Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Розроблення інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для підготовки питної води
(тема)

Виконав:
здобувач 4 року навчання,
групи АКТАКІТ-21-1

Даніїл ДЕРЕВ'ЯНКО
(власне ім'я, прізвище)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва спеціальності)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Ірина СЕЗОНОВА
(посада, ім'я, прізвище)

Допускається до захисту

Завідувач кафедри _____ НЕВЛЮДОВ І. Ш.
(підпис) (прізвище,ініціали)

2025

Я, Дерев’янко Данііл Ігорович, як здобувач вищої освіти ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавав і не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Я не використовував штучний інтелект для підготовки кваліфікаційної роботи.

Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

«19» червня 2025 Данііл ДЕРЕВ’ЯНКО

Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет АКТ

Кафедра КІТАР

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва)

Тип програми освітньо-професійна

Освітня програма Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
(повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:
Зав. кафедри _____
(підпис)
«28» квітня 2025 р.

ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві Дерев'янко Даніїлу Ігоровичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи Розроблення інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для підготовки питної води
затверджена наказом університету від 19.05.2025 №390 Ст.
2. Термін подання здобувачем роботи до екзаменаційної комісії 27.06.2025р
3. Вихідні дані до роботи
3.1 Призначення системи: забезпечення безопасної дезинфекції води шляхом автоматичного дозування хлорагенту; 3.2 Функції: контроль об'єму води, автоматизація дозування шляхом регулювання виконавчих пристроїв;
3.3 Мова програмування: C++/C.
4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі
4.1 Вступ, актуальність роботи;
4.2 Визначення мети, предмету та об'єкту розробки;
4.3 Аналіз методів контролю якості питної води з використанням автоматизованих пристроїв.
4.4 Аналіз існуючих інтелектуальних систем управління дозуванням хлорагента в питній воді
4.5 Проєктування автоматичної системи дозування хлорагенту для питної води
4.6 Створення імітаційної моделі системи автоматизації дозування хлорагенту в середовищі Wokwi
4.7 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакати комп'ютерних ілюстрацій (п.5 включається до завдання за рішенням випускової кафедри) Графічний матеріал у вигляді презентації.

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1)

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз методів контролю якості питної води з використанням автоматизованих пристроїв	07.04 – 15.04.2025	виконано
2	Аналіз існуючих інтелектуальних систем управління дозуванням хлорагента в питній воді	16.04 – 25.04.2025	виконано
3	Вибір модулів та компонентів для системи	28.04 – 17.05.2025	виконано
4	Розрахунки для системи	18.05 – 21.05.2025	виконано
5	Створення імітаційної моделі системи автоматизації дозування хлорагенту в середовищі Wokwi	24.05 – 17.06.2025	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	18.06 – 20.06.2025	виконано

Дата видачі завдання 28.04.2025р.

Здобувач _____ Даніїл ДЕРЕВ'ЯНКО
(підпис)

Керівник роботи _____ проф. Ірина СЕЗОНОВА
(підпис) (прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить: 80с, 3 табл., 22 рис, 28 джерел.

ПИТНА ВОДА, ХЛОРУВАННЯ, СИСТЕМА АВТОМАТИЗАЦІЇ, ДОЗУВАННЯ ХЛОРАГЕНТУ, РОЗПОДІЛ ДОЗУВАННЯ.

Мета роботи – розробка автоматичної системи дозування хлору для підготовки питної води.

Об’єкт розробки – процеси керування пристроями дозування.

Предмет розробки – автоматична система додавання хлорагенту для питної води.

У роботі наведено:

– аналіз існуючих промислових систем автоматичних дозаторів хлору та розглянуто автоматизовані методи вимірювання хлору;

– обґрунтовано вибір апаратних засобів для реалізації автоматичної системи;

– проведено розрахунки мінімальної напруги джерела живлення для системи та необхідної кількості дозування хлору.

На основі вибору компонентів було створено структурну схему системи для розуміння взаємодії між об’єктами. Розроблено алгоритм роботи програми та створено імітаційну модель автоматизації дозування в онлайн симуляторі.

ABSTRACT

Explanatory note: 80p, 3 tabl., 22 pic, 28 sources.

DRINKING WATER, CHLORINATION, AUTOMATION SYSTEM, CHLORINATING AGENT DOSING, DOSING DISTRIBUTION.

The purpose of the work is to develop an automatic chlorine dosing system for drinking water preparation.

The object of the development is the control processes of dosing devices.

The subject of the development is an automatic system for adding chlorinating agent for drinking water.

The work provides:

– analysis of existing industrial systems of automatic chlorine dispensers and consideration of automated methods of chlorine measurement;

– justification of the choice of hardware for the implementation of the automatic system;

– calculations of the minimum voltage of the power source for the system and the required amount of chlorine dosing were carried out.

Based on the components choice, a structural diagram of the system was created to understand the interaction between objects. The algorithm of the program operation was developed and a simulation model of dosing automation was created in an online simulator.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень 9
Вступ 10
1 Аналіз автоматизованих методів контролю якості води та існуючих систем дозування хлорагенту 11
1.1 Аналіз показників якості питної води 11
1.2 Аналіз методів контролю якості питної води з використанням автоматизованих пристроїв 15
1.3 Аналіз існуючих інтелектуальних систем управління дозування хлорагента в питній воді 19
2 Проєктування інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для питної води 24
2.1 Вибір основних модулів та компонентів системи 24
2.2 Розробка структурної схеми системи 34
2.3 Розрахунки для системи 35
2.3.1 Розрахунок живлення для системи 36
2.3.2 Розрахунок рідкого хлору для необхідної кількості дозування у воду 39
2.3.3 Дослідження стійкості лінійних систем автоматичного управління 40
3 Створення імітаційної моделі системи автоматизації дозування хлорагенту в середовищі Wokwi 43
3.1 Аналіз середовища для симуляції Wokwi 43
3.2 Розробка алгоритму роботи 45
3.3 Реалізація роботи автоматичної системи 46
3.4 Охорона праці 56
Висновки 58
Перелік джерел посилання 59

Додаток А Код програми 63
Додаток Б Апробація роботи 72
Додаток В Демонстраційний матеріал 79

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

РК – рідкокристалічний;

LED – light-emitting diode;

LCD – рідкокристалічний дисплей;

ОВП – окисно-відновлювальний потенціал;

ABS – ударостійка технічна термопластична смола;

TDS – Total Dissolved Solids;

PPM – Parts Per Million;

API – Application Programming Interface.

ВСТУП

У сучасних умовах стрімкого розвитку промисловості та аграрного сектору питання забезпечення населення доброякісною питною водою набуває особливої актуальності. Одним з найважливіших етапів у системі для підготовки питної води є знезараження води, що забезпечить її безпечність для здоров'я людини.

Найпоширенішим методом дезинфекції питної води є хлорування, яке, за належним контролем, дає змогу ефективно знешкоджувати патогенні мікроорганізми. Водночас, надмірне або недостатнє дозування хлорагенту може мати серйозні наслідки для здоров'я людини.

Актуальність теми зумовлена необхідністю підвищення ефективності й точності процесів хлорування шляхом впровадження сучасних технологій автоматизації, зокрема – інтелектуальних систем управління. Використання таких рішень дозволить не лише забезпечити дозування хлорагенту в режимі реального часу, але й підвищити надійність та безпеку системи водопостачання.

Мета роботи – розроблення автоматичної системи дозування хлорагенту для безпечнего знезараження питної води в режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – процес підготовки питної води шляхом хлорування.

Предмет дослідження – інтелектуальна система автоматизації дозування хлорагенту, призначена для оптимізації процесу знезараження води.

Кваліфікаційна робота виконана згідно ДСТУ 3008 – 15 [1], а також з методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами першого (бакалаврського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» [2]. Матеріали роботи опубліковані у [3].

1 АНАЛІЗ АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТОДІВ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВОДИ ТА ІСНУЮЧИХ СИСТЕМ ДОЗУВАННЯ ХЛОРАГЕНТУ

Контроль якості питної води є дуже важливою складовою для підготовки води, оскільки це зможе забезпечити безпеку та відповідність води санітарним вимогам. У сучасних умовах, коли потреба в безперервному моніторінгу якості води зростає, дедалі ширше застосовується автоматизовані прилади та системи контролю, що дозволяють оперативно реагувати на змінні у складі води та забезпечити надійне дозування реагентів, зокрема хлорагентів.

1.1 Аналіз показників якості питної води

Для початку, потрібно зрозуміти які показники у воді повинні бути у нормі та що саме перевіряють для узгодження безпеки питної води. У таблиці 1.1 наведений перелік санітарно-хімічних показників безпечності та якості питної води за державними санітарними нормами та правилами «Гігієнічної вимоги до питної води, призначеної для споживання людиною».

Таблиця 1.1 – Санітарно-хімічні показники безпечності та якості питної води [4]

№	Найменування показників	Одиниці виміру	Нормативи для питної води		
			водопровідної	з колодязів	фасованої, з пунктів розливу та бюветів
1	2	3	4	5	6
1. Органолептичні показники					
1	Запах: при t 20 °С при t 60 °С	бали	≤ 2 ≤ 2	≤ 3 ≤ 3	≤ 0 (2)[β] ≤ 1 (2)[β]
2	Забарвленість	градуси	≤ 20–35[ρ]	≤ 35	≤ 10 (20)[β]

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
3	Каламутність	нефелометрична одиниця каламітності (1 НОК = 0,58 мг/л)	≤ 1,0–3,5[ρ] ≤ 2,6–3,5[ρ] – для підземного вододжерела	≤ 3,5	≤ 0,5 (1,0)[β]
4	Смак і присмак	бали	≤ 2	≤ 3	≤ 0 (2)[β]
2. Фізико-хімічні показники					
а) неорганічні компоненти					
5	Водневий показник	Одиниці pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5 (>= 4,5)[Ω]
6	Діоксид вуглецю	%	не визначається	не визначається	0,2-0,3 – для слабогазованої 0,31-0,4 – для середньо-газованої > 0,4 – для сильногазованої
7	Залізо загальне	мг/л	≤ 0,2-1,0[ρ]	≤ 1,0	≤ 0,2
8	Загальна жорсткість	ммоль/л	≤ 7,0-10,0[ρ]	≤ 10,0	≤ 7,0
9	Загальна лужність	ммоль/л	не визначається	не визначається	≤ 6,5
10	Йод	мкг/л	не визначається	не визначається	≤ 50
11	Кальцій	мг/л	не визначається	не визначається	≤ 130
12	Маґній	мг/л	не визначається	не визначається	≤ 80
13	Марганець	мг/л	≤0,05-0,5[ρ]	≤0,5	≤ 0,05
14	Мідь	мг/л	≤ 1,0	не визначається	≤ 1,0
15	Поліфосфати (за PO_4^{3-})	мг/л	≤ 3,5	не визначається	≤ 0,6 (3,5)[β]
16	Сульфати	мг/л	≤ 250-500[ρ]	≤ 500	≤ 250
17	Сухий залишок	мг/л	≤ 1000-1500[ρ]	≤ 1500	≤ 1000
18	Хлор залишковий вільний	мг/л	≤0,5	≤ 0,5	≤ 0,05
19	Хлориди	мг/л	≤ 250-350[ρ]	≤ 350	≤ 250

