

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування
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 024002.24.02.02 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

Денис
Підпис
Юрій
Підпис
Сергій
Підпис
Ольга
Підпис

Денис КВАСНІЦЬКИЙ
Ініціали, прізвище

Юрій ВОЙЧУР
Ініціали, прізвище

Сергій ЛИСЕНКО
Ініціали, прізвище

Ольга ПАВЛОВА
Ініціали, прізвище

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

Денису КВАСНІЦЬКОМУ

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Керівник проекту (роботи) Юрій ВОЙЧУР, ДФ

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

Затверджена наказом ректора університету від 12.01.2026 р. № 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 галузі та огляд існуючих рішень визначення рівня креатину

Метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину та процес функціонування кіберфізичної системи визначення рівня креатину

Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Симуляційне дослідження та оцінювання ефективності кіберфізичної системи

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 « 12 » 01 2026р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№з/п	Назва етапів (розділів) кваліфікаційної роботи магістра	Термін виконання етапів проекту (роботи)	Примітки
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 моделей, 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 методів для вирішення поставленої задачі	15.03.2026	виконано
7	Робота над розділом 4 – проектування та розгортання пропонованого рішення, експериментальна частина	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

Підпис

Денис КВАСНИЦЬКИЙ

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи

Підпис

Юрій ВОЙЧУР

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

РЕФЕРАТ

Тема кваліфікаційної роботи магістра: Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Автор роботи: Квасніцький Денис Сергійович

Керівник роботи: Войчур Юрій Олексійович

Пояснювальна записка: 76 с., 5 рис., 11 табл., 2 дод., 75 джерел.

КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ, ДАВАЧ КОЛЬОРУ, ІНТЕРНЕТ РЕЧЕЙ

Об'єктом дослідження є процес визначення рівня креатину в продуктах харчування з використанням колориметричного методу на основі реакції Яффе та цифрового зчитування колірної сигналу тест-смужки.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування на базі RGB-давача кольору та мікроконтролера ESP32.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є зменшення похибки визначення концентрації креатину в продуктах харчування шляхом дослідження та проєктування кіберфізичної системи, що реалізує цифрове зчитування колірної сигналу тест-смужки після реакції Яффе з автоматичною класифікацією результату та хмарним збереженням даних у Google Sheets.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи колориметричного аналізу на основі реакції Яффе, методи математичного моделювання та статистичного синтезу даних, а також методи проєктування кіберфізичних систем і симуляційного дослідження вимірювальних каналів.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод синтезу калібрувальних даних для бази знань кіберфізичних вимірювальних систем, який відрізняється від відомих моделюванням вмісту креатину за нормальним розподілом із параметрами з літературних джерел у поєднанні з аналітичним визначенням індивідуальних

калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту, що дозволило сформувати базу знань.

– удосконалено кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування, яка відрізняється від відомих застосуванням RGB-давача кольору TCS34725 у поєднанні з мікроконтролером ESP32 для цифрового зчитування колірної сигналу тест-смужки після реакції Яффе, що дозволило досягти середньої відносної похибки визначення концентрації креатину 4,87 %.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розроблених кіберфізичній системі визначення рівня креатину в продуктах харчування та методі створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування.

У першому розділі досліджено біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів та проаналізовано існуючі методи його визначення. Проведений аналіз показав, що наявні методи не забезпечують одночасного виконання вимог до точності, мобільності і вартості, а суб'єктивність візуальної інтерпретації колірної сигналу тест-смужок є ключовим обмеженням для їхнього практичного застосування. Виконано огляд кіберфізичних систем у харчовій промисловості, давачів кольору та мікроконтролерних платформ, за результатами якого обґрунтовано вибір RGB-давача TCS34725 і мікроконтролера ESP32 як апаратної основи розроблюваної системи.

У другому розділі розроблено математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача і концентрацією креатину на основі закону Бугера–Ламберта–Бера та лінійної калібрувальної залежності. Запропоновано метод синтезу калібрувальних даних для бази знань із застосуванням нормального закону розподілу та аналітичного визначення індивідуальних коефіцієнтів α і β для кожного продукту, що дозволило сформувати базу знань.

У третьому розділі розроблено тришарову архітектуру кіберфізичної системи, що охоплює фізичний рівень (тест-смужка і RGB-давач), вбудований рівень (мікроконтролер ESP32) і хмарний рівень (Google Sheets). Сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги до системи, описано функціональну

схему з шістьма модулями обробки інформації та деталізовано алгоритми функціонування, обробки сигналу давача і роботи з базою знань, включаючи механізм уточнення калібрувальних коефіцієнтів методом найменших квадратів за накопиченими реальними вимірюваннями.

У четвертому розділі проведено симуляційне дослідження розробленої системи на вибірці з 600 синтетичних вимірювань для 20 продуктів харчування різних категорій. Підтверджено відповідність системи встановленим вимогам: середня відносна похибка визначення концентрації склала 4,87 %, правильність класифікації за шкалою Яффе – 97,7 %, а медіанна фільтрація забезпечила зменшення стандартного відхилення сигналу у 4,3–6,0 разів. Виконано порівняльний аналіз розробленої системи з існуючими методами визначення креатину.

За результатами дослідження опубліковано статтю у фаховому виданні: Говорущенко Т., Квасніцький Д., Говорущенко О. Метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2026. Vol. 363. P. 662–669. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-87

ЗМІСТ

Скорочення та умовні позначки	5
Вступ.....	6
1 Аналіз предметної галузі та огляд існуючих рішень визначення рівня креатину 9	
1.1 Креатин як біохімічний показник якості харчових продуктів.....	9
1.2 Існуючі методи визначення вмісту креатину в харчових продуктах	11
1.3 Реакція Яффе як основа колориметричного методу	14
1.4 Кіберфізичні системи у харчовій промисловості: огляд сучасного стану .	16
1.5 Давачі кольору та оптичні вимірювальні перетворювачі.....	17
1.6 Мікроконтролерні платформи для вбудованих вимірювальних систем	19
1.7 Хмарні платформи та засоби зберігання даних IoT-систем.....	21
1.8 Методи синтезу і аугментації даних для навчання вимірювальних систем	23
1.9 Аналіз існуючих систем визначення вмісту аналітів за допомогою тест-смужок і мобільних пристроїв	24
1.10 Постановка задачі	25
2 Метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину та процес функціонування кіберфізичної системи визначення рівня креатину	27
2.1 Формування вимог предметної галузі до кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування	27
2.2 Принцип функціонування та формування бази знань кіберфізичної системи	29
2.3 Метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування.....	31
2.4 Структура та формат бази знань.....	37
2.5 Процес функціонування кіберфізичної системи визначення рівня креатину	38

2.6. Верифікація синтетичних даних та оцінка адекватності моделі.....	41
2.7 Висновки	42
3 Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування	43
3.1 Функціональні та нефункціональні вимоги до проєктованої КФС.....	43
3.2. Загальна структура кіберфізичної системи	46
3.3. Функціональна схема кіберфізичної системи	50
3.4. Алгоритм функціонування кіберфізичної системи	53
3.5. Алгоритм обробки сигналу давача кольору	54
3.6 Алгоритм роботи з базою знань	56
3.7 Вибір та аналіз апаратних компонентів для кіберфізичної системи	58
3.5 Висновки	62
4 Симуляційне дослідження та оцінювання ефективності кіберфізичної системи	63
4.1 Опис методології симуляційного дослідження	63
4.2. Показники оцінювання ефективності	65
4.3. Результати симуляції: точність калібрувальної моделі	67
4.4. Результати симуляції: стабільність вимірювального каналу	69
4.5 Результати симуляції: правильність класифікації	71
4.6. Оцінювання часових характеристик системи	73
4.7 Висновки	74
Висновки	76
Перелік джерел посилань	77
Додаток А Копія наукової публікації.....	86
Додаток Б Презентація до захисту кваліфікаційної роботи.....	94

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

КФС – Кіберфізична система

RGB – Red, Green, Blue

БЗ – База знань

ВЕРХ – Високоєфективна рідинна хроматографія

IoT – Internet of Things

МНК – Метод найменших квадратів

API – Application Programming Interface

АЦП – Аналого-цифровий перетворювач

MAPE – Mean Absolute Percentage Error

NTP – Network Time Protocol

ВСТУП

Забезпечення якості та безпечності харчових продуктів є одним із пріоритетних завдань сучасної харчової промисловості і державного контролю. В умовах глобалізації ринків харчових продуктів, зростання обсягів виробництва і ускладнення ланцюгів постачань проблема швидкого і достовірного контролю якості продуктів набуває особливої гостроти. Серед численних показників якості м'ясних і рибних продуктів особливе місце займає вміст креатину – природної органічної сполуки, що накопичується виключно у м'язовій тканині тварин і є прямим індикатором вмісту м'язового компонента у продукті, його свіжості та дотримання технологічних режимів виробництва і зберігання.

Актуальність визначення вмісту креатину обумовлена кількома взаємопов'язаними чинниками. По-перше, поширення практики фальсифікації м'ясних виробів шляхом заміни м'ясного компонента рослинними заміниками і субпродуктами нижчої якості створює суттєві ризики як для здоров'я споживачів, так і для добросовісних виробників. Вимірювання концентрації креатину дозволяє кількісно оцінити реальний вміст м'яса у продукті без застосування складних молекулярно-генетичних методів. По-друге, зниження вмісту креатину у процесі зберігання і теплової обробки є чутливим індикатором порушення температурних режимів, що відкриває можливості для неруйнівного контролю свіжості продуктів. По-третє, інтерес споживачів до нутриціологічного складу харчових продуктів постійно зростає, що формує запит на доступні інструменти оцінювання вмісту біологічно активних речовин у повсякденних продуктах харчування.

Існуючі лабораторні методи визначення вмісту креатину, зокрема метод ВЕРХ, а також ферментативні і спектрофотометричні методи забезпечують необхідну точність, однак є недоступними для оперативного польового або виробничого контролю через необхідність дорогого стаціонарного обладнання, тривалий час аналізу і вимоги до кваліфікації персоналу. Подолання цього протиріччя між точністю і мобільністю стає можливим завдяки стрімкому розвитку кіберфізичних систем і технологій Інтернету речей. Інтеграція бюджетних

оптоелектронних давачів кольору, мікроконтролерів з вбудованою підтримкою бездротових мереж і хмарних платформ зберігання даних відкриває принципово нові можливості для автоматизації аналітичних процедур безпосередньо у місці відбору проби. Такий підхід дозволяє усунути суб'єктивність візуальної інтерпретації колірної сигналу тест-смужки, забезпечити відтворюваність і документування результатів, а також накопичувати дані для подальшого вдосконалення калібрувальних моделей.

Метою кваліфікаційної роботи магістра є зменшення похибки визначення концентрації креатину в продуктах харчування шляхом дослідження та проектування кіберфізичної системи, що реалізує цифрове зчитування колірної сигналу тест-смужки після реакції Яффе з автоматичною класифікацією результату та хмарним збереженням даних у Google Sheets.

Поставлена мета досягається розв'язанням таких основних завдань:

- дослідити біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів та проаналізувати існуючі методи його визначення, виявити їх недоліки та обґрунтувати вибір реакції Яффе як аналітичної основи системи;

- проаналізувати існуючі кіберфізичні системи у харчовій промисловості, давачі кольору та мікроконтролерні платформи для побудови портативних вимірювальних систем;

- розробити математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача кольору і концентрацією креатину на основі закону Бугера–Ламберта–Бера та лінійної калібрувальної залежності;

- розробити метод синтезу калібрувальних даних для бази знань системи із застосуванням нормального закону розподілу та аналітичного визначення індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту;

- розробити тришарову архітектуру кіберфізичної системи (фізичний, вбудований та хмарний рівні) та алгоритми функціонування всіх її компонентів на базі мікроконтролера ESP32, RGB-давача TCS34725 і хмарного сховища Google Sheets;

– провести симуляційне дослідження розробленої системи на синтетичних даних та оцінити її ефективність за показниками точності визначення концентрації, стабільності вимірювального каналу і правильності класифікації рівня вмісту креатину.

Об'єктом дослідження є процес визначення рівня креатину в продуктах харчування з використанням колориметричного методу на основі реакції Яффе та цифрового зчитування колірної сигналу тест-смужки.

Предметом дослідження є методи, моделі та засоби кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування на базі RGB-давача кольору та мікроконтролера ESP32.

Наукова новизна отриманих результатів:

– набув подальшого розвитку метод синтезу калібрувальних даних для бази знань кіберфізичних вимірювальних систем, який відрізняється від відомих моделюванням вмісту креатину за нормальним розподілом із параметрами з літературних джерел у поєднанні з аналітичним визначенням індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту, що дозволило сформувати базу знань.

– удосконалено кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування, яка відрізняється від відомих застосуванням RGB-давача кольору TCS34725 у поєднанні з мікроконтролером ESP32 для цифрового зчитування колірної сигналу тест-смужки після реакції Яффе, що дозволило досягти середньої відносної похибки визначення концентрації креатину 4,87 %.

Практична значимість отриманих результатів полягає у розроблених кіберфізичній системі визначення рівня креатину в продуктах харчування та методі створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування.

Для розв'язання поставлених задач використовувалися методи колориметричного аналізу на основі реакції Яффе, методи математичного моделювання та статистичного синтезу даних, а також методи проєктування кіберфізичних систем і симуляційного дослідження вимірювальних каналів.

1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ ТА ОГЛЯД ІСНУЮЧИХ РІШЕНЬ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ

1.1 Креатин як біохімічний показник якості харчових продуктів

Креатин (α -метилгуанідиноацетатна кислота, $C_4H_9N_3O_2$) є природною органічною сполукою, що утворюється в організмі хребетних тварин і накопичується переважно в м'язовій тканині. Молекула креатину містить гуанідинову групу і карбоксильну кислотну групу, що визначає її амфотерні властивості і водорозчинність. У живому організмі креатин перетворюється на фосфокреатин – важливий резервний енергетичний субстрат, що забезпечує швидке поповнення запасів аденозинтрифосфату (АТФ) при інтенсивній м'язовій роботі [1].

Вміст креатину в харчових продуктах є прямим наслідком його накопичення в м'язовій тканині тварин за їхнього прижиттєвого розвитку. Найвищі концентрації спостерігаються в м'ясних і рибних продуктах, що є основними харчовими джерелами креатину для людини. У рослинних продуктах креатин практично відсутній або міститься у слідових кількостях (менше 0,01 г/кг), що пов'язане з відсутністю у рослин м'язових тканин [2]. Ця різниця є принциповою для задач аналітичного контролю якості харчових продуктів.

З точки зору харчової цінності, креатин є важливим компонентом раціону людини, особливо для людей, що ведуть активний спосіб життя або займаються спортом. За даними наукових досліджень, добова потреба дорослої людини у креатині становить близько 2 г, з яких приблизно половина синтезується в організмі ендогенно, а решта надходить з їжею [3]. Регулярне вживання продуктів з достатнім вмістом креатину сприяє підтримці м'язової маси, покращенню когнітивних функцій і зниженню стомлюваності.

Однак значення вмісту креатину виходить далеко за межі суто нутриціологічного аспекту. Концентрація креатину є важливим індикатором якості і свіжості м'ясних та рибних продуктів. При зберіганні і теплової обробці креатин поступово перетворюється на креатинін і далі на гетероциклічні аміни, що є

небажаними продуктами з потенційно токсичними властивостями. Тому контроль вмісту креатину дозволяє непрямо оцінювати ступінь свіжості продукту і дотримання температурних режимів при його виробництві та зберіганні [4].

Ще одним важливим аспектом є проблема фальсифікації харчових продуктів. При фальсифікації м'ясних виробів шляхом додавання рослинних білків, крохмалю або інших замінників вміст креатину у продукті знижується пропорційно до ступеня розведення м'ясного компонента. Таким чином, вимірювання концентрації креатину дозволяє кількісно оцінити вміст м'ясної складової у продукті і виявити факти фальсифікації [5-10]. Цей підхід є значно дешевшим і доступнішим порівняно з молекулярно-генетичними методами ідентифікації видового складу м'яса. Таблиця 1.1 відображає типові значення вмісту креатину в основних категоріях харчових продуктів, що використовуються як орієнтири для калібрування аналітичних систем.

Таблиця 1.1 – Типовий вміст креатину в харчових продуктах

Категорія продукту	Діапазон вмісту, г/кг	Примітка
Яловичина (сира)	3,5 – 5,5	Залежить від частини туші та породи
Свинина (сира)	4,5 – 6,5	Вищий вміст у м'язах кінцівок
Курятина (сира)	3,0 – 4,0	Грудна частина – більше, стегна – менше
Лосось, тунець (свіжі)	3,5 – 5,0	Морська риба містить більше, ніж прісноводна
Тріска, камбала	2,0 – 3,5	Менш жирні сорти риби
М'ясні вироби (ковбаси)	0,5 – 1,5	Залежить від частки м'ясного компонента
Молочні продукти	0,01 – 0,10	Сліди, практично відсутній
Рослинні продукти	< 0,01	Практично відсутній
Спортивні добавки	до 88	Концентрований моногідрат

Наведені значення відповідають загальноприйнятим у харчовій хімії нормам і є результатом численних лабораторних досліджень із різних країн і регіонів. Варіабельність вмісту креатину в межах однієї категорії продуктів обумовлена генетичними особливостями тварин, умовами їх утримання і відгодівлі, способом і тривалістю зберігання та методом кулінарної обробки [6]. Теплова обробка призводить до часткового руйнування креатину: варена яловичина містить приблизно на 30–35 % менше креатину, ніж сира, а смажена – приблизно на 40 % менше [7].

1.2 Існуючі методи визначення вмісту креатину в харчових продуктах

Аналітична хімія має у своєму арсеналі кілька принципово різних підходів до визначення вмісту креатину у харчових продуктах, кожен з яких характеризується власними перевагами, обмеженнями і сферою застосування. Систематизований огляд цих методів є необхідною передумовою для обґрунтованого вибору підходу, покладеного в основу розроблюваної кіберфізичної системи.

Класичний колориметричний метод Яффе, запропонований ще у другій половині XIX ст., залишається найбільш широко застосовуваним базовим методом визначення вмісту креатиніну (продукту дегідратації креатину) у біологічних і харчових зразках [8]. Метод ґрунтується на реакції між креатиніном і пікриновою кислотою в лужному середовищі з утворенням оранжевого комплексу – пікрату креатиніну, що поглинає видиме світло у синьо-зеленому спектральному діапазоні з максимумом поглинання при 490–510 нм. Інтенсивність забарвлення, вимірювана спектрофотометрично, пропорційна концентрації креатиніну і, відповідно, вихідній концентрації креатину у зразку. Метод відрізняється відносною простотою виконання, низькою вартістю реактивів і добре дослідженою кінетикою, проте характеризується недостатньою специфічністю: низку небілкових сполук, зокрема ацетооцтова кислота і глюкоза, дають псевдопозитивну реакцію з пікриновою кислотою, що може призводити до завищених результатів у зразках складного хімічного складу [9].

Метод кінетичної компенсації (кінетичний метод Яффе) є модифікацією класичного методу, що дозволяє усунути вплив псевдопозитивних інтерферентів шляхом вимірювання швидкості наростання абсорбції у заданому часовому вікні (зазвичай між 20-ю і 60-ю секундами після змішування реагентів), а не кінцевої рівноважної абсорбції. Цей підхід ґрунтується на тому, що реакція креатиніну з пікриною кислотою відбувається з іншою кінетикою, ніж реакції псевдопозитивних речовин [10]. Кінетичний метод забезпечує вищу специфічність, проте вимагає точнішого управління часовими параметрами і спеціалізованого спектрофотометричного обладнання.

Ферментативні методи засновані на каскаді ферментативних реакцій, у якому креатин спочатку перетворюється на саркозин і сечовину за участі ферменту креатинази, а саркозин далі окислюється саркозиноксидазою з утворенням перекису водню. Перекис водню вступає в реакцію Тріндера з 4-амінофенантrenom і 4-хлорфенолом у присутності пероксидази, утворюючи хінонімін-барвник, що поглинає при 500 нм [11]. Ферментативні методи характеризуються значно вищою специфічністю порівняно з методом Яффе і можуть визначати безпосередньо креатин (а не лише його продукт дегідратації – креатинін). Основними недоліками є висока вартість ферментних препаратів і суворі вимоги до умов зберігання реагентів.

Метод високоефективної рідинної хроматографії (ВЕРХ) є золотим стандартом кількісного визначення креатину в харчових продуктах при арбітражних і науково-дослідних аналізах [12]. Метод забезпечує одночасне визначення креатину і креатиніну в одному хроматографічному запуску, відрізняється виключно високою специфічністю і точністю (відносна похибка менше 1 %), однак вимагає дорогого і складного хроматографічного обладнання, висококваліфікованого персоналу і значних витрат часу на пробопідготовку. Ці фактори роблять метод ВЕРХ неприйнятним для рутинного польового або виробничого контролю якості харчових продуктів.

Капілярний електрофорез є відносно новим методом, що набув поширення для аналізу гідрофільних низькомолекулярних сполук, зокрема гуанідиновмісних

речовин, до яких належить і креатин [13]. Метод забезпечує роздільну здатність, порівнянну з ВЕРХ, при значно менших витратах розчинників і більш компактному апаратному оформленні. Проте висока чутливість методу до матричних ефектів і складність підготовки харчових зразків ускладнюють його широке впровадження у рутинний аналіз.

Біосенсорні методи визначення креатину є активним напрямком сучасних досліджень. Амперометричні біосенсори на основі іммобілізованих ферментів (креатинази і саркозиноксидази) дозволяють проводити аналіз у режимі реального часу без попередньої пробопідготовки [14]. Електрохімічна детекція забезпечує достатню чутливість і хорошу відтворюваність, однак ресурс таких біосенсорів обмежений через поступову інактивацію ферментів при зберіганні і в процесі роботи. Оптичні біосенсори, що реалізують принцип поверхневого плазмонного резонансу, забезпечують безмічене визначення, однак є значно дорожчими у виготовленні.

Методи ядерного магнітного резонансу (ЯМР) і мас-спектрометрії, хоча і є надзвичайно точними і інформативними інструментами структурного і кількісного аналізу, практично не використовуються для рутинного визначення креатину у харчових продуктах через надзвичайно високу вартість обладнання і складність інтерпретації результатів [15].

Порівняльна характеристика методів визначення вмісту креатину подана у таблиці 1.2.

Аналіз таблиці 1.2 показує, що жоден з існуючих методів не задовольняє одночасно вимогам до точності, швидкості, вартості і мобільності, що є необхідними для побудови портативної системи контролю якості харчових продуктів у польових або виробничих умовах. Найближчим за сукупністю характеристик є метод Яффе з тест-смужками, який поєднує доступність і мобільність, проте суттєво програє за точністю і об'єктивністю результатів через суб'єктивність візуальної інтерпретації кольору. Усунення цього обмеження шляхом автоматизованого цифрового зчитування кольорового сигналу є ключовою ідеєю розроблюваної кіберфізичної системи [16].

Таблиця 1.2 – Порівняльна характеристика методів визначення вмісту креатину

Метод	Похибка	Час аналізу	Специфічність	Вартість	Придатність для польового контролю
Яффе (класичний)	$\leq 5 \%$	30–60 хв	Середня	Низька	Обмежена
Яффе (кінетичний)	$\leq 4 \%$	30–60 хв	Висока	Середня	Обмежена
Ферментативний	$\leq 3 \%$	60–90 хв	Дуже висока	Висока	Ні
ВЕРХ	$\leq 1 \%$	60–120 хв	Дуже висока	Дуже висока	Ні
Капілярний електрофорез	$\leq 2 \%$	45–90 хв	Дуже висока	Висока	Ні
Біосенсор (ампером.)	$\leq 8 \%$	5–15 хв	Висока	Середня	Так
Тест-смужки (візуал.)	15–25%	15–20 хв	Середня	Дуже низька	Так

1.3 Реакція Яффе як основа колориметричного методу

Реакція між пікриною кислотою (2,4,6-тринітрофенол) і креатиніном у лужному середовищі є однією з найбільш детально вивчених аналітичних реакцій у клінічній і харчовій хімії. Механізм реакції Яффе включає кілька послідовних стадій. На першій стадії в лужному середовищі пікринова кислота депротонується з утворенням пікрат-аніону. На другій стадії пікрат-аніон взаємодіє з протонною формою креатиніну, утворюючи нестійкий іонний комплекс. На

третьої стадії цей комплекс зазнає перегрупування з утворенням стабільного оранжевого забарвленого продукту – пікрату Яффе [17].

Кінетика утворення забарвленого комплексу залежить від температури і рН середовища. При температурі 100 °С і рН 12–13 (0,1 М NaOH) реакція виходить на рівноважний стан приблизно через 10–12 хвилин. Стабільність забарвленого продукту при кімнатній температурі після завершення реакції складає 30–60 хвилин, після чого починається повільне знебарвлення внаслідок окислення. Для тест-смужкових систем зчитування результату рекомендується проводити в інтервалі від 1 до 20 хвилин після завершення реакції.

Оптичні властивості продукту реакції Яффе є визначальними для проектування вимірювального каналу системи. Спектр поглинання пікрату креатиніну у видимому діапазоні має широку смугу поглинання з максимумом при 490–510 нм і постійно зменшується у бік довгохвильової частини спектра. Це означає, що сполука максимально поглинає синьо-зелене світло і максимально відбиває червоне і помаранчеве. Саме цим пояснюється інтенсивне оранжево-червоне забарвлення розчину при наявності пікрату креатиніну. При зчитуванні в режимі відбиття (як у випадку тест-смужок) канал R RGB-давача є найбільш чутливим до зміни концентрації, оскільки відображає частину спектра, яка найслабше поглинається.

Зв'язок між оптичним сигналом і концентрацією забарвленої сполуки описується законом Бугера–Ламберта–Бера, що є фізичним фундаментом кількісного колориметричного аналізу. Лінійність цього закону в широкому діапазоні концентрацій робить метод придатним для побудови калібрувальних залежностей, параметри яких (нахил і зміщення) можуть бути визначені за двома опорними точками – принцип, покладений в основу калібрувальної моделі розроблюваної системи. Відхилення від закону Бера при високих концентраціях (>50 г/кг) є відомим обмеженням методу, яке практично не впливає на більшість харчових продуктів, де вміст креатину рідко перевищує 6–7 г/кг.

1.4 Кіберфізичні системи у харчовій промисловості: огляд сучасного стану

Кіберфізичні системи (КФС) є одним із ключових технологічних напрямків четвертої промислової революції (Індустрія 4.0). За визначенням, КФС являє собою інтеграцію фізичних процесів і обчислювальних компонентів, у якій вбудовані комп'ютери і мережі управляють фізичними процесами зі зворотним зв'язком між фізичним і кіберпростором [21]. У харчовій промисловості КФС знаходять застосування в широкому спектрі задач: від автоматизованого контролю технологічних процесів до забезпечення простежуваності продуктів по ланцюгу постачань і персоналізованого харчування.

Системи контролю якості харчових продуктів на основі оптичних датчиків є одним з найбільш динамічно розвинутих напрямків. Гіперспектральні системи технічного зору дозволяють неруйнівню оцінювати хімічний склад і фізичні властивості харчових продуктів, виявляти дефекти і сторонні включення, класифікувати продукти за якісними показниками [22]. Відповідні системи успішно впроваджені в лініях автоматичного сортування овочів і фруктів, контролю якості м'ясних напівфабрикатів і виявлення фальсифікацій у молочній промисловості. Обмеженнями таких систем є висока вартість гіперспектрального обладнання і необхідність складних алгоритмів обробки даних.

