

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

### КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору  
Назва теми

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Галузь знань 12 «Інформаційні технології»

Шифр, назва

Спеціальність 123 «Комп'ютерна інженерія»

Шифр, назва

Освітня програма «Комп'ютерна інженерія та програмування»

Назва

Шифр\_КвРКІ-022033.22.02.46-ПЗ

Виконав здобувач IV курсу, група КІ2-22-2

  
Підпис

Богдан КОВАЛЬЧУК  
Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Олександр КОЗЕЛЬСЬКИЙ  
Ініціали, прізвище

Нормоконтролер канд.фіз.-мат.наук, доц.

Науковий ступінь, учене звання

  
Підпис

Тетяна КИСІЛЬ  
Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:  
завідувач кафедри КІС

  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ініціали, прізвище

«01» червня 2026 р.

дата

Хмельницький 2026

ХМЕЛЬНИЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Кафедра КОМП'ЮТЕРНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ

Рівень вищої освіти ПЕРШИЙ (БАКАЛАВРСЬКИЙ)


Галузь знань 12 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Спеціальність 123 КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ

Освітня програма «КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ ТА ПРОГРАМУВАННЯ»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувачка кафедри КІС

 Ольга ПАВЛОВА

“ 10 ” 01 2026 р.

**ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ**

Ковальчуку Богдану Сергійовичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Керівник проекту (роботи) Козельський Олександр, асистент

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

Затверджена наказом ректора університету від 20.01.2026 р. № 7

2. Термін подання здобувачем роботи на кафедру 01.06.2026 р.

3. Вихідні дані до роботи Завдання на кваліфікаційну роботу

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

Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Проектування системи обробки інформації у кіберфізичній системі автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

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

Архітектура ПЗ проекту

Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи

Апаратне забезпечення проекту


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

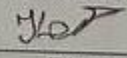
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№з/п	Назва етапів (розділів) дипломного проєкту (роботи)	Термін виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	Вибір напрямку дослідження та узгодження тематики кваліфікаційної роботи з керівником	10.01.2026	виконано
2	Ознайомлення з предметною областю; формулювання мети та задач дослідження; визначення об'єкта та предмета дослідження	01.02.2026	виконано
3	Робота над розділом 1 – дослідження предметної області та постановка задачі	01.03.2026	виконано
4	Робота над розділом 2 – вибір компонентів для проєктування системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору	01.04.2026	виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору	29.04.2026	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2025	виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Підпис Богдан КОВАЛЬЧУК  
Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Підпис Козельський Олександр, асистент  
Імя, ПРІЗВИЩЕ



## АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору».

Автор роботи: Богдан КОВАЛЬЧУК.

Керівник роботи: Козельський Олександр, асистент.


Пояснювальна записка: 63 с., 20 рис., 3 дод., 57 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

АВТОМАТИЗАЦІЯ ВИРОБНИЦТВА, ДОЗУВАННЯ ІНГРЕДІЄНТІВ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, КЛІЄНТ-СЕРВЕРНА АРХІТЕКТУРА, КОЛІРНІ МОДЕЛІ, ЛАКОФАРБОВЕ ВИРОБНИЦТВО, ПРОГРАМНА СИМУЛЯЦІЯ, FASTAPI, REACT.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці та дослідженню симуляційної моделі кіберфізичної системи для автоматизації процесів дозування інгредієнтів у лакофарбовій промисловості. Актуальність теми обумовлена високими вимогами до точності відтворення кольору та оптимізації витрат дороговартісної сировини. Впровадження кіберфізичних принципів дозволяє інтегрувати складні математичні моделі колірних просторів безпосередньо в технологічний цикл, забезпечуючи стабільну якість продукції.

