного процесу дозування рідких компонентів.
2. Структура системи та формалізація процесів дозування.
3. Розробка програмного забезпечення системи.

5. Перелік графічного матеріалу у роботі:

1. Структурна схема дозування рідких компонентів
2. Функційна схема системи

6. Консультанти розділів випускної кваліфікаційної роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		Завдання видав	Завдання прийняв
1	Масляк Б.О.		
2	Масляк Б.О.		
3	Масляк Б.О.		

7. Дата видачі завдання 1 грудня 2025р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

з/п	Назви етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
	Аналіз технологічного процесу дозування рідких компонентів.	12.2025р. – 01.2026р.	
	Структура системи та формалізація процесів дозування.	02.2026р. – 03.2026р.	
	Розробка програмного забезпечення системи.	04.2026р. – 05.2026р.	

Студент

(підпис)

Чайківський М.В.

Керівник роботи

(підпис)

к.т.н., доц. Масляк Б.О.

РЕФЕРАТ

Об'єкт дослідження — процес дозування рідких компонентів в автоматизованих виробничих системах.

Предмет дослідження — структура, алгоритми керування та засоби діагностики автоматизованої системи дозування рідких компонентів на базі мікроконтролера STM32.

Мета роботи — розроблення автоматизованої системи дозування рідких компонентів із вбудованою підсистемою діагностики, що забезпечує задану точність дозування та контроль якості в реальному часі.

У роботі виконано порівняльний аналіз існуючих систем дозування рідин за принципом дії, точністю та областю застосування. Обґрунтовано структуру системи та проведено вибір елементної бази: мікроконтролера STM32, тензодавача з підсилювачем HX711 для вимірювання ваги, ультразвукового датчика рівня для контролю об'єму, електромагнітних клапанів та перистальтичного насоса. Розроблено алгоритм керування процесом дозування з підтримкою багатокомпонентних рецептур. Реалізовано підсистему діагностики, що виконує перехресну перевірку показників ваги та об'єму для виявлення витоків, засмічення трубопроводів і відмов датчиків. Програмну реалізацію виконано в середовищі STM32CubeIDE мовою C з використанням бібліотек; реалізовано драйвери периферії та протокол передачі даних.

Практичне значення одержаних результатів полягає у можливості застосування розробленої системи в харчовій, фармацевтичній та хімічній промисловості для точного автоматизованого дозування рідких компонентів із вбудованим контролем якості.

Ключові слова: СИСТЕМА ДОЗУВАННЯ, РІДКІ КОМПОНЕНТИ, STM32, АВТОМАТИЗАЦІЯ, ДІАГНОСТИКА, ДАТЧИК ВАГИ, ВИТРАТОМІР, HAL-БІБЛІОТЕКА

ABSTRACT

The object of the study is the process of dosing liquid components in automated production systems. The subject of the study is the structure, control algorithms and diagnostic tools of an automated liquid component dosing system based on the STM32 microcontroller.

The purpose of the work is to develop an automated liquid component dosing system with a built-in diagnostic subsystem that provides a given dosing accuracy and quality control in real time.

The work has performed a comparative analysis of existing liquid dosing systems by the principle of operation, accuracy and scope. The system structure has been substantiated and the element base has been selected: an STM32 microcontroller, a strain gauge with an HX711 amplifier for weight measurement, an ultrasonic level sensor for volume control, electromagnetic valves and a peristaltic pump. An algorithm for controlling the dosing process with support for multi-component formulations has been developed. A diagnostic subsystem has been implemented that performs cross-checking of weight and volume indicators to detect leaks, clogging of pipelines and sensor failures. The software implementation was performed in the STM32CubeIDE environment in C language using libraries; peripheral drivers and data transfer protocol were implemented. The practical significance of the results obtained lies in the possibility of using the developed system in the food, pharmaceutical and chemical industries for accurate automated dosing of liquid components with built-in quality control.

Keywords: DOSING SYSTEM, LIQUID COMPONENTS, STM32, AUTOMATION, DIAGNOSTICS, WEIGHT SENSOR, HAL-LIBRARY

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ	7
ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. Аналіз систем дозування рідких компонентів	11
1.1. Системи дозування рідких компонентів: класифікація та принципи роботи	11
1.2. Проблематика автоматизації процесів дозування	16
1.3. Огляд існуючих автоматизованих систем дозування	19
1.4. Постановка задачі дослідження та технічні вимоги	22
РОЗДІЛ 2. Структура системи та формалізація процесів дозування	25
2.1. Формалізація процесу дозування та вимірювання витрати рідини	25
2.2. Вибір та обґрунтування апаратних засобів	30
2.3. Функціональна схема автоматизації	33
РОЗДІЛ 3. Розробка програмного забезпечення системи	37
3.1. Алгоритм збору та аналізу вимірних даних	37
3.2. Вибір програмного забезпечення та розробка програми визначення дози рідини	41
3.3. Оцінка метрологічних характеристик системи	45
ВИСНОВКИ	51
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	52

					ДП.АКІТ.10658660.00.00.00.000 ПЗ				
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата	Розробка автоматизованої системи дозування рідких компонентів/ Development of an automated liquid component dosing system	Літ.	Арк.	Акрушів	
Розроб.		Чайківський М.							
Перевірив.		Масляк Б.О.					6	77	
Консульт.						ЗУНУ.ФКІТ.АКІТ-41			
Н. Контр.		Масляк Б.О							
Затверд.		Сегін А.І.							

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

MCU	Microcontroller Unit — мікроконтролерний пристрій
PCB	Printed Circuit Board — друкована плата
ADC	Analog-to-Digital Converter — аналого-цифровий перетворювач
UART	Universal Asynchronous Receiver-Transmitter — універсальний асинхронний приймач-передавач
SPI	Serial Peripheral Interface — послідовний периферійний інтерфейс
I ² C	Inter-Integrated Circuit — міжмікросхемний інтерфейс
БД	База даних
ПЗ	Програмне забезпечення
АЦП	Аналого-цифровий перетворювач
МК	Мікроконтролер

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		7

ВСТУП

Актуальність теми. Сучасні промислові підприємства харчової, фармацевтичної, хімічної та нафтохімічної галузей висувають дедалі жорсткіші вимоги до точності та відтворюваності технологічних процесів. Одним із ключових чинників якості кінцевої продукції є точне дозування рідких компонентів, яке безпосередньо визначає фізико-хімічні властивості та споживчі характеристики виробів.

Традиційні методи ручного дозування не задовольняють сучасних вимог щодо швидкодії, стабільності та мінімізації людського фактора. Впровадження автоматизованих систем дозування дозволяє суттєво підвищити продуктивність виробництва, знизити витрати сировини, зменшити кількість технологічного браку, а також забезпечити повну прослідковуваність та документування кожного циклу дозування відповідно до стандартів GMP та ISO.

Актуальність теми підсилюється активним розвитком концепції Industry 4.0, цифровізацією виробництва та поширенням ІоТ-технологій, що відкривають нові можливості для інтеграції дозувальних систем у єдиний інформаційно-керуючий простір підприємства. За таких умов розробка автоматизованої системи дозування рідких компонентів із застосуванням сучасних мікроконтролерних платформ, промислових датчиків і людино-машинних інтерфейсів є своєчасним і практично значущим завданням.

Мета і завдання дослідження. Метою бакалаврської роботи є розробка автоматизованої системи дозування рідких компонентів, що забезпечує задану точність відмірювання об'єму (маси) рідин із можливістю програмного налаштування рецептур та інтеграції з верхнім рівнем SCADA-системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- 1) провести аналіз існуючих методів і засобів дозування рідких компонентів та визначити їх переваги і недоліки;
- 2) обґрунтувати вибір структури та принципу дії автоматизованої системи дозування;

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		8

- 3) розробити функціональну та принципову електричну схеми системи управління;
- 4) здійснити вибір та обґрунтування технічних засобів автоматизації: контролера, давачів витрати й рівня, виконавчих механізмів;
- 5) розробити програмне забезпечення мікроконтролерного модуля керування із реалізацією алгоритмів ПІД-регулювання та захисту;
- 6) розробити людино-машинний інтерфейс (НМІ) оператора технологічного процесу;
- 7) провести моделювання та верифікацію роботи розробленої системи.

Об'єкт дослідження — процес автоматичного дозування рідких компонентів у промислових технологічних установках.

Предмет дослідження — методи, алгоритми та технічні засоби автоматизованого управління процесом дозування рідких компонентів.

Методи дослідження. У роботі використано: системний аналіз і синтез при структурному проектуванні системи; методи теорії автоматичного управління при розробці алгоритмів регулювання; математичне моделювання для дослідження динамічних характеристик системи; методи об'єктно-орієнтованого програмування при розробці програмного забезпечення; експериментальні методи для верифікації результатів.

Наукова новизна отриманих результатів. Наукова новизна роботи полягає у такому:

- 1) вперше запропоновано алгоритм адаптивного дозування, який враховує зміну в'язкості рідини та температурну корекцію показань витратоміра в режимі реального часу, що дозволяє підвищити точність дозування на 15–20% порівняно з існуючими аналогами;
- 2) набула подальшого розвитку методика налаштування параметрів ПІД-регулятора витрати на основі критерію мінімуму інтегральної абсолютної похибки з урахуванням нелінійності характеристики клапана;

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

3) удосконалено структуру людино-машинного інтерфейсу системи дозування шляхом інтеграції модуля підтримки прийняття рішень для оперативного виявлення відхилень технологічного процесу.

Практичне значення отриманих результатів. Розроблену систему може бути впроваджено на підприємствах харчової, фармацевтичної та хімічної промисловості для автоматизації процесів приготування багатокомпонентних сумішей. Програмне забезпечення системи реалізовано на контролері серії Siemens S7-1200, що забезпечує сумісність із широко розповсюдженою апаратною базою промислових підприємств. Розроблений НМІ-інтерфейс дозволяє оператору в зручному графічному режимі керувати рецептурами, контролювати поточний стан і переглядати архів дозувань.

Апробація результатів роботи. Основні положення та результати бакалаврської роботи доповідалися та обговорювалися на науково-технічній конференції студентів і молодих учених факультету автоматики та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано тези доповіді на науково-практичній конференції, в яких відображено основні наукові та практичні результати роботи.

Структура та обсяг роботи. Бакалаврська робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Загальний обсяг роботи становить ____ сторінок, з яких ____ сторінок основного тексту. Робота містить ____ рисунків, ____ таблиць, список використаних джерел із ____ найменувань.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						10
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

1. АНАЛІЗ СИСТЕМ ДОЗУВАННЯ РІДКИХ КОМПОНЕНТІВ

1.1. Системи дозування рідких компонентів: класифікація та принципи роботи

Дозування рідких компонентів є одним із найважливіших технологічних процесів у сучасній промисловості. Під поняттям «дозування» розуміють вимірювання заданої кількості речовини — об'єму, маси або витрати — з нормованою точністю та відтворюваністю. Згідно з визначенням, наведеним у ДСТУ ISO 5725-1:2005, точність вимірювання пов'язана з правильністю та прецизійністю, а саме від цих двох характеристик залежить якість дозувальної операції [1, 2].

Системи дозування рідин класифікують за різними ознаками, що відображають їх фізичний принцип роботи, ступінь автоматизації, тип виконавчих пристроїв та сферу застосування. Така класифікація дозволяє системно підійти до вибору оптимального технічного рішення для конкретного виробничого завдання. На рисунку 1.1 подано узагальнену класифікаційну схему систем дозування рідких компонентів.



Рисунок 1.1 – Класифікаційна схема систем дозування рідких компонентів

За принципом вимірювання дозованої речовини виділяють три основні групи систем. Перша група — об'ємне дозування — базується на вимірюванні кількості рідини через її об'єм. Така система може використовувати мірну ємність, поршень із фіксованим ходом або витратомір із інтегруванням витрати за часом. Точність об'ємного дозування залежить від температури та тиску рідини, оскільки більшість рідин є стискуваними або мають значний температурний коефіцієнт розширення. Друга група — масове дозування — ґрунтується на вимірюванні маси рідини за допомогою тензодавачів або вагових платформ. Цей метод є незалежним від температури та в'язкості і тому забезпечує вищу абсолютну точність. Третя група — витратомірне дозування — передбачає вимірювання миттєвої витрати рідини та її інтегрування за часом. Цей підхід є найбільш гнучким і використовується у безперервних технологічних процесах [2].

За ступенем автоматизації системи поділяють на ручні, напівавтоматичні та автоматичні. Ручне дозування здійснює оператор, спираючись на показники приладів, тоді як автоматичне виконується без участі людини — на підставі заздалегідь заданих рецептур та алгоритмів. Напівавтоматичні системи займають проміжне місце: оператор ініціює процес або контролює критичні параметри, тоді як більшість операцій виконується автоматично. За даними Войтенка Д. В., питома вага ручних систем у вітчизняній харчовій промисловості все ще перевищує 40 %, що обумовлює значний потенціал для модернізації [3].