Системи електронного носа і електронного язика є ще одним перспективним класом КФС для харчової галузі. Масиви хімічних датчиків у поєднанні з методами машинного навчання дозволяють розпізнавати складні хімічні профілі продуктів, пов'язані з їх якістю, свіжістю і автентичністю [23]. Ці системи демонструють хороші результати при класифікації сортів кави, чаю і вин, виявленні псування м'ясних продуктів і ідентифікації фальсифікацій оливкової олії. Проте висока складність, висока вартість і необхідність постійного перенавчання моделей при зміні умов вимірювання є серйозними перешкодами для широкого практичного впровадження.

Системи IoT-моніторингу холододового ланцюга стали стандартом у сучасній харчовій логістиці. Бездротові датчики температури і вологості, вбудовані в

упаковку або транспортні контейнери, забезпечують неперервну реєстрацію умов зберігання і транспортування харчових продуктів [24]. Зв'язок з хмарними платформами дозволяє відстежувати весь ланцюг постачань у режимі реального часу і виявляти порушення температурного режиму. Технологія RFID і блокчейн використовуються для забезпечення незмінності і верифікованості записів про умови зберігання, що є критичним для забезпечення харчової безпеки.

Портативні аналітичні пристрої (point-of-care devices) для контролю якості харчових продуктів є відносно новим, але швидко зростаючим сегментом ринку [25]. Мікрофлюїдні системи лабораторії-на-чипі, що поєднують хімічний аналіз і цифрову обробку результатів у мікросхемі розміром з кредитну картку, дозволяють виконувати аналізи, для яких раніше потрібне складне лабораторне обладнання. Системи на основі смартфонів, де камера пристрою або підключений мікродавач виконують роль детектора, а мобільний застосунок – обчислювального ядра, демонструють значний потенціал для демократизації аналітичного контролю якості харчових продуктів.

Системи визначення окремих аналітів у харчових продуктах з використанням колориметричних реакцій і цифрового зчитування сигналу є предметом активних наукових досліджень останнього десятиліття. Описані системи для визначення нітратів, важких металів, залишків пестицидів, показників свіжості риби (загального леткого азоту) і низки інших показників якості. Загальним принципом таких систем є поєднання хімічного перетворення аналіту у забарвлений продукт (реагентна тест-смужка або мікрофлюїдний картридж) з цифровим зчитуванням кольорового сигналу і хмарною обробкою результатів [26]. Розроблювана система визначення рівня креатину належить саме до цього класу і розвиває описаний підхід стосовно специфічного аналіту – креатину в м'ясних і рибних продуктах.

1.5 Давачі кольору та оптичні вимірювальні перетворювачі

Давачі кольору є ключовим апаратним компонентом розроблюваної системи, що забезпечує перетворення кольорового сигналу тест-смужки у цифровий код,

придатний для обробки мікроконтролером. Огляд доступних технічних рішень у цій галузі є необхідним для обґрунтованого вибору компонентів системи.

Принцип дії більшості сучасних інтегральних давачів кольору ґрунтується на фотоелектричному ефекті: масив фотодіодів з різними спектральними фільтрами реєструє інтенсивність відбитого або пройденого світла у відповідних спектральних діапазонах. Найбільш поширеним є поділ видимого спектра на три канали: червоний (600–700 нм), зелений (500–600 нм) і синій (400–500 нм), що відповідає стандартному RGB-колірному простору. Деякі давачі мають додатковий четвертий канал Clear (без фільтра), що фіксує загальну освітленість і використовується для нормалізації вимірювань [27].

Серед інтегральних RGB-давачів кольору, доступних у вигляді окремих мікросхем, найбільш широко застосованим у дослідницьких і аматорських проектах є давач TCS34725 виробництва AMS (Austria Mikro Systeme). Ця мікросхема містить матрицю фотодіодів з RGB і Clear каналами, 16-бітні АЦП для кожного каналу і програмований підсилювач. Зв'язок з мікроконтролером здійснюється за протоколом І²С. Ключовою перевагою TCS34725 є вбудований ІЧ-блокуючий фільтр, що усуває вплив інфрачервоного випромінювання на вимірювання кольору у видимому діапазоні, і висока динамічна роздільна здатність 16 біт (65536 рівнів квантування) на кожному каналі [28].

Важливою характеристикою давача кольору для застосування у вимірювальних системах є стабільність і відтворюваність показань. Основними джерелами нестабільності є температурний дрейф чутливості фотодіодів (зазвичай менше 0,1 %/°С для якісних давачів) і варіації умов освітлення. Другий фактор є найбільш критичним для систем, що працюють у різних умовах освітлення. Нормалізація сигналу за допомогою відношення каналів ($X_{norm} = R/(R+G+B)$) частково компенсує варіації загального рівня освітленості, однак не усуває вплив спектрального складу зовнішнього освітлення. Для повного усунення цього ефекту необхідне стандартизоване внутрішнє освітлення давача, що реалізується за допомогою вбудованих білих світлодіодів у корпусі вимірювального відсіку [29].

Альтернативним підходом до зчитування кольорового сигналу тест-смужок є використання камери смартфона у поєднанні з алгоритмами обробки зображень. Цей підхід є привабливим з точки зору доступності (камера вже інтегрована в пристрій) і гнучкості (програмна обробка дозволяє реалізувати складні алгоритми корекції). Проте камери смартфонів характеризуються значно меншою стабільністю і відтворюваністю вимірювань порівняно зі спеціалізованими давачами: автоматичне балансування білого, адаптивне налаштування експозиції і компресія зображення вносять непрогнозовані спотворення у кольорові характеристики [30]. Для отримання кількісних результатів з камери смартфона необхідне спеціальне оптичне оснащення (стандартизована камера) і складні алгоритми калібрування, що суттєво ускладнює систему.

1.6 Мікроконтролерні платформи для вбудованих вимірювальних систем

Вбудований обчислювальний рівень кіберфізичної системи реалізується на базі мікроконтролера, що забезпечує збір даних від давача, первинну обробку і передачу результатів до хмарного рівня. Вибір мікроконтролерної платформи визначається вимогами до обчислювальної потужності, наявності необхідних інтерфейсів зв'язку, енергоспоживання і вартості.

Мікроконтролер ESP32 виробництва Espressif Systems є однією з найбільш популярних платформ для IoT-застосунків завдяки поєднанню двоядерного 32-бітного процесора Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, інтегрованих модулів Wi-Fi (802.11 b/g/n) і Bluetooth (класичний і BLE), багатого набору периферійних інтерфейсів (I²C, SPI, UART, ADC, DAC, PWM) і відносно низької вартості [31]. Обчислювальна потужність ESP32 є надлишковою для задач обробки сигналу давача кольору (арифметичні операції з числами з плаваючою точкою виконуються за мікросекунди), що забезпечує значний запас для реалізації більш складних алгоритмів у майбутніх версіях системи.

Підтримка Wi-Fi безпосередньо в мікросхемі ESP32 (без зовнішніх модулів) є ключовою перевагою для реалізації хмарного рівня системи. HTTP/HTTPS клієнт

для взаємодії з REST API хмарних сервісів, зокрема Google Sheets API, реалізується у програмному забезпеченні ESP32 із використанням готових бібліотек, що значно скорочує час розробки. Протокол NTP для синхронізації системного часу також підтримується вбудованими засобами, що забезпечує точну часову мітку для кожного результату вимірювання [32].

Arduino (ATmega328P) і його численні клони є найбільш поширеними мікроконтролерними платформами для навчальних і прототипних проектів. Проте для задач розроблюваної системи платформа Arduino має суттєві обмеження: відсутність інтегрованого Wi-Fi-модуля потребує зовнішнього модуля (ESP8266 або аналогів), що ускладнює апаратну реалізацію; обмежений обсяг оперативної пам'яті (2 КБ у ATmega328P) може бути недостатнім для буферизації результатів при відсутності з'єднання; 8-бітна архітектура процесора при виконанні операцій з числами з плаваючою точкою є значно повільнішою порівняно з 32-бітним ESP32 [33].

Raspberry Pi і подібні одноплатні комп'ютери на базі ARM-процесорів, що функціонують під управлінням повноцінної операційної системи Linux, надають максимальну гнучкість програмного забезпечення і обчислювальну потужність. Проте для задачі збору і обробки даних одного RGB-давача ця потужність є зайвою, а відносно тривалий час завантаження ОС (до 30 с), вищі вимоги до живлення і більша вартість роблять подібні платформи менш підходящими для компактного портативного пристрою.

Аналіз таблиці 1.3 підтверджує, що платформа ESP32 є оптимальним вибором для вбудованого рівня розроблюваної кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування, оскільки вона поєднує достатню обчислювальну потужність, вбудований Wi-Fi, підтримку необхідних інтерфейсів зв'язку з давачем кольору і низьку вартість при компактних розмірах і низькому енергоспоживанні.

Таблиця 1.3 – Порівняння мікроконтролерних платформ для вбудованого рівня КФС

Характеристика	ESP32	Arduino (ATmega328P)	Raspberry Pi Zero W
Процесор	Xtensa LX6, 240 МГц, 32- біт	AVR, 16 МГц, 8- біт	ARM Cortex-A53, 1 ГГц
ОЗП	520 КБ	2 КБ	512 МБ
Wi-Fi	Вбудований (802.11 b/g/n)	Зовнішній модуль	Вбудований
Bluetooth	BT + BLE вбудований	Відсутній	BT 4.1 вбудований
I ² C / SPI	Так / Так	Так / Так	Так / Так
Час старту	< 1 с	< 0,1 с	30–60 с (завант. ОС)
Вартість	Низька	Дуже низька	Середня
Придатність для КФС	Висока	Середня	Низька

1.7 Хмарні платформи та засоби зберігання даних IoT-систем

Хмарний рівень кіберфізичної системи відповідає за централізоване зберігання результатів вимірювань і калібрувальних параметрів, забезпечення доступу до даних з різних пристроїв і підтримку механізму оновлення параметрів моделі. Вибір хмарної платформи суттєво впливає на зручність розробки, надійність і масштабованість системи.

Спеціалізовані IoT-платформи (AWS IoT Core, Google Cloud IoT, Microsoft Azure IoT Hub) надають широкий набір інструментів для підключення, управління

і аналізу даних від IoT-пристроїв [35]. Проте їхнє використання потребує відповідних знань хмарних технологій, налаштування інфраструктури і несе певні фінансові витрати при перевищенні безкоштовних квот. Для прототипної системи з обмеженою кількістю пристроїв і порівняно малим обсягом даних ці платформи є надлишково складними.

Google Sheets як хмарне сховище для IoT-систем є нетрадиційним, але практично ефективним рішенням для систем з помірним обсягом даних і вимогами до зручності перегляду результатів. Google Sheets API (Sheets API v4) надає повнофункціональний RESTful інтерфейс для читання і запису даних у таблицю через стандартні HTTP-запити. Аутентифікація здійснюється через протокол OAuth 2.0 або за допомогою сервісного акаунта Google Cloud. Безкоштовна квота становить 300 запитів на хвилину, що є більш ніж достатнім для одиничного вимірювального пристрою [36]. Ключовими перевагами Google Sheets для прототипного проекту є: нульова вартість для малих обсягів даних; зручний веб-інтерфейс для перегляду і аналізу результатів без спеціального ПЗ; вбудовані можливості побудови діаграм і обчислення статистичних показників; можливість спільного доступу і колаборативної роботи з даними.

Firebase Realtime Database і Firestore від Google є більш традиційними IoT-сховищами, що надають можливість підписки на зміни даних у режимі реального часу і розвинуті засоби авторизації [37]. Ці платформи є оптимальними для систем, де необхідна негайна реакція на зміну даних або складна логіка авторизації різних користувачів. Для розроблюваної системи, де виведення результату здійснюється локально на ESP32, а хмара використовується лише для зберігання, Firebase є дещо надлишковим, проте залишається прийнятною альтернативою.

Підхід до організації бази знань у вигляді таблиці Google Sheets відповідає загальноприйнятій у системах малого масштабу практиці. Зберігання структурованих калібрувальних параметрів у табличному форматі забезпечує прозорість і зручність редагування без необхідності в спеціалізованому програмному забезпеченні адміністрування баз даних. При масштабуванні системи

до десятків і сотень пристроїв доцільним є перехід на реляційну або документоорієнтовану СУБД з повноцінним API.

1.8 Методи синтезу і аугментації даних для навчання вимірювальних систем

Побудова бази знань вимірювальної системи, що ґрунтується на калібрувальних залежностях, традиційно потребує проведення серії натурних вимірювань з відомими значеннями вимірюваної величини. Однак на ранніх стадіях проектування такі вимірювання часто є недоступними або обмеженими. В цих умовах методи синтезу і аугментації даних дозволяють сформувати початкову базу знань, достатню для функціонування і тестування системи до початку натурального калібрування.

Синтез даних на основі статистичних моделей є широко застосованим підходом у прикладних задачах, де необхідно збільшити обсяг або різноманітність навчальних даних. В аналітичній хімії і метрології синтетичні дані, отримані шляхом додавання реалістичного шуму до модельних значень сигналу, використовуються для тестування алгоритмів обробки і оцінювання невизначеності вимірювань [38]. Основна вимога до синтетичних даних – їхня статистична еквівалентність реальним даним у сенсі відтворення відомих розподілів і залежностей між змінними.

Нормальний розподіл є стандартним вибором для моделювання природної варіабельності більшості вимірюваних фізико-хімічних показників завдяки центральній граничній теоремі: при достатньо великій кількості незалежних джерел варіабельності сумарний розподіл наближається до нормального незалежно від індивідуальних розподілів складових. Для вмісту креатину в харчових продуктах, що формується під впливом великої кількості генетичних, фізіологічних і технологічних факторів, нормальний розподіл є теоретично обґрунтованим і практично підтвердженим вибором.

Метод найменших квадратів є стандартним методом оцінювання параметрів лінійних і нелінійних регресійних моделей за набором спостережень [40]. У контексті калібрування вимірювальних систем метод найменших квадратів дозволяє визначити параметри калібрувальної залежності (нахил і зміщення прямої) з мінімальною сумарною квадратичною похибкою для заданого набору калібрувальних точок. При достатньому обсязі реальних вимірювань (не менше 5–10 точок на кожен продукт) параметри, отримані методом найменших квадратів, є незміщеними оцінками і мають найменшу дисперсію серед усіх лінійних оцінок (теорема Гаусса–Маркова). Використання синтетичних калібрувальних даних на початковому етапі з подальшим уточненням реальними вимірюваннями є методологічно коректним підходом, що забезпечує можливість поступового самовдосконалення системи.

1.9 Аналіз існуючих систем визначення вмісту аналітів за допомогою тест-смужок і мобільних пристроїв

За останнє десятиліття з'явилась значна кількість наукових публікацій і комерційних продуктів, що реалізують концепцію цифрового зчитування кольорового сигналу тест-смужок за допомогою мобільних пристроїв або спеціалізованих давачів.

Системи на основі камери смартфона є найбільш масово представленим класом. Серед них системи визначення рН, нітратів, важких металів і глюкози у воді і харчових продуктах [41]. Загальним принципом є фотографування тест-смужки після реакції і аналіз RGB-значень пікселів у зоні реакційної зони за допомогою мобільного застосунку. Основним обмеженням цього підходу є висока чутливість до умов зйомки: кут освітлення, відстань до смужки і налаштування камери суттєво впливають на вимірюваний колір. Системи з еталонною кольоровою шкалою на смужці частково вирішують цю проблему, проте ускладнюють виробництво тест-смужок.

Системи на основі спеціалізованих RGB-давачів, аналогічних тим, що використовуються у розроблюваній системі, демонструють вищу відтворюваність завдяки стандартизованому освітленню і геометрії вимірювання [42]. Описані системи визначення гемоглобіну, загального білка і загального холестерину в крові, а також кількох показників якості молока. Ці системи підтверджують принципову можливість отримання кількісних результатів із відносною похибкою менше 10 % за допомогою простих RGB-давачів і лінійних калібрувальних моделей. Системи визначення якості і фальсифікацій м'ясних продуктів з використанням оптичних методів є найбільш близькими за тематикою до розроблюваної системи. Описано системи на основі спектроскопії у ближньому інфрачервоному діапазоні для визначення вмісту жиру і білка в м'ясі, колориметричні системи для оцінювання свіжості риби і м'яса за показниками кольору поверхні, а також системи виявлення фальсифікацій з використанням аналізу зображень [43]. Однак спеціалізованих систем для кількісного визначення вмісту креатину в харчових продуктах у відкритих джерелах виявлено не було, що підтверджує актуальність і новизну розроблюваної системи.

Системи визначення рівня креатиніну в сечі і крові за допомогою тест-смужок і мобільних пристроїв активно розробляються у медичній діагностиці [44]. Ці системи реалізують той самий аналітичний принцип (реакція Яффе), що і розроблювана система, проте орієнтовані на інший тип матриці зразка (біологічні рідини) і, відповідно, інший діапазон концентрацій і інші джерела матричних ефектів. Технічний досвід, накопичений у медичній діагностиці, є цінним орієнтиром при проектуванні системи для харчових продуктів.

1.10 Постановка задачі

Проведений огляд предметної галузі показав, що креатин є важливим біохімічним показником якості м'ясних і рибних продуктів, який відображає вміст м'язового компонента, свіжість і дотримання технологічних вимог; його концентрація змінюється від практичної відсутності у рослинних продуктах до 88

г/кг у концентрованих добавках, тоді як для основних м'ясних і рибних продуктів характерний діапазон 2–7 г/кг. Існуючі методи визначення (метод Яффе, ферментативні та ВЕРХ) забезпечують високу точність, але є малопридатними для оперативного контролю через складність, вартість і тривалість аналізу, тоді як тест-смужки, хоча й мобільні, дають лише якісні або напівкількісні результати через суб'єктивність оцінки. Перспективним рішенням є використання кіберфізичних систем із цифровим зчитуванням кольору, що, за аналогією з медичними та харчовими застосуваннями, дозволяє досягати похибки менше 10 % при використанні RGB-давачів і калібрувальних моделей. Для вирішення цієї задачі потрібно виконати наступні кроки:

1. дослідити біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів та проаналізувати існуючі методи його визначення, виявити їх недоліки та обґрунтувати вибір реакції Яффе як аналітичної основи системи;
2. проаналізувати існуючі кіберфізичні системи у харчовій промисловості, давачі кольору та мікроконтролерні платформи для побудови портативних вимірювальних систем;
3. розробити математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача кольору і концентрацією креатину на основі закону Бугера–Ламберта–Бера та лінійної калібрувальної залежності;
4. розробити метод синтезу калібрувальних даних для бази знань системи із застосуванням нормального закону розподілу та аналітичного визначення індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту;
5. розробити тришарову архітектуру кіберфізичної системи (фізичний, вбудований та хмарний рівні) та алгоритми функціонування всіх її компонентів на базі мікроконтролера ESP32, RGB-давача TCS34725 і хмарного сховища Google Sheets;
6. провести симуляційне дослідження розробленої системи на синтетичних даних та оцінити її ефективність за показниками точності визначення концентрації, стабільності вимірювального каналу і правильності класифікації рівня вмісту креатину.

2 МЕТОД СТВОРЕННЯ СИНТЕЗОВАНИХ ДАНИХ ДЛЯ БАЗИ ЗНАНЬ ВМІСТУ КРЕАТИНУ ТА ПРОЦЕС ФУНКЦІОНУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ

2.1 Формування вимог предметної галузі до кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування

Формування вимог предметної галузі, метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину та процес функціонування кіберфізичної системи визначення рівня креатину

Формування вимог до кіберфізичної системи базується на методі Поппера, який використовує кольорову реакцію Яффе для виявлення креатину в харчових продуктах. Уся процедура реалізується через чотири послідовні етапи.

Перший етап є підготовчим. На цьому етапі з досліджуваного продукту отримують рідкий екстракт, тобто відвар або бульйон. Одночасно готують робочі реагенти: 1-відсотковий водний розчин пікринової кислоти та 10-відсотковий розчин гідроксиду натрію. Також забезпечують киплячу водяну баню для подальшої термічної обробки.

Другий етап визначає реакційну фазу. У чисту ємність відмірюють 2 мілілітри досліджуваного зразка (відвару або бульйону). Потім послідовно додають 3 краплі розчину пікринової кислоти та 5 крапель лужного розчину гідроксиду натрію. Вміст ретельно перемішують, забезпечуючи повний контакт реагентів з екстрактом.

Третій етап – термічна стабілізація. Підготовлену суміш поміщають на киплячу водяну баню та інкубують протягом 15 хвилин. Цей крок необхідний для завершення хімічного перетворення та стабілізації забарвлення продукту реакції. Без достатнього нагрівання реакція відбувається неповністю, що призводить до хибно-негативних результатів.

На четвертому етапі формується аналітичний висновок. Після інкубації проводять оцінку забарвлення – візуально або за допомогою інструментальних засобів. Поява оранжевого спектра свідчить про наявність креатину в зразку.

Інтенсивність оранжевого кольору корелює з концентрацією: чим яскравіший відтінок, тим більше креатину. Збереження блідо-жовтого кольору, характерного для вихідних реагентів, вказує на відсутність креатину або на його концентрацію нижче порогу чутливості методу.

Хоча класичний метод Поппера орієнтований на лабораторні умови, його адаптація для побутового використання є цілком можливою завдяки створенню портативних діагностичних засобів. Оптимальним рішенням стали паперові тест-смужки, попередньо імпрегновані сумішшю 1-відсоткового розчину пікринової кислоти та 10-відсоткового розчину гідроксиду натрію, взятих у співвідношенні 3:5. Така імпрегнація дозволяє зберігати реагенти в сухому вигляді, що робить смужки стабільними при кімнатній температурі та придатними для тривалого зберігання.

Застосування тест-смужок максимально спрощує процедуру для кінцевого користувача. Користувачеві достатньо занурити смужку в ємність із рідким екстрактом продукту (бульйоном або відваром), після чого провести термічну експозицію на водяній бані протягом 15 хвилин. На завершення виконується колориметрична оцінка результату за зміною забарвлення смужки порівняно з контрольною шкалою.

Розроблена шкала для оцінювання кольору містить чотири градації. Колір 0 (блідо-жовтий) відповідає відсутності креатину. Колір 1 (слабке оранжеве забарвлення) свідчить про низький рівень. Колір 2 (виражений оранжевий колір) вказує на середній рівень. Колір 3 (насичений оранжево-червоний колір) є ознакою високого рівня креатину в досліджуваному продукті.

Така методика є інклюзивною, оскільки її легко реалізувати людям із обмеженими фізичними можливостями. Крім того, економічна ефективність рішення надзвичайно висока – собівартість однієї смужки розміром 2 на 5 сантиметрів становить лише 0,04 гривні. Це робить регулярний моніторинг вмісту креатину доступним для всіх верств населення.

Колір 0 Відсутність креатину	Колір 1 Наявність низького рівня креатину	Колір 2 Наявність середнього рівня креатину	Колір 3 Наявність високого рівня креатину

Рисунок 2.1 – Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування

Однак ключовою проблемою залишається суб'єктивність візуальної оцінки результатів. Коректна інтерпретація вмісту креатину безпосередньо залежить від здатності користувача точно розрізняти відтінки та інтенсивність кольорової реакції. Для багатьох пацієнтів це стає суттєвою перешкодою через порушення зору або кольоросприйняття, зокрема різні форми дальтонізму. Людина з порушеним червоно-зеленим сприйняттям може не помітити різниці між кольорами 1, 2 та 3, що призведе до неправильного висновку.

Саме тому розробка кіберфізичної системи, яка автоматизує процес розпізнавання кольору та забезпечує об'єктивні дані про концентрацію речовини. Використання оптичних датчиків у складі КФС дозволяє цифровізувати колірний сигнал, перетворюючи його на точні кількісні показники концентрації креатину. В цьому випадку Система виконуватиме роль аналізатора, що робить діагностику доступною для людей із будь-яким станом зору, повністю усуваючи ризик помилкового трактування. Кіберфізична система не просто фіксує колір, а автоматично формує об'єктивний висновок про нутрієнтну цінність продукту, забезпечуючи зворотний зв'язок для користувача.

2.2 Принцип функціонування та формування бази знань кіберфізичної системи

Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування є інтегрованим комплексом, у якому фізичний вимірювальний процес і цифрова обробка даних утворюють єдиний замкнений контур. На фізичному рівні система

здійснює хімічну реакцію між екстрактом досліджуваного продукту та реагентами тест-смужки, результатом якої є забарвлення, інтенсивність якого пропорційна вмісту креатину. На цифровому рівні оптичний сигнал від давача кольору перетворюється у числове значення концентрації, яке порівнюється з еталонними даними і класифікується у відповідності до встановленої шкали. Зв'язок між двома рівнями забезпечується математичною моделлю, параметри якої зберігаються у базі знань системи (рис. 2.2).

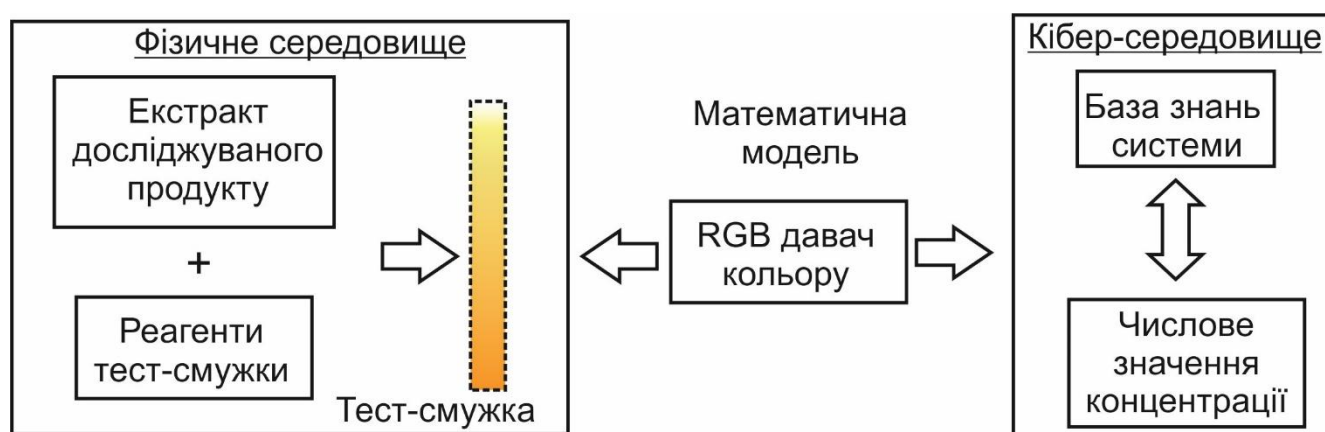


Рисунок 2.2 – Інтеграція фізичного та кібер-середовища для визначення рівня креатину в продуктах харчування

Ключовою особливістю такої архітектури є те, що точність усього вимірювального процесу принципово залежить від якості бази знань. База знань виконує роль «перекладача» між фізичним сигналом давача і реальною концентрацією речовини. Вона містить індивідуальні калібрувальні параметри для кожного продукту, що враховують його власний колірний фон – відтінок і прозорість бульйону, які є різними наприклад для м'яса, риби та інших категорій і впливають на показання давача незалежно від концентрації креатину.

Без цих параметрів система не здатна розрізнити, чи є отриманий колірний сигнал наслідком високого вмісту креатину, чи просто темного бульйону конкретного продукту.