Метою роботи є проектування, програмна реалізація та тестування апаратно-програмного комплексу, що здійснює розрахунок пропорцій компонентів на основі цільових параметрів кольору в реальному часі. Для досягнення мети було проаналізовано сучасні колірні моделі, розроблено алгоритми точного змішування та спроектовано клієнт-серверну архітектуру системи. Практична частина включає розробку високоефективної серверної логіки на базі FastAPI для опрацювання математичних обчислень та створення інтерактивного користувацького інтерфейсу на React для візуалізації та керування параметрами симуляції.





  
Підпис здобувача

30.05.2026

Дата

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	6
1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	6
1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	9
1.3 Постановка задачі.....	15
1.4 Висновки до першого розділу.....	16
2 Проектування системи обробки інформації у кіберфізичній системі автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору.....	17
2.1 Визначення мети та встановлення вимог до проектованої кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	17
2.2 Загальна структура апаратної реалізації кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору.....	21
2.3 Схема електрична принципова системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	24
2.4 Монтажна схема проектованої кіберфізичної системи.....	26
2.5 Аналіз обраних рішень .....	29
2.5.1 Аналіз обраних апаратних рішень та їх технічних характеристик .....	31
2.5.2. Аналіз обраних програмних рішень.....	37

КВРКІ-022033.22.02.46-ПЗ				
Зм.	Арк.	№докум.	Підпис	Дата
Виконав		Ковальчук Богдан		
Перевір.		Козельський Олександр		
Н.контр.		Тетяна КИСЛЬ		01/06
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		
Відомість проекту			Літера	Аркуш
			у	Аркушів
			2	79
ХНУ КІ2-22-2				

2.6 Висновки до другого розділу .....	40
3 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	41
3.1 Огляд використовуваних програмних бібліотек та їх функціональне призначення.....	41
3.2 Розробка програмного коду для автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору .....	46
3.3 Розробка веб-інтерфейсу та візуалізація даних у режимі реального часу .....	56
3.4 Висновки до третього розділу.....	61
Висновки .....	63
Перелік джерел посилань .....	65
Додаток А Архітектура пз проєкту .....	71
Додаток Б Архітектура пз для кіберфізичної системи.....	72
Додаток В Апаратне забезпечення проєкту .....	73

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		3

## ВСТУП

Сучасне промислове виробництво, зокрема в лакофарбовій галузі, висуває дедалі вищі вимоги до точності, швидкості та гнучкості технологічних процесів. Традиційні підходи до дозування інгредієнтів та змішування фарб, що значною мірою спираються на ручну працю або застарілі напівавтоматичні механізми, часто є неефективними. Вони не дозволяють миттєво адаптуватися до індивідуальних замовлень, супроводжуються високим ризиком людської помилки та призводять до нераціонального використання дорогих базових матеріалів і пігментів, а також до збільшення обсягів бракованих партій.

У цьому контексті особливої актуальності набуває впровадження кіберфізичних систем. Такі системи дозволяють безшовно поєднати фізичні виробничі об'єкти із цифровими керуючими сервісами. Завдяки використанню мікроконтролерів, точних математичних алгоритмів розрахунку пропорцій та сучасного програмного забезпечення стає можливим здійснювати моніторинг стану обладнання в режимі реального часу і миттєво переводити цифрові параметри кольору у точні фізичні об'єми рідин.

Впровадження автоматизованих систем дозування сприяє суттєвому підвищенню загальної рентабельності підприємства, забезпечує ідеальну повторюваність складних відтінків та мінімізує витрати сировини. Крім того, автоматизація знижує потребу в безпосередньому контакті персоналу з хімічними компонентами, що суттєво покращує безпеку та умови праці. Такі рішення є важливою складовою концепції «розумного виробництва», яка передбачає глибоку інтеграцію інформаційних технологій у промислову інфраструктуру.

Таким чином, розробка кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб є актуальним і практично значущим завданням. Воно спрямоване на підвищення ефективності управління

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

технологічним процесом, мінімізацію виробничих втрат та впровадження інноваційних підходів у сфері промислової автоматизації.

Метою кваліфікаційної роботи є розробка, програмна реалізація та тестування симуляційної моделі кіберфізичної системи автоматизованого дозування фарб, що забезпечує точний математичний розрахунок пропорцій інгредієнтів на основі цільових параметрів кольору.

Об'єктом дослідження є процес автоматизованого дозування та змішування інгредієнтів у промислових умовах лакофарбового виробництва.

Предметом дослідження виступають алгоритми розрахунку колірних пропорцій, методи імітаційного моделювання фізичних процесів, а також сучасні програмні засоби та технології для побудови клієнт-серверної архітектури системи.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		5

# 1 КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОЗУВАННЯ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ФАРБ З ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОЛЬОРУ

1.1 Аналіз структурних і функціональних особливостей кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Кіберфізичні системи (КФС) інтегрують обчислювальні алгоритми з фізичними процесами для моніторингу та адаптивного керування обладнанням у режимі реального часу. У лакофарбовій промисловості (в рамках Індустрії 4.0) це дозволяє поєднати математичні колірні моделі з прецизійними електромеханічними пристроями для досягнення абсолютної точності змішування компонентів.

Сучасне лакофарбове виробництво стикається з постійно зростаючими вимогами ринку щодо якості продукції, швидкості виконання замовлень та розширення асортименту відтінків [1]. Задоволення індивідуальних потреб споживачів вимагає від підприємств здатності швидко переналаштовувати виробничі лінії для створення фарб із точно заданими колориметричними параметрами [2]. У таких умовах традиційні підходи до процесу дозування інгредієнтів виявляються недостатньо ефективними та застарілими.

Суттєвим недоліком класичних методів змішування є їхня залежність від ручної праці або напівавтоматичних механізмів, які характеризуються високою інерційністю та низькою точністю [3]. При ручному або механічному дозуванні базової основи та кольорових пігментів часто виникають дрібні відхилення від рецептури, що призводить до невідповідності фінального кольору еталонному зразку [4]. Це спричиняє появу бракованих партій, необхідність додаткового коригування суміші та, як наслідок, нераціональне використання дорогих хімічних компонентів і суттєве збільшення виробничих витрат [5].

Вирішення цих проблем лежить у площині впровадження парадигми Індустрії 4.0, зокрема застосування кіберфізичних систем (КФС), які дозволяють безшовно інтегрувати обчислювальні ресурси з фізичними процесами [6]. Оснащення резервуарів з інгредієнтами високоточними датчиками рівня, а ліній подачі автоматизованими клапанами та насосами, керованими мікроконтролерами, створює єдину мережу, де фізичні дії повністю підпорядковуються цифровим алгоритмам [7]. Це дозволяє здійснювати надточний моніторинг та керування процесом мікродозування в режимі реального часу.

Важливою перевагою впровадження КФС є можливість реалізації складних математичних моделей перетворення цифрового опису кольору (наприклад, кольірних просторів RGB, CMYK або HEX) у точні фізичні об'єми (мілілітри) базової білої фарби та відповідних пігментів [8]. Замість використання фіксованих рецептурних карт, розумна система здатна динамічно розраховувати пропорції для будь-якого цільового відтінку з урахуванням поточного заданого об'єму партії [9]. Це забезпечує виняткову гнучкість виробництва та стовідсоткову повторюваність кольору в різних партіях, незалежно від об'єму тари [10].

Окремо слід відзначити роль клієнт-серверної архітектури у розбудові таких систем, що наразі є стандартом для промислових IoT-рішень [11]. Розділення логіки на серверний рівень (обробка даних з датчиків, математичні розрахунки, керування обладнанням) та рівень людино-машинного інтерфейсу (веб-панелі оператора) забезпечує децентралізацію управління [12]. Це дозволяє технологам дистанційно відстежувати стан резервуарів, ініціювати процеси змішування та контролювати етапи дозування з будь-якого пристрою без необхідності фізичної присутності у цеху [13].

Важливим аспектом є також підвищення прозорості та простежуваності виробничих процесів. Системи автоматизованого дозування здатні безперервно генерувати та зберігати телеметричні дані про кожну виготовлену партію:

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

точний час транзакції, витрачені об'єми кожного інгредієнта, цільовий колір та системні повідомлення [14]. Такий детальний цифровий журнал операцій створює надійне інформаційне підґрунтя для сертифікації продукції, вирішення рекламаций від клієнтів та комплексного аудиту ефективності підприємства [15].

Накопичення масивів історичних даних що до роботи дозувальної системи відкриває шлях до застосування методів прогнозної аналітики [16]. На основі аналізу динаміки витрат пігментів та бази підприємство може точно прогнозувати потребу в сировині, автоматизувати закупівлі, оптимізувати складські запаси та планувати графік технічного обслуговування обладнання до його зносу [17].

Крім економічного та технологічного ефекту, автоматизація процесу змішування має вагоме значення для екології та охорони праці. Точне дозування зводить до мінімуму кількість некондиційної фарби, яка підлягає складній утилізації та становить загрозу для довкілля [18]. Водночас мінімізація прямого контакту персоналу з леткими органічними сполуками і токсичними пігментами суттєво знижує професійні ризики для здоров'я працівників [19].

Більше того, така технологічна модернізація створює необхідні передумови для інтеграції лакофарбового підприємства у глобальну концепцію сталого розвитку (Sustainable Development) та переходу до парадигми «зеленого» виробництва. Зниження загальної енергоємності процесів за рахунок точних алгоритмів керування електроприводами дозаторів і міксерів, у поєднанні з мінімізацією небезпечних відходів, значно спрощує процедуру аудиту та сертифікації за міжнародними стандартами екологічного менеджменту (наприклад, ISO 14001) і безпеки праці (ISO 45001). Це, у свою чергу, не лише підвищує соціальну відповідальність бізнесу, а й формує його позитивний імідж, відкриваючи нові конкурентні переваги для закріплення на міжнародних ринках із жорсткими регуляторними вимогами.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Практичне впровадження кіберфізичних систем автоматизованого дозування у лакофарбовому виробництві забезпечує ряд відчутних переваг [20]:

- гарантування абсолютної точності та повторюваності відтінків за рахунок алгоритмічного розрахунку пропорцій;
- значне скорочення часу на переналаштування обладнання для виготовлення нових кольорів та індивідуальних партій;
- мінімізація перевитрат дорогоцінних пігментів та скорочення загальних обсягів бракованої продукції;
- дистанційний моніторинг рівня інгредієнтів у резервуарах та загального стану обладнання в режимі реального часу;
- підвищення рівня безпеки на підприємстві шляхом виключення людського фактора з небезпечних технологічних етапів.

У підсумку, використання кіберфізичних систем при автоматизованому дозуванні інгредієнтів фарб дозволяє не лише усунути недоліки ручного керування, а й створює міцну основу для побудови високотехнологічного, гнучкого та економічно вигідного виробництва нового покоління.

## 1.2 Аналіз програмно-апаратного забезпечення обробки інформації в кіберфізичній системі автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Реалізація сучасних кіберфізичних систем (КФС) автоматизованого дозування фарб базується на глибокій інтеграції апаратних механізмів і багаторівневого програмного забезпечення [20]. Класична архітектура завжди включає чотири ключові рівні: збору даних (промислова сенсорика), виконавчий (дозатори), передачі та обробки з візуалізацією (сервери, НМІ) [21].

На фізичному рівні для безперервного контролю залишків сировини (основи та пігментів) у резервуарах найчастіше застосовують ультразвукові датчики [22]. Вони вимірюють поточний рівень рідини за часом проходження

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

акустичної хвилі [23]. Приклад використання ультразвукового датчика у промисловому резервуