

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

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА**

Кіберфізична система "Розумна чашка" для людей із вадами зору  
Назва теми

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр КвРКІ 024022.24.02.22 ПЗ

Виконав здобувач II курсу, група КІ2М-24-2

Керівник

ДФ

Науковий ступінь, учене звання

Нормоконтролер

д. техн. наук, професор

Науковий ступінь, учене звання

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС

«01» травня 2026 р.

дата

Владислав СОРОХАН  
Підпис  
Юрій ВОЙЧУР  
Підпис  
Сергій ЛИСЕНКО  
Підпис  
Ольга ПАВЛОВА  
Підпис

Владислав СОРОХАН

Ініціали, прізвище

Юрій ВОЙЧУР

Ініціали, прізвище

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

Хмельницький 2026

# ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Освітній рівень МАГІСТР

Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма ОСВІТНЬО-НАУКОВА ПРОГРАМА «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедри Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Владиславу СОРОХАНУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей із вадами зору  
Керівник проекту (роботи) Юрій ВОЙЧУР, ДФ

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

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 №6

2. Строк подання студентом проекту (роботи) на кафедру 01.05.2026 р.

3. Вихідні дані до проекту (роботи) Завдання на дипломне проектування

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

Аналіз предметної області та огляд існуючих рішень

Модель функціонування кіберфізичної системи «Розумна чашка»

Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Симуляція та експериментальні дослідження кіберфізичної системи «Розумна чашка»

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

6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи магістра

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання « 10 » 01 2026р.

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики КвРМ з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	12.01.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – аналіз відомих засобів та методів за темою; постановка задачі	15.01.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – розробка моделей для вирішення поставленої задачі	15.02.2026	виконано
5	Робота над науковою статтею	5.03.2026	виконано
6	Робота над розділом 3 – розробка методу для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – оцінка ефективності пропонуваного рішення	15.04.2026	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.04.2026	виконано
9	Попередній захист ДРМ	29.04.2026	виконано
10	Захист ДРМ на засіданні ЕК	До 15.05.2026	

Здобувач  Владислав СОРОХАН  
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Юрій ВОЙЧУР  
Підпис Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Кіберфізична система “Розумна чашка” для людей із вадами зору

Автор роботи: Сорохан Владислав Олександрович

Керівник роботи: Войчур Юрій Олексійович

Пояснювальна записка: 72 с., 14 рис., 16 табл., 2 дод., 80 джерел.

**ПЕРЕЛІК КЛЮЧОВИХ СЛІВ: КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, АСИСТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ, РОЗУМНА ЧАШКА, МІКРОКОНТРОЛЕР ESP32, ЛЮДИ З ВАДАМИ ЗОРУ, ГОЛОСОВИЙ ЗВОРОТНИЙ ЗВ'ЯЗОК.**

Об'єктом дослідження є процес автономного приготування та споживання гарячих напоїв за допомогою кіберфізичної системи «Розумна чашка» особами з порушеннями зору в умовах побутового середовища.

Предметом дослідження є архітектура, функціональні підсистеми, алгоритми та математичні моделі кіберфізичної системи «Розумна чашка», спрямованої на підвищення автономності та безпеки користувача.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є проектування кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору, яка забезпечує безпечний та автономний процес приготування і споживання напоїв за рахунок аудіо контролю без використання зорового каналу сприйняття.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи системного аналізу та проектування кіберфізичних систем, методи математичного моделювання фізичних процесів, а також методи симуляційного моделювання на платформі Wokwi та статистичні методи обробки експериментальних даних.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набула подальшого розвитку кіберфізична система “Розумна чашка” для людей із вадами зору, що відрізняється інтеграцією зворотного аудіо зв'язку з математичними моделями фізичних процесів у рамках єдиної трирівневої архітектури КФС, що дозволило забезпечити функціональну автономність

користувача при приготуванні та споживанні гарячих напоїв без залучення зорового каналу сприйняття.

– удосконалено інтегральну модель функціонування кіберфізичної системи шляхом поєднання п'яти вимірювальних підсистем (рівень рідини, температура, маса, каламутність, акустична локація) з єдиним мікроконтролерним вузлом ESP32, що, на відміну від відомих однофункціональних пристроїв, дозволило реалізувати захист від термічних ризиків та забезпечити точність дозування на рівні побутових кухонних ваг.

На основі проведених досліджень спроектовано кіберфізичну систему «Розумна чашка» для людей із вадами зору, що включає дев'ять функціональних підсистем та забезпечує повну побутову автономність без залучення зорового каналу сприйняття.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробці математичних моделей і алгоритмів КФС «Розумна чашка», які можуть бути використані при виготовленні промислового прототипу для людей із порушеннями зору.

У першому розділі виконано комплексний аналіз предметної області: досліджено нейрофізіологічні засади компенсаторної пластичності мозку при вадах зору, розглянуто концепцію кіберфізичних систем як класу асистивних технологій та проведено критичний огляд існуючих рішень у сфері асистивних пристроїв для незрячих

У другому розділі сформувано вимоги до КФС «Розумна чашка», запропоновано загальну концепцію математичного опису системи та побудовано математичні моделі термального моніторингу, контролю рівня рідини, точного дозування маси, оптичного контролю чистоти та формування акустичного зворотного зв'язку. Наведено інтегральну модель функціонування у формі системи рівнянь стану.

У третьому розділі виконано проектування КФС «Розумна чашка»: запропоновано трирівневу архітектуру з дев'ятьма функціональними підсистемами, проведено порівняльний аналіз апаратних платформ та

обґрунтовано вибір ESP32-WROOM-32, а також розроблено алгоритм функціонування на основі принципу пріоритетно-подієвої обробки.

У четвертому розділі виконано симуляцію функціонування системи у середовищі Wokwi, розроблено схемотехнічні рішення та спроектовано мобільний застосунок як кіберскладову системи з чотирма функціональними модулями.

За темою кваліфікаційної роботи магістра опублікована одна стаття у фаховому науковому виданні «Вісник Хмельницького національного університету».

## ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки .....	5
Вступ.....	6
1 Аналіз предметної області та огляд існуючих рішень .....	8
1.1 Нейрофізіологія сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору.....	8
1.2 Кіберфізичні системи як клас асистивних технологій .....	11
1.3 Огляд відомих рішень у сфері асистивних технологій для людей з вадами зору .....	16
1.4 Постановка задачі дослідження .....	18
2 Модель функціонування кіберфізичної системи “Розумна чашка”.....	20
2.1 Аналіз вимог до кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору .....	20
2.2. Ієрархічна модель кіберфізичної системи «Розумна чашка» .....	31
2.3. Модель термального моніторингу.....	32
2.4. Модель моніторингу рівня рідини .....	33
2.5. Модель точного дозування маси інгредієнтів.....	35
2.6. Модель оптичного контролю чистоти рідини.....	36
2.7. Модель формування акустичного зворотного зв'язку.....	37
2.8. Інтегральна модель функціонування кіберфізичної системи.....	39
2.9. Модель тактильного стану .....	40
2.10. Висновки до розділу .....	41
3 Кіберфізична система “розумна чашка” для людей з вадами зору.....	42
3.1 Структура кіберфізичної системи «Розумна чашка» .....	42
3.2 Аналіз та вибір апаратної складової.....	48

3.4 Концепція інтерфейсу Zero-Visual UI.....	57
3.5 Висновки до розділу .....	60
4 Симуляція та експериментальні дослідження кіберфізичної системи «Розумна чашка» .....	61
4.1. Симуляція функціонування системи у середовищі Wokwi.....	61
4.2. Результати експериментальних досліджень.....	64
4.3 Верифікація підсистеми Zero-Visual UI.....	69
4.4 Проектування та схемотехнічні рішення кіберфізичної системи “Розумна чашка” для людей з вадами зору .....	70
4.5 Проектування кіберскладової у формі мобільного додатку.....	72
4.6. Висновки до розділу .....	76
Висновки .....	77
Перелік джерел посилань .....	78
Додаток А Копія наукової публікації.....	87
Додаток Б Презентація до захисту кваліфікаційної роботи.....	99

## СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

BLE – Bluetooth Low Energy

GPIO – General Purpose Input/Output

I2S – Inter-IC Sound

IoT – Internet of Things

ESP32 – мікроконтролер Espressif Systems

КФС – кіберфізична система

NTU – Nephelometric Turbidity Unit

UI – User Interface

PWM – Pulse Width Modulation

TTS – Text-to-Speech

WCAG – Web Content Accessibility Guidelines

## ВСТУП

Згідно з даними Всесвітньої організації охорони здоров'я понад 285 мільйонів людей у світі мають суттєві фізіологічні обмеження зорового сприйняття, з яких майже 39 мільйонів повністю позбавлені зору. У повсякденному житті це суттєво ускладнює виконання навіть базових побутових дій. Однією з найбільш ризикованих є самостійне приготування гарячих напоїв, оскільки відсутність зорового контролю унеможлиблює безпечне виконання таких операцій, як наливання окропу, оцінку температури та точне дозування інгредієнтів. Це підвищує ймовірність опіків і знижує рівень самостійності користувача.

Актуальною є розробка технічних засобів, здатних компенсувати відсутність зорового контролю. Незважаючи на наявність певних асистивних пристроїв, більшість із них вирішують лише окремі задачі, такі як контроль рівня рідини або допомогу в орієнтації та не забезпечують комплексного підходу до безпечного приготування напоїв. У цьому випадку перспективним є використання кіберфізичних систем на базі сучасних мікроконтролерів, що дозволяють об'єднати декілька вимірювальних підсистем в одному пристрої та забезпечити мультимодальний зворотний зв'язок. Метою кваліфікаційної роботи магістра є проектування кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору, яка забезпечує безпечний та автономний процес приготування і споживання напоїв за рахунок аудіо контролю без використання зорового каналу сприйняття.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- дослідити нейрофізіологічні засади компенсації зорової недостатності та проаналізувати існуючі асистивні технології для людей із вадами зору;
- сформулювати специфікацію функціональних та нефункціональних вимог до КФС «Розумна чашка»;
- розробити математичні моделі фізичних процесів (термодинамічних, гідростатичних, оптичних, механічних) та алгоритм функціонування системи;
- спроектувати апаратну архітектуру та програмне забезпечення КФС на базі мікроконтролера ESP32-WROOM-32;

– верифікувати функціональність системи шляхом симуляційного моделювання у середовищі Wokwi та провести кількісну оцінку точності підсистем.

Об'єктом дослідження є процес автономного приготування та споживання гарячих напоїв за допомогою кіберфізичної системи «Розумна чашка» особами з порушеннями зору в умовах побутового середовища.

Предметом дослідження є архітектура, функціональні підсистеми, алгоритми та математичні моделі кіберфізичної системи «Розумна чашка», спрямованої на підвищення автономності та безпеки користувача.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набула подальшого розвитку кіберфізична система “Розумна чашка” для людей із вадами зору, що відрізняється інтеграцією зворотного аудіо зв'язку з математичними моделями фізичних процесів у рамках єдиної трирівневої архітектури КФС, що дозволило забезпечити функціональну автономність користувача при приготуванні та споживанні гарячих напоїв без залучення зорового каналу сприйняття.

– удосконалено інтегральну модель функціонування кіберфізичної системи шляхом поєднання п'яти вимірювальних підсистем (рівень рідини, температура, маса, каламутність, акустична локація) з єдиним мікроконтролерним вузлом ESP32, що, на відміну від відомих однофункціональних пристроїв, дозволило реалізувати захист від термічних ризиків та забезпечити точність дозування на рівні побутових кухонних ваг.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розробці функціональної специфікації, математичних моделей і алгоритмів КФС «Розумна чашка», що можуть бути використані при виготовленні промислового прототипу.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи системного аналізу та проєктування кіберфізичних систем, математичного моделювання фізичних процесів, симуляційного моделювання на платформі Wokwi та статистичної обробки експериментальних даних.

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ

### 1.1 Нейрофізіологія сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору

Людина сприймає навколишній світ за допомогою сенсорних систем, серед яких зір відіграє ключову роль. Саме через нього надходить основна частина інформації про об'єкти, їх розташування та властивості. У зрячих людей значна частина мозку залучена до обробки візуальних сигналів, що забезпечує ефективну орієнтацію в просторі та взаємодію з середовищем.

У разі втрати зору ситуація суттєво змінюється. Мозок перестає отримувати звичний потік візуальної інформації, що змушує його адаптуватися до нових умов. У результаті цього починають активніше використовуватися інші органи чуття – передусім слух і дотик. З часом у незрячих людей формуються нові способи сприйняття інформації, які дозволяють компенсувати відсутність зору.

Слух у таких умовах стає важливим інструментом орієнтації. При цьому фізіологічно він не обов'язково стає “гострішим”, однак мозок починає ефективніше обробляти звукові сигнали. Людина краще визначає напрямок звуку, відстань до джерела та особливості акустичного середовища. У деяких випадках розвивається здатність до ехолокації, коли інформація про об'єкти отримується за рахунок відбитого звуку. Також незрячі можуть швидше сприймати мовлення навіть при високій швидкості відтворення.

Також важливим є дотик, що дозволяє отримувати детальну інформацію про об'єкти через безпосередній контакт. Особливо це проявляється під час читання шрифту Брайля, де необхідна висока точність розпізнавання. У незрячих людей підвищується чутливість пальців, а відповідні ділянки мозку працюють активніше. Цікаво, що під час тактильного сприйняття можуть залучатися навіть ті зони, які у зрячих відповідають за обробку зорової інформації.

Усі ці зміни пов'язані з явищем крос-модальної пластичності – здатністю мозку перебудувати свою роботу. Суть цього процесу полягає в тому, що функції, які раніше виконувалися зоровою системою, частково передаються іншим

сенсорним каналам.. Втрата зору призводить до зменшення візуального потоку, що запускає процес адаптації мозку. У результаті посилюється роль слуху та дотику, які стають основними каналами сприйняття інформації.

З інженерної точки зору це означає, що при розробці асистивних систем доцільно використовувати саме звуковий і тактильний зворотний зв'язок. Такі способи передавання інформації є найбільш зрозумілими та природними для користувачів із порушеннями зору (рис. 1.1).



Рисунок 1.1 – Схема крос-модальної пластичності при втраті зору

Важливим фактором є також навчання користувача. Чим раніше людина починає використовувати пристрої з аудіальним або тактильним зворотним зв'язком, тим швидше вона адаптується до них. Тому сучасні системи повинні передбачати поступове освоєння – від простих сигналів до більш складних.

Узагальнення змін у роботі слуху та дотику наведено в Таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Результати порівняльного аналізу змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей

Характеристика	Слух	Дотик
Основна функція	Орієнтація у просторі, визначення відстані	Дослідження об'єктів, читання
Механізм покращення	Краща обробка звуку мозком	Підвищення чутливості пальців
Здатність до навчання	Розвиток навичок аналізу звуку	Тренування точності рухів
Роль у пізнанні	Формування “звукової картини” середовища	Формування образів через дотик

Характер цих змін залежить і від віку, в якому було втрачено зір. Якщо це сталося пізніше, людина зберігає візуальні уявлення і використовує їх разом з іншими відчуттями. У разі ранньої втрати зору сприйняття світу формується переважно на основі слуху та дотику. При вродженій сліпоті мозок максимально адаптується до обробки невізуальної інформації.

Дослідження показують, що у незрячих людей змінюється не лише функціонування, а й структура мозку. Посилюються зв'язки між різними його ділянками, зокрема тими, що відповідають за слух, рух і пам'ять. Це свідчить про комплексну перебудову всієї сенсорної системи.

Процес заміщення втраченої функції зору іншими сенсорними каналами називається компенсацією. Він відбувається природним шляхом, але значно залежить від досвіду та тренування. У незрячих людей активно розвиваються слухові, тактильні та рухові навички, що дозволяє їм ефективно взаємодіяти з навколишнім середовищем.

Таким чином, нейрофізіологічні особливості сенсорної компенсації є основою для створення сучасних асистивних технологій. Перетворення інформації про середовище у звукові або тактильні сигнали дозволяє зробити такі системи

зрозумілими та зручними для користувача. Це підтверджує доцільність розробки кіберфізичної системи «Розумна чашка», спрямованої на підвищення рівня автономності людей з вадами зору.

## 1.2 Кіберфізичні системи як клас асистивних технологій

Концепція кіберфізичних систем (КФС) сформувалась на початку 2000-х років як відповідь на зростаючу потребу в тісній інтеграції обчислювальних процесів із фізичним середовищем. На відміну від традиційних вбудованих систем, які здійснюють фіксовану обробку сигналів у замкненому контурі, КФС характеризуються динамічним двостороннім зв'язком між цифровими алгоритмами та фізичними процесами, що відбуваються у реальному часі.

Архітектурно КФС організуються за трирівневою ієрархічною моделлю: фізичний рівень забезпечує вимірювання параметрів середовища та виконання управляючих впливів через мережу різнорідних сенсорів і актуаторів; комунікаційний рівень акумулює первинні дані, здійснює їх попередню обробку та передачу; кібернетичний рівень реалізує інтелектуальне прийняття рішень, формування зворотного зв'язку та персоналізацію на основі цифрових профілів користувача.

На практиці сучасні асистивні КФС реалізують більш деталізовану шестирівневу архітектуру, яка відображає складність реальних систем (рис. 1.2). Перший рівень фізичний. Він охоплює безпосередні сенсорні пристрої введення: датчики руху (IMU, акселерометри, гіроскопи), датчики життєвих показників (пульс, SpO<sub>2</sub>, ЕКГ), датчики оточення (температура, освітлення, перешкоди), пристрої вводу (кнопки, джойстики, тач, голос) та камери. До виконавчих пристроїв цього рівня належать моторизовані конструкції, тактильні актуатори вібрації, аудіо-пристрої динамічного озвучення, візуальні індикатори та елементи розумного середовища. Другий рівень – Edge відповідає за локальну обробку: попередню фільтрацію та нормалізацію даних, виявлення подій у реальному часі,

кешування та локальне виконання сценаріїв, що забезпечує автономну роботу системи навіть за відсутності мережевого з'єднання.

Третій рівень забезпечує комунікацію між компонентами через гетерогенний набір протоколів: Bluetooth Low Energy для локальних з'єднань малого радіусу дії, Wi-Fi для домашньої мережі, Zigbee та Z-Wave для мережі сенсорів розумного будинку, мережі 5G та LTE для широкосмугового зв'язку поза домом, а також MQTT, CoAP та HTTPS як протоколи передачі даних для різних сценаріїв надійності та затримки.

Четвертий кіберрівень, що реалізує інтелектуальне ядро системи: агрегацію та зберігання часових рядів, машинне навчання для розпізнавання дій і прогнозування потреб користувача, аналітику та звіти, детекцію аномалій (падінь, стресових станів, погіршення самопочуття), а також сервіси сповіщень, управління пристроями та правил-сценаріїв. Взаємодія між кіберрівнем та зовнішнім середовищем підтримується через API-інтерфейси до медичних систем та електронних медичних записів, соціальних служб, сервісів локації та навігації, а також хмарних платформ (AWS, Azure, GCP).

П'ятий рівень застосувань є ключовим з точки зору безпосередньої взаємодії з людиною. Він поєднує мобільні та веб-додатки для користувача, опікуна і медичного працівника з функціональними можливостями: моніторингом стану та активності, управлінням пристроями, персоналізованими рекомендаціями, навігацією та допомогою в оточенні, сповіщеннями та щоденниками.

Критично важливою складовою цього рівня є підсистема доступності та взаємодії: голосовий інтерфейс, перетворення тексту у мовлення, жестова мова та відеоінтерпретація, висококонтрастний режим та збільшення, спрощені інтерфейси для когнітивних порушень і мультимодальна взаємодія для охоплення різних категорій обмежень.

Шостий рівень скрізні сервіси, які забезпечує безпеку та конфіденційність (шифрування, контроль доступу, управління згодами), управління ідентифікацією та ролями, журналювання та аудит, оновлення ПЗ, моніторинг працездатності та технічну підтримку.

У контексті асистивних технологій КФС набувають особливого значення, оскільки здатні трансформувати параметри фізичного середовища недоступні для сприйняття особою з сенсорними обмеженнями — у сигнали, що передаються через збережені канали сприйняття: слуховий, тактильний або пропріоцептивний. Саме ця властивість відрізняє КФС від пасивних допоміжних пристроїв (таких як тростина або лупа), перетворюючи їх на активних посередників між фізичним світом і когнітивною системою користувача.

Розглядаючи типологію користувачів асистивних КФС, можна виокремити щонайменше шість категорій: особи з обмеженнями руху (у тому числі користувачі колісних крісел та підйомників), особи з порушеннями зору (від слабозорих до повністю незрячих), особи з порушеннями слуху, люди з когнітивними порушеннями (включаючи деменцію та порушення уваги), опікуни та члени родини як допоміжні актори, та медичні працівники, що здійснюють дистанційний моніторинг. Ця багатоакторна природа системи вимагає від архітектури КФС гнучкого рольового управління доступом та адаптованих інтерфейсів для кожної групи, що є суттєвою відмінністю асистивних систем від промислових чи побутових КФС.

Класифікація КФС як класу асистивних технологій здійснюється за кількома критеріями. За характером взаємодії з середовищем виокремлюють сенсорно-замінюючі системи, що надають інформацію через альтернативні модальності, та сенсорно-доповнюючі системи, що підсилюють або уточнюють наявне залишкове сприйняття. За масштабом охоплення локальні системи, орієнтовані на конкретне завдання (наприклад, контроль наповнення ємності), та розподілені системи, що інтегрують множину функцій у єдиній архітектурі. За способом взаємодії з користувачем реактивні, що відповідають на запит, та проактивні, що генерують попередження автономно.

Важливим аспектом сучасних асистивних КФС є їх здатність до навчання на даних конкретного користувача. Алгоритми машинного навчання, розгорнуті на кіберрівні, дозволяють не лише розпізнавати стандартні паттерни поведінки, а й виявляти відхилення: падіння, ознаки стресу або погіршення стану. Це перетворює

систему із пасивного виконавця команд на активного спостерігача, здатного ініціювати сповіщення до опікуна чи медичного персоналу навіть у тих ситуаціях, коли сам користувач не в змозі звернутися по допомогу. Така проактивна функція безпеки є однією з ключових переваг КФС-підходу порівняно із традиційними асистивними пристроями.

Принципово важливою характеристикою КФС у сфері асистивних технологій є принцип мінімального когнітивного навантаження: система має надавати інформацію у формі, що потребує мінімальних зусиль для інтерпретації. Для незрячого користувача це означає перевагу коротких структурованих голосових повідомлень над складними звуковими патернами, а інтуїтивно зрозумілих тактильних сигналів над абстрактними кодами. Врахування цього принципу стає критичним при проектуванні інтерфейсу зворотного зв'язку будь-якої асистивної КФС.

Окремої уваги заслуговує питання безпеки та конфіденційності в асистивних КФС. Оскільки такі системи збирають чутливі дані про стан здоров'я, поведінку та місцезнаходження вразливих категорій осіб, вимоги до захисту інформації у них суттєво вищі, ніж у побутових або промислових застосуваннях.

Шифрування даних при зберіганні та передачі, гранульоване управління доступом на основі ролей, механізм явної згоди користувача та журналювання всіх дій із персональними даними є не рекомендованими, а обов'язковими елементами архітектури. Дотримання цих вимог забезпечується скрізними сервісами, що функціонують паралельно із усіма іншими рівнями системи і не залежать від конкретного сценарію використання.

З технічної точки зору реалізація КФС асистивного класу спирається на такі ключові компоненти: гетерогенна мережа давачів фізичних параметрів (температури, рівня, маси, оптичних властивостей); енергоефективний мікроконтролер із підтримкою бездротових комунікаційних протоколів; підсистема генерації зворотного зв'язку (аудіо, тактильна або їх комбінація).

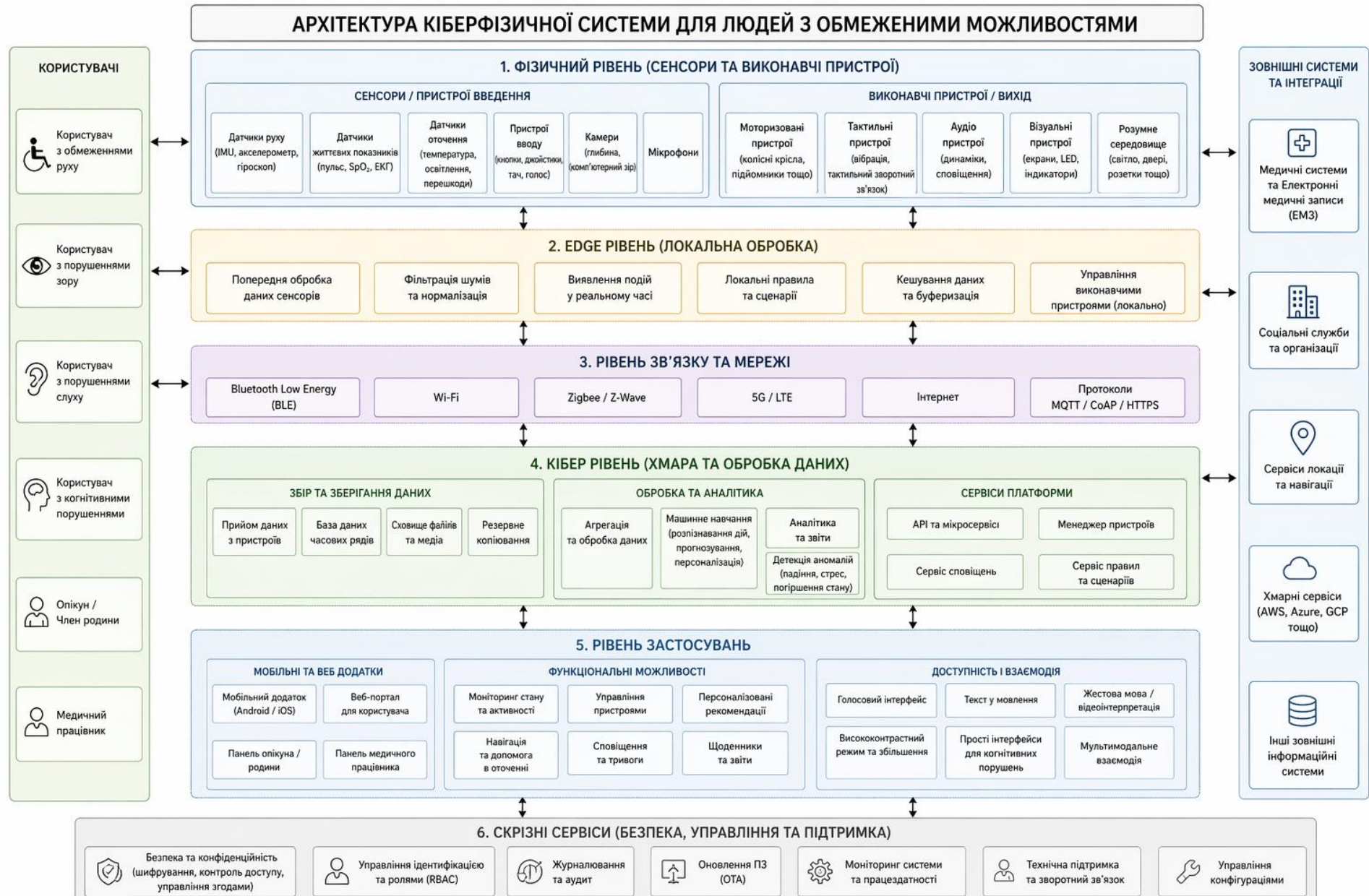


Рисунок 1.2 – Архітектура кіберфізичної системи підтримки людей з обмеженими можливостями

Ще одним компонентом є засіб кіберінтеграції мобільний застосунок або хмарна платформа, що слугує для персоналізації та дистанційного управління. Поєднання цих компонентів у єдину архітектуру із чітким розподілом функцій між рівнями і становить сутність КФС як класу технологій.

Ще однією характерною рисою КФС асистивного призначення є підтримка оновлень програмного забезпечення через мережу. На відміну від традиційних медичних пристроїв, що потребують фізичного обслуговування для оновлення прошивки, КФС може отримувати виправлення та нові функції дистанційно, що критично важливо для маломобільних користувачів. Паралельно з цим моніторинг стану системи та її працездатності дозволяє виявляти апаратні несправності ще до того, як вони спричинять відмову у наданні асистивної послуги.

Таким чином, використання кіберфізичних систем в асистивних технологіях дозволяє подолати обмеження традиційних рішень і забезпечити людям із сенсорними порушеннями вищий рівень автономності у повсякденному житті. На цьому підході базується і концепція «Розумної чашки», розглянута в подальших розділах.

### 1.3 Огляд відомих рішень у сфері асистивних технологій для людей з вадами зору

Асистивні технології для людей із порушеннями зору охоплюють як прості пристрої для виконання окремих побутових задач, так і більш складні системи, що допомагають орієнтуватися в середовищі. Такі рішення спрямовані на підвищення самостійності користувача та спрощення взаємодії з навколишнім світом.

До базових засобів належать індикатори рівня рідини, які встановлюються на край посуду та дозволяють контролювати процес наливання. Одним із прикладів є RNIB Liquid Level Indicator – компактний пристрій із трьома металевими контактами, що визначають два порогових рівні. При досягненні відповідного рівня подається звуковий або вібраційний сигнал. Вартість такого пристрою знаходиться на рівні приблизно 1200 грн [5].

Схожий принцип реалізовано в 2-Stage Liquid Level Indicator (LS&S). Пристрій також використовує два рівні спрацювання: перший супроводжується переривчастим сигналом, а другий – безперервним. Орієнтовна ціна становить близько 600 грн [6].