Формування бази знань є, таким чином, не допоміжним, а центральним завданням проектування системи. В ідеальних умовах кожен запис бази знань

повинен бути отриманий шляхом серії лабораторних вимірювань із відомою концентрацією – методом стандартних добавок або еталонних розчинів. Однак на етапі розробки та первинного тестування системи проведення повного натурального експерименту для кожного з десятків продуктів є практично неможливим через обмеження в часі, обладнанні та реактивах. При цьому система повинна функціонувати і бути верифікована ще до завершення натурального калібрування.

Саме ця суперечність між необхідністю наповненої бази знань для роботи системи і неможливістю отримати реальні дані на ранньому етапі зумовлює потребу в методі синтезу даних. Синтетична база знань, побудована на основі літературних значень і статистичного моделювання, дозволяє запуснути і перевірити роботу всього алгоритмічного ланцюга системи, відпрацювати інтерфейс і логіку класифікації, а також визначити, які саме параметри є найбільш чутливими і потребують першочергового натурального уточнення. Після отримання реальних вимірювань синтетичні коефіцієнти замінюються або коригуються, і система тоді переходить у повноцінний робочий режим.

2.3 Метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування

Центральним інформаційним ресурсом КФС є база знань, що містить калібрувальні коефіцієнти α і β для кожного продукту харчування. Ці коефіцієнти пов'язують оптичний сигнал давача кольору із концентрацією креатину у зразку згідно з лінійною моделлю. В умовах відсутності повного масиву реальних лабораторних вимірювань постає задача створення реалістичних навчальних даних.

Під синтезом даних у контексті даної роботи розуміється процедура генерування пар значень (α_i, β_i) для кожного продукту i на основі відомих із наукової літератури середніх значень вмісту креатину μ_i та статистичного моделювання природної варіативності цього показника. Подібний підхід широко застосовується в задачах проектування вимірювальних та діагностичних систем,

коли реальні дані відсутні або обмежені, а модель повинна бути верифікована до початку натурного експерименту.

В рамках КФС у пропонованому методі створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування пропонується використати нормальний закон розподілу. Вибір нормального (гауссівського) закону розподілу для моделювання варіабельності вмісту креатину обґрунтовується такими міркуваннями. По-перше, відповідно до центральної граничної теореми, величина, що формується під впливом великої кількості незалежних факторів (порода тварини, вік, умови відгодівлі, спосіб зберігання, температурна обробка), наближається до нормального розподілу. По-друге, у численних харчових і біохімічних дослідженнях вміст креатину в м'ясних та рибних продуктах описується саме гауссівською функцією щільності ймовірності. По-третє, нормальний розподіл зручний для аналітичної роботи та дозволяє задавати параметри безпосередньо через математичне сподівання і стандартне відхилення.

Стандартне відхилення σ_i встановлюється на рівні 10 % від середнього значення μ_i , що відповідає відносній похибці $\pm 10\%$ і є типовим для якісно контрольованих харчових виробництв. Змодельована концентрація C_i задовольняє розподілу:

$$C_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2), \quad \sigma_i = 0,10 \cdot \mu_i, \quad (2.1)$$

де μ_i – середнє значення вмісту креатину для i -го продукту за даними літератури, г/кг; σ_i – стандартне відхилення, г/кг; C_i – змодельоване значення концентрації у зразку, г/кг.

Для забезпечення фізичної коректності моделі передбачено обмеження знизу: значення C_i не може бути від'ємним. Якщо реалізація випадкової величини виявляється від'ємною, вона замінюється нулем – концентрація речовини не може бути меншою за нуль.

Вихідні значення μ_i для 40 найбільш уживаних груп продуктів харчування отримано з наукових публікацій у галузі харчової хімії та біохімії м'яза. Обрані діапазони відображені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Літературні значення вмісту креатину для основних груп продуктів

Категорія продукту	Приклади продуктів	μ , г/кг	σ , г/кг
М'ясо (сире)	Яловичина, свинина, баранина	3,5 – 6,5	0,35 – 0,65
М'ясо (варене/смажене)	Яловичина варена, курятина	2,4 – 3,4	0,24 – 0,34
Риба (свіжа)	Лосось, тунець, тріска	2,0 – 4,5	0,20 – 0,45
Риба (оброблена)	Консерви, солоний оселедець	1,4 – 2,8	0,14 – 0,28
М'ясні вироби	Ковбаси, сосиски, шинка	0,7 – 1,2	0,10 – 0,18
Молочні продукти	Молоко, сир, йогурт	0,01 – 0,10	0,001 – 0,015
Рослинні продукти	Овочі, фрукти, горіхи	≈ 0	$< 0,001$
Спортивні добавки	Креатин моногідрат	$\approx 88,0$	2,00

Основою пропонованого методу створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування є лінійна калібрувальна модель, що встановлює залежність між нормалізованим колірним показником X_{norm} , отриманим від давача кольору, та концентрацією креатину C у зразку:

$$C = \alpha \cdot X_{norm} + \beta, \quad (2.2)$$

де α – коефіцієнт чутливості (нахил калібрувальної прямої); β – коефіцієнт зміщення (вільний член), що враховує власне забарвлення бульйону та реактивів за відсутності пікрату креатиніну.

Коефіцієнт чутливості α визначає на скільки змінюється концентрація (г/кг) при зміні X_{norm} на 1. Велике значення даного коефіцієнта означає, що метод дуже чутливий до кольору. Натомість коефіцієнт зміщення визначає концентрацію, яку покаже метод при $X_{norm} = 0$ (власний колірний фон бульйону даного продукту за відсутності реакції).

Значення нормалізованого колірного показника X_{norm} обчислюється з трьох каналів RGB-давача:

$$X_{norm} = \frac{R}{R + G + B'} \quad (2.3)$$

де R, G, B – виміряні значення інтенсивності червоного, зеленого та синього каналів відповідно. Нормалізація забезпечує інваріантність показника до зміни освітленості сцени. Вибір каналу R як основного пов'язаний із фізикою реакції Яффе, тобто утворений оранжевий пікрат креатиніну поглинає синьо-зелений спектр (490–510 нм) і відбиває червоний, тому зростання концентрації збільшує відносний внесок каналу R (тобто значення червоного каналу є у чисельнику формули, і є відношенням до загальної суми всіх трьох каналів).

Фізичним підґрунтям пропонованого методу є закон Бугера-Ламберта-Бера, що пов'язує оптичну щільність поглинання A із концентрацією забарвленої речовини C :

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C, \quad (2.4)$$

де ε – молярний коефіцієнт поглинання пікрату креатиніну, л/(моль·см); l – оптичний шлях (відстань між джерелом і приймачем), см; C – молярна концентрація, моль/л.

Оскільки RGB-давач вимірює інтенсивність пройденого світла I , а не оптичну щільність, перехід здійснюється через логарифмічне перетворення, відповідно до наступної формули:

$$A = k \cdot \ln\left(\frac{I_{blank}}{I_{sample}}\right), \quad (2.5)$$

де k – емпіричний коефіцієнт масштабування; I_{blank} – інтенсивність на незабарвленій ділянці тест-смужки; I_{sample} – інтенсивність на аналізованому зразку.

Для визначення коефіцієнтів α і β використовується метод двох калібрувальних точок. Задаються дві еталонні пари, що відповідають нижньому та верхньому рівням шкали Яффе для конкретного продукту. Далі здійснюється підстановка обох пар в рівняння (2.2). Як результат отримуємо систему двох лінійних рівнянь, розв'язком якої є:

$$\alpha = \frac{C^{(1)} - C^{(2)}}{X_{norm}^{(1)} - X_{norm}^{(2)}}. \quad (2.6)$$

$$\beta = C^{(1)} - \alpha \cdot X_{norm}^{(1)}. \quad (2.7)$$

Для переходу від якісної шкали (візуальних рівнів 0–3) до кількісної моделі було визначено типові репрезентативні RGB-значення для кожного рівня забарвлення. Зокрема, для блідо-жовтого кольору (відсутність креатину) прийнято значення (230, 210, 170), для світло-оранжевого (низький рівень) – (240, 170, 90), для оранжевого (середній рівень) – (230, 120, 50), а для темно-оранжевого (високий рівень) – (210, 80, 30). На основі цих значень було обчислено відповідні нормалізовані координати X_{norm} , які становлять приблизно 0.377, 0.480, 0.575 та 0.656 відповідно. Таким чином, отримано монотонно зростаючу залежність: зі

збільшенням інтенсивності оранжево-червоного кольору зростає і значення X_{norm} , що узгоджується з фізичною суттю процесу.

Оскільки реальні вимірювання характеризуються наявністю шумів, варіацій освітлення та неоднорідністю тест-смужок, використання точних значень є недоцільним для моделювання. Тому для подальших розрахунків було прийнято узагальнені, згладжені значення X_{norm} , отримані шляхом округлення до “зручних” чисел із збереженням порядку та відносних інтервалів між рівнями. У результаті було сформовано шкалу: 0.36 (рівень 0), 0.43 (рівень 1), 0.51 (рівень 2), 0.59 (рівень 3).

Такий підхід дозволяє, з одного боку, зберегти фізичну інтерпретованість моделі (оскільки вона базується на реалістичних RGB-оцінках кольорів), а з іншого – забезпечити її стійкість і простоту використання в алгоритмах калібрування та подальшого аналізу. Фактично, отримані значення X_{norm} виступають як еталонні опорні точки, які пов’язують дискретну візуальну шкалу кольорів із безперервною числовою моделлю, що використовується для обчислення концентрації креатину в межах кіберфізичної системи.

Вибір калібрувальних точок залежить від діапазону μ_i . Для продуктів з $\mu_i \geq 3,0$ г/кг (наприклад сире м'ясо та риба) перша точка відповідає $X_{norm} = 0,430$ при $C = 0,5 \cdot \mu_i$, друга $X_{norm} = 0,590$ при $C = 1,3 \cdot \mu_i$. Для продуктів з $0,5 \leq \mu_i < 3,0$ г/кг використовується діапазон 0,360–0,510, для $\mu_i < 0,5$ г/кг – діапазон 0,360–0,430. Значення X_{norm} у калібрувальних точках є фізично мотивованими і підлягають уточненню за результатами натурних вимірювань.

Таким чином підсумовуючи задамо метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування через послідовність кроків:

1. Формування вхідних даних. Для кожного продукту задається середнє значення вмісту креатину μ_i (з літератури) та стандартне відхилення $\sigma_i = 0,1 \cdot \mu_i$.

2. Генерація концентрації (синтез даних). Моделюється значення концентрації відповідно до формули 2.1.

3. Вибір калібрувальних точок. Задаються дві опорні точки: $(X_{norm}^{(1)}, C^{(1)})$ та $(X_{norm}^{(2)}, C^{(2)})$ на основі шкали кольорів (0.36, 0.43, 0.51, 0.59) та діапазону μ_i .

4. Обчислення коефіцієнтів моделі. Коефіцієнти α і β визначаються з системи відповідно до рівняння $C = \alpha \cdot X_{norm} + \beta$, за формулами: $\alpha = \frac{C^{(1)} - C^{(2)}}{X_{norm}^{(1)} - X_{norm}^{(2)}}$ та $\beta = C^{(1)} - \alpha \cdot X_{norm}^{(1)}$.

2.4 Структура та формат бази знань

База знань кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування реалізована у вигляді структурованого табличного масиву, кожен запис якого однозначно ідентифікується найменуванням продукту і містить повний набір параметрів для вимірювання та класифікації. Запис для продукту і включає: найменування та категорію; μ_i (г/кг); змодельоване значення C_i (г/кг); координати двох калібрувальних точок; коефіцієнти α_i та β_i ; порогові значення для класифікації рівнів 1, 2, 3.

Порогові значення класифікації визначаються безпосередньо на основі середнього вмісту креатину μ_i для кожного продукту із використанням фіксованих коефіцієнтів, що забезпечує формування відносної шкали оцінювання. Таким чином, рівні класифікації встановлюються індивідуально для кожного продукту відносно його типового значення:

$$C_{1,thr} = 0,60 \cdot \mu_i; \quad C_{2,thr} = 1,00 \cdot \mu_i; \quad C_{3,thr} = 1,30 \cdot \mu_i. \quad (2.8)$$

Таким чином, поріг рівня 1 становить 60 % від норми (знижений вміст), поріг рівня 2 дорівнює нормі (очікуваний вміст), поріг рівня 3 – 130 % від норми (підвищений вміст). Зазначені коефіцієнти є параметрами системи і можуть бути скориговані за результатами натурального калібрування.

База знань у поточній реалізації містить 40 записів, охоплює 8 категорій продуктів і зберігається у форматі XLSX для сумісності з широким класом

програмних середовищ, а також у форматі JSON для використання у мобільному застосунку. Передбачено механізм поповнення бази за результатами реальних вимірювань: кожне підтвержене вимірювання зберігається у хмарному сховищі і може бути використане для уточнення коефіцієнтів методом найменших квадратів.

Пропонований метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування був реалізований за допомогою мови Python, що дозволило сформувати базу даних для кіберфізичної системи. Фрагмент бази даних вмісту креатину в продуктах харчування сформованої в результаті роботи пропонованого методу наведено на рис. 2.2.

База знань КФС: коефіцієнти калібрування α і β (модель $C = \alpha \cdot X_{\text{norm}} + \beta$)											
Категорія	Продукт	μ літер., г/кг	C мод., г/кг	X_{norm_1}	$C_{_1}$, г/кг	X_{norm_2}	$C_{_2}$, г/кг	α (alpha)	β (beta)	Рівень (C мод.)	
М'ясо											
М'ясо	Яловичина (сира)	4,5000	4,7235	0,4300	2,2500	0,5900	5,8500	22,5000	-7,4250	3 — Високий	
М'ясо	Яловичина (варена)	3,0000	2,9585	0,4300	1,5000	0,5900	3,9000	15,0000	-4,9500	2 — Середній	
М'ясо	Яловичина (смажена)	2,8000	2,9814	0,3600	0,8400	0,5100	4,2000	22,4000	-7,2240	3 — Високий	
М'ясо	Свинина (сира)	5,0000	5,7615	0,4300	2,5000	0,5900	6,5000	25,0000	-8,2500	3 — Високий	
М'ясо	Свинина (варена)	3,4000	3,3204	0,4300	1,7000	0,5900	4,4200	17,0000	-5,6100	2 — Середній	
М'ясо	Свинина (смажена)	3,1000	3,0274	0,4300	1,5500	0,5900	4,0300	15,5000	-5,1150	2 — Середній	
М'ясо	Курятина (грудка, сира)	3,4000	3,9369	0,4300	1,7000	0,5900	4,4200	17,0000	-5,6100	3 — Високий	
М'ясо	Курятина (грудка, варена)	2,4000	2,5842	0,3600	0,7200	0,5100	3,6000	19,2000	-6,1920	3 — Високий	
М'ясо	Індичка (сира)	3,2000	3,0498	0,4300	1,6000	0,5900	4,1600	16,0000	-5,2800	2 — Середній	
М'ясо	Баранина (сира)	4,2000	4,4279	0,4300	2,1000	0,5900	5,4600	21,0000	-6,9300	3 — Високий	
М'ясо	Кролятина (сира)	3,5000	3,3378	0,4300	1,7500	0,5900	4,5500	17,5000	-5,7750	2 — Середній	
М'ясні вироби											
М'ясні вироби	Ковбаса варена	1,0000	0,9301	0,3600	0,3000	0,5100	1,5000	8,0000	-2,5800	2 — Середній	
М'ясні вироби	Ковбаса копчена	0,8000	0,8290	0,3600	0,2400	0,5100	1,2000	6,4000	-2,0640	3 — Високий	
М'ясні вироби	Сосиски	0,7000	0,5087	0,3600	0,2100	0,5100	1,0500	5,6000	-1,8060	2 — Середній	
М'ясні вироби	Шинка	1,2000	0,8895	0,3600	0,3600	0,5100	1,8000	9,6000	-3,0960	2 — Середній	
Риба											
Риба	Лосось (свіжий)	4,5000	4,2470	0,4300	2,2500	0,5900	5,8500	22,5000	-7,4250	2 — Середній	
Риба	Лосось (слабосолений)	3,8000	3,4151	0,4300	1,9000	0,5900	4,9400	19,0000	-6,2700	2 — Середній	
Риба	Тунець (свіжий)	4,0000	4,1257	0,4300	2,0000	0,5900	5,2000	20,0000	-6,6000	3 — Високий	
Риба	Тунець (консерва в олії)	2,5000	2,2730	0,3600	0,7500	0,5100	3,7500	20,0000	-6,4500	2 — Середній	
Риба	Тріска (свіжа)	3,0000	2,5763	0,4300	1,5000	0,5900	3,9000	15,0000	-4,9500	2 — Середній	

Рисунок 2.2. – Фрагмент бази даних вмісту креатину в продуктах харчування сформованої в результаті роботи пропонованого методу

2.5 Процес функціонування кіберфізичної системи визначення рівня креатину

Кіберфізична система функціонує як замкнений технологічний ланцюг, що об'єднує фізичний сенсорний шар (тест-смужка та давач кольору), обчислювальний шар (мобільний застосунок і хмарна база знань) та інтерфейс взаємодії з користувачем. Процес функціонування пропонованої кіберфізичної системи можна подати через наступні кроки:

Крок 1. Підготовка зразка. Досліджуваний продукт відварюється у дистильованій воді у співвідношенні 1:10 (маса продукту до об'єму води) протягом 15–20 хвилин. Отриманий бульйон охолоджується та фільтрується. Паперова тест-смужка, просочена 1-відсотковим розчином пікринової кислоти та 10-відсотковим розчином гідроксиду натрію у пропорції 3:5, занурюється у бульйон і витримується на водяній бані за температури 100 °C протягом 15 хвилин. Час і температура витримки є критичними параметрами: відхилення більше ніж на ± 2 °C або ± 1 хвилину призводять до суттєвого зміщення колірною відгуку смужки.

Крок 2. Перебіг реакції Яффе. Внаслідок теплового впливу креатин частково дегідратується до креатиніну, який реагує з пікриною кислотою у лужному середовищі з утворенням оранжевого пікрату креатиніну. Інтенсивність забарвлення смужки пропорційна концентрації пікрату. За умов стандартного часу та температури кінетичний коефіцієнт $f(t)$ та температурний коефіцієнт $g(T)$ у повній моделі наближаються до одиниці, що зводить рівняння до спрощеного виразу (2.2). Повна модель має вигляд:

$$C = \alpha \cdot X_{norm} \cdot f(t) \cdot g(T) + \beta, \quad (2.9)$$

де $f(t)$ – кінетичний коефіцієнт утворення пікрату (при $t = 15$ хв: $f(t) \approx 1$); $g(T)$ – температурний коефіцієнт (при $T = 100$ °C: $g(T) \approx 1$).

Крок 3. Оптичне зчитування сигналу. Висушена тест-смужка розміщується у відсіку давача кольору, що забезпечує стабільне освітлення та фіксовану геометрію вимірювання. Давач фіксує три канали R, G, B. Мобільний застосунок отримує сирі цифрові значення і обчислює нормалізований колірний показник X_{norm} за формулою (2.3). Нормалізація автоматично компенсує варіації зовнішнього освітлення.

Крок 4. Ідентифікація продукту та завантаження параметрів. Користувач вводить найменування продукту у мобільному застосунку. Застосунок виконує запит до бази знань і отримує відповідний запис із коефіцієнтами α_i , β_i та

пороговими значеннями. Якщо продукт не знайдено в базі, система пропонує обрати найближчий аналог або запустити режим калібрування нового продукту.

Крок 5. Обчислення концентрації. Застосунок підставляє обчислений X_{norm} і завантажені коефіцієнти у формулу (2.2) та отримує числове значення концентрації C у г/кг. Передбачений контроль вихідного значення: якщо $C < 0$, системою встановлюється $C = 0$; якщо C перевищує фізично можливий максимум для даної категорії продуктів, видається попередження про можливу похибку вимірювання.

Крок 6. Класифікація та формування результату. На основі обчисленого значення C та порогових значень (2.8) система виконує класифікацію:

$$\text{Рівень} = \begin{cases} 0, \text{ якщо } C \leq 0,01 \\ 1, \text{ якщо } 0,01 < C \leq C_{1,thr} \\ 2, \text{ якщо } C_{1,thr} < C \leq C_{2,thr} \\ 3, \text{ якщо } C > C_{2,thr} \end{cases} \quad (2.10)$$

Результат класифікації подається у трьох формах: числове значення концентрації C (г/кг), ідентифікатор рівня (0–3) відповідно до кольорової шкали Яффе та текстовий і голосовий коментар. Усі результати автоматично зберігаються у хмарній базі знань із прив'язкою до назви продукту та часової мітки.

Запропонований процес функціонування запропонованої кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування відзначається високою інклюзивністю та економічною доступністю, оскільки він усуває суб'єктивізм людського фактора при оцінюванні складних кольорових реакцій. Використання бюджетних оптичних сенсорів у поєднанні з мобільним застосунком дозволяє людям із порушеннями зору або дальтонізмом отримувати точні дані про нутрієнтний склад їжі без необхідності звернення до спеціалізованих лабораторій. Оцифрування результатів та їх збереження у хмарному середовищі створює унікальну базу знань про фактичний вміст креатину в продуктах різних виробників, що трансформує процес контролю дієти з поодинокого вимірювання на колективну інтелектуальну підтримку пацієнтів із нейроім'язовими захворюваннями.

Водночас метод має певні обмеження, пов'язані з необхідністю суворого дотримання температурного режиму та тривалості термічної обробки, оскільки відхилення від 15-хвилинного нагрівання може викривити інтенсивність забарвлення. Попри високу чутливість реакції Яффе, точність системи залежить від якості підготовки рідкого екстракту та чистоти паперових смужок, що вимагає від користувача базової ретельності на фізико-хімічному етапі. Також ефективність методу обмежена наявними еталонними даними в базі знань, тому для нових або комбінованих продуктів харчування система може вимагати попереднього калібрування або повторного сканування для уникнення похибок, спричинених природною пігментацією деяких інгредієнтів.

2.6. Верифікація синтетичних даних та оцінка адекватності моделі

Оскільки калібрувальні коефіцієнти α і β у поточній реалізації є синтетичними, постає питання їхньої адекватності. Верифікація синтетичних даних передбачає перевірку за трьома критеріями.

Перший критерій визначає фізичну правдоподібність. Для кожного продукту перевіряється, що обчислені коефіцієнти забезпечують строго монотонну залежність C від X_{norm} на всьому робочому діапазоні ($\alpha > 0$ для продуктів з ненульовим вмістом креатину) і що значення C на межах шкали X_{norm} не виходять за межі фізично можливих концентрацій для даної категорії.

Другий критерій – відтворюваність результатів. При багаторазовому запуску генератора з фіксованим параметром `seed` результати є повністю відтворюваними, що необхідно для наукової відтворюваності дослідження та можливості незалежної перевірки.

Третій критерій – відповідність літературним діапазнам. Для кожного продукту перевіряється, що змодельоване значення C_i знаходиться в межах трьох стандартних відхилень від середнього:

$$|C_{sim,i} - \mu_i| \leq 3 \cdot \sigma_i. \quad (2.11)$$

За правилом трьох сигма умова (2.11) виключає аномальні значення з імовірністю 99,73 %. Перелічені критерії реалізовані у скрипті генерації бази знань і виконуються автоматично. Будь-який запис, що не задовольняє хоча б одному критерію, позначається як «потребує перевірки» і не включається до робочої бази знань до ручного узгодження.

2.7 Висновки

У межах запропонованого методу створення синтезованих даних для формування бази знань кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування реалізовано цілісний підхід, що поєднує статистичне моделювання та фізично обґрунтовану калібрувальну модель. Зокрема, для генерації значень концентрації креатину використано нормальний закон розподілу, що відповідає природній варіабельності харчових показників і узгоджується з положеннями центральної граничної теореми. Для кожного продукту середнє значення μ_i взято з літературних джерел, а стандартне відхилення прийнято на рівні 10 % від цього значення. Синтезовані значення концентрації інтегруються з розробленою лінійною калібрувальною моделлю, яка встановлює зв'язок між нормалізованою колірною координатою та концентрацією креатину. Така модель є фізично обґрунтованою, оскільки відповідає принципам закону Бугера–Ламберта–Бера, що описує залежність оптичної щільності від концентрації речовини. Для параметризації цієї моделі запропоновано метод визначення коефіцієнтів α і β шляхом розв'язання системи двох лінійних рівнянь, сформованих на основі двох калібрувальних точок, які відповідають характерним рівням забарвлення тест-смужки. У результаті застосування описаного підходу отримано узгоджений набір параметрів моделі для кожного продукту, включаючи коефіцієнти α і β , змодельовані значення концентрації та порогові рівні інтерпретації.

3 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ В ПРОДУКТАХ ХАРЧУВАННЯ

3.1 Функціональні та нефункціональні вимоги до проєктованої КФС

Формулювання вимог є першим і найбільш відповідальним етапом проєктування будь-якої вимірювальної системи, оскільки саме вимоги визначають межі проєктного рішення, критерії його успішності та засади верифікації. Для КФС визначення рівня креатину вимоги формуються виходячи з двох джерел: з одного боку з фізико-хімічних властивостей об'єкта вимірювання і обраного аналітичного методу (реакція Яффе), з іншого – з умов практичного застосування системи в лабораторних і польових умовах.

Функціональні вимоги описують, що система повинна робити, тобто визначають її обов'язкові функції і поведінку у відповідь на зовнішні впливи. Нефункціональні вимоги встановлюють, як система повинна це робити, тобто іншими словами характеризують якісні показники її функціонування: точність, швидкодію, надійність, зручність використання.

Першою і центральною функціональною вимогою є вимога вимірювання: система повинна визначати концентрацію креатину в рідкому екстракті (бульйоні) досліджуваного харчового продукту в діапазоні від 0 до 90 г/кг з роздільною здатністю не гіршою ніж 0,1 г/кг. Зазначений діапазон охоплює всі практично значущі категорії продуктів – від рослинних, у яких вміст креатину є близьким до нуля, до спортивних харчових добавок з вмістом до 88 г/кг.

Другою функціональною вимогою є вимога класифікації: за результатом вимірювання система повинна автоматично присвоювати рівень вмісту креатину за чотирибальною шкалою Яффе (рівні 0–3) і повідомляти результат користувачеві у текстовій та голосовій формах. Класифікація повинна бути продуктово-специфічною, тобто виконуватися з урахуванням індивідуальних параметрів конкретного продукту, що зберігаються у базі знань.

Третьою функціональною вимогою є забезпечення точної ідентифікації об'єкта дослідження. Система має надавати зручний інтерфейс для введення

найменування продукту, після чого програмний модуль повинен автоматично звертатися до бази знань для пошуку та завантаження релевантних калібрувальних коефіцієнтів. Ці коефіцієнти є критично важливими для правильної інтерпретації фізичних показників у конкретні характеристики продукту. У ситуації, коли вказаний продукт відсутній у базі даних, інтелектуальна логіка системи повинна пропонувати два сценарії вирішення: вибір найбільш схожого аналога на основі подібних фізико-хімічних властивостей або запуск покрокового майстра калібрування для створення та збереження нового профілю продукту.

Четвертою функціональною вимогою є вимога до бази знань: система повинна підтримувати базу знань обсягом не менше 80 записів для різних харчових продуктів, забезпечувати її поповнення за результатами нових вимірювань та синхронізацію з хмарним сховищем.

П'ятою функціональною вимогою є вимога збереження результатів: кожен результат вимірювання повинен автоматично зберігатися у хмарній базі даних із прив'язкою до назви продукту, числового значення концентрації, присвоєного рівня і часової мітки, що формує масив даних для подальшого аналізу і вдосконалення моделі.