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
20	Цинк	мг/л	≤ 1,0	не визначається	≤ 1,0
б) органічні компоненти					
21	Хлор залишковий зв'язаний	мг/л	≤ 1,2	≤ 1,2	< 0,05
3. Санітарно-токсикологічні показники					
а) неорганічні компоненти					
22	Алюміній**	мг/л	≤ 0,2 (0,50)$^{\mu}$	не визначається	≤ 0,1
23	Амоній	мг/л	≤ 0,5-2,6$^{\rho}$	≤ 2,6	≤ 0,1 – (1,2)$^{\beta,\ \rho}$
24	Діоксид хлору	мг/л	≥ 0,1	не визначається	не визначається
25	Кадмій**	мг/л	≤ 0,001	не визначається	≤ 0,001
26	Кремній**	мг/л	≤ 10	не визначається	≤ 10
27	Миш'як**	мг/л	≤ 0,01	не визначається	≤ 0,01
28	Молібден**	мг/л	≤ 0,07	не визначається	≤ 0,07
29	Натрій**	мг/л	≤ 200	не визначається	≤ 200
30	Нітрати (за NO_3)	мг/л	≤ 50	≤ 50	≤ 10 (50)$^{\beta}$
31	Нітрити**	мг/л	≤ 0,5 (0,1)$^{\alpha}$	≤ 3,3	≤ 0,5 (0,1$^{)\eta}$
32	Озон залишковий	мг/л	0,1-0,3	не визначається	не визначається
33	Ртуть*	мг/л	≤ 0,0005	не визначається	≤ 0,0005
34	Свинець**	мг/л	≤ 0,01	не визначається	≤ 0,01
35	Срібло**	мг/л	не визначається	не визначається	≤ 0,025
36	Фториди**	мг/л	для кліматичних зон: IV ≤ 0,7 III ≤ 1,2 II ≤ 1,5	≤ 1,5	≤ 1,5$^{\omega}$

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6
37	Хлорити	мг/л	≤ 0,2	не визначається	не визначається
б) органічні компоненти					
38	Поліакриламід залишковий**	мг/л	≤ 2,0	не визначається	≤ 2,0
39	Формальдегід**	мг/л	≤ 0,05	не визначається	≤ 0,05
40	Хлороформ**	мкг/л	-	не визначається	≤ 6
в) інтегральний показник					
41	Перманганатна окиснюваність	мг/л	-	≤ 5,0	≤ 2,0 (5,0)$^{\beta}$

де **μ** – норматив, зазначений у дужках, установлюється для питної води, обробленої реагентами, що містять алюміній;

α – норматив, зазначений у дужках, установлюється для обробленої питної води, крім обробленої методом хлорування з преамонізацією;

β – норматив, зазначений у дужках, установлюється для питної води фасованої газованої, питної води з пунктів розливу та бюветів;

Ω – pH для газованої питної води;

ω – норматив встановлюється виключно для питної води фасованої. Для питної води з пунктів розливу та бюветів норматив встановлюється за кліматичними зонами;

η– норматив, зазначений у дужках, установлюється для негазованої питної води;

ρ – максимальний рівень нормативів застосовується в окремих випадках, що пов’язані з особливими природними умовами та технологією підготовки питної води, що не дозволяє довести якість питної води до жорсткішого нормативу, про що повинно бути зазначено у технологічному регламенті або іншому документі з описом технологічного процесу виробництва питної води;

* – речовини першого класу небезпеки;

** – речовини другого класу небезпеки [4].

Із основних показників варто звернути увагу на:

– водневий показник (pH), який допомагає визначити різні процеси, які проходять у воді, а також походження речовин, які в ній розчинені [5];

– жорсткість, яка визначає скільки в воді солей кальцію і магнію;

– каламутність, яка визначає наскільки вода прозора;

– запах, який може визначити чи забруднена вода (за суб'єктивною думкою людини);

– лужність, яка показує, скільки речовин, які гасять кислоту;

– хлориди (тобто солі ґрунту або стоків);

– окиснюваність, яка визначає скільки в воді органіки, яку можна окислити [6];

– залишковий хлор, який є головним параметром для контролю ефективності дизенфекції води.

1.2 Аналіз методів контролю якості питної води з використанням автоматизованих пристроїв

Розглянемо деякі методи контролю якості питної води з використанням автоматизованих пристроїв. Визначимо, які пристрої можуть вимірювати той чи інший показник.

Турбідиметр (рис. 1.1) – вимірювальний пристрій, завдяки якому можна визначити каламутність рідини. Принцип його роботи полягає у тому, що коли працює турбідиметр, він пропускає світло через зразок рідини, що вимірюється, а потім вимірює кількість світла, розсіяного зваженими частинками. Кількість розсіяного світла прямо пропорційна каламутності рідини. Джерелом світла в каламутності зазвичай є лампа з вольфрамовою ниткою або світлодіод (LED).

Розсіяне світло виявляється фотоелементом або фотодіодом. Потім кількість розсіяного світла перетворюється на показники, зазвичай на екрані дисплея [7]. Сам метод вимірювання називається турбідиметрією.

Рисунок 1.1 – Портативний турбідиметр TN500 [8]

Для вимірювання кольоровості води використовуються колориметри (рисунок 1.2).

Принцип роботи заснований на порівнянні інтенсивності забарвлення проби води з еталонною шкалою. Завдяки виміру інтенсивності фарбування можна дізнатися чи є у воді вміст хімічних речовин, наприклад заліза, хлору, марганцю та ін. Вимірюється у градусах забарвленості. Сучасні прилади дозволяють вимірювати кольоровість у широкому діапазоні – від 5 до 500 градусів [9]. Цей метод вимірювання називають колориметричним методом.

Рисунок 1.2 – Цифровий колориметр PASCO PS-2179 [10]

pH-метр (рис. 1.3) – це електронний пристрій, що складається зі спеціального вимірювального зонда (скляного електрода), приєднаного до електронного вимірювача, який має вигляд трубки, комплектується на кінці кулькою з тонкими стінками та характеризується досить великим опором.

Також цей пристрій має вимірювальний блок, який обробляє сигнал від електрода та відображає значення pH [11]. Такий метод вимірювання називають потенціометричним, таке як цей пристрій вимірює різницю електричних потенціалів між двома електродами.

Рисунок 1.3 – Портативний pH-метр XS pH 70 Vio + 201T [12]

Визначити вміст залишкового або загального хлору можна завдяки амперометричному методу, який полягає у занурені у розчин, що містить окислювач, два електроди генерують електричний струм, який пропорційний концентрації окислювачів. Електроди складаються з міді (катода) та платини (анод). Катод створює негативну напругу в аноді – позитивне. Ці електричні сигнали повинні оброблятися відповідним електронним блоком. Хоча невеликої (кілька мг/л), генерація напруги призводить до окислення поверхні електрода (включаючи катод) через безперервне тертя скляної кулі. Таким пристроєм може бути датчик хлору, який працює за цим методом (рис. 1.4) [13].

Рисунок 1.4 – Приклад датчику для вимірювання залишкового хлору [13]

1.3 Аналіз існуючих інтелектуальних систем управління дозування хлорагента в питній воді

Серед методів знезараження питної води, метод додавання хлорагенту є одним з самих поширених та ефективних методів. Система дозування хлору у воді полягає у додаванні хлору або його похідних, як приклад гіпохлорит натрію. Цей процес приводить до руйнування вірусів та інших мікроорганізмів, які можуть бути присутніми у воді, що дає змогу знизити ризик захворювань, пов’язаних з водою [14].

На рисунку 1.5 наведено насос-дозатор BT PH-RX-CL/M для контролю рівня pH / ОВП / хлору.

Рисунок 1.5 – Насос дозатор BT PH-RX-CL/M з вбудованим контролером pH / ОВП / хлору [15]

Насос-дозатор BT PH-RX-CL/M із вбудованим контролером дозволяє точно додавати реагенти на основі pH, RedOx (окисно-відновювального потенціалу Rx) або хлору Cl. Це програмований дозатор з мікропроцесорним управлінням і вбудованим контролером, продуктивність якого регулюється частотою імпульсів (вприскувань). Дозатор має два режими дозування: ручний та пропорційний. У ручному режимі продуктивність встановлюється за допомогою кнопок меню в діапазоні від 0% до 100%. Насос буде дозувати із заданою продуктивністю і зупиниться при досягненні значення точки установки.

В пропорційному «PROP» режимі насос працюватиме на максимальній частоті, доки не буде досягнуто цієї точки, після чого почнеться пропорційне дозування. Мікропроцесор автоматично відстежуватиме продуктивність і зупинятиме насос на заданій точці. Коли рівень відходить від загального значення, насос знову починає дозування.

Дозатор виконаний в алюмінієвому корпусі, який покритий двома шарами захисної антикислотної фарби. На панелі управління насоса присутні: 5

сенсорних кнопок управління, меню в базовому і розширеному варіантах і 3 Led-індикатора. Всі програмовані параметри відображаються на РК-дисплеї.

Панель закрита прозорою пластиковою кришкою [15] вигляд панелі управління наведений на рисунку 1.6.

Рисунок 1.6 – Загальний вигляд панелі управління насосу дозатора BT PH-RX-CL/M [15]

Переваги насосу-дозатора:

– немає потреби у зовнішньому контролері;

– зрозуміле меню налаштувань;

– постійний моніторинг водневого показнику для правильного додавання хлору;

– можна використовувати як в побутових так і в промислових системах.

Недоліки насосу дозатора:

– підходить не для великих об’ємів води;

– має чутливість до занадто забрудненої, жорсткої води.

Наступна система – Oxiperm Pro OCD-162 (рис. 1.7), являє собою установку для виробництва і дозування діоксиду хлору методом, заснованому на реакціх між хлоритом натрію і соляною кислотою, що вимагає мінімальної кількості хімікатів і захищає від корозії зі співвідношенням подачі реагентів 1:1 [16].

Рисунок 1.7 – Система дезинфекції Oxiperm Pro OCD-162 [16]

На рисунку 1.8 наведено установку без кришок та периферійних пристроїв.

Рисунок 1.8 – Система дезинфекції Oxiperm Pro OCD-162 [17]

Пристрій для дезинфекції Oxiperm Pro OCD-162 використовується для виготовлення та дозування розчину діоксиду хлору для дезинфекції питної та

технічної води. Принцип отримання діоксиду хлору в реакторі: вода, соляна кислота та хлорит натрію додаються в реактор до заданого рівня. Під час реакції виходить розведений розчин діоксиду хлору. Далі у реактор подається вода. Готовий розчин з концентрацією діоксиду хлору 2 грами на літр води перетікає в нижній резервуар по трубці (переливною), розташованій в середині хімічного реактора. З дозувального резервуару дозувальний насос подає порцію розчину діоксиду хлору до вузла впорскування, де він впорскується в основний трубопровід для води, яку необхідно продезінфікувати [17].

Переваги такої системи:

– має високу ефективність знезараження води;

– компактна конструкція для встановлення в обмежених просторах;

– менше споживання реагентів;

– може обробляти до 150 $м^3$ води на годину при концентрації 0,4 мг/л діоксиду хлору.

З недоліків такої системи маємо:

– висока вартість;

– має вимоги до умов експлуатації;

– потребує регулярного технічного обслуговування при безперервній роботі.

2 ПРОЄКТУВАННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДОЗУВАННЯ ХЛОРАГЕНТУ ДЛЯ ПИТНОЇ ВОДИ

Ефективне знезараження питної води потребує точного та стабільного дозування хлорагенту залежно від поточних характеристик води. Процес дозування хлору є важливим етапом і потребує точних розрахунків витрат та пропорцій хлору та води. У зв’язку з цим виникає потреба у створені автоматичної системи для дозування хлору у питній воді.

Представлена модель має забезпечити:

– автоматичне зчитування параметрів води (таких як наявність води та ін.);

– розрахунок необхідної дози хлорагенту;

– подачу сигналу керуючих сигналів на виконавчий пристрій (в даному випадку насоси).

2.1 Вибір основних модулів та компонентів системи

Дана система дозування хлорагенту містить:

– мікроконтролер ESP-32;

– датчик хлору (TDS датчик);

– два датчика витрати води;

– два насоси: вихровий та перистальтичний;

– два модуля реле;

– резервуари для: води, рідкого хлору та готової води;

– I2C LCD дисплей 1602 20x4.

Розглянемо детальніше компоненти цієї системи.

ESP32 (рис. 2.1) – це потужна плата, що базується на мікроконтролері ESP32 і має вбудовані модулі WiFi та Bluetooth, що робить цю плату ідеальним вибором для проєктів Інтернету речей (IoT). Плата оснащена чіпом CH340, що

забезпечує зручне підключення до комп’юрера через USB, спрощуючи процес програмування та налаштування. ESP-32 підтримує двоядерну архітектуру, що забезпечує високу продуктивність, а також пропонує широкий спектр інтерфейсів, таких як GPIO, PWM, I2C, SPI та інші, для підключення різноманітних датчиків і пристроїв [18].

ESP-32 має наступні характеристики:

– операційна напруга: 3.3 В;

– струм: 0,24 А;

– чіп USB-UART: CH340;

– підтримка WiFi: IEEE 802.11 b/g/n;

– підтримка Bluetooth: Bluetooth v4.2 BR/EDR та BLE;

– пам’ять: 520 КБ SRAM;

– флеш-пам’ять: 4 МБ;

– GPIO піни: 34;

– PWM канали: 16;

– аналогові входи: 18 (ADC з розрядністю 12-біт);

– швидкість процесора: до 240 МГц (двоядерний Tensilica LX6);

– порти: USB для програмування (чіп CH340);

– робоча температура: від -40°C до +85°C;

– підтримка Arduino IDE та інших платформ;

– розміри: 58 мм x 31 мм.

Ціна (на 13.05.2025) складає 273 грн.

Чому саме ESP-32 кращий вибір на відміну від інших плат на базі Arduino (у випадку даної системи):

– може одночасно зчитувати дані з декількох датчиків;

– більш потужний та швидкий;

– компактніший;

– має більшу вбудовану пам’ять.

Рисунок 2.1 – Arduino ESP32 [18]

Модуль реле на 1 канал для Arduino (рис. 2.2) – це універсальний пристрій, призначений для вмикання та вимикання навантаження. Його особливість полягає в тому, що контакти замикаються фізично, подібно до звичайного вимикача.

Реле має наступні характеристики:

– максимальна напруга 250 вольтів / 10 амперів – змінний струм, 30 вольтів / 10 амперів – постійний струм;

– робоча напруга модуля: 5 В, 12 В, 24 В на вибір;

– модуль реле має перемичку для встановлення високого або низького рівня керування [19].

Ціна (на момент 13.05.2025) становить 40 грн за штуку.

Рисунок 2.2 – Модуль реле на 1 канал [18]

На рисунку 2.3 наведена водяна помпа JT-180A. Ця помпа відноситься до різновиду насоса з електродвигуном та може забезпечити забір води з різних ємностей. Сама помпа виконана у водонепроникному корпусі зі ступенем захисту IP68. Довжина живильного проводу дозволяє нанучити помпу в рідину на глубину до 1,5 метра.

Технічні характеристики:

– матеріал корпусу: ABS (ударостійка технічна термопластична смола);

– привід: електричний;

– застосування: занурювальний;

– потужність: 0.5 ~ 5 Вт;

– рівень шуму: 35 дБ;

– номінальний струм: 180 мА;

– робоча напруга: 4.5 ~ 12 В;

– висота підйому води: 40 ~ 250 см;

– продуктивність: 100 ~ 350 л/год;

– робоча температура: -20 ~ 90 °C;

– розміри: 44 х 37 х 38 мм [20].

Ціна (на 13.05.2025) становить 504 грн. Даний насос буде використовуватись для перекачування необробленої води.

Рисунок 2.3 – Водяна помпа JT-180A [20]

Для хлору був обраний менш потужний насос, а саме лабораторний дозувальний насос постійного струму 12В перистальтичний хімічний насос для води та рідини від компанії Yasoo (рис. 2.4).

Перистальтичний насос – це тип насосу, який використовується для перекачування різних рідин. Принцип його роботи полягає у тому, що коли рідина транспортується всередені гнучкої трубки з використанням ефективного принципу відкачування, що називається перистальтикою [21]. Цей насос, з переваг, має тиху роботу, він підходить для хімікатів та дозуючих добавок. Його просто відремонтувати, має невеликі габарити. Можна контролювати напрямок потоку за допомогою позитивного та негативного з’єднання, але для системи ця функція не знадобиться.

Технічні характеристики:

– матеріал: пластик;

– вага виробу: 0,04 кілограма;

– напруга: 12 вольт (постійний струм);

– тип: занурювальний;

– вага виробу: ≈ 40 грам;

– розміри виробу: 3,54 х 2,6 х 2,17 дюйма;

– трубка насоса (внутрішній діаметр): 3 мм;

– зовнішній діаметр: 5 мм;

– струм: 300 мА;

– робочі умови: 0-40 °C;

– швидкість: 19-100 мл/хв [22].

Ціна (на 13.05.2025) цього насосу складає 258 грн.

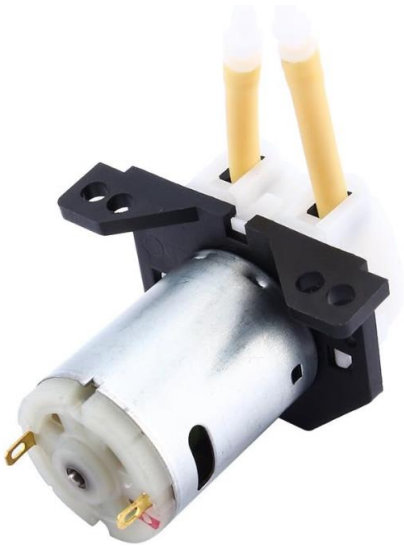

Рисунок 2.4 – Дозувальний перистальтичний насос для води від компанії Yasoo [22]

На рисунку 2.5 наведено TDS (Total Dissolved Solids) датчик DF-SEN0244 від виробника DFRobot для вимірювання залишку хлору. Це датчик, який вимірює скільки неорганічних солей, мінералів та органічних речовин розчинено у воді. Чим більше розчинених у воді речовин, таких як солі та мінерали, тим вища її електропровідність. На основі цього показника датчик визначає приблизний вміст розчинених твердих речовин у ppm (частинах на мільйон).

Датчик має наступні характеристики та комплект набору:

– комплектація: зонд / модуль / дроти;

– напруга живлення: 3,3...5В DC;

– застосування: для Arduino;

– точність виміру: ± 10% допустимої похибки (при 25 °C)

– вид датчику: TDS;

– поріг спрацьовування: від 0 до 1000 ppm;

– кількість каналів: 1 [23].

Ціна (на момент 13.05.2025) становить 873 грн.

Рисунок 2.5 – TDS датчик DF-SEN0244 [23]

На рисунку 2.6 наведений датчик витрати води YF-S401. Цей датчик буде використовуватися до обох насосів.

Характеристики датчику:

– робоча напруга: 5 - 18 В;

– споживаний струм: до 15 мА;

– вимірюваний діапазон витрати води: 0,3 - 6 л/хв;

– похибка вимірів: ±3%;

– робочий тиск: до 0,8 МПа = 8 бар = 7,9 ст. атм;

– робоча температура: 0 - 80 ° С;

– температура рідини: до 120 °С;

– габарити: 58х35х27 мм;

– вага: 37 г [24].

Ціна (на момент 13.05.2025) становить 108 грн.

Рисунок 2.6 – Датчик витрати води YF-S401 [23]

На рисунку 2.7 наведений прямий поплавковий датчик рівня води EP3508.

Поплавкові датчики працюють за дуже простим принципом: поплавок піднімається внаслідок дії вимірювальної рідини, і при досягненні певного рівня контакти замикаються. Вони мають вигляд компактного електронного блок із вбудованим стрижнем або кабелем. Для контакту зазвичай використовують геркон або мікроперемикач.

Найбільш популярними є датчики з герконом (герметичний контакт). Їх принцип роботи полягає у тому, що в стрижень датчика, зануреного в рідину, вбудовується герметичний контакт, а на нього встановлюється поплавець, вбудовується герметичний контакт, а на нього встановлюється поплавець у магнітному корпусі. Зазвичай встановлюють два геркони: один угорі, а інший унизу ємності. Коли рівень рідини підвищується або знижується, магнітний поплавок досягає геркона, замикаючи або розмикаючи контакти, залежно від призначення датчика [25].

Рисунок 2.7 – Прямий поплавковий датчик рівня води EP3508 [26]

Нижче наведені характеристики обраного поплавкового датчика (таблиця 2.1).

Таблиця 2.1 – Характеристики поплавкового датчика рівня води

Параметр	Значення
Тип датчика	Поплавковий, герконовий
Модель	EP3508
Робоча напруга	До 100 В DC або AC
Максимальний струм	0.5 А
Потужність комутації	До 10 Вт
Матеріал корпусу	Пластик
Довжина кабелю	350мм

Ціна поплавкового датчика (на момент 13.05.2025) становить 77 грн.

В якості пристрою для виводу інформації був взятий I2C LCD дисплей 20x4 для Arduino (рис. 2.8). I2C LCD дисплей – це текстовий РК екран, в який вбудований інтерфейс I2C для спрощеного підключення до мікроконтролеру.

Інтерфейс I2C використовує лише дві інформаційні лінії, а саме SDA для даних та SCL для тактового сигналу що робить підключення пінів економніше

навідміну від інших моделей дисплеїв, які потребують 8 пінів. Характеристики дисплею наступні:

– I2C адреса 0x27;

– чіп конвертера I2C: PCF8574A;

– кількість символів в рядку: 20;

– кількість рядків: 4;

– колір фону – жовтий, колір символів – чорний;

– контраст налаштовується підлаштовним резистором зі зворотного боку плати;

– живлення: 5В;

– розміри точки: 0.55 х 0.55 мм;

– крок точки: 0.60 х 0.60 мм;

– розміри символу: 2.96 х 4.75 мм;

– крок символів: 3.55 х 5.35 м;

– розміри: 98 х 60 х 20 мм [25].

Ціна (на момент 14.05.2025) становить 553 грн.

Рисунок 2.8 – LCD 2004 I2C символьний дисплей 20х4

Для кожного з насосів буде використовуватись силіконові трубки діаметром 10мм для насосу JT-180A та трубка діаметром 5мм для дозувального насосу від компанії Yasoo. Для резервуарів краще за все використовувати харчові каністри.

2.2 Розробка структурної схеми системи

Для ефективної роботи системи автоматичного дозування хлору у питній воді необхідна організація взаємодії всіх компонентів цієї системи. Структурна схема дозволяє наочно уявити принцип функціонування системи, від подачі необробленої води до контролю якості обробленої.

Структурна схема – це графічне зображення, яке показує основні частини (компоненти) системи та зв’язки між ними. Схему наведено на рисунку 2.9.

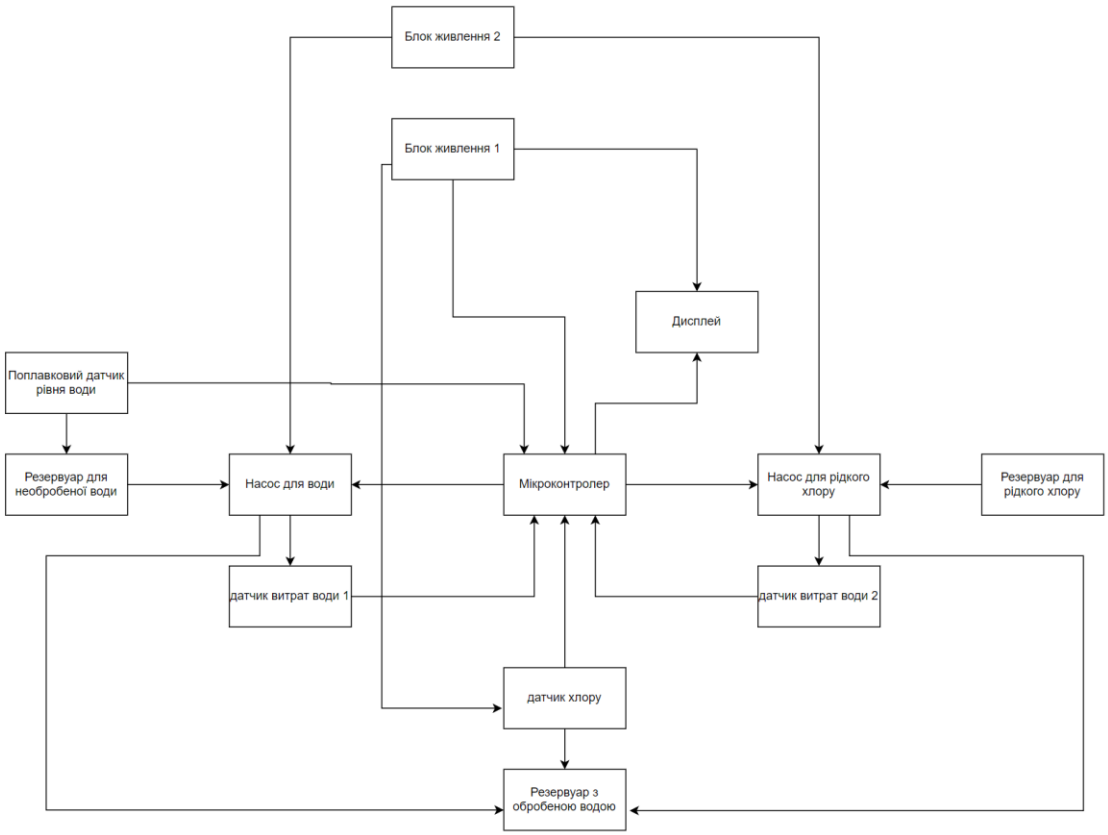

Рисунок 2.9 – Структурна схема інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для питної води

Робота системи починається з того, що поплавковий датчик рівня води вимірює наявність води у резервуарі і, якщо вода присутня, починається подача води із резервуару з необробленою водою за допомогою насоса JT-180A через реле.

Потік води проходить через датчик витрат води, який під’єднаний до насосу та передає інформацію про кількість води до мікроконтролера; другий датчик виконує функцію контролю для більш точного дозування рідкого хлору.

Мікроконтролер ESP-32 фіксує обсяг перекачаної води (до тих пір поки не дійде до потрібного значення) і відповідно запускає другий насос Yasoo DC 12V для перекачування рідкого хлору. Потік рідкого хлору також перевіряється через датчик витрат та надає інформацію у мікроконтролер. На виході до резервуару, де вже введена вода та рідкий хлор, стоїть датчик залишкового хлору. Він вимірює концентрацію хлору в обробленій воді та відправляє дані до ESP-32.

Після отримання даних, ESP-32 виводить отриману інформацію на дисплей.

2.3 Розрахунки для системи

В даному підрозділі проведено основні розрахунки, необхідні для коректної роботи автоматичної системи дозування хлору. Розрахунок живлення призначений для визначення потрібного джерела, що буде підживлювати систему, а саме в випадку даної системи для насосів та мікроконтролера з датчиками, які до них під’єднані. Розрахунки дозування рідкого хлору необхідні за для точного розуміння скільки необхідно буде закачати рідкої води щоб не перевищити допустимої норми концентрації хлору у питній воді.

2.3.1 Розрахунок живлення для системи

Для розрахунку потрібного блоку живлення для компонентів необхідно щоб виконувались умови:

$$P_{БЖ} \geq P_E;$$

$$I_{БЖ} \geq I_E,$$

де $P_{БЖ}$ – потужність блоку живлення;

P_E – загальна потужність елементів;

I_E – загальний струм елементів;

$I_{БЖ}$ – струм блоку живлення.

Для знаходження електричної потужності елементів для першого блоку живлення беруться такі елементи:

– мікроконтролер ESP32 (5В; 0,24А);

– датчик хлору DF-SEN0244 (5В; 0,004А);

– датчики витрат води YF-S401 (по 5В; 0,015А);

– два модуля реле (по 5В; 0,14А);

– I2C LCD дисплей (5В; 0,2А; 1Вт).

Розрахунок електричної потужності елементів для блоку живлення виконується за формулою:

$$P_{Ea} = \sum P_{a1} + P_{b2} + \cdots + P_{ca}, \quad (2.1)$$

де $P_{a1} \ldots P_{ca}$ – потужність елементів системи для блоку живлення.

Розрахунок електричної потужності знаходимо за формулою (2.2):

$$P = U \cdot I, \quad (2.2)$$

де P – потужність;

U – напруга;

I – струм.

Тоді знайдемо потужність для мікроконтролера (P_{11}):

$$P_{11} = 5 \cdot 0{,}24 = 1{,}2 \text{ Вт.}$$

Для датчика хлору (P_{12}):

$$P_{12} = 5 \cdot 0{,}004 = 0{,}02 \text{ Вт.}$$

Для датчиків витрат води (P_{13}):

$$P_{13} = 5 \cdot 0{,}015 = 0{,}075 \text{ Вт.}$$

Для модулів реле (P_{14}):

$$P_{13} = 5 \cdot 0{,}014 = 0{,}07 \text{ Вт.}$$

Тож розрахунок електричної потужності для елеменів першого блоку живлення виглядає наступним чином:

$$\mathrm{P}_{E1} = 1{,}2 + 0{,}02 + 0{,}075 + 0{,}7 + 1 = 2{,}995 \approx 3 \text{ Вт.}$$

Для знаходження загального струму елементів використаємо формулу:

$$I_{Ea} = \sum I_{a1} + I_{b2} + \dots I_{ca}, \tag{2.3}$$

де $I_{a1} \dots I_{ca}$ – струм елементів системи.

Тоді:

$$\mathrm{I}_{E1} = 0{,}24 + 0{,}004 + 0{,}015 + 0{,}14 + 0{,}02 = 0{,}42 \text{ А}.$$

Це значить що блок живлення для першої системи P_{E1} має мати напругу мінімум 5 вольт, 0,6 ампери і 3 ват.

Для знаходження електричної потужності елементів для другого блоку живлення використовуються такі елементи:

– водяна помпа JT-180A (12В; 0,18А);

– перистальтичний насос Yasoo 12 DC (12В; 0,3А).

Розрахуємо електричну потужність для водяної помпи (P_{21}) та перистальтичного насосу (P_{22}) відповідно:

$$P_{21} = 12 \cdot 0{,}18 = 2{,}16 \text{ Вт};$$

$$P_{22} = 12 \cdot 0{,}3 = 3{,}6 \text{ Вт}.$$

Підставимо з формули (2.1) значення потужності і струму елементів та знайдемо електричну потужність елементів для другого блоку:

$$\mathrm{P}_{E2} = 2{,}16 + 3{,}6 = 5{,}76 \approx 6 \text{ Вт}.$$

Знайдемо загальний струм елементів для другого блоку живлення:

$$\mathrm{I}_{E2} = 0{,}18 + 0{,}3 = 0{,}5 \text{ А}.$$

Це значить, що для другого блоку живлення (для компонентів P_{E2}) мінімальні значення повинні бути наступними: 12 вольт, 6 ват, 0,5 ампер.

2.3.2 Розрахунок рідкого хлору для необхідної кількості дозування у воду

В даній роботі у якості рідкого хлору було обрано розчин гіпохлорит натрію з вмістом активного хлору 12%. Для того щоб розрахувати необхідну дозу рідкого хлору на 1 літр води, треба враховувати:

– необхідну концентрацію залишкового хлору в обробленій воді (0,5 мг/л);

– вміст активного хлору в розчині (12%).

Для виміру необхідної дози рідкого хлору використаємо формулу:

$$V_1 \cdot B_1 = V_2 \cdot B_2, \quad (2.4)$$

де V_1 – об’єм розчину хлору;

B_1 – концентрація рідкого хлору;

V_2 – кількість невідфільтрованої води;

B_2 – необхідна концентрація залишкового хлору у готовій воді.

Щоб розрахувати кількість рідкого хлору для очищення води використовуємо пропорцію та вирішимо рівняння:

$$V_1 \cdot 12\% = 1000\text{мл} \cdot 0{,}05\%;$$

$$12 \cdot V_1 = 50;$$

$$V_1 = 4{,}17 \text{ мл.}$$

Тож для одного літру невідфільтрованої води потрібно додати 4,17 мл рідкого хлору.

2.3.3 Дослідження стійкості лінійних систем автоматичного управління

Система автоматичного дозування хлорагенту застосовується для забезпечення стабільної та безпечної концентрації залишкового хлору в питній воді відповідно до санітарних норм. Такі системи дозволяють точно регулювати кількість реагенту залежно від витрат води або показників її якості, знижуючи ризик передозування чи недостатнього знезараження. Метою дослідження є визначення стійкості системи за алгебраїчним критерієм Гурвіца в якості прикладу.

Математичний вираз, який описує характеристичне рівняння безперервної лінійної системи автоматичного управління, записується у такій формі:

$$a_0\lambda^n + a_1\lambda^{n-1} + \cdots + a_n = 0, \qquad (2.5)$$

де λ – змінна, значення якої визначають стійкість системи;

a_i – задані коефіцієнти;

n – порядок системи.

Стійкість лінійної системи забезпечується тільки коли всі корені характеристичного рівняння мають від’ємні дійсні частини $Re\lambda_i < 0$.

У комплексній площині корені з негативними дійсними частинами розташовані ліворуч від уявної осі мають назву «лівими», а ті що мають дійсні частини – правими. Для дослідження стійкості за допомогою алгебраїчних критеріїв, потрібно перевірити виконання умови стійкості, тому що саме ця перевірка не потребує розрахунків та при невиконанні умови подальші розрахунки робити не потрібно.

За алгебраїчним критерієм Гурвіца, система буде стійкою тільки тоді, коли всі визначники Гурвіца додатні, а коефіцієнти характеристичного рівняння були дійсними та відмінними від нуля.

Щоб побудувати головний визначник Гурвіца, коефіцієнти характеристичного рівняння розташовують на головній діагоналі у порядку зростання їх індексів, починаючи з a_1 і закінчуючи a_n. Далі, у кожному стовпчику, при цьому рухаючись від елемента на головній діагоналі вгору, індекси коефіцієнтів збільшуються, а рухаючись вниз – зменшуються.

$$\Delta_n = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & a_n \end{vmatrix} \qquad (2.6)$$

При усуненні діагональних мінорів з головного визначника Гурвіца ми отримаємо визначники нижчих порядків:

$$\Delta_1 = a_1, \Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix}, \Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix}. \qquad (2.7)$$

З цього критерію Гурвіца, при n = 3 необхідна та стійка умова виглядає так: $a_0 > 0$, $\Delta_1 = a_1 > 0$, $\Delta_2 = a_1a_2 - a_0a_3 > 0$, $\Delta_3 = a_3\Delta_2 > 0$.

Для випадку системи автоматизації дозування хлорагенту для процесу дозування хлору складається з характеристичного полінома п’ятого порядку:

$$P(s) = s^5 + a_1s^4 + a_2s^3 + a_3s^2 + a_4s + a_5.$$

Включаючи елементи системи, припустимо, що: $a_1 = 3{,}5$, $a_2 = 6$, $a_3 = 5, a_4 = 2{,}5, a_5 = 0{,}8$.

Тоді матриця Гурвіца буде виглядати наступним чином:

$$\Delta = \begin{vmatrix} 3,5 & 5 & 0,8 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 2,5 & 0 & 0 \\ 0 & 3,5 & 5 & 0,8 & 0 \\ 0 & 1 & 6 & 2,5 & 0 \\ 0 & 0 & 3,5 & 5 & 0,8 \end{vmatrix}$$

Визначники матриці Гурвіца дорівнюють:

$$\Delta_1 = 3,5 > 0;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 3,5 & 5 \\ 1 & 6 \end{vmatrix} = 3,5 \cdot 6 - 1 \cdot 5 = 21 - 5 = 16 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 3,5 & 5 & 0,8 \\ 1 & 6 & 2,5 \\ 0 & 3,5 & 5 \end{vmatrix} = 3,5 \cdot 21,25 - 5 \cdot 5 + 0,8 \cdot 3,5 = 74,37 - 25 + 2,8$$

$$= 52,17 > 0;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} 3,5 & 5 & 0,8 & 0 \\ 1 & 6 & 2,5 & 0 \\ 0 & 3,5 & 5 & 0,8 \\ 0 & 1 & 6 & 2,5 \end{vmatrix} = 3,5 \cdot 26,32 - 5 \cdot 7,7 + 0,8 \cdot 7,95 =$$

$$= 92,13 - 38,5 + 6,36 = 60 > 0;$$

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 3,5 & 5 & 0,8 & 0 & 0 \\ 1 & 6 & 2,5 & 0 & 0 \\ 0 & 3,5 & 5 & 0,8 & 0 \\ 0 & 1 & 6 & 2,5 & 0 \\ 0 & 0 & 3,5 & 5 & 0,8 \end{vmatrix} = 3,5 \cdot 21,06 - 5 \cdot 6,16 + 0,8 \cdot 6,36 =$$

$$= 73,71 - 30,8 + 5,09 = 48 > 0.$$

Так як усі мінори вийшли із додатним значенням, можемо вважати, що задана система стійка за критерієм Гурвіца.

3 СТВОРЕННЯ ІМІТАЦІЙНОЇ МОДЕЛІ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ДОЗУВАННЯ ХЛОРАГЕНТУ В СЕРЕДОВИЩІ WOKWI

3.1 Аналіз середовища для симуляції Wokwi

Wokwi simulator – це безкоштовний веб-сервіс, який дозволяє змоделювати роботу проєкту, розробленого на базі мікроконтролерів, таких як Arduino, ESP-32, STM-32 та інших популярних плат і датчиків. Wokwi працює прямо в браузері, що дозволяє робити проєкти без встановлення доданку на комп’ютер. Середовище має зручний інтерфейс, також є можливість ділитись проєктом.

Серед основних можливостей, Wokwi здатний:

– писати код для популярних мікроконтролерів на мові C++ та python (MicroPython для ESP-32);

– симулятор має обширний вибір віртуальних компонентів, а саме модулів і датчиків, такі як семисегментні індикатори та дисплеї;

– має підтримку багатьох бібліотек Arduino, що надає змогу перенести реальний проєкт одразу в симулятор для перевірки працездатності;

– має вбудовану консоль Serial, графічний плотер, логічний аналізатор сигналів з пінів, який допоможе проаналізувати роботу коду та схеми;

– має офлайн версію доданку через інтеграцію з Visual Studio Code.

Недоліки симулятора Wokwi:

– обмеження щодо додавання бібліотек у безкоштовну версію, іншими словами – не має можливості встановити власну бібліотеку без платної підписки;

– платні функції для розширеної взаємодії, як приклад, керування WiFi та Bluetooth;

– має обмежені функції в офлайн режимі.

В порівнянні з іншими онлайн середовищами, такими як Tinkercad, Wokwi має більш обширну базу для ознайомлювальних цілей. Зробимо порівняння у вигляді таблиці (табл. 3.1).

Таблиця 3.1 – Порівняння симуляторів Wokwi і Tinkercad

Критерій	Wokwi	Tinkercad
Підримка платформ	Arduino (Uno, Mega, Nano), ESP32, Raspberry Pi Pico, STM32	Arduino Uno та базові мікроконтролери
Підримка бібліотек	Велика кількість популярних бібліотек	Обмежено кількість бібліотек
Аналогова симуляція	Немає підтримки аналогових ланцюгів	Має підтримку аналогових ланцюгів
Інтерфейс	Більша перевага на код та схеми	Більш візуальний та інтуїтивно зрозумілий
Швидкість симуляції	Швидко симулює, але якщо проєкт має велику кількість компонентів то швидкість симуляції сильно падає	Середня швидкість симуляції
Збереження проєкту	Хмарне збереження	Хмарне збереження
Робота на мобільних пристроях	Працює стабільно в мобільних браузерах	Обмежена мобільна підримка
Офлайн режим	Присутній (якщо встановити доданок у VS Code)	Відсутній
Візуалізація моделі пристрою	Відсутня	Можна візуалізувати корпус та компоненти

Тому, як висновок, середовище Wokwi підходить краще для побудування імітаційної моделі системи автоматизації дозування хлорагенту для питної води в порівнянні з Tinkercad. Tinkercad більш простий і підходить для тих хто тільки почав вивчати середу Arduino, а Wokwi simulator підходить для більш складних проєктів з більшою підтримкою платформ.

3.2 Розробка алгоритму роботи

Для розуміння як буде працювати код, треба зробити алгоритм роботи нашої інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для питної води (рис. 3.1).

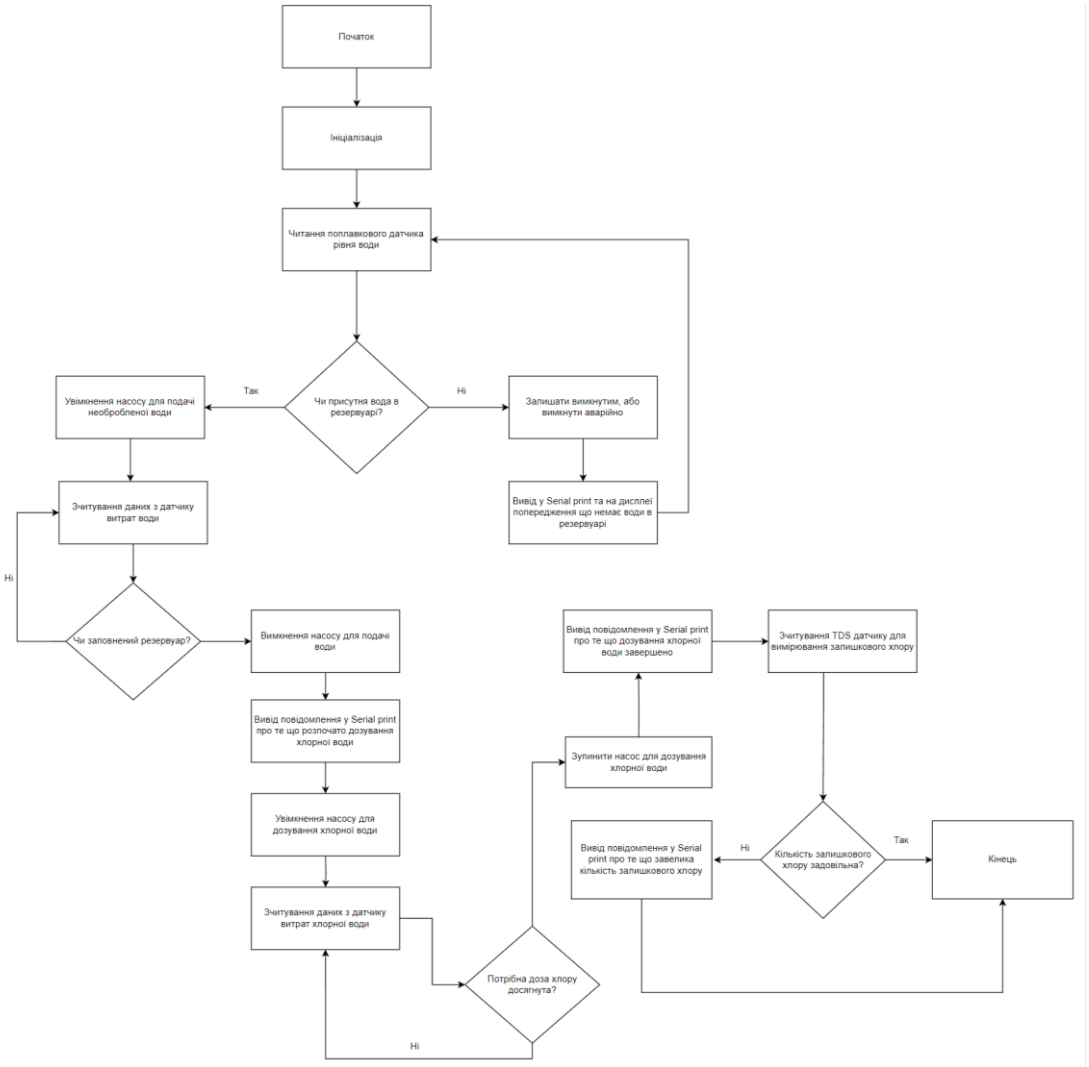

Рисунок 3.1 – Алгоритм роботи системи

3.3 Реалізація роботи автоматичної системи

Надана система автоматизації дозування хлорагенту у питній воді реалізована на мікроконтролері ESP-32 з використанням мови C++ (Arduino).

Зібрана схема підключення системи, яка наведена на рисунку 3.2.

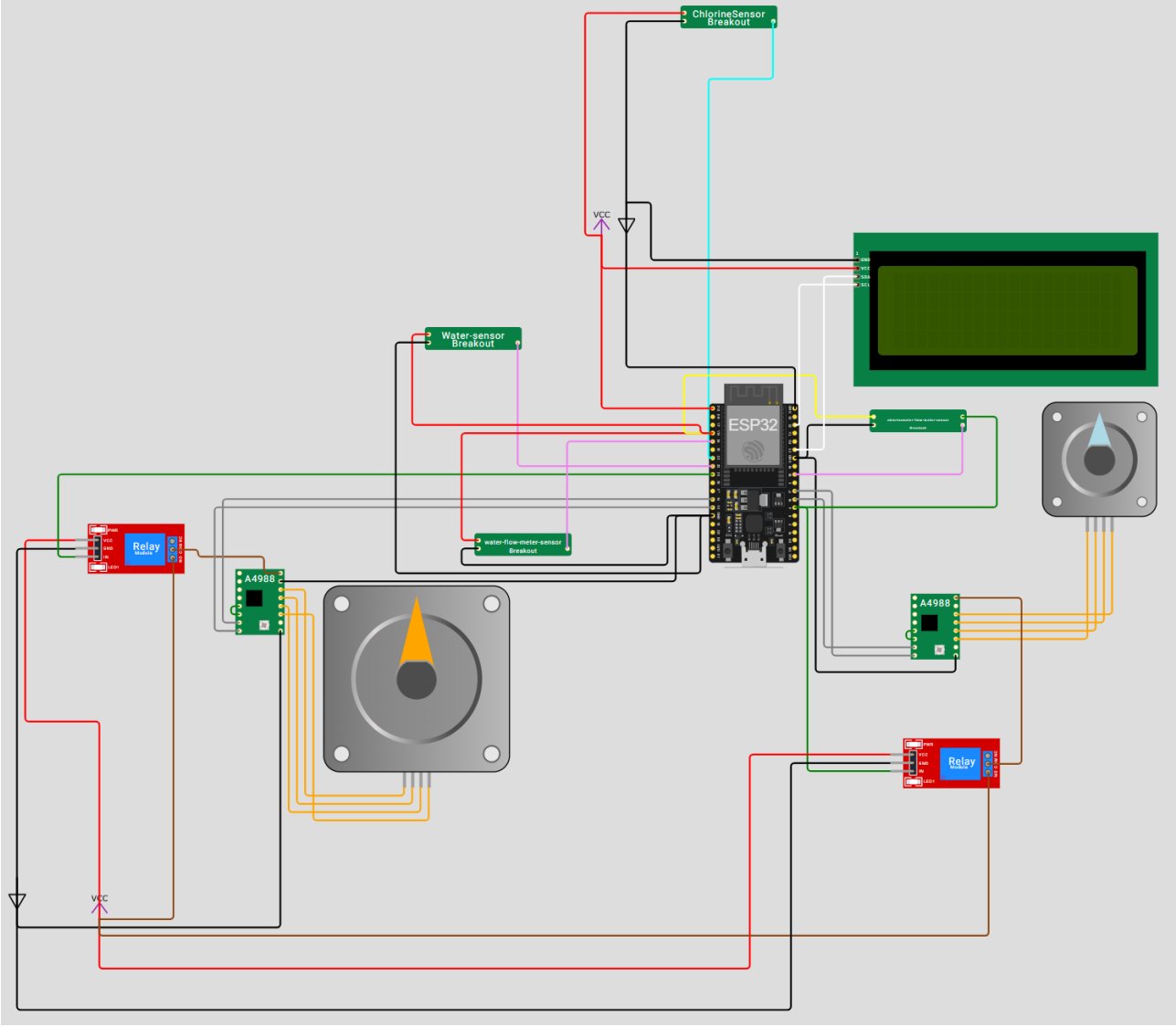

Рисунок 3.2 – Схема підключеннння системи в середовищі Wokwi

Замість реальних насосів був використаний звичайний Stepper Motor, а замість реальних датчиків було імітовано їх роботу у якості компонентів типу Custom Chip.

Компонент Custom Chip у Wokwi – це користувальницька модель мікросхеми або пристрою, яку можна зробити та запрограмувати для розширення функціоналу симулятора. Він дозволяє імітувати роботу нестандартних датчиків та інших апаратних компонентів яких немає у середовищі Wokwi. Основною мовою для програмування Custom Chip є мова C, але також є підримка мови Rust та Verilog (експерементальна мова). Коли ми додаємо чіп у схему проєкту, нас просять його найменувати, а також до проєкту додається два файли: .JSON-файл з описом: пінів та їх назви (яку ми можемо задавати самі), та налаштуваннями мікросхеми, як наприклад, для цього проєкту буде використовуватись слайдер, який за повзунком «штучно» підсилює швидкість подачі води через датчик за для швидшої демонстрації роботи системи; та файл .C в якому ми задаємо логіку чіпа.

Для взаємодії із пінами, таймерами та потрібними атрибутами, використовується Wokwi API який задається бібліотекою wokwi-api.h, завдяки якої ми додаємо функції для читання або запису пінів, налаштування таймерів та роботи з атрибутами користувача (наприклад той самий слайдер). Для ініціалізації і обробки використовується функція chip_init() для задавання початкового стану чіпа, а також налаштовуються таймери та переривання.

В Custom Chip, за допомогою функції print_f(), можна зробити відображення повідомлення у спеціальну консоль, яка, за наявності посилання у коді чипу, з’являється поряд із вкладкою «Serial Monitor» із назвою «Chips Console», яку можна використовувати для перевірки роботи логіки самого кастомного чіпа.

Почнемо огляд кожного з кастомних чипів та дізнаємося як вони працюють.

Поплавковий датчик рівня води виступає в якості кастом чіпу із назвою «Water-sensor». Основна ідея створення цього чіпу є те, що він зчитує параметри атрибута waterLevel, який може приймати значення 0 чи 1 і виводить це значення на цифровий вихід OUT. Тому якщо waterLevel дорівнює 1 – на виході буде

HIGH, що буде означати що вода присутня в резервуарі. Якщо рівень буде дорівнювати 0 – це буде означати що води немає у резервуарі і буде сигнал LOW.

Розглянемо детальніше код. Почнемо з ініціалізації пінів і атрибуту:

```
pin_t out_pin; // пін цифрового виходу
int level_attr; // це атрибут для зберігання рівня води (0 або 1)
```

Далі іде використання функції tick – загальний цикл оновлення:

```
void tick(void *user_data) {
int level = (int) attr_read_float (level_attr); // зчитуємо атрибут waterLevel
pin_write(out_pin, level); // встановлюємо рівень на виході
}
```

Всередені цієї функції ми зчитуємо поточне значення атрибуту waterLevel (очікуване 0 або 1). Значення записується на цифровий вихід OUT. Отже, вихід відображає стан рівня води.

```
void chip_init(void) {
out_pin = pin_init("OUT", OUTPUT); // ініціалізація піна OUT як вихід
level_attr = attr_init_float("waterLevel", 1.0f); // ініціалізація атрибуту waterLevel
timer_config_t cfg = {
.callback = tick, // покажчик на функцію, яка буде викликатись при спрацьовуванні таймера
.user_data = NULL // покажчик на дані користувача, які можна передати в callback-функцію
};
timer_t t = timer_init(&cfg); // створення таймера з callback tick
```

timer_start(t, 100, true); // запуск таймера з періодом 100 мс (повторюваний)

}

В цьому блоці коду ми налаштовуємо вихідний пін OUT. Тут ініціалізується атрибут waterLevel з початковою 1 та запускається таймер, який кожні 100 мс викликає функцію tick для оновлення стану виходу. На рисунку 3.3 наведений слайдер для визначення рівня води.

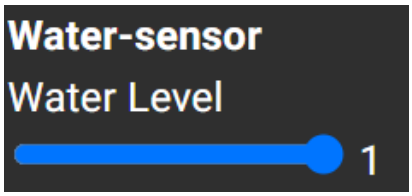

Рисунок 3.3 – Слайдер для визначення рівня води

Наступний датчик, а саме TDS датчик залишкового хлору буде найменований як «ChlorineSensor». Ідея створення імітаційного компоненту для цього датчику полягає у тому, що чип приймає значення концентрації хлору у значенні ppm від 0 до 15 через атрибут chlorineLevel, та перетворює це значення в аналогову напругу від 0 до 5В і виводить його на аналоговий вихід OUT. Таким чином, мікроконтролер зможе зчитувати аналоговий сигнал, відповідний до рівню хлору. В якості атрибуту для задавання кількості залишкового хлору використовується атрибут chlorine_attr.

У функції tick ми задаємо значення залишкового хлору у ppm через: float ppm = attr_read_float(chlorine_attr).

Значення у ppm перетворюємо у напругу 5В, тобто float voltage = (ppm / 15.0f) * 5.0f.

Та через функцію pin_dac_write(out_pin, voltage) ми виводимо напругу на аналоговий пін OUT. В функції chip_init ми ініціалізуємо пін OUT як аналоговий,

а також ініціалізуємо атрибут chlorineLevel з початковим нулем (тобто при запуску буде втановлено 0 ppm):

```
void chip_init(void) {
out_pin = pin_init("OUT", ANALOG); // робимо пін OUT аналоговим
chlorine_attr = attr_init_float("chlorineLevel", 0.0f); // початкове значення атрибуту = 0
timer_config_t cfg = {
.callback = tick,
.user_data = NULL
};
timer_t t = timer_init(&cfg); // створення таймера з callback tick
timer_start(t, 1000, true); // запуск таймера з періодом 1000 мс (1 секунда)
}
```

На рисунку 3.4 наведений слайдер для налаштування рівня залишкового хлору.

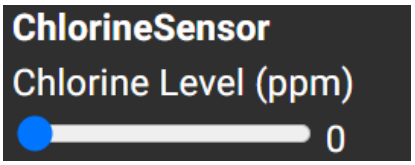

Рисунок 3.4 – Слайдер для налаштування рівня залишкового хлору

Останніми імітованими датчиками ідуть датчики витрат води. Було задано такі назви для цих датчиків: «water-flow-meter-sensor» у якості датчика витрат для необробленої води та «chlorinewater-flow-sensor» – датчик витрат хлорної води.

Тут вже трішки складніше, бо в нашому випадку ми повинні зробити імітацію реальної моделі, щоб за розрахунками, які були взяті для реального датчику витрат води, було визначено чинну швидкість потоку води. Тому в логіці

кастом чіпу ми «штучно» створюємо імпульси для правильного розрахунку вже в основному коді скетчу для мікроконтролера. Почнемо з коду для датчику витрат для необробленої води:

```
pin_t out_pin; // пін цифрового виходу
int speed_rate_attr; // атрибут швидкості потоку (для слайдеру)
bool pin_state = false; // поточний стан виходу (HIGH/LOW)
int tick_counter = 0; // лічильник тиків таймера
int toggle_interval = 500; // інтервал перемикання стану виходу (у тіках)
```

У функції chip_tick ми задаємо speed – це вхідний параметр швидкості, заданий користувачем. Параметром freq ми визначаємо частоту імпульсів, сходячи з того, що 7,5 імпульсів відповідає 1 мл. Та параметр toggle_interval – це інтервал між перемиканнями виходу, розрахований із частоти.

Кожну мілісекунду збільшується лічильник tick_counter. Коли він досягає toggle_interval, вихід перемикається (HIGH>LOW або LOW>HIGH), генеруючи прямокутний імпульс.

```
void chip_tick(void *user_data) {
float speed = attr_read_float (speed_rate_attr); // зчитуємо швидкість потоку
if (speed <= 0.0f) {
pin_write(out_pin, true); // якщо швидкість 0, тримаємо вихід у HIGH
return;
}
float ml_per_sec = speed * 0.1f; // перетворимо швидкість на мл/сек (коефіцієнт 0.1 на 1 шаг)
float freq = ml_per_sec * 7.5f;
toggle_interval = (int)(500.0f/freq); // обчислюємо інтервал перемикання виходу (у тиках)
```

```
tick_counter++;
if (tick_counter >= toggle_interval) {
pin_state =! Pin_state; // інвертуємо стан виходу
pin_write(out_pin, pin_state); // записуємо новий стан на вихід
tick_counter = 0;
}
}
```

Остання функція chip_init робить ініціалізацію піна OUT, встановлює атрибут speedRate з початковим значенням 1 (тобто при значені 1 буде реальна швидкість потоку води для насосу JT-180A) та запускає таймер, який викликає функцію chip_tick з періодом в 1 мс.

```
void chip_init(void) {
out_pin = pin_init("OUT", OUTPUT);
speed_rate_attr = attr_init_float("speedRate", 1.0f);
timer_config_t cfg = {
.callback = chip_tick,
.user_data = NULL
};
timer_t t = timer_init(&cfg);
timer_start(t, 1, true); // Виклик chip_tick кожну 1 мс
}
```

Завдяки цьому коду ми отримаємо не тільки частоту імпульсів, але зможемо зробити ще й налаштування швидкості потоку для того щоб швидше перевірити інші функції. На рисунку 3.5 наведений слайдер налаштування швидкості для датчику витрат води. Задати значення на слайдері можна тільки при запуску симуляції, тикнувши по компоненту кастомного чіпа.

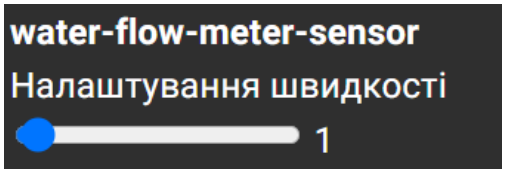

Рисунок 3.5 – Слайдер для налаштування швидкості імітованого датчику витрат води

Для датчику витрат хлорної води код майже ідентичний, але був встановлений додатковий пін IN, який перевіряє роботу насосу (мотору) для хлорної води і який, при наявності сигналу, запускається цей датчик і починається розрахунок швидкості потоку хлорної води. Реалізація відбувається у функціях chip_tick:

```
void chip_tick(void *user_data) {
bool enabled = pin_read(in_pin); // перевірка стану вхідного піна
if (!enabled) {
pin_write(out_pin, false); // якщо вхідний пін не активний, то вихідний пін вимкнутий
return; // завершення виконання функції
}
```

Переходимо до огляду коду скетчу для мікроконтролера ESP-32 та опишемо основний принцип роботи коду. Було підключено 3 бібліотеки, а саме: Wire.h, LiquidCrystal_I2C.h та AccelStepper.h. Бібліотека Wire.h використовується для роботи з I2C інтерфейсом, яка необхідна для взаємодії з дисплеєм. LiquidCrystal_I2C.h це бібліотека для управління LCD дисплею з інтерфейсом I2C. Також підключена бібліотека AccelStepper.h використовується для підтримки крокovими двигунами.

Першим кроком було створено об’єкт LCD дисплею з адресою 0x27, та розмірами 20 символів на чотири строки. Наступним етапом було встановлено

визначення пінів для першого крокового двигуна (насос подачі необробленої води), другого крокового двигуна (насос подачі хлорної води), а також реле, яке запускає ці крокові двигуни, та визначено датчики хлору з поплавковим датчиком рівня води. Далі було встановлено змінні для обліку витрат води і хлору з використанням функції для лічильнику імпульсу volatile. Для обліку витрат води було задано максимальний об’єм води для того, щоб при досягненні цього значення насос для подачі води був вимкнутим, а у витратах хлору було задано константу за для визначення потрібної дози хлорної води, виглядає наступним чином:

```
const float chlorineTargetDose = (maxVolume / 1000.0) * chlorinePerLiter;
```

де maxVolume – це значення максимального об’єму води;

1000.0 – число у мілілітрах щоб визначити значення об’єму в літрах;

chlorinePerLiter – розрахована доза рідкого хлору на 1 літр води в мілілітрах.

Було задано блок коду з функцією переривання датчиків для того щоб зробити лічільник імпульсів для імітованих датчиків з найменуваннями pulseCount – для води, chlorinePulseCount – для рідкого хлору. Для остаточного розрахунку швидкості потоку води була використана формула (3.1):

$$U = \frac{T}{7{,}5}, \tag{3.1}$$

де U – швидкість потоку води;

T – частота імпульсів.

Дана формула широко використовується в реальних датчиках витрат води для визначення швидкості потоку рідини. Вигляд цієї формули у коді виглядає наступним чином:

float mlPerSec = pulses / pulsesPerML; // для визначення швидкості потоку для необробленої води

float chlorineMLPerSec = chlorinePulses / chlorinePulsesPerML; // визначення швидкості потоку для хлорної води

Ініціалізація параметру pulses та chlorinePulses була виконана через задавання лічильнику імпульсів, а саме pulseCount та chlorinePulseCount відповідно. Параметр pulsesPerML та chlorinePulseCount дорівнює 7,5, як наведено у формулі (3.1).

Для першого крокового двигуна (насос води) було задано умови, де якщо виконується умова tankFull (заповнений резервуар) та noWater (нема води), тоді зупиняється кроковий двигун через реле, ініціалізований як relayPin1. Для другого крокового двигуна (насос з хлором) при умові tankFull ми запускаємо реле через пін relayPin2.

У TDS датчику хлору було розраховано перетворення значення через зчитування через змінну raw, яка зчитує напругу з піна OUT нашого кастомного чіпу що надасть нам імітовану кількість ppm.

Також, було додано вивід у Serial Monitor такі дані:

– швидкість води (у мл/сек);

– скільки було перекачано води (у мл);

– швидкість подачі хлору (у мл);

– потрібний об’єм дозації хлору та скільки продозовано на даний момент;

– залишковий хлор у ppm;

– наявність води.

Якщо рівень хлору буде перевищувати 14,5 ppm тоді в Serial Monitor замість значення залишкового хлору буде попередження про високу кількість залишкового хлору. При виконані умови noWater повідомлення про те що насос вимкнутий. Швидкість подачі повідомлень параметрів виконується кожну секунду.

Для дисплею було виведено швидкість води, накопичений об’єм води, скільки хлору було додано та рівень залишкового хлору за допомогою lcd.print. Якщо виконується умова noWater, тоді буде виводитись попередження про те що води немає та покаже скільки води вже було перекачано.

3.4 Охорона праці

При роботі з персональним комп’ютером слід дотримуватись правил дотримання безпеки при експлуатації електричних пристроїв для забезпечення продуктивної праці та запобігання професійних травм. Неправильне використання електронного обладнання може спричинити до небезпечних наслідків, зокрема ураження електричним струмом, перевантаження зору, головного болю і болю у спині, виникнення пожежі та нервово-емоційне напруження [27].

Перед початком роботи, треба перевірити загальний стан апаратури, справність електропровідки, розеток та заземлення захисного екрану.

Потрібно забезпечити чисте робоче місце без зберігання на ньому хімічно-активних речовин, що можуть пошкодити ізоляцію. Не робити чистку пристрою при його увімкненні, чистку монітору від пилу треба виконати спеціальною серветкою. Також, щоб запобігти ураження електричним струмом необхідно не торкатися екрану монітора руками та не переміщати або примусово відключати пристрої під напругою. Виймати вилку з розетки мокрими руками та самостійно ремонтувати монітор, системний блок, клавіатуру, комп’ютерну мишу без належної підготовки та нерозумінні роботи електронних пристроїв заборонено.

Якщо виникла проблема з пристроєм рекомендується викликати відповідальну в цьому питанні особу і до цього моменту не вмикати пристрій який вийшов з ладу.

Висота стільця, столу та кут нахилу монітору повинен бути відрегульованим за зростом людини, яка користується комп'ютером на даний момент.

Тривалість безперервного користування комп'ютером не повинна перевищувати одну годину, необхідно робити перерви інтервалом 5-10 хвилин для відпочинку очей та зробити фізичну розминку за бажанням. Після 20 хвилин роботи рекомендується зробити вправи для очей для знаття їх напруження.

Заборонено палити, використовувати відкритий вогонь на робочому місці.

Після закінчення роботи необхідно виключити комп'ютер, прибрати робоче місце та переконатися у відсутності сторонніх предметів [28].

Впровадження охорони праці під час експлуатації електронного пристрою є дуже важливим для запобігання травм та зменшення негативного впливу на навколишнє середовище. Запропоновані вимоги використання забезпечать підвищення рівню безпеки, а також посприяють комфорту на робочих місцях.

ВИСНОВКИ

В ході виконання кваліфікаційної роботи для розроблення інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагентів для питної води було проведено аналіз показників якості та їх норми що підлягають контролю, поширені методи вимірювання якості води і якими пристроями вони вимірюються та розглянуто існуючі системи дозування хлорагенту для питної води, їх переваги та недоліки.

Завдяки аналізу було створено імітаційну модель системи автоматизації дозування хлору з автоматичним додаванням рідкого хлору через насос, а також датчики рівня води і залишкового хлору для контролю параметрів системи.

Вибір компонентів для системи був обраний на основі визначення характеристик і вимог до системи. В якості основного мікроконтролеру для управління системою був обраний ESP-32 через його великий функціонал та компактність. Важливим кроком стало впровадження компонентів системи, а саме: виконавчі пристрої, датчики і дисплей для відображення інформації у проєкт. В ході проєктування системи з’явилася необхідність розрахунку живлення та контентрації рідкого хлору (гіпохлориту натрію) на літр води для забезпечення стабільності і працездатності системи. Було визначено середовище для симуляції роботи системи, а саме Wokwi симулятор та вияснили чому саме цей онлайн-симулятор кращий за інші аналоги. Система автоматизації дозування хлорагенту була спроєктована за дапомогою інтеграції Custom Chip в середовищі Wokwi. Завдяки цій функції було задано необхідні параметри і розрахунки через логіку створених чипів для більшої наглядності процесів. Інтелектуальність даної системи пов’язана з роботою за алгоритмом коду, де виконуються різні сценарії при яких виконується та чи інша умова, що також вважається інтелектуальністю.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. Структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. - 29 с.

2. Методичні вказівки з підготовки кваліфікаційної роботи бакалавра для студентів усіх форм навчання спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» освітньої програми «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» / Упоряд.: І.Ш. Невлюдов, А.О. Андрусевич, О.В. Токарєва, С.П. Новоселов, О.В Сичова. Харків: ХНУРЕ, 2022. – 55 с.

3. Дерев'янко Д. І. Розроблення інтелектуальної системи автоматизації дозування хлорагенту для підготовки питної води / Д. І. Дерев'янко // Автоматизація та Приладобудування («Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2025): збірник студенських наукових статей. – Харків : ХНУРЕ, 2025. – Вип. 1. – С.178-183.

4. Показники та критерії якості питної води. URL: https://mywatershop.com.ua/blog/pokazniki-ta-kriterii-yakosti-pitnoi-vodi/?srsltid=AfmBOoqa6pgN0Yu3909Eo23y8cLkzTPPOTlILgUKx6P0xkrNciYTtol (дата звернення: 21.04.2025).

5. Основні показники якості води. URL: https://aqua-life.ua/ua/info/osnovnye-pokazateli-kachestva-vody/?srsltid=AfmBOorjVwCDynWdUCc_CLT6Wo0NpnfWpnzVqds0_PnWCKk45uoMq70D (дата звернення: 21.04.2025).

6. Turbidity meter how it works. URL: https://www.boquinstrument.com/turbidity-meter-how-it-works.html (date of access: 22.04.2025).

7. Турбідиметр портативний TN500. URL: https://spectrolab.com.ua/ua/p1165732264-turbidimetr-portativnyj-tn500.html (дата звернення: 22.04.2025).

8. Які прилади застосовують для вимірювання якості води? URL: https://teploradost.com.ua/ua/jaki-prylady-zastosovujut-dlja-vymirjuvannja-jakosti-vody (дата звернення: 22.04.2025).

9. Цифровий датчик колориметр якості води PASCO PS-2179. URL: https://b2b-solutions.com.ua/ua/cifrovij-datchik-kolorimetr-jakosti-vodi-pasco-ps-2179-ua (дата звернення: 22.04.2025).

10. Introduction of ph meter: The principe of pH meter. URL: https://www.supmeaauto.com/training/introduction-of-ph-meter (date of access: 23.04.2025).

11. Портативний pH-метр XS pH 70 Vio + 201T (з електродом 201T). URL: https://simvolt.ua/portativniy-ph-metr-xs-ph-70-vio-201t-z-elektrodom-201t.html/ (дата звернення: 23.04.2025).

12. Амперометричний тримач з датчиком хлору SCLO 3 HYCHLOR. URL: https://www.etatron.com.ua/pumps/sensor/cl/sclo_3_hychlor/ (дата звернення: 23.04.2025).

13. Система хлорування води. URL: https://www.etatron.com.ua/news/?sid=1046 (дата звернення: 24.04.2025).

14. Насос дозатор BT PH-RX-CL/M для контролю рівня pH / ОВП / хлору. URL: https://www.etatron.com.ua/pumps/dosing_pumps/bt/bt_ph_rx_cl_m/ (дата звернення: 24.04.2025).

15. OCD-162-60-P/G2 | Grundfos. https://product-selection.grundfos.com/ua/products/disinfection-systems/oxiperm/ocd-162-60-pg2 95718458?pumpsystemid=2626239991&tab=documentation (дата звернення: 24.04.2025).

16. Oxiperm Pro OCD-162. URL: https://api.grundfos.com/literature/Grundfosliterature-5903104.pdf (дата звернення: 24.04.2025).

17. Arduino ESP32 WiFi Bluetooth CH340. URL: https://rozetka.com.ua/ua/455195339/p455195339/?gad_source=1&gad_campaignid=20086286791&gbraid=0AAAADlXhI4nmfc1oWDBZ9Gld-afN5crF&gclid=CjwKCAjwuIbBBhBvEiwAsNypvXWJ_cs1f4zJASJDVjAndnGDr9znKPEwpGnbV3jJLqfrCOqa_m0RMBoCZHAQAvD_BwE (дата звернення: 9.05.2025).

18. Модуль реле 1-канальний (низький/високий рівень) - 5V (Arduino). URL: https://arduinokit.com.ua/ua/p1513563522-rele-modul-kanalnyj.html?srsltid=AfmBOopvdcCP80Y6qcRkUqiJuVFe65c5Wh9BCJCyEQ5kF-LRdVldpKNz (дата звернення: 9.05.2025).

19. Помпа водяна JT-180A, 12В. URL: https://prom.ua/ua/p1270629879-pompa-vodyanaya-180a.html (дата звернення: 9.05.2025).

20. Yosoo Dc 12v D4 Lab Dosing Pump Peristaltic Chemical Water Liquid 19~100ml/min for Aquarium Lab Analytical Water (D4 35). URL: https://www.amazon.com/Yosoo-Peristaltic-Chemical-19-100ml-Analytical/dp/B017NFFLMG (date of acces: 9.05.2025).

21. Що таке перистальтичні насоси та як вони працюють? URL: https://www.debem.com.ua/news/?sid=759/ (дата звернення: 9.05.2025).

22. SEN0244 DFRobot. URL: https://www.rcscomponents.kiev.ua/product/sen0244.html (дата звернення: 13.05.2025).

23. Датчик витрат води для Arduino YF-S401. URL: https://artificer.com.ua/product/datchik-rashoda-vody-0-3-6l-min-dlya-arduino-yf-s201/ (дата звернення: 13.05.2025).

24. Датчики рівня рідини: види та принципи роботи. URL: https://vec-tech.by/informacziya/blog/stati/datchiki-urovnya-zhidkosti-vidyi-i-princzipyi-rabotyi/ (дата звернення: 14.05.2025).

25. Поплавковий датчик рівня води (прямий) для Arduino. Датчик рівня рідини EP3508. URL: https://diyshop.com.ua/ru/poplavkovyj-datchik-urovnya-vody-pryamoj-dlya-arduino-datchik-urovnya-zhidkosti-us23?srsltid=AfmBOopZjn0__O-5pBeMcWQLXyzeDEGCDGcvaffDCQ5wva8SBFTGxCsr (дата звернення: 14.05.2025).

26. LCD 2004 I2C символьний дисплей 20x4 (жовтий). URL: https://vseplus.com/ua/product/lcd-2004-i2c-simvolnij-displej-283116?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=21393827196&utm_term=&gad_source=1&gad_campaignid=21393827196&gbraid=0aaaaadexgrignstmjmcwzcazc7gsgs_h9&gclid=CjwKCAjwpMTCBhA-EiwA_-MsmVZ2i8H6gdEEHVvt9nOX-Wd9IjetrGasRxE55MOF8jbR64R3BqDltRoCVBAQAvD_BwE (дата звернення 16.05.2025).

27. Охорона праці при роботі з комп’ютером. URL: https://pro-op.com.ua/article/485-nstruktsya-z-ohoroni-prats-pri-robot-na-personalnomu-kompyuter (дата звернення: 17.06.2025).

28. Комплекс навчально-методичного забезпечення навчальної дисципліни «Безпека праці в індустрії ІТ-технологій» підготовки освітнього рівня бакалавр усіх спеціальностей та усіх напрямів університету [http://catalogue.nure.ua/knmz] / ХНУРЕ; розроб.: Т. Є. Стиценко, Г. В. Пронюк, Н. М. Сердюк. – Харків, 2017. – 122 с.