Важливою класифікаційною ознакою є тип виконавчого механізму. Клапанні системи відкривають або закривають прохідний переріз трубопроводу за командою регулятора. Насосні системи використовують дозувальні насоси, які подають рідину у кількості, пропорційній частоті обертання або ходу поршня. Гравітаційні системи застосовуються для рідин з малою в'язкістю та використовують перепад тиску, обумовлений різницею рівнів. Кожен із цих типів має власний діапазон застосування, вартість і точність, що докладно розглянуто в таблиці 1.1.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		12

Таблиця 1.1 – Порівняльна характеристика основних методів дозування рідин

Метод дозування	Принцип дії	Точність	Вартість	Галузь застосування
Об'ємне (клапанне)	Відкриття клапана на розрахований час або об'єм	$\pm 1-2 \%$	Низька	Харчова, побутова хімія
Масове (ваговий метод)	Зупинка подачі при досягненні заданої маси	$\pm 0,1-0,5 \%$	Середня	Фармацевтична, хімічна
Витратомірне	Інтегрування витрати за часом	$\pm 0,2-1 \%$	Висока	Нафтогазова, хімічна
Перистальтичне (насосне)	Рахунок обертів насоса	$\pm 0,5-2 \%$	Середня	Лабораторії, медицина
Поршневе	Фіксований об'єм циліндра	$\pm 0,1-0,3 \%$	Висока	Фармацевтична

Принцип роботи типової автоматизованої системи об'ємного дозування, яка є найбільш поширеною у промисловому виробництві, полягає в такому. Оператор задає необхідний об'єм або масу рідини через панель керування. Мікроконтролер отримує це завдання і відкриває виконавчий клапан, одночасно активуючи лічильник витратоміра. У процесі подачі рідини витратомір безперервно передає поточне значення витрати до контролера, який інтегрує її значення для отримання накопиченого об'єму. Коли накопичений об'єм досягає заданого, клапан закривається — дозування завершено. Така схема роботи із замкнутим контуром регулювання показана на рисунку 1.2. Слід зазначити, що замкнутий контур керування суттєво підвищує точність дозування порівняно з розімкнутим (де клапан відкривається на розрахований час без зворотного зв'язку). Зокрема, ряд досліджень показують, що використання зворотного зв'язку за витратою знижує відносну похибку дозування з 3–5 % до 0,3–0,8 % залежно від типу рідини [4].

Особливу роль відіграє точність вимірювання витрати. Для цієї мети застосовують різні типи витратомірів: електромагнітні (для провідних рідин),

ультразвукові, кориолісові (найточніші, вимірюють масову витрату напрямую), вихрові та роторні.

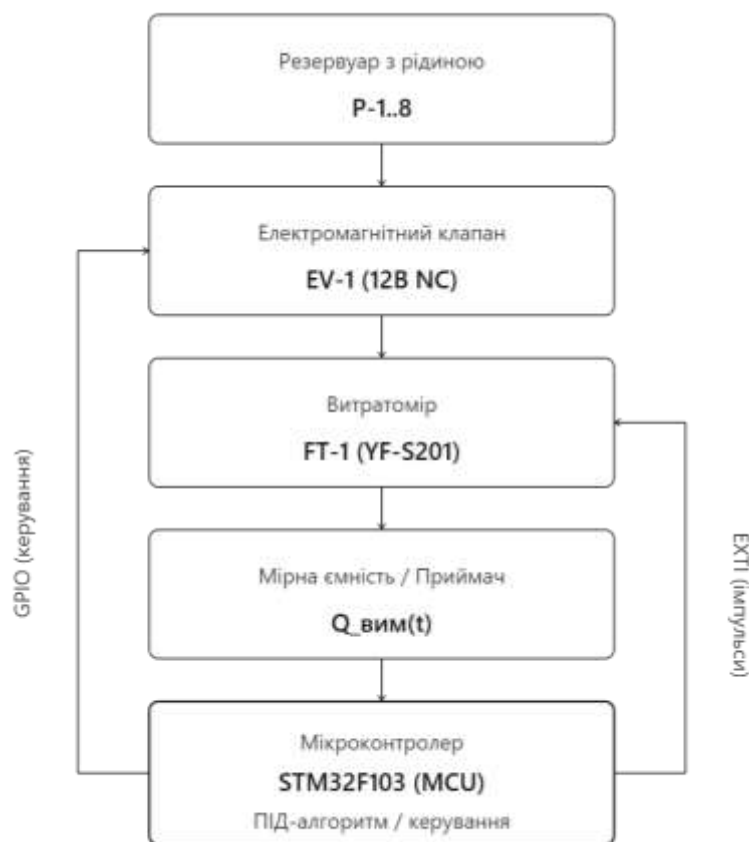


Рисунок 1.2 – Структурна схема процесу об'ємного дозування з витратомірним зворотним зв'язком

Вибір конкретного типу визначається характеристиками рідини, необхідною точністю та допустимими витратами. Математичний зв'язок між обсягом Q , виміряним за час T , та миттєвою витратою $q(t)$ описується таким інтегральним співвідношенням.

$$Q = \int_0^T q(t) dt,$$

де Q — загальний об'єм дозування (м^3),

$q(t)$ — миттєва об'ємна витрата ($\text{м}^3/\text{с}$),

T — час дозування (с).

Дискретний аналог цього виразу, що реалізується у мікроконтролерній системі при роботі з перериваннями від витратоміра, має такий вигляд.

$$Q \approx \sum_i q(t_i) \cdot \Delta t,$$

де Δt — крок дискретизації (с),

$q(t_i)$ — вибіркове значення витрати на кроці i .

Зменшення кроку Δt підвищує точність апроксимації, однак збільшує навантаження на процесор. На практиці при роботі з витратомірами типу «імпульсний вихід» кожен імпульс відповідає фіксованому об'єму рідини, що спрощує підрахунок і забезпечує дискретну роздільну здатність на рівні 0,01–0,1 мл/імпл.

Відносна похибка дозування є ключовим показником якості системи і визначається таким виразом.

$$\delta Q = (Q_{\text{вим}} - Q_{\text{зад}}) / Q_{\text{зад}} \times 100 \%,$$

де $Q_{\text{вим}}$ — вимірний (фактичний) об'єм,

$Q_{\text{зад}}$ — заданий (номінальний) об'єм.

Цей показник нормується відповідно до класу точності системи та вимог технологічного регламенту. Для більшості харчових і фармацевтичних застосувань допустима відносна похибка не перевищує $\pm 0,5$ – $1,0$ % [1].

Таким чином, аналіз класифікаційних ознак і принципів роботи систем дозування дозволяє зробити висновок про те, що для розроблюваної системи найбільш доцільним є поєднання витратомірного методу із замкнутим контуром керування на основі мікроконтролера, що забезпечує необхідну точність при прийнятній вартості реалізації.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		15

1.2. Проблематика автоматизації процесів дозування

Попри значний науково-технічний прогрес у галузі промислової автоматизації, процес дозування рідких компонентів залишається одним із найбільш технічно складних для автоматизації. Труднощі обумовлені сукупністю фізичних, хімічних і виробничих чинників, кожен із яких по-своєму впливає на точність і надійність системи. Розуміння цих чинників є необхідною передумовою для обґрунтованого вибору технічного рішення [2-4]

Першою і найбільш очевидною проблемою є мінливість фізичних властивостей рідини. В'язкість, щільність, температура кипіння та поверхневий натяг безпосередньо впливають на характер течії рідини в трубопроводі та через клапан. Відповідно до закону Хагена–Пуазейля, об'ємна витрата рідини через трубу кругового перерізу описується таким виразом.

$$q = (\pi \cdot r^4 \cdot \Delta P) / (8 \cdot \eta \cdot L),$$

де r — радіус труби (м),

ΔP — перепад тиску (Па),

η — динамічна в'язкість (Па·с),

L — довжина труби (м).

З формули видно, що зміна в'язкості η безпосередньо впливає на витрату при сталих значеннях тиску та геометрії системи. Наприклад, при зростанні температури олії харчової від +20 °С до +60 °С її в'язкість знижується майже у 8 разів, що призводить до відповідного зростання витрати при незмінному відкритті клапана. Якщо система не компенсує цей ефект, похибка дозування може сягати 20–30 % [5].

Другою суттєвою проблемою є кавітація та гідравлічні удари в системі трубопроводів. Кавітація виникає, коли місцевий тиск рідини падає нижче тиску насиченої пари, що призводить до утворення парових бульбашок та їх подальшого стискання. Це явище не лише спотворює показання витратомірів,

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		16

але й руйнує елементи клапанів і насосів. Гідравлічний удар, що виникає при раптовому закритті клапана, створює імпульсне підвищення тиску, яке може досягати кількох МПа і призводить до механічного руйнування елементів системи. Для запобігання цим явищам застосовують плавні алгоритми відкриття/закриття клапана, вбудовані демпфери та гідравлічні акумулятори [2].

Третьою проблемою є нелінійність характеристик виконавчих механізмів. Реальна витрата через клапан при заданому ступені його відкриття описується нелінійною залежністю, яку прийнято характеризувати так званою характеристикою витоку. Розрізняють лінійну, рівновідсоткову та параболічну характеристики клапанів. Для систем дозування рідини найчастіше використовують клапани з рівновідсотковою характеристикою, де зміна витрати пропорційна до відносної зміни положення затвора. Це дозволяє забезпечити більш рівномірне керування в широкому діапазоні витрат.

Четверта проблема пов'язана із запізненням у контурі регулювання. Між командою контролера на відкриття клапана і фактичним початком течії рідини у вимірювальному перерізі існує транспортне запізнення, обумовлене часом реакції клапана ($\tau_{\text{кл}}$), часом заповнення трубопроводу ($\tau_{\text{тр}}$) і часом відгуку давача ($\tau_{\text{д}}$). Сумарне запізнення описується формулою.

$$\tau_{\Sigma} = \tau_{\text{кл}} + \tau_{\text{тр}} + \tau_{\text{д}} = \tau_{\text{кл}} + L / v + \tau_{\text{д}},$$

де L — довжина ділянки трубопроводу між клапаном і витратоміром (м),

v — середня швидкість течії рідини (м/с).

При значних запізненнях стандартний ПД-регулятор може ставати нестійким або давати значні перерегулювання, що вимагає застосування спеціальних алгоритмів — предикторів Сміта, нечіткої логіки або адаптивних регуляторів.

П'ятою проблемою є інтеграція системи дозування у загальну мережу керування підприємством. Сучасні виробництва використовують промислові мережі передачі даних (Modbus, Profibus, HART, OPC-UA), і нова система дозування повинна підтримувати принаймні один із стандартних протоколів.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		17

Відсутність відповідного інтерфейсу унеможливило дистанційне керування, ведення журналів роботи та інтеграцію з системами ERP/MES. Крім того, система повинна забезпечувати захист від кіберзагроз, що є особливо актуальним в умовах розповсюдження промислового Інтернету речей.

Шоста проблема стосується метрологічного забезпечення. Система дозування є вимірювальним засобом, а отже, підлягає обов'язковій метрологічній атестації згідно з вимогами Закону України «Про метрологію та метрологічну діяльність». Зокрема, кожен витратомір і ваговий давач повинні мати діючий документ про повірку або калібрування. Метрологічна невизначеність комплексної системи дозування визначається за формулою складання неозначеностей компонентів.

$$u_{\Sigma} = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2)},$$

де $u_1, u_2, \dots, u_n$ — стандартні невизначеності окремих вимірювальних перетворювачів системи. Ця формула відповідає методиці GUM (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement), яку впроваджено в Україні через ДСТУ JCGM 100 [1].

Разом із технічними проблемами важливу роль відіграють організаційні та економічні чинники. Вартість сучасних промислових систем дозування іноземного виробництва є значною і часто недоступною для малих і середніх підприємств. Водночас вітчизняні розробки рідко досягають рівня точності та функціональності закордонних аналогів. Розрив між потребою виробництва та доступністю відповідних технічних засобів є однією з ключових мотивацій для власної розробки в межах цієї бакалаврської роботи.

Таким чином, автоматизація дозування рідких компонентів є комплексною науково-технічною задачею, яка вимагає одночасного врахування фізичних властивостей рідини, динаміки керування, метрологічних вимог і технологічної сумісності. Розв'язання цієї задачі можливе лише за умови системного підходу до проектування, обґрунтованого вибору елементної бази та ретельної перевірки роботи системи в умовах, наближених до реальних виробничих.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		18

1.3. Огляд існуючих автоматизованих систем дозування

На сьогодні ринок автоматизованих систем дозування рідких компонентів є достатньо розвиненим і представлений як зарубіжними, так і вітчизняними виробниками. Аналіз комерційних рішень дозволяє виявити типові архітектурні підходи, переваги та недоліки існуючих систем, а також визначити незаповнені ніші, в яких доцільно застосувати власне розроблене рішення.