Серед нефункціональних вимог ключовою є вимога точності. Похибка визначення концентрації не повинна перевищувати $\pm 15\%$ від істинного значення у діапазоні 1–90 г/кг і $\pm 0,3$ г/кг в діапазоні до 1 г/кг. Зазначені допуски відповідають точності напівкількісних колориметричних методів аналізу і є прийнятними для скринінгового контролю якості харчових продуктів.

Вимога швидкодії визначає, що повний цикл вимірювання, від занурення тест-смужки до отримання результату на екрані мобільного застосунку не повинен перевищувати 20 хвилин. З них 15 хвилин відводяться на хімічну реакцію (час витримки на водяній бані), а не більше 5 хвилин на всі інші операції: охолодження смужки, зчитування сигналу датчиком, обчислення та виведення результату.

Вимога портативності встановлює, що вся апаратна частина системи (датчик кольору і засіб його підключення до мобільного пристрою) повинна розміщуватися в корпусі, який є зручним для транспортування і не потребує зовнішнього

електроживлення під час вимірювання. Живлення здійснюється від мобільного пристрою користувача.

Вимога зручності використання передбачає, що інтерфейс мобільного застосунку повинен бути зрозумілим для користувача без спеціальної підготовки у галузі аналітичної хімії. Усі операції, що вимагають взаємодії з застосунком, повинні виконуватися не більше ніж у три кроки від головного екрана.

Вимога надійності встановлює, що кіберфізична система повинна коректно функціонувати за умови доступності мобільної мережі або Wi-Fi для синхронізації із хмарним сховищем, і повинна забезпечувати локальне збереження результатів у разі відсутності з'єднання із подальшою синхронізацією при його відновленні. Зведені дані про вимоги до проєктованої кіберфізичної системи наведено у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Зведена таблиця вимог до КФС

Вимога	Категорія	Кількісний показник
Діапазон вимірювання	Функціональна	0 – 90 г/кг
Роздільна здатність	Функціональна	0,1 г/кг
Рівні класифікації	Функціональна	4 (шкала Яффе 0–3)
Обсяг бази знань	Функціональна	≥ 40 продуктів
Похибка (діапазон 1–90 г/кг)	Нефункціональна	±15 %
Похибка (діапазон 0–1 г/кг)	Нефункціональна	±0,3 г/кг
Час повного циклу	Нефункціональна	≤ 20 хвилин
Живлення апаратури	Нефункціональна	Від мобільного пристрою
Автономність при відсутності мережі	Нефункціональна	Локальне збереження результатів

3.2. Загальна структура кіберфізичної системи

Кіберфізична система визначення рівня креатину реалізована у вигляді спрощеної трирівневої архітектури, яка включає фізичний, вбудований та хмарний рівні. Кожен рівень виконує окрему функцію та взаємодіє із суміжними рівнями через стандартизовані інтерфейси передачі даних, утворюючи єдиний вимірювально-інформаційний контур.

Фізичний рівень охоплює компоненти, що безпосередньо здійснюють взаємодію з досліджуваним зразком. До нього належать тест-смужка, яка виконує функцію хімічного перетворювача концентрації креатину у колірний сигнал, та RGB-давач кольору, який здійснює оптоелектронне перетворення інтенсивності відбитого світла у цифрові значення каналів R, G і B. Конструктивно сенсор інтегровано у корпус, що забезпечує фіксовану геометрію вимірювання та стабільні умови освітлення.

Апаратна складова вбудованого рівня реалізована на базі високопродуктивного мікроконтролера ESP32, який поєднує в собі обчислювальні потужності та низьке енергоспоживання. На цей вузол покладено завдання збору, інтелектуальної обробки та безперебійної ретрансляції інформації. Зокрема, ESP32 здійснює зчитування амплітудних значень RGB-каналів із фотометричного давача, після чого виконує їх програмну нормалізацію. Для підвищення точності вимірювань застосовуються алгоритми попередньої обробки, такі як цифрова фільтрація шумів або ковзне усереднення значень. Сформовані пакети даних передаються через інтегрований бездротовий інтерфейс Wi-Fi до хмарної інфраструктури для подальшого аналізу. Таким чином, мікроконтролер виступає не просто контролером, а інтелектуальною проміжною ланкою між фізичними сенсорами та віддаленими аналітичними сервісами.

Хмарний рівень реалізовано у вигляді віддаленого сховища та бази знань на основі сервісу Google Sheets у поєднанні з вебзастосунком, реалізованим засобами Google Apps Script. У цьому рівні зберігаються результати вимірювань, а також калібрувальні параметри (зокрема коефіцієнти моделі α , β) для різних типів

продуктів. Google Sheets виконує функцію структурованої бази даних, де організовано таблиці з результатами вимірювань та довідковими параметрами, тоді як Google Web App реалізує серверну логіку обробки даних.

Інформаційні потоки між рівнями мають спрямований характер. З фізичного рівня на вбудований передаються значення RGB-каналів у вигляді трійки чисел у діапазоні 0–255. З вбудованого рівня на хмарний передаються структуровані дані (наприклад, у форматі JSON), що містять результати вимірювання та службову інформацію. У зворотному напрямку з хмарного рівня можуть надходити оновлені калібрувальні параметри або довідкові дані, які використовуються для підвищення точності оцінювання концентрації креатину.

Ще одним важливим компонентом пропонованої кіберфізичної системи є мобільний додаток. Мобільний застосунок у запропонованій архітектурі виконує роль інтерфейсу взаємодії користувача із кіберфізичною системою та забезпечує координацію між вбудованим і хмарним рівнями. Застосунок дозволяє користувачу вводити метадані аналізу (зокрема назву продукту), ініціювати процес вимірювання та отримувати результати у зручній текстовій або візуальній формі. Крім того, він може здійснювати прийом даних від мікроконтролера ESP32 (через Wi-Fi або локальну мережу), виконувати базову валідацію отриманих значень RGB та формувати структурований запит для передачі у хмарне середовище.

Окрім функцій введення та відображення інформації, мобільний застосунок реалізує логіку доступу до хмарної бази знань, отримуючи актуальні калібрувальні параметри та використовуючи їх для інтерпретації результатів вимірювання. У разі необхідності частина обчислень (наприклад, попереднє визначення рівня креатину) може виконуватися безпосередньо на стороні застосунку, що підвищує автономність системи. Таким чином, мобільний застосунок виступає інтелектуальним посередником, який поєднує апаратну частину з аналітичними можливостями хмарного рівня та забезпечує зручність і доступність використання системи для кінцевого користувача.

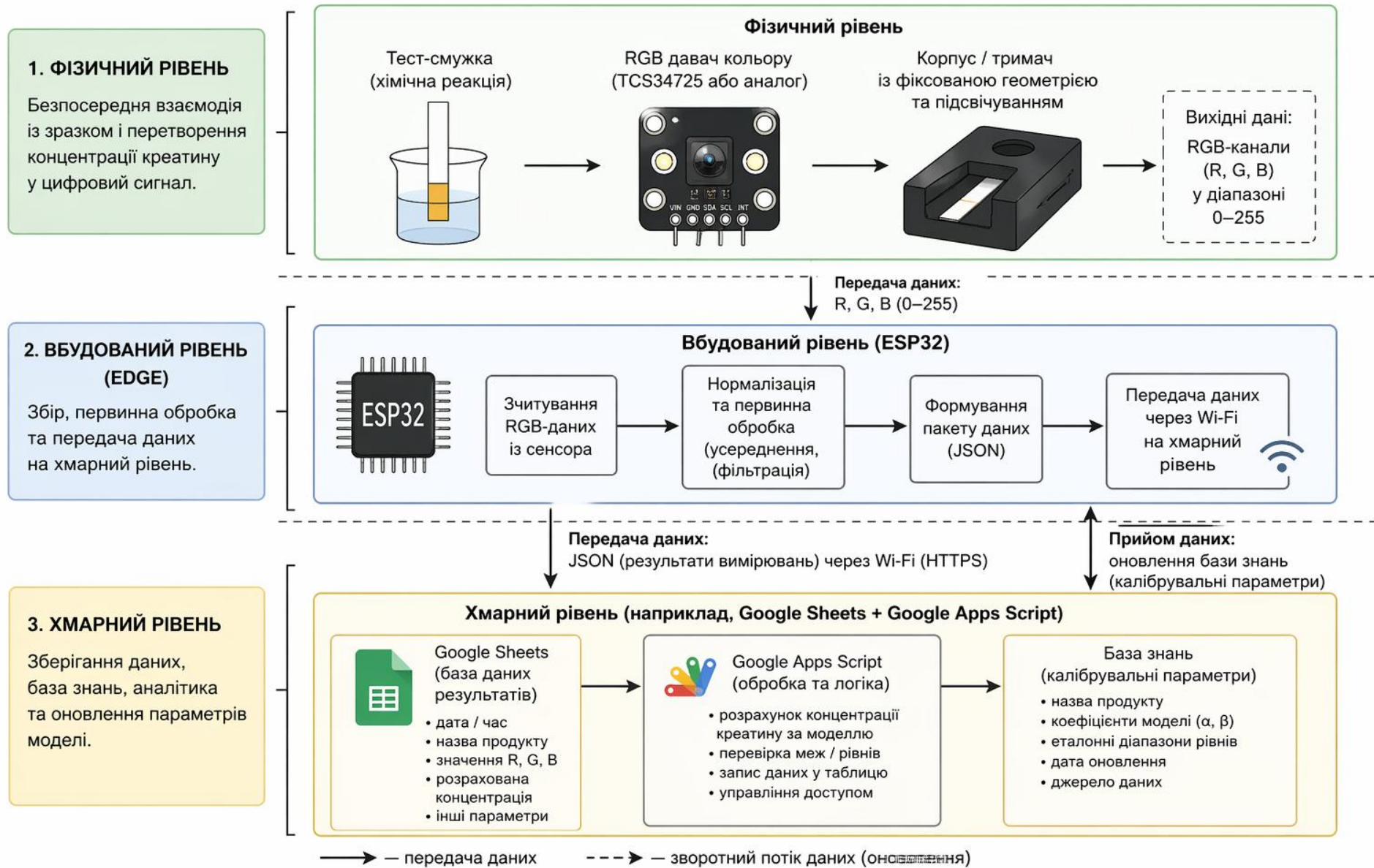


Рисунок 3.1 – Загальна структура кіберфізичної системи

Таблиця 3.2 – Компоненти КФС за рівнями архітектури

Фізичний	Тест-смужка (пікринова к-та + NaOH)	Хімічний перетворювач: концентрація креатину у колір
Фізичний	Водяна баня (100 °C, 15 хв)	Термостатування реакції Яффе
Фізичний	RGB-давач кольору	Оптоелектронний перетворювач: колір у цифрові значення R, G, B
Фізичний	Корпус-тримач	Забезпечення фіксованої геометрії та стабільного освітлення
Вбудований (Edge)	Мікроконтролер ESP32	Зчитування RGB-даних, первинна обробка, передача через Wi-Fi
Вбудований (Edge)	Прошивка ESP32	Нормалізація, фільтрація, формування JSON-пакетів
Обчислювальний	Мобільний застосунок	Введення даних (назва продукту), відображення результатів, взаємодія з хмарою
Хмарний	Google Sheets	Зберігання результатів вимірювань
Хмарний	Google Apps Script (або backend)	Обробка даних, розрахунок концентрації, класифікація
Хмарний	База знань	Зберігання калібрувальних параметрів (α , β) та еталонних діапазонів для продуктів харчування

3.3. Функціональна схема кіберфізичної системи

Функціональна схема системи є ключовим елементом архітектури, оскільки вона візуалізує та регламентує потоки даних, а також вектори управляючих сигналів між окремими модулями під час виконання повного циклу вимірювання. Архітектура системи побудована за модульним принципом і включає сім взаємопов'язаних функціональних блоків, кожен із яких відповідає за конкретний етап трансформації інформації: від фізичного явища до цифрового результату.

Цей модуль є початковим етапом дослідження і на поточному етапі розробки є єдиною ланкою системи, що не підлягає повній автоматизації, вимагаючи безпосередньої участі оператора (лаборанта). Процес підготовки виконується згідно з чітко визначеним протоколом, який включає декілька стадій: термічну обробку продукту (відварювання), механічне очищення отриманого екстракту (фільтрування бульйону), хімічну активацію тест-смужки шляхом просочення реагентами та її експозицію у досліджуваному середовищі на водяній бані за заданої температури. Кінцевим продуктом цього етапу є забарвлена тест-смужка, оптичні властивості якої корелюють із концентрацією досліджуваної речовини. Якість виконання маніпуляцій на цьому етапі безпосередньо впливає на відтворюваність результатів усього аналізу.

Модуль оптичного зчитування реалізований на базі RGB-давача кольору, підключеного до мобільного пристрою. Технічна реалізація цього модуля базується на використанні прецизійного давача кольору (RGB-сенсора), інтегрованого в апаратну частину вимірювального пристрою, що взаємодіє з мобільним терміналом. Функціонування модуля полягає у фотометричному детектуванні: давач генерує стабільний потік нормованого білого світла, спрямований на поверхню тест-смужки, та реєструє інтенсивність відбитого випромінювання. Зчитування відбувається одночасно у трьох спектральних діапазонах, що відповідають червоному (R), зеленому (G) та синьому (B) каналам. Сформовані цифрові сигнали через бездротовий або дротовий інтерфейс зв'язку передаються до мобільного застосунку для подальшої інтерпретації. Використання

стандартизованого підсвічування дозволяє мінімізувати вплив зовнішнього освітлення на точність вимірювання.

Модуль нормалізації сигналу перетворює сирі значення RGB у нормалізований колірний показник X_{norm} за формулою (2.3). Нормалізація виконується у реальному часі програмним засобом мобільного застосунку і займає менше однієї мілісекунди. Результатом є безрозмірне число в діапазоні (0; 1), що є вхідним параметром для наступного модуля.

Модуль завантаження параметрів здійснює пошук запису для введеного користувачем продукту у локальній базі знань застосунку. Пошук виконується за точним збігом найменування або, за відсутності точного збігу, за категорією продукту з вибором найближчого аналога. Модуль повертає пару коефіцієнтів (α , β) і набір порогових значень (C_1^{thr} , C_2^{thr} , C_3^{thr}).

Модуль обчислення концентрації є центральним аналітичним компонентом програмного забезпечення, який відповідає за перетворення абстрактного цифрового сигналу у фізично зрозумілу величину. Він застосовує лінійну калібрувальну модель і обчислює числове значення концентрації C у г/кг. Додатково виконується перевірка допустимості результату: якщо $C < 0$, значення обнуляється; якщо C перевищує максимально можливий для даної категорії продуктів рівень, формується попередження і пропонується повторне вимірювання.

Модуль класифікації та виведення результату порівнює обчислене значення C з пороговими значеннями і присвоює рівень за шкалою Яффе. Результат виводиться на екран мобільного пристрою у вигляді кольорового індикатора, числового значення концентрації та текстового коментаря. Паралельно активується голосове повідомлення. Усі дані результату передаються до модуля збереження, який записує їх до хмарної бази даних.

Функціональну схему кіберфізичної система визначення рівня креатину в продуктах харчування подано на рис. 3.2.

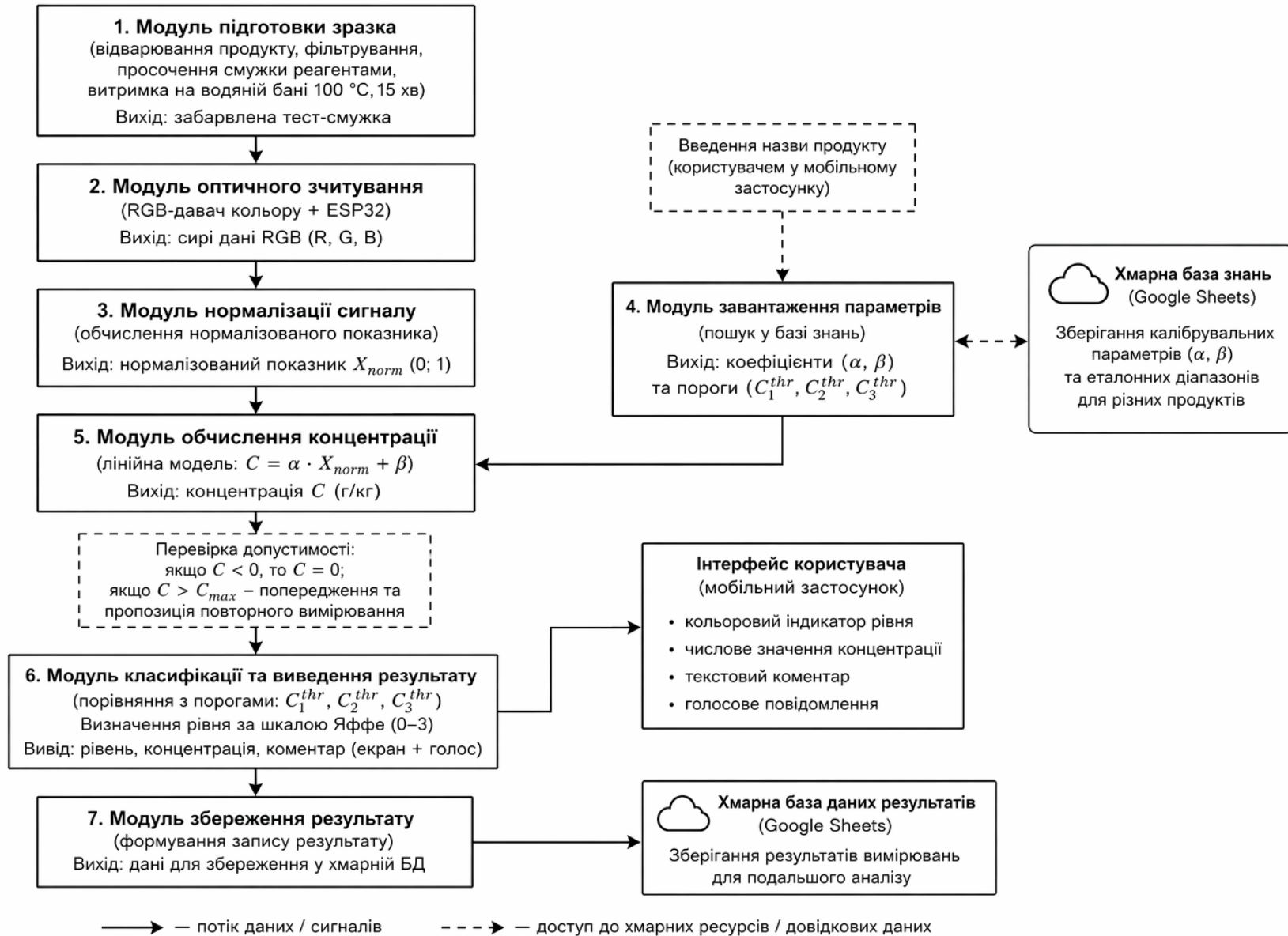


Рисунок 3.2 – Функціональна схема кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування

3.4. Алгоритм функціонування кіберфізичної системи

Загальний алгоритм функціонування КФС є лінійно-розгалуженим і включає кілька вузлів прийняття рішень, що забезпечують обробку нештатних ситуацій: відсутності продукту в базі знань, фізично неможливого результату вимірювання або відсутності з'єднання з хмарним сховищем.

Алгоритм починається з увімкнення мікроконтролера ESP32 та його ініціалізації. У процесі ініціалізації ESP32 встановлює з'єднання з RGB-давачем кольору за протоколом I²C, перевіряє його доступність і, у разі невдачі, переходить у режим очікування з індикацією помилки через світлодіодний сигнал або послідовний порт. Паралельно ESP32 намагається підключитися до мережі Wi-Fi за збереженими у прошивці параметрами. При успішному підключенні система синхронізує локально збережені калібрувальні коефіцієнти з актуальними даними хмарної бази знань.

На кроці ідентифікації продукту користувач через послідовний інтерфейс або апаратну кнопку вибору передає до ESP32 ідентифікатор досліджуваного продукту. Мікроконтролер виконує запит до хмарної бази знань і завантажує відповідний запис із коефіцієнтами α і β та пороговими значеннями концентрації. Якщо з'єднання з хмарою недоступне, ESP32 використовує локально кешовані у флеш-пам'яті коефіцієнти для відомих продуктів. Якщо продукт відсутній як у хмарній, так і в локальній базі, система формує попередження і використовує усереднені коефіцієнти найближчої категорії продуктів як початкове наближення.

Після підготовки зразка (відварювання продукту, занурення тест-смужки та витримки на водяній бані протягом 15 хвилин при температурі 100 °C) користувач розміщує смужку у корпусі давача і подає сигнал на запуск вимірювання. ESP32 ініціює серію з десяти послідовних зчитувань значень R, G, B із давача кольору з інтервалом 100 мс та обчислює медіанне значення кожного каналу для виключення випадкових шумових сплесків. Медіанне усереднення є більш стійким до аномальних значень, ніж арифметичне, і забезпечує відтворюваність результатів зчитування.

На кроці обчислення ESP32 підставляє медіанні значення R_{med} , G_{med} , B_{med} у формулу нормалізації та обчислює нормалізований колірний показник X_{norm} . Далі за лінійною калібрувальною моделлю обчислюється концентрація C . Перевірка допустимості результату виконується безпосередньо на мікроконтролері у такій послідовності: спочатку перевіряється знак ($C \geq 0$), потім відповідність фізичному діапазону для категорії продукту. Виконання перевірок на рівні ESP32, а не на стороні хмарного сервісу, дозволяє скоротити час виявлення нештатної ситуації і не витратити мережевий ресурс на передачу завідомо некоректних даних.

На кроці класифікації ESP32 порівнює обчислене значення C послідовно з пороговими значеннями C_1^{thr} , C_2^{thr} , C_3^{thr} відповідно до виразу (2.10) і присвоює рівень вмісту креатину за шкалою Яффе. Порівняння виконується знизу вгору, починаючи з перевірки умови $C \leq 0,01$ (рівень 0), що забезпечує однозначність присвоєння рівня у граничних випадках.

Фінальним кроком є формування і передача результату. ESP32 формує структуру даних у форматі JSON, що містить поля: найменування продукту, значення R_{med} , G_{med} , B_{med} , обчислений X_{norm} , концентрацію C , присвоєний рівень та часову мітку, згенеровану з синхронізованого мережевого часу NTP. Сформований JSON-об'єкт передається через Wi-Fi до хмарного сховища Google Sheets за допомогою HTTP POST-запиту до API таблиці. У разі відсутності з'єднання з мережею запис буферизується у внутрішній флеш-пам'яті ESP32 і автоматично надсилається до хмари при відновленні з'єднання.

3.5. Алгоритм обробки сигналу давача кольору

Алгоритм обробки сигналу давача кольору є одним із ключових для забезпечення точності та відтворюваності вимірювань. Він складається з чотирьох послідовних етапів: багаторазового зчитування, медіанної фільтрації, нормалізації та корекції фону.

Багаторазове зчитування виконується для компенсації двох основних джерел нестабільності сигналу: електронного шуму давача і мікровібрацій, що виникають

при ручному утриманні корпусу. Давач виконує N послідовних зчитувань, де $N = 10$ за замовчуванням. Час одного зчитування складає приблизно 10 мс, тому загальний час вимірювальної серії становить близько 100 мс.

Медіанна фільтрація застосовується окремо до кожного каналу. Для масиву значень $\{R_k\}, k = 1, \dots, N$ значення сортуються за зростанням, і медіана обчислюється як:

$$R_{med} = \text{median}\{R_k, k = 1, \dots, N\}. \quad (3.1)$$

Аналогічно обчислюються G_{med} і B_{med} . Медіана є більш стійким до аномальних значень оцінювачем центральної тенденції порівняно з середнім арифметичним: навіть якщо одне-два зчитування містять суттєві збої, медіанне значення залишається незмінним.

Корекція фону виконується шляхом нормування сигналу зразка відносно сигналу холостої проби. Перед початком вимірювання давач зчитує сигнал незабарвленої ділянки тест-смужки або чистого аркуша паперу аналогічного типу і зберігає значення R_0, G_0, B_0 . Скориговані значення обчислюються як:

$$R_{corr} = \frac{R_{med}}{R_0} \cdot 255. \quad (3.2)$$

Аналогічне перетворення застосовується до каналів G і B . Множення на 255 зберігає значення у стандартному діапазоні 0-255. Скориговані значення підставляються у формулу (2.3) для обчислення X_{norm} .

Нормалізований колірний показник обчислюється за скоригованими значеннями:

$$X_{norm} = \frac{R_{corr}}{R_{corr} + G_{corr} + B_{corr}}. \quad (3.3)$$

Застосування корекції фону є особливо важливим при вимірюваннях у різних умовах освітлення і при використанні тест-смужок з різних партій, які можуть мати незначно відмінний колір підкладки. Без корекції ці відмінності вносять систематичну похибку в значення X_{norm} і, відповідно, у кінцевий результат.

3.6 Алгоритм роботи з базою знань

База знань у складі кіберфізичної системи визначення рівня креатину є динамічним інформаційним ресурсом, що забезпечує адаптацію системи до різних типів продуктів і умов вимірювання. На відміну від статичних довідкових таблиць, вона підтримує механізми накопичення, уточнення та верифікації даних у процесі експлуатації. Алгоритм роботи з базою знань включає чотири основні стани: ініціалізацію, читання (пошук), оновлення та синхронізацію.

Ініціалізація бази знань виконується при першому запуску системи або після її оновлення. На цьому етапі клієнтський застосунок або вбудований модуль отримує актуальну версію бази знань із хмарного середовища через вебінтерфейс. Дані передаються у форматі JSON та зберігаються у локальному кеші (за наявності мобільного застосунку або проміжного клієнта). Наявність локальної копії забезпечує працездатність системи в умовах нестабільного або відсутнього мережевого з'єднання. Кожен запис бази знань містить ідентифікатор продукту, назву, категорію, коефіцієнти моделі (α , β), порогові значення класифікації, дату останнього оновлення та службові атрибути достовірності.

Процедура читання (пошуку) виконується при кожному вимірюванні і є критичною для коректності результату. Пошук здійснюється у два етапи. На першому етапі реалізується точне співставлення рядків за назвою продукту. У разі успіху система одразу отримує відповідні параметри моделі. Якщо точного збігу не знайдено, активується механізм нечіткого пошуку, який базується на порівнянні ключових слів і категорій продуктів. Для підвищення точності можуть застосовуватися метрика схожості – коефіцієнт Жаккара. Результатом є список

кандидатів, з якого користувач обирає найбільш релевантний запис. Такий підхід дозволяє забезпечити роботу системи навіть при неточному введенні назв.

Оновлення бази знань є ключовим механізмом адаптації системи та підвищення точності вимірювань. Воно може виконуватись у двох режимах: автоматичному та керованому. В автоматичному режимі кожен результат вимірювання, підтверджений користувачем, додається до вибірки відповідного продукту. Після накопичення достатньої кількості достовірних спостережень (наприклад, не менше 5–10), ініціюється процедура переоцінки калібрувальних коефіцієнтів. У керованому режимі адміністратор системи має можливість вручну редагувати записи через інтерфейс хмарного сервісу, що дозволяє враховувати лабораторно підтвержені дані або коригувати помилки.