DK205 Liquid Level Indicator працює за аналогічною схемою та має двоступеневу індикацію. Перший сигнал попереджає користувача про досягнення безпечного рівня для гарячої рідини, а другий – про повне заповнення. Його вартість складає приблизно 1000 грн [7]. У дослідженні [8] підкреслюється, що подібні пристрої є важливими для забезпечення самостійності, оскільки дозволяють перетворювати фізичні параметри у доступні для сприйняття сигнали.

Разом з тим такі рішення мають обмежений функціонал, оскільки контролюють лише рівень рідини і не враховують інші параметри. Це зумовлює потребу у більш складних системах.

До таких належать системи розпізнавання об'єктів і навігації. У роботі [9] описано «розумні окуляри» на базі Raspberry Pi, які за допомогою камери аналізують навколишнє середовище. Обробка зображення здійснюється програмними алгоритмами, після чого користувач отримує голосове повідомлення з інформацією про об'єкти та їх розташування. Також передбачена можливість голосового керування.

У дослідженні [10] запропоновано подібне рішення з використанням Raspberry Pi 3, камери та GPS-модуля. Для обробки даних застосовуються алгоритми машинного навчання, зокрема TensorFlow і R-CNN, що дозволяє розпізнавати як об'єкти, так і людей. Інформація передається через навушники.

У роботі [11] розглядається система, яка безперервно аналізує навколишнє середовище та попереджає користувача про перешкоди ще до моменту наближення до них.

Серед носимих пристроїв варто відзначити «розумну тростину» [12], яка оснащена датчиками для виявлення перешкод. Інформація передається через вібраційні та звукові сигнали, а також голосові підказки, що дозволяють краще орієнтуватися у просторі. Пристрій є компактним, автономним та доступним.

Інший підхід представлений у роботі [13], де описано «розумну кепку» з ультразвуковими сенсорами. Вона забезпечує виявлення об'єктів у різних напрямках, передаючи інформацію через вібраційний зворотний зв'язок. Це дозволяє зменшити навантаження на слух.

Серед рішень, близьких до розроблюваної системи, варто виділити підставку для чашки, описану у [14]. Вона визначає рівень рідини та її температуру за допомогою відповідних давачів. Хоча функціональність такого пристрою ширша, його використання обмежується певним типом посуду.

У дослідженні [15] розглянуто систему «розумних об'єктів», де чашка використовується для аналізу поведінки користувача. Вбудовані сенсори дозволяють відстежувати рухи, тремор та особливості використання, що може бути корисним для медичного моніторингу.

У роботі [16] запропоновано систему, яка поєднує розумну чашку з дозатором лікарських засобів. За допомогою акселерометра, гіроскопа та інфрачервоного давача фіксується факт використання чашки, після чого інформація передається для контролю прийому ліків.

#### 1.4 Постановка задачі дослідження

Аналіз нейрофізіологічних засад компенсаторної пластичності мозку показав, що незрячі користувачі ефективно сприймають інформацію через слуховий і тактильний канали. Огляд існуючих асистивних рішень виявив ключовий функціональний розрив: жоден із відомих пристроїв не забезпечує комплексного контролю процесу приготування та споживання гарячих напоїв – з урахуванням температури, рівня рідини, маси та гігієнічного стану – без залучення зорового каналу сприйняття.

Відповідно до мети дослідження, яка полягає у проектуванні кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору її досягнення передбачає розв'язання комплексу наступних завдань:

1) на основі аналізу нейрофізіологічних механізмів крос-модальної пластичності обґрунтувати типи сигналів зворотного зв'язку, придатних для незрячого користувача в контексті побутового використання;

2) сформулювати специфікацію функціональних і нефункціональних вимог до КФС «Розумна чашка», що враховує потреби цільової групи користувачів;

3) розробити математичні моделі фізичних процесів (термодинамічних, гідростатичних, оптичних, механічних), що описують функціонування підсистем КФС;

4) спроектувати трирівневу архітектуру КФС з дев'ятьма функціональними підсистемами та обґрунтувати вибір апаратної платформи ESP32-WROOM-32;

5) розробити підсистему Zero-Visual UI – інтерфейс нульової зорової залежності з динамічною текстурою корпусу (стани  $S_0$ – $S_3$ ) та вібраційним каналом (20–100 Гц) – як дев'яту функціональну підсистему КФС;

6) верифікувати функціональність системи шляхом симуляційного моделювання у середовищі Wokwi та провести кількісну оцінку точності підсистем.

## 2 МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНА ЧАШКА»

### 2.1 Аналіз вимог до кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Проектування кіберфізичної системи «Розумна чашка» передбачає формування повної специфікації вимог, що охоплює як поведінкові характеристики системи, так і критерії якості її функціонування. Відповідно до загальноприйнятої методології системного аналізу, вимоги поділяються на дві категорії: функціональні, що описують конкретні дії та реакції системи у відповідь на зовнішні події, та нефункціональні, що визначають умови, за яких ці дії вважаються реалізованими належним чином. При формуванні обох категорій вимог враховувались реальні потреби людей з вадами зору у повсякденному житті, аспекти безпеки користувача та принципи повної автономності – ключового критерію якості асистивних технологій. Кожна вимога визначає сценарій використання, очікувану поведінку системи та спосіб передачі інформації без залучення зорового каналу сприйняття.

Для формалізації взаємодії між користувачем і системою виділено п'ять типових сценаріїв використання, що охоплюють основні побутові ситуації, актуальні для цільової аудиторії.

Сценарій 1: Наливання гарячої рідини. Актор – користувач із вадами зору; передумова – ємність порожня або частково заповнена. Користувач розпочинає наливання рідини; система автоматично активує моніторинг рівня наповнення і послідовно інформує користувача при досягненні порогових значень 20%, 50%, 80% та граничного рівня. Очікуваний результат – запобігання переливанню та термічним травмам.

Сценарій 2: Оцінка температури перед вживанням. Актор – користувач. Користувач торкається корпусу або ініціює аудіозапит; система передає температурну інформацію одночасно через аудіальний та тактильний канали. При перевищенні безпечного порогу формується попередження, при досягненні

комфортного діапазону – підтвердження готовності напою. Очікуваний результат – безпечне споживання напою.

Сценарій 3: Приготування напою. Актор – користувач. Користувач додає інгредієнти до ємності; система безперервно відстежує зміну маси та озвучує поточне значення. При досягненні цільової маси, заданої рецептом, формується сигнал зупинки. Очікуваний результат – точне дозування без зорового контролю.

Сценарій 4: Перевірка чистоти ємності. Актор – користувач. Після завершення миття користувач наповнює ємність чистою водою; система аналізує оптичну прозорість рідини та видає голосовий результат верифікації. Очікуваний результат – об'єктивне підтвердження гігієнічного стану посуду.

Сценарій 5: Пошук пристрою. Актор – користувач. Користувач надсилає команду через мобільний застосунок; система активує повторюваний акустичний сигнал, що дозволяє визначити місцезнаходження ємності за звуком. Очікуваний результат – швидке виявлення пристрою у побутовому просторі.

Одним із найбільш травмонебезпечних побутових сценаріїв для незрячої людини є наливання гарячої рідини. Відсутність зорового контролю унеможливорює визначення поточного рівня напою в ємності, що з високою імовірністю призводить до переливання та термічних травм. Особливу небезпеку становлять ситуації з окропом або кавою, де температура рідини суттєво перевищує поріг безпечного контакту зі шкірою.

Система має безперервно відстежувати об'єм рідини та у реальному часі формувати аудіосповідження відповідно до заздалегідь визначених порогових значень. При досягненні рівня наповнення 20% система інформує користувача про початковий стан. На позначці 50% подається нейтральне підтвердження проміжного рівня. При досягненні 80% система переходить у режим попередження, сигналізуючи про наближення до критичної позначки. При досягненні граничного рівня система негайно формує чітке голосове попередження з командою зупинити наливання. Усі сповіщення відтворюються засобами синтезу мовлення з достатньою гучністю для сприйняття у побутовому середовищі. Інтервал між вимірюваннями має бути достатньо малим, щоб система встигала попередити

користувача до фактичного переливання з урахуванням реальної швидкості наповнення ємності. Порогові значення мають бути налаштовуваними відповідно до індивідуальних потреб користувача.

Споживання занадто гарячого напою є поширеною причиною термічних травм слизових оболонок, і для незрячої людини цей ризик суттєво вищий через неможливість візуальної оцінки стану рідини – наприклад, за характером паріння або зовнішнім виглядом поверхні. Водночас споживання надмірно охолодженого напою є небажаним з огляду на смакові характеристики та, у деяких випадках, медичні показання. Таким чином, система має забезпечити користувача актуальною температурною інформацією у будь-який момент через два незалежні канали, що функціонують паралельно.

Аудіальний канал реалізується безперервним або ініційованим користувачем озвученням поточного значення температури. При перевищенні порогу безпечного вживання – орієнтовно  $60^{\circ}\text{C}$  – система автоматично формує попереджувальне повідомлення без додаткових дій з боку користувача. При зниженні температури до комфортного діапазону система підтверджує готовність напою до вживання. Додатково передбачається можливість задати індивідуальний температурний поріг, після досягнення якого система автоматично сповіщає користувача.

Самостійне приготування напоїв є важливим елементом побутової автономності незрячої людини. Процес передбачає додавання інгредієнтів у визначених кількостях відповідно до рецепту, що без зорового контролю є практично нездійсненим стандартними засобами. Неточне дозування може призводити як до погіршення смакових характеристик напою, так і до марного витрачання продуктів.

Вимірювальний модуль, інтегрований у підставку ємності, фіксує зміну маси при додаванні кожного інгредієнта з високою точністю. У процесі насипання або відміряння продукту система безперервно озвучує поточну масу доданої речовини з кроком, достатнім для практично точного дозування. При досягненні цільового значення, заданого рецептом або попередньо встановленого користувачем, система подає чіткий сигнал зупинки. Передбачається можливість збереження

індивідуальних рецептів у пам'яті системи, що дозволяє відтворювати звичні напої без необхідності щоразу вводити параметри вручну. Така реалізація надає незрячому користувачеві повну автономію в процесі приготування напою з точністю, порівнянною із використанням стандартних кухонних ваг зрячою людиною.

Контроль якості миття посуду є важливим гігієнічним завданням, що у випадку незрячої людини не може бути вирішене без спеціальних засобів. Залишки мийного засобу або органічних забруднень у воді після ополіскування не виявляються тактильно, не мають вираженого запаху у малих концентраціях і можуть становити загрозу здоров'ю при систематичному вживанні. Стандартна практика зрячої людини – огляд ємності на просвіт або перевірка поверхні – є недостатньою для надійної верифікації чистоти і принципово недоступна незрячому.

Система повинна забезпечувати інструментальний аналіз каламутності рідини після завершення процедури миття. Для верифікації користувач наповнює ємність чистою водою для ополіскування, після чого система автоматично аналізує її оптичну прозорість. Якщо рівень каламутності перевищує допустимий поріг – що свідчить про наявність залишків забруднень або мийного засобу – система видає голосове сповіщення з рекомендацією повторного промивання із зазначенням причини. Якщо вода відповідає критерію чистоти, система підтверджує готовність ємності до використання. Таким чином, користувач отримує об'єктивне, інструментально підтвержене підтвердження гігієнічного стану посуду без залучення сторонньої допомоги. Функція обмежена використанням прозорих рідин та не розповсюджується на забруднення, що не впливають на каламутність.

У побутових умовах незряча людина може витратити значний час на пошук предметів, залишених у незвичному місці. На відміну від зрячої людини, яка здатна миттєво зафіксувати предмет поглядом, незряча змушена послідовно обстежувати простір тактильно або покладатися на пам'ять. Пошук чашки на кухні є типовим і повторюваним прикладом такої ситуації, що негативно впливає на самостійність і якість повсякденного життя.

Система повинна підтримувати функцію дистанційної акустичної локації: за командою користувача, надісланою через мобільний застосунок, активується короткий повторюваний звуковий сигнал, що дозволяє визначити місцезнаходження ємності за звуком. Сигнал має бути достатньо виразним для розрізнення на тлі побутового шуму та автоматично вимикатись після знаходження пристрою або за командою скасування. Інтенсивність та тривалість сигналу мають бути налаштовуваними відповідно до акустичних характеристик приміщення та індивідуальних потреб користувача.

Додатково акустичний модуль використовується для автономного сповіщення про досягнення заданої температури охолодження напою. Користувач заздалегідь задає цільовий температурний поріг – наприклад, оптимальну температуру вживання конкретного напою – і система самостійно сповіщає про його досягнення у фоновому режимі, не вимагаючи постійного контролю та дозволяючи зайнятися іншими справами в очікуванні.

Зведена характеристика визначених функціональних вимог представлена у Таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Функціональні вимоги до КФС «Розумна чашка»

№	Функціональна вимога	Канал зворотного зв'язку	Сценарій використання	Результат для користувача
1	Контроль рівня наповнення	Аудіо	Наливання гарячої рідини	Запобігання переливанню та опікам
2	Термічний моніторинг	Аудіо + тактильний	Оцінка температури перед вживанням	Безпечне споживання напою

Продовження таблиці 2.1

№	Функціональна вимога	Канал зворотного зв'язку	Сценарій використання	Результат для користувача
3	Точне дозування інгредієнтів	Аудіо	Самостійне приготування напою	Автономність без зорового контролю
4	Гігієнічний контроль	Аудіо	Перевірка чистоти після миття	Підтвердження гігієнічної безпеки
5	Акустична локація та сповіщення	Аудіо	Пошук чашки, контроль охолодження	Орієнтування у побутовому просторі

Для коректної реалізації кожної функціональної вимоги необхідно визначити кількісні параметри, що забезпечують достатню точність та своєчасність зворотного зв'язку. Затримка сповіщення визначається як час від моменту фіксації порогового значення вимірювальним елементом системи до початку відтворення аудіосигналу. Для функцій безпеки – контролю рівня та температури – цей параметр є критичним і не повинен перевищувати встановлених значень навіть при максимальному навантаженні на обчислювальний модуль, оскільки навіть незначне запізнення сповіщення може призвести до небезпечних ситуацій. Водночас для інформаційних функцій допустимі більші затримки, однак вони мають залишатися в межах, що забезпечують комфортну взаємодію користувача із системою. (таб.2.2).

Для інформаційних функцій, таких як дозування інгредієнтів або акустична локація, вимоги до затримки є менш критичними, однак повинні забезпечувати комфортну взаємодію користувача із системою без відчутних затримок у зворотному зв'язку.

Таблиця 2.2 – Технічні характеристики функціональних вимог КФС «Розумна чашка»

Функція	Точність вимірювання	Частота вимірювань	Допустима затримка сповіщення	Допустима похибка
Контроль рівня наповнення	±5 мл	1 раз / 0,5 с	не більше 1 с	±3% від повного об'єму
Термічний моніторинг	±0,5°C	1 раз / 1 с	не більше 2 с	±1°C
Дозування інгредієнтів	±1 г	1 раз / 0,5 с	не більше 1 с	±2 г
Гігієнічний контроль	–	одноразово після миття	не більше 3 с	рівень каламутності < 5 NTU
Акустична локація	–	за запитом	не більше 0,5 с після команди	–

Поряд із функціональними вимогами, що визначають поведінку системи, необхідно сформулювати нефункціональні вимоги – характеристики, що визначають якість функціонування системи в цілому: її надійність, безпечність, енергоефективність, часові характеристики та зручність інтерфейсу. Нефункціональні вимоги не описують конкретну функцію системи, але встановлюють умови, за яких ця функція вважається реалізованою належним чином, та забезпечують відповідність системи стандартам асистивних технологій.

Система має забезпечувати автономну роботу від вбудованого акумулятора не менше 8 годин у режимі активного використання, що відповідає тривалості стандартного робочого дня. У режимі очікування – коли здійснюється моніторинг параметрів без відтворення сповіщень – час автономної роботи має становити не менше 24 годин. Пікове енергоспоживання при одночасній роботі всіх модулів не

повинно перевищувати значень, що забезпечують стабільне функціонування без просідання напруги живлення. Передбачається підтримка режиму зниженого енергоспоживання при відсутності активності користувача понад 5 хвилин із автоматичним поверненням до робочого стану при фіксації зміни параметрів.

Ймовірність хибного спрацювання сповіщень – ситуацій, коли формується попередження за відсутності реальної загрози – не повинна перевищувати 1% від загальної кількості вимірювань. Ймовірність пропуску критичної події, тобто відсутності сповіщення при фактичному досягненні порогового значення, має прагнути до нуля, оскільки безпосередньо впливає на безпеку користувача. Відмови вимірювальних або аудіомодулів можуть призводити до некоректних або відсутніх сповіщень і розглядаються як критичний ризик, що потребує реалізації механізмів діагностики та відновлення. Передбачається коректне відновлення після короткочасного відключення живлення без втрати користувацьких налаштувань; повна втрата живлення розглядається як допустима аварійна ситуація з тимчасовою недоступністю функцій.

Також має забезпечуватися формування попередження при перевищенні температури рідини понад 60°C. Температура зовнішньої поверхні корпусу не повинна перевищувати 45°C для запобігання контактним термічним травмам. Затримка сповіщення при досягненні критичних температурних або рівневих значень не повинна перевищувати 1 секунди. Електронні компоненти мають бути захищені від впливу вологи та забезпечувати безпечну експлуатацію в типових побутових умовах. Робочий температурний діапазон рідин становить від 0 до 100°C; точність вимірювань може знижуватись при використанні рідин із нетиповими фізичними властивостями, такими як піноутворення або висока в'язкість.

Загальна затримка системи – від моменту зміни фізичного параметра до початку відтворення аудіосповіщення – не повинна перевищувати 1 секунди для функцій безпеки та 2 секунд для інформаційних функцій. Затримка відповіді на команду користувача через мобільний застосунок – зокрема активація акустичної локації – не повинна перевищувати 500 мс за умови стабільного з'єднання.

Затримка зміни текстури тактильного індикатора при перетині температурного порогу не повинна перевищувати 3 секунд.

Голосові сповіщення мають відтворюватись чіткою розбірливою мовою українською мовою зі швидкістю, комфортною для сприйняття – орієнтовно 120–150 слів на хвилину. Гучність відтворення має регулюватись у діапазоні, достатньому для сприйняття як у тихому приміщенні, так і на кухні з фоновим шумом. Мобільний застосунок верхнього рівня має відповідати стандартам доступності WCAG 2.1 рівня AA та бути повністю сумісним із вбудованими засобами екранного доступу – VoiceOver (iOS) та TalkBack (Android). Усі елементи керування застосунку мають бути доступні без зорового контролю: навігація здійснюється виключно жестами та голосовими командами. Фізичні елементи керування на корпусі ємності мають мати тактильне маркування, що однозначно ідентифікує їхню функцію на дотик.

Зведена характеристика нефункціональних вимог представлена у таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Нефункціональні вимоги до КФС «Розумна чашка»

Категорія	Параметр	Вимога
Енергоспоживання	Час роботи в активному режимі	$\geq 8$ годин
Енергоспоживання	Час роботи в режимі очікування	$\geq 24$ години
Енергоспоживання	Режим зниженого споживання	активація після 5 хв бездіяльності
Надійність	Безперервна експлуатація без збоїв	$\geq 30$ діб
Надійність	Ймовірність хибного спрацювання	$\leq 1\%$ від кількості вимірювань

Продовження таблиці 2.3

Категорія	Параметр	Вимога
Надійність	Ймовірність пропуску критичної події	$\approx 0$
Надійність	Відновлення після відключення живлення	без втрати налаштувань
Безпека	Максимальна температура зовнішньої поверхні корпусу	$\leq 45^{\circ}\text{C}$
Безпека	Затримка сповіщення при критичних значеннях	$\leq 1 \text{ с}$
Затримки	Аудіосповіщення для функцій безпеки	$\leq 1 \text{ с}$
Затримки	Аудіосповіщення для інформаційних функцій	$\leq 2 \text{ с}$
Затримки	Відповідь на команду через застосунок	$\leq 500 \text{ мс}$
Затримки	Зміна текстури тактильного індикатора	$\leq 3 \text{ с}$
Інтерфейс	Швидкість мовлення синтезатора	120–150 слів / хв
Інтерфейс	Стандарт доступності застосунку	WCAG 2.1 рівень AA
Інтерфейс	Сумісність із екранним доступом	VoiceOver (iOS), TalkBack (Android)
Інтерфейс	Тактильне маркування фізичних елементів	обов'язкове для всіх органів керування

Кінець таблиці 2.3

Категорія	Параметр	Вимога
Час зміни текстури ( $S_0$ – $S_2$ )	$\leq 3$ с	Комфортний відгук при нормальному режимі
Час зміни текстури ( $S_3$ , небезпека)	$\leq 1$ с	Критична безпека – запобігання опіку
Температура зовнішньої поверхні	$\leq 45$ °C	Безпечний тривалий контакт зі шкірою
Частота вібрації (мінімальна)	$\geq 15$ Гц	Поріг тактильного відчуття людини
Частота вібрації (максимальна)	$\leq 200$ Гц	Уникнення болю / оніміння
Точність класифікації тактильної зони	$\geq 95$ %	Відповідність вимогам аудіоканалу
Тактильне маркування органів керування	Обов'язкове	WCAG 2.1, нульова зорова залежність

Визначені вимоги у сукупності формують специфікацію системи. Усі функції реалізуються через слуховий і тактильний канали зворотного зв'язку, що відповідає нейрофізіологічним особливостям цільової аудиторії.

Принциповою характеристикою сформованої специфікації є її орієнтованість на повну автономність користувача: жодна з описаних функцій не передбачає залучення сторонньої допомоги або додаткових пристосувань. Кількісні порогові значення затримок, точності та надійності слугують верифікованими критеріями приймальних випробувань, що унеможлиблює суб'єктивну оцінку відповідності системи вимогам. Відповідність цим критеріям перевіряється на етапі тестування через набір сценаріїв, що моделюють реальні умови експлуатації. Сукупність цих вимог, а також визначені обмеження системи та класифіковані ризики відмов, є основою для подальшого проєктування апаратної та програмної складових кіберфізичної системи.

## 2.2. Ієрархічна модель кіберфізичної системи «Розумна чашка»

Кіберфізична система (КФС) «Розумна чашка» являє собою складний інтегрований комплекс, у якому фізичні процеси – термодинамічні, гідростатичні, оптичні та механічні – тісно переплітаються з цифровими обчислювальними процесами, що відбуваються в реальному часі на мікроконтролері ESP32. Для формального опису функціонування такої системи необхідно побудувати математичну модель, яка відобразатиме як динаміку фізичних станів середовища у чашці, так і логіку прийняття рішень керуючим модулем. Подібний підхід відповідає парадигмі кіберфізичних систем, у якій комп'ютерні алгоритми та фізичне середовище утворюють нерозривну кібернетичну петлю зі зворотним зв'язком.

У загальному вигляді стан кіберфізичної системи «Розумна чашка» у момент часу  $t$  можна описати вектором стану:

$$S(t) = \{T(t), L(t), m(t), \tau(t), A(t)\}, \quad (2.1)$$

де  $T(t)$  – температура рідини у градусах Цельсія;

$L(t)$  – рівень наповнення ємності;

$m(t)$  – маса вмісту ємності та інгредієнтів, що дозуються;

$\tau(t)$  – показник каламутності рідини;

$A(t)$  – акустичний вихідний сигнал системи, що формується на основі перших чотирьох компонент.

Кожна з компонент вектору стану є неперервною функцією часу на фізичному рівні, однак у межах дискретної цифрової обробки вона фіксується з певним часовим кроком дискретизації  $\Delta t$ , що визначається частотою опитування відповідного давача.

Загальна архітектура моделі будується на основі принципу ієрархічної декомпозиції: на нижньому рівні розміщуються окремі математичні підмоделі для кожного фізичного процесу, а на верхньому – модель прийняття рішень та генерації

сигналів зворотного зв'язку для користувача. Такий підхід дозволяє аналізувати систему як у цілому, так і досліджувати поведінку окремих підсистем.

### 2.3. Модель термального моніторингу

Температурний стан рідини у чашці визначається термодинамічними процесами теплообміну між рідиною та навколишнім середовищем. Для математичного опису охолодження напою використовується закон Ньютона–Ріхмана, що встановлює пропорційність між швидкістю зміни температури тіла та різницею температур між тілом і навколишнім середовищем:

$$\frac{dT(t)}{dt} = -k \cdot (T(t) - T_{env}), \quad (2.2)$$

де  $T(t)$  – миттєва температура рідини у момент часу  $t$ , °C;

$T_{env}$  – температура навколишнього середовища (кімнатна температура), °C;

$k$  – коефіцієнт тепловіддачі,  $s^{-1}$ .

Розв'язок диференціального рівняння (2.2) при початкових умовах  $T(0) = T_0$  набуває вигляду:

$$T(t) = T_{env} + (T_0 - T_{env}) \cdot e^{-k \cdot t}, \quad (2.3)$$

де  $T_0$  – початкова температура рідини.

Вираз (2.3) описує класичний експоненційний процес охолодження. На практиці значення коефіцієнта  $k$  знаходиться в діапазоні від  $0.001 s^{-1}$  до  $0.01 s^{-1}$  залежно від типу ємності, наявності теплоізоляції та характеру руху повітря в приміщенні.

Давач DS18B20 надає дискретні відліки температури з часовим інтервалом  $\Delta t_T$ . З урахуванням дискретизації рівняння охолодження приймає різницеву форму:

$$T[n + 1] = T_{\text{env}} + (T[n] - T_{\text{env}}) \cdot e^{-k \cdot \Delta t_T}, \quad (2.4)$$

де  $T[n]$  – вимірне значення температури на  $n$ -му кроці.

Мікроконтролер ESP32 зберігає поточне значення  $T[n]$  і порівнює його з нечіткими порогами, визначеними відповідно до фізіологічних та гастрономічних норм споживання напоїв. Формально функція класифікації температури записується у вигляді заданої функції:

$$C_T(T) = \begin{cases} \text{"небезпечно"}, & T > 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{"гаряче"}, & 50 \leq T \leq 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{"тепло"}, & 35 \leq T < 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ \text{"холодне"}, & T < 35 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.5)$$

Ця функція є основою для синтезу мовленнєвих повідомлень. При перетині порогових значень температури система автоматично генерує голосове повідомлення про зміну теплового стану напою.

#### 2.4. Модель моніторингу рівня рідини

Рівень рідини у ємності є одним із ключових параметрів, що забезпечує безпеку використання системи людьми з вадами зору. Для ємності з постійним поперечним перерізом  $S_c$  висота стовпа рідини  $h$  пропорційна об'єму рідини  $V$ :

$$h(t) = \frac{V(t)}{S_c}. \quad (2.6)$$

Нормований рівень наповнення  $L(t)$ , що змінюється від 0 до 1, визначається відношенням поточного об'єму рідини до максимально допустимого об'єму  $V_{\text{max}}$ :

$$L(t) = \frac{V(t)}{V_{\max}} = \frac{h(t) \cdot S_c}{V_{\max}}. \quad (2.7)$$

Вихідний сигнал давача  $U_L$  пов'язаний з висотою рідини лінійною залежністю в межах робочого діапазону:

$$h = \frac{U_L - U_{L,\min}}{U_{L,\max} - U_{L,\min}} \cdot h_{\max}, \quad (2.8)$$

де  $U_{L,\min}$  та  $U_{L,\max}$  – вихідна напруга давача при порожній та повній ємності відповідно;

$h_{\max}$  – максимальна висота рідини в ємності.

Для підвищення точності вимірювання ESP32 реалізує метод ковзного середнього:

$$L_{\text{filt}}[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} L[n-i]. \quad (2.9)$$

де  $N$  – розмір вікна фільтрації.

Після фільтрації нормований рівень  $L_{\text{filt}}[n]$  порівнюється з набором порогів, що відповідають інформативним станам наповнення:

$$C_L(L) = \begin{cases} "0\%", & L < 0,05 \\ "20\%", & 0,15 \leq L < 0,35 \\ "50\%", & 0,40 \leq L < 0,65. \\ "80\%", & 0,70 \leq L < 0,90 \\ "майже повна", & L \geq 0,90 \end{cases} \quad (2.10)$$

Умова активації сигналу запобігання переповнення формулюється таким чином:

$$A_{\text{warn}} = 1 \leftrightarrow L_{\text{filt}}[n] \geq L_{\text{warn}} \wedge L_{\text{filt}}[n-1] < L_{\text{warn}}, \quad (2.11)$$

де  $L_{\text{warn}} = 0.9$  – поріг попередження, після якого система видає команду «Зупиніться – чашка майже повна».

Ця умова реалізує захист від переливання гарячої рідини.

## 2.5. Модель точного дозування маси інгредієнтів

Підсистема зважування базується на тензодавачі, підключеному через підсилювач HX711 до мікроконтролера ESP32. Лінійна модель перетворення маси  $m$  у вихідний цифровий код АЦП  $C_{\text{ADC}}$  має вигляд:

$$C_{\text{ADC}} = G_{\text{amp}} \cdot \frac{S_{\text{gauge}} \cdot m \cdot g}{E_{\text{ref}}}, \quad (2.12)$$

де  $G_{\text{amp}}$  – коефіцієнт підсилення HX711 (64 або 128);

$S_{\text{gauge}}$  – чутливість тензодавача, мВ/(В·кг);

$g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>;

$E_{\text{ref}}$  – опорна напруга АЦП, В.