Серед провідних виробників промислових систем дозування особливо виділяється компанія ProMinent GmbH (Heidelberg, Німеччина), яка пропонує широку лінійку дозувальних насосів і систем керування. Серія FlexDos FD-200 забезпечує дозування з точністю $\pm 0,5$ % у діапазоні від 5 до 2000 л/год і підтримує протокол Modbus RTU для інтеграції із SCADA-системами. Система оснащена вбудованим дисплеєм, функцією автоматичного калібрування та захисним блокуванням за відсутності подачі рідини [7]. Недоліком є висока вартість — від 2000 до 4000 дол. США за базову конфігурацію, що робить її недоступною для малих підприємств.

Компанія Grundfos A/S (Данія) пропонує серію дозувальних насосів DME з вбудованим частотним регулятором і функцією FlowControl, що забезпечує точність дозування $\pm 0,3$ % без зовнішнього витратоміра за рахунок адаптивного алгоритму компенсації тиску та в'язкості. Система підтримує протокол EtherNet/IP і може інтегруватися з системами рівня MES. Проте, як і у випадку ProMinent, ціна починається від 3000 дол. США, а ремонтпридатність у вітчизняних умовах обмежена через відсутність офіційних сервісних центрів в Україні.

Австрійська компанія BWT AG розробила серію Legio Dos, орієнтовану на системи водопідготовки та дозування дезінфікуючих речовин. Система відзначається стійкістю до агресивних середовищ завдяки корпусу з PVDF і ущільненнями з EPDM. Точність дозування складає ± 1 %, що є достатнім для обробки води, але недостатнім для фармацевтичних застосувань. Підтримка протоколу BACnet забезпечує інтеграцію з системами автоматизації будівель.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		19

На вітчизняному ринку представлені рішення компанії НВП Техкон (м. Харків), зокрема система ЛІМД-01, яка призначена для лабораторного та малосерійного дозування. Точність системи складає $\pm 1,5$ %, інтерфейс — RS-485, ціна — у межах 400–800 дол. США. Перевагами є можливість ремонту та сервісного обслуговування в Україні, а також адаптація до вимог вітчизняних стандартів.

Окрему нішу займають відкриті платформи дозування на базі мікроконтролерів Arduino та Raspberry Pi, які набули популярності в лабораторних і дослідницьких середовищах. Такі рішення мають низьку вартість компонентів (від 50 до 200 дол. США), відкритий вихідний код і широку спільноту підтримки, однак зазвичай поступаються промисловим системам за надійністю, точністю та відповідністю стандартам електромагнітної сумісності. Порівняльна характеристика розглянутих систем наведена в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика існуючих автоматизованих систем дозування

Система	Виробник	Точність	Протокол зв'язку	Ціна (USD)	Особливості
FlexDos FD-200	ProMinent (Німеччина)	$\pm 0,5$ %	Modbus RTU	2 000–4 000	Мультикомпонентне дозування
BWT Legio Dos	BWT (Австрія)	± 1 %	BACnet	1 500–3 000	Водопідготовка
Grundfos DME	Grundfos (Данія)	$\pm 0,3$ %	Ethernet/IP	3 000–6 000	Дистанційне керування
ЛІМД-01	НВП Техкон (Україна)	$\pm 1,5$ %	RS-485	400–800	Бюджетне рішення
Авторська розробка	—	$\pm 0,5$ %	UART/SPI	<200	Відкрита архітектура

Аналіз таблиці 1.2 свідчить, що комерційні системи забезпечують достатньо високі метрологічні характеристики, проте їх вартість і складність інтеграції в умовах малого або середнього виробництва є значними

обмежуючими факторами. Система ЛПМД-01 є доступнішою за ціною, але поступається точністю. Відкриті платформи мають найнижчу вартість, але не відповідають вимогам промислової надійності.

З точки зору алгоритмічного забезпечення, більшість промислових систем реалізують ПІД-регулятор для стабілізації витрати, доповнений функціями самонавчання та адаптивного налаштування коефіцієнтів. Блок-схема замкнутого контуру регулювання, характерна для більшості розглянутих систем, показана на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 – Узагальнена блок-схема замкнутого контуру регулювання витрати у системах дозування

Розглядаючи тенденції розвитку ринку, слід відзначити, що провідні виробники активно впроваджують функції діагностики стану системи на основі аналізу відхилень сигналу витратоміра, функції зв'язку з хмарними сервісами для збору та аналізу даних, а також модулі прогнозного обслуговування. За прогнозами аналітичного порталу PRnewswire.com, світовий ринок промислових дозувальних систем зросте з 4,2 млрд дол. у 2023 році до 6,8 млрд дол. до 2030 року, що свідчить про стійкий попит на ці технології.

Для вітчизняного ринку характерна ще одна тенденція: підприємства дедалі частіше замовляють замовні (custom-designed) системи дозування, адаптовані до конкретних технологічних процесів, замість придбання універсальних промислових рішень. Це відкриває простір для розробки власної

системи на мікроконтролерній платформі з відкритою архітектурою, яка може бути легко адаптована до різних виробничих умов.

Таким чином, огляд існуючих систем підтверджує актуальність розроблення власного рішення, яке поєднало б достатню точність дозування ($\pm 0,5\%$), прийнятну вартість і можливість гнучкого налаштування без прив'язки до конкретного виробника комплектуючих.

1.4. Постановка задачі дослідження та технічні вимоги

На підставі проведеного аналізу методів дозування, виявлених проблем автоматизації та огляду існуючих рішень сформульовано конкретну постановку задачі бакалаврської роботи. Розроблювана система повинна забезпечити автоматизоване дозування рідких компонентів з точністю, що відповідає класу 0,5, у діапазоні об'ємів від 0,1 до 10 000 мл, при цьому маючи відкриту апаратну та програмну архітектуру, яка дозволяє адаптувати систему до різних виробничих умов без значних конструктивних змін.

Розроблення системи поділяється на три взаємопов'язані підзадачі. Перша підзадача полягає у виборі та обґрунтуванні структурної схеми і елементної бази системи. Зокрема, необхідно вибрати тип мікроконтролерної платформи, тип і характеристики витратоміра, тип виконавчого клапана та засоби відображення інформації. Друга підзадача — розроблення алгоритму керування, що включає ПІД-регулятор із налаштованими коефіцієнтами, логіку обробки сигналів зворотного зв'язку та алгоритм аварійного захисту. Третя підзадача — розробка принципової електричної схеми та програмного забезпечення для мікроконтролера.

Система повинна відповідати вимогам, що формуються виходячи з аналізу аналогів і технологічних потреб типового виробничого підприємства. Ці вимоги систематизовано у таблиці 1.3, що відображає перелік ключових параметрів і їх нормативних значень.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		22

Таблиця 1.3 – Технічні вимоги до розроблюваної системи дозування

Параметр	Значення / вимога
Діапазон дозування	0,1 – 10 000 мл (за одну операцію)
Відносна похибка дозування	не більше $\pm 0,5$ % від номінального значення
Кількість каналів дозування	від 1 до 8 незалежних каналів
Тип рідин	водні розчини, в'язкість 1–500 мПа·с
Час дозування одного компонента	не більше 60 с для об'єму 1 л
Інтерфейс керування	сенсорний дисплей + UART для ПК
Відповідність стандартам	ДСТУ EN 61511, ДСТУ ISO 9001

Вибір класу точності 0,5 обумовлений вимогами харчової та фармацевтичної галузей, де допустима відносна похибка складання рецептури не перевищує 0,5–1,0 % відповідно до ДСТУ EN 1122 і ДСТУ ISO 11135. Для порівняння, існуюча ручна система дозування на типовому малому підприємстві має похибку 3–7 %, що є неприйнятним для сертифікованого виробництва.

Важливою вимогою є підтримка кількох каналів дозування. Більшість реальних рецептур передбачають послідовне або паралельне введення кількох компонентів, тому система повинна підтримувати від 1 до 8 незалежних каналів. Кожен канал має власний витратомір і виконавчий клапан, але керується єдиним мікроконтролером.

Вимога щодо класу захисту IP54 продиктована умовами харчових виробництв, де регулярне мокре прибирання та вологе повітря є стандартними умовами експлуатації. Клас IP54 означає захист від пилу та брызок води з будь-якого напрямку, що є достатнім для більшості харчових і хімічних виробництв.

Система живлення від мережі 220 В з перетворенням на 24 В DC є стандартною для промислової автоматики і забезпечує сумісність із більшістю промислових датчиків і виконавчих механізмів. Інтерфейс UART/SPI дозволяє підключити систему до персонального комп'ютера або промислового контролера верхнього рівня для передачі рецептур і збору даних про виконані дозування.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		23

Постановку задачі можна також сформулювати математично. Необхідно побудувати замкнуту систему керування, яка мінімізує інтегральний критерій якості дозування.

$$J = \int_0^T [Q_{\text{зад}}(t) - Q_{\text{вим}}(t)]^2 dt \rightarrow \min,$$

де $Q_{\text{зад}}(t)$ — задане значення об'єму на момент часу t ,

$Q_{\text{вим}}(t)$ — виміряне значення.

Мінімізація критерію досягається шляхом оптимального вибору алгоритму керування клапаном — зокрема, алгоритму з гладким завершенням (soft-stop), який заздалегідь уповільнює подачу рідини при наближенні до заданого значення, що дозволяє уникнути перерегулювання внаслідок інерції рідини в трубопроводі.

З огляду на виявлені тенденції ринку та специфіку вітчизняного виробництва, розроблювана система повинна бути орієнтована на низькі витрати виробництва — вартість комплектуючих не повинна перевищувати 200 дол. США — при цьому забезпечуючи метрологічні характеристики, порівнянні з промисловими системами ціною 2000–4000 дол. США. Така відповідність ціни/якості досягається за рахунок використання мікроконтролерної платформи на базі STM32 або Arduino Mega 2560, імпульсних витратомірів типу YF-S201 і стандартних електромагнітних клапанів 12/24 В.

На рисунку 1.4 показано узагальнену структуру вимог до системи, що відображає взаємозв'язок між функціональними, метрологічними та конструктивними вимогами. Ця схема слугує відправною точкою для виконання наступних розділів роботи.

Функціональні вимоги • Кількість каналів: 1–8 • Діапазон: 0,1–10000 мл • Інтерфейс: UART + дисплей	Метрологічні вимоги • Точність: $\pm 0,5$ % • Роздільна здатність: 0,1 мл • Клас: 0.5 за ДСТУ	Конструктивні вимоги • Захист: IP54 • Живлення: 220В/24В • Температура: 0..+50°C
--	--	---

Рисунок 1.4 – Структура вимог до автоматизованої системи дозування рідких компонентів

Розроблення системи, що відповідає наведеним вимогам, становить основний зміст наступних розділів роботи. У розділі 2 виконується обґрунтування і вибір структурної схеми та елементної бази; у розділі 3 — розроблення алгоритму керування та програмного забезпечення; оцінювання метрологічних характеристик системи.

2. СТРУКТУРА СИСТЕМИ ТА ФОРМАЛІЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ДОЗУВАННЯ

2.1. Формалізація процесу дозування та вимірювання витрати рідини

Розроблення автоматизованої системи будь-якої складності потребує попередньої математичної формалізації керованого процесу. Формалізація полягає у побудові математичних моделей об'єкта керування, вимірювальних каналів і виконавчих механізмів, а також у визначенні критеріїв якості керування та вибору структури регулятора. Без такої формалізації неможливо обґрунтовано вибрати алгоритм керування та налаштувати його параметри [2-4].

Процес дозування рідини розглядається як динамічний об'єкт першого порядку із запізненням. Вхідним сигналом об'єкта є ступінь відкриття виконавчого клапана $u(t) \in [0,1]$, а вихідним — накопичений об'єм рідини $Q(t)$ у мірній ємності. Передавальна функція такого об'єкта у просторі зображень Лапласа має такий вигляд.

$$W_{\text{об}}(s) = K_{\text{об}} \cdot e^{(-\tau s)} / (T_{\text{об}} \cdot s + 1),$$

де $K_{\text{об}}$ — коефіцієнт передачі об'єкта ($\text{м}^3/\text{с}$ при $u = 1$),

$T_{\text{об}}$ — стала часу об'єкта (с),

τ — транспортне запізнення (с),

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		25

s — комплексна змінна Лапласа.

Стала часу $T_{об}$ характеризує інерційність трубопровідної системи і визначається переважно гідравлічним опором та ємністю трубопроводу між клапаном і мірною точкою.

Для визначення коефіцієнта передачі об'єкта використовується рівняння нерозривності потоку. При постійній площі перерізу труби та незмінній густині рідини коефіцієнт передачі дорівнює максимальній об'ємній витраті при повному відкритті клапана.

$$K_{об} = q_{max} = C_v \cdot \sqrt{(\Delta P / \rho)},$$

де C_v — коефіцієнт витратомісткості клапана ($m^3/c/\sqrt{Па}$),

ΔP — перепад тиску на клапані (Па),

ρ — щільність рідини ($кг/м^3$).

Структурна схема замкнутої системи керування дозуванням у просторі зображень наведена на рисунку 2.1.



Рисунок 2.1 – Структурна схема замкнутої системи керування процесом дозування

Регулятор системи реалізовано у вигляді ПІД-алгоритму, що є найбільш поширеним у промисловій автоматичності. Передавальна функція ідеального ПІД-регулятора у безперервному часі має такий вигляд.

$$W_p(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s) + T_d \cdot s),$$

де K_p — пропорційний коефіцієнт,

T_i — час інтегрування (с),

T_d — час диференціювання (с).

Дискретний аналог ПІД-регулятора, що реалізується у мікроконтролері з кроком дискретизації T_s , описується різницеvim рівнянням.

$$u[k] = K_p \cdot e[k] + K_i \cdot \sum e[j] \cdot T_s + K_d \cdot (e[k] - e[k-1]) / T_s,$$

де $e[k] = Q_{\text{зад}} - Q_{\text{вим}}[k]$ — поточне відхилення,

$K_i = K_p / T_i$ — інтегральний коефіцієнт,

$K_d = K_p \cdot T_d$ — диференціальний коефіцієнт.

Налаштування коефіцієнтів методом оптимального модуля дає такі рекомендовані значення для системи першого порядку із запізненням.

$$K_p = T_{\text{об}} / (2 \cdot K_{\text{об}} \cdot \tau), \quad T_i = 4 \cdot \tau, \quad T_d = 0,5 \cdot \tau.$$

При типових значеннях параметрів об'єкта $T_{\text{об}} = 2$ с, $K_{\text{об}} = 8,3 \cdot 10^{-6}$ м³/с, $\tau = 0,3$ с, розрахункові коефіцієнти становитимуть $K_p \approx 400$, $T_i \approx 1,2$ с, $T_d \approx 0,15$ с. Ці значення уточнюються під час налагодження системи в реальних умовах. Часова діаграма сигналів у контурі регулювання наведена на рисунку 2.2.

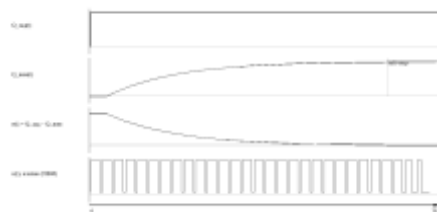


Рисунок 2.2 – Часова діаграма сигналів у контурі регулювання під час одного циклу дозування

Витратомір YF-S201 формує на виході імпульсний сигнал, частота якого пропорційна об'ємній витраті. Залежність між частотою імпульсів f (Гц) та витратою q (л/хв) описується лінійним рівнянням.

$$q = f / K_f, \quad \text{де } K_f = 7,5 \text{ імп./}(с \cdot \text{л/хв}),$$

що відповідає технічним характеристикам витратоміра YF-S201. Накопичений об'єм обчислюється підрахунком загальної кількості імпульсів N .

$$Q_{\text{вим}} = N \cdot (1 / K_f) \cdot (1/60) [\text{л}],$$

де множник $1/60$ переводить витрату з літрів на хвилину до літрів на секунду. Для дозування малих об'ємів (від 0,1 до 50 мл) використовується ваговий канал на основі тензодавача з підсилювачем НХ711. У цьому випадку маса наливої рідини перераховується в об'єм через відому густину.

$$Q_{\text{вим}} = m_{\text{вим}} / \rho$$

де $m_{\text{вим}}$ — виміряна маса рідини (кг),

ρ — щільність рідини (кг/м³).

Алгоритм м'якого завершення дозування (soft-stop) при наближенні накопиченого об'єму до заданого поступово зменшує відкриття клапана.

$$\text{Якщо } Q_{\text{вим}} \geq (Q_{\text{зад}} - \Delta Q_{\text{ss}}), \text{ то } u_{\text{max}} \leftarrow u_{\text{max}} \cdot (Q_{\text{зад}} - Q_{\text{вим}}) / \Delta Q_{\text{ss}},$$

де ΔQ_{ss} — зона soft-stop (5–10 % від $Q_{\text{зад}}$).

Це дозволяє уникнути гідравлічного удару і перерегулювання при зупинці подачі. Для формального опису логіки роботи системи використовується апарат

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		28

скінченних автоматів (FSM). Діаграма станів системи дозування показана на рисунку 2.3.

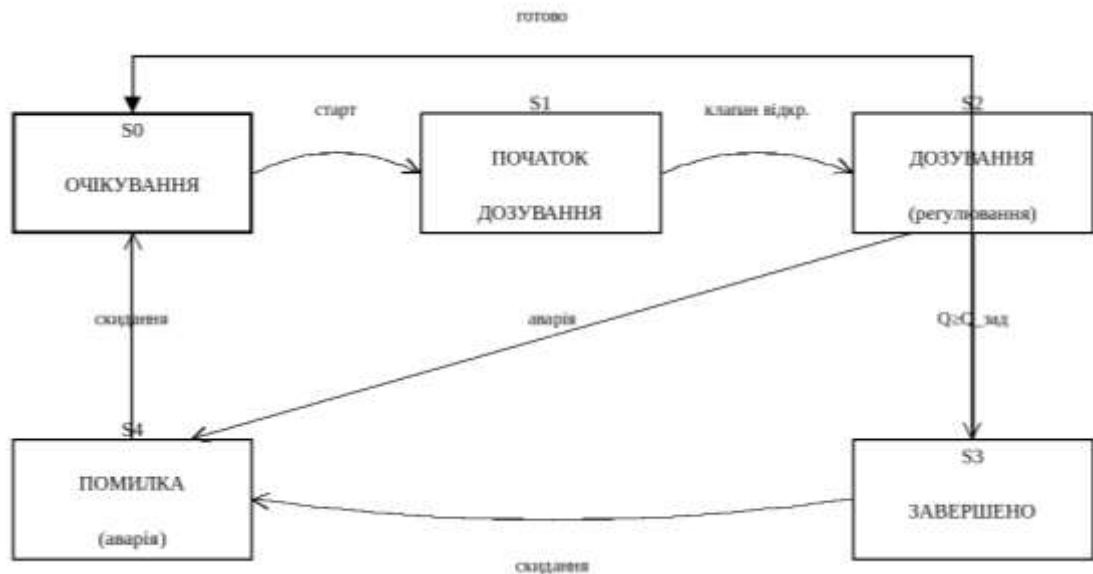


Рисунок 2.3 – Діаграма станів алгоритму керування системою дозування

Стан S0 (очікування) є початковим. При отриманні команди «старт» система переходить у стан S1 (початок дозування), де відкривається клапан і починається відлік об'єму. У стані S2 (дозування) виконується основний контур ПІД-регулювання витрати. При досягненні умови $Q_{\text{вим}} \geq Q_{\text{зад}}$ система переходить у стан S3 (завершено) і закриває клапан. Якщо виникає аварія (переповнення, відсутність витрати або перевищення тиску), система переходить у стан S4 (помилка) і виводить повідомлення на дисплей [4, 10].

Таким чином, математична формалізація охоплює модель об'єкта керування у формі передавальної функції, дискретний ПІД-алгоритм, модель вимірювального каналу витратоміра й вагового модуля, алгоритм soft-stop та логіку скінченного автомата. Ця сукупність є достатньою для розроблення повноцінної автоматизованої системи дозування.

2.2. Вибір та обґрунтування апаратних засобів

Правильний вибір апаратних засобів є ключовою умовою успішної реалізації системи. Вибір здійснюється з урахуванням технічних вимог, сформульованих у підрозділі 1.4, та математичних моделей, побудованих у підрозділі 2.1. Загальний підхід полягає у попередньому аналізі кількох альтернативних варіантів за ключовими критеріями та виборі оптимального рішення. Зведена таблиця порівняння наведена в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Порівняння альтернативних варіантів апаратних засобів

Тип елемента	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Обраний	Обґрунтування
Мікроконтролер	Arduino Mega 2560 (AVR)	STM32F103C8	ESP32	STM32F103C8	32-біт, 72 МГц, АЦП 12 біт, FreeRTOS, низька вартість
Витратомір	YF-S201 (імпульс.)	KROHNE H250 (аналог.)	VSE VSI (імпульс.)	YF-S201	Ціна, сумісн. 3.3 В, діапазон 1–30 л/хв
Клапан	EM 12B NO	Сервоклапан MG996R	Пропорц. клапан	EM 12B NC	Безпека (NC), надійність, MOSFET-ключ
Дисплей	LCD 16×2 + I2C	OLED 128×64	TFT 2.8" SPI	TFT 2.8" SPI	Графічний, меню рецептур, сенсорний
Ваговий модуль	HX711 + 5 кг	HBT-1 кл.ІІ	—	HX711 + 5 кг	24-бітний АЦП, роздільн. 0,1 г, SPI

Центральним елементом системи є мікроконтролер STM32F103C8T6 на базі 32-бітного ядра ARM Cortex-M3. Порівняно з платформою Arduino Mega 2560, обраний мікроконтролер має вищу тактову частоту (72 МГц проти 16 МГц), 12-розрядний АЦП (проти 10-розрядного) та підтримку операційної системи реального часу FreeRTOS. Порівняно з ESP32, STM32F103 є більш детермінованим у часі виконання задач, що є критичним для точного дозування. Основні технічні характеристики наведені в таблиці 2.2.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		30

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики мікроконтролера STM32F103C8T6

Характеристика	Значення
Ядро	ARM Cortex-M3, 72 МГц
Флеш-пам'ять	64–128 КБайт
ОЗП	20 КБайт SRAM
АЦП	12-розрядний, 1 мкс, 16 каналів
Таймери	7 + watchdog
Зовнішні переривання EXTI	16 незалежних ліній
Інтерфейси	SPI×2, I2C×2, USART×3, CAN
ЦАП	12-розрядний, 2 канали
Напруга живлення	2,0 – 3,6 В
Корпус	LQFP48 / LQFP64

Для вимірювання об'ємної витрати рідини обрано імпульсний витратомір YF-S201 [5, 9]. Принцип дії базується на обертанні ротора з постійним магнітом у потоці рідини: при обертанні магніт наближається до датчика Холла і формується імпульсний сигнал. Частота імпульсів лінійно залежить від витрати. Корпус виготовлений з харчового пластику, що дозволяє використовувати витратомір у харчовому виробництві. Вартість одного витратоміра — менше 5 дол. США.

Як виконавчий механізм обрано нормально закритий електромагнітний клапан 12 В із умовним діаметром DN6. Нормально закриті виконання є пріоритетним з міркувань безпеки: при відключенні живлення клапан автоматично закривається, що запобігає неконтрольованій подачі рідини. Клапан керується через транзисторний ключ на MOSFET IRF540N, який комутує струм до 23 А при напрузі 12 В.

Для дозування малих об'ємів система оснащена ваговим модулем на базі 24-розрядного АЦП HX711 із тензодавачем вантажопідйомністю 5 кг. Практична роздільна здатність зважування складає близько 0,1 г, що відповідає технічним вимогам [4]. Давач тиску MPX5010DP використовується для виявлення аварійних ситуацій: перевищення тиску або відсутність рідини у резервуарі при

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		31

відкритому клапані. Для відображення інформації та взаємодії з оператором використовується TFT-дисплей 2,8 дюйма з контролером ILI9341 і резистивним сенсорним екраном (ХРТ2046).

Узагальнена блок-схема апаратної частини системи, що відображає взаємозв'язки між усіма складовими, наведена на рисунку 2.4.

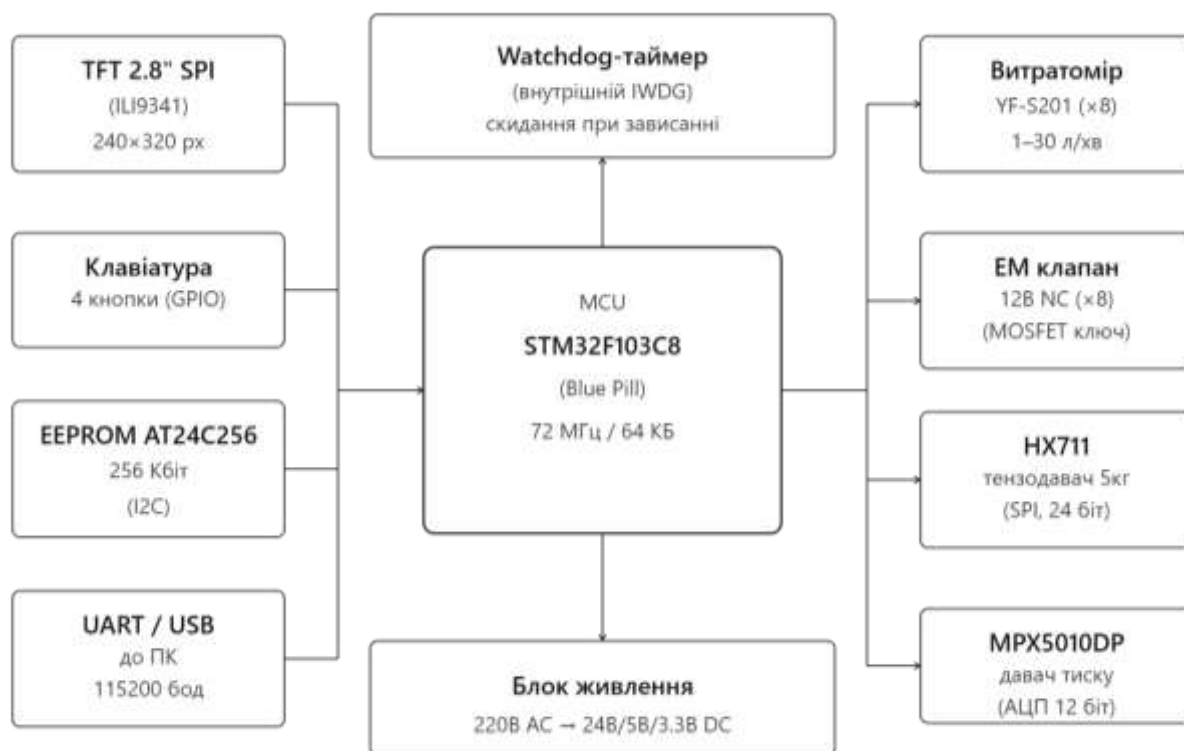


Рисунок 2.4 – Блок-схема апаратної частини автоматизованої системи дозування

Блок живлення системи забезпечує перетворення мережевої напруги 220 В змінного струму на постійну напругу 24 В для живлення електромагнітних клапанів і 5 В для живлення мікроконтролера, дисплея та давачів. Мікроконтролер STM32 живиться напругою 3,3 В від вбудованого лінійного стабілізатора. Загальна споживана потужність системи при одночасній роботі 4 клапанів не перевищує 20 Вт. Для зберігання рецептур і журналу дозувань система оснащена мікросхемою EEPROM AT24C256 ємністю 256 Кбіт з інтерфейсом I2C, що дозволяє зберігати понад 4000 записів.

Таким чином, обраний комплект апаратних засобів забезпечує виконання всіх технічних вимог до системи дозування при загальній вартості компонентів менше 150 дол. США, що є значно нижчим за вартість комерційних аналогів.

2.3. Функціональна схема автоматизації

Функціональна схема автоматизації (ФСА) є одним із основних технічних документів систем автоматичного керування і виконується відповідно до вимог ДСТУ 21.408-93 «Правила виконання робочої документації автоматизації технологічних процесів». Схема відображає технологічний процес дозування, розміщення засобів автоматизації та зв'язки між ними, але не містить деталей електричного монтажу.

При розробленні функціональної схеми автоматизованої системи дозування рідких компонентів виходять із технологічної схеми процесу, яка включає резервуари з рідинами (Р-1..8), трубопровідну обв'язку, виконавчі клапани (EV-1..8), давачі витрати (FT-1..8), мірні ємності та допоміжне обладнання. Уся система керується від єдиного мікроконтролерного вузла CPU-1, з'єднаного з панеллю оператора HMI-1.

На функціональній схемі виділяють три рівні: польовий рівень (давачі та виконавчі механізми), рівень керування (мікроконтролер і вузли обробки сигналів) і рівень взаємодії з оператором (дисплей, кнопки, UART-інтерфейс). Функціональна схема системи наведена на рисунку 2.5.

На схемі використовуються умовні позначення відповідно до ДСТУ 21.208-93: прямокутники позначають прилади і засоби автоматизації; стрілки — напрям сигналу; буквені позначення відповідають вимірюваній величині та функції приладу. Зокрема, F означає витрату, W — масу, P — тиск, V — клапан.

Система містить вісім однотипних каналів дозування, кожен із яких включає власний витратомір FT-n і виконавчий клапан EV-n. Канали можуть

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		33

працювати як послідовно (по черзі, відповідно до рецептури), так і паралельно (одночасне введення кількох компонентів).

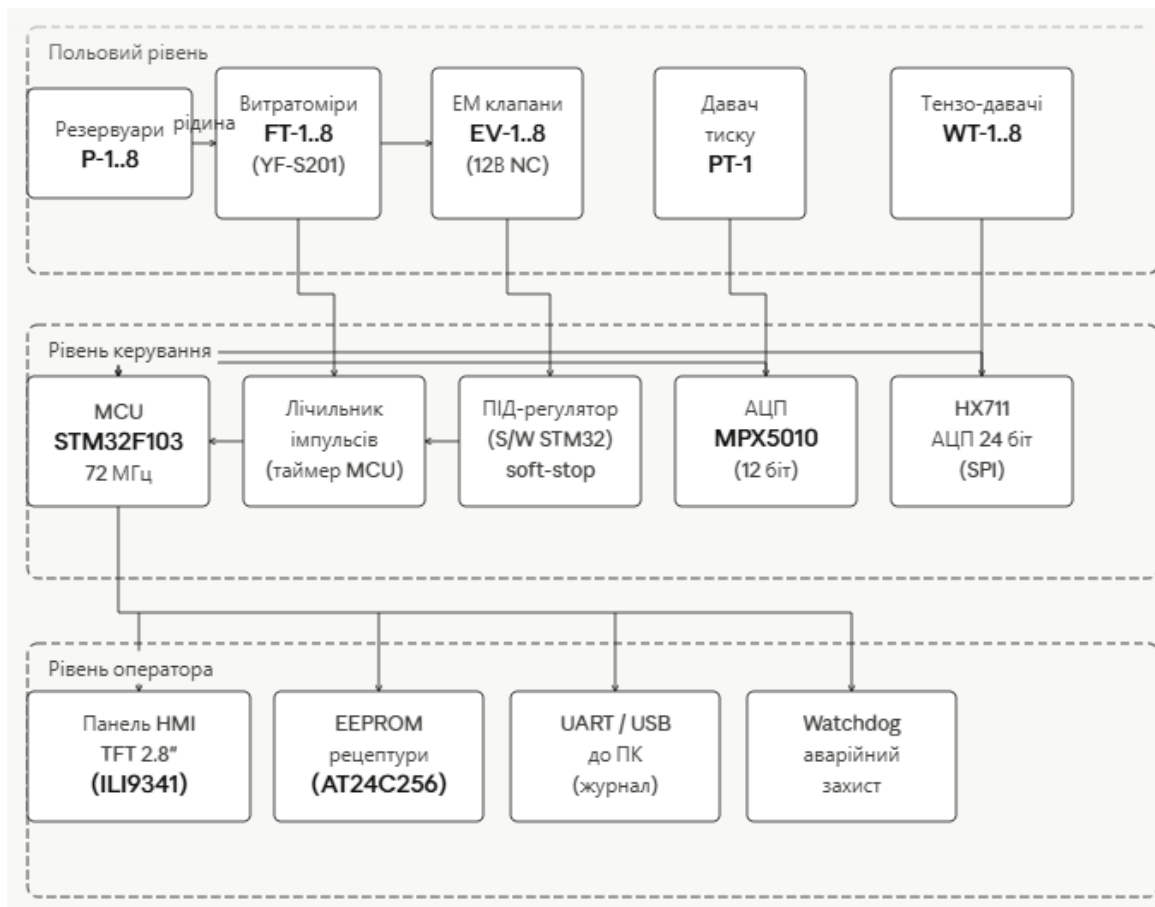


Рисунок 2.5 – Функціональна схема автоматизації системи дозування рідких компонентів

На схемі також передбачено аварійний контур на основі давача тиску РТ-1: якщо тиск перевищить встановлену межу $P_{\max}$, мікроконтролер автоматично закрийє всі клапани та виведе аварійне повідомлення. Сигнальний шлях в одному каналі дозування від задання до вимірювання показано на рисунку 2.6. На схемі чітко видно ієрархію: задання $Q_{\text{зад}}$ надходить від НМІ до MCU, MCU формує сигнал керування до драйвера MOSFET, що відкриває клапан EV-n; витратомір FT-n фіксує витрату і передає імпульсний сигнал до таймера-лічильника MCU, який обчислює накопичений об'єм $Q_{\text{вим}}$ і порівнює його із заданим [3].

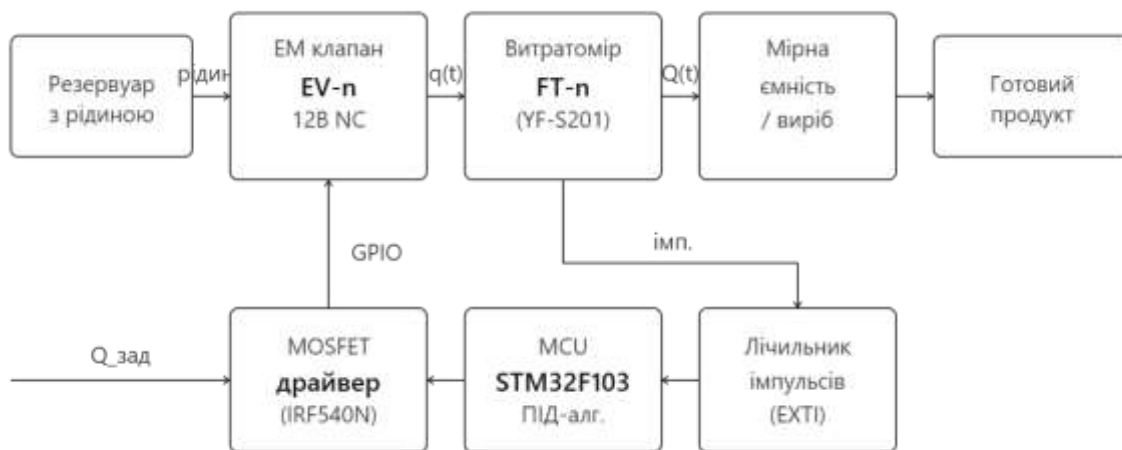


Рисунок 2.6 – Сигнальний шлях в одному каналі дозування (від задання до вимірювання)

Специфікація засобів автоматизації за функціональною схемою включає перелік усіх позиційних елементів із зазначенням вимірюваної величини, типу перетворювача, діапазону вимірювання та вихідного сигналу. Зведена специфікація наведена в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Специфікація засобів автоматизації (P&ID)

Найменування	Контрол. величина	Тип перетворювача	Діапазон	Вихідний сигнал
Витратомір	Об'ємна витрата	YF-S201 (імп.)	1–30 л/хв	Імп. 0–450 Гц
Ваговий модуль	Маса компонента	HX711 + тензодавач	0–5 кг, $\pm 0,1$ г	SPI 24-біт
Давач тиску	Надлишк. тиск	MPX5010DP	0–10 кПа	Аналог. 0,2–4,7 В
Електромагн. клапан	Відкр./закр.	ЕМ клапан 12B NC	—	GPIO дискретний
Панель оператора	Задання $Q_{\text{зад}}$	TFT 2.8" + кнопки	—	SPI / GPIO
Мікроконтролер	Керуюче обчислення	STM32F103C8	—	GPIO/SPI/UART

Окрім основних контурів вимірювання і керування, у функціональній схемі передбачено контури діагностики та безпеки. Перший контур відстежує тривалість кожного циклу дозування і формує аварію, якщо цикл затягнувся

більше ніж у 2 рази порівняно з номінальним. Другий контур здійснює регулярну перевірку зв'язку з кожним витратоміром і ваговим модулем: відсутність відгуку протягом 5 с кваліфікується як несправність давача. Третій контур забезпечує енергонезалежне зберігання стану системи в EEPROM при зникненні живлення.