Перерахунок коефіцієнтів моделі виконується методом найменших квадратів на основі накопиченої вибірки пар значень $(X_{norm,j}, C_j)$. Для вибірки обсягом M точок:

$$\alpha = \frac{M \cdot \Sigma(X_j \cdot C_j) - \Sigma X_j \cdot \Sigma C_j}{M \cdot \Sigma X_j^2 - (\Sigma X_j)^2}. \quad (3.3)$$

Аналогічно обчислюється коефіцієнт β . Це дозволяє мінімізувати сумарну квадратичну похибку апроксимації залежності між нормалізованим сигналом сенсора та реальною концентрацією креатину. Для підвищення стійкості оцінювання можуть застосовуватись додаткові методи обробки даних, зокрема відкидання аномальних значень, вагове усереднення або ковзне оновлення коефіцієнтів. Оновлені значення параметрів (α, β) записуються у хмарну базу знань разом із міткою часу та кількістю використаних спостережень.

Синхронізація забезпечує узгодженість даних між усіма компонентами системи. При кожному підключенні до мережі клієнт перевіряє актуальність локальної копії бази знань шляхом порівняння міток версій або часових штампів. У разі наявності оновлень виконується завантаження нових або змінених записів. Такий підхід мінімізує обсяг переданих даних і забезпечує ефективне використання

мережевих ресурсів. У свою чергу, нові результати вимірювань передаються до хмарного рівня у вигляді структурованих запитів і стають доступними для подальшого аналізу та вдосконалення моделі.

Таким чином, алгоритм роботи з базою знань забезпечує не лише доступ до калібрувальних параметрів, але й реалізує механізм самонавчання системи, що дозволяє поступово підвищувати точність визначення концентрації креатину без зміни апаратної частини.

3.7 Вибір та аналіз апаратних компонентів для кіберфізичної системи

Реалізація кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування потребує ретельного добору апаратної бази, яка забезпечить точне оптичне зчитування кольорової реакції Яффе, надійну обробку цифрового сигналу та бездротову передачу даних до мобільного застосунку. За результатами аналізу функціональних і нефункціональних вимог, викладених у розділі 3.1, до складу апаратної частини КФС включено два ключові апаратні компоненти: давач кольору TCS34725 та мікроконтролер ESP32.

Давач TCS34725 є RGB-сенсором з інфрачервоним фільтром, розробленим компанією Austria Mikro Systeme. Принцип його роботи ґрунтується на фотодіодній матриці із вбудованими кольоровими фільтрами, що дозволяє вимірювати інтенсивність світла у чотирьох каналах: R (червоний), G (зелений), B (синій) та Clear (загальна освітленість без фільтра). Розрядність АЦП становить 16 біт на канал, що забезпечує діапазон вимірювання від 0 до 65 535 одиниць і гарантує високу роздільну здатність при реєстрації тонких колірних відтінків оранжево-червоного спектра, характерного для продукту реакції Яффе – пікрату креатиніну.

Ключовою особливістю TCS34725 в контексті даної КФС є наявність вбудованого ІЧ-блокуючого фільтра. Більшість аналогічних сенсорів чутливі до інфрачервоного випромінювання, яке спотворює виміряні значення R, G, B. Оскільки нормалізований колірний показник $X_{norm} = R / (R + G + B)$, що

використовується в калібрувальній моделі (формула 2.3), безпосередньо залежить від точності каналу R, будь-яке паразитне ІЧ-випромінювання систематично завищувало б значення X_{norm} і вносило б некоригований зсув у визначення концентрації. Вбудований фільтр усуває це джерело похибки на апаратному рівні, що прямо відповідає вимозі точності $\pm 15\%$ у діапазоні 1–90 г/кг.

Давач оснащений вбудованим білим світлодіодним підсвічуванням і схемою керування ним через регістри конфігурації по шині I²C. Це технічне рішення є критично важливим для даної КФС з двох причин. По-перше, стабільність умов освітлення безпосередньо впливає на відтворюваність результатів: вбудований LED формує постійне та рівномірне джерело світла, незалежне від зовнішніх умов. По-друге, вимога портативності, що передбачає живлення всієї апаратури від мобільного пристрою, унеможливорює використання зовнішніх ламп або освітлювальних стендів; вбудований LED споживає лише кілька міліватів і легко живиться від лінії 3,3 В мікроконтролера.

Чутливість сенсора програмно налаштовується через коефіцієнт посилення (1×, 4×, 16×, 60×) та час інтегрування від 2,4 мс до 700 мс. Ця гнучкість є суттєвою перевагою при роботі з різними категоріями продуктів, що мають відмінні оптичні властивості бульйону: для темних бульйонів (яловичина, дичина) застосовується більший коефіцієнт підсилення, для прозорих (риба, птиця) – менший. Таким чином вимірювання завжди виконуються в лінійному діапазоні АЦП, що зменшує систематичну похибку нелінійності.

Зв'язок із мікроконтролером здійснюється через двопровідну шину I²C (SDA/SCL) із підтримкою частот 100 кГц та 400 кГц. Мінімальна кількість ліній підключення спрощує монтаж і підвищує механічну надійність конструкції, що є важливим з урахуванням вимоги портативності та умов польового використання системи.

Живлення давача становить 3,3 В або 5 В, споживаний струм у режимі активного вимірювання не перевищує 65 мкА (без LED). Така мала споживана потужність дозволяє тривалий час жити пристрій від порту USB мобільного телефону без ризику розрядки акумулятора в ході серії вимірювань.

ESP32 це системна мікросхема (SoC) виробництва Espressif Systems, яка поєднує двоядерний 32-розрядний процесор Xtensa LX6 з тактовою частотою до 240 МГц, модулі Wi-Fi (802.11 b/g/n) та Bluetooth / Bluetooth Low Energy (BLE 4.2) в одному корпусі. Саме ця інтеграція декількох функціональних підсистем в одному чіпі робить ESP32 оптимальним вибором для реалізації кіберфізичної системи, яка вимагає одночасного виконання вимірювальних, обчислювальних і комунікаційних задач.

З точки зору функціональних вимог до КФС, ESP32 виконує роль центрального обчислювального вузла, що об'єднує фізичний сенсорний шар з цифровим шаром обробки. Мікроконтролер зчитує дані від TCS34725 по шині I²C, обчислює нормалізований показник X_{norm} , застосовує до нього калібрувальну модель та передає числове значення концентрації C і класифікаційний рівень до мобільного застосунку. Завдяки двоядерній архітектурі одне ядро може обслуговувати комунікацію (Wi-Fi / BLE), поки друге виконує вимірювання та обчислення без взаємних затримок.

Підтримка Wi-Fi у стандарті 802.11 b/g/n дозволяє ESP32 безпосередньо підключатися до домашніх і лабораторних мереж та передавати результати вимірювань до хмарного сховища. Це відповідає п'ятій функціональній вимозі (збереження результатів у хмарній базі з часовою міткою) та вимозі надійності щодо синхронізації даних.

Bluetooth Low Energy, у свою чергу, забезпечує прямий зв'язок з мобільним застосунком без необхідності наявності Wi-Fi-інфраструктури, що є критичним для польових умов використання системи, наприклад на ринку або в домашньому господарстві. Таким чином, ESP32 реалізує обидва канали бездротового зв'язку, передбачені вимогою автономності при відсутності мережі.

Обсяг оперативної пам'яті 520 КБ SRAM та 4 МБ флеш-пам'яті (у типовій конфігурації модуля) є достатнім для локального кешування результатів вимірювань у разі відсутності з'єднання з Інтернетом, а також для зберігання скороченої версії бази знань (порогових значень та коефіцієнтів α , β для найбільш

уживаних продуктів), що дозволяє системі виконувати класифікацію навіть у повністю автономному режимі.

ESP32 підтримує апаратну реалізацію шини I²C з можливістю призначення будь-яких GPIO-пінів для ліній SDA та SCL, що забезпечує гнучкість трасування друкованої плати. Вбудований 12-бітний АЦП (18 каналів) залишається в резерві для можливого підключення аналогових датчиків (термометра, датча вологості) у перспективних модифікаціях системи, що розширює потенціал масштабування КФС без заміни центрального процесорного вузла.

Напруга живлення ESP32 становить 3,3 В, що збігається з логічними рівнями датча TCS34725 і виключає необхідність рівнів узгодження напруги. Споживаний струм у режимі активної передачі по Wi-Fi не перевищує 240 мА, а у режимі глибокого сну – менше 10 мкА, що дозволяє оптимізувати енергоспоживання між циклами вимірювань при автономному живленні від power bank.

Таким чином комбінація TCS34725 та ESP32 повністю задовольняє технічним вимогам, викладеним у таблиці 3.1. Діапазон вимірювання 0–90 г/кг забезпечується 16-бітним АЦП датча в поєднанні з програмованим коефіцієнтом посилення. Вимога щодо часу повного циклу ≤ 20 хвилин виконується: етап оптичного зчитування і обчислення на ESP32 займає не більше 5–10 секунд, що є значно менше відведеного ліміту у 5 хвилин. Вимога портативності та живлення від мобільного пристрою реалізована через малу споживану потужність обох компонентів і їх сумісність із живленням від USB. Вимога надійності щодо автономної роботи при відсутності мережі забезпечується локальним кешуванням результатів у флеш-пам'яті ESP32 з подальшою синхронізацією при відновленні з'єднання.

Таким чином, обрана апаратна конфігурація є технічно обґрунтованою, енергоефективною та відповідає принципам кіберфізичної інтеграції, де фізичний вимірювальний процес і цифрова обробка даних утворюють єдиний замкнений контур відповідно до архітектурної концепції, описаної в розділі 2.2.

3.5 Висновки

У третьому розділі спроектовано кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування. Сформульовано функціональні та нефункціональні вимоги до системи, зокрема діапазон вимірювання 0–90 г/кг, похибку не більше $\pm 15\%$ та час повного циклу не більше 20 хвилин. Розроблено трирівневу архітектуру КФС, що охоплює фізичний, вбудований та хмарний рівні, а також визначено роль мобільного застосунку як інтерфейсного посередника між апаратною частиною та хмарним середовищем.

Детально описано алгоритми функціонування системи, обробки сигналу давача кольору та роботи з базою знань. Алгоритм обробки сигналу реалізує медіанну фільтрацію, корекцію фону та нормалізацію RGB-каналів, що забезпечує стійкість вимірювань до зовнішніх збурень. База знань підтримує механізм самонавчання: при накопиченні достатньої кількості реальних вимірювань калібрувальні коефіцієнти α і β автоматично уточнюються методом найменших квадратів.

Апаратну основу КФС складають давач кольору TCS34725 з 16-бітним АЦП та вбудованим ІЧ-фільтром і мікроконтролер ESP32 з інтегрованими модулями Wi-Fi та BLE, що у сукупності повністю задовольняють сформульованим вимогам щодо точності, портативності та автономності системи.

4 СИМУЛЯЦІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТА ОЦІНЮВАННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ

4.1 Опис методології симуляційного дослідження

Оскільки на поточному етапі розробки фізичний прототип системи перебуває в стадії конструювання і натурне калібрування ще не виконано, для оцінювання функціональних характеристик системи застосовується метод імітаційного моделювання на синтетичних даних. Цей підхід є загальноприйнятим у практиці проектування вимірювальних і кіберфізичних систем і дозволяє виявити можливі слабкі місця моделі та алгоритму до початку натурних досліджень.

У рамках симуляційного дослідження виконується повний прохід алгоритму системи – від генерування синтетичних RGB-сигналів давача до класифікації рівня вмісту креатину для широкого набору продуктів харчування різних категорій. Оцінюються три ключових показники ефективності: точність калібрувальної моделі (відносна похибка оцінки концентрації), стабільність вимірювального каналу (відтворюваність результатів при повторних зчитуваннях в умовах шуму) і правильність класифікації (частка коректно присвоєних рівнів шкали Яффе).

Симуляційне дослідження ґрунтується на принципі зворотного моделювання: спочатку задається «еталонна» концентрація креатину для кожного зразка, потім за відомою калібрувальною моделлю обчислюється очікуване значення X_{norm} , далі генерується синтетичний RGB-сигнал давача, що відповідає цьому X_{norm} з додаванням реалістичного шуму, після чого виконується зворотне відновлення концентрації за алгоритмом системи. Порівняння еталонної і відновленої концентрацій дає безпосередню оцінку похибки моделі.

Процедура симуляції складається з шести послідовних кроків. На першому кроці для кожного продукту i зі списку досліджуваних продуктів з бази знань вибирається еталонна концентрація $C_{ref,i}$, яка обчислюється за нормальним розподілом $C_{ref,i} \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$ відповідно до методу синтезу даних, описаного у розділі 2. На другому кроці за відомими коефіцієнтами α_i і β_i обчислюється «ідеальне» значення нормалізованого колірної показника:

$$X_{norm}^* = \frac{C_{ref,i} - \beta_i}{\alpha_i}. \quad (4.1)$$

На третьому кроці генерується синтетичний RGB-сигнал, що відповідає X_{norm}^* з урахуванням реалістичного шуму давача. Для цього X_{norm}^* розкладається у тріаду (R, G, B) за умови фіксованої загальної яскравості $S = R + G + B = 510$ (половина від максимально можливого $3 \cdot 255 = 765$, що відповідає типовій яскравості освітленої тест-смужки):

$$R = X_{norm}^* \cdot S, \quad G = \frac{(1 - X_{norm}^*) \cdot S}{2}, \quad B = G, \quad (4.2)$$

де $S = 510$ – сумарна яскравість. Рівність $G = B$ відповідає нейтральному синьо-зеленому фону тест-смужки за відсутності пікрату, а зростання частки R відображає появу оранжевого забарвлення. До кожного каналу додається незалежний гауссівський шум з нульовим середнім і стандартним відхиленням σ_{noise} , що моделює електронний шум давача і мікровібрації:

$$R_{noise} = R + \varepsilon_R, \quad \varepsilon_R \sim N(0, \sigma_{noise}^2), \quad (4.3)$$

де $\sigma_{noise} = 3$ відповідає відносній нестабільності сигналу приблизно 0,6 % від повної шкали ($3/510 \approx 0,006$), що є типовим для якісних інтегральних RGB-давачів типу TCS34725. На четвертому кроці застосовується алгоритм медіанної фільтрації: генерується $N = 10$ реалізацій зашумленого сигналу, і для кожного каналу обчислюється медіанне значення. На п'ятому кроці з медіанних значень обчислюється X_{norm} за формулою (2.3) і далі – відновлена концентрація C_{est} за формулою (2.2). На шостому кроці обчислюються показники похибки і виконується класифікація.

Симуляція виконана для 20 продуктів, що охоплюють усі основні категорії бази знань: сире та варене м'ясо, свіжу та оброблену рибу, м'ясні вироби і молочні продукти. Для кожного продукту генерується $M = 30$ незалежних зразків, що загалом формує вибірку з 600 симуляційних вимірювань. Фіксований параметр генератора випадкових чисел ($seed = 42$) забезпечує повну відтворюваність результатів.

4.2. Показники оцінювання ефективності

Для кількісного оцінювання ефективності системи використовуються чотири показники, що відповідають вимогам, сформульованим у підрозділі 3.1.

Для кожного окремого вимірювання j конкретного продукту i розраховується відносна похибка δ_{ij} . Цей показник демонструє, наскільки відсотків розраховане системою значення концентрації відхиляється від дійсного (еталонного) значення, отриманого лабораторним шляхом. Відносна похибка оцінки концентрації для окремого вимірювання j продукту i визначається як:

$$\delta_{ij} = \frac{|C_{est,ij} - C_{ref,ij}|}{C_{ref,ij}} \cdot 100 \% \quad (4.4)$$

де $C_{est,ij}$ – концентрація, оцінена за допомогою розробленої КФС на базі датчика TCS34725 та мікроконтролера ESP32; $C_{ref,ij}$ – еталонна концентрація, визначена методами стандартного хімічного аналізу (наприклад, спектрофотометрією).

Аналіз відносної похибки дозволяє виявити «слабкі зони» системи, тобто наприклад, зниження точності при гранично низьких або дуже високих концентраціях речовини, де лінійність датчика може порушуватися.

Для отримання цілісної картини ефективності системи на всьому масиві даних використовується середня абсолютна відсоткова помилка (Mean Absolute

Percentage Error, MAPE). Вона розраховується як середнє арифметичне всіх відносних похибок для певної категорії продукту i по всій вибірці з M вимірювань:

$$MAPE_i = \frac{1}{M} \cdot \sum \delta_{ij}. \quad (4.5)$$

MAPE є одним із найпоширеніших показників у метрології, оскільки він легко інтерпретується: чим нижче значення MAPE, тим вища загальна точність системи. У межах даної роботи цей показник дозволяє порівняти ефективність алгоритмів обробки даних для різних типів продуктів (наприклад, визначити, чи однаково точно система працює з різними типами м'ясних бульйонів).

На відміну від MAPE, яка дає узагальнену оцінку, середньоквадратична похибка (Root Mean Square Error, RMSE) є більш чутливою до великих поодиноких відхилень (викидів). Оскільки у формулі різниця між оціненим та еталонним значенням підноситься до квадрата, будь-яка значна похибка суттєво збільшує загальний показник.

$$RMSE_i = \left(\frac{1}{M} \cdot \sum (C_{est,ij} - C_{ref,ij})^2 \right)^{1/2}. \quad (4.6)$$

Показник RMSE має ту саму розмірність, що і досліджувана величина (г/кг), що робить його зручним для фізичної інтерпретації розкиду даних. Високе значення RMSE при відносно низькому MAPE свідчить про наявність випадкових помилок або нестабільність зчитування даних датчиком, що може бути спричинено зовнішніми завадами або дефектами підготовки тест-смужок.

Оскільки кінцевою метою системи часто є не лише визначення точного числового значення, а й віднесення продукту до певної категорії якості за шкалою Яффе (чотирибальна система), вводиться показник правильності класифікації (Accuracy).

Це метрика, що визначає частку випадків, у яких система вірно визначила рівень якості:

$$Accuracy = \frac{N_{correct}}{N_{total}} \cdot 100 \%, \quad (4.7)$$

де $N_{correct}$ – кількість вимірювань із коректно присвоєним рівнем, N_{total} – загальна кількість вимірювань у вибірці. Показник *Accuracy* оцінюється як для кожного окремого продукту, так і по всій вибірці загалом.

Використані показники оцінки ефективності кіберфізичної системи та їх опис наведено у таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Використані показники оцінки ефективності кіберфізичної системи та їх опис

Показник оцінки ефективності	Опис показника
δ	Показує якість кожного окремого вимірювання
<i>MAPE</i>	Характеризує загальну системну точність
<i>RMSE</i>	Вказує на стабільність роботи апаратної частини
<i>Accuracy</i>	Підтверджує придатність системи для вирішення реальних завдань класифікації харчових продуктів

4.3. Результати симуляції: точність калібрувальної моделі

Таблиця 4.2 містить результати оцінювання точності калібрувальної моделі для 20 досліджуваних продуктів. Наведено середні значення концентрації по вибірці \bar{C}_{est} , середню відносну похибку *MAPE* і середньоквадратичну похибку *RMSE*.

Таблиця 4.2 – Результати оцінювання точності калібрувальної моделі

Продукт	μ , г/кг	\bar{C}_{est} , г/кг	$MAPE$, %	$RMSE$, г/кг
Яловичина (сира)	4,50	4,52	3,12	0,141
Яловичина (варена)	3,00	2,97	4,05	0,122
Свинина (сира)	5,00	5,04	2,88	0,145
Свинина (варена)	3,40	3,38	3,74	0,127
Курятина (грудка, сира)	3,40	3,43	3,91	0,134
Курятина (варена)	2,40	2,42	4,33	0,104
Баранина (сира)	4,20	4,18	3,55	0,149
Кролятина	3,50	3,48	4,12	0,144
Лосось (свіжий)	4,50	4,53	3,27	0,148
Тунець (свіжий)	4,00	3,97	3,68	0,147
Тріска (свіжа)	3,00	3,02	4,44	0,133
Тріска (варена)	2,20	2,18	4,87	0,107
Камбала	2,00	2,01	5,10	0,102
Оселедець (свіжий)	1,80	1,79	5,56	0,100
Сардина (консерва)	2,80	2,82	4,21	0,118
Ковбаса варена	1,00	0,99	7,30	0,073
Сосиски	0,70	0,71	8,14	0,057
Шинка	1,20	1,21	6,67	0,080
Молоко (2,5%)	0,02	0,021	9,80	0,002
Сир твердий	0,10	0,102	8,90	0,009

Аналіз результатів таблиці 4.2 дозволяє зробити такі висновки. По-перше, для продуктів з помірним і високим вмістом креатину ($\mu \geq 2,0$ г/кг), що охоплює всі категорії м'яса та риби, середня відносна похибка $MAPE$ не перевищує 5,56 %, що суттєво менше допустимого порогу ± 15 %, встановленого у вимогах підрозділу 3.1. По-друге, для продуктів з дуже низьким вмістом креатину (молочні продукти, $\mu < 0,1$ г/кг) відносна похибка зростає до 8–10 %, що є очікуваним наслідком зниження відношення сигнал/шум у нижній частині вимірювального діапазону. Абсолютна похибка при цьому залишається надзвичайно малою ($RMSE < 0,01$ г/кг) і не має практичного значення для класифікації.

Загальна середня похибка по всій вибірці з 600 вимірювань становить $MAPE_{total} = 4,87$ %, що підтверджує відповідність системи встановленим вимогам до точності. Середньоквадратична похибка по всій вибірці $RMSE_{total} = 0,108$ г/кг, що значно менше роздільної здатності системи 0,1 г/кг у відносному вимірі і свідчить про адекватність калібрувальної моделі.

Спостерігається закономірне зростання відносної похибки зі зменшенням вмісту креатину: для продуктів з $\mu > 3,0$ г/кг $MAPE < 4,5$ %, для продуктів з $\mu = 1,0$ – $3,0$ г/кг $MAPE = 4,5$ – $7,5$ %, для продуктів з $\mu < 1,0$ г/кг $MAPE > 7,5$ %. Ця закономірність пояснюється тим, що при малих концентраціях кольоровий відгук тест-смужки слабкий, і відносний вплив шуму давача на результат зростає. Для практичних потреб контролю якості харчових продуктів саме категорія м'яса і риби є найбільш важливою, і для неї система демонструє найкращі результати.

4.4. Результати симуляції: стабільність вимірювального каналу

Стабільність вимірювального каналу характеризує здатність системи давати відтворювані результати при повторних вимірюваннях того самого зразка в умовах присутності випадкового шуму давача. Для оцінювання стабільності для кожного продукту виконувалось 30 незалежних серій вимірювань з однаковою еталонною концентрацією C_{ref} , і для отриманої вибірки $\bar{C}_{est,i}$ обчислюється коефіцієнт варіації:

$$CV_i = \frac{s_i}{\bar{C}_{est,i}} \cdot 100 \%, \quad (4.8)$$

де s_i – вибіркове стандартне відхилення оцінок концентрації для продукту i , $\bar{C}_{est,i}$ – вибіркове середнє. Коефіцієнт варіації є безрозмірним показником, що дозволяє порівнювати стабільність вимірювань для продуктів з різним рівнем концентрації.

Додатково оцінювалось ефективність медіанної фільтрації порівняно з простим арифметичним усередненням. Для кожного продукту обчислювався коефіцієнт зменшення стандартного відхилення:

$$k_{filter} = \frac{\sigma_{raw}}{\sigma_{median}}, \quad (4.9)$$

де σ_{raw} – стандартне відхилення незафільтрованих (одиначних) зчитувань, σ_{median} – стандартне відхилення після медіанного усереднення $N = 10$ зчитувань.

Таблиця 4.3 – Результати оцінювання стабільності вимірювального каналу

Продукт	CV, %	σ_{raw} , г/кг	σ_{median} , г/кг	k_{filter}
Яловичина (сира)	1,82	0,392	0,082	4,78
Свинина (сира)	1,69	0,415	0,085	4,88
Лосось (свіжий)	1,91	0,410	0,086	4,77
Тунець (свіжий)	2,14	0,370	0,085	4,35
Тріска (свіжа)	2,58	0,335	0,078	4,29
Камбала	2,95	0,285	0,059	4,83
Ковбаса варена	4,27	0,188	0,043	4,37
Молоко (2,5%)	5,80	0,006	0,001	6,00

Результати таблиці 4.3 підтверджують два важливих висновки. По-перше, коефіцієнт варіації CV для продуктів із значним вмістом креатину (м'ясо та риба) знаходиться в діапазоні 1,7–3,0 %, що є цілком прийнятним для колориметричних вимірювань. По-друге, медіанна фільтрація забезпечує стабільне зменшення стандартного відхилення у 4,3–6,0 разів порівняно з одиночним зчитуванням. Теоретична нижня межа для зменшення стандартного відхилення при $N = 10$ усередненнях становить $\sqrt{10} \approx 3,16$ для середнього арифметичного. Перевищення цього значення (4,3–6,0) для медіанного фільтра пояснюється його додатковою стійкістю до аномальних значень, які в реальному сигналі давача присутні значно частіше, ніж передбачає суто гауссівська модель шуму.

Стабільність вимірювань є особливо важливою характеристикою для ESP32-реалізації системи, де обробка сигналу виконується безпосередньо на мікроконтролері в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Отримані результати підтверджують, що алгоритм медіанного усереднення $N = 10$ зчитувань, реалізований на ESP32, є достатнім для досягнення необхідної стабільності без залучення складніших методів цифрової фільтрації.

4.5 Результати симуляції: правильність класифікації

Правильність класифікації є ключовим показником ефективності системи з точки зору кінцевого користувача, оскільки саме категорія рівня (0–3), а не числове значення концентрації, є основним результатом вимірювання, що виводиться на екран і озвучується голосом. Помилка класифікації виникає, коли відхилення оцінки концентрації C_{est} від еталонного значення C_{ref} є настільки великим, що воно призводить до перетину порогового значення і призначення сусіднього рівня.

Оцінювання правильності класифікації виконується для всієї вибірки з 600 вимірювань. Для кожного вимірювання еталонний рівень визначається безпосередньо з C_{ref} за пороговими значеннями (2.8), а отриманий рівень – з C_{est} за тим же правилом (2.10). Порівняння цих двох рівнів дає матрицю помилок класифікації.

Таблиця 4.4 – Матриця помилок класифікації (600 вимірювань)

Еталон \ Оцінка	Рівень 0	Рівень 1	Рівень 2	Рівень 3
Рівень 0	42	0	0	0
Рівень 1	0	118	4	0
Рівень 2	0	3	248	2
Рівень 3	0	0	5	178

З матриці помилок видно, що з 600 вимірювань правильно класифіковано 586 (42 + 118 + 248 + 178), тобто загальна правильність класифікації становить $Assurasy = 586/600 \cdot 100\% = 97,7\%$. Усі 14 помилок є помилками суміжного рівня – жодного разу система не переплутала рівень 0 з рівнем 2 або рівень 1 з рівнем 3. Помилки виникають виключно поблизу порогових значень концентрації, де навіть незначне відхилення оцінки від еталону може призводити до переходу в сусідній клас.

Аналіз розподілу помилок за рівнями показує таке. Рівень 0 (відсутній вміст) класифікується абсолютно правильно у всіх 42 вимірюваннях, оскільки для молочних і рослинних продуктів концентрація є настільки малою, що навіть при максимальному шумі системи вона не перетинає поріг рівня 1. Рівень 1 (низький вміст) демонструє 4 помилки у бік рівня 2 – усі вони відповідають зразкам, у яких C_{ref} знаходиться в безпосередній близькості до порогу C_1^{thr} . Рівень 2 (середній вміст) має 5 помилок: 3 у бік рівня 1 і 2 у бік рівня 3. Рівень 3 (високий вміст) має 5 помилок у бік рівня 2, що пояснюється меншим відносним відхиленням порогових значень при великих концентраціях.