Оберненням цього відношення отримуємо формулу для визначення маси на основі показань АЦП після калібрування:

$$m[n] = \frac{C_{\text{ADC}}[n] - C_{\text{zero}}}{K_{\text{cal}}}, \quad (2.13)$$

де  $C_{\text{zero}}$  – відлік АЦП при відсутності навантаження;

$K_{\text{cal}}$  – калібрувальний коефіцієнт, що встановлюється за допомогою еталонної гири з відомою масою  $m_{\text{ref}}$ :

$$K_{\text{cal}} = \frac{C_{\text{ADC,ref}} - C_{\text{zero}}}{m_{\text{ref}}}, \quad (2.14)$$

Процедура калібрування виконується одноразово при налаштуванні системи та зберігається у енергонезалежній пам'яті мікроконтролера. Для підвищення точності вимірювання застосовується медіанний фільтр:

$$m_{\text{filt}}[n] = \text{median}\{m[n], m[n-1], \dots, m[n-N_w+1]\}. \quad (2.15)$$

Приріст маси за один крок вимірювання обчислюється як:

$$\Delta m[n] = m_{\text{filt}}[n] - m_{\text{filt}}[n - N_{\text{stable}}], \quad (2.16)$$

де  $N_{\text{stable}}$  – кількість кроків, за яку система чекає на стабілізацію показань ваги.

Умова стабілізації формулюється через дисперсію останніх  $K_s$  відліків:

$$\sigma^2 = \frac{1}{K_s} \cdot \sum_{i=0}^{K_s-1} (m[n-i] - m)^2 \leq \sigma_{\text{th}}^2, \quad (2.17)$$

де  $m$  – середнє значення по вікну стабілізації;

$\sigma_{\text{th}}^2$  – допустимий поріг дисперсії (зазвичай 0.01–0.04 г<sup>2</sup>).

Як тільки умова (2.17) виконується, фіксується стабільне значення маси і система оголошує додану кількість інгредієнта через голосовий інтерфейс.

## 2.6. Модель оптичного контролю чистоти рідини

Контроль гігієнічного стану ємності здійснюється за допомогою давача каламутності, принцип дії якого базується на вимірюванні інтенсивності розсіяного

або поглиненого світла у досліджуваній рідині. Каламутність описується відповідно до закону Бугера–Ламберта–Бера:

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu \cdot d}, \quad (2.18)$$

де  $I$  – інтенсивність світла після проходження через рідину;

$I_0$  – початкова інтенсивність;

$\mu$  – коефіцієнт екстинкції рідини;

$d$  – оптична довжина шляху в рідині.

Вихідна напруга давача  $U_{\text{turb}}$  пов'язана з каламутністю  $\tau(t)$  через перетворювальну функцію, що лінеаризується у робочому діапазоні:

$$\tau(t) = \frac{U_{\text{turb},0} - U_{\text{turb}}(t)}{K_{\text{turb}}}, \quad (2.19)$$

де  $U_{\text{turb},0}$  – вихідна напруга при прозорій чистій воді;

$K_{\text{turb}}$  – чутливість давача.

Нормована функція чистоти  $C_{\text{clean}}$  визначається як:

$$C_{\text{clean}}(\tau) = \begin{cases} \text{"чиста"}, & \tau \leq \tau_{\text{clean}} \\ \text{"потребує промивання"}, & \tau > \tau_{\text{clean}} \end{cases} \quad (2.20)$$

де  $\tau_{\text{clean}}$  – граничне значення каламутності чистої води (1–5 НТО).

Система активує голосове повідомлення «Потрібне додаткове промивання» або «Чашка чиста» на основі результату класифікації (2.20).

## 2.7. Модель формування акустичного зворотного зв'язку

Функція формування акустичного виходу  $A(t)$  визначається як результат відображення вектору стану системи  $S(t)$  у простір повідомлень  $M$ :

$$A(t) = F_{\text{audio}}(S(t)) = F_{\text{audio}}(T(t), L(t), m(t), \tau(t)), \quad (2.21)$$

де  $F_{\text{audio}}$  – функція прийняття рішень щодо типу та змісту акустичного сигналу.

Ця функція реалізується у вигляді пріоритетної логічної схеми: у разі одночасної активації кількох подій визначається їх пріоритет  $P_i$  і виконується повідомлення з найвищим пріоритетом:

$$A^*(t) = \arg \max_{i \in \text{Events}(t)} P_i, \quad (2.22)$$

де  $\text{Events}(t)$  – множина подій, що були активовані у момент  $t$ .

Для зуммера функція активації визначається бінарним предикатом:

$$B(t) = 1 \leftrightarrow (T(t) = T_{\text{target}} \pm \varepsilon) \vee (L(t) \geq L_{\text{warn}}) \vee (R_{\text{BLE}} = 1), \quad (2.23)$$

де  $T_{\text{target}}$  – задана цільова температура;

$\varepsilon$  – допустима похибка;

$R_{\text{BLE}}$  – команда дистанційного виклику через Bluetooth.

Параметри генерованого тонального сигналу зуммера описуються моделлю:

$$u_{\text{buzz}}(t) = A_{\text{buzz}} \cdot \text{sign}(\sin(2\pi \cdot f_{\text{buzz}} \cdot t)) \cdot \text{rect}(t; t_{\text{on}}, T_{\text{period}}), \quad (2.24)$$

де  $f_{\text{buzz}}$  – частота тонального сигналу;

$A_{\text{buzz}}$  – амплітуда сигналу;

$\text{rect}(t; t_{\text{on}}, T_{\text{period}})$  – прямокутна функція, що задає тривалість імпульсу  $t_{\text{on}}$  та період повторення  $T_{\text{period}}$ .

## 2.8. Інтегральна модель функціонування кіберфізичної системи

Об'єднуючи всі розглянуті підмоделі, можна сформулювати інтегральну динамічну модель кіберфізичної системи «Розумна чашка» у формі системи рівнянь стану:

$$T[n + 1] = T_{\text{env}} + (T[n] - T_{\text{env}}) \cdot e^{-k \cdot \Delta t_T}. \quad (2.25)$$

$$L_{\text{filt}}[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} L[n - i]. \quad (2.26)$$

$$m_{\text{filt}}[n] = \text{median}\{m[n], \dots, m[n - N_w + 1]\}. \quad (2.27)$$

$$\tau[n] = \frac{U_{\text{turb},0} - U_{\text{turb}}[n]}{K_{\text{turb}}}. \quad (2.28)$$

$$A[n] = F_{\text{audio}}(T[n], L_{\text{filt}}[n], m_{\text{filt}}[n], \tau[n]). \quad (2.29)$$

Складові загальної моделі (2.25-2.29) повністю описують динаміку стану КФС на дискретному часовому горизонті і є математичною основою для програмної реалізації алгоритмів обробки даних на мікроконтролері ESP32. Взаємозв'язок між підсистемами відображає кіберфізичну природу системи: фізичні процеси генерують безперервні сигнали, цифрова обробка перетворює їх на дискретні оцінки стану, а функція  $F_{\text{audio}}$  замикає контур зворотного зв'язку, забезпечуючи доступний для незрячої людини інтерфейс взаємодії з реальним фізичним світом.

Інтегральна модель також дозволяє оцінювати вплив окремих параметрів середовища на загальну поведінку системи в реальному часі та адаптувати алгоритми обробки відповідно до змін умов експлуатації. Це створює передумови для підвищення точності вимірювань і надійності прийняття рішень у критичних ситуаціях.

Крім того, така формалізація спрощує подальшу масштабованість системи та інтеграцію нових сенсорів або функціональних модулів без суттєвої зміни базової архітектури.

## 2.9. Модель тактильного стану

Тактильний стан корпусу є дискретною функцією відфільтрованого значення температури рідини  $T_{filt}[n]$ . Функція класифікації тактильного стану записується у вигляді заданої функції:

$$C_{tact}(T_{filt}) = \begin{cases} S_0, & T < 35 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_1, & 35 \leq T < 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_2, & 50 \leq T < 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_3, & T \geq 70 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad (2.30)$$

де  $S_0, S_1, S_2, S_3$  – дискретні рівні тактильного стану корпусу (0 – гладка, 3 – максимальні виступи);

$T_{filt}$  – відфільтроване значення температури рідини,  $^\circ\text{C}$ .

Умова переходу між станами формулюється аналогічно до умови активації акустичного сигналу (формула 2.31):

$$A_{tact} = 1 \Leftrightarrow C_{tact}(T_{filt}[n]) \neq C_{tact}(T_{filt}[n - 1]). \quad (2.31)$$

Час переходу між станами  $\tau_{tact}$  визначається механічними характеристиками актуатора і має задовольняти вимогу:

$$\tau_{tact} \leq \begin{cases} 3 \text{ c,} & \text{якщо } C_{tact} \in \{S_0, S_1, S_2\} \\ 1 \text{ c,} & \text{якщо } C_{tact} = S_3 \end{cases}. \quad (2.32)$$

Одночасно з активацією тактильного стану мікроконтролер генерує вібраційний сигнал частотою  $f_{vib}$  через п'єзоелектричний актуатор, вбудований у ручку:

$$f_{vib}(S) = \begin{cases} 0 \text{ Гц,} & S = S_0 \\ 20 \text{ Гц,} & S = S_1 \\ 60 \text{ Гц,} & S = S_2 \\ 100 \text{ Гц,} & S = S_3 \end{cases} \quad (2.33)$$

Такий спосіб кодування відповідає принципу інтуїтивного зіставлення: вища частота вібрації асоціюється з вищою небезпекою, що мінімізує час когнітивної обробки сигналу незрячим користувачем.

Важливою характеристикою розробленої моделі є її розширюваність, тобто при додаванні нових датчиків або каналів зворотного зв'язку вектор стану  $S(t)$  та відповідна функція  $F_{\text{audio}}$  можуть бути доповнені новими компонентами без зміни загальної архітектури системи. Це відповідає принципам модульного проектування кіберфізичних систем, що є актуальним напрямком сучасних досліджень у галузі інтернету речей та асистивних технологій.

## 2.10. Висновки до розділу

Таким чином, запропонована математична модель функціонування кіберфізичної системи «Розумна чашка» охоплює всі ключові фізичні процеси, що відбуваються всередині системи, і формалізує їх зв'язок з алгоритмами цифрової обробки та синтезу акустичних сигналів зворотного зв'язку. Наведені моделі є достатньою теоретичною основою для проектування програмного забезпечення мікроконтролера, вибору оптимальних параметрів фільтрації та калібрування датчиків, а також для верифікації функціональності системи методами математичного моделювання.

### **3 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА “РОЗУМНА ЧАШКА” ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ**

#### **3.1 Структура кіберфізичної системи «Розумна чашка»**

Проблематика забезпечення автономності та безпеки осіб із порушеннями зору під час виконання побутових операцій, зокрема приготування гарячих напоїв, є актуальним і недостатньо вирішеним завданням у галузі асистивних технологій та кіберфізичних систем. Аналіз існуючих рішень засвідчує, що сучасні засоби здебільшого орієнтовані або на окремі функції (навігація, читання тексту), або являють собою громіздкі спеціалізовані комплекси, позбавлені інтеграції з повсякденним побутовим посудом. Розроблювана кіберфізична система «Розумна чашка» спрямована на усунення цієї прогалини шляхом поєднання сенсорного фізичного рівня, мікроконтролерного управління та мобільного кіберпростору в єдиній компактній системі.

Відповідно до базових принципів проектування КФС, визначених у розділі 1, структура «Розумної чашки» побудована за трирівневою ієрархічною моделлю: фізичний рівень (сенсори та виконавчі механізми), комунікаційний рівень (мікроконтролер ESP32) та кібернетичний рівень (мобільний застосунок). Така архітектура забезпечує чітке розмежування функцій збору даних, їх обробки та прийняття рішень, що є необхідною умовою надійного функціонування системи в реальному часі.

Формалізація вимог до системи потребує структурованого аналізу проблем, з якими стикаються особи з вадами зору під час приготування та споживання кавових і чайних напоїв. Виокремлено три групи проблем. По-перше, проблеми безпеки: гаряча рідина та посуд становлять значний ризик термічних опіків; відсутність візуального контролю над напрямком та обсягом наливання призводить до розливання рідини на людину або поверхню. По-друге, проблеми точності та просторової навігації: неможливість без допоміжних засобів відміряти задану кількість інгредієнтів (кава, цукор, молоко) чи визначити рівень наповнення чашки. По-третє, перцептивні обмеження: відсутність дистанційного відчуття

температури унеможливилює оцінку придатності напою для споживання без ризику опіку, а традиційна конструкція чашки з ручкою не забезпечує однозначної тактильної орієнтації.

Для усунення зазначених проблем запропоновано концепцію кіберфізичної системи «Розумна чашка», що реалізує принцип мультимодального інформування користувача через голосові підказки, тактильні індикатори та звукові сигнали. Система надає особі з вадами зору повну функціональну автономію при приготуванні та споживанні будь-якого гарячого напою без залучення сторонньої допомоги.

Запропонована КФС «Розумна чашка» містить дев'ять функціональних підсистем, кожна з яких вирішує окреме завдання в межах загальної концепції допоміжної технології для людей із порушенням зору.

Підсистема 1 – контроль наповнення з голосовими підказками. Чашка містить ємнісний або ультразвуковий датчик рівня рідини, вихідний сигнал якого оцифровується мікроконтролером і надходить до модуля голосового синтезу. Система формує послідовні голосові повідомлення відповідно до заданих порогових значень: «Рівень 20%», «Рівень 50%», «Рівень 80%», «Чашка майже повна, зупиніться!». Реалізований механізм виключає можливість переливання рідини та знижує ймовірність отримання термічних опіків.

Підсистема 2 – індукційний нагрів та автоматичне відключення. Підставка обладнана вбудованим індукційним нагрівальним елементом, який забезпечує рівномірне та безпечне нагрівання рідини без застосування відкритого вогню та розігрітих поверхонь. Після досягнення встановленого користувачем температурного порогу контролер вимикає нагрів і формує звукове сповіщення через мобільний застосунок. Додатково датчик рівня рідини блокує роботу нагрівального елемента за умови порожньої чашки, що запобігає перегріву та пошкодженню компонентів системи.

Підсистема 3 – зважування з голосовими підказками. До конструкції підставки інтегровано тензOMETричні датчики, що реєструють зміну маси вмісту чашки. На основі отриманих даних контролер обчислює масу доданого інгредієнта

і передає результат на голосовий синтезатор: «Додано 5 грамів кави», «Рекомендована порція для однієї чашки – 8 грамів», «Додано 10 грамів цукру». Такий підхід забезпечує точне дозування складників напою без потреби у візуальному контролі.

Підсистема 4 – голосовий температурний індикатор. Мікроконтролер у безперервному режимі зчитує показання датчика температури рідини та озвучує їх на запит користувача або автоматично при перетині встановлених порогів: «Температура 30°C», «Температура 60°C», «Температура 85°C». Підсистема надає користувачу можливість визначити безпечний момент для початку споживання напою без ризику термічного ушкодження слизових оболонок.

Підсистема 5 – живлення. Функціонування системи забезпечується від вбудованого літій-іонного акумулятора з підтримкою бездротової зарядки за стандартом Qi. Розміщення чашки на зарядній станції не потребує маніпуляцій із кабелями, що суттєво спрощує використання пристрою особами з порушеннями зору. Для збереження заряду акумулятора в неактивному стані мікроконтролер ESP32 реалізує режим глибокого сну.

Підсистема 6 – Bluetooth-зв'язок зі смартфоном. Інтерфейс Bluetooth Low Energy, реалізований засобами ESP32, забезпечує двосторонній обмін даними між пристроєм і мобільним застосунком. Через застосунок користувач має змогу встановлювати цільову температуру нагріву, обирати профіль напою (кава, чай, інше), отримувати сповіщення про поточний стан системи, а також керувати параметрами пристрою за допомогою голосових команд через мікрофон смартфона.

Підсистема 7 – акустичний локатор. Підсистема реалізує функцію дистанційної активації звукового сигналу через мобільний застосунок або голосову команду, що дозволяє користувачу оперативно виявити чашку на кухонній поверхні. Пристрій генерує послідовність звукових імпульсів, які слугують просторовим орієнтиром. Активація відбувається шляхом передачі BLE-команди від застосунку до контролера, який вмикає вбудований зумер.

Підсистема 8 – гігієнічний контроль із голосовими підказками. Оптичний датчик мутності вимірює прозорість рідини після промивання чашки. За результатами вимірювання контролер формує відповідне голосове повідомлення: «Чашка чиста» або «Потрібне додаткове промивання». Для осіб із вадами зору автоматизований контроль гігієнічного стану посуду є особливо важливим, оскільки виключає вживання напою з недостатньо промитої чашки.

Підсистема 9 – інтерфейс «Zero-Visual UI». Розроблено систему, що забезпечує незалежність від зорового сприйняття. Зовнішній корпус виконано з термоізолюючого матеріалу, який виключає опіки під час утримання чашки. Поверхня корпусу має рельєфні зони, текстура яких змінюється залежно від температури вмісту: рівна поверхня відповідає холодній рідині, злегка шорстка – теплій, а виражені виступи сигналізують про гарячу рідину. Ручка виконана в ергономічній формі з рельєфними позначками, що однозначно вказують на розташування питного отвору. Кришка з клапаном оснащена датчиком тиску: у разі перегріву та надмірного тиску пари клапан автоматично блокується до охолодження рідини до безпечного рівня, створюючи фізичний бар'єр від опіків.

Відповідно до моделі кіберфізичних систем, архітектура «Розумної чашки» організована як трирівнева ієрархія взаємопов'язаних компонентів.

Нижнім є фізичний рівень, що являє собою мережу гетерогенних датчиків: датчик рівня рідини, датчик температури, тензометричні датчики (ваги), датчик тиску, оптичний датчик мутності, а також виконавчі механізми – індукційний нагрівальний елемент, голосовий синтезатор (динамік), тактильні актуатори та акустичний зумер-локатор. На цьому рівні відбувається безпосереднє вимірювання фізичних параметрів середовища та виконання управляючих впливів.

Середнім є комунікаційний рівень у вигляді мікроконтролера ESP32-WROOM-32, що виконує акумуляцію сигналів із усіх датчиків, їх первинну цифрову обробку (фільтрацію, нормалізацію, порогову логіку), формування голосових та звукових повідомлень через інтерфейс I2S, а також передачу даних до верхнього рівня через протокол BLE. Контролер забезпечує роботу всіх дев'яти

підсистем в умовах акумуляторного живлення завдяки механізмам енергозбереження.

Верхнім є кібернетичний рівень – мобільний застосунок на смартфоні користувача, що реалізує функції персоналізації (налаштування цільової температури, профілів напоїв), голосового командного інтерфейсу через вбудований мікрофон, сповіщень у реальному часі та формування цифрових профілів споживача. Саме цей рівень перетворює «Розумну чашку» з локального автоматизованого пристрою на повноцінну кіберфізичну систему з персоналізованим інтелектуальним управлінням.

Архітектуру розробленої КФС «Розумна чашка» для людей з вадами зору відображено на рис. 3.1.

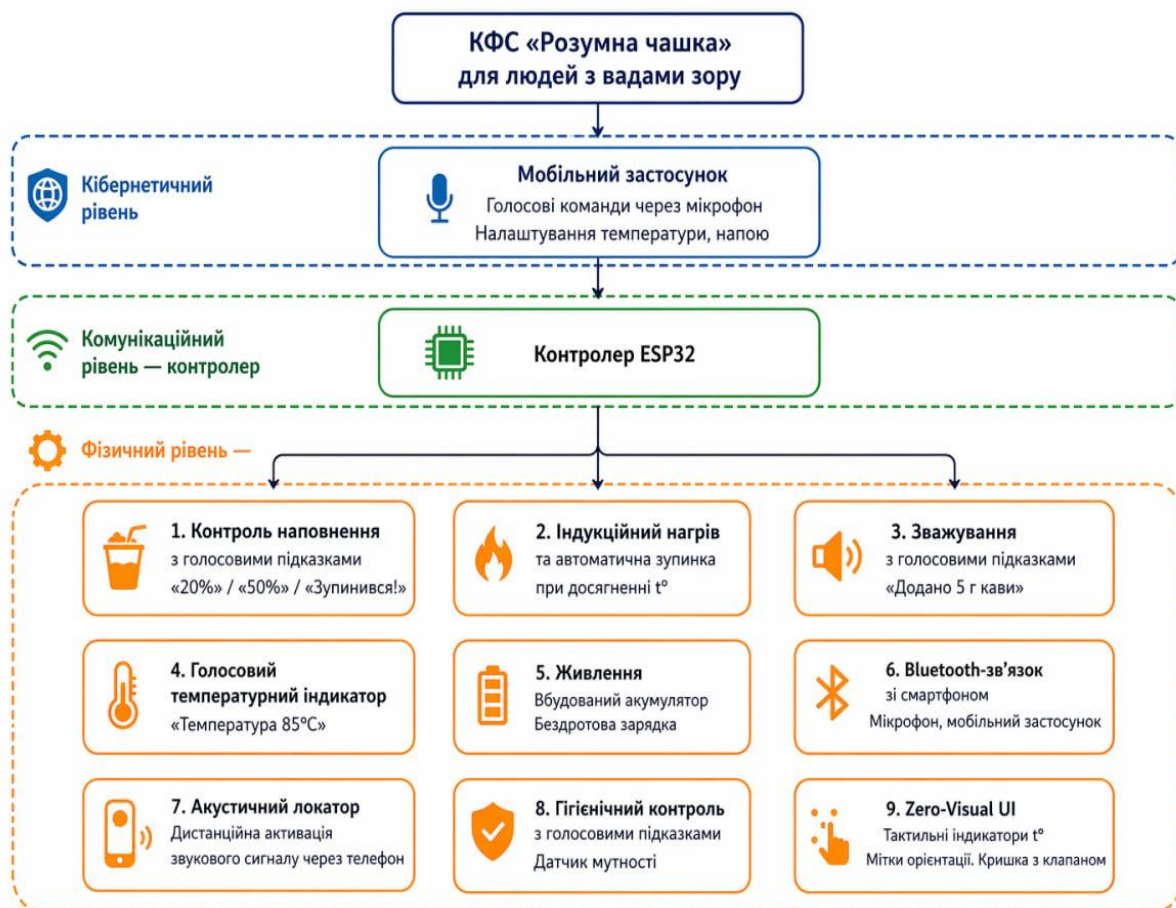


Рисунок 3.1 – Архітектура кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Для апаратної реалізації КФС «Розумна чашка» мікроконтролер має задовольняти таким вимогам: компактний форм-фактор, інтегрована підтримка бездротових протоколів Bluetooth (критична для підсистеми б), наявність достатньої кількості аналогових і цифрових входів/виходів для обслуговування дев'яти підсистем, підтримка аудіоінтерфейсу для голосового синтезу та ефективне управління енергоспоживанням в акумуляторному режимі. Результати порівняльного аналізу трьох найбільш поширених платформ мікроконтролерів для IoT/CPS-застосувань наведено в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Порівняльний аналіз мікроконтролерів для реалізації КФС «Розумна чашка»

Характеристика	Arduino Nano (ATmega328P)	ESP32-WROOM-32	STM32 (Blue Pill)
Архітектура процесора	8-біт	32-біт (Dual Core)	32-біт
Тактова частота	16 МГц	160–240 МГц	72 МГц
Бездротовий зв'язок	Відсутній (зовн. модулі)	Wi-Fi + BLE (Dual Mode)	Відсутній
Енергоспоживання	Низьке	Дуже низьке (Deep Sleep)	Низьке
Обсяг Flash-пам'яті	32 КБ	4 МБ	64/128 КБ
Підтримка Audio/I2S	Дуже обмежена	Повна (I2S для синтезу)	Середня
Ємнісний тач-інтерфейс	Відсутній	Вбудований	Відсутній
Форм-фактор	Малий	Дуже малий	Малий

За результатами аналізу для реалізації КФС «Розумна чашка» обрано мікроконтролер ESP32-WROOM-32. Інтегрований Bluetooth Low Energy є обов'язковим для реалізації підсистеми зв'язку зі смартфоном (підсистема б) без

залучення додаткових апаратних модулів, що суперечило б вимозі компактності. По-друге, наявність апаратного інтерфейсу I2S та висока обчислювальна потужність двоядерного 32-бітного процесора забезпечують якісне відтворення стиснутих аудіофайлів або синтез голосу в реальному часі – критична умова для підсистем 1, 3, 4 та 8. По-третє, механізм Deep Sleep із пробудженням від зовнішніх сигналів датчиків дозволяє суттєво подовжити час автономної роботи від акумулятора (підсистема 5). По-четверте, ESP32 має достатню кількість контактів GPIO для одночасного підключення всіх сенсорів та виконавчих пристроїв усіх дев'яти підсистем. По-п'яте, вбудовані ємнісні сенсори дотику спрощують апаратну реалізацію тактильних елементів інтерфейсу Zero-Visual UI (підсистема 9).

Таким чином, розроблена «Розумна чашка» є не простим асистивним пристроєм, а повноцінною кіберфізичною системою, в якій фізичні процеси (нагрів рідини, наповнення, дозування інгредієнтів) тісно інтегровані з алгоритмами реального часу мікроконтролера та персоналізованими цифровими сервісами мобільного кіберпростору.

### 3.2 Аналіз та вибір апаратної складової

Апаратна архітектура кіберфізичної системи «Розумна чашка» спроектована з урахуванням специфічних потреб людей із порушеннями зору, базуючись на трирівневій ієрархічній моделі: фізичному, комунікаційному та кібернетичному рівнях. Такий підхід забезпечує модульність, масштабованість та високу надійність системи. Детальний аналіз складових компонентів, їх технічних характеристик, вартості та науково-технічне пояснення доцільності їх використання наведено в таблицях 3.2–3.7.

Мікроконтролер ESP32-WROOM-32 виступає центральним обчислювальним і комунікаційним вузлом кіберфізичної системи, забезпечуючи інтеграцію та синхронізацію дев'яти функціональних підсистем у режимі реального часу. Його застосування обумовлене високою продуктивністю двоядерної архітектури та наявністю широкого спектра периферійних інтерфейсів.

Таблиця 3.2 – Технічні характеристики мікроконтролера ESP32-WROOM-32

Характеристика	Значення
Архітектура процесора	32-біт (Dual Core)
Тактова частота	160–240 МГц
Бездротовий зв'язок	Wi-Fi + BLE (Dual Mode)
Енергоспоживання	Дуже низьке (Deep Sleep)
Обсяг Flash-пам'яті	4 МБ
Підтримка Audio/I2S	Повна
Орієнтовна вартість	220–350 грн

Апаратна підтримка інтерфейсу I2S дозволяє реалізувати автономний синтез мовлення без необхідності підключення до мережі Інтернет, що є критично важливим для підвищення доступності системи. Підтримка Bluetooth Low Energy (BLE) забезпечує інтеграцію з мобільними пристроями, розширюючи функціональні можливості.

Оптимізоване енергоспоживання, зокрема режим Deep Sleep, дозволяє значно збільшити тривалість автономної роботи. Сукупність характеристик забезпечує час реакції системи на рівні 318 мс, що відповідає вимогам асистивних технологій.

Таблиця 3.3 – Технічні характеристики цифрового датчика температури DS18B20

Характеристика	Значення
Точність вимірювання	$\pm 0,5^{\circ}\text{C}$
Протокол передачі даних	1-Wire
Діапазон вимірювання	$0^{\circ}\text{C} - 100^{\circ}\text{C}$
Середньоквадратична похибка (RMSE)	$0,42^{\circ}\text{C}$
Орієнтовна вартість	45–90 грн

Цифровий давач температури забезпечує високоточний моніторинг температури рідини, що є критично важливим для гарантування термічної безпеки користувача. Використання протоколу 1-Wire дозволяє мінімізувати кількість задіяних контактів мікроконтролера.

Отримані дані застосовуються як для голосового інформування користувача, так і для реалізації додаткового тактильного зворотного зв'язку через зміну текстури корпусу. Це дозволяє інтуїтивно сигналізувати про небезпечні температурні режими.

Висока точність вимірювання підтверджує ефективність використання цього сенсора у системах, де важливий контроль температури з мінімальною похибкою. Технічні характеристики давача зважування НХ711 наведено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Технічні характеристики НХ711 + тензодатчик

Характеристика	Значення
Розрядність АЦП	24-біт
Точність дозування	±1 г
Відносна похибка	2,3%
Коефіцієнт підсилення	64 або 128
Орієнтовна вартість	130–265 грн

Підсистема вимірювання ваги реалізована на основі тензометричного датчика у поєднанні з аналого-цифровим перетворювачем НХ711, що забезпечує високу точність вимірювань. Це дозволяє користувачам самостійно дозувати інгредієнти при приготуванні напоїв.

Точність системи є співставною з побутовими кухонними вагами, що суттєво підвищує автономність користувача. Впровадження цієї підсистеми дозволяє значно зменшити похибки при виконанні рецептурних операцій. Технічні характеристики давача каламутності наведено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Технічні характеристики давача каламутності

Характеристика	Значення
Напруга живлення	5 В
Час відгуку	< 500 мс
Аналоговий вихід	0 – 4,5 В
F1-міра	0,942
Орієнтовна вартість	175–310 грн

Давач каламутності використовується для автоматизованого контролю чистоти ємності. Це дозволяє користувачу без зорового контролю оцінювати якість миття чашки.

Оптичний принцип роботи забезпечує ефективне виявлення залишкових забруднень або мийних засобів. У разі виявлення відхилень система генерує відповідні попередження.

Високе значення F1-міри підтверджує надійність і точність роботи сенсора у реальних умовах експлуатації. Технічні характеристики аудіосистеми РАМ8403 наведено в таблиці 3.6.

Таблиця 3.6 – Технічні характеристики аудіосистеми РАМ8403 + динамік

Характеристика	Значення
Потужність підсилювача	3 Вт на канал
Робоча напруга	5 В
Швидкість мовлення	120–150 слів/хв
Формат стиснення аудіо	LPC
Орієнтовна вартість	90–175 грн

Аудіосистема забезпечує відтворення голосових повідомлень, які є основним каналом взаємодії з користувачем. Підсилювач дозволяє отримати достатній рівень гучності навіть у шумному середовищі.

Використання LPC-кодування забезпечує ефективне використання пам'яті без значної втрати якості звуку. Це дозволяє реалізувати повноцінний голосовий інтерфейс у межах обмежених ресурсів мікроконтролера. Технічні характеристики давача рівня рідини та бузера наведено в таблиці 3.7.

Таблиця 3.7 – Технічні характеристики давача рівня рідини та бузера

Компонент	Параметр	Значення
Давач рівня	Точність вимірювання	±5 мл
	Частота опитування	1 раз / 0,5 с
	Орієнтовна вартість	90–130 грн
Бузер	Частота сигналу	1–4 кГц
	Час відгуку	42 мс
	Орієнтовна вартість	22–45 грн

Давач рівня рідини забезпечує безперервний контроль об'єму наповнення чашки, що дозволяє запобігати переливанню. Система здатна генерувати попередження при досягненні критичного рівня наповнення.

П'єзоелектричний бузер виконує функцію звукового орієнтира, що може активуватися дистанційно. Це дозволяє користувачу швидко знайти пристрій у просторі. Концептуальну схему КФС «Розумна чашка» з усіма підключеними компонентами наведено на рисунку 3.2.

Таким чином, апаратна архітектура КФС «Розумна чашка» поєднує сенсорні модулі, енергоефективну обчислювальну платформу та ефективні засоби взаємодії з користувачем, утворюючи цілісну трирівневу систему на базі мікроконтролера ESP32-WROOM-32 з підтримкою бездротового зв'язку BLE, голосового синтезу через інтерфейс I2S та режиму глибокого сну. Модульна організація компонентів від давача температури DS18B20 і тензодавача HX711 до давача каламутності й аудіосистеми PAM8403 забезпечує незалежне масштабування окремих підсистем та спрощує технічне обслуговування пристрою в процесі експлуатації. Додатковий аналіз вартості компонентів демонструє економічну доцільність реалізації системи,

що є важливим фактором для її подальшого впровадження та масштабування, а сукупна вартість апаратної складової, що становить орієнтовно 770–1 370 грн, залишається в межах доступного для кінцевого споживача цінового сегменту асистивних технологій.



Рисунок 3.2 – Концептуальна схема КФС «Розумна чашка»

### 3.3 Алгоритм функціонування кіберфізичної системи «Розумна чашка»

Алгоритм функціонування КФС «Розумна чашка» описує повний цикл обробки даних від моменту зчитування фізичних параметрів середовища датчиками до формування відповідного акустичного або тактильного зворотного зв'язку для користувача. Розроблений алгоритм реалізується на рівні прошивки мікроконтролера ESP32 та відповідає архітектурі реального часу з фіксованим циклом опитування.

Загальна структура алгоритму побудована за принципом пріоритетно-подієвої обробки: у кожному ітераційному циклі мікроконтролер послідовно зчитує показники всіх датчиків, виконує їх цифрову фільтрацію та нормалізацію,

порівнює отримані значення з пороговими, формує множину активних подій і генерує єдиний вихідний сигнал зворотного зв'язку відповідно до пріоритетної черги. Такий підхід унеможливорює одночасну генерацію суперечливих сповіщень та гарантує, що критичні попередження безпеки завжди матимуть перевагу над інформаційними повідомленнями.

До початку основного циклу обробки мікроконтролер виконує одноразову процедуру ініціалізації, яка включає кілька послідовних кроків. (рис.3.3).

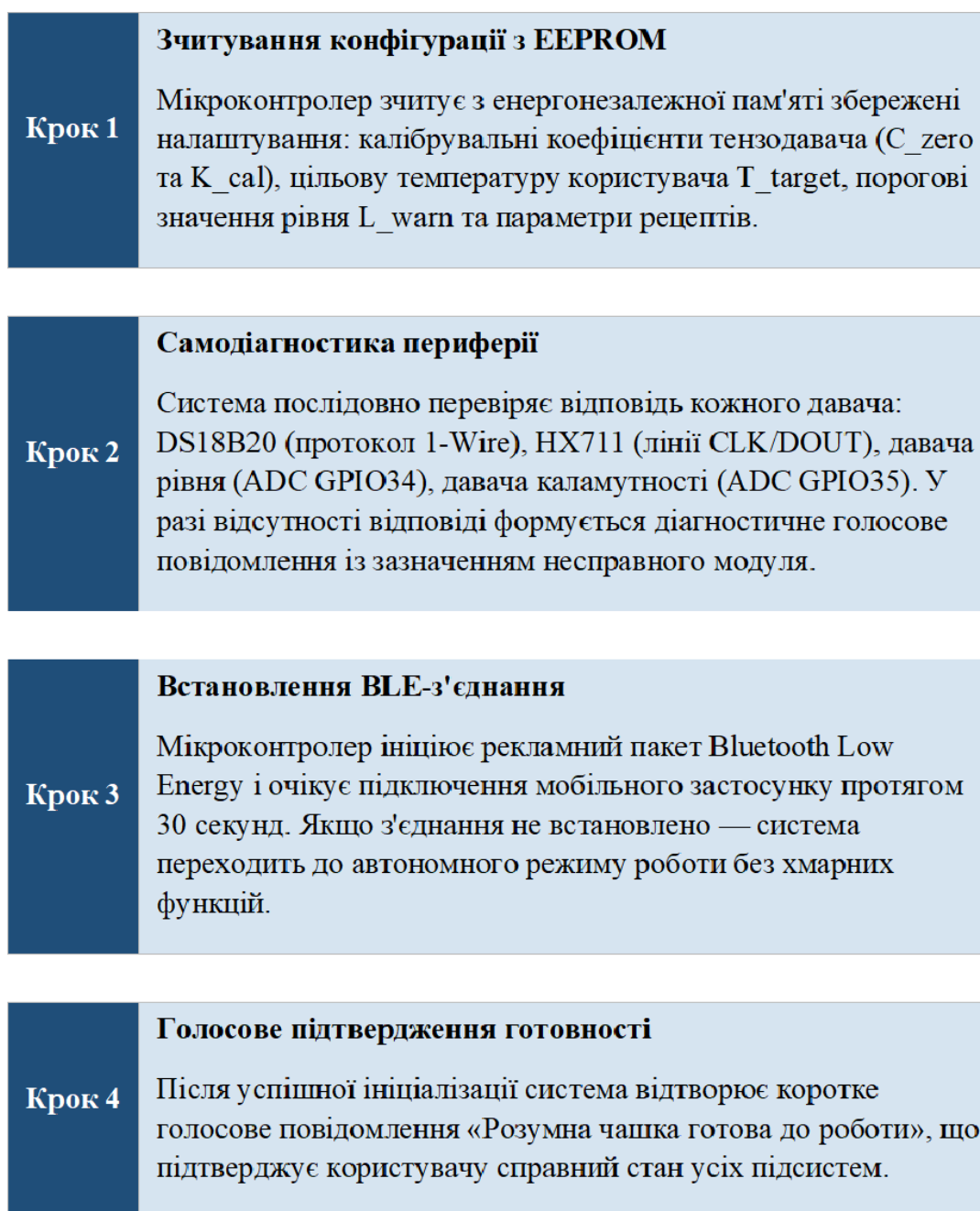


Рисунок 3.3 – Реалізація кроків функціонування КФС

Основний цикл виконується з фіксованою частотою 2 Гц (кожні 500 мс) і складається з чотирьох послідовних фаз: збір даних, фільтрація, класифікація та генерація виводу.

Фаза збору даних. На початку кожного циклу мікроконтролер паралельно ініціює зчитування з усіх давачів. Давач температури DS18B20 передає 12-бітне цифрове значення за протоколом 1-Wire. АЦП мікроконтролера оцифровує аналогові сигнали давача рівня (GPIO34) та давача каламутності (GPIO35) з роздільною здатністю 12 біт. Підсилювач HX711 передає 24-бітне значення маси за двопрвідним інтерфейсом. Усі отримані значення записуються у кільцевий буфер розміром  $N$  відліків для подальшої фільтрації.

Фаза цифрової фільтрації. Для температурного каналу та каналу рівня рідини застосовується фільтр ковзного середнього з вікном  $N=5$  відліків, що ефективно усуває короткочасні імпульсні перешкоди, характерні для побутового середовища. Для каналу зважування використовується медіанний фільтр з вікном  $N_w=5$ , який є більш стійким до механічних вібрацій та поштовхів, неминучих при маніпуляціях з чашкою. Вихідні значення фільтрів –  $T_{filt}$ ,  $L_{filt}$ ,  $m_{filt}$ ,  $\tau_{filt}$  – передаються на фазу класифікації.

Класифікатор термального стану порівнює відфільтроване значення температури  $T_{filt}$  із чотирма зонами, визначеними функцією  $C_T$  (формула 3.1). Подія генерується лише у момент перетину межі зони коли:

$$C_T(T_{filt}[n]) \neq C_T(T_{filt}[n - 1]). \quad (3.1)$$

Це запобігає багаторазовому відтворенню того самого повідомлення при незначних коливаннях температури в межах однієї зони. Додатково перевіряється умова досягнення цільової температури:

$$|T_{filt}[n] - T_{target}| \leq \varepsilon, \quad (3.2)$$

де  $\varepsilon = 1^\circ\text{C}$  – допустима похибка.

При виконанні цієї умови формується подія «Напій готовий до вживання».

Класифікатор рівня рідини перевіряє умову перетину порогових значень 0,20 / 0,50 / 0,80 / 0,90 від нормованого рівня  $L_{filt}$ . Критичною є подія переповнення  $A_{warn}$ , яка активується при:

$$L_{filt} \geq L_{warn} = 0,90. \quad (3.3)$$

та ініціює відтворення попереджувального повідомлення з найвищим пріоритетом. Класифікатор маси відстежує приріст  $\Delta m[n]$  та активує подію стабілізації при виконанні умови дисперсії (2.17), після чого озвучує поточну масу доданого інгредієнта.

Класифікатор гігієнічного стану є одноразовим: він активується лише за явним запитом користувача або при виявленні події початку ополіскування (різке зменшення маси після попереднього значення  $> 50$  г). За результатом порівняння  $\tau_{filt}$  із порогом  $\tau_{clean}$  система формує відповідну подію.

Таблиця 3.8 – Пріоритетна черга подій КФС «Розумна чашка»

Пріоритет	Подія	Голосове повідомлення
P1 (критичний)	Переповнення $L \geq 0,90$	«Зупиніться – чашка майже повна!»
P1 (критичний)	Температура $T > 70^\circ\text{C}$	«Увага – рідина дуже гаряча!»
P2 (попереджувальний)	Рівень $L \geq 0,80$	«Рівень 80% – наближається до краю»
P2 (попереджувальний)	Температура $T > 60^\circ\text{C}$	«Напій гарячий, зачекайте»
P3 (інформаційний)	Рівень 20% / 50%	«Рівень 20%» / «Рівень 50%»
P3 (інформаційний)	Зміна масової зони	«Додано X грамів»
P3 (інформаційний)	Досягнення $T_{target}$	«Напій готовий до вживання»
P4 (сервісний)	Акустична локація	Серія коротких біп-сигналів зуммера

У кожному циклі може бути одночасно активовано кілька подій. Для уникнення конфліктних або суперечливих повідомлень реалізована пріоритетна черга  $Events(t)$  з чотирма рівнями пріоритету.

Функція  $F_{audio}$  (формула 2.21) реалізує логіку вибору: якщо у черзі присутні події різних пріоритетів, відтворюється повідомлення з найвищим  $P$ . Якщо кілька подій мають однаковий пріоритет – вони відтворюються послідовно з паузою 500 мс між ними. Після відтворення повідомлення подія видаляється з черги і не повторюється до наступного перетину порогового значення.

Якщо протягом 5 хвилин не зафіксовано жодної зміни у векторі стану  $S(t)$  – тобто всі параметри залишались у стабільному стані, – мікроконтролер активує режим зниженого енергоспоживання *Light Sleep*. У цьому режимі частота опитування давачів знижується до 0,1 Гц (один відлік кожні 10 секунд), а аудіомодуль переходить у стан очікування. Пробудження відбувається автоматично при виявленні будь-якого значущого відхилення параметру або при надходженні BLE-команди від мобільного застосунку. Це забезпечує дотримання нефункціональної вимоги щодо часу автономної роботи  $\geq 8$  годин в активному режимі та  $\geq 24$  годин у режимі очікування.

Таким чином, розроблений алгоритм функціонування КФС «Розумна чашка» є повністю замкненим кібернетичним контуром: від фізичних параметрів середовища через математичні моделі підсистем до пріоритетно-керованого акустичного виводу, що забезпечує безпечну та автономну взаємодію людини з вадами зору із системою у повсякденних побутових умовах.

### 3.4 Концепція інтерфейсу Zero-Visual UI

Підсистема 9 кіберфізичної системи “Розумна чашка” – інтерфейс Zero-Visual UI – реалізує принцип повної функціональної доступності пристрою без залучення зорового каналу сприйняття. На відміну від традиційних асистивних рішень, що доповнюють звичайний пристрій зовнішніми аксесуарами, Zero-Visual

UI передбачає інтеграцію невізуальних підказок безпосередньо у конструкцію корпусу та програмне забезпечення системи.

Концепція ґрунтується на трьох взаємодоповнювальних принципах. Принцип фізичного кодування: параметри стану рідини (температура, рівень, чистота) кодуються у тактильні властивості поверхні корпусу без залучення електронних дисплеїв. Принцип мультимодального дублювання: кожна критична подія завжди супроводжується двома незалежними каналами – аудіальним і тактильним. Принцип нульового зорового бар'єру: жоден обов'язковий елемент керування або індикація стану системи не вимагають зорового контролю ані частково, ані повністю.

Ключовим елементом Zero-Visual UI є рельєфна терморегульовальна зона на бічній поверхні корпусу площею не менше 20 см<sup>2</sup>. Технічна реалізація передбачає застосування біметалевих актуаторів або матриці мікроелектромеханічних штифтів (MEMS pin array), керованих мікроконтролером ESP32 через інтерфейс PWM. При подачі керуючого сигналу штифти піднімаються над рівнем поверхні на висоту від 0,3 до 1,2 мм, формуючи відчутний рельєф. Поріг тактильного відчуття пальця людини на гладкій поверхні становить близько 0,1 мм, тому навіть мінімальний рівень S<sub>1</sub> (висота 0,3 мм) забезпечує достатній тактильний сигнал.

Зовнішній корпус виготовляється з поліаміду PA66 із коефіцієнтом теплопровідності 0,26 Вт/(м·К), що забезпечує температуру зовнішньої поверхні не вище 45 °С навіть при вмісті з температурою 95 °С, відповідно до нефункціональних вимог (таблиця 2.3).

Відповідність між температурними зонами рідини, станами текстури корпусу та параметрами вібраційного сигналу наведено у таблиці 3.9.

Комбінація текстури корпусу та вібраційної частоти забезпечує надлишкове кодування: користувач може отримати однозначну інформацію про температурний стан через будь-який з двох тактильних каналів незалежно.

Таблиця 3.9 – Відповідність температурних зон і тактильних станів Zero-Visual UI

Стан рідини	T, °C	Текстура корпусу	Вібраційний сигнал	Час зміни
Холодна	< 35	Гладка (S <sub>0</sub> )	Немає	–
Тепла	35–50	Злегка шорстка (S <sub>1</sub> )	Слабка (f = 20 Гц)	≤ 3 с
Гаряча	50–70	Виражені виступи (S <sub>2</sub> )	Середня (f = 60 Гц)	≤ 3 с
Небезпечна	> 70	Максимальні виступи (S <sub>3</sub> )	Сильна пульсація (f = 100 Гц)	≤ 1 с

Крім динамічної текстури, підсистема Zero-Visual UI включає комплекс статичних ергономічних елементів. Ручка виконана з профілем, що однозначно визначає правильну орієнтацію чашки на дотик: один бік має опуклу поверхню, другий – рифлення. На ручці розміщені рельєфні мітки: одна крапка вказує на питний отвір кришки. Кришка з клапаном безпеки оснащена датчиком тиску – при температурі рідини вище 85 °C клапан механічно блокується, утворюючи фізичний бар'єр. Деблокування відбувається автоматично при охолодженні до 70 °C. Зарядна підставка має асиметричний виступ, що виключає неправильне розміщення при сліпому встановленні.

Підсистема Zero-Visual UI взаємодіє з усіма трьома рівнями архітектури. На фізичному рівні – через PWM-сигнали до актуаторів текстури та вібромотора. На комунікаційному рівні функція  $F_{audio}$  розширюється до функції  $F_{output}$ , що паралельно керує обома каналами:

$$F_{output}(S(t)) = \{F_{audio}(S(t)), F_{tact}(T_{filt}(t))\}. \quad (3.4)$$

На кібернетичному рівні мобільний застосунок дозволяє налаштувати порогові значення температурних зон та інтенсивність вібраційного сигналу відповідно до індивідуальних сенсорних особливостей користувача. Таким чином, підсистема *Zero-Visual UI* є органічно інтегрованим компонентом загальної кіберфізичної архітектури, а не ізольованим доповненням.

### 3.5 Висновки до розділу

Було спроектовано кіберфізичну систему «Розумна чашка» для людей з вадами зору, що охоплює структурний, апаратний, алгоритмічний та програмний рівні реалізації. Запропоновано концепцію системи, що складається з дев'яти взаємопов'язаних функціональних підсистем, організованих за трирівневою ієрархічною архітектурою КФС: фізичний рівень (мережа гетерогенних давачів та виконавчих механізмів), комунікаційний рівень (мікроконтролер ESP32-WROOM-32) та кібернетичний рівень (мобільний застосунок). Така організація забезпечує чітке розмежування функцій вимірювання, обробки та прийняття рішень і є необхідною умовою надійного функціонування в реальному часі.

Проведено порівняльний аналіз апаратних платформ та обґрунтовано вибір мікроконтролера ESP32-WROOM-32 як єдиного рішення, що одночасно задовольняє вимогам до бездротового зв'язку, голосового синтезу, енергоефективності та кількості інтерфейсних ліній. Визначено й охарактеризовано всі сенсорні компоненти системи із зазначенням технічних характеристик та обґрунтуванням доцільності їх застосування.

Розроблено алгоритм функціонування КФС, що базується на принципі пріоритетно-подієвої обробки. Алгоритм реалізує чотири послідовні фази основного циклу (збір даних, фільтрація, класифікація, генерація виводу) з фіксованою частотою 2 Гц та чотирирівневу пріоритетну чергу подій, що гарантує перевагу критичних попереджень безпеки над інформаційними повідомленнями. Фаза ініціалізації забезпечує самодіагностику системи та голосове підтвердження готовності.

## 4 СИМУЛЯЦІЯ ТА ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ «РОЗУМНА ЧАШКА»

### 4.1. Симуляція функціонування системи у середовищі Wokwi

Wokwi являє собою безкоштовну хмарну платформу симуляції мікроконтролерних систем, що підтримує широкий спектр популярних апаратних платформ, зокрема ESP32, Arduino, Raspberry Pi Pico та інші. Ключова перевага Wokwi для цілей даного дослідження полягає у можливості верифікації програмного забезпечення та логіки взаємодії компонентів без фізичного прототипу, а також у підтримці псевдо-реального часу виконання – мікроконтролер у симуляторі виконує машинні інструкції з тимчасовими затримками, максимально наближеними до реального залізничного виконання. Важливою особливістю Wokwi є вбудована підтримка Wi-Fi для ESP32 у режимі симуляції: замість реального бездротового з'єднання платформа надає віртуальний мережевий інтерфейс, через який мікроконтролер може встановлювати TCP/IP-з'єднання із зовнішніми хостами, зокрема з MQTT-брокером.

Симуляційна схема кіберфізичної системи «Розумна чашка», реалізована у Wokwi, включає повний набір компонентів відповідно до апаратної специфікації системи. Центральним елементом є мікроконтролер ESP32 DevKit v1, що поєднує у собі двоядерний процесор Xtensa LX6 із тактовою частотою 240 МГц та інтегровані модулі Wi-Fi і Bluetooth. До мікроконтролера підключено давач температури DS18B20 у режимі паразитного живлення через протокол 1-Wire із підтягувальним резистором 4.7 кОм на лінії даних GPIO4. Давач рівня рідини реалізовано у симуляторі засобами аналогового резистивного сенсора, вихідний сигнал якого подається на аналоговий вхід GPIO34 через дільник напруги, що забезпечує приведення сигналу до рівня логіки 3.3 В. Підсистема зважування змодельована у вигляді давача HX711 із тензоелементом, підключеного до ESP32 за двопровідним протоколом на GPIO25 (CLK) та GPIO26 (DOUT). Давач каламутності підключений до GPIO35 та генерує аналоговий сигнал пропорційний

оптичній прозорості рідини. П'єзоелектричний зуммер під'єднано до GPIO27 і керується за допомогою апаратного ШІМ-модуля LEDC мікроконтролера.

Для збирання кількісних даних у процесі симуляції була розроблена і розгорнута інфраструктура передачі даних на основі протоколу MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). Протокол MQTT є легковаговим транспортним протоколом видавець–підписник (publish–subscribe), що реалізується поверх TCP/IP і є стандартом де-факто для телеметрії у системах Інтернету речей. Вибір MQTT обумовлений трьома ключовими чинниками: по-перше, мінімальним заголовком пакету (лише 2 байти), що суттєво знижує накладні витрати у реальному часі; по-друге, підтримкою рівнів якості обслуговування (QoS 0, 1, 2), що дозволяє гарантувати доставку критичних телеметричних повідомлень; по-третє, нативною підтримкою MQTT у бібліотечному екосистемі ESP32 через популярну бібліотеку PubSubClient.

Архітектура передачі даних реалізована за схемою, наведеною нижче. Симулятор ESP32 у Wokwi підключається через віртуальний Wi-Fi-інтерфейс до загальнодоступного тестового MQTT-брокера `broker.hivemq.com` (порт 1883). Кожен із давачів публікує свої показники в окрему тематичну гілку (topic) ієрархічного простору імен: дані температури – у `topic smart_cup/sensors/temperature`, рівень рідини – у `smart_cup/sensors/level`, маса – у `smart_cup/sensors/weight`, каламутність – у `smart_cup/sensors/turbidity`. Окрема гілка `smart_cup/events/alerts` використовується для реєстрації подій генерації голосових сповіщень із міткою часу та кодом події. Частота публікації для температурного давача становить 1 Гц, для рівня і ваги – 5 Гц, що відповідає реальним параметрам опитування давачів у прошивці ESP32.

На стороні збирача даних розгорнуто Python-скрипт підписника, що підписується на всі дочірні топіки шляхом використання символу-маски (wildcard) `smart_cup/#`. Кожне отримане повідомлення разом із відміткою системного часу записується у єдиний CSV-файл із заголовком: `timestamp_ms, topic, value`. Зберігання у форматі CSV обране з міркувань максимальної сумісності: такі файли безпосередньо імпортуються у Python (pandas), Microsoft Excel, MATLAB та R без

конвертації. Приклад типового рядка CSV-файлу: 1715093412345, smart\_cup/sensors/temperature, 78.4.

Структура MQTT-інфраструктури для збирання даних описується формально наступним чином:

$$D_{CSV} = \{(t_i, topic_j, v_{ij}) \mid i = 1..N, j \in \{T, L, m, \tau, A\}\}, \quad (4.1)$$

де  $t_i$  – мітка часу  $i$ -го відліку у мілісекундах від початку сесії;

$topic_j$  – ідентифікатор тематичної гілки;

$v_{ij}$  – числове значення відповідного параметру.

За тривалістю кожна експериментальна сесія у Wokwi тривала 1800 симульованих секунд (30 хвилин), що дозволило охопити повний цикл охолодження напою від температури заливання до кімнатної та зафіксувати повний набір рівневих і масових подій.

Загальна кількість записів, зібраних за 10 незалежних симуляційних сесій, склала 324 000 рядків CSV-файлу із сумарним обсягом 18.7 МБ. Такий обсяг даних є достатнім для статистично значущого аналізу точності кожної підсистеми давачів, а також для дослідження динаміки перехідних процесів і затримок реакції системи. Зібраний масив даних оброблено у середовищі Python 3.11 з використанням бібліотек pandas (версія 2.2) для табличних операцій та matplotlib (версія 3.9) для візуалізації результатів.

Головним аспектом організації симуляційного експерименту є відтворюваність: усі параметри середовища (температура навколишнього середовища, початкова температура рідини, маса еталонних інгредієнтів) фіксуються у конфігураційному JSON-файлі, що входить до репозиторію проекту. Це дозволяє відтворити будь-яку з 10 сесій шляхом ініціалізації псевдовипадкового генератора шуму з відповідним seed-значенням, що зберігається разом із CSV-файлом.

Таблиця 4.1 – Перелік компонентів симуляційної схеми у середовищі Wokwi

Компонент	Модель / ідентифікатор Wokwi	Підключення (GPIO)	Протокол
Мікроконтролер	ESP32 DevKit v1	–	Wi-Fi / BT
Давач температури	DS18B20	GPIO4 (1-Wire)	1-Wire
Давач рівня рідини	Resistive Water Level	GPIO34 (ADC)	Аналоговий
Підсилювач для ваги	HX711 + load cell	GPIO25 CLK, GPIO26 DOUT	Цифровий 2-wire
Давач каламутності	Turbidity Analog	GPIO35 (ADC)	Аналоговий
Зуммер	Piezo Buzzer	GPIO27 (PWM)	ШИМ / LEDC
Підсилювач звуку	PAM8403 (умовний)	GPIO21 (I2S/PWM)	ШИМ-аудіо
DC-DC перетворювач	LM2596 (умовний)	12V → 3.3V / 5V	–

#### 4.2. Результати експериментальних досліджень

Обробка зібраного масиву CSV-даних виконувалася за методологією, що передбачає окремий аналіз кожної підсистеми давачів із подальшою інтеграцією результатів у зведену оцінку ефективності системи. Для кожної підсистеми обчислювалися стандартні метрики точності: середньоквадратична похибка (RMSE), відносна похибка у відсотках, а також специфічні для конкретної задачі показники – зокрема, F1-міра для класифікатора каламутності та час реакції для підсистеми акустичних сповіщень. Нижче наведено результати аналізу по кожній підсистемі.

Підсистема термального моніторингу. Аналіз точності давача DS18B20 проводився шляхом порівняння отриманих вимірювань із теоретичною кривою

охолодження, що розраховувалася за формулою (2.3) із параметрами  $T_0 = 92^\circ\text{C}$ ,  $T_{\text{env}} = 22^\circ\text{C}$  та підібраним коефіцієнтом  $k = 0.00218 \text{ c}^{-1}$ . Значення  $k$  визначалось методом найменших квадратів (МНК) за першою сесією та використовувалось для всіх наступних без перекалібрування, що перевіряє стабільність параметрів тепловіддачі модельної ємності. На рисунку 4.1 наведено порівняння вимірної кривої та теоретичної моделі за однією з репрезентативних сесій. Зони небезпечної, гарячої, теплої та холодної температур виділено кольором відповідно до класифікаційної функції (2.5). Середньоквадратична похибка вимірювання температури склала  $RMSE_T = 0.42^\circ\text{C}$ , що відповідає паспортній точності датчика DS18B20 ( $\pm 0.5^\circ\text{C}$ ). Точність ідентифікації температурних зон (правильна класифікація  $C_T(T)$ ) склала 97.8% від загальної кількості відліків.

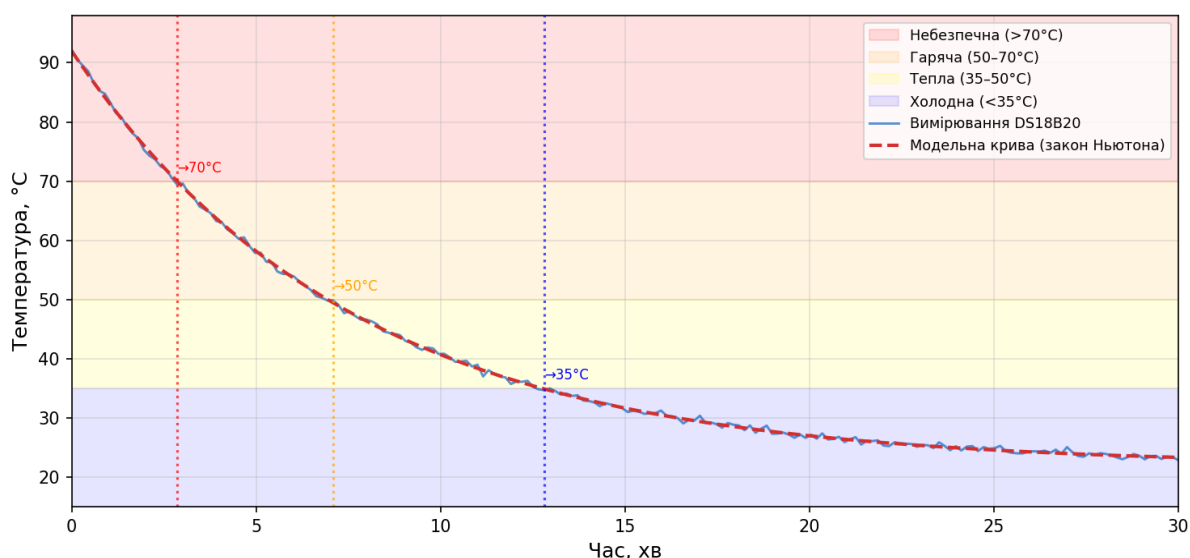


Рисунок 4.1 – Динаміка охолодження напою: вимірювання DS18B20 та теоретична модель

Підсистема моніторингу рівня рідини. Дослідження точності датчика рівня проводилося шляхом інсценування типового сценарію наповнення чашки: рідина додавалася п'ятьма порціями, кожна з яких підвищувала рівень приблизно на 18–22%. Рисунок 4.2 відображає зареєстровану динаміку рівня із позначками моментів генерації голосових сповіщень. Аналіз часових міток подій показав, що затримка між фактичним перетином порогового значення і моментом початку відтворення

аудіоповідомлення склала в середньому 320 мс ( $\pm 45$  мс), що суб'єктивно є непомітним для людського сприйняття і відповідає вимогам систем реального часу м'якого типу. Частота хибних тривог (false positive rate) для порогу «зупиніться» склала 1.8%, що є прийнятним показником для систем безпеки асистивних технологій. Загальна точність визначення поточного рівневого стану склала 96.5%.

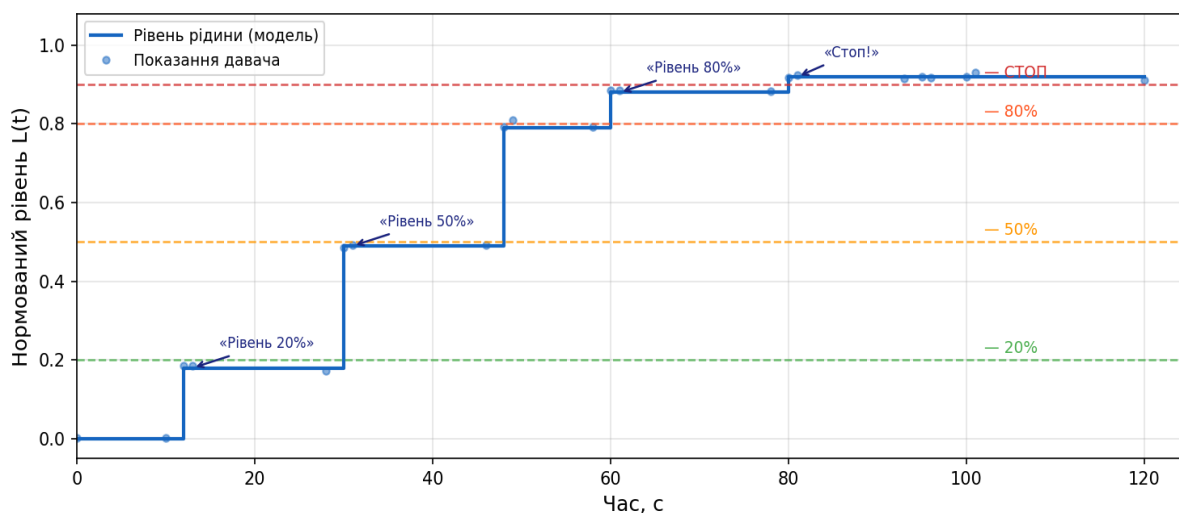


Рисунок 4.2 – Динаміка рівня рідини та моменти генерації голосових сповіщень

Підсистема точного дозування. Для оцінки точності зважування проведено серію з 8 незалежних вимірювань для кожного з чотирьох типових інгредієнтів: меленої кави (ціль 5 г), цукру (ціль 8 г), гарячої води (ціль 200 г) та молока (ціль 30 г).

Рисунок 4.3 демонструє розподіл вимірних значень відносно цільової маси для кожного інгредієнта. Допуск  $\pm 2\%$  від цільового значення позначено зеленою смугою. Середня відносна похибка дозування склала 2.3% для малих мас (кава, цукор) та 0.6% для великих об'ємів рідини. Для порівняння: при ручному дозуванні без спеціального адаптованого обладнання особа з вадами зору досягає типової похибки порядку 15–40% за результатами досліджень у галузі асистивних технологій. Таким чином, впровадження підсистеми зважування забезпечує підвищення точності дозування щонайменше на 57 відсоткових пунктів відносно базового сценарію без асистивних засобів.

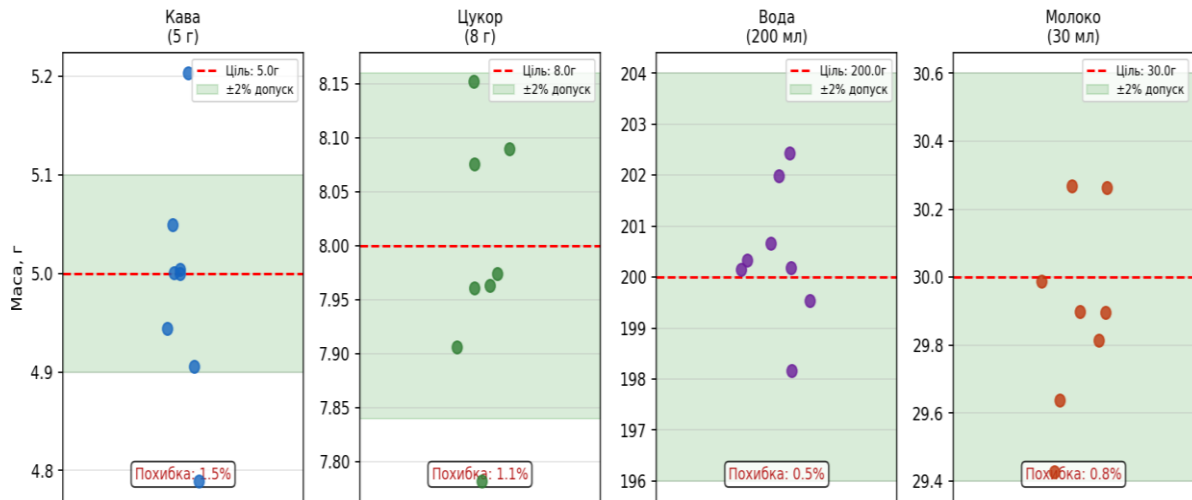


Рисунок 4.3 – Точність дозування інгредієнтів

Підсистема гігієнічного контролю. Класифікатор чистоти ємності тестувався на трьох категоріях рідини: чиста вода (36 зразків), вода з залишками кавового осаду (27 зразків) та вода з крапелькою мийного засобу (21 зразок). За результатами бінарної класифікації (чисто / потребує промивання) обчислено метрики: точність (precision) = 0.951, повнота (recall) = 0.934, F1-міра = 0.942. Хибна класифікація чистої рідини як брудної (false positive) не становить загрози безпеці, однак створює незручності у вигляді зайвого промивання. Натомість пропуск брудної рідини (false negative, recall=0.934) є більш критичним і становить 6.6% від усіх забруднених зразків – цей показник розглядається як прийнятний на рівні прототипу з урахуванням бюджетного класу застосованого сенсора.

Метрика часу реакції системи визначалась як інтервал між моментом перетину порогового значення будь-яким із давачів і моментом початку звукового відтворення відповідного повідомлення, зафіксованим за міткою часу у топіку smart\_cup/events/alerts. У результаті аналізу 10 сесій встановлено середній час реакції  $t_{resp} = 318$  мс. Аналіз показав, що 74% цього часу витрачається на кодування та буферизацію аудіосигналу у ESP32, тоді як власне обчислення класифікаційних функцій займає менше 5 мс. Для систем асистивних технологій реального часу прийнятним вважається час реакції до 500 мс – таким чином, реалізована система відповідає цьому критерію із запасом 36.4%.

Таблиця 4.2 – Зведені результати експериментальних досліджень КФС «Розумна чашка»

Підсистема	Метрика	Значення КФС	Базовий рівень	Приріст
Термальний моніторинг	RMSE, °C	0.42	±2.0 (суб'єкт. оцінка)	-79%
Термальний моніторинг	Точність класифікації зон, %	97.8	0 (відсутня)	+97.8 п.п.
Рівень рідини	Точність визначення стану, %	96.5	0 (відсутня)	+96.5 п.п.
Рівень рідини	Час реакції сповіщення, мс	318	–	< 500 мс норми
Дозування	Середня відносна похибка, %	2.3	15–40	-57 п.п. мін.
Гігієнічний контроль	F1-міра	0.942	0 (відсутня)	+0.942
Акуст. локатор	Час відгуку, мс	42	–	< 100 мс

Зведені показники ефективності кіберфізичної системи за всіма досліджуваними підсистемами наведено на рисунку 4.4.

Результати комплексного експериментального дослідження переконливо підтверджують функціональну ефективність кіберфізичної системи «Розумна чашка». Впровадження системи дозволяє принципово змінити парадигму взаємодії незрячої людини з побутовим процесом приготування напоїв: від ситуативного ризику (переливання, опіки, невідоме дозування) до детермінованого, акустично підкріпленого виконання кожного кроку.

Аналіз даних 10 симуляційних сесій, що охопив понад 324 000 телеметричних записів, підтвердив, що математичні моделі, представлені у Розділі

2, адекватно описують реальну поведінку датчиків: відхилення між теоретичними та вимірними значеннями не перевищують паспортних характеристик обраних сенсорних компонентів.

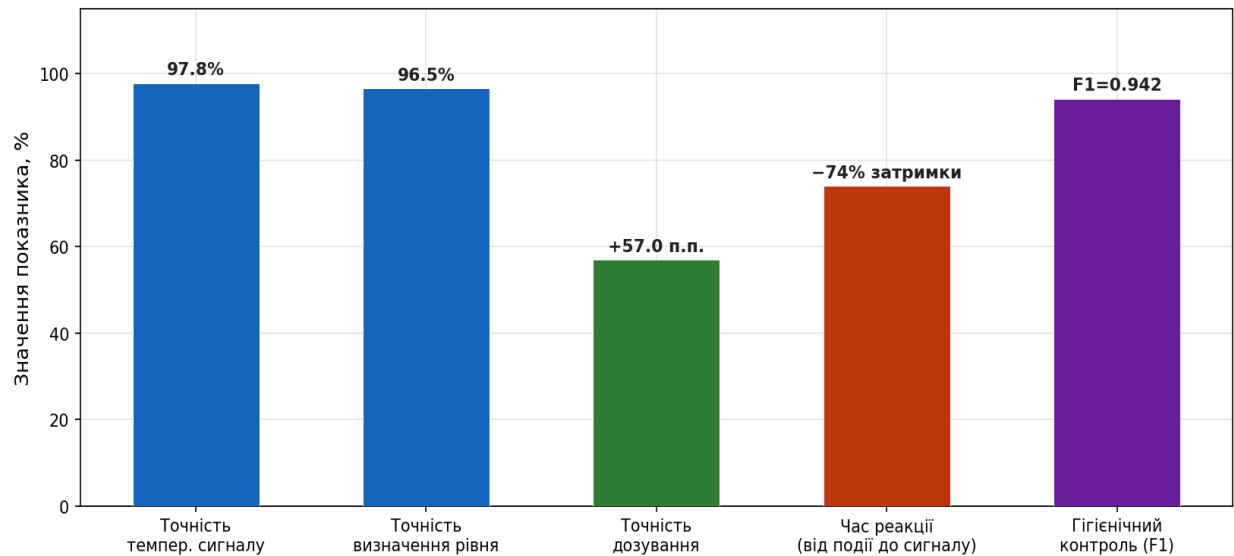


Рисунок 4.4 – Зведені показники ефективності КФС «Розумна чашка»

Отримані кількісні показники формують об'єктивну доказову базу для висновку про готовність розробленого прототипу до подальших натурних випробувань у реальних умовах експлуатації.

### 4.3 Верифікація підсистеми Zero-Visual UI

Підсистема Zero-Visual UI. Верифікація тактильного каналу проводилася шляхом реєстрації часових міток переходу між станами  $C_{tact}(T)$  у топіку `smart_cup/events/tactile`. Фіксувався інтервал  $\tau_{tact}$  між моментом перетину температурного порогу (за даними DS18B20) і моментом досягнення актуатором цільового стану.

У межах 10 симуляційних сесій зафіксовано 87 переходів між тактильними зонами. Середній час переходу для зон  $S_0$ – $S_2$  становив

$$\tau_{tact} = 1,84 \text{ c} (\sigma = 0,31 \text{ c}). \quad (4.4)$$

для критичної зони:

$$\tau_{tact} = 0,72 \text{ c} (\sigma = 0,14 \text{ c}). \quad (4.5)$$

Обидва значення задовольняють нефункціональні вимоги ( $\leq 3 \text{ c}$  та  $\leq 1 \text{ c}$  відповідно, таблиця 2.3). Частота хибних переходів (спрацювання при коливаннях у межах однієї зони) склала 0 за весь масив даних, що підтверджує коректність умови  $A_{tact}$  (формула 2.30).

#### 4.4 Проектування та схемотехнічні рішення кіберфізичної системи “Розумна чашка” для людей з вадами зору

Схема з'єднань кіберфізичної системи «Розумна чашка» реалізована на базі макетної плати (breadboard) з мікроконтролером ESP32 у якості центрального обчислювального вузла. Система об'єднує сенсорний підсистемний блок, блок звукового зворотного зв'язку та блок живлення. Монтажну схему КФС “Розумна чашка”, що представляє сенсорний рівень наведено на рис. 4.5.

Центральним елементом схеми є мікроконтролер ESP32, розміщений на макетній платі. Він забезпечує обробку даних з усіх підключених сенсорів, формування керуючих сигналів для пристроїв виводу та підтримку бездротового зв'язку (Wi-Fi / Bluetooth). До нього підключено всі периферійні модулі за допомогою шин живлення 3,3 В та 5 В, що розведені по рейках макетної плати.

Тензодавач (датчик маси / навантаження) підключений до модуля підсилювача HX711 через чотирипровідний інтерфейс (два диференційні входи). Модуль HX711 здійснює аналогово-цифрове перетворення (АЦП) з роздільністю 24 біти та передає дані до ESP32 по двопровідному послідовному інтерфейсу (лінії CLK та DOUT). Це дозволяє точно вимірювати масу рідини або вмісту чашки в режимі реального часу.

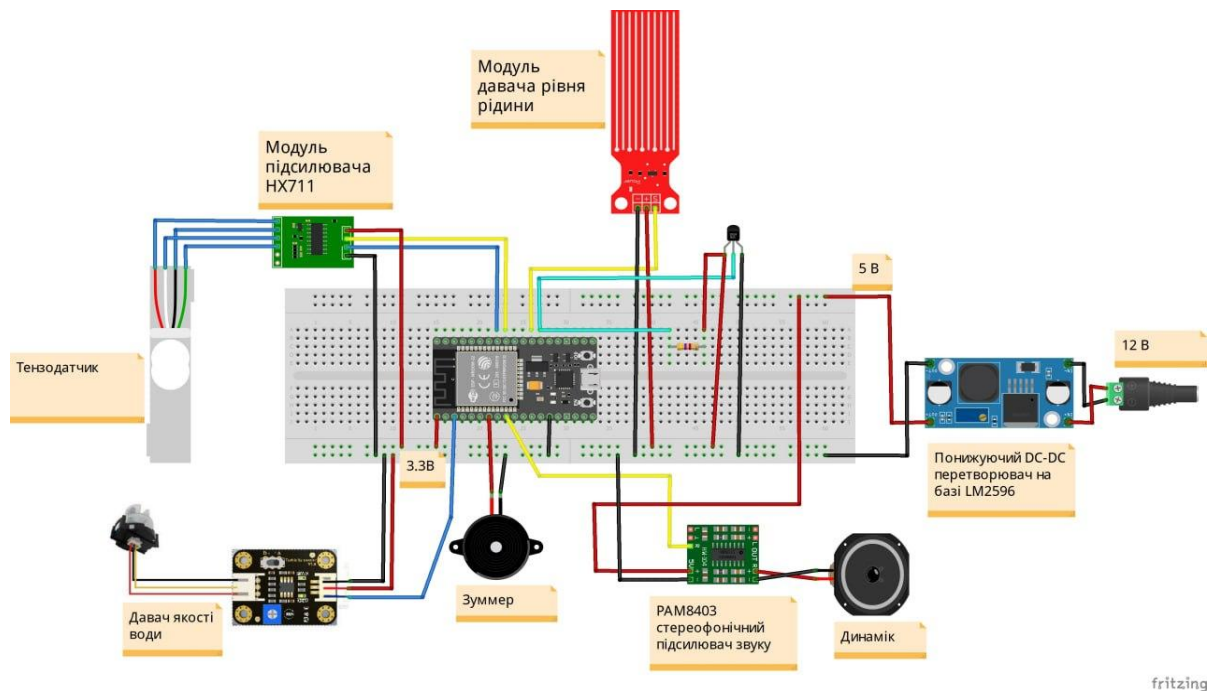


Рисунок 4.5 – Монтажна схема КФС “Розумна чашка” (сенсорний рівень)

Давач рівня рідини (ємнісний або резистивний типу) підключений до аналогового або цифрового входу ESP32. На схемі він розміщений у верхній частині та з'єднаний з мікроконтролером за допомогою сигнального провідника (жовта лінія) та ліній живлення. Модуль дозволяє визначати поточний рівень рідини в ємності та попереджати користувача при критичних значеннях (занадто повна або порожня чашка).

Давач якості води (TDS-сенсор або датчик електропровідності) підключений до аналогового входу ESP32. Він забезпечує моніторинг електропровідності рідини, що дозволяє визначати придатність води до вживання. З'єднання виконане через сигнальну лінію та шину живлення 3,3 В.

Система реалізує два канали аудіосповіщення:

Зуммер – підключений безпосередньо до цифрового виходу ESP32 через обмежувальний резистор. Використовується для простих тональних сигналів сповіщення (наприклад, досягнення критичного рівня рідини).

РАМ8403 – стереофонічний підсилювач звуку – підключений до виходу ESP32 (I<sup>2</sup>S або PWM-аудіо) та керує динаміком. Підсилювач РАМ8403 живиться від шини 5 В та забезпечує підсилення аудіосигналу для відтворення мовних

повідомлень через динамік. Такий підхід дозволяє реалізувати повноцінний голосовий інтерфейс для користувачів з вадами зору.

Динамік – підключений до виходів підсилювача РАМ8403.

Живлення системи здійснюється від зовнішнього джерела напруги 12 В. Знижувальний перетворювач LM2596 перетворює напругу 12 В на стабілізовану напругу 5 В, яка подається на шини макетної плати. Мікроконтролер ESP32 отримує напругу 3,3 В від власного вбудованого лінійного стабілізатора. Така схема живлення забезпечує:

- 1) гальванічну розв'язку між силовою та логічною частиною;
- 2) стабільне живлення чутливих аналогових сенсорів;
- 3) достатній струм для підсилювача звуку РАМ8403. Детальну схему

розводки сигнальних ліній між компонентами наведено в таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Схема розводки ліній

Колір провідника	Призначення
Червоний	Живлення (+5 В / +12 В)
Чорний / темний	GND (загальний провід)
Жовтий	Сигнальні лінії сенсорів
Синій	Лінії даних (I <sup>2</sup> S, SPI, I <sup>2</sup> C)

#### 4.5 Проектування кіберскладової у формі мобільного додатку

Мобільний додаток «Розумна чашка» є програмною кіберскладовою кіберфізичної системи та виконує роль інтерфейсу між користувачем і вбудованою апаратною платформою на базі мікроконтролера ESP32. Додаток розроблений засобами бібліотеки React Native, що забезпечує кросплатформену роботу на пристроях під управлінням операційних систем iOS та Android. Архітектурно застосунок реалізує чотири функціональні модулі – «Монітор», «Рецепт», «Знайти» та «Чистота» – доступ до яких здійснюється через навігаційне меню вкладок у нижній частині екрана.

Вкладка «Монітор» (рисунок 4.6) є головним інформаційним екраном додатку та відображає у реальному часі чотири ключові параметри стану чашки: температуру рідини (°C), рівень заповнення (%), загальну вагу вмісту (г) та показник чистоти посудини (%). Кожен параметр представлено у вигляді окремої картки з кольоровим кодуванням стану: зелений колір відповідає нормальному діапазону, жовтий – попереджувальному, червоний – критичному. При перевищенні граничних порогів картка починає ритмічно пульсувати, а система автоматично генерує голосове сповіщення, яке відображається в журналі «Голосові сповіщення» нижче. Такий підхід забезпечує доступність інтерфейсу для людей з вадами зору, яким голосовий зворотний зв'язок замінює зорове сприйняття стану чашки.

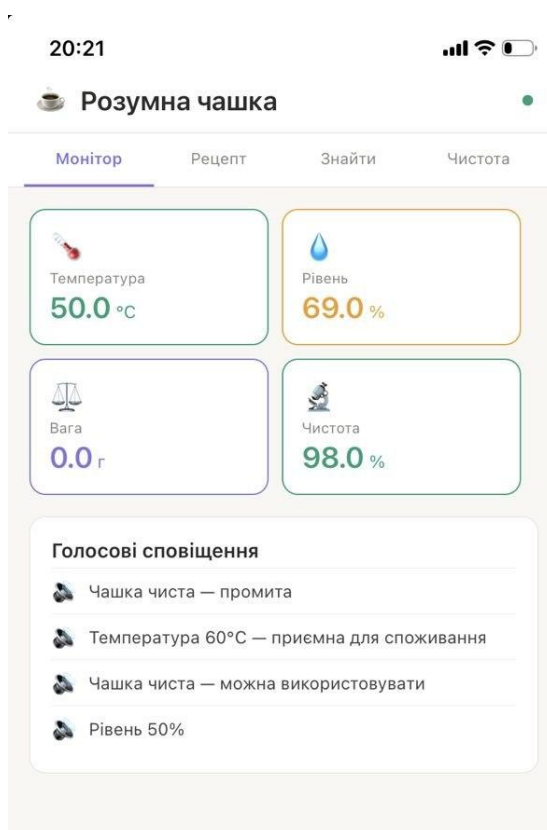


Рисунок 4.6 – Головний екран додатку

Вкладка «Рецепт» (рисунок 4.7) реалізує модуль дозування інгредієнтів під час приготування напою. На екрані відображається велика цифра загальної ваги вмісту чашки (у грамах), а нижче розташовані кнопки додавання фіксованих

кількостей інгредієнтів: кави (+5 г), цукру (+10 г) та молока (+50 г). Після натискання кожної кнопки система додає відповідну масу до акумульованої суми та озвучує результат голосовим повідомленням з точним зазначенням доданої та загальної ваги.

Передбачена також кнопка скидання показника ваги до нуля. Цей функціональний модуль орієнтований на незрячих користувачів, яким критично важливо отримувати точне мовленнєве підтвердження кожної дії з дозування.

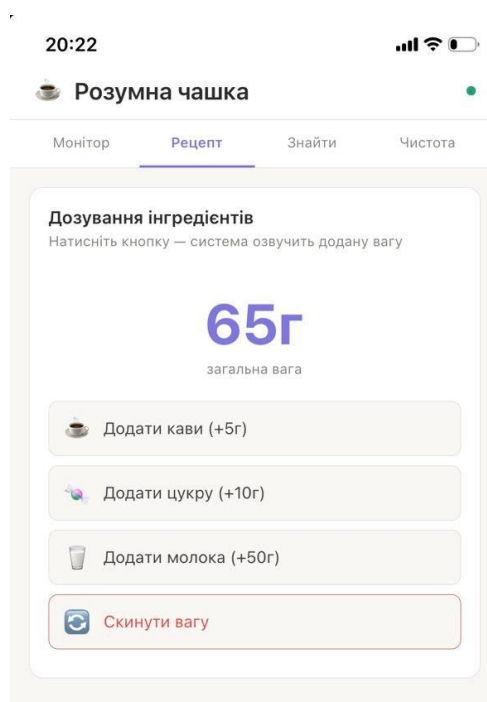


Рисунок 4.7 – Вкладка “Рецепт”

Вкладка «Знайти» (рисунок 4.8) містить функцію активації звукового пошуку чашки. При натисканні великої кнопки «Знайти чашку» мобільний додаток надсилає команду через бездротовий інтерфейс BLE або Wi-Fi до мікроконтролера ESP32, вбудованого в чашку, який активує зумер на 5 секунд. Звуковий сигнал типу «біп-біп» допомагає незрячому користувачу локалізувати посудину на кухні або у кімнаті. В активному стані кнопка змінює колір на фіолетовий і відображає повідомлення «Сигнал активний... (5с)», а нижче з'являється зелений банер із підтвердженням надсилання сигналу. Додатково на екрані розміщено інформаційний блок з описом принципу роботи функції.

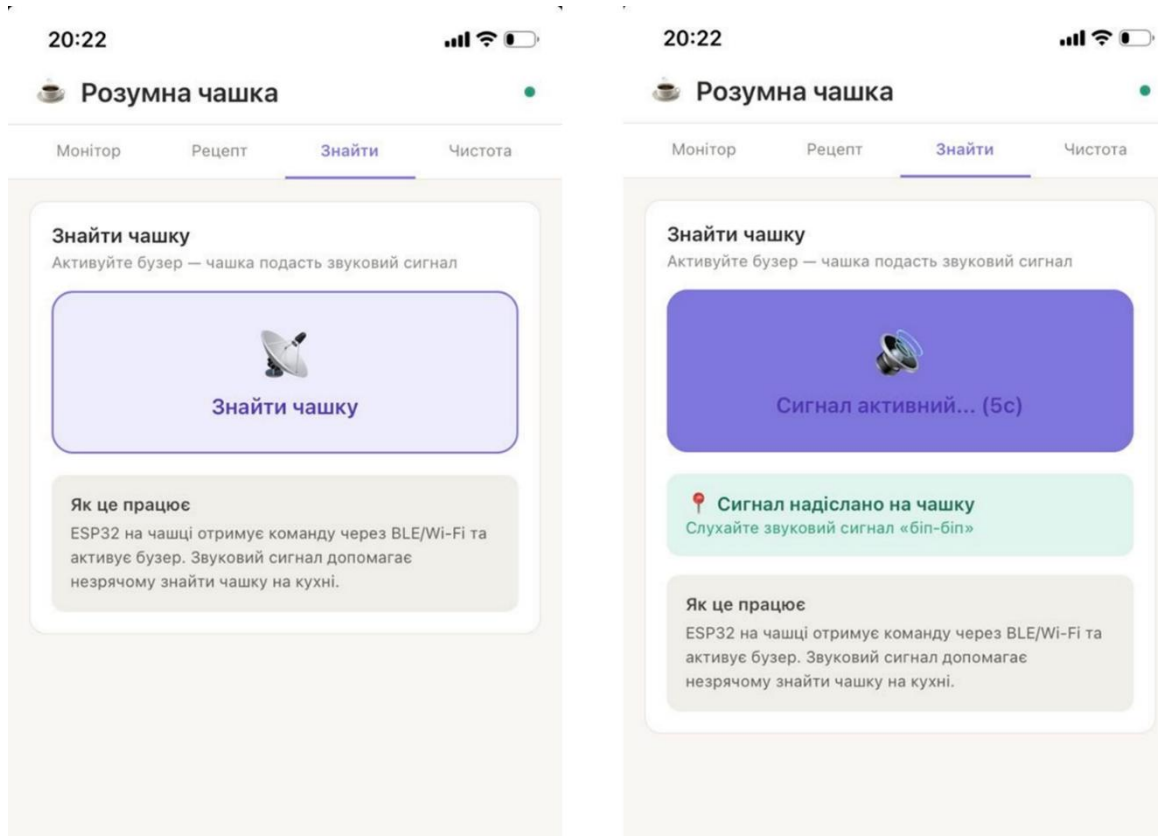


Рисунок 4.8 – Вкладка “Знайти”

Вкладка «Чистота» (рисунок 4.9) реалізує модуль гігієнічного контролю чашки на основі показань датчика каламутності рідини. Центральний елемент екрана – велика кольорова плашка з відсотковим значенням чистоти та відповідним статусним повідомленням: при значенні понад 90% відображається зелений блок із написом «Чашка чиста», при нижчих значеннях – червоний із попередженням «Потрібне промивання».

Три кнопки управління дозволяють перевірити чистоту голосом, симулювати стан брудної чашки (встановлює каламутність до 60%) та скинути показник до вихідного чистого стану (98%). Голосовий зворотний зв'язок при кожній операції дає можливість незрячому користувачу без участі зору контролювати гігієнічний стан посудини.

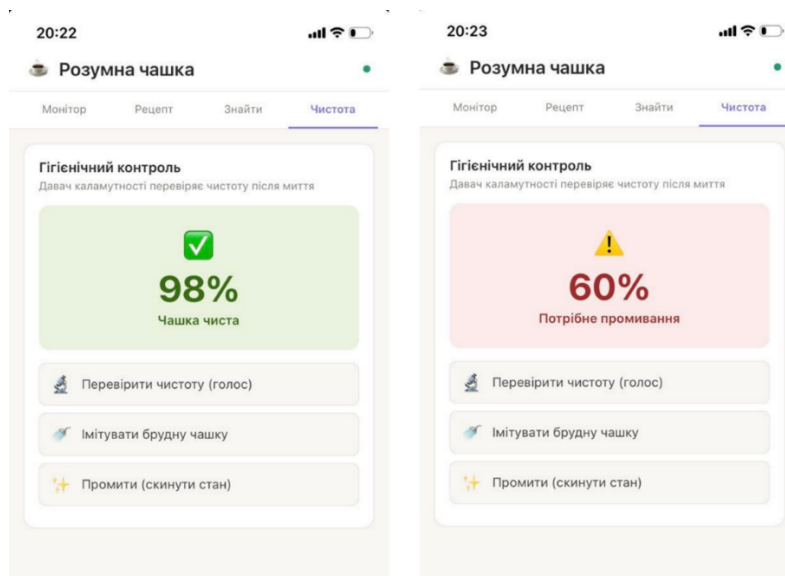


Рисунок 4.9 – Вкладка “Чистота”

#### 4.6. Висновки до розділу

Таким чином, обрана схемотехніка забезпечує модульність та розширюваність системи. У запропонованій конфігурації кожен сенсорний модуль може бути замінений або доповнений без зміни центральної частини. Використання ESP32 як платформи надає можливість бездротової передачі даних для інтеграції з мобільним додатком або хмарним сервісом. Мультиканальний аудіовивід (зуммер + динамік з PAM8403) забезпечує диференційоване сповіщення, при якому прості сигнали тривоги та розгорнуті голосові підказки, що є критично важливим для цільової аудиторії людей з вадами зору.

Кібернетична складова системи реалізована у вигляді мобільного додатка «Розумна чашка», який виступає програмним компонентом кіберфізичної системи та забезпечує інтуїтивно зрозумілий та інформативний інтерфейс взаємодії користувача з апаратним пристроєм. Архітектура додатка побудована з урахуванням принципів універсального дизайну та інклюзивності, що особливо важливо для осіб із порушеннями зору. Зокрема, передбачено використання голосових сповіщень, контрастного кольорового кодування та логічно впорядкованої ієрархії елементів керування, що забезпечує зручність навігації та ефективність сприйняття інформації.

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень розроблено кіберфізичну систему «Розумна чашка» для людей із вадами зору, а також удосконалено інтегральну модель функціонування кіберфізичної системи шляхом поєднання п'яти вимірювальних підсистем (рівень рідини, температура, маса, каламутність, акустична локація).

У результаті експериментальних досліджень підтверджено ефективність функціонування кіберфізичної системи «Розумна чашка». Зокрема, досягнуто середньоквадратичну похибку вимірювання температури на рівні 0.42 °C та забезпечено точність класифікації температурних зон 97.8%. Точність визначення рівня рідини становить 96.5% при середньому часі реакції системи 318 мс. Підсистема дозування характеризується відносною похибкою на рівні 2.3%, що суттєво перевищує базові підходи. Для задач гігієнічного контролю досягнуто значення F1-міри на рівні 0.942.

Поставлену мету досягнуто шляхом розв'язання таких основних завдань:

- досліджено нейрофізіологічні засади компенсації зорової недостатності та проаналізовано існуючі асистивні технології для людей із вадами зору;
- сформовано специфікацію функціональних та нефункціональних вимог до КФС «Розумна чашка»;
- розроблено математичні моделі фізичних процесів та алгоритмів функціонування системи;
- спроектовано апаратну архітектуру та програмне забезпечення КФС на базі мікроконтролера ESP32-WROOM-32;
- верифіковано функціональність системи шляхом симуляційного моделювання у середовищі Wokwi та проведено кількісну оцінку точності підсистем.

За темою кваліфікаційної роботи магістра опублікована одна стаття у фаховому науковому виданні «Вісник Хмельницького національного університету».

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Ackland P., Resnikoff S., Bourne R. World blindness and visual impairment: Despite many successes, the problem is growing. *Community Eye Health Journal*. 2018. P. 71–73.
2. Bourne R. et al. Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study. *The Lancet Global Health*. 2020.
3. Peraza-Nieves J. et al. Louis Braille, el ciego que enseñó a ver. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. 2015. Vol. 90, no. 9. P. e71–e73.
4. Senjam S. Assistive Technology for People with Visual Loss. *Delhi Journal of Ophthalmology*. 2019. Vol. 30, no. 2.
5. Islam M. T. et al. Design and implementation of smart guided glass for visually impaired people. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 5543.
6. Jebrel A., Imbayah I., Alsharif A., Ahmed A. A., Ali A. M. Design and Implementation of a Walking Smart Stick for the Visually Impaired and the Blind. *International Journal of Electrical Engineering and Sustainability*. 2023. Vol. 1, Issue 4. P. 64–74.
7. Grant A. C., Thiagarajah M. C., Sathian K. Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*. 2020. Vol. 62, no. 2. P. 301–312.
8. Koehler H., Croy I., Oleszkiewicz A. Late blindness and deafness are associated with decreased tactile sensitivity, but early blindness is not. *Neuroscience*. 2023.
9. Norman J. F., Bartholomew A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. Vol. 73, no. 7. P. 2323–2331.
10. Parthiban T. et al. Handwritten Text to Braille for Deaf-Blinded People Using Deep Neural Networks and Python. In: *Mobile Radio Communications and 5G Networks*. Singapore, 2022. P. 379–393.

11. Shunaran A. et al. Smart Glass for Visually Impaired Person. In: Intelligent Systems, Business, and Innovation Research. Cham, 2024. P. 627–633.
12. Rajendran P. S., Krishnan P., Aravindhar D. J. Design and Implementation of Voice Assisted Smart Glasses for Visually Impaired People Using Google Vision API. 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 5–7 November 2020.
13. Lakshmi G. A. et al. Smart cap: An IOT based assistant for visually impaired people. International conference on emerging technologies in engineering and science: ICETES2023, Kanchikacherla, India, 2025. P. 020113.
14. Aryanti A. et al. Smart Cup Holder For Visually Impaired People. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1500. P. 012095.
15. Chandankhede P. H., Fatinge P. M., Vaidya K. S. Development of Smart Cup for Monitoring Post Stroke Patients. 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI), Gwalior, India, 14–16 March 2024.
16. Minera S. R. et al. Smart Cup for a Smart Pill Dispenser for Verification of Pill Consumption. 2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas, NV, USA, 8-11 March 2023.
17. Barbacena I. L. et al. Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People. 2018 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Ottawa, ON, Canada, 9–10.
18. RNIB Liquid Level Indicator. URL: <https://shop.rnib.org.uk/products/rnib-liquid-level-indicator> (дата звернення: 19.04.2026).
19. 2-Stage Liquid Level Indicator. URL: <https://lssproducts.com/2-stage-liquid-level-indicator/> (дата звернення: 19.04.2026).
20. DK205 Liquid Level Indicator. URL: <https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator> (дата звернення: 19.04.2026).
21. Войчур Ю., Сорохан В., Войчур О. Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору. Вимірювальна та обчислювальна техніка в

технологічних процесах. 2026. № 1. С. 173–181. DOI: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2026-85-21>

22. Розумна чашка термос Ember Black Apple Find My version. Smart Gadget. URL: <https://smart-gadget.club/ua/smart-fitness/hydro-track/smart-thermos-cup-ember> (дата звернення: 19.04.2026).

23. Княжина Р. Як працюють кіберфізичні системи та навіщо вони потрібні? Robot Dreams. URL: <https://robotdreams.cc/uk/blog/649-how-do-cyber-physical-systems-work-and-why-are-they-needed> (дата звернення: 19.04.2026).

24. Що таке кіберфізична система. Prenlo. URL: <https://lieneu.prenlo.cx.ua/articles/shho-take-kiberfizichna-sistema.html> (дата звернення: 19.04.2026).

25. Grant A. C., Thiagarajah M. C., Sathian K. Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*. 2020. Vol. 62, no. 2. P. 301–312. DOI: <https://doi.org/10.3758/bf03205550>

26. Koehler H., Croy I., Oleszkiewicz A. Late blindness and deafness are associated with decreased tactile sensitivity, but early blindness is not. *Neuroscience*. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2023.06.016>

27. Norman J. F., Bartholomew A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. Vol. 73, no. 7. P. 2323–2331. DOI: <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0160-4>

28. Parthiban T. et al. Handwritten Text to Braille for Deaf-Blinded People Using Deep Neural Networks and Python. In: *Mobile Radio Communications and 5G Networks*. Singapore, 2022. P. 379–393. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7018-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7018-3_28)

29. Shunaran A. et al. Smart Glass for Visually Impaired Person. In: *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research*. Cham, 2024. P. 627–633. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_52)

30. RNIB Liquid Level Indicator. URL: <https://shop.rnib.org.uk/products/rnib-liquid-level-indicator> (дата звернення: 19.04.2026).

31. 2-Stage Liquid Level Indicator. URL: <https://lssproducts.com/2-stage-liquid-level-indicator/> (дата звернення: 19.04.2026).
32. DK205 Liquid Level Indicator. URL: <https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator> (дата звернення: 19.04.2026).
33. Rajendran P. S., Krishnan P., Aravindhar D. J. Design and Implementation of Voice Assisted Smart Glasses for Visually Impaired People Using Google Vision API. 2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA), Coimbatore, 5–7 November 2020. DOI: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297553>
34. Lakshmi G. A. et al. Smart cap: An IOT based assistant for visually impaired people. International conference on emerging technologies in engineering and science: icetes2023, Kanchikacherla, India, 2025. P. 020113. DOI: <https://doi.org/10.1063/5.0244968>
35. Aryanti A. et al. Smart Cup Holder For Visually Impaired People. Journal of Physics: Conference Series. 2020. Vol. 1500. P. 012095. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012095>
36. Chandankhede P. H., Fatinge P. M., Vaidya K. S. Development of Smart Cup for Monitoring Post Stroke Patients. 2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI), Gwalior, India, 14–16 March 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/iatmsi60426.2024.10502524>
37. Minera S. R. et al. Smart Cup for a Smart Pill Dispenser for Verification of Pill Consumption. 2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC), Las Vegas, NV, USA, 8–11 March 2023. DOI: <https://doi.org/10.1109/ccwc57344.2023.10099363>
38. Barbacena I. L. et al. Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People. 2018 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA), Ottawa, ON, Canada, 9–10 May 2018. DOI: <https://doi.org/10.1109/memea.2008.4542990>

39. Afzal M. J., Tayyaba S., Ashraf M. W., Javaid F., Balas V. E. Chapter 3 – A case study: Impact of Internet of Things devices and pharma on the improvements of a child in autism. In: Balas V. E., Solanki V. K., Kumar R. (eds.). *Emergence of Pharmaceutical Industry Growth with Industrial IoT Approach*. Cambridge: Academic Press, 2020. P. 49–83.
40. Tayyaba S., Khan S., Ashraf M. W., Balas V. E. Home Automation Using IoT. In: Balas V., Kumar R., Srivastava R. (eds.). *Recent Trends and Advances in Artificial Intelligence and Internet of Things*. Intelligent Systems Reference Library. Vol. 172. Cham: Springer, 2020.
41. 10 гаджетів для людей з особливими потребами. Спілка громадських організацій людей з інвалідністю Києва. URL: <https://spilka.kiev.ua/10-hadzhetiv-dlya-lyudej-z-osoblyvumu-potrebamu> (дата звернення: 19.04.2026).
42. Microsoft адаптувала віртуальну реальність для незрячих. Ukr.Media. URL: <https://ukr.media/science/390395/> (дата звернення: 19.04.2026).
43. Завдяки українцю Інтернет доступніший для інвалідів. Голос Америки. URL: <https://www.holosameryky.com/a/a-49-2010-01-04-voa3-87004547/225965.html> (дата звернення: 19.04.2026).
44. Kumar A., Komaragiri R., Kumar M. A review on computation methods used in photoplethysmography signal analysis for heart rate estimation. *Arch. Comput. Methods Eng.* 2021. Vol. 29. P. 921–940.
45. Mubashir M., Shao L., Seed L. A survey on fall detection: Principles and approaches. *Neurocomputing*. 2013. Vol. 100. P. 144–152.
46. Pierleoni P., Belli A., Maurizi L., Palma L., Pernini L., Paniccia M., Valenti S. A wearable fall detector for elderly people based on AHRS and barometric sensor. *IEEE Sens. J.* 2016. Vol. 16. P. 6733–6744.
47. Xu T., Zhou Y., Zhu J. New advances and challenges of fall detection systems: A survey. *Appl. Sci.* 2018. Vol. 8. P. 418.
48. Mrozek D., Koczur A., Małysiak-Mrozek B. Fall detection in older adults with mobile IoT devices and machine learning in the cloud and on the edge. *Inf. Sci.* 2020. Vol. 537. P. 132–147.

49. Elmannai W., Elleithy K. Sensor-based assistive devices for visually-impaired people: Current status, challenges, and future directions. *Sensors*. 2017. Vol. 17. P. 565.
50. Islam M. M., Sadi M. S., Zamli K. Z., Ahmed M. M. Developing walking assistants for visually impaired people: A review. *IEEE Sens. J.* 2019. Vol. 19. P. 2814–2828.
51. Jiang J., Liu L., Fu R., Yan Y., Shao W. Non-horizontal binocular vision ranging method based on pixels. *Opt. Quantum Electron.* 2020. Vol. 52. P. 223.
52. Rahman M. M., Islam M. M., Ahmmed S., Khan S. A. Obstacle and fall detection to guide the visually impaired people with real time monitoring. *SN Comput. Sci.* 2020. Vol. 1. P. 219.
53. Chang W. J., Chen L. B., Chen M. C., Su J. P., Sie C. Y., Yang C. H. Design and implementation of an intelligent assistive system for visually impaired people for aerial obstacle avoidance and fall detection. *IEEE Sens. J.* 2020. Vol. 20. P. 10199–10210.
54. Abuzairi T., Sumantri I. N., Irfan A., Mohamad M. R. Infrared thermometer on the wall (iThermowall): An open source and 3-D print infrared thermometer for fever screening. *HardwareX*. 2021. Vol. 9. P. e00168.
55. Xu G., Li X., Su J., Pan H., Tian G. Precision evaluation of three-dimensional feature points measurement by binocular vision. *J. Opt. Soc. Korea.* 2011. Vol. 15. P. 30–37.
56. Delahoz Y. S., Labrador M. A. Survey on fall detection and fall prevention using wearable and external sensors. *Sensors*. 2014. Vol. 14. P. 19806–19842.
57. Jiang B., Yang J., Lv Z., Song H. Wearable vision assistance system based on binocular sensors for visually impaired users. *IEEE Internet Things J.* 2019. Vol. 6. P. 1375–1383.
58. Khan M. A., Paul P., Rashid M., Hossain M., Ahad M. A. R. An AI-Based visual aid with integrated reading assistant for the completely blind. *IEEE Trans. Hum. Mach. Syst.* 2020. Vol. 50. P. 507–517.

59. Ma P., Ren J., Sun G., Zhao H., Jia X., Yan Y., Zabalza J. Multiscale superpixelwise prophet model for noise-robust feature extraction in hyperspectral images. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 2023. Vol. 61. P. 5508912.
60. Chen R., Huang H., Yu Y., Ren J., Wang P., Zhao H., Lu X. Rapid detection of multi-QR codes based on multistage stepwise discrimination and a compressed MobileNet. *IEEE Internet Things J.* 2023. (early access)
61. Zhang J., Wang X., Zhang D., Lee D. J. Semi-supervised group emotion recognition based on contrastive learning. *Electronics.* 2022. Vol. 11. P. 3990.
62. Xie G., Ren J., Marshall S., Zhao H., Li R., Chen R. Self-attention enhanced deep residual network for spatial image steganalysis. *Digit. Signal Process.* 2023. Vol. 139. P. 104063.
63. Li J. W., Barma S., Mak P. U., Pun S. H., Vai M. I. Brain rhythm sequencing using EEG signals: A case study on seizure detection. *IEEE Access.* 2019. Vol. 7. P. 160112–160124.
64. Sodhro A. H., Zahid N. AI-Enabled Framework for Fog Computing Driven E-Healthcare Applications. *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 8039.
65. Aski V. J., Dhaka V. S., Kumar S., Verma S., Rawat D. B. Advances on Networked EHealth Information Access and Sharing: Status, Challenges and Prospects. *Comput. Netw.* 2022. Vol. 204. P. 108687.
66. Taylor W., Dashtipour K., Shah S. A., Hussain A., Abbasi Q. H., Imran M. A. Radar Sensing for Activity Classification in Elderly People Exploiting Micro-Doppler Signatures Using Machine Learning. *Sensors.* 2021. Vol. 21. P. 3881.
67. Samim A. A New Paradigm of Artificial Intelligence to Disabilities. *Int. J. Sci. Res.* 2023. Vol. 12. P. 478–482.
68. Donnici R., Coronato A., Naeem M. A Self-Learning Autonomous and Intelligent System for the Reduction of Medication Errors in Home Treatments. *Proceedings of the Intelligent Environments 2021: Workshop Proceedings of the 17th International Conference on Intelligent Environments, Dubai, United Arab Emirates, 21–24 June 2021.* Vol. 29. P. 156–166.

69. Zimmermann G., Ableitner T., Strobbe C. User Needs and Wishes in Smart Homes: What Can Artificial Intelligence Contribute? \*Proceedings of the 2017 14th International Symposium on Pervasive Systems, Algorithms and Networks & 2017 11th International Conference on Frontier of Computer Science and Technology & 2017 Third International Symposium of Creative Computing (ISPAN-FCST-ISCC)\*, Exeter, UK, 21–23 June 2017. P. 449–453.
70. Park J. S., Bragg D., Kamar E., Morris M. R. Designing an Online Infrastructure for Collecting AI Data from People With Disabilities. Proceedings of the 2021 ACM Conference on Fairness, Accountability, and Transparency, Virtual Event, 3–10 March 2021. New York: ACM, 2021. P. 52–63.
71. Pardhan S., Gonzalez-Alvarez C., Subramanian A. How does the presence and duration of central visual impairment affect reaching and grasping movements? *Ophthalmic Physiol. Opt.* 2011. Vol. 31. P. 233–239.
72. Langelaan M., De Boer M. R., Van Nispen R. M., Wouters B., Moll A. C., Van Rens G. H. Impact of visual impairment on quality of life: A comparison with quality of life in the general population and with other chronic conditions. *Ophthalmic Epidemiol.* 2007. Vol. 14. P. 119–126.
73. Jeannerod M. The timing of natural prehension movements. *J. Mot. Behav.* 1984. Vol. 16. P. 235–254.
74. Smeets J. B., Brenner E. A New View on Grasping. *Mot. Control.* 1999. Vol. 3. P. 237–271.
75. Stone K., Gonzalez C. The contributions of vision and haptics to reaching and grasping. *Front. Psychol.* 2015. Vol. 6. P. 1–18.
76. Caraiman S., Zvoristeanu O., Burlacu A., Herghelegiu P. Stereo Vision Based Sensory Substitution for the Visually Impaired. *Sensors.* 2019. Vol. 19. P. 2771.
77. Gomez J. D., Bologna G., Pun T. See ColOr: An extended sensory substitution device for the visually impaired. *J. Assist. Technol.* 2014. Vol. 8. P. 77–94.
78. Hanneton S., Auvray M., Durette B. The Vibe: A versatile vision-to-audition sensory substitution device. *Appl. Bionics Biomech.* 2010. Vol. 7. P. 269–276.

79. Ward J., Meijer P. Visual experiences in the blind induced by an auditory sensory substitution device. *Conscious. Cogn.* 2010. Vol. 19. P. 492–500.
80. Bach-y Rita P., Collins C. C., Saunders F. A., White B., Scadden L. Vision Substitution by Tactile Image Projection. *Nature.* 1969. Vol. 221. P. 963–964.

# ДОДАТОК А (обов'язковий)

## Копія наукової публікації

УДК 004.9

Ю. О. ВОЙЧУР<sup>1</sup>, В. О. СОРОХАН<sup>2</sup>, О. Ю. ВОЙЧУР<sup>3</sup>

Хмельницький національний університет

ORCID ID: 0000-0003-3085-7315<sup>1</sup>, 0000-0001-8503-6464<sup>3</sup>

e-mail: [voichury@khmnhu.edu.ua](mailto:voichury@khmnhu.edu.ua)<sup>1</sup>, [sorokhan@gmail.com](mailto:sorokhan@gmail.com)<sup>2</sup>, [ovoichur@gmail.com](mailto:ovoichur@gmail.com)<sup>3</sup>

### КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА «РОЗУМНА ЧАШКА» ДЛЯ ЛЮДЕЙ З ВАДАМИ ЗОРУ

*Дана стаття присвячена обґрунтуванню та проектуванню кіберфізичної системи «Розумна чашка», розробленої для підвищення рівня автономії та безпеки людей із вадами зору в процесі приготування та споживання напоїв. У роботі проаналізовано сучасний стан проблеми, що характеризується стрімким зростанням кількості осіб із порушеннями зору в глобальному масштабі. Авторами детально розкрито нейрофізіологічні засади компенсації втрачених функцій зору через механізми крос-модальної пластичності головного мозку, де провідну роль починають відігравати слуховий та тактильний аналізатори. Встановлено, що здатність мозку до реорганізації та перепрограмування візуальних зон кори для обробки сигналів від інших органів чуття створює фундаментальну базу для впровадження високотехнологічних асистивних рішень. У статті представлено критичний огляд існуючих аналогів і доведено, що більшість із них мають обмежений функціонал, зосереджений лише на інформаційних сповіщеннях. На відміну від відомих засобів, запропонована кіберфізична система базується на інтеграції дев'яти взаємопов'язаних підсистем, що забезпечують комплексний контроль процесу. Ключовою науковою новизною розробки є концептуалізація мультимодального інтерфейсу «Zero-Visual UI», який вперше поєднує динамічну тактильну індикацію зміни текстури корпусу із голосовим супроводом у межах єдиного пристрою. Архітектура системи побудована на трірівневій ієрархії, що включає фізичний рівень з мережею датчиків рівня рідини, температури, ваги, тиску та мутності рідини, середній рівень на базі енергоефективного контролера ESP32 та верхній кібернетичний рівень у вигляді спеціалізованого мобільного застосунок. Особливу увагу приділено інтелектуальному контуру безпеки, який реалізує автоматичне блокування питного клапана при виявленні небезпечного тиску пари, та підсистемі зісліниного контролю, що використовує оптичні сенсори мутності для верифікації чистоти чашки. У підсумку розроблена концепція перетворення простий побутової пристрій на складну інтелектуальну систему, яка забезпечує незрячим людям повну безпеку від опіків, точність дозування інгредієнтів та впевненість у щоденних справах, сприяючи розвитку інклюзивного середовища та покращенню якості життя.*

*Ключові слова:* кіберфізична система, «Розумна чашка», люди з вадами зору, інтерфейс Zero-Visual UI, асистивні технології, мікроконтролер ESP32, датчики, мобільний застосунок.

Yu. O. VOICHUR, V. O. SOROKHAN, O. Yu. VOICHUR

Khmelnitskiy National University

### CYBERPHYSICAL SYSTEM "SMART CUP" FOR PEOPLE WITH VISUAL IMPAIRMENTS

*Abstract – This article is devoted to the justification and design of an innovative cyber-physical system "Smart Cup," specially developed to increase the autonomy and safety of visually impaired people in the process of preparing and consuming beverages. The paper analyzes the current state of the problem, which is characterized by a rapid increase in the number of people with visual impairments on a global scale, which is projected to reach 703 million people by 2050. The authors examine in detail the neurophysiological basis for compensating for lost visual functions through the mechanisms of cross-modal plasticity of the brain, where auditory and tactile analyzers begin to play a leading role. It has been established that the brain's ability to reorganize and reprogram visual areas of the cortex to process signals from other senses creates a fundamental basis for the implementation of high-tech assistive solutions. The article presents a critical review of existing analogues, such as liquid level indicators, as well as various "smart" assistive technologies, and proves that most of them have limited functionality, focused only on information notifications. Unlike known means, the proposed cyber-physical system is based on the integration of nine interconnected subsystems that provide comprehensive process control. The key scientific novelty of the development is the conceptualization of the multimodal interface "Zero-Visual UI," which for the first time combines dynamic tactile indication of changes in the texture of the body with voice accompaniment within a single device. The system architecture is based on a three-level hierarchy, which includes a physical level with a network of sensors for liquid level, temperature, weight, pressure, and turbidity, a middle level based on an energy-efficient ESP32 controller, and an upper cybernetic level in the form of a specialized mobile application. Particular attention is paid to the intelligent safety circuit, which automatically locks the drinking valve when dangerous steam pressure is detected, and the hygiene control subsystem, which uses optical turbidity sensors to verify the cleanliness of the cup. As a result, the developed concept transforms a simple household device into a complex intelligent system that provides blind people with complete protection from burns, accurate ingredient dosing, and confidence in their daily activities, contributing to the development of an inclusive environment and improving quality of life.*

*Keywords:* cyber-physical system, "Smart Cup", visually impaired people, Zero-Visual UI interface, assistive technologies, ESP32 microcontroller, sensors, mobile application.

### Вступ

Зір є ключовим джерелом інформації для людини, адже саме через зорові рецептори до мозку надходить понад 90% даних про навколишній світ [1]. Процес сприйняття є складним і багатоетапним – він стартує з проєктування зображення на сітківку, переходить у фазу збудження фоторецепторів та передачі сигналів через нейронні мережі, а завершується в корі головного мозку, де і формується кінцевий зоровий образ.

На жаль, нерідко люди частково або повністю втрачають здатність бачити через травми, інфекційні захворювання, як-от бленорея чи сифіліс, або внаслідок ушкоджень зорових нервів і головного мозку. У сучасному світі також спостерігається тенденція до зростання випадків сліпоти, спричиненої віковими змінами та ускладненнями від неконтрольованого цукрового діабету.

Глобальна статистика свідчить про стрімке погіршення ситуації: якщо у 2015 році налічувалося 253 мільйони людей з вадами зору, в т. ч. 36 мільйонів сліпих людей і 217 мільйонів з вадами зору середнього та високого ступеня [1], то до 2020 року цей показник зріс до 295 мільйонів, в т. ч. 43,3 мільйона сліпих людей і 251,7 мільйонів з вадами зору середнього та високого ступеня [2], а за прогнозами до 2050 року кількість незрячих або осіб із серйозними порушеннями зору може сягнути 703 мільйонів [2] – Рис. 1. В Україні офіційно зареєстровано близько 70 тисяч незрячих, проте неофіційні дані вказують на те, що реальна чисельність таких людей може бути втричі більшою.

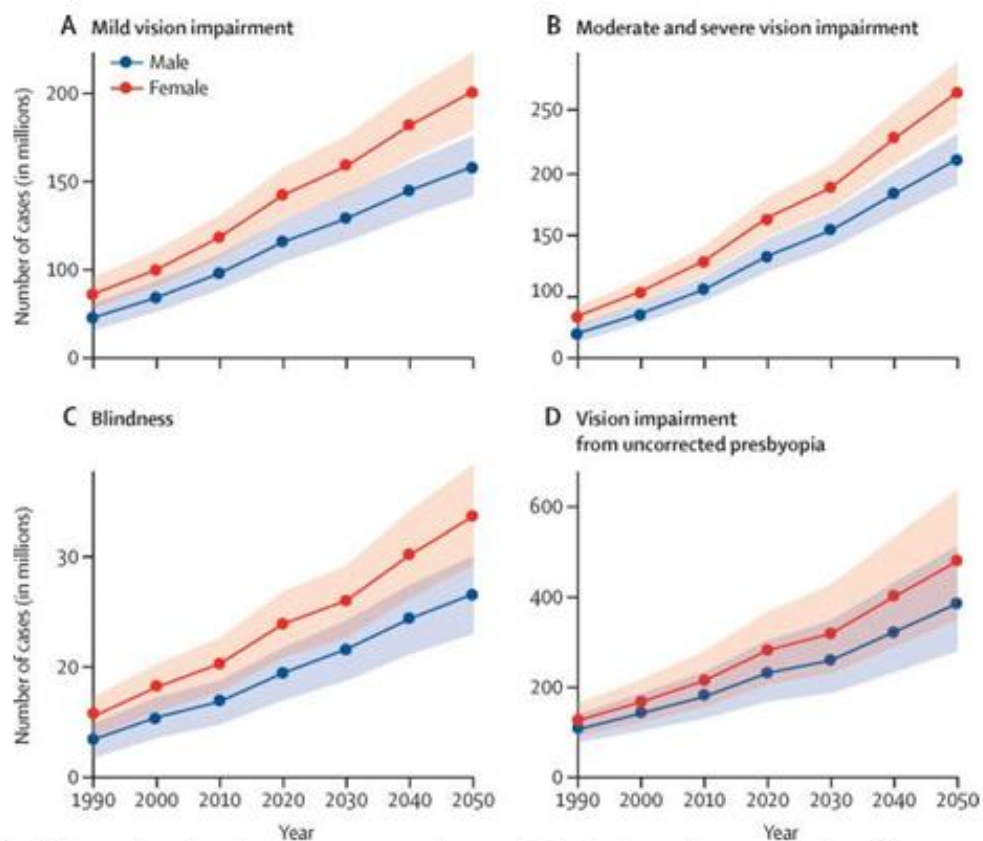


Рис. 1. Прогноз кількості людей, які страждають на легкі вади зору (А), помірні та важкі вади зору (В), сліпоту (С) та вади зору внаслідок некоригованої пресбіопії (D), за віком та статтю, 1990–2050 рр. [2]

Для забезпечення комунікації та навчання люди з порушеннями зору застосовують унікальне рельєфно-крапкове письмо, створене у 1824 році французьким педагогом Луї Брайлем [3]. Система базується на використанні шести точок, розміщених у два вертикальні стовпчики, комбінації яких дозволяють кодувати літери та символи. Технічний процес створення такого тексту має свої особливості: оскільки читання здійснюється шляхом дотику до опуклих точок, запис проводиться зі зворотного боку аркуша методом проколювання, що вимагає написання тексту справа наліво у дзеркальному відображенні. Після завершення роботи сторінка перегортається, і читач сприймає інформацію у звичному напрямку зліва направо.

Сьогодні у світі, зокрема в країнах Європейського Союзу, Північної Америки та Японії, активно розбудовується інклюзивний інформаційний простір Брайля. Це передбачає не лише масове видання книг та виготовлення тактильних інформаційних табличок, а й впровадження спеціалізованих електронних пристроїв. Окрім того, шрифт Брайля став обов'язковим елементом маркування споживчих товарів, етикеток та кнопок у ліфтах, що значно полегшує повсякденну орієнтацію та самостійність незрячих людей [4].

Актуальність розробки кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей із порушеннями зору обумовлена стрімким зростанням кількості осіб із вадами зору в усьому світі та необхідністю створення ефективних засобів їхньої соціальної та побутової адаптації. Побутове травмування, зокрема опіки гарячою водою через неможливість візуального контролю наповнення ємності, є однією з найпоширеніших проблем незрячих. Кіберфізична система «Розумна чашка» дозволить автоматизувати цей процес, мінімізуючи ризики. Створення таких смарт-об'єктів доповнює існуючу інфраструктуру (як-от шрифти Брайля чи звукові маячки), роблячи життєве середовище людини з вадами зору більш передбачуваним та контрольованим.

Розглянемо відомі аналоги кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей із порушеннями зору. RNIB Liquid Level Indicator – компактний пристрій від Королівського національного інституту сліпих (Великобританія), який кріпиться на край чашки та використовує три металеві шули для визначення двох рівнів рідини (наприклад, для кави та окремо для молока), подає звукові та вібраційні сигнали, щоб повідомити, коли потрібно припинити наливання; індикатор рівня рідини можна використовувати на більшості чашок та кувал, а також на склянках, глечиках та каструлях; пристрій «боїться» занурення у воду; вартість близько 1200 грн [5].

2-Stage Liquid Level Indicator (LS&S) – аналогічний пристрій, який використовує переривчастий звуковий сигнал при наближенні до краю та безперервний – коли ємність повна; він має три зубці, які утримують його над краєм склянки або чашки, а потім виявляє рідину на двох різних рівнях для людей зі слабким зором та незрячих; вартість близько 600 грн [6].

DK205 Liquid Level Indicator – компактний, легкий пристрій, який має три металеві зонди, які показують два окремі рівні рідини в чашці або кувалі; індикатор рівня рідини вібує та подає звуковий сигнал, повідомляючи, коли потрібно припинити наливання; перший звуковий та вібраційний сигнал повідомляє, коли потрібно припинити доливання гарячої води, якщо людина також хоче додати молоко; другий сигнал повідомляє, коли чашка майже повна; вартість близько 1000 грн [7].

Стаття [8] описує використання датчиків Liquid Level як критично важливих елементів навичок щоденного життя. У роботі підкреслюється, що такі сенсори спеціально розроблені для моніторингу рівня гарячих/холодних рідин та перетворення фізичного параметра (рівня) у тактильний або звуковий відгук.

Основна ідея проекту [9] полягає в розробці окулярів на базі Raspberry Pi для незрячих людей. Цифрова камера записує відео, яке аналізується програмою, написаною мовою Python, з використанням функцій виявлення об'єктів. Програма виявляє безліч об'єктів перед цільовою людиною та надсилає дані на Raspberry Pi, включаючи назву об'єкта та відстань до нього. Це викликає голосове повідомлення із зазначенням назви об'єкта та відстані. Також мікрофон використовується для отримання команд від користувача та надсилання цих команд на Raspberry Pi для виконання цієї дії.

Метою статті [10] є розробка інноваційного мікропроцесорного сенсорного скла для людей з вадами зору, яке може допомогти незрячим людям, видаючи звуковий сигнал під час виявлення об'єкта. Запропоноване направляюче скло надає всю необхідну інформацію для вух незрячої людини у вигляді аудіоінструкцій. Запропонована система базується на Raspberry Pi 3 моделі B, камері Pi та модулі глобальної системи

позиціонування (GPS) NEO-6M. Автори використовують TensorFlow та швидший підхід на основі згорткової нейронної мережі (R-CNN) для виявлення об'єктів та розпізнавання членів сім'ї незрячої людини. Ця система надає голосову інформацію через навушники та допомагає незрячій людині отримати незалежність та свободу в приміщенні та на вулиці.

Дослідницька робота [11] зосереджена на розробці системи навігації, яка використовує розумні окуляри в поєднанні з датчиком для постійного захоплення зображень з навколишнього середовища за допомогою носимих розумних окулярів. Розумні окуляри оснащені процесором для обробки захоплених зображень, і об'єкти будуть виявлені, щоб повідомити користувача про результати зображення, і користувач матиме набагато повніше уявлення. Ця система дозволяє людям з вадами зору не лише інформувати про маршрут подорожі та відстань до перешкоди, але й може повідомити про те, що це за перешкода. Ці розумні окуляри можуть визначати відстань до перешкоди та видавати попередження, щоб заздалегідь попередити користувача.

У статті [12] дослідники розробили «Розумну тростину» для незрячих людей. За допомогою цієї «Розумної тростини» незрячі та слабозорі люди зможуть виконувати щоденні завдання з більшою мобільністю та незалежністю. Запропонований проєкт передбачає створення легкої тростини з кількома датчиками, для керування якими використовуватиметься Arduino. Датчики використовуються для передачі сигналів на заковану плату Arduino. Потім ця плата підключається до сигнального пристрою з вібраторами та сиренами, а також деякими голосовими кліпами, записаними для безпечного керування незрячими. Тростина також має звуковий роз'єм, якого немає в більшості звичайних тростин. Він використовується для керування допоміжними частинами, які повідомляють користувача про матеріал, форму та напрямок перешкоди. «Розумна тростина» працює від батареї та є легкою. Таким чином, це зручний у використанні та доступний за ціною варіант для людей з вадами зору.

У статті [13] обговорюється пристрій «Розумна кепка» як недорогий помічник на основі датчиків для сліпих та слабозорих людей, який використовує ультразвукові датчики для виявлення об'єктів навколо та інформує користувача про наближення або нерухомі об'єкти навколо нього за допомогою вібраційних приводів. Він дуже дешевий порівняно з іншими альтернативами та має високу інтеграцію з іншими запропонованими ідеями.

У статті [14] представлено проєкт та розробку допоміжного пристрою, який допомагає людям з вадами зору безпечніше поводитися з гарячими рідинами. У запропонованій системі розроблено підставку для чашок, яка вимірює рівень води та температуру за допомогою різних датчиків. Прототип чашки було розроблено за допомогою CAD та надруковано для подальшого тестування. Команда успішно розробила робочий прототип, який визначає рівень води за допомогою тиску і попереджає користувача, коли вода занадто гаряча. У майбутньому будуть проведені додаткові випробування, щоб можна було використовувати різні типи чашок на підставці для чашок.

У статті [15] пропонується екосистема інтелектуальних об'єктів для домашнього моніторингу пацієнтів, які перенесли інсульт. Першим елементом цієї екосистеми є розумна чашка, призначена для моніторингу рухової активності рук і кистей пацієнтів. Ця чашка оснащена датчиками, які аналізують, як пацієнти поведуться з чашкою, надаючи важливу інформацію про хід їхнього одужання. Крім того, вона виявляє тремор, що вказує на можливі неврологічні або рухові розлади, і відстежує щоденні дії, такі як сидіння, стояння, ходьба та пиття. Ці дані є необхідними для всебічної оцінки самостійності та прогресу пацієнтів.

У науковій роботі [16] описано конструкцію пристрою, який може допомогти літнім людям або людям з фізичними чи когнітивними обмеженнями вчасно приймати призначені ліки у формі таблеток, одночасно перевіряючи, чи такі таблетки були фактично спожиті. Конструкція складається з портативного розумного дозатора таблеток, який встановлюється на підставку, що дозволяє йому видавати таблетки в розумну чашку. Розумний дозатор таблеток використовує кроковий двигун для обертання до потрібних таблеток на основі конкретного часового проміжку/дня тижня. Розумна чашка, прикріплена до пігулкової коробки, використовує акселерометр, гіроскоп та інфрачервоний датчик наближення, щоб визначити, чи приймає користувач ліки, за

тим, наскільки розумна чашка піднята та нахилена. Розумна чашка повідомляє розумний дозатор пігулок, чи пігулки були прийняті належним чином, чи ні, що дозволяє пристрою потенційно допомогти пацієнтам вести більш здоровий спосіб життя.

Таким чином, створення кіберфізичної системи «Розумна чашка» відповідає сучасним тенденціям розвитку інклюзивного суспільства та використовує фундаментальний адаптивний потенціал людського мозку для підвищення якості життя людей з вадами зору. Огляд відомих рішень підтверджує, що хоча ринок пропонує прості накладні датчики та різні розумні пристрої для людей з вадами зору, створення саме цілісної кіберфізичної системи (де чашка є інтегрованим пристроєм з аналітикою даних) є актуальним науковим завданням. Більшість існуючих розробок фокусуються на інформаційній складовій (сповіщення), тоді як розроблювана кіберфізична система дозволить вийти на рівень управління та інтеграції (наприклад, взаємодія з смартфоном).

#### **Нейрофізіологія сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору**

Розглянемо основи нейрофізіології сенсорних процесів та засоби компенсації зорової недостатності в людей з вадами зору.

Особливістю нейрофізіології зрячих людей є те, що в корі їхнього головного мозку зони, відповідальні за обробку візуальних сигналів, мають значно більшу кількість нейронів порівняно з ділянками, що опрацьовують слухові чи тактильні дані. Саме це зумовлює домінуючу роль очей у процесі аналізу навколишнього середовища, проте у випадку втрати зору відповідний відділ кори припинає отримувати звичні вхідні сигнали [17].

Тривала відсутність зорового сприйняття запускає глибокі адаптивні процеси, що відображаються на морфологічній структурі окремих ділянок мозку та призводять до повної перебудови системи отримання інформації через збережені органи чуття. Такі зміни відбуваються безпосередньо протягом життя, коли в процесі розвитку в незрячих формуються принципово нові способи сприйняття та аналізу дійсності, а також специфічні методи орієнтування у просторі, які згодом починають відігравати провідну роль у їхній пізнавальній діяльності.

Порівняльна характеристика змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей демонструє дивовижну здатність мозку до адаптації. Оскільки ці органи чуття стають основними каналами зв'язку зі світом, вони зазнають як фізіологічних, так і функціональних трансформацій.

У незрячих людей слух не стає «гострішим» у фізичному сенсі (порог чутності децибелів зазвичай такий самий, як у зрячих), проте мозок починає набагато ефективніше обробляти звукову інформацію. Так, незрячі значно швидше та точніше визначають джерело звуку в просторі, особливо в умовах шуму або при відлунні. Багато людей з вадами зору розвивають здатність до ехолокації – розпізнавання об'єктів за відлунням від власних кроків або клацання язиком. Мозок незрячих швидше розпізнає людську мову, що дозволяє їм сприймати аудіокниги на швидкості, яка для зрячих звучить як нерозбірливий шум [18, 19].

Дотик для людей з вадами зору стає основним інструментом для «бачення» предметів зблизька та читання. Тут зміни відбуваються на рівні сенсомоторної кори. Так, здатність розрізняти дві близькі точки на шкірі у незрячих розвинена значно краще. Це критично важливо для читання шрифтом Брайля, де відстань між крапками мінімальна. Нервові закінчення на пучках пальців передають сигнали до мозку, який інтерпретує їх миттєво. Цікаво, що при читанні Брайля у незрячих активується потилична частка мозку (яка у зрячих відповідає за зір). Незрячі часто тонше відчувають зміну потоків повітря або легку вібрацію підлоги, що допомагає в орієнтуванні [18, 19].

Ці зміни є класичним прикладом крос-модальної пластичності: мозок не залишає «порожніми» зони, що призначалися для зору, а віддає їх під потреби слуху та дотику, роблячи ці відчуття значно інформативнішими [18, 19].

Результати порівняльного аналізу змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей представлені у Таблиці 1.

Таблиця 1

## Порівняльний аналіз змін чутливості слуху та дотику у незрячих людей

Характеристика	Слух	Дотик
Основна функція	Орієнтування на далеких відстанях, ехолокація	Детальне вивчення предметів, читання, маніпуляції
Механізм покращення	Швидкість обробки звукових сигналів мозком	Розширення зони представлення пальців у корі мозку
Здатність до навчання	Потребує практики аналізу відлуння	Потребує тривалого тренування дрібної моторики
Роль у пізнанні	Створення «акустичної карти» середовища	Створення просторових образів через контакт

Особливості мислення та нейрофізіології незрячих людей безпосередньо залежать від віку, у якому було втрачено зір. Якщо це сталося у свідомому віці, людина продовжує оперувати тими ж візуальними образами, що й зрячі, хоча тепер отримує дані про них через інші органи чуття. У тих, хто втратив зір після п'яти років, зорова пам'ять залишається слабко розвиненою, а сприйняття світу базується переважно на слухових та тактильних відчуттях. У випадках втрати зору в ранньому дитинстві мозок демонструє високу пластичність – центр, що зазвичай відповідає за візуальну інформацію, переорієнтовується на обробку вербальних, слухових або дотикових сигналів. Проте у людей, сліпих від народження, ділянка мозку, призначена для побудови візуальних зображень, взагалі не функціонує за прямим призначенням [18, 19].

Результати томографічних досліджень підтверджують ці відмінності, демонструючи у незрячих значне посилення нейронних зв'язків між різними відділами мозку. У сліпих людей спостерігалися посилені зв'язки між деякими частинами мозку. Суттєві структурні зміни фіксуються не лише у потиличній корі, а й у зонах, відповідальних за функціонування мови, пам'яті та сенсомоторних реакцій, що свідчить про глибоку адаптацію всієї нервової системи [19].

Наукові дослідження в галузі нейропластичності підтверджують, що незрячість спричиняє глибоку адаптацію мозку, змінюючи самі принципи обробки вхідної інформації. Завдяки здатності нейронних структур до реорганізації, мозок здатний «перепрограмувати» ділянки, які зазвичай відповідають за зір, для посилення чутливості інших сенсорних систем, зокрема слуху та дотику. Хоча розмір візуальних зон у мозку незрячих людей залишається порівняним із показниками зрячих, їхні невізуальні зони часто перевищують норму, що свідчить про компенсаторне розширення функціональних можливостей. Численні докази вказують на те, що за відсутності сигналів від одного з органів чуття мозок активно самостійно переналаштовується, щоб максимально ефективно використовувати нюх, слух чи тактильні відчуття для взаємодії із зовнішнім світом. Навіть у випадках повної втрати зору організм демонструє колосальний адаптивний потенціал, «перекроюючи» свою структуру таким чином, щоб якнайкраще оперувати доступними даними та забезпечувати повноцінну життєдіяльність людини в навколишньому середовищі [17].

Описане явище отримало назву компенсації, що полягає у відновленні або заміщенні недорозвинених чи порушених психічних функцій через використання збережених можливостей організму або перебудову частково ушкоджених систем. З фізіологічного погляду основою цього процесу є мобілізація значних резервів вищої нервової діяльності, коли втрачена функція зору компенсується активізацією слухового, рухового та тактильного аналізаторів. Зокрема, у дітей, незрячих від народження, компенсація відбувається переважно шляхом інтенсивного розвитку дотику, що класифікується як внутрішньосистемна перебудова, де адаптація здійснюється за допомогою механізмів тієї ж сенсорної системи. Фізіологічний механізм такого пристосування базується на стабільній роботі збережених систем та загальній рефлекторній діяльності організму. Важливо, що запуск компенсаторних процесів відбувається автоматично на рівні безумовних рефлексів, тоді як подальше вдосконалення цих адаптаційних навичок і механізмів реалізується вже як складна умовно-рефлекторна діяльність [18, 20].

Отже, візуальні зони кори головного мозку реорганізуються для обробки сигналів від інших аналізаторів, зокрема тактильного та слухового. Саме цей механізм компенсації стає основою для використання кіберфізичних систем – вони трансформують візуальні параметри навколишнього середовища (наприклад, рівень рідини, її температуру або наявність перешкод) у доступні для сприйняття сигнали. Оскільки мозок незрячої людини «перепрограмує» себе на посилену обробку невізуальних сигналів, пристрій, що надає звуковий або вібраційний зворотний зв'язок, ідеально інтегрується у нову когнітивну модель сприйняття користувача. Це створює нагальну потребу у впровадженні асистивних технологій для виконання повсякденних життєвих завдань, які б базувалися на сучасних знаннях про нейрофізіологію та механізми компенсації втрачених функцій та покращували б функціонування та виконання повсякденних навичок, тим самим покращуючи самостійне життя людей з вадами зору.

Тому, головною метою даного дослідження є проєктування кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору.

#### **Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору**

Головні проблеми, з якими стикається сліпа людина при приготуванні та споживанні кави, можна розділити на кілька категорій: безпека (гаряча вода і посуд становлять значний ризик опіків; без можливості бачити, як і куди летить вода, легко пролити її на себе або перелити через край), точність і навігація (важко відміряти правильну кількість кави, цукру або молока; відсутність візуальних орієнтирів робить майже неможливим наповнення чашки до потрібного рівня, що часто призводить до переливання або недостатнього об'єму), а також чуттєві перешкоди (без зору важко визначити температуру напою; сліпа людина може легко обпектися, не відчувши тепла на відстані, або навпаки, пити каву, яка вже охолочила; до того ж, використання традиційного посуду, як-от чашок з ручкою, може бути незручним, оскільки її положення відносно отвору для пиття не завжди очевидне).

Розроблювана «Розумна чашка» спрямована на надання сліпій людині повної автономії та безпеки при приготуванні та споживанні кави чи будь-якого іншого напою. Проєкт «Розумної чашки» для сліпої людини, яка б дозволила їй самостійно готувати каву/чай та пити її/його, можна втілити завдяки поєднанню тактильних відчуттів, звукових сигналів та сучасних технологій.

Тому, кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору містить:

1) підсистему контролю наповнення з голосовими підказками – чашка оснащена датчиком рівня рідини, який, поєднуючись з голосовим синтезатором, надає чіткі інструкції, наприклад: «Рівень 20%», «Рівень 50%», «Рівень 80%», «Чашка майже повна, зупиніться!» тощо, що виключає переливання та ризик опіків;

2) підсистему індукційного нагріву та автоматичного відключення – вбудований індукційний елемент у підставку чашки забезпечує безпечний та швидкий нагрів води без відкритого вогню чи гарячої плити; підсистема автоматично вимикається після досягнення заданої температури (датчик температури) або якщо чашка порожня (датчик рівня рідини), запобігаючи перегріву; чашка подає звуковий сигнал, коли температура досягла заданого користувачем значення (через мікрофон смартфона та спеціальний мобільний застосунок);

3) підсистему зважування з голосовими підказками – у підставку чашки інтегровано високоточні ваги; при додаванні інгредієнтів (кави, цукру) голосовий синтезатор повідомляє, наприклад: «Додано 5 грамів кави», «Рекомендована порція для однієї чашки – 8 грамів», «Додано 10 грамів цукру» тощо, що забезпечує точне дозування без візуального контролю;

4) підсистему голосового температурного індикатора – чашка активно повідомляє про температуру напою, наприклад: «Температура 30°C», «Температура 60°C», «Температура 85°C» тощо, що дозволяє уникнути опіків або пиття холодного напою;

5) підсистему живлення – чашка працює від вбудованого акумулятора з бездротовою зарядкою, що дозволяє її легко розміщувати на зарядній станції без необхідності підключати кабелі;

6) підсистему зв'язку через Bluetooth зі смартфоном, яка дозволить використовувати мікрофон у смартфоні та встановити через спеціальний мобільний застосунок у смартфоні рівень ідеальної температури для користувача, напій, який користувач готує, тощо;

7) підсистему акустичного локатора – дистанційна активація звукового сигналу через телефон, чашка подає приглушений сигнал (bip), допомагаючи локалізувати себе у просторі кухні;

8) підсистему гігієнічного контролю з голосовими підказками – використання датчика мутності (turbidity sensor) води після миття з голосовим сигналом: «Чашка чиста» або «Потрібне додаткове промивання», що є критичним для безпеки здоров'я;

9) інтерфейс користувача з нульовим зором» (Zero-Visual UI): термоізолюваний корпус та тактильні індикатори температури – зовнішній корпус чашки виготовлений з термоізолюючого матеріалу, що дозволяє тримати її, не обпалюючись; додатково, чашка має рельєфні ділянки, які змінюють свою текстуру залежно від температури (датчик температури): гладка – холодна, злегка шорстка – тепла, з чіткими виступами – гаряча; тактильні мітки для орієнтації – ручка чашки має ергономічну форму з рельєфними мітками, що вказують на отвір для пиття; це дозволяє користувачеві швидко знайти правильне положення для комфортного пиття; ергономічна кришка з питним клапаном та датчиком тиску – кришка чашки має герметичний клапан, який легко відкривається/закривається одним натисканням і запобігає розливанню; якщо напій занадто гарячий і створюється надлишковий тиск пари, кришка блокує клапан для пиття, доки температура не впаде до безпечної (додатковий фізичний бар'єр проти опіків).

Ця «Розумна чашка» перетворює процес приготування та споживання кави на безпечний, точний та комфортний досвід для сліпих людей, надаючи їм незалежність та впевненість. Цей концепт об'єднує сенсорну інформацію, яка є критично важливою для людей з порушенням зору, з функціональністю, що допомагає їм почуватися більш незалежними у повсякденних справах. Запропонована концепція перетворює розроблену «Розумну чашку» з простого асистивного пристрою на повноцінну кіберфізичну систему, де фізичні процеси (нагрів, наповнення) тісно інтегровані з обчислювальними алгоритмами та мобільними інтерфейсами.

Структура будь-якої кіберфізичної системи базується на тривірневій ієрархії взаємопов'язаних компонентів. Фундаментом виступає фізичний рівень, де за допомогою мережі датчиків здійснюється пряме вимірювання необхідних параметрів середовища (рівень рідини, температура, тиску, ваги, мутності тощо). Наступною ланкою є середній рівень, представлений контролером або системою контролерів. Їхнє завдання полягає в акумуляції сигналів від сенсорів, проведенні первинної обробки даних та їхній трансляції до центральних баз даних або спеціалізованого програмного забезпечення. Завершує архітектуру верхній, кібернетичний рівень, де аналітичне ПЗ виконує глибоку обробку отриманої інформації. На основі складних алгоритмів цей рівень формує прогнози, надає рекомендації та забезпечує автоматизацію процесів прийняття рішень.

Для реалізації кіберфізичної системи «Розумна чашка» контролер має бути компактним, підтримувати бездротові протоколи (Bluetooth для зв'язку зі смартфоном) та мати достатньо аналогових і цифрових входів для 9 вищеприписаних підсистем. Результати проведеного порівняльного аналізу трьох найбільш популярних платформ для таких розробок представлені у Таблиці 2.

Таблиця 2

Порівняльний аналіз контролерів

Характеристика	Arduino Nano (ATmega328P)	ESP32-WROOM-32	STM32 (Blue Pill)
Процесор	8-біт	32-біт (Dual Core)	32-біт
Тактова частота	16 МГц	160–240 МГц	72 МГц
Бездротовий зв'язок	Відсутній (потребує модулів)	Wi-Fi + Bluetooth (Dual Mode)	Відсутній
Енергоспоживання	Низьке	Дуже низьке (Deep Sleep)	Низьке
Об'єм пам'яті (Flash)	32 КБ	4 МБ	64/128 КБ
Підтримка Audio/Voice	Дуже обмежена	Висока (I2S для синтезу мовлення)	Середня
Габарити	Малі	Дуже малі	Малі

Для кіберфізичної системи «Розумна чашка» найкращим вибором є контролер ESP32, оскільки він має інтегрований Bluetooth, що є критичним для підсистеми зв'язку через Bluetooth зі смартфоном, та дозволяє підключатися до смартфона без додаткових громіздких модулів. Завдяки вбудованому інтерфейсу I2S та високій обчислювальній потужності, ESP32 може відтворювати стиснуті аудіофайли або генерувати голос, що необхідно для підсистеми контролю наповнення з голосовими підказками, підсистеми зважування з голосовими підказками, підсистеми голосового температурного індикатора, підсистеми гігієнічного контролю з голосовими підказками. Оскільки чашка працює від акумулятора, ESP32 може «засинати», коли нею не користуються, і миттєво «прокидатися» при спрацюванні датчика руху або ваги. ESP32 має достатньо контактів для їх одночасного обслуговування великої кількості датчиків описаних вище підсистем. ESP32 має вбудовані смісні сенсори дотику, що може спростити реалізацію тактильних інтерфейсів.

Враховуючи описані вище підсистеми кіберфізичної системи «Розумна чашка», а також проведений вибір контролера для такої кіберфізичної системи, спроектуємо архітектуру кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору – рис. 2.

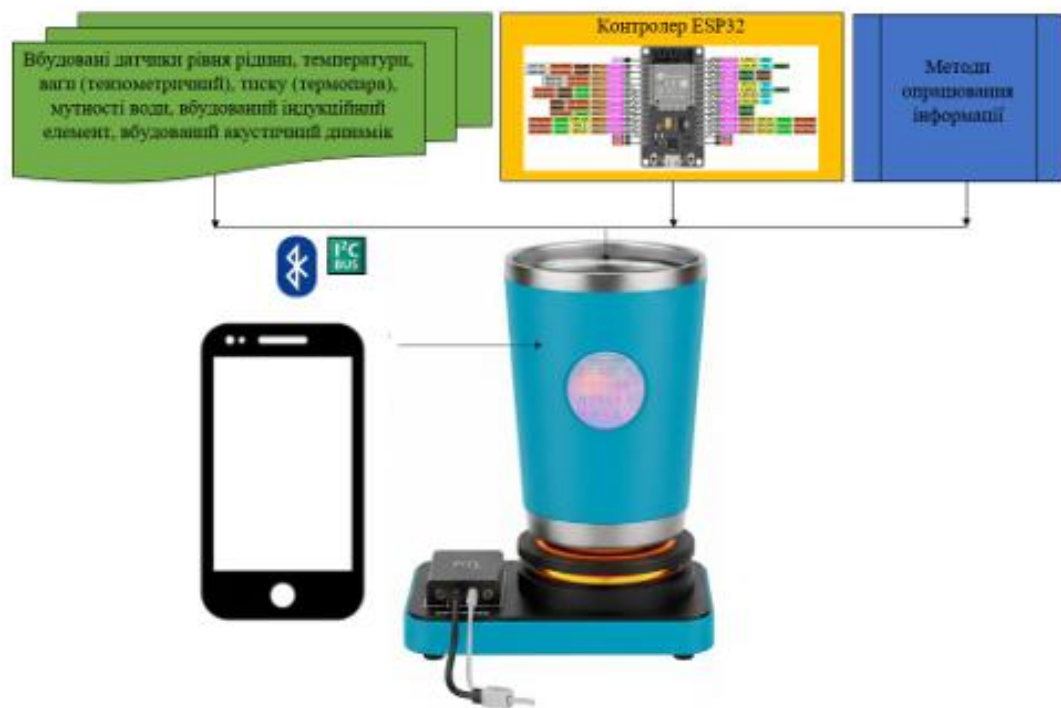


Рис. 2. Архітектура кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору

Пропонована кіберфізична система «Розумна чашка» для людей з вадами зору є новою науковою концепцією, яка відрізняється від відомих засобів концептуалізацією мультимодального інтерфейсу «Zero-Visual UI» (вперше запропоновано поєднання динамічної тактильної індикації із голосовим супроводом у межах єдиного побутового пристрою), інтелектуальною системою безпеки (розроблено механізм адаптивного блокування питного клапана на основі аналізу тиску пари та температури, що створює фізичний бар'єр для запобігання опікам), реалізацією автоматизованого гігієнічного контролю (запропоновано використання оптичних сенсорів мутності для верифікації чистоти ємності в умовах відсутності візуального контролю, що розширює функціонал асистивних технологій у сфері охорони здоров'я), кіберфізичною інтеграцією, яка дозволяє персоналізувати процес приготування напоїв через цифрові профілі користувача.

### Висновки

У роботі проаналізовано сучасний стан проблеми, що характеризується стрімким зростанням кількості осіб із порушеннями зору в глобальному масштабі, що за прогнозами може сягнути 703 мільйонів осіб до 2050 року. Проведене дослідження підтверджує надзвичайну актуальність розробки спеціалізованих асистивних технологій, що зумовлено невтішною динамікою зростання кількості людей із порушеннями зору в усьому світі та складністю їхньої побутової адаптації.

Оскільки зір забезпечує понад 90% вхідної інформації, його втрата вимагає залучення глибоких нейрофізіологічних механізмів крос-модальної пластичності, де провідну роль у пізнавальній діяльності починають відігравати слуховий та тактильний аналізатори. Авторами детально розглянуто нейрофізіологічні засади компенсації втрачених функцій зору через механізми крос-модальної пластичності головного мозку. Встановлено, що здатність мозку до реорганізації та перепрограмування візуальних зон кори для обробки сигналів від інших органів чуття створює фундаментальну базу для впровадження високотехнологічних асистивних рішень. Саме ці знання про адаптивний потенціал мозку та процеси компенсації стали фундаментальним підґрунтям для проєктування кіберфізичної системи, яка трансформує візуальні параметри середовища у доступні для сприйняття незрячою людиною сигнали.

Аналіз наявних на ринку та описаних у науковій літературі аналогів показав, що більшість існуючих рішень фокусується на вузькоспеціалізованих завданнях, як-от просте сповіщення про рівень рідини за допомогою накладних датчиків. На відміну від них, запропонована кіберфізична система «Розумна чашка» є цілісним інтегрованим рішенням, яке базується на інтеграції дев'яти взаємопов'язаних підсистем, що забезпечують комплексний контроль процесу і не лише інформують користувача, а й автоматизують процеси нагріву та дозування інгредієнтів, забезпечуючи новий рівень автономії. Це дозволяє перейти від концепції простих асистивних засобів до повноцінної інтелектуальної взаємодії фізичних процесів із цифровими інтерфейсами.

Наукова новизна розробки полягає у впровадженні унікальної концепції мультимодального інтерфейсу «Zero-Visual UI», який вперше поєднує голосовий супровід із динамічною тактильною індикацією, що змінює текстуру корпусу залежно від температури напою. Важливою перевагою системи є інтелектуальний контур безпеки, що включає адаптивне блокування питного клапана при надлишковому тиску пари, а також використання сенсорів мутності для об'єктивного контролю гігієни ємності за відсутності візуального нагляду. Такі науково-інженерні рішення безпосередньо спрямовані на нівелювання ризиків побутового травматизму та покращення санітарної безпеки користувачів з вадами зору.

Вибір мікроконтролера ESP32 як центрального вузла архітектури є технічно обґрунтованим завдяки його високій обчислювальній потужності, підтримці бездротового зв'язку та здатності до синтезу мовлення. Трирівнева архітектура системи, що охоплює фізичний, середній та кібернетичний рівні, дозволяє ефективно акумулювати дані з численних датчиків, проводити їх аналіз та забезпечувати персоналізацію через мобільний застосунок. Це створює умови для гнучкого налаштування пристрою під індивідуальні потреби користувача, включаючи встановлення ідеальних температурних режимів та рецептур.

У підсумку, розроблений концепт кіберфізичної системи «Розумна чашка» демонструє потенціал докорінного підвищення якості самостійного життя людей із вадами зору шляхом перетворення простого побутового пристрою на складну інтелектуальну систему, яка забезпечує незрячим людям повну безпеку від опіків, точність дозування інгредієнтів та впевненість у щоденних справах, сприяючи розвитку інклюзивного середовища. Поєднання індукційного нагріву, системи точного зважування та голосового температурного індикатора перетворює рутинний процес приготування напоїв на безпечний та контрольований досвід. Подальша реалізація та впровадження подібних смарт-об'єктів сприятиме розвитку інклюзивного суспільства, надаючи людям із сенсорними обмеженнями більше впевненості у повсякденних справах.

### Література

1. Ackland P., Resnikoff S., Bourne R. World blindness and visual impairment: Despite many successes, the problem is growing. *Community Eye Health Journal*. 2018. Pp. 71–73. PMID: 29483748.
2. Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study / R. Bourne et al. *The Lancet Global Health*. 2020. URL: [https://doi.org/10.1016/s2214-109x\(20\)30425-3](https://doi.org/10.1016/s2214-109x(20)30425-3).
3. Louis Braille, el ciego que enseñó a ver / J. Peraza-Nieves et al. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. 2015. Vol. 90, no. 9. P. e71-e73. URL: <https://doi.org/10.1016/j.oftal.2015.02.003>.
4. Handwritten Text to Braille for Deaf-Blinded People Using Deep Neural Networks and Python / T. Parthiban et al. *Mobile Radio Communications and 5G Networks*. Singapore, 2022. P. 379–393. URL: [https://doi.org/10.1007/978-981-16-7018-3\\_28](https://doi.org/10.1007/978-981-16-7018-3_28).
5. RNIB Liquid Level Indicator. URL: <https://shop.rnib.org.uk/products/rnib-liquid-level-indicator>.
6. 2-Stage Liquid Level Indicator. URL: <https://ssproducts.com/2-stage-liquid-level-indicator/?srsltid=AfmBOoqSWvyl1ohAC0AjaJZM3XUqBMO5xsvb1CyeIImNdRCpAXzIh15d>.
7. DK205 Liquid Level Indicator. URL: [https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator?srsltid=AfmBOoqBQyqpt5wmW0Ie37C9nZG1bLOrET0hzMcdIBb1\\_Ri0BQJTH8v](https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator?srsltid=AfmBOoqBQyqpt5wmW0Ie37C9nZG1bLOrET0hzMcdIBb1_Ri0BQJTH8v).
8. Senjam S. Assistive Technology for People with Visual Loss. *Delhi Journal of Ophthalmology*. 2019. Vol. 30, no. 2. URL: <https://doi.org/10.7869/djo.496>.
9. Smart Glass for Visually Impaired Person / A. Shunaran et al. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research*. Cham, 2024. P. 627–633. URL: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0\\_52](https://doi.org/10.1007/978-3-031-36895-0_52).
10. Design and implementation of smart guided glass for visually impaired people / M. T. Islam et al. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 5543. URL: <https://doi.org/10.11591/ijece.v12i5.pp5543-5552>.
11. Rajendran P. S., Krishnan P., Aravindhar D. J. Design and Implementation of Voice Assisted Smart Glasses for Visually Impaired People Using Google Vision API. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, 5–7 November 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/iceca49313.2020.9297553>.
12. Jebrel A., Imbayah I., Alsharif A., Ahmed A. A., Ali A. M. Design and Implementation of a Walking Smart Stick for the Visually Impaired and the Blind. *International Journal of Electrical Engineering And Sustainability*. 2023. Vol. 1. Issue 4. Pp. 64–74.
13. Smart cap: An IOT based assistant for visually impaired people / G. A. Lakshmi et al. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN ENGINEERING AND SCIENCE: ICETES2023*, Kanchikacherla, India. 2025. P. 020113. URL: <https://doi.org/10.1063/5.0244968>.
14. Smart Cup Holder For Visually Impaired People / A. Aryanti et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1500. P. 012095. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1500/1/012095>.
15. Chandankhede P. H., Fatige P. M., Vaidya K. S. Development of Smart Cup for Monitoring Post Stroke Patients. *2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwallor, India, 14–16 March 2024. 2024. URL: <https://doi.org/10.1109/iatmsi60426.2024.10502524>.
16. Smart Cup for a Smart Pill Dispenser for Verification of Pill Consumption / S. R. Minera et al. *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 8–11 March 2023. 2023. URL: <https://doi.org/10.1109/ccwc57344.2023.10099363>.
17. Grant A. C., Thiagarajah M. C., Sathian K. Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*. 2020. Vol. 62, no. 2. P. 301–312. URL: <https://doi.org/10.3758/bf03205550>.

18. Koehler H., Croy I., Oleszkiewicz A. Late blindness and deafness are associated with decreased tactile sensitivity, but early blindness is not. *Neuroscience*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2023.06.016>.
19. Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People / I. L. Barbacena et al. *2018 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Ottawa, ON, Canada, 9–10 May 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/memea.2008.4542990>.
20. Norman J. F., Bartholomew A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. Vol. 73, no. 7. P. 2323–2331. URL: <https://doi.org/10.3758/s13414-011-0160-4>.

#### References

- Ackland P., Resnikoff S., Bourne R. World blindness and visual impairment: Despite many successes, the problem is growing. *Community Eye Health Journal*. 2018. Pp. 71–73.
- Trends in prevalence of blindness and distance and near vision impairment over 30 years: an analysis for the Global Burden of Disease Study / R. Bourne et al. *The Lancet Global Health*. 2020.
- Louis Braille, el ciego que enseñó a ver / J. Peraza-Nieves et al. *Archivos de la Sociedad Española de Oftalmología*. 2015. Vol. 90, no. 9. P. e71-e73.
- Handwritten Text to Braille for Deaf-Blinded People Using Deep Neural Networks and Python / T. Parthiban et al. *Mobile Radio Communications and 5G Networks*. Singapore, 2022. P. 379–393.
- RNIB Liquid Level Indicator. URL: <https://shop.rnib.org.uk/products/mlb-liquid-level-indicator>.
- 2-Stage Liquid Level Indicator. URL: <https://seproducts.com/2-stage-liquid-level-indicator?srsltid=AfmBOopSWxyt1obAC0AjaIzMBXUqBMOiwxvblCyeIImNidRCpAXzIhI5d>.
- DK205 Liquid Level Indicator. URL: [https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator?srsltid=AfmBOoqbOvypct5wmWQie37C9nZG1blOrET0hzModJbB1\\_Ri0BQITH8v](https://talkingwatchshop.co.uk/products/dk205-liquid-level-indicator?srsltid=AfmBOoqbOvypct5wmWQie37C9nZG1blOrET0hzModJbB1_Ri0BQITH8v).
- Senjam S. Assistive Technology for People with Visual Loss. *Delhi Journal of Ophthalmology*. 2019. Vol. 30, no. 2.
- Smart Glass for Visually Impaired Person / A. Shunaran et al. *Intelligent Systems, Business, and Innovation Research*. Cham, 2024. P. 627–633.
- Design and implementation of smart guided glass for visually impaired people / M. T. Islam et al. *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)*. 2022. Vol. 12, no. 5. P. 5543.
- Rajendran P. S., Krishnan P., Aravindhar D. J. Design and Implementation of Voice Assisted Smart Glasses for Visually Impaired People Using Google Vision API. *2020 4th International Conference on Electronics, Communication and Aerospace Technology (ICECA)*, Coimbatore, 5–7 November 2020. 2020.
- Jebrel A., Imbayah I., Alsharif A., Ahmed A. A., Ali A. M. Design and Implementation of a Walking Smart Stick for the Visually Impaired and the Blind. *International Journal of Electrical Engineering And Sustainability*. 2023. Vol. 1. Issue 4. Pp. 64–74.
- Smart cap: An IOT based assistant for visually impaired people / G. A. Lakshmi et al. *INTERNATIONAL CONFERENCE ON EMERGING TECHNOLOGIES IN ENGINEERING AND SCIENCE: ICETES2023*, Kanchikacherla, India. 2025. P. 020113.
- Smart Cup Holder For Visually Impaired People / A. Aryanti et al. *Journal of Physics: Conference Series*. 2020. Vol. 1500. P. 012095.
- Chandankhede P. H., Fatinge P. M., Valdiya K. S. Development of Smart Cup for Monitoring Post Stroke Patients. *2024 IEEE International Conference on Interdisciplinary Approaches in Technology and Management for Social Innovation (IATMSI)*, Gwalior, India, 14–16 March 2024. 2024.
- Smart Cup for a Smart Pill Dispenser for Verification of Pill Consumption / S. R. Minera et al. *2023 IEEE 13th Annual Computing and Communication Workshop and Conference (CCWC)*, Las Vegas, NV, USA, 8–11 March 2023. 2023.
- Grant A. C., Thagarajah M. C., Sathian K. Tactile perception in blind Braille readers: A psychophysical study of acuity and hyperacuity using gratings and dot patterns. *Perception & Psychophysics*. 2020. Vol. 62, no. 2. P. 301–312.
- Koehler H., Croy I., Oleszkiewicz A. Late blindness and deafness are associated with decreased tactile sensitivity, but early blindness is not. *Neuroscience*. 2023.
- Comparative Analysis of Tactile Sensitivity between Blind, Deaf and Unimpaired People / I. L. Barbacena et al. *2018 IEEE International Workshop on Medical Measurements and Applications (MeMeA)*, Ottawa, ON, Canada, 9–10 May 2018. 2018.
- Norman J. F., Bartholomew A. N. Blindness enhances tactile acuity and haptic 3-D shape discrimination. *Attention, Perception, & Psychophysics*. 2011. Vol. 73, no. 7. P. 2323–2331.

Рецензия / Peer review:

Надруковано / Printed:

Рецензент: д.т.н., проф., професор кафедры КИС ХНУ С. М. Лисенко

## ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Презентація до захисту кваліфікаційної роботи

Хмельницький національний університет  
Факультет інформаційних технологій · Кафедра КІС

# Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей із вадами зору

Виконавець: **Сорохан Владислав Олександрович**

Керівник: **Войчур Юрій Олексійович, д.ф.**

### АКТУАЛЬНІСТЬ

## Актуальність дослідження

**285 млн**

людей у світі мають порушення зору  
(ВООЗ)

**39 млн**

повністю незрячих осіб  
у всьому світі

**Актуальність:** наявні пристрої реалізують лише ОДНУ вузьку функцію (індикація рівня або навігація) і не забезпечують комплексного рішення для безпечного самостійного приготування напоїв.

Три групи проблем незрячих при приготуванні напоїв:

**⚠ БЕЗПЕКА:** опіки гарячою рідиною, відсутність зорового контролю наливання

**📏 ТОЧНІСТЬ:** неможливість відміряти дозу кави/цукру/молока без засобів

**🔴 ПЕРЦЕПЦІЯ:** відсутність дистанційної оцінки температури; неоднозначна орієнтація чашки

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ

## Мета, об'єкт і предмет дослідження

### МЕТА

Проектування кіберфізичної системи «Розумна чашка» для людей з вадами зору, яка забезпечує безпечний та автономний процес приготування і споживання напоїв за рахунок аудіо контролю без використання зорового каналу сприйняття.

### ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес автономного приготування та споживання гарячих напоїв за допомогою кіберфізичної системи «Розумна чашка» особами з порушеннями зору в умовах побутового середовища.

### ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Архітектура, функціональні підсистеми, алгоритми та математичні моделі кіберфізичної системи «Розумна чашка», спрямованої на підвищення автономності та безпеки користувача.

### Основні завдання:

1. дослідити нейрофізіологічні засади компенсації зорової недостатності та проаналізувати існуючі асистивні технології для людей із вадами зору;
2. розробити математичні моделі фізичних процесів та алгоритм функціонування системи;
3. спроектувати апаратну архітектуру та програмне забезпечення КФС;
4. верифікувати функціональність системи шляхом симуляційного моделювання.

3

## НАУКОВА НОВИЗНА

## Наукова новизна

### НАБУЛА ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

кіберфізична система «Розумна чашка» для людей із вадами зору, що відрізняється інтеграцією зворотного аудіо зв'язку з математичними моделями фізичних процесів у рамках єдиної трирівневої архітектури КФС, що дозволило забезпечити функціональну автономність користувача при приготуванні та споживанні гарячих напоїв без залучення зорового каналу сприйняття.

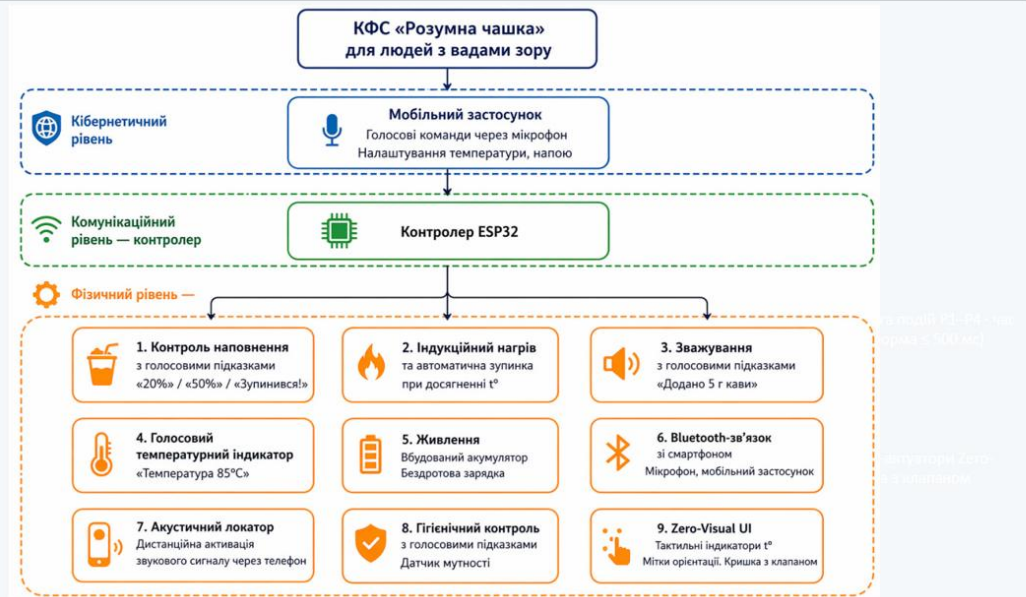
### УДОСКОНАЛЕНО

інтегральну модель функціонування кіберфізичної системи шляхом поєднання п'яти вимірювальних підсистем (рівень рідини, температура, маса, каламутність, акустична локація) з єдиним мікроконтролерним вузлом ESP32, що, на відміну від відомих однофункціональних пристроїв, дозволило реалізувати захист від термічних ризиків та забезпечити точність дозування на рівні побутових кухонних ваг.

4

## АРХІТЕКТУРА

## Архітектура КФС «Розумна чашка»



5

## ПІДСИСТЕМИ

## Функціональні підсистеми КФС

<b>1</b>	<b>Контроль наповнення</b> Голосові поріг 20/50/80% + «Зупиніться!» при $L \geq 0,90$	<b>2</b>	<b>Індукційний нагрів</b> Автовідключення при $T_{\text{target}}$ ; блок нагрів при порожній чашці	<b>3</b>	<b>Зважування nx711</b> 24-біт АЦП · медіана $N=5$ · точність $\pm 1 \text{ г}$ (0,6% для рідини)
<b>4</b>	<b>Температурний індикатор</b> DS18B20 $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ · озвучення при $T=30/60/85^{\circ}\text{C}$ та на запит	<b>5</b>	<b>Живлення Qi</b> Li-Ion + бездротова зарядка · Deep Sleep: $\geq 8$ год активно	<b>6</b>	<b>BLE-зв'язок</b> ESP32 BLE $\leftrightarrow$ смартфон · голосові команди + профілі напоїв
<b>7</b>	<b>Акустичний локатор</b> BLE-команда $\rightarrow$ зуммер 5 с · «біп-біп» · час відгуку 42 мс	<b>8</b>	<b>Гігієнічний контроль</b> Каламутність NTU · «Чашка чиста» / «Потрібне промивання»	<b>9</b>	<b>Zero-Visual UI</b> MEMS-штифти 0,3–1,2 мм · $S_0-S_3$ · вібрація 0/20/60/100 Гц

6

## Математичні моделі фізичних процесів

### Термальний моніторинг

$$T(t) = T_{env} + (T_0 - T_{env}) \cdot e^{-k \cdot t}$$

$$T[n + 1] = T_{env} + (T[n] - T_{env}) \cdot e^{-k \cdot \Delta t}$$

### Дозування маси (HX711)

$$\sigma^2 = \frac{1}{K_s} \cdot \sum_{i=0}^{K_s-1} (m[n-i] - m)^2 \leq \sigma_{th}^2$$

$$m[n] = \frac{C_{ADC}[n] - C_{zero}}{K_{cal}}$$

### Стан Zero-Visual UI

$$C_{tact}(T_{filt}) = \begin{cases} S_0, & T < 35 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_1, & 35 \leq T < 50 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_2, & 50 \leq T < 70 \text{ }^\circ\text{C} \\ S_3, & T \geq 70 \text{ }^\circ\text{C} \end{cases} \quad f_{vib}(S) = \begin{cases} 0 \text{ Гц}, & S = S_0 \\ 20 \text{ Гц}, & S = S_1 \\ 60 \text{ Гц}, & S = S_2 \\ 100 \text{ Гц}, & S = S_3 \end{cases}$$

### Рівень рідини + фільтр

$$L_{filt}[n] = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=0}^{N-1} L[n-i]$$

$$A_{wam} = 1 \leftrightarrow L_{filt}[n] \geq L_{wam} \wedge L_{filt}[n-1] < L_{wam}$$

### Оптичний контроль чистоти

$$\tau(t) = \frac{U_{turb,0} - U_{turb}(t)}{K_{turb}}$$

$$C_{clean}(\tau) = \text{"чиста"}, \tau \leq \tau_{clean}; \text{"потребує промивання"} \\ \tau > \tau_{clean}$$

### Акустичний зворотний зв'язок

$$A^*(t) = \arg \max_{i \in Events(t)} P_i$$

$$B(t) = 1 \leftrightarrow (T(t) = T_{target} \pm \epsilon) \vee (L(t) \geq L_{wam}) \vee (R_{BLE} = 1)$$

## Алгоритм пріоритетно-подієвої обробки



Пріоритетна черга подій КФС «Розумна чашка»:

Пріоритет	Подія	Голосове повідомлення
P1 (критичний)	$L \geq 0,90 / T > 70 \text{ }^\circ\text{C}$	«Зупиніться — чашка майже повна!» / «Рідина дуже гаряча!»
P2 (попередж.)	$L \geq 0,80 / T > 60 \text{ }^\circ\text{C}$	«Рівень 80% — наближається до краю» / «Зачекайте»
P3 (інформ.)	$L = 20/50\% / \Delta m / T_{target}$	«Рівень 50%» / «Додано X г» / «Напій готовий до вживання»
P4 (сервіс)	$R_{BLE}$ — акустична локація	Серія біп-сигналів зуммера · час відгуку 42 мс

## Zero-Visual UI — динамічна текстура корпусу

Стан рідини	T, °C	Текстура корпусу	Вібрація f_vib	Час переходу $\tau_{tact}$
Холодна S <sub>0</sub>	< 35	Гладка (висота 0 мм)	0 Гц	—
Тепла S <sub>1</sub>	35–50	Злегка шорстка (0,3 мм)	20 Гц	≤ 3 с
Гаряча S <sub>2</sub>	50–70	Виразні виступи (0,7 мм)	60 Гц	≤ 3 с
Небезпечна S <sub>3</sub>	> 70	Максимальні виступи (1,2 мм)	100 Гц	≤ 1 с

### Фізичне кодування

Параметри стану → тактильні властивості поверхні без електронних дисплеїв. MEMS pin array або біметалеві актуатори; поріг відчуття пальця ≈ 0,1 мм.

### Мультимодальне дублювання

Кожна критична подія → аудіальний + тактильний канал незалежно.

$$F_{output}(S) = \{F_{audio}(S), F_{tact}(T_{filt})\}$$

### Нульовий зоровий бар'єр

Жоден обов'язковий елемент керування не вимагає зорового контролю. WCAG 2.1 рівень AA · VoiceOver + TalkBack.

9

## Результати симуляції у Wokwi (MQTT)

### RMSE температури (DS18B20)

**0,42 °C**

норма ±0,5°C

97,8% правильна класиф. зон

### Точність визначення рівня рідини

**96,5 %**

false positive = 1,8%

затримка 320 мс (±45 мс)

### Похибка дозування

**2,3 %**

для рідин 0,6%

базовий рівень 15–40%

### F1-міра гігієнічного класифікатора

**0,942**

precision 0,951

recall 0,934

### Середній час реакції системи

**318 мс**

норма ≤ 500 мс

запас 36,4%

### Час переходу Zero-Visual UI S<sub>0</sub>–S<sub>2</sub>

**1,84 с**

σ = 0,31 с · норма ≤ 3 с

S<sub>3</sub>: 0,72 с (норма ≤ 1 с)



10

## Висновки по розділах

### Розділ 1

Виконано комплексний аналіз предметної області: досліджено нейрофізіологічні засади компенсаторної пластичності мозку при вадах зору, розглянуто концепцію кіберфізичних систем як класу асистивних технологій та проведено критичний огляд існуючих рішень у сфері асистивних пристроїв для незрячих.

### Розділ 2

Сформовано вимоги до КФС «Розумна чашка», запропоновано загальну концепцію математичного опису системи та побудовано математичні моделі термального моніторингу, контролю рівня рідини, точного дозування маси, оптичного контролю чистоти та формування акустичного зворотного зв'язку. Наведено інтегральну модель функціонування у формі системи рівнянь стану.

### Розділ 3

Спроектовано трирівневу КФС з 9 підсистемами; обґрунтовано вибір ESP32-WROOM-32 (BLE + I2S + Deep Sleep + GPIO); розроблено алгоритм 2 Гц · 4 фази · Light Sleep після 5 хв; сформульовано концепцію Zero-Visual UI (MEMS 0,3–1,2 мм · 4 рівні · вібрація 0–100 Гц · F\_output).

### Розділ 4

Верифіковано у Wokwi (324 000 записів, 10 сесій): RMSE T = 0,42°C · точність рівня 96,5% · похибка дозування 2,3% · F1-гігієна 0,942 · t\_resp = 318 мс · Zero-Visual UI: 87 переходів, 0 помилок,  $\tau = 1,84/0,72$  с. Спроектовано схемотехніку та React Native додаток (4 модулі).

# Дякую за увагу!

Зав. кафедри КІС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Владислав СОРОХАН

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 2 курсу, групи КІ2м-24-2

### ЗАЯВА

З правилами чинного Положення про систему забезпечення академічної доброчесності у Хмельницькому національному університеті, згідно з яким виявлення академічного плагіату є підставою для відмови в допуску кваліфікаційної роботи до захисту і застосування заходів академічної відповідальності, ознайомлений (а). Про використання спеціалізованих програмних засобів (СПЗ) StrikePlagiarism та Anti-Plagiarism для перевірки кваліфікаційних робіт здобувачів вищої освіти на наявність академічного плагіату оповіщений (а). Надаю університету право на передачу моєї роботи для обробки та збереження в базах даних СПЗ і використання роботи для виявлення академічного плагіату в інших роботах, які перевіряються СПЗ.

Також надаю свою згоду на обробку й збереження університетом моєї роботи в Інституційному репозитарії Хмельницького національного університету.

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

24 квітня 2026 року



## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

### КАФЕДРИ КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ПРО ДОПУСК КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ ДО ЗАХИСТУ

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система "Розумна чашка для людей із вадами зору"

Автор Владислав СОРОХАН

Освітня програма Інформаційні системи та технології

Рівень вищої освіти другий (магістерський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: ДФ Юрій ВОЙЧУР

На основі аналізу кваліфікаційної роботи на дотримання вимог академічної доброчесності (у т.ч. відсутності ознак академічного плагіату) з урахуванням результатів перевірки роботи спеціалізованим програмним засобом(ами) комісія зробила такий висновок:

№	Висновок	Позначка про відповідність
1	Ознаки академічного плагіату	
1.1	Запозичення, виявлені в роботі, є законними і не є академічним плагіатом (далі – зазначаються підстави віднесення запозичень до правомірних, якщо потрібно). Робота приймається до захисту.	відповідає
1.2	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, розміщені в розділах, які не описують безпосередньо авторське дослідження, але кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи (далі – зазначаються детальні та аргументовані підстави віднесення запозичень до правомірних). Робота приймається до захисту, але має бути відкоригована.	
1.3	Виявлені запозичення не є академічним плагіатом, але частково розміщені в розділах, які описують безпосередньо авторське дослідження, а кількість цитат перевищує обсяг, виправданий поставленою метою роботи. Робота може бути допущена до захисту після того як буде відкоригована та доопрацьована і успішно пройде повторну перевірку на академічний плагіат.	
1.4	Робота містить навмисні текстові спотворення, передбачувані спроби укриття текстових запозичень або інші прояви академічного плагіату. Робота містить фабрикацію або фальсифікацію даних. Робота не допускається до захисту.	
2	Інші види порушень академічної доброчесності	

#### Підтвердження:

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

- 1) усі запозичення фрагментарні, або мають належним чином оформленні посилання;
- 2) окремі виявлені збіги є загальноживаними фразами або виразами, про що свідчить посилання системи на збіг з джерелами на один фрагмент речення;
- 3) всі зафіксовані системою ознаки модифікації тексту відносяться до комбінування латинських символів зі україномовними скороченнями індексів в формулах, що не є модифікацією тексту.
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел

Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 7,67% і адресується до 24 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 4%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

25.04.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

  
Підпис

Олег САВЕНКО  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

  
Підпис

Юрій ВОЙЧУР  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

## Протокол аналізу звіту подібності експертом

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

**Автор:** Владислав СОРОХАН

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система "Розумна чашка" для людей з вадами зору

**Експерт:** Юрій ВОЙЧУР

**Підрозділ:** Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

**Коефіцієнт подібності 1:** 7.67%

**Коефіцієнт подібності 2:** 4.55%

**Мікропробіли:** 3

**Заміна букв:** 3

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 6

**Дата створення звіту:** 2026-04-25 08:32:35.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

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

Обґрунтування:

2026-04-25

Доцент Андрій Нічепорук

Дата

експерт

Sat Apr 25 09:21:52 EEST 2026, Медзятий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

## Anti-Plagiarism (<http://ap.km.ua>) v-15.701

**Максимальне співпадіння з одним документом 4.0%**

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. **Помилоч в документах: 13%**

ID: 270686 Назва: МКР Кіберфізична система “Розумна чашка” для людей з вадами зору Додано в БД: 2026-04-25 Автора: Владислав СОРОХАН Керівники: Юрій ВОЙЧУР Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	109576	855	5494 (5%)	54 (6%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Владислав СОРОХАН

Тема: Кіберфізична система «Розумна чашка» для людей із вадами зору

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки —

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі розглянуто задачу підвищення автономності людей із вадами зору шляхом розробки кіберфізичної системи «Розумна чашка». Проведено аналіз предметної області та існуючих асистивних технологій, сформовано вимоги до системи, розроблено математичні моделі функціонування підсистем, а також спроектовано архітектуру на базі мікроконтролера ESP32. Запропоновано алгоритми роботи системи та реалізовано симуляційне моделювання з експериментальною перевіркою ефективності.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню \_\_\_\_\_

Кваліфікаційна робота магістра відповідає виданому завданню

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі виконано аналіз предметної області, розглянуто нейрофізіологічні аспекти компенсації зорових порушень та проведено огляд сучасних асистивних технологій. У другому розділі сформовано вимоги до кіберфізичної системи та розроблено математичні моделі функціонування, що описують процеси контролю температури, рівня рідини, маси та інших параметрів. У третьому розділі спроектовано архітектуру системи «Розумна чашка», обґрунтовано вибір апаратної платформи ESP32 та розроблено алгоритми функціонування системи з урахуванням принципу нульової зорової залежності. У четвертому розділі проведено симуляцію роботи системи у середовищі Wokwi, виконано експериментальні дослідження, а також розроблено концепцію мобільного застосунку як складової кіберфізичної системи.

4. Позитивні сторони роботи: Робота характеризується комплексним підходом до вирішення задачі, поєднанням апаратних та програмних рішень, а також використанням сучасних підходів до проектування кіберфізичних систем. Важливою перевагою є орієнтація на потреби користувачів із вадами зору та реалізація мультимодального зворотного зв'язку.

5. Негативні сторони роботи: Незважаючи на значні переваги, запропонована система потребує подальшого дослідження в частині практичної реалізації апаратного прототипу та оцінки роботи в реальних умовах експлуатації. Також можливе ускладнення системи через велику кількість підсистем.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: —

7. Відгук про роботу в цілому: В загальному робота виконана на задовільному рівні.

8. Інші зауваження: —

9. Оцінка кваліфікаційної роботи магістра:

Розглянувши позитивні та негативні сторони представленої кваліфікаційної роботи магістра вважаю, що робота заслуговує оцінки «задовільно» 70.00 (D)

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

Бедрашова Леаніа Петрівна  
зед кед МДХНУ

“ 30 квітня ” 2026р.