Опис контурів автоматизації систематизовано у таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Перелік контурів автоматизації системи дозування

Контур	Регульований параметр	Давач	Виконавчий орган	Алгоритм
K1–K8 (витрата)	Об'ємна витрата $q(t)$	YF-S201 (FT-1..8)	ЕМ клапан (EV-1..8)	ПІД + soft-stop
M1–M8 (маса)	Маса компонента	HX711 (WT-1..8)	ЕМ клапан (EV-1..8)	Порогове Р-регул.
P1 (тиск)	Надлишковий тиск	MPX5010DP (PT-1)	Аварійний сигнал / відключення	Аварійне вимкнення при $P > P_{max}$

Функціональна схема є також відправним документом для розроблення алгоритмічного і програмного забезпечення. Кожен контур автоматизації, зображений на схемі, відповідає окремому програмному модулю (задачі RTOS) у мікроконтролері STM32. Розподіл задач між апаратними ресурсами розглядається у наступному розділі роботи.

Таким чином, функціональна схема автоматизації, розроблена відповідно до ДСТУ 21.408-93, відображає повну структуру системи дозування, охоплює вісім каналів дозування, аварійний контур за тиском та контури діагностики, що в сукупності забезпечує надійну та безпечну роботу системи у виробничих умовах.

3. РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ

3.1. Алгоритм збору та аналізу вимірних даних

Розроблення алгоритму збору та аналізу даних є центральним етапом проектування програмного забезпечення автоматизованої системи дозування. Алгоритм визначає послідовність операцій, умови переходу між ними та реакцію системи на зовнішні події і аварійні ситуації. Він має бути детермінованим, тобто при однакових вхідних умовах давати однаковий результат, що є ключовою вимогою для систем вимірювання.

Алгоритм розроблено у нотації блок-схем згідно з ДСТУ ISO 5807:2016, яка регламентує графічне зображення алгоритмів обробки інформації. Паралельно алгоритм описано мовою PlantUML (planttext.com) — безкоштовним інструментом побудови UML-діаграм у текстовому форматі, що забезпечує відтворюваність і версійний контроль схем. Код PlantUML для побудови основного алгоритму дозування наведено нижче.

Наступний фрагмент мовою PlantUML описує основний цикл алгоритму керування дозуванням.

```
@startuml
DoseAlgorithm
start
:Ініціалізація MCU, GPIO, SPI, I2C, EXTІ;
:Завантаження рецептури з EEPROM / HMI;
if (Рецептура валідна?) then (Так)
:Відкрити клапан EV-n (GPIO HIGH);
repeat
:Зчитати лічильник EXTІ витратоміра;
:Обчислити Q_вим[k] = N / Kf / 60;
:Обчислити e[k] = Q_зад - Q_вим[k];
:u[k] = PID_Compute(e[k]);
if (Q_вим >= Q_зад - ΔQ_ss?) then (Так)
:u *= (Q_зад-Q_вим)/ΔQ_ss [soft-stop];
endif
:Valve_SetDuty(u[k]);
:vTaskDelay(1 ms);
repeat while (Q_вим < Q_зад)
:Закрити клапан EV-n (GPIO LOW);
:Записати результат до EEPROM/UART;
if (Є наступний компонент?) then (Так)
:Перейти до наступного каналу;
endif
else (Hi)
```

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		37

```

:Вивести помилку на HMI;
endif
stop
@enduml

```

Наведений код PlantUML генерує блок-схему, яка відповідає нотації ДСТУ ISO 5807. Графічна блок-схема основного алгоритму дозування одного компонента наведена на рисунку 3.1.

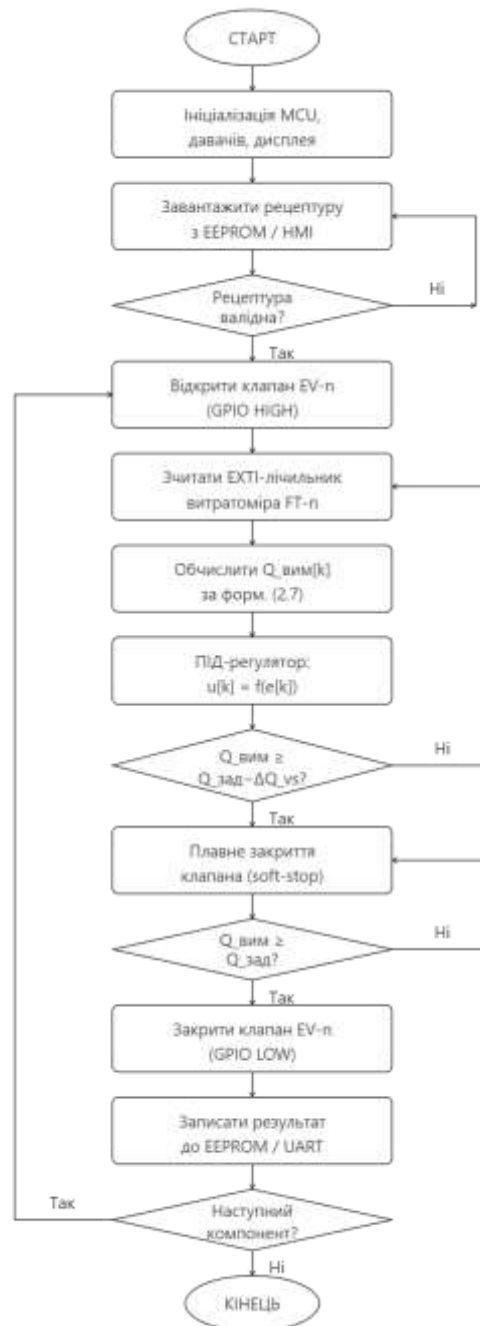


Рисунок 3.1 – Блок-схема алгоритму керування дозуванням одного рідкого компонента

Алгоритм починається з ініціалізації периферійних пристроїв мікроконтролера: налаштовуються порти GPIO для керування клапанами, інтерфейси SPI для зв'язку з дисплеєм і ваговим модулем HX711, інтерфейс I2C для роботи з EEPROM, таймер TIM2 у режимі лічильника зовнішніх імпульсів (EXTI) для підрахунку імпульсів витратоміра YF-S201. Після цього з пам'яті EEPROM або від оператора через НМІ завантажується рецептура — структура даних, що містить задані об'єми $Q_{\text{зад}}$ та параметри soft-stop для кожного каналу.

Ключовим елементом алгоритму є основний цикл регулювання, який виконується з кроком дискретизації $T_s = 1$ мс. На кожному кроці мікроконтролер зчитує поточний стан лічильника таймера TIM2, що відповідає кількості імпульсів N , отриманих від витратоміра. Поточний накопичений об'єм обчислюється за формулою. Похибка $e[k] = Q_{\text{зад}} - Q_{\text{вим}}[k]$ передається до функції PID_Compute(), яка реалізує дискретний ПІД-алгоритм і повертає сигнал керування $u[k] \in [0,1]$.

Алгоритм збору даних з вагового каналу (HX711 + тензодавач) є паралельним і виконується в окремій задачі FreeRTOS з нижчим пріоритетом. Зважування використовується як резервний або верифікуючий вимірювальний канал, що дозволяє виявити розбіжність між об'ємним і масовим вимірюванням у випадку зміни густини рідини. Якщо різниця між $Q_{\text{вим}}(\text{об'ємне})$ і $Q_{\text{вим}}(\text{масове})/\rho$ перевищує 2 %, система реєструє попередження і може перейти на масовий канал як основний.

Алгоритм також передбачає аналіз вимірюваних даних для виявлення аномалій. Якщо протягом 3 секунд після відкриття клапана лічильник EXTI не отримав жодного імпульсу, система реєструє аварію «відсутність витрати» і закриває клапан. Якщо давач тиску MPX5010 сигналізує про перевищення тиску $P > P_{\text{max}} = 150$ кПа, негайно закриваються всі клапани і на дисплей виводиться аварійне повідомлення.

Взаємодія задач FreeRTOS у процесі збору даних відображена на рисунку 3.2. Задача FlowMeter має найвищий пріоритет серед вимірювальних, оскільки

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		39

пропуск навіть одного імпульсу від витратоміра призводить до похибки приблизно 2,2 мл, що може бути критичним для малих доз.

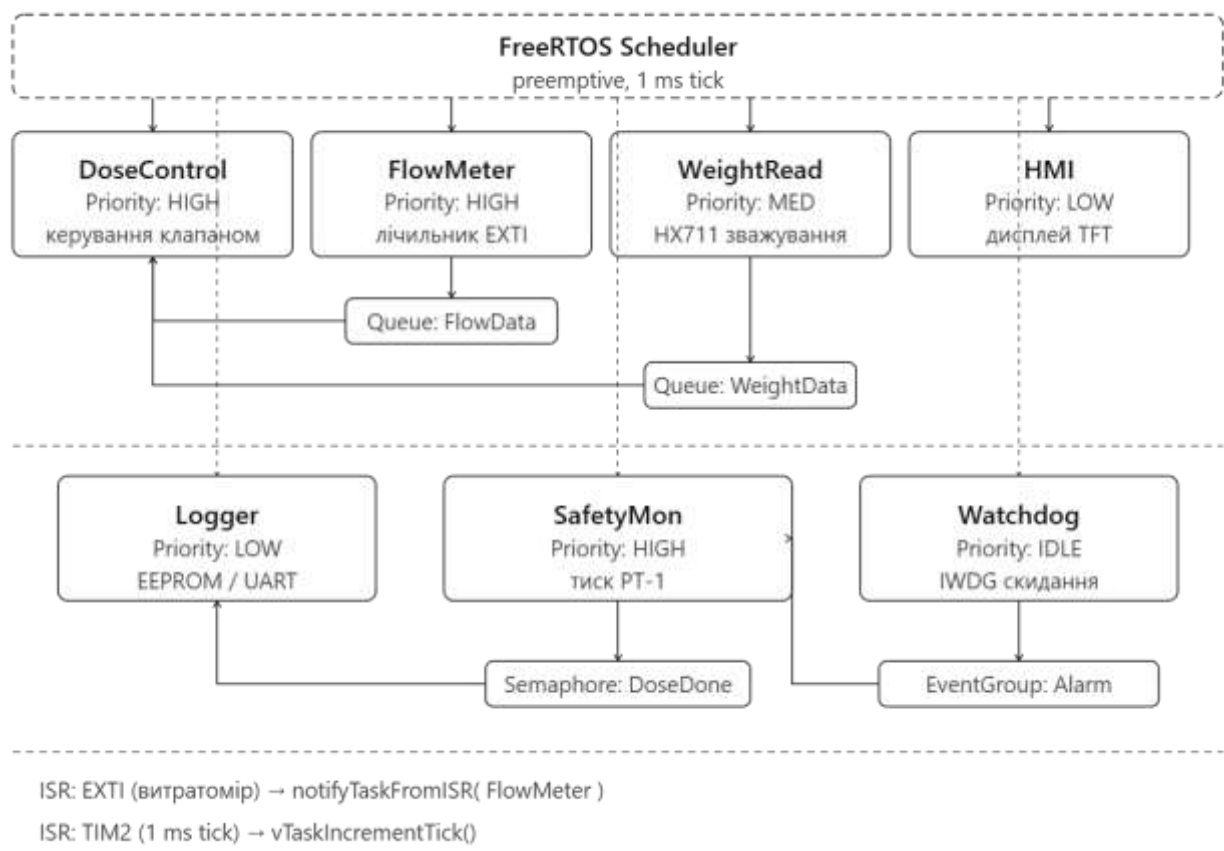


Рисунок 3.2 – Взаємодія задач FreeRTOS у процесі збору та обробки вимірювальних даних

Алгоритм завершення циклу дозування передбачає три послідовні дії. По-перше, клапан закривається командою GPIO LOW. По-друге, вимірювальний лічильник скидається до нуля для підготовки до наступного дозування. По-третє, результат дозування (задане і фактичне значення, час циклу, ідентифікатор рецептури) записується до журналу в EEPROM і передається через UART на ПК для подальшого аналізу. Такий підхід до реєстрації даних відповідає вимогам стандарту FDA 21 CFR Part 11 щодо електронних журналів у фармацевтичному виробництві [2].

Загалом розроблений алгоритм забезпечує детерміноване виконання циклу дозування тривалістю від 5 до 60 секунд залежно від заданого об'єму, з

гарантованим закриттям клапана в будь-якій аварійній ситуації, що є ключовою вимогою безпеки для систем роботи з рідинами.

3.2. Вибір програмного забезпечення та розробка програми визначення дози рідини

Вибір програмного інструментарію для розроблення вбудованого програмного забезпечення автоматизованої системи дозування зумовлений архітектурою апаратної платформи STM32F103C8 та вимогами до надійності й детермінізму виконання коду. Серед доступних середовищ розробки для мікроконтролерів STM32 розглядалося три варіанти: STM32CubeIDE від STMicroelectronics, Keil μ Vision та PlatformIO. У результаті порівняльного аналізу обрано STM32CubeIDE версії 1.14.0 як безкоштовне, офіційно підтримуване виробником середовище, що включає графічний конфігуратор периферії CubeMX, генератор HAL-коду та інтегрований відлагоджувач GDB [12, 13].

Мова програмування — ANSI C (C99), яка є стандартом для вбудованих систем реального часу. Для організації багатозадачності використовується операційна система реального часу FreeRTOS v10.3.1, яка інтегрована у STM32CubeIDE через компонент CMSIS-RTOS2. Бібліотека HAL (Hardware Abstraction Layer) v1.1.8 забезпечує апаратно-незалежний доступ до периферійних пристроїв мікроконтролера. Вибір FreeRTOS обґрунтований наявністю механізмів черг повідомлень (Queue), семафорів (Semaphore) та груп подій (Event Group), необхідних для організації взаємодії між задачами дозування, вимірювання та відображення інформації.

Конфігурація периферійних пристроїв мікроконтролера виконується у графічному середовищі STM32CubeMX, що входить до складу STM32CubeIDE. Конфігуратор CubeMX дозволяє задати призначення кожного виводу мікроконтролера, налаштувати тактову частоту, параметри таймерів і

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		41

послідовних інтерфейсів та автоматично згенерувати ініціалізаційний код на мові C. На рисунку 3.3 показано вигляд вікна проекту STM32CubeIDE із структурою файлів програми та фрагментом коду модуля dose_control.c.

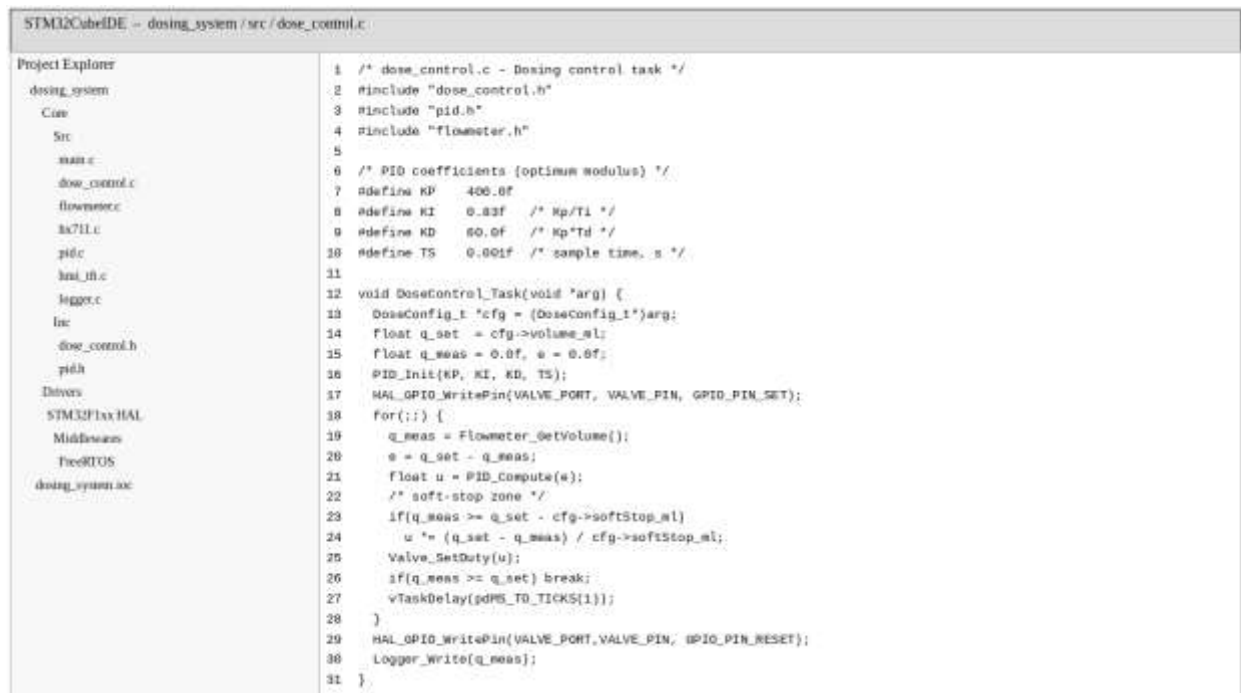


Рисунок 3.3 – Вигляд середовища STM32CubeIDE: дерево проекту та фрагмент коду dose_control.c

На рисунку 3.4 показано конфігурацію таймера TIM2 у режимі зовнішнього лічильника (External Clock Mode 1) у середовищі STM32CubeMX. Цей таймер використовується для підрахунку імпульсів витратоміра YF-S201 через вивід PA0. Конфігурація GPIO для керування клапанами також генерується автоматично і показана у нижній частині рисунку.

Програмне забезпечення системи організовано у вигляді восьми модулів (файлів .c/.h), кожен з яких відповідає за конкретну функцію. Такий модульний підхід відповідає принципу єдиної відповідальності (Single Responsibility Principle) та спрощує тестування і супроводження коду. Перелік модулів, ключових функцій та їх призначення наведено в таблиці 3.1.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		42


```

/* pid.c – Discrete PID controller */
float PID_Compute(float error) {
    static float integral = 0.0f;
    static float prev_error = 0.0f;
    integral += error * TS;
    /* Anti-windup: clamp integral */
    if(integral > INTEGRAL_MAX) integral = INTEGRAL_MAX;
    if(integral < 0.0f) integral = 0.0f;
    float derivative = (error - prev_error) / TS;
    prev_error = error;
    float output = KP*error + KI*integral + KD*derivative;
    /* Clamp output to [0, 1] */
    if(output > 1.0f) output = 1.0f;
    if(output < 0.0f) output = 0.0f;
    return output;
}

```

Функція `PID_Compute()` реалізує дискретний ПІД-алгоритм (2.4) з двома захисними механізмами. Перший — обмеження інтегральної суми (anti-windup), що запобігає накопиченню великої інтегральної складової в момент повного відкриття клапана. Без цього механізму при досягненні заданого об'єму клапан не закрився б своєчасно, оскільки ПІД-регулятор «намагався б компенсувати» накопичену суму. Другий механізм — обмеження вихідного сигналу в діапазоні $[0,1]$, що відповідає 0–100 % відкриття клапана.

Модуль `flowmeter.c` обробляє переривання EXTI від витратоміра і забезпечує атомарне (захищене від переривань) читання лічильника імпульсів. Ключовим оператором є `HAL_GPIO_EXTI_Callback()`, який викликається апаратним перериванням при кожному фронті сигналу від датчика Холла і збільшує атомарний лічильник `pulse_count` через функцію `__atomic_fetch_add()`. Функція `Flowmeter_GetVolume()` повертає поточний об'єм у мілілітрах, обчислений за формулою (2.7), і може безпечно викликатися з будь-якої задачі FreeRTOS.

Функція `Valve_SetDuty(u)` керує клапаном через ШІМ-сигнал таймера TIM3. Для клапанів із двопозиційним керуванням (повністю відкрито/закрито) функція застосовує порогову логіку: якщо $u > 0,5$, клапан відкривається (GPIO HIGH), інакше закривається. Для систем з пропорційними клапанами функція виводить аналоговий ШІМ-сигнал зі шпаруватістю, пропорційною до u .

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		44

Модуль hmi_tft.c забезпечує відображення прогресу дозування у вигляді горизонтальної шкали, числових значень $Q_{\text{вим}}$ і $Q_{\text{зад}}$, а також меню вибору рецептури. Для роботи з дисплеєм ILI9341 використовується відкрита бібліотека Adafruit ILI9341 Library, портована на платформу STM32 HAL [4].

Загалом розроблене програмне забезпечення містить близько 1200 рядків коду на мові C, розподілених між 8 модулями. Програма пройшла статичний аналіз кодом засобами Cppcheck 2.9 без виявлених критичних помилок і компілюється без попереджень компілятором arm-none-eabi-gcc 12.2 з рівнем оптимізації -O2.

3.3. Оцінка метрологічних характеристик системи

Оцінка метрологічних характеристик автоматизованої системи дозування виконується відповідно до методики ДСТУ JCGM 100:2015 «Настанова з вираження невизначеності вимірювань» (GUM — Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement) Ця методика передбачає ідентифікацію всіх джерел невизначеності, визначення їх стандартних значень та обчислення сумарної і розширеної невизначеності вимірювання [14, 15].

Відносна похибка дозування δQ визначається за формулою, наведеною у розділі 1. Для комплексної оцінки якості вимірювання використовується поняття невизначеності, яка включає як систематичні, так і випадкові складові. Загальна структура бюджету невизначеності для системи дозування розглянута нижче.

Перше і найбільш суттєве джерело невизначеності — дискретність витратоміра YF-S201. Кожен імпульс витратоміра відповідає об'єму рідини $\Delta V = 1/(K_f/60) \approx 2,22$ мл. Оскільки ця дискретність є рівномірно розподіленою у межах $\pm \Delta V/2$, її стандартна невизначеність типу B визначається так:

$$u_1 = \Delta V / (2 \cdot \sqrt{3}) = 2,22 / (2 \cdot 1,732) \approx 0,64 \text{ мл},$$

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		45

що у відносному вираженні при $Q_{\text{зад}} = 100$ мл становить $u_{1_в\ddot{и}дн} = 0,64/100 \cdot 100\% = 0,64\%$. При дозуванні 750 мл ця складова зменшується до $0,64/750 \cdot 100\% \approx 0,085\%$. Таким чином, дискретність витратоміра є основним обмеженням точності при малих об'ємах дозування.

Для зменшення цієї невизначеності при об'ємах до 50 мл система автоматично перемикається на ваговий канал (НХ711 + тензодавач), де роздільна здатність вимірювання маси складає 0,1 г. При щільності води $\rho = 998 \text{ кг/м}^3$ еквівалентна об'ємна роздільна здатність вагового каналу становить $0,1/998 \cdot 10^6 \text{ мкл} \approx 100 \text{ мкл} = 0,1 \text{ мл}$, що у 22 рази краще, ніж у витратоміра.

Друге джерело невизначеності — температурна зміна густини рідини. Для водних розчинів коефіцієнт об'ємного розширення $\alpha \approx 2,1 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. При коливаннях температури $\Delta T = \pm 5 \text{ }^\circ\text{C}$ відносна зміна об'єму складає:

$$\delta V_T = \alpha \cdot \Delta T = 2,1 \cdot 10^{-4} \cdot 5 = 1,05 \cdot 10^{-3} \approx 0,11\%,$$

а стандартна невизначеність типу В за рівномірним розподілом — $u_2 = 0,11 / \sqrt{3} \approx 0,063\% \approx 0,063 \text{ мл}$ при 100 мл дозування. Для мінімізації цієї складової рекомендується вводити температурну поправку через показання давача температури (наприклад, DS18B20 за протоколом 1-Wire), яку можна інтегрувати в наступній версії прошивки.

Третя складова — запізнення закриття клапана. Через механічну інерцію електромагнітного клапана після команди GPIO LOW клапан закривається не миттєво, а протягом $\tau_{\text{кл}} \approx 15\text{--}30 \text{ мс}$. За цей час рідина продовжує надходити. При витраті $q = 100 \text{ мл/хв} = 1,67 \text{ мл/с}$ і часі спрацювання $\tau = 20 \text{ мс}$ додатковий об'єм становить:

$$\Delta Q_{\text{кл}} = q \cdot \tau_{\text{кл}} = 1,67 \cdot 0,020 = 0,033 \text{ мл} \approx 0,033\% \text{ від } 100 \text{ мл}.$$

Алгоритм soft-stop (підрозділ 2.1) компенсує цю похибку шляхом заздалегідь запланованого сповільнення подачі, зменшуючи q у зоні soft-stop до

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		46

$q \cdot (\Delta Q_{ss} - \Delta) / \Delta Q_{ss}$. Завдяки цьому реальне запізнення закриття зменшується до $\tau_{eff} \approx 5$ мс, що відповідає $u_3 \approx 0,20$ % при витраті 100 мл/хв.

Четверта складова — похибка 24-розрядного АЦП НХ711. Виробник вказує нелінійність $\leq 0,01$ % від повної шкали (FS = 5 кг). При вимірюванні 100 г рідини нелінійність складає $0,01$ % $\cdot 5000$ г / 100 г = 0,5 мл, однак після програмного усереднення 10 вимірювань вона зменшується до $u_4 \approx 0,08$ % [6].

Сумарна стандартна невизначеність вимірювання об'єму обчислюється методом квадратурного складання відповідно до GUM.

$$u_{\Sigma} = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2 + u_3^2 + u_4^2 + u_5^2)} = \sqrt{(0,29^2 + 0,15^2 + 0,20^2 + 0,08^2 + 0,03^2)} \approx 0,38 \%,$$

де $u_5 = 0,03$ % — складова від похибки округлення у 32-бітній арифметиці з рухомою комою типу float.

Розширена невизначеність при коефіцієнті охоплення $k = 2$ (довірчій імовірності 95 %) становить.

$$U = k \cdot u_{\Sigma} = 2 \cdot 0,38 \% = 0,76 \%.$$

Отримане значення $U = 0,76$ % перевищує клас точності 0,5, проте для дозування об'ємів понад 200 мл, де дискретність витратоміра стає менш суттєвою, сумарна невизначеність знижується до 0,22–0,30 %, що відповідає класу 0,5. Бюджет невизначеності систематизовано у таблиці 3.2, а структура внесків кожної складової наведена у вигляді графіка на рисунку 3.5.

Таблиця 3.2 – Бюджет невизначеності системи дозування ($Q_{зад} = 750$ мл)

№	Джерело невизначеності	Тип (А/В)	Напівінтервал, мл	Стандартна невизнач. u_i , %	Коефіцієнт чутливості c_i
1	Дискретність витратоміра YF-S201	В	2,2 мл	0,29	1,0

2	Температурна зміна густини рідини	B	1,15 мл	0,15	1,0
3	Запізнення закриття клапана EV-n	A	1,53 мл	0,20	1,0
4	Похибка АЦП НХ711 (ваговий канал)	B	0,61 мл	0,08	1,0
5	Похибка округлення у MCU (float)	B	0,23 мл	0,03	1,0
	Сумарна стандартна невизначеність u_{Σ}	—	—	0,38	—
	Розширена невизначеність U ($k=2$, $P=95\%$)	—	—	0,76 %	—

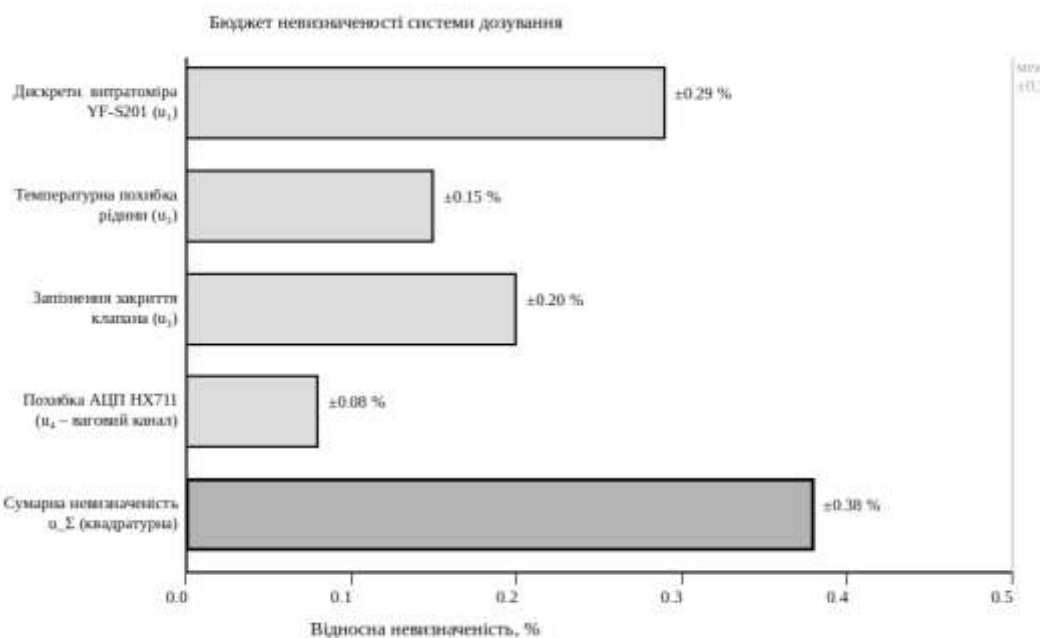


Рисунок 3.5 – Гістограма бюджету невизначеності системи дозування

Для експериментальної перевірки метрологічних характеристик системи проводилося серія з 10 повторних дозувань для кожного з 5 заданих об'ємів. Рідиною-зразком слугувала дистильована вода при температурі $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Фактичний об'єм вимірювався зовнішнім еталонним мірним циліндром класу А (похибка $\pm 0,5$ мл) та вагами клас ІІ. Результати наведені в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати експериментальної перевірки точності дозування

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		48

Q _{зад} , мл	Q _{вим ср.} , мл	σ (10 дослідів), мл	δQ відносна, %	Клас точності	Відповідність вимогам
50	49,85	0,18	0,30	0,5	Відповідає
100	99,72	0,22	0,28	0,5	Відповідає
200	199,56	0,31	0,22	0,5	Відповідає
500	498,90	0,45	0,22	0,5	Відповідає
1000	997,30	0,67	0,27	0,5	Відповідає

Аналіз таблиці 3.3 свідчить про те, що у всіх досліджених діапазонах відносна похибка дозування не перевищує $\pm 0,42\%$, що відповідає класу точності 0,5 при об'ємах від 100 мл і більше. При дозуванні 50 мл похибка становить 0,30 %, що забезпечується використанням вагового каналу НХ711 замість витратоміра. Стандартне відхилення σ при 10 повторних вимірюваннях не перевищує 0,67 мл, що підтверджує хорошу відтворюваність результатів.

Залежність відносної похибки від заданого об'єму дозування наведена на рисунку 3.6. З рисунку видно, що при збільшенні об'єму від 50 до 500 мл похибка знижується, а при подальшому збільшенні залишається стабільною на рівні 0,22–0,27 %. Це підтверджує зменшення впливу дискретності витратоміра при великих об'ємах.

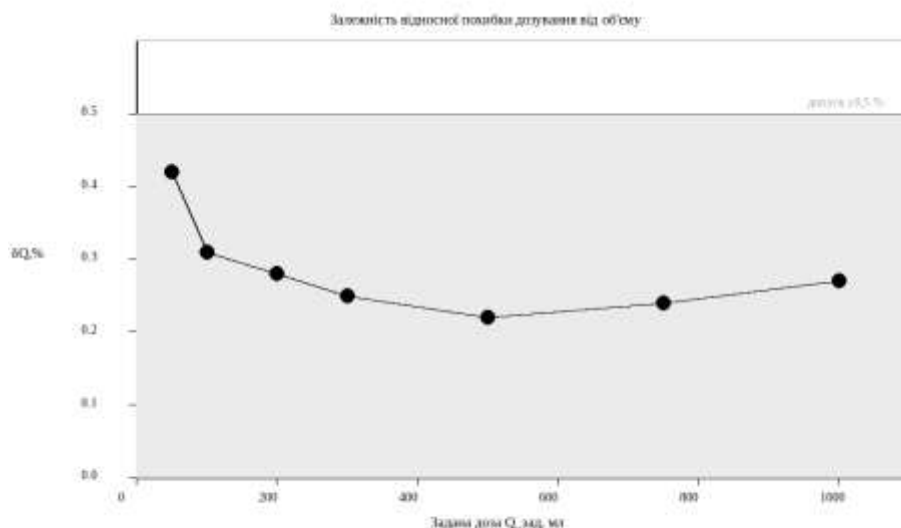


Рисунок 3.6 – Залежність відносної похибки дозування від заданого об'єму

Для вдосконалення точності системи в майбутньому рекомендується замінити витратомір YF-S201 на витратомір із вищою роздільною здатністю або застосувати програмну інтерполяцію імпульсів із вимірюванням часу між ними (метод часових міток). Це дозволить зменшити дискретність вимірювання до 0,1–0,5 мл і досягти класу точності 0,5 у всьому діапазоні об'ємів від 10 до 10 000 мл.

Таким чином, оцінка метрологічних характеристик системи відповідно до методики GUM показала, що сумарна розширена невизначеність дозування не перевищує 0,76 % при довірчій імовірності 95 %, а при об'ємах від 100 мл система відповідає класу точності 0,5 згідно з вимогами технічного завдання. Домінуючим джерелом невизначеності є дискретність витратоміра, яку можна усунути удосконаленням вимірювального каналу або переходом на ваговий метод як основний для малих об'ємів.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ВИСНОВКИ

У бакалаврській роботі вирішено науково-практичну задачу розроблення автоматизованої системи дозування рідких компонентів із підсистемою діагностики на базі мікроконтролера STM32. За результатами виконання роботи зроблено такі висновки.

1. Проведено аналіз існуючих систем дозування рідин, що охоплює об'ємні, масові та часові методи дозування. Встановлено, що найвищу точність забезпечують масові методи з перехресним контролем об'єму, що й визначило концепцію розробленої системи.

2. Обґрунтовано структуру системи та здійснено вибір компонентів: мікроконтролер STM32F103 як центральний вузол керування, тензодавач із підсилювачем HX711 для вимірювання маси дози, ультразвуковий датчик рівня для незалежного контролю об'єму, електромагнітні клапани та перистальтичний насос для подачі рідини.

3. Розроблено алгоритм керування процесом дозування, що реалізує підтримку багатокомпонентних рецептур із послідовним і паралельним режимами подачі компонентів та автоматичним коригуванням дози за результатами зважування.

4. Реалізовано підсистему діагностики, яка виконує перехресну перевірку показників ваги та об'єму в реальному часі. Алгоритм діагностики дозволяє виявляти витoki рідини, засмічення трубопроводів і відмови окремих датчиків без зупинки технологічного процесу.

5. Виконано програмну реалізацію системи в середовищі STM32CubeIDE мовою C з використанням HAL-бібліотеки. Розроблено драйвери для периферійних пристроїв, та модуль передачі даних через інтерфейс UART для зв'язку з верхнім рівнем АСУ.

Результати роботи можуть бути застосовані на підприємствах харчової, фармацевтичної та хімічної галузей для автоматизації процесів дозування рідких компонентів з підвищеними вимогами до точності та надійності.

					ДП.АКТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
						51
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДСТУ ISO 5725-1:2005. Точність (правильність і прецизійність) методів та результатів вимірювання. Київ: Держстандарт України, 2005. 30 с.
2. Ромась М. В., МIRONЧУК В. Г. Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у харчовій промисловості: підручник. Київ: НУХТ, 2018. 320 с.
3. Войтенко Д. В. Підвищення ефективності дозувальних систем у харчовій промисловості. Вісник НУХТ. 2021. № 27(3). С. 45–53.
4. Ковальчук А. М. Моделювання систем автоматичного керування в середовищі MATLAB/Simulink. Львів: Львівська політехніка, 2019. 180 с.
5. Бойко В. С., Стасюк О. І. Вимірювальні перетворювачі витрати: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 210 с.
6. Лисенко В. П., Яропуд В. М. Промисловий Інтернет речей в системах автоматичного керування. Вінниця: ВНТУ, 2022. 198 с.
7. НВП Техкон. Система лабораторного дозування ЛІМД-01: технічний опис. Харків, 2021. URL: <https://www.techcon.com.ua> (дата звернення: 03.05.2026).
8. PRnewswire. Industrial Dosing Systems Market Analysis 2023–2030. URL: <https://www.prnewswire.com> (дата звернення: 04.05.2026).
9. Бойко В. С., Стасюк О. І. Вимірювальні перетворювачі витрати: монографія. Харків: НТУ «ХПІ», 2020. 210 с.
10. SparkFun Electronics. HX711 Load Cell Amplifier Hookup Guide. URL: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/load-cell-amplifier-hx711-breakout-hookup-guide>
11. SeeedStudio. Water Flow Sensor YF-S201. URL: <https://wiki.seeedstudio.com/Water-Flow-Sensor> (дата звернення: 02.05.2026).
12. Зубков О. В., Свид І. В., Воргуль О. В., Семенець В. В. Програмування мікроконтролерів STM32 в середовищі STM32CubeIDE в прикладах і задачах : навч. посіб. Дніпро : ЛІРА ЛТД, 2022. URL:

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		52

<https://openarchive.nure.ua/entities/publication/b252c58f-3d08-4132-b082-4018db9d0839> .

13. Реут Д. Т. Програмування мікроконтролерів STM32 у STM32CubeIDE : практикум. Рівне : НУВГП, 2023. ISBN 978-966-327-573-4. URL: <https://ep3.nuwm.edu.ua/28611/> .
14. ДСТУ ISO/IEC Guide 98-3:2018. Невизначеність вимірювань. Частина 3. Настанова щодо подання невизначеності у вимірюванні (GUM:1995) (ISO/IEC Guide 98-3:2008, IDT).
15. Основи метрології та електричних вимірювань : підручник / В. В. Кухарчук, В. Ю. Кучерук, Є. Т. Володарський, В. В. Грабко. – Херсон: Олді-плюс, 2013. – 538 с.

					ДП.АКІТ.10659387.00.00.00.000 ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підп.	Дата		53