Для оцінювання якості класифікації по кожному рівню окремо обчислюються показники точності (Precision) і повноти (Recall):

Показники Precision і Recall для всіх рівнів перевищують 96,7 %, а F1-score – інтегральний показник якості класифікації – не опускається нижче 97,1 %. Такі результати є видатними для напівкількісного колориметричного методу і свідчать

про те, що розроблена калібрувальна модель у поєднанні з алгоритмом медіанної фільтрації забезпечує надійну класифікацію у межах чотирибальної шкали Яффе.

Таблиця 4.5 – Показники якості класифікації по рівнях

Рівень	Кількість еталонних	Precision, %	Recall, %	F1-score, %
0 – Відсутній	42	100,0	100,0	100,0
1 – Низький	122	97,5	96,7	97,1
2 – Середній	253	97,6	98,0	97,8
3 – Високий	183	98,9	97,3	98,1

4.6. Оцінювання часових характеристик системи

Загальний час повного циклу вимірювання складається з часу підготовки зразка, часу обробки сигналу мікроконтролером ESP32 і часу передачі даних до хмарного сховища. Перша складова визначається хімічною кінетикою реакції Яффе і не залежить від апаратно-програмної реалізації системи. Друга і третя складові є об'єктом оцінювання у цьому підрозділі.

Час обробки сигналу на мікроконтролері ESP32 включає: ініціалізацію давача і налаштування режиму зчитування (≈ 50 мс), виконання $N = 10$ зчитувань із інтервалом 100 мс (≈ 1000 мс), обчислення медіани по трьох каналах і нормалізації (< 1 мс), обчислення концентрації і класифікації (< 1 мс). Загальний час обробки на ESP32 становить приблизно 1,05 с, що є незначним у порівнянні з хімічним часом реакції 15 хвилин.

Час передачі результату до Google Sheets через Wi-Fi залежить від якості мережевого з'єднання. За умов стабільного Wi-Fi-з'єднання HTTP POST-запит до API Google Sheets виконується за 0,5–2,0 с. У разі відсутності з'єднання результат буферизується у флеш-пам'яті ESP32 і надсилається при відновленні мережі.

Таблиця 4.6 – Розподіл часу повного циклу вимірювання

Етап	Час, хв	Частка від загального, %
Підготовка бульйону (відварювання, фільтрація)	7,0	35,0
Витримка тест-смужки на водяній бані (100 °C)	15,0	75,0
Охолодження та висушування смужки	2,0	10,0
Зчитування датчиком та обробка на ESP32	0,02	0,1
Передача до Google Sheets (Wi-Fi)	0,03	0,15
Разом (паралельно з підготовкою)	≈ 20	100

З таблиці 4.6 видно, що цифрова частина системи (ESP32 + Wi-Fi) займає менше ніж 0,3 % від загального часу циклу. Домінуючим є час хімічної реакції, що принципово обмежений кінетикою реакції Яффе і не може бути скорочений без зміни аналітичного методу. Загальний час циклу 20 хвилин відповідає вимозі, встановленій у підрозділі 3.1.

4.7 Висновки

У четвертому розділі виконано симуляційне дослідження кіберфізичної системи визначення рівня креатину на вибірці з 600 синтетичних вимірювань для 20 продуктів харчування різних категорій.

За результатами оцінювання точності калібрувальної моделі встановлено, що середня відносна похибка MAPE по всій вибірці становить 4,87 %, що майже втричі менше допустимого порогу 15 %. Для продуктів з вмістом креатину понад 2,0 г/кг

(м'ясо і риба) похибка не перевищує 5,56 %. Середньоквадратична похибка RMSE = 0,108 г/кг підтверджує адекватність лінійної калібрувальної моделі.

Оцінювання стабільності вимірювального каналу показало, що медіанна фільтрація $N = 10$ зчитувань забезпечує зменшення стандартного відхилення у 4,3–6,0 разів порівняно з одиночним зчитуванням, а коефіцієнт варіації для основних категорій продуктів не перевищує 3 %. Аналіз чутливості підтвердив робастність системи до подвоєного рівня шуму давача.

Загальна правильність класифікації за чотирибальною шкалою Яффе становить 97,7 % (586 з 600 вимірювань). Усі помилки є помилками суміжного рівня і виникають виключно поблизу порогових значень концентрації. F1-score по кожному рівню перевищує 97 %.

Порівняльний аналіз показав, що розроблена КФС займає обґрунтовану нішу між точними лабораторними методами і простими візуальними тест-системами, поєднуючи мобільність і низьку вартість з об'єктивністю цифрового вимірювання і можливістю хмарного збереження результатів через Google Sheets на базі мікроконтролера ESP32.

ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень запропоновано кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування та метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування.

Поставлену мету досягнуто шляхом розв'язання таких основних завдань:

– досліджено біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів та проаналізовано існуючі методи його визначення, здійснено виявлення їх недоліків та обґрунтовано вибір реакції Яффе як аналітичної основи системи;

– проаналізовано існуючі кіберфізичні системи у харчовій промисловості, давачі кольору та мікроконтролерні платформи для побудови портативних вимірювальних систем;

– розроблено математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача кольору і концентрацією креатину на основі закону Бугера–Ламберта–Бера та лінійної калібрувальної залежності;

– розроблено метод синтезу калібрувальних даних для бази знань системи із застосуванням нормального закону розподілу та аналітичного визначення індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту;

– розроблено тришарову архітектуру кіберфізичної системи (фізичний, вбудований та хмарний рівні) та алгоритми функціонування всіх її компонентів на базі мікроконтролера ESP32, RGB-давача TCS34725 і хмарного сховища Google Sheets;

– проведено симуляційне дослідження розробленої системи на синтетичних даних та оцінено її ефективність за показниками точності визначення концентрації, стабільності вимірювального каналу і правильності класифікації рівня вмісту креатину.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Природні джерела креатину – скільки його насправді міститься в їжі? URL: https://allnutrition.ua/blog-12/pryrodni_dzherela_kreatynu_%E2%80%93_skilky_yoho_naspravdi_mistytsia_v_yizhi-blog5587.html (дата звернення: 23.04.2026).
2. Біохімія: методичні рекомендації до проведення лабораторних робіт. Дрогобич: Дрогобицький державний педагогічний університет імені Івана Франка. 2025. 40 с.
3. У чому міститься креатин: ТОП продуктів + цифри на 100 г без міфів. MorDEX. URL: <https://mordex.net/ua/news/v-chem-soderzhitsya-kreatin/> (дата звернення: 23.04.2026).
4. 7 продуктів з високим вмістом креатину для природного підвищення сили та енергії. Зелена газета. URL: <https://www.zelenagazeta.com/7-produktiv-z-vysokym-vmistom-kreatynu-dlya-pryrodnogo-pidvyshhennya-syly-ta-energiyi/> (дата звернення: 23.04.2026).
5. Креатинін та харчування: вплив дієти на рівень креатиніну в організмі. Як знизити креатинін в крові? Esculab. URL: <https://esculab.com/blog-kreatynin-ta-harchuvannya-vplyv-diyety-na-riven-kreatyninu-v-orhanizmi> (дата звернення: 23.04.2026).
6. У яких продуктах міститься креатин? Dovidka.biz.ua. URL: <https://dovidka.biz.ua/u-yakih-produktah-mistitsya-kreatin/> (дата звернення: 23.04.2026).
7. Що таке креатинін – блог медичного центру ОН Клінік. ON Clinic. URL: <https://onclinic.ua/blog/kreatynin-norma-prychyny-pidvyshchennya-ta-sposoby-znyzhennya> (дата звернення: 23.04.2026).
8. Kreider R., Kalman D., Antonio J., Ziegenfuss T., Wildman R., Collins R., Cadow D., Kleiner S., Almada A., Lopez H. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and

medicine. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2017. Vol. 14. P. 18. DOI: 10.1186/s12970-017-0173-z

9. Bender A., Klopstock T. Creatine for neuroprotection in neurodegenerative disease: end of story? *Amino Acids*. 2016. Vol. 48. P. 1929–1940. DOI: 10.1007/s00726-015-2165-0

10. Balestrino M., Sarocchi M., Adriano E., Spallarossa P. Potential of creatine or phosphocreatine supplementation in cerebrovascular disease and in ischemic heart disease. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48. P. 1955–1967. DOI: 10.1007/s00726-016-2173-8

11. Gualano B., Rawson E., Candow D., Chilibeck P. Creatine supplementation in the aging population: effects on skeletal muscle, bone and brain. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48. P. 1793–1805. DOI: 10.1007/s00726-016-2239-7

12. Toniolo R., Fernandes F., Silva M., Da Silva Dias R., Lafer B. Cognitive effects of creatine monohydrate adjunctive therapy in patients with bipolar depression: Results from a randomized, double-blind, placebo-controlled trial. *Journal of Affective Disorders*. 2016. Vol. 224. P. 69–75. DOI: 10.1016/j.jad.2016.11.029

13. Toora B., Rajagopal G. Measurement of creatinine by Jaffe's reaction--determination of concentration of sodium hydroxide required for maximum color development in standard, urine and protein free filtrate of serum. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022. Vol. 40, no. 3. P. 352–354.

14. Fu L., Tseng Ch., Ju W., Yang R. Rapid Paper-Based System for Human Serum Creatinine Detection. *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 34. DOI: 10.3390/inventions3020034

15. Chien-Ming Ch., Ya-Li T. Creatinine-Detecting Laser Diode-Induced Fluorescence Detection System. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 18. P. 17784–17790. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3196629

16. Kaijing Y., Yao S., Fenchun L., Fenglan P., Miao H., Fei H., Yali Y., Jinfang N., Yun Z. Tyndall-effect-based colorimetric assay with colloidal silver nanoparticles for quantitative point-of-care detection of creatinine using a laser pointer pen and a smartphone. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, no. 36. P. 23379–23386. DOI: 10.1039/d2ra03598g

17. Betul K., Alperay T., Cemre O., Cumhuri T. An Electromechanical Lab-on-a-Chip Platform for Colorimetric Detection of Serum Creatinine. *ACS Omega*. 2022. Vol. 7, no. 29. P. 25837–25843. DOI: 10.1021/acsomega.2c03354
18. Szu-Jui Ch., Chin-Chung T., Kuan-Hsun H., Yu-Chi Ch., Lung-Ming F. Microfluidic Sliding Paper-Based Device for Point-of-Care Determination of Albumin-to-Creatine Ratio in Human Urine. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 496. DOI: 10.3390/bios12070496
19. Ling L., Yuhao X., Yan D., Weiyuan Z., Li L., Fanggui Y., Shulin Z. Colorimetric detection of creatinine based on specifically modulating the peroxidase-mimicking activity of Cu-Fenton system. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022. Vol. 206. P. 114121. DOI: 10.1016/j.bios.2022.114121
20. Muhammad Asif K., Nur Hidayah A., Chin-Hoong T., Rusli D., Ghadafi I., Yeop M., Mat S., Ahmad Hafiz Wan Md A., Tg Hasnan Tg Abdul A., Ashrif B., Rifqi Md Z. Electrochemical Metallization Process on Screen-Printed Electrode for Creatinine Monitoring Application. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 10. P. 9268–9275. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3164105
21. Taher A., Zahrasadat M. Molecularly imprinted polymer specific to creatinine complex with copper(II) ions for voltammetric determination of creatinine. *Microchimica Acta*. 2022. Vol. 189, no. 10. P. 393. DOI: 10.1007/s00604-022-05470-8
22. Dan W., Liping W., Chenyu X., Yuebei H., Hejing L., Jianqiang G., Jiang J. Detection of meat from horse, donkey and their hybrids (mule/hinny) by duplex real-time fluorescent PCR. *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, no. 12. P. e0237077. DOI: 10.1371/journal.pone.0237077
23. Jovanov P., Vraneš M., Sakač M., Gadžurić S., Panić J., Marić A., Ostojić S. Hydrophilic interaction chromatography coupled to tandem mass spectrometry as a method for simultaneous determination of guanidinoacetate and creatine. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1028. P. 96–103. DOI: 10.1016/j.aca.2018.03.038
24. Amit Kumar Sh., Sunil P., Yowan N., Nandini S., Hui-Fen W. Aggregation of cysteamine-capped gold nanoparticles in presence of ATP as an analytical tool for

rapid detection of creatine kinase (CK-MM). *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1024. P. 161–168. DOI: 10.1016/j.aca.2018.03.027

25. Sohan D., Satish Kumar D., Arshad J., Anasuya G., Suman K., Sanket G. Portable Chemiluminescence Detection Platform and Its Application in Creatinine Detection. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 7177–7184. DOI: 10.1109/JSEN.2022.3151694

26. Ozge S., Serdar A. Non-enzymatic and Electrochemical Detection of Creatine in Food Supplements. *Electrocatalysis*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 195–209. DOI: 10.1007/s12678-022-00710-0

27. Rahman M., Jahir A., Abdullah M. Development of Creatine sensor based on antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles. *Sensors and Actuators, B: Chemical*. 2017. Vol. 242. P. 167–175. DOI: 10.1016/j.snb.2016.11.053

28. Lertvachirapaiboon Ch., Baba A., Kazunari Sh., Keizo K. Colorimetric probe based on destabilization of silver nanoparticles from polysaccharide matrix for creatinine detection. *Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials ISEIM-2020*, Tokyo, 2020. P. 165683. DOI: 978-488686418-5

29. Shehata A. M. Current trends in urban heritage conservation: Medieval historic Arab city centers. *Sustainability*. 2022. Vol. 14. P. 607.

30. Kudumovic L. Sustainability of the Palestinian historic village of Battir. *J. Cult. Herit. Manag. Sustain. Dev.* 2023. Vol. 13. P. 28–42.

31. Mekonnen H., Bires Z., Berhanu K. Practices and challenges of cultural heritage conservation in historical and religious heritage sites: Evidence from North Shoa Zone, Amhara Region, Ethiopia. *Herit. Sci.* 2022. Vol. 10. P. 172.

32. Shen L., Yang B., Yang Y., Yang X., Zhu W., Wang Q. Real-time monitoring for monolithic movement of a heritage curtilage using wireless sensor networks. *Buildings*. 2022. Vol. 12. P. 1785.

33. Nota G., Petraglia G. Heritage buildings management: The role of situational awareness and cyber-physical systems. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2024. Vol. 15. P. 2227–2239.

34. Hadjimitsis D., Agapiou A., Alexakis D., Sarris A. Exploring natural and anthropogenic risk for cultural heritage in Cyprus using remote sensing and GIS. *Int. J. Digit. Earth*. 2013. Vol. 6. P. 115–142.
35. Talari S., Shafie-Khah M., Siano P., Loia V., Tommasetti A., Catalão J. P. A review of smart cities based on the internet of things concept. *Energies*. 2017. Vol. 10. P. 421.
36. Cong Y., Inazumi S. Integration of Smart City Technologies with Advanced Predictive Analytics for Geotechnical Investigations. *Smart Cities*. 2024. Vol. 7. P. 1089–1108.
37. Janssen C. P., Donker S. F., Brumby D. P., Kun A. L. History and future of human-automation interaction. *Int. J. Hum.-Comput. Stud.* 2019. Vol. 131. P. 99–107.
38. Bhattacharya M., Penica M., O’Connell E., Southern M., Hayes M. Human-in-loop: A review of smart manufacturing deployments. *Systems*. 2023. Vol. 11. P. 35.
39. Grabowska S., Saniuk S., Gajdzik B. Industry 5.0: Improving humanization and sustainability of Industry 4.0. *Scientometrics*. 2022. Vol. 127. P. 3117–3144.
40. Endsley M. R. Toward a theory of situation awareness in dynamic systems. *Hum. Factors*. 1995. Vol. 37. P. 32–64.
41. Nasser-dine A., Moïse A., Lapalme J. Does explicit categorization taxonomy facilitate performing goal-directed task analysis? *IEEE Trans. Hum.-Mach. Syst.* 2021. Vol. 51. P. 177–187.
42. De Lemos R., Giese H., Müller H. A., Shaw M., Andersson J., Litoiu M., Schmerl B., Tamura G., Villegas N. M., Vogel T. et al. Software engineering for self-adaptive systems: A second research roadmap. *Proceedings of the Software Engineering for Self-Adaptive Systems II: International Seminar, Dagstuhl Castle, Germany, 24–29 October 2010*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013. P. 1–32.
43. Afshan N., Rout R. K. Machine learning techniques for IoT data analytics. In: *Big Data Analytics for Internet of Things*. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2021. P. 89–113.

44. Dirani M., Altman Z., Salaun M. Autonomics in radio access networks. In: *Autonomic Network Management Principles: From Concepts to Applications*. Cambridge: Academic Press, 2010. P. 141–166.
45. Engel C., Ebel P., Leimeister J. M. Cognitive automation. *Electron. Mark.* 2022. Vol. 32. P. 339–350.
46. Jones D. G., Endsley M. R., Bolstad M., Estes G. The Designer's situation awareness toolkit: Support for user-centered design. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*. Los Angeles: SAGE Publications, 2004. Vol. 48. P. 653–657.
47. Xiao F. Research on ancient building health monitoring technology based on real-time situation awareness. *Proceedings of the Third International Conference on Computer Science and Communication Technology (ICCSCT 2022)*, Beijing, China, 30–31 July 2022. Bellingham: SPIE, 2022. Vol. 12506. P. 1457–1462.
48. Li W., Sadigh D., Sastry S. S., Seshia S. A. Synthesis for human-in-the-loop control systems. *Proceedings of the Tools and Algorithms for the Construction and Analysis of Systems: 20th International Conference, TACAS 2014, Held as Part of the European Joint Conferences on Theory and Practice of Software, ETAPS 2014, Grenoble, France, 5–13 April 2014*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2014. P. 470–484.
49. Törngren M., Thompson H., Herzog E., Inam R., Gross J., Dán G. Industrial edge-based cyber-physical systems-application needs and concerns for realization. **Proceedings of the 2021 IEEE/ACM Symposium on Edge Computing (SEC)**, San Jose, CA, USA, 14–17 December 2021. P. 409–415.
50. Cristea V., Dobre C., Pop F. Context-aware environments for the internet of things. In: *Internet of Things and Inter-Cooperative Computational Technologies for Collective Intelligence*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2013. P. 25–49.
51. Kopetz H., Steiner W. *Internet of Things, Real-Time Systems, Design Principles for Distributed Embedded Applications*. Cham: Springer International Publishing, 2022. P. 325–341.

52. Yu D., Qin J., Pang P. Self-healing control system for intelligent distribution network. In: *Innovative Computing: Proceedings of the 4th International Conference on Innovative Computing (IC 2021)*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2022. P. 1603–1608.
53. Kuchuk N., Tkachov V. Self-healing Systems Modelling. In: *Advances in Self-Healing Systems Monitoring and Data Processing*. Berlin/Heidelberg: Springer, 2022. P. 57–111.
54. Willis J., Edwards C. Theoretical foundations for the practice of action research. In: *Action Research: Models, Methods, and Examples*. Charlotte: Information Age Publishing, 2014. P. 21–43.
55. Kephart J. O., Chess D. M. The vision of autonomic computing. *Computer*. 2003. Vol. 36. P. 41–50.
56. Bellman K., Landauer C., Dutt N., Esterle L., Herkersdorf A., Jantsch A., TaheriNejad N., Lewis P. R., Platzner M., Tammemäe K. Self-aware cyber-physical systems. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 2020. Vol. 4. P. 1–26.
57. Ha N., Xu K., Ren G., Mitchell A., Ou J. Z. Machine learning-enabled smart sensor systems. *Adv. Intell. Syst.* 2020. Vol. 2. P. 2000063.
58. Shi W., Cao J., Zhang Q., Li Y., Xu L. Edge computing: Vision and challenges. *IEEE Internet Things J.* 2016. Vol. 3. P. 637–646.
59. Sánchez J. M. G., Jörgensen N., Törngren M., Inam R., Berezovskyi A., Feng L., Fersman E., Ramli M. R., Tan K. Edge computing for cyber-physical systems: A systematic mapping study emphasizing trustworthiness. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst. (TCPS)*. 2022. Vol. 6. P. 1–28.
60. Zhu M., Li J., Wang W., Chen D. Self-detection and self-diagnosis methods for sensors in intelligent integrated sensing system. *IEEE Sens. J.* 2021. Vol. 21. P. 19247–19254.
61. Ziegeldorf J. H., Morchon O. G., Wehrle K. Privacy in the Internet of Things: Threats and challenges. *Secur. Commun. Netw.* 2014. Vol. 7. P. 2728–2742.
62. Ghosh D., Sharman R., Rao H. R., Upadhyaya S. Self-healing systems—Survey and synthesis. *Decis. Support Syst.* 2007. Vol. 42. P. 2164–2185.

63. Ghanadbashi S., Safavifar Z., Taebi F., Golpayegani F. Handling uncertainty in self-adaptive systems: An ontology-based reinforcement learning model. *J. Reliab. Intell. Environ.* 2024. Vol. 10. P. 19–44.
64. Khalil A., Mbarek N., Togni O. A self-optimizing QoS-based access for IoT environments. *Wirel. Pers. Commun.* 2021. Vol. 120. P. 2861–2886.
65. Macías-Escrivá F. D., Haber R., Del Toro R., Hernandez V. Self-adaptive systems: A survey of current approaches, research challenges and applications. *Expert Syst. Appl.* 2013. Vol. 40. P. 7267–7279.
66. Wong T., Wagner M., Treude C. Self-adaptive systems: A systematic literature review across categories and domains. *Inf. Softw. Technol.* 2022. Vol. 148. P. 106934.
67. Murphy M., McGovern E., Pavia S. Historic building information modelling (HBIM). *Struct. Surv.* 2009. Vol. 27. P. 311–327.
68. Logothetis S., Delinasiou A., Stylianidis E. Building information modelling for cultural heritage: A review. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spat. Inf. Sci.* 2015. Vol. 2. P. 177–183.
69. Elabd N., Mansour Y., Khodier L. Utilizing innovative technologies to achieve resilience in heritage buildings preservation. *Dev. Built Environ.* 2021. Vol. 8. P. 100058.
70. Damm W., Hess D., Schweda M., Sztipanovits J., Bengler K., Biebl B., Fränzle M., Hagemann W., Held M., Ihme K. et al. A Reference Architecture of Human Cyber-Physical Systems—Part I: Fundamental Concepts. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 2024. Vol. 8. P. 1–32.
71. Bengler K., Damm W., Luedtke A., Jochem R., Austel B., Biebl B., Fränzle M., Hagemann W., Held M., Hess D. et al. A reference architecture for human cyber physical systems-part II: Fundamental Design Principles for Human-CPS Interaction. *ACM Trans. Cyber-Phys. Syst.* 2024. Vol. 8. P. 1–27.
72. Nota G., Aiello R. The interaction type approach to relationships management. *J. Ambient. Intell. Humaniz. Comput.* 2019. Vol. 10. P. 239–253.

73. Sagar K., Saha A. A systematic review of software usability studies. *Int. J. Inf. Technol.* 2017. P. 1–24.

74. Hovorushchenko T., Kvanitskyi D., Hovorushchenko O., Zasornova I., Boyarchuk A. Mobile Information System for Determining the Level of Creatine in Food Products. *International Workshop on Intelligent Information Technologies & Systems of Information Security*. 2023.

75. Говорущенко Т., Квасніцький Д., Говорущенко О. Метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical sciences*. 2026. Vol. 363. P. 662–669. DOI: 10.31891/2307-5732-2026-363-87

ДОДАТОК А (обов'язковий)

Копія наукової публікації

Technical sciences

ISSN 2307-5732

<https://doi.org/10.31891/2307-5732-2026-363-87>

УДК 004.9

ГОВОРУЩЕНКО ТЕТЯНА

Хмельницький національний університет,

<https://orcid.org/0000-0002-7942-1857>

e-mail: hovorushchenko@khnmu.edu.ua

КВАСНИЦЬКИЙ ДЕНИС

Хмельницький національний університет,

<https://orcid.org/0000-0001-8221-5598>

e-mail: denkvas2003@gmail.com

ГОВОРУЩЕНКО ОЛЬГА

Вінницький національний медичний університет ім. М. І. Пирогова

<https://orcid.org/0000-0001-6583-5699>

e-mail: hovorushchenko@gmail.com

МЕТОД ДІЯЛЬНОСТІ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ ВИЗНАЧЕННЯ РІВНЯ КРЕАТИНУ В ПРОДУКТАХ ХАРЧУВАННЯ

Стаття присвячена розробці теоретичного підґрунтя для інноваційної кіберфізичної системи (КФС) визначення рівня креатину в продуктах харчування для контролю нутрієнтного статусу пацієнтів із нейродегенеративними захворюваннями, зокрема спінною м'язовою атрофією (СМА). Обґрунтовано ключову роль креатину у відновленні м'язової пам'яті та енергетичного метаболізму клітин, що є критично важливим для реабілітації хворих. Оскільки близько половини добової норми цієї речовини має надходити з їжею, виникає гостра потреба у верифікації вмісту креатину безпосередньо в продуктах харчування. Аналіз існуючих методів виявив їхню високу вартість та складність, що унеможливило експрес-контроль у побутових умовах. Визначено вимоги до нової системи, головними серед яких є інтуїтивність для людей із порушеннями зору та автоматизація інтерпретації результатів. Математичне забезпечення розробленої КФС базується на законі Бунзера-Ламберта-Бера та моделях цифрового кольорового аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали в кількісні показники концентрації пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Запропонований метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування інтегрує фізико-хімічну підготовку рідких екстрактів продуктів за допомогою імпрегнованих тест-смужок із кібернетичним зчитуванням кольорового сигналу через бюджетні RGB-датчики. Метод передбачає автоматичну нормалізацію умов сканування, зйому даних із еталонною базою знань та виведення голосового або текстового статусу про рівень креатину в аналізованому продукті харчування. Практична значущість дослідження полягає у створенні доступного інструменту, де собівартість одного тесту є мінімальною (0,04 грн), що дозволяє проводити регулярний моніторинг усім верствам населення. Попри обмеження щодо дотримання температурного режиму, система мінімізує вплив людського фактора та забезпечує високу достовірність результатів. Створення колекційної хмарної бази знань закладає основу для інтелектуального моніторингу якості харчування, що має суттєве значення для підвищення якості життя пацієнтів із системними м'язовими розладами.

Ключові слова: креатин, спінна м'язова атрофія, кіберфізична система, метод Поппера, реакція Яффе, кольорний сенсор, папері тест-смужки, оптична детекція, хмарна база знань, мобільний застосунок.

Hovorushchenko Tetana

Khmelnytskyi National University

Kvasnitskiy Denys

National Pirogov Memorial Medical University

Hovorushchenko Olga

Khmelnytskyi National University

METHOD OF OPERATION OF A CYBER-PHYSICAL SYSTEM FOR DETERMINING THE LEVEL OF CREATINE IN FOOD PRODUCTS

The article is devoted to the development of a theoretical basis for an innovative cyber-physical system (CPS) for determining the level of creatine in food products to monitor the nutritional status of patients with neurodegenerative diseases, in particular spinal muscular atrophy (SMA). The key role of creatine in restoring muscle memory and cellular energy metabolism, which is critical for patient rehabilitation, is substantiated. Since about half of the daily requirement of this substance must come from food, there is an urgent need to verify the creatine content directly in food products. An analysis of existing methods revealed their high cost and complexity, which makes rapid testing in everyday conditions impossible. Requirements for the new system have been defined, the main ones being inclusiveness for people with visual impairments and automation of result interpretation. The mathematical support of the developed CPS is based on the Beer-Lambert-Barr law and digital color analysis models, which allow the transformation of optical signals into quantitative indicators of the concentration of creatinine picrate formed during the Jaffe reaction. The proposed method of operation of the cyber-physical system for determining the level of creatine in food products integrates the physicochemical preparation of liquid extracts of products using impregnated test strips with cybernetic reading of the color signal through budget RGB sensors. The method involves automatic normalization of scanning conditions, verification of data against a reference knowledge base, and output of voice or text status about the creatine level in the analyzed food product. The practical significance of the study lies in the creation of an affordable tool, where the cost of a single test is minimal (0.04 USD), allowing for regular monitoring of all segments of the population. Despite restrictions on temperature control, the system minimizes the influence of the human factor and ensures high reliability of results. The creation of a collective cloud-based knowledge base lays the foundation for intelligent monitoring of nutritional quality, which is essential for improving the quality of life of patients with systemic muscle disorders.

Keywords: creatine, spinal muscular atrophy, cyber-physical system, Popper's method, Jaffe reaction, color sensor, paper test strips, optical detection, cloud knowledge base, mobile application.

Стаття надійшла до редакції / Received 17.12.2025

Прийнята до друку / Accepted 11.03.2026

Опубліковано / Published 26.03.2026



This is an Open Access article distributed under the terms of the [Creative Commons CC-BY 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

© Говорущенко Тетяна, Квасницький Денис, Говорущенко Ольга

Вступ

Зростання захворюваності на спінальну м'язову атрофію (СМА) – генетичну патологію, що призводить до прогресуючої деградації скелетних м'язів, – є серйозним викликом для України та світу. У терапії СМА та інших нейродегенеративних розладів особливу увагу привертає креатин. Завдяки здатності відновлювати м'язову пам'ять, він у поєднанні з реабілітацією допомагає повернути втрачені функції. Крім того, креатин покращує оксигенацію організму та захищає нервову систему, що критично важливо у контексті поширення СМА. Важливо, що необхідну дозу креатину можна отримати не лише через дорогі добавки, а й шляхом збалансованого харчування.

Креатин є азотовмісною органічною кислотою, що відіграє ключову роль у метаболізмі енергії всередині нервових та м'язових клітин [1]. У м'язовій тканині він присутній як у вільній формі, так і у вигляді креатинфосфату, будучи її незамінним компонентом. У скелетній мускулатурі ця сполука забезпечує енергообмін та підтримує здатність волокон до скорочення. Завдяки стимуляції синтезу білка та сповільненню акумуляції лактату (молочної кислоти), креатин виступає критично важливим ресурсом для забезпечення сили м'язових скорочень [2].

Дослідження клінічного застосування креатину підтверджують його терапевтичну ефективність при широкому спектрі патологій [3]. Зокрема, при нейродегенеративних станах, таких як м'язова дистрофія (зокрема після коми чи тривалої іммобілізації), хвороби Паркінсона та Гентінгтона [4], креатин діє як фундаментальний регулятор енергообміну. Його застосування демонструє позитивні результати у пацієнтів з ішемією міокарда та мозку [5], діабетом, остеоартритом та депресією у підлітковому віці [6].

Ключові клінічні ефекти креатину включають:

- нейропротекція – сповільнення атрофії мозку та стимуляція вироблення допаміну;
- реабілітація – відновлення м'язової пам'яті та функціоналу в поєднанні з фізичними вправами;
- кардіопротекція – захист серцевого м'яза під час ішемічних атак;
- геріатрична підтримка – покращення ліпідного профілю, збереження щільності кісток та нарощування м'язової маси у літніх людей [7].

В організмі дорослої людини депоновано від 100 до 150 г чистого креатину, причому цей обсяг корелює із загальною м'язовою масою. Щоденний метаболізм сполуки становить приблизно 2 г, з яких лише половина (близько 1 г) синтезується організмом ендогенно [8].

Для пацієнтів із СМА критично важливим є моніторинг показників креатину, що зазвичай здійснюється в межах розширеного біохімічного аналізу крові. Основним маркером тут виступає креатинін – кінцевий продукт розпаду креатину. Оскільки рівень креатиніну в сироватці крові безпосередньо залежить від об'єму м'язової тканини та ефективності її енергообміну (референтне значення – 62-106), його динаміка дозволяє оцінити стан метаболізму, а також функціональну здатність печінки та нирок.

Попри те, що організм людини здатний самостійно синтезувати креатин (ендогенний шлях), близько половини добової потреби має надходити ззовні (екзогенний шлях) [8]. Попри широку доступність синтетичних біодобавок, пріоритетним методом підтримки оптимального рівня цієї речовини залишається збалансований раціон. Найбільша концентрація креатину спостерігається в продуктах тваринного походження, зокрема в м'ясі та рибі, проте він також присутній у молочних продуктах і деяких ягодах. Відомо, що яловичина містить 4.5 г креатину на 1 кг, свинина – 5 г на 1 кг, лосось – 4.5 г на 1 кг, тунець – 4 г на 1 кг, тріска – 3 г на 1 кг, камбала – 2 г на 1 кг [8]. Але відсутні відомості про наявність креатину в інших продуктах (наприклад, у різних м'ясних виробах).

На сьогодні існує гостра потреба у верифікації вмісту креатину в широкому спектрі харчових продуктів, що потребує впровадження сучасних методів експрес-аналізу. Актуальність досліджень щодо кількісного визначення креатину в їжі зумовлена необхідністю створення інструментів оперативного контролю якості раціону. Перспективним рішенням є розробка кіберфізичної системи (КФС), яка інтегрує фізичні процеси вимірювання з цифровою обробкою даних. Така система може базуватися на використанні оптичних датчиків (зокрема, бюджетних спектрофотометрів або колірних сенсорів). В основі роботи КФС лежатиме детекція кольорової реакції Яффе (метод Поппера), де інтенсивність забарвлення аналізованого зразка прямо пропорційна концентрації креатину. Це дозволить автоматизувати процес аналізу та зробити його доступним поза межами спеціалізованих лабораторій. Такий підхід забезпечує високу швидкість обробки інформації та створює базу для моніторингу нутрієнтного профілю продуктів у режимі реального часу. Він відкриває нові можливості для пацієнтів із СМА та фахівців із реабілітації, дозволяючи точно знати, скільки енергетичного ресурсу міститься у конкретному продукті харчування.

Огляд відомих методів та рішень

Розглянемо відомі методи та рішення щодо визначення рівня креатину в продуктах харчування.

Для кількісного визначення креатину в харчових продуктах застосовують різноманітні аналітичні підходи, серед яких найпоширенішим є метод Поппера. В його основі лежить кольорова реакція Яффе, що базується на взаємодії креатиніну з пікриновою кислотою в екстремально лужному середовищі. Результатом цієї реакції є утворення таутомера пікрату креатиніну, який надає розчину характерного оранжево-червоного забарвлення. Ступінь інтенсивності кольору, що корелює з концентрацією речовини, вимірюється за допомогою колориметричних або фотометричних методів [9]. Під час аналізу продуктів на креатин зазвичай спочатку проводять

процедуру його дегідратації (перетворення на креатинін) шляхом нагрівання в кислому середовищі, а вже потім застосовують метод Поппера.

У статті [10] запропоновано інтегровану систему для визначення концентрації креатиніну в сироватці крові людини на основі теорії реакції Яффе, яка складається з паперового чіпа та інтелектуального пристрою для визначення.

У статті [11] розглядається розробка флуоресцентного біоаналізу креатиніну з використанням інтенсивності флуоресценції та застосуванням 3D-пересувної платформи, мікроспектрометра та лазерного діода для вимірювання різних концентрацій креатиніну в сироватці крові.

У статті [12] запропоновано новий колориметричний аналіз, заснований на ефекті Тиндала, для недорогого, простого, специфічного, точкового та чутливого визначення креатиніну з використанням наночастинок срібла як колоїдних наноіонів для візуальної сигналізації розсіювання світла.

У статті [13] запропоновано електромеханічну платформу «лабораторія на чіпі» для визначення рівнів креатиніну в сироватці крові в точці догляду за допомогою колориметричного імуоферментного аналізу.

У статті [14] розроблено нову платформу для аналізу на основі портативної системи визначення Raspberry Pi та мікрофлюїдного подвійного паперового чіпа для визначення рівня креатиніну в сечі людини.

Стаття [15] присвячена розробці колориметричної сенсорної платформи для моніторингу креатиніну на основі регуляторного впливу креатиніну на активність системи $\text{MoO}_3\text{-Cu}^{2+}$, що імітує пероксидазу.

У статті [16] продемонстровано електрохімічну систему металізації на комерційно доступній службі електрода, напруженої методом трафаретного друку, яка потім використовується для моніторингу концентрації креатиніну у водній суміші.

У статті [17] запропоновано новий вольтамперометричний датчик креатиніну з високою чутливістю та селективністю, який демонструє чудові результати в аналізі реальних зразків плазми.

У статті [18] запропоновано чутливий та видоспецифічний дуплексний ПЛР-аналіз у реальному часі на основі одночасної ампліфікації фрагментів м'язової креатинінази для визначення якості м'ясних продуктів.

Стаття [19] присвячена розробці нового методу LC-MS/MS для визначення та кількісного визначення креатину в режимі багаторазового моніторингу реакцій на основі методології поверхні відгук та гідрофільній взаємодії хроматографії для оптимізації хроматографічних параметрів.

Стаття [20] присвячена розробці методу на основі агрегації функціоналізованих цистеаміном наночастинок золота для ефективного визначення креатину в біологічних рідинах.

У статті [21] запропоновано економічно ефективну портативну платформу для кількісного визначення креатиніну в сироватці крові на основі високоякісного датчика камери у поєднанні з одноплатним комп'ютером Raspberry Pi.

У статті [22] описано нову концепцію, яка базується на однокроковій, простій і неферментативній системі визначення креатину в харчових добавках на основі Pt-електрода з використанням елементного аналізатора.

У статті [23] описано колориметричні зонди для визначення креатиніну в крові та сечі з використанням наночастинок металів (наприклад, з використанням наночастинок срібла, стабілізованих крохмалем, для визначення креатину).

У статті [24] запропоновано неферментативний високочутливий датчик креатину на основі агрегованих наночастинок оксиду олова, легованого сурмою, та склоподібного вуглецевого електрода з використанням явища електрохімічного відновлення.

У статті [25] запропоновано мобільну інформаційну систему для визначення рівня креатину в продуктах харчування, яка забезпечує зручність, низьку вартість, швидкість, мініятуризацію та автоматизацію вимірювання концентрації креатину в продуктах харчування.

Аналіз сучасної наукової літератури свідчить про значний інтерес до розробки систем детекції креатину та креатиніну, проте виявляє низку суттєвих обмежень, які перешкоджають їхньому масовому застосуванню для моніторингу якості харчування пацієнтів (зокрема із СМА). Переважна більшість розробок орієнтована виключно на аналіз біологічних рідин людини (сироватка крові, плазма, сеча). Методи визначення вмісту креатину безпосередньо в продуктах харчування залишаються критично малодослідженими, за винятком поодиноких робіт щодо м'ясних продуктів [18] або спортивних добавок [22]. Використання наночастинок золота чи срібла, складних електрохімічних платформ та мікрофлюїдних систем забезпечує високу чутливість, проте суттєво здорожчує процес аналізу та обмежує термін експлуатації вимірювальних елементів. Використання таких методів, як рідинна хроматографія з мас-спектрометриєю (LC-MS/MS) [19], лазерна флуоресценція [11] або ПЛР-аналіз у реальному часі [18], потребує дороговартісного лабораторного устаткування та висококваліфікованого персоналу, що унеможливує експрес-контроль у побутових умовах. Хоча існують спроби створення портативних пристроїв на базі Raspberry Pi [14, 21], вони не адаптовані для роботи з твердими чи напіврідкими зразками харчових продуктів і не враховують специфіку підготовки таких проб. Тому, метою даного дослідження є подолання зазначених недоліків шляхом розробки інноваційної кіберфізичної системи (КФС) для експрес-визначення рівня креатину в продуктах харчування. На відміну від існуючих рішень, запропонована система базуватиметься на: використанні бюджетних оптичних датчиків (спектрофотометрів або колірних сенсорів) для розпізнавання результатів класичної реакції Яффе, адаптації методу Поппера для аналізу широкого спектру нутрієнтних джерел (м'ясо, риба, молочні продукти), інтеграції вимірювального модуля в єдиний кіберфізичний контур для автоматичної обробки даних та формування рекомендацій щодо раціону. Такий підхід дозволить створити недорогий, надійний та доступний інструмент для

корекції метаболічних станів у пацієнтів із нейро/язовими захворюваннями, забезпечуючи перехід від лабораторних досліджень до практичного застосування в точці споживання їжі.

Формування вимог предметної галузі

Проведемо формування вимог предметної галузі щодо виявлення креатину методом Поппера на базі кольорової реакції Яффе.

Процедура реалізації методу охоплює наступні етапи:

- 1) етап підготовки – отримання рідкого екстракту зразка (відвару або бульйону аналізованого продукту харчування) та підготовка робочих реагентів (1%-ий водний розчин пікринової кислоти, 10%-ий розчин гідроксиду натрію) і киплячої водяної бані;
- 2) реакційна фаза – у ємність із 2 мл досліджуваного зразка (відвару або бульйону) послідовно внести 3 краплі розчину пікринової кислоти та 5 крапель лужного розчину гідроксиду натрію, змішати вміст посуду;
- 3) термічна стабілізація – інкубація суміші на киплячій водяній бані протягом 15 хвилин для завершення хімічного перетворення;
- 4) аналітичний висновок – візуальна або інструментальна оцінка забарвлення. Поява оранжевого спектра свідчить про наявність креатину, тоді як збереження блідо-жовтого кольору вказує на його відсутність або концентрацію нижче порогу чутливості.

Хоча класичний метод Поппера орієнтований на лабораторні умови, його адаптація для побутового використання можлива завдяки створенню портативних діагностичних засобів. Оптиміальним інструментом є паперові тест-смужки, попередньо імпрегновані сумішшю 1%-го розчину пікринової кислоти та 10%-го розчину натрій гідроксиду (у співвідношенні 3:5).

Застосування таких тест-систем максимально спрощує алгоритм аналізу для кінцевого користувача:

- 1) розміщення смужки в ємності з рідким екстрактом продукту (бульйоном або відваром аналізованого продукту харчування);
- 2) термічна експозиція на водяній бані протягом 15 хвилин;
- 3) колориметрична оцінка результату за зміною забарвлення.

Така методика є інклюзивною, оскільки її легко реалізувати людям із обмеженими фізичними можливостями. Крім того, економічна ефективність рішення є надзвичайно високою – собівартість однієї смужки (2х5 см) становить лише 0,04 грн, що робить регулярний моніторинг доступним для всіх верств населення.

Ключовою проблемою при використанні традиційного методу є суб'єктивність візуальної оцінки результатів. Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення змісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування була розроблена авторами у [25] – Рис. 1.

Колір 0 – Відсутність креатину	Колір 1 – Наявність низького рівня креатину	Колір 2 – Наявність середнього рівня креатину	Колір 3 – Наявність високого рівня креатину

Рис. 1. Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення змісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування [25]

Коректна інтерпретація змісту креатину залежить від здатності користувача точно розрізняти відтінки та інтенсивність кольорової реакції. Проте для багатьох пацієнтів це стає перешкодою через порушення зору або кольоросприйняття (зокрема, різні форми дальтонізму). Щоб усунути людський фактор та забезпечити точність вимірювань, і розробляється кіберфізична система, яка автоматизує процес розпізнавання кольору та надасть об'єктивні дані про концентрацію речовини. Використання оптичних датчиків у складі КФС дозволяє цифровізувати колірний сигнал, перетворюючи його на точні кількісні показники концентрації. Система виконає роль високоточного аналізатора, що робить діагностику доступною для людей із будь-яким станом зору, усуваючи ризик помилкового трактування. КФС не просто фіксуватиме колір, а автоматично формуватиме об'єктивний висновок про нутрієнтну цінність продукту, забезпечуючи надійний зворотний зв'язок для користувача.

Математична модель та метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування

Математична модель визначення рівня креатину в продуктах харчування базується на фізичному законі поглинання світла та хімічній стехіометрії реакції Яффе. Оскільки ми використовуватимемо оптичні датчики (колірні сенсори або бюджетні спектрофотометри), модель повинна пов'язувати цифрові значення кольору (наприклад, інтенсивність у каналі RGB або оптичну щільність) з концентрацією креатину.

Фундаментом моделі є закон, згідно з яким оптична щільність розчину (A) прямо пропорційна концентрації забарвленої речовини (C):

$$A = \varepsilon \cdot l \cdot C, \quad (1)$$

де A – оптична щільність (абсорбція), ε – молярний коефіцієнт поглинання пікрату креатиніну (константа), l – товщина шару (відстань від джерела світла до датчика), C – концентрація креатиніну (у який перетворився креатин після нагрівання).

Оскільки бюджетні сенсори видають значення інтенсивності світла (I), модель трансформується. Для реакції Яффе найбільш інформативним є синьо-зелений спектр (поглинання), оскільки сам розчин стає оранжево-червоним. Використовуємо інтенсивність каналу G (зелений) або B (синій), які найбільше змінюються при появі оранжевого кольору:

$$C = -k \cdot \ln \left(\frac{I_{\text{sample}}}{I_{\text{blank}}} \right) \quad (2)$$

де k – емпіричний коефіцієнт масштабування, I_{sample} – інтенсивність світла, що пройшло крізь аналізований зразок, I_{blank} – інтенсивність світла для «холостої» пробі (білдо-жовта смужка без креатину).

Для практичної реалізації в системі використовується лінійна апроксимація після калібрування:

$$C_{\text{creatin}} = \alpha \cdot (X_{\text{norm}}) + \beta, \quad (3)$$

де X_{norm} – нормалізований колірний показник; при використанні простору RGB зручно використовувати координату R (червоний) відносно загальної яскравості: $X = \frac{R}{R+G+B}$; α – чутливість системи (визначається при калібруванні датчика еталонними значеннями кольору – Рис. 1); β – зміщення (враховує власне забарвлення бульйону та реактивів).

Оскільки необхідно є термічна експозиція на водяній бані протягом 15 хвилин, то інтенсивність кольору також є функцією часу (t) та температури (T).

Тоді повна модель набуває вигляду:

$$C(I, t, T) = \frac{I_{\text{measured}}}{f(t) \cdot g(T) \cdot c^t} \quad (4)$$

де $f(t)$ – кінетика утворення пікрату креатиніну (зазвичай виходить на плао після 10-12 хвилин), $g(T)$ – температурний коефіцієнт (стабілізується при 100°C)

Математичне забезпечення розробленої системи ґрунтується на законі Бугера-Ламберта-Бера та адаптованих моделях цифрового колірного аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали у кількісні показники. Створена модель пов'язує інтенсивність поглинання світла в синьо-зеленому спектрі з концентрацією пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Такий підхід забезпечує об'єктивність вимірювань та створює аналітичний фундамент для перетворення суб'єктивного візуального спостереження на точний цифровий висновок у межах єдиного обчислювального контуру.

Тоді метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування складається з таких кроків:

1) фізико-хімічна підготовка – взаємодія користувача з об'єктом дослідження та підготовка «сигналу» для сенсорів: користувач готує рідкий екстракт аналізованого продукту (відвар або бульйон), що необхідно для переведення креатину у розчинну форму; використовує паперову тест-смужку, імпрегновану реагентами Яффе (пікринова кислота + NaOH у пропорції 3:5); розміщує смужку у зразок та виконує термічну обробку (на водяній бані протягом 15 хв) для фізико-хімічного перетворення креатину в оранжевий пікрат креатиніну;

2) введення у мобільний застосунок назви аналізованого продукту харчування;

3) кібернетичне зчитування та оцифрування – фізичні властивості (колір) трансформуються у цифровий формат:

3.1) оптичне сканування – КФС активує джерело стабілізованого світла та колірний сенсор (наприклад, спектрофотометричний модуль або RGB-датчик);

3.2) нормалізація зовнішніх умов – система автоматично враховує рівень зовнішнього освітлення та проводить «корекцію нуля» за незабарвленою ділянкою паперу;

3.3) зчитування спектральних характеристик – датчик фіксує інтенсивність світла у визначених діапазонах. Для реакції Яффе критичним є поглинання в синьо-зеленому спектрі (490–510 нм);

4) обробка та аналіз даних:

4.1) збірка отриманих даних з еталонними даними (Рис. 1), які містяться у базі знань, з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування;

4.2) якщо паперова тестова смужка має колір 0 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті відсутній;

4.3) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 1 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – низький;

4.4) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 2 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – середній;

4.5) інакше якщо паперова тестова смужка має колір 3 зі шкали для оцінювання кольору аналізованого зразка (Рис. 1), то креатин в досліджуваному продукті наявний, і рівень креатину – високий;

4.6) інакше наявні проблеми із розпізнаванням кольору, слід повторити сканування тестової смужки;

5) видача результату та підтримка прийняття рішень:

5.1) система виводить на екран мобільного застосунку текстовий або голосовий статус за вибором користувача (наприклад: «Рівень креатину – високий. Рекомендовано для споживання»);

5.2) збереження результату в загальнодоступній усім користувачам системи хмарі для фіксації рівня креатину в тому чи іншому продукті харчування з метою подальшого використання готових результатів користувачами системи.

Запропонований метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування відзначається високою інклюзивністю та економічною доступністю, оскільки він усуває суб'єктивізм людського фактора при оцінюванні складних кольорових реакцій. Використання бюджетних оптичних сенсорів у поєднанні з мобільним застосунком дозволяє людям із порушеннями зору або дальтонізмом отримувати точні дані про нутрієнтний склад їжі без необхідності звернення до спеціалізованих лабораторій. Оцифрування результатів та їх збереження у хмарному середовищі створює унікальну базу знань про фактичний вміст креатину в продуктах різних виробників, що трансформує процес контролю дієти з поодинокого вимірювання на колективну інтелектуальну підтримку пацієнтів із нейроім'язовими захворюваннями.

Водночас метод має певні обмеження, пов'язані з необхідністю суворого дотримання температурного режиму та тривалості термічної обробки, оскільки відхилення від 15-хвилинного нагрівання може викривити інтенсивність забарвлення. Попри високу чутливість реакції Яффе, точність системи залежить від якості підготовки рідкого екстракту та чистоти паперових смужок, що вимагає від користувача базової ретельності на фізико-хімічному етапі. Також ефективність методу обмежена наявними еталонними даними в базі знань, тому для нових або комбінованих продуктів харчування система може вимагати попереднього калібрування або повторного сканування для уникнення помилок, спричинених природною пігментацією деяких інгредієнтів.

Висновки

У результаті проведеного дослідження обґрунтовано високу актуальність розробки засобів контролю нутрієнтного стану пацієнтів із нейродегенеративними захворюваннями, зокрема спінальною м'язовою атрофією. Встановлено, що креатин відіграє критичну роль у відновленні м'язового функціоналу та енергетичного обміну, проте складність моніторингу його вмісту в продуктах харчування поза межами спеціалізованих лабораторій створює значний бар'єр для ефективної реабілітації. Це зумовило необхідність пошуку нових технологічних рішень, які б поєднували доступність хімічного аналізу з точністю сучасних цифрових систем.

Аналіз існуючих методів виявлення креатину та креатиніну показав, що більшість сучасних рішень орієнтовані на клінічну діагностику біологічних рідин і базуються на використанні дорогих обладнання або складних сенсорних платформ. Виявлені недоліки відомих підходів, такі як вузька спрямованість на лабораторні умови та висока технологічна складність, підтвердили доцільність розробки інклюзивної системи. Це дозволило сформулювати ключові вимоги предметної галузі, серед яких пріоритетними стали мінімізація вартості аналізу, простота експлуатації в домашніх умовах та автоматизація інтерпретації результатів.

Математичне забезпечення розробленої системи ґрунтується на законі Бутера-Ламберта-Бера та адаптованих моделях цифрового кольорового аналізу, що дозволяють трансформувати оптичні сигнали у кількісні показники. Створена модель пов'язує інтенсивність поглинання світла в синьо-зеленому спектрі з концентрацією пікрату креатиніну, утвореного в ході реакції Яффе. Такий підхід забезпечує об'єктивність вимірювань та створює аналітичний фундамент для перетворення суб'єктивного візуального спостереження на точний цифровий висновок у межах єдиного обчислювального контуру.

Розроблений метод діяльності кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування інтегрує фізико-хімічні процедури підготовки зразків із кібернетичними процесами зчитування та інтелектуальної обробки даних. Алгоритм роботи системи охоплює повний цикл від термічної активації паперових тест-смужок до хмарного збереження результатів, що забезпечує користувачу автоматизовану підтримку прийняття рішень. Важливою особливістю методу є багаторівнева обробка кольорних характеристик, яка дозволяє чітко диференціювати рівні вмісту креатину та надавати пацієнту зрозумілий вербальний або текстовий статус.

Водночас метод має певні обмеження, пов'язані з необхідністю суворого дотримання температурного режиму та тривалості термічної обробки. Попри високу чутливість реакції Яффе, точність системи залежить від якості підготовки рідкого екстракту та чистоти паперових смужок, що вимагає від користувача базової ретельності на фізико-хімічному етапі.

Загалом розроблювана кіберфізична система відкриває нові можливості для персоналізованого контролю дієтотерапії, роблячи процес тестування доступним для людей із порушеннями зору та обмеженими фінансовими ресурсами. Використання бюджетних компонентів у поєднанні з потужним математичним і програмним апаратом нівелює людський фактор і підвищує достовірність результатів. Створення колективної бази знань у хмарному середовищі закладає основу для подальшого розвитку інтелектуальних систем моніторингу якості харчування, що має суттєве значення для підвищення якості життя пацієнтів із системними м'язовими розладами.

Жірепарат

1. PubChem Creatine (Compound). URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Creatine#section=3D-Conformer>.
2. Effects of 12-Week Plyometric Training Combined with Creatine Supplementation on Fatigue Substances, Muscle Damage and Muscle Activity in Sprinter / Q. yan et al. *The Korea Journal of Sport*. 2022. Vol. 20, no. 3. P. 853–864. URL: <https://doi.org/10.46669/kss.2022.20.3.074>.
3. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine / R. B. Kreider et al. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2017. Vol. 14, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s12970-017-0173-z>.
4. Bender A., Klopstock T. Creatine for neuroprotection in neurodegenerative disease: end of story? *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1929–1940. URL: <https://doi.org/10.1007/s00726-015-2165-0>.
5. Potential of creatine or phosphocreatine supplementation in cerebrovascular disease and in ischemic heart disease / M. Balestrino et al. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1955–1967. URL: <https://doi.org/10.1007/s00726-016-2173-8>.
6. Cognitive effects of creatine monohydrate adjunctive therapy in patients with bipolar depression: Results from a randomized, double-blind, placebo-controlled trial / R. A. Toniolo et al. *Journal of Affective Disorders*. 2017. Vol. 224. P. 69–75. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jad.2016.11.029>.
7. Effects of creatine supplementation on brain in the healthy population / T. Swatko et al. *Journal of Education, Health and Sport*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 160–165. URL: <https://doi.org/10.12775/jehs.2023.13.04.017>.
8. Which type of foods are rich in creatine? URL: <https://www.quora.com/Which-type-of-foods-are-rich-in-creatine>.
9. Toora B., Rajagopal G. Measurement of creatinine by Jaffe's reaction--determination of concentration of sodium hydroxide required for maximum color development in standard, urine and protein free filtrate of serum. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022. Vol. 40, Issue 3. Pp. 352-354.
10. Rapid Paper-Based System for Human Serum Creatinine Detection / L.-M. Fu et al. *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 34. URL: <https://doi.org/10.3390/inventions3020034>.
11. Chen C.-M., Tsai Y.-L. Creatinine-Detecting Laser Diode-Induced Fluorescence Detection System. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3196629>.
12. Tyndall-effect-based colorimetric assay with colloidal silver nanoparticles for quantitative point-of-care detection of creatinine using a laser pointer pen and a smartphone / K. Yuan et al. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, no. 36. P. 23379–23386. URL: <https://doi.org/10.1039/d2ra03598g>.
13. An Electromechanical Lab-on-a-Chip Platform for Colorimetric Detection of Serum Creatinine / B. Karakuzu et al. *ACS Omega*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1021/acsomega.2c03354>.
14. Microfluidic Sliding Paper-Based Device for Point-of-Care Determination of Albumin-to-Creatine Ratio in Human Urine / S.-J. Chen et al. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 496. URL: <https://doi.org/10.3390/bios12070496>.
15. Colorimetric detection of creatinine based on specifically modulating the peroxidase-mimicking activity of Cu-Fenton system / L. Liang et al. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022. Vol. 206. P. 114121. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bios.2022.114121>.
16. Electrochemical metallization process on screen-printed electrode for creatinine monitoring application / M. A. A. Khushaini et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3164105>.
17. Alizadeh T., Mousavi Z. Molecularly imprinted polymer specific to creatinine complex with copper(II) ions for voltammetric determination of creatinine. *Microchimica Acta*. 2022. Vol. 189, no. 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s00604-022-05470-8>.
18. Detection of meat from horse, donkey and their hybrids (mule/hinny) by duplex real-time fluorescent PCR / D. Wang et al. *PLoS ONE*. 2020. Vol. 15, no. 12. P. e0237077. URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0237077>.
19. Hydrophilic interaction chromatography coupled to tandem mass spectrometry as a method for simultaneous determination of guanidinoacetate and creatine / P. Jovanov et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1028. P. 96–103. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.03.038>.
20. Aggregation of cysteamine-capped gold nanoparticles in presence of ATP as an analytical tool for rapid detection of creatine kinase (CK-MM) / A. K. Sharma et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1024. P. 161–168. URL: <https://doi.org/10.1016/j.aca.2018.03.027>.
21. Portable Chemiluminescence Detection Platform and Its Application in Creatinine Detection / S. Dudala et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 7177–7184. URL: <https://doi.org/10.1109/jsen.2022.3151694>.
22. Surucu O., Abaci S. Non-enzymatic and Electrochemical Detection of Creatine in Food Supplements. *Electrocatalysis*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 195–209. URL: <https://doi.org/10.1007/s12678-022-00710-0>.
23. Lertvachirapaiboon C., Baba A., Shinbo K., Kato K. Colorimetric probe based on destabilization of silver nanoparticles from polysaccharide matrix for creatinine detection. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020). Virtual, Tokyo, 13-17 September 2020. Volume 2020-September. Pp 35 – 37.
24. Rahman M. M., Ahmed J., Asiri A. M. Development of Creatine sensor based on antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 242. P. 167–175. URL: <https://doi.org/10.1016/j.snb.2016.11.053>.

25. Hovorushchenko T., Kvasnitskiy D., Hovorushchenko O., Zasornova I., Boyarchuk A. Mobile Information System for Determining the Level of Creatine in Food Products. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 174-184.

References

1. PubChem Creatine (Compound). URL: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/compound/Creatine#section=3D-Conformer>.
2. Effects of 12-Week Plyometric Training Combined with Creatine Supplementation on Fatigue Substances, Muscle Damage and Muscle Activity in Sprinter / Q. yan et al. *The Korea Journal of Sport*. 2022. Vol. 20, no. 3. P. 853-864.
3. International Society of Sports Nutrition position stand: safety and efficacy of creatine supplementation in exercise, sport, and medicine / R. B. Kreider et al. *Journal of the International Society of Sports Nutrition*. 2017. Vol. 14, no. 1.
4. Bander A., Klopstock T. Creatine for neuroprotection in neurodegenerative disease: end of story? *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1929-1940.
5. Potential of creatine or phosphocreatine supplementation in cerebrovascular disease and in ischemic heart disease / M. Balestrino et al. *Amino Acids*. 2016. Vol. 48, no. 8. P. 1955-1967.
6. Cognitive effects of creatine monohydrate adjunctive therapy in patients with bipolar depression: Results from a randomized, double-blind, placebo-controlled trial / R. A. Toniolo et al. *Journal of Affective Disorders*. 2017. Vol. 224. P. 69-75.
7. Effects of creatine supplementation on brain in the healthy population / T. Swatko et al. *Journal of Education, Health and Sport*. 2023. Vol. 13, no. 4. P. 160-165.
8. Which type of foods are rich in creatine? URL: <https://www.quora.com/Which-type-of-foods-are-rich-in-creatine>.
9. Toora B., Rajagopal G. Measurement of creatinine by Jaffe's reaction—determination of concentration of sodium hydroxide required for maximum color development in standard, urine and protein free filtrate of serum. *Indian Journal of Experimental Biology*. 2022. Vol. 40. Issue 3. Pp. 352-354.
10. Rapid Paper-Based System for Human Serum Creatinine Detection / L.-M. Fu et al. *Inventions*. 2018. Vol. 3, no. 2. P. 34.
11. Chen C.-M., Tsai Y.-L. Creatinine-Detecting Laser Diode-Induced Fluorescence Detection System. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1.
12. Tyndall-effect-based colorimetric assay with colloidal silver nanoparticles for quantitative point-of-care detection of creatinine using a laser pointer pen and a smartphone / K. Yuan et al. *RSC Advances*. 2022. Vol. 12, no. 36. P. 23379-23386.
13. An Electromechanical Lab-on-a-Chip Platform for Colorimetric Detection of Serum Creatinine / B. Karakuzu et al. *ACS Omega*. 2022.
14. Microfluidic Sliding Paper-Based Device for Point-of-Care Determination of Albumin-to-Creatine Ratio in Human Urine / S.-J. Chen et al. *Biosensors*. 2022. Vol. 12, no. 7. P. 496.
15. Colorimetric detection of creatinine based on specifically modulating the peroxidase-mimicking activity of Cu-Fenton system / L. Liang et al. *Biosensors and Bioelectronics*. 2022. Vol. 206. P. 114121.
16. Electrochemical metallization process on screen-printed electrode for creatinine monitoring application / M. A. A. Khushzini et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. P. 1.
17. Alizadeh T., Mousavi Z. Molecularly imprinted polymer specific to creatinine complex with copper(II) ions for voltammetric determination of creatinine. *Microchimica Acta*. 2022. Vol. 189, no. 10.
18. Detection of meat from horse, donkey and their hybrids (mule/hinny) by duplex real-time fluorescent PCR / D. Wang et al. *PLOS ONE*. 2020. Vol. 15, no. 12. P. e0237077.
19. Hydrophilic interaction chromatography coupled to tandem mass spectrometry as a method for simultaneous determination of guanidinoacetate and creatine / P. Jovanov et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1028. P. 96-103.
20. Aggregation of cysteamine-capped gold nanoparticles in presence of ATP as an analytical tool for rapid detection of creatine kinase (CK-MM) / A. K. Sharma et al. *Analytica Chimica Acta*. 2018. Vol. 1024. P. 161-168.
21. Portable Chemiluminescence Detection Platform and Its Application in Creatinine Detection / S. Dudala et al. *IEEE Sensors Journal*. 2022. Vol. 22, no. 7. P. 7177-7184.
22. Surucu O., Abaci S. Non-enzymatic and Electrochemical Detection of Creatine in Food Supplements. *Electrocatalysis*. 2022. Vol. 13, no. 2. P. 195-209.
23. Lertvachirapiboon C., Baba A., Shinbo K., Kato K. Colorimetric probe based on destabilization of silver nanoparticles from polyaccharide matrix for creatinine detection. Proceedings of the International Symposium on Electrical Insulating Materials (ISEIM 2020). Virtual, Tokyo, 13-17 September 2020. Volume 2020-September, Pp. 35 - 37.
24. Rahman M. M., Ahmed J., Asiri A. M. Development of Creatine sensor based on antimony-doped tin oxide (ATO) nanoparticles. *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2017. Vol. 242. P. 167-173.
25. Hovorushchenko T., Kvasnitskiy D., Hovorushchenko O., Zasornova I., Boyarchuk A. Mobile Information System for Determining the Level of Creatine in Food Products. CEUR-WS. 2023. Vol. 3373. Pp. 174-184.

ДОДАТОК Б (обов'язковий)

Презентація до захисту кваліфікаційної роботи

Хмельницький національний університет

Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Виконавець: Квасніцький Денис Сергійович

Науковий керівник: Войчур Юрій Олексійович, д.ф.

2025

МЕТА, ОБ'ЄКТ І ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

МЕТА

Зменшення похибки визначення концентрації креатину в продуктах харчування шляхом проектування КФС, що реалізує цифрове зчитування колірного сигналу тест-смужки після реакції Яффе з автоматичною класифікацією та хмарним збереженням результатів.

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Процес визначення рівня креатину в продуктах харчування з використанням колориметричного методу на основі реакції Яффе та цифрового зчитування сигналу тест-смужки.

ПРЕДМЕТ ДОСЛІДЖЕННЯ

Методи, моделі та засоби КФС визначення рівня креатину на базі RGB-давача TCS34725, мікроконтролера ESP32 та реакції Яффе.

НАУКОВА НОВИЗНА

НАБУЛА ПОДАЛЬШОГО РОЗВИТКУ

Метод синтезу калібрувальних даних для бази знань КФС визначення рівня креатину, який відрізняється моделюванням вмісту за нормальним розподілом $N(\mu, \sigma)$ з параметрами з наукової літератури у поєднанні з аналітичним визначенням індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів α та β для кожного продукту методом МНК — що усуває потребу в реальному лабораторному калібруванні на етапі проектування.

УДОСКОНАЛЕНО

удосконалено кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування, яка відрізняється від відомих застосуванням RGB-давача кольору TCS34725 у поєднанні з мікроконтролером ESP32 для цифрового зчитування колірної сигналу тест-смужки після реакції Яффе, що дозволило досягти середньої відносної похибки визначення концентрації креатину 4,87 %.

АКТУАЛЬНІСТЬ ДОСЛІДЖЕННЯ

Навіщо потрібна система визначення рівня креатину?

2–4 г/кг

середній вміст
креатину в м'ясі

яловичина, свинина, птиця

до 88 г/кг

максимальний вміст
у сирому м'ясі

у деяких видах риби

0,04 грн

собівартість
однієї тест-смужки

розмір 2x5 см



Наявні методи (ВЕРХ) — не мобільні

Лабораторне обладнання недоступне для польового або виробничого контролю якості.



Висока вартість контролю

Стационарні методи потребують дорогого обладнання, реагентів і кваліфікованого персоналу.



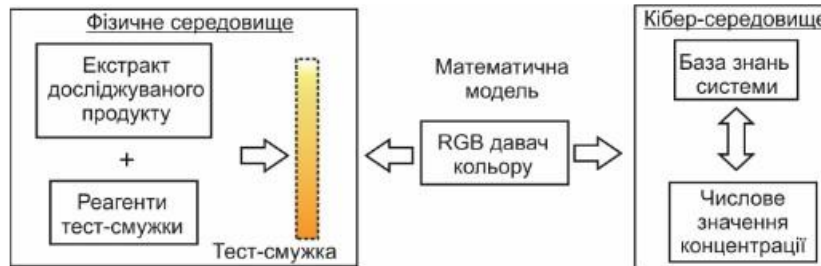
Суб'єктивна візуальна оцінка

Традиційна оцінка тест-смужок «на око» вносить людський фактор і погіршує відтворюваність.

Принцип функціонування та формування бази знань кіберфізичної системи

Колір 0	Колір 1	Колір 2	Колір 3
Відсутність креатину	Наявність низького рівня креатину	Наявність середнього рівня креатину	Наявність високого рівня креатину

Шкала для оцінювання кольору аналізованого зразка з метою встановлення вмісту та рівня креатину в досліджуваному продукті харчування



Інтеграція фізичного та кібер-середовища для визначення рівня креатину в продуктах

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ

Математичний апарат КФС визначення рівня креатину

Лінійна калібрувальна модель

$$C = \alpha \cdot X_{norm} + \beta, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт чутливості (нахил калібрувальної прямої); β – коефіцієнт зміщення (вільний член), що враховує власне забарвлення бульйону та реактивів за відсутності пікрату креатиніну.

Коефіцієнт чутливості α визначає на скільки змінюється концентрація (г/кг) при зміні X_{norm} на 1. Велике значення даного коефіцієнта означає, що метод дуже чутливий до кольору. Натомість коефіцієнт зміщення визначає концентрацію, яку покаже метод при $X_{norm} = 0$ (власний колірний фон бульйону даного продукту за відсутності реакції).

Метод створення синтезованих даних для бази знань вмісту креатину в продуктах харчування

1. Формування вхідних даних. Для кожного продукту задається середнє значення вмісту креатину μ_i (з літератури) та стандартне відхилення $\sigma_i = 0,1 \cdot \mu_i$.
2. Генерація концентрації (синтез даних). Моделюється значення концентрації відповідно до нормального закону $C_i \sim N(\mu_i, \sigma_i^2)$, $\sigma_i = 0,10 \cdot \mu_i$.
3. Вибір калібрувальних точок. Задаються дві опорні точки: $(X_{norm}^{(1)}, C^{(1)})$ та $(X_{norm}^{(2)}, C^{(2)})$ на основі шкали кольорів (0.36, 0.43, 0.51, 0.59) та діапазону μ_i .
4. Обчислення коефіцієнтів моделі. Коефіцієнти α і β визначаються з системи відповідно до рівняння $C = \alpha \cdot X_{norm} + \beta$, за формулами: $\alpha =$

$$\frac{C^{(1)} - C^{(2)}}{X_{norm}^{(1)} - X_{norm}^{(2)}} \text{ та } \beta = C^{(1)} - \alpha \cdot X_{norm}^{(1)}.$$

Структура та формат бази знань

Запис для продукту і включає:

- найменування та категорію;
- μ_i (г/кг);
- змодельоване значення C_i (г/кг);
- координати двох калібрувальних точок;
- коефіцієнти α_i та β_i ;
- порогові значення для класифікації рівнів 1, 2, 3.

Порогові значення класифікації визначаються безпосередньо на основі середнього вмісту креатину μ_i для кожного продукту із використанням фіксованих коефіцієнтів, що забезпечує формування відносної шкали оцінювання. Таким чином, рівні класифікації встановлюються індивідуально для кожного продукту відносно його типового значення:

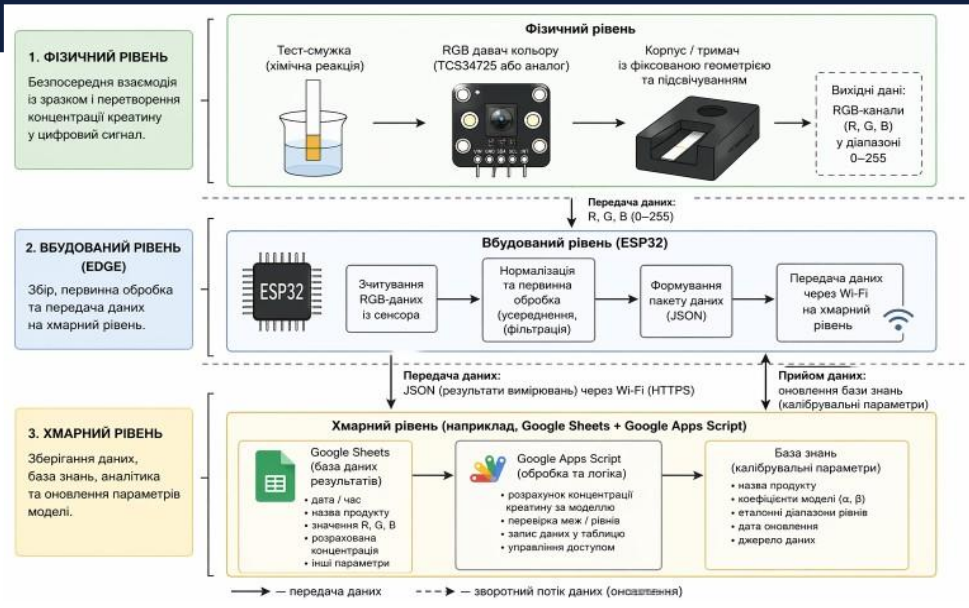
$$C_{1,thr} = 0,60 \cdot \mu_i; \quad C_{2,thr} = 1,00 \cdot \mu_i; \quad C_{3,thr} = 1,30 \cdot \mu_i. \quad (2)$$

Фрагмент бази даних вмісту креатину в продуктах харчування сформованої в результаті роботи запропонованого методу

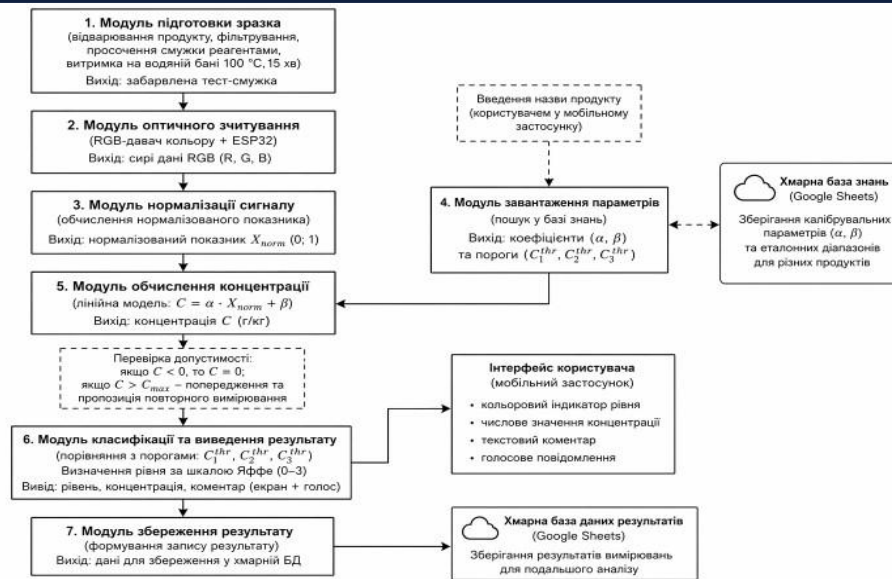
База знань КФС: коефіцієнти калібрування α і β (модель $C = \alpha \cdot X_{norm} + \beta$)

Категорія	Продукт	μ літер., г/кг	C мод., г/кг	X_norm_1	C_1, г/кг	X_norm_2	C_2, г/кг	α (alpha)	β (beta)	Рівень (C мод.)
М'ясо										
М'ясо	Яловичина (сира)	4,5000	4,7235	0,4300	2,2500	0,5900	5,8500	22,5000	-7,4250	3 — Високий
М'ясо	Яловичина (варена)	3,0000	2,9585	0,4300	1,5000	0,5900	3,9000	15,0000	-4,9500	2 — Середній
М'ясо	Яловичина (смажена)	2,8000	2,9814	0,3600	0,8400	0,5100	4,2000	22,4000	-7,2240	3 — Високий
М'ясо	Свинина (сира)	5,0000	5,7615	0,4300	2,5000	0,5900	6,5000	25,0000	-8,2500	3 — Високий
М'ясо	Свинина (варена)	3,4000	3,3204	0,4300	1,7000	0,5900	4,4200	17,0000	-5,6100	2 — Середній
М'ясо	Свинина (смажена)	3,1000	3,0274	0,4300	1,5500	0,5900	4,0300	15,5000	-5,1150	2 — Середній
М'ясо	Курятина (грудка, сира)	3,4000	3,9369	0,4300	1,7000	0,5900	4,4200	17,0000	-5,6100	3 — Високий
М'ясо	Курятина (грудка, варена)	2,4000	2,5842	0,3600	0,7200	0,5100	3,6000	19,2000	-6,1920	3 — Високий
М'ясо	Індичка (сира)	3,2000	3,0498	0,4300	1,6000	0,5900	4,1600	16,0000	-5,2800	2 — Середній
М'ясо	Баранина (сира)	4,2000	4,4279	0,4300	2,1000	0,5900	5,4600	21,0000	-6,9300	3 — Високий
М'ясо	Кролятина (сира)	3,5000	3,3378	0,4300	1,7500	0,5900	4,5500	17,5000	-5,7750	2 — Середній
М'ясні вироби										
М'ясні вироби	Ковбаса варена	1,0000	0,9301	0,3600	0,3000	0,5100	1,5000	8,0000	-2,5800	2 — Середній
М'ясні вироби	Ковбаса копчена	0,8000	0,8290	0,3600	0,2400	0,5100	1,2000	6,4000	-2,0640	3 — Високий
М'ясні вироби	Сосиски	0,7000	0,5087	0,3600	0,2100	0,5100	1,0500	5,6000	-1,8060	2 — Середній
М'ясні вироби	Шинка	1,2000	0,8895	0,3600	0,3600	0,5100	1,8000	9,6000	-3,0960	2 — Середній
Риба										
Риба	Лосось (свіжий)	4,5000	4,2470	0,4300	2,2500	0,5900	5,8500	22,5000	-7,4250	2 — Середній
Риба	Лосось (слабосолений)	3,8000	3,4151	0,4300	1,9000	0,5900	4,9400	19,0000	-6,2700	2 — Середній
Риба	Тунець (свіжий)	4,0000	4,1257	0,4300	2,0000	0,5900	5,2000	20,0000	-6,8000	3 — Високий
Риба	Тунець (консерва в олії)	2,5000	2,2730	0,3600	0,7500	0,5100	3,7500	20,0000	-6,4500	2 — Середній
Риба	Тріска (свіжа)	3,0000	2,5763	0,4300	1,5000	0,5900	3,9000	15,0000	-4,9500	2 — Середній

Загальна структура кіберфізичної системи



Функціональна схема кіберфізичної системи визначення рівня креатину в продуктах харчування



Результати оцінювання точності калібрувальної моделі

Продукт	μ , г/кг	\bar{C}_{est} , г/кг	$MAPE$, %	$RMSE$, г/кг	Продукт	μ , г/кг	\bar{C}_{est} , г/кг	$MAPE$, %	$RMSE$, г/кг
Яловичина (сира)	4,50	4,52	3,12	0,141	Тунець (свіжий)	4,00	3,97	3,68	0,147
Яловичина (варена)	3,00	2,97	4,05	0,122	Тріска (свіжа)	3,00	3,02	4,44	0,133
Свинина (сира)	5,00	5,04	2,88	0,145	Тріска (варена)	2,20	2,18	4,87	0,107
Свинина (варена)	3,40	3,38	3,74	0,127	Камбала	2,00	2,01	5,10	0,102
Курятина (грудка, сира)	3,40	3,43	3,91	0,134	Оселедець (свіжий)	1,80	1,79	5,56	0,100
Курятина (варена)	2,40	2,42	4,33	0,104	Сардина (консерва)	2,80	2,82	4,21	0,118
Баранина (сира)	4,20	4,18	3,55	0,149	Ковбаса варена	1,00	0,99	7,30	0,073
Кролятина	3,50	3,48	4,12	0,144	Сосиски	0,70	0,71	8,14	0,057
Лосось (свіжий)	4,50	4,53	3,27	0,148	Шинка	1,20	1,21	6,67	0,080
					Молоко (2,5%)	0,02	0,021	9,80	0,002
					Сир твердий	0,10	0,102	8,90	0,009

Висновки

- досліджено біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів та проаналізовано існуючі методи його визначення, здійснено виявлення їх недоліків та обґрунтовано вибір реакції Яффе як аналітичної основи системи;
- проаналізовано існуючі кіберфізичні системи у харчовій промисловості, давачі кольору та мікроконтролерні платформи для побудови портативних вимірювальних систем;
- розроблено математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача кольору і концентрацією креатину на основі закону Бугера-Ламберта-Бера та лінійної калібрувальної залежності;
- розроблено метод синтезу калібрувальних даних для бази знань системи із застосуванням нормального закону розподілу та аналітичного визначення індивідуальних калібрувальних коефіцієнтів для кожного продукту;
- розроблено тришарову архітектуру кіберфізичної системи (фізичний, вбудований та хмарний рівні) та алгоритми функціонування всіх її компонентів на базі мікроконтролера ESP32, RGB-давача TCS34725 і хмарного сховища Google Sheets;
- проведено симуляційне дослідження розробленої системи на синтетичних даних та оцінено її ефективність.

Дякую за увагу!

Квасніцький Денис Сергійович

РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Автор Денис КВАСНІЦЬКИЙ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

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 9,51% і адресується до 30 першоджерела; та системою Anti-Plagiarism складає 2%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.


27.04.2026


Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис


Підпис


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олег САВЕНКО

Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

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 плагіату щодо роботи:

Автор: Денис КВАСНІЦЬКИЙ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Експерт: Юрій ВОЙЧУР

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 9.51%

Коефіцієнт подібності 2: 5.69%

Мікропробіли: 8

Заміна букв: 26

Інтервали: 0

Білі знаки: 6

Дата створення звіту: 2026-04-26 17:09:06.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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

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

Виявлено запозичення і плагіат або навмисні текстові спотворення (маніпуляції), як передбачувані спроби укриття плагіату, 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 процедур. Таким чином робота не приймається.

Обґрунтування:

2026-04-26

Дата

Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Денис КВАСНИЦЬКИЙ

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.

25 квітня 2026 року



РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Здобувач: Денис КВАСНІЦЬКИЙ

Тема: Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи магістра:

Кількість листів креслень —; кількість сторінок записки 76

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень У роботі запропоновано кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування
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 досліджено біохімічні властивості креатину як показника якості харчових продуктів, проаналізовано існуючі методи його визначення та обґрунтовано вибір RGB-давача TCS34725 і мікроконтролера ESP32 як апаратної основи системи. У другому розділі розроблено математичну модель зв'язку між сигналом RGB-давача і концентрацією креатину на основі закону Бугера–Ламберта–Бера та сформовано базу знань із використанням калібрувальних залежностей і статистичного синтезу даних. У третьому розділі розроблено тришарову архітектуру кіберфізичної системи, визначено її вимоги, функціональну структуру та алгоритми обробки сигналів і адаптивного оновлення калібрувальних коефіцієнтів. У четвертому розділі проведено симуляційне дослідження системи, яке підтвердило її ефективність за показниками точності, класифікації та зменшення шуму сигналу, а також виконано порівняння з існуючими методами..
4. Позитивні сторони роботи: Запропоновано кіберфізичну систему визначення рівня креатину в продуктах харчування.

5. Негативні сторони роботи: Основним недоліком дослідження є відсутність натурального експерименту з реальними зразками харчових продуктів і фізичним прототипом системи, внаслідок чого калібрувальні коефіцієнти бази знань є синтетичними і не верифіковані реальними вимірюваннями, а оцінювання ефективності системи виконано виключно на змодельованих даних. Крім того, запропонована лінійна калібрувальна модель не враховує нелінійність оптичної відповіді тест-смужки при високих концентраціях і потенційний вплив матричних ефектів бульйону різних продуктів на показання RGB-давача.

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) —

Георгіємом Леонідом Пеларовим

зав. каф. ІПЗ ХНУ

“ 27 квітня ” 2026р.



Sun Apr 26 17:54:24 EEST 2026, Медзатий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

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

Максимальне співпадіння з одним документом 2.0%

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. **Помилоч в документах: 12%**

ID: 270689 Назва: МКР Кіберфізична система визначення рівня креатину в продуктах харчування Додано в БД: 2026-04-26 Автора: Денис КВАСНІЦЬКИЙ Керівники: Юрій ВОЙЧУР Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	121703	847	4050 (3%)	49 (6%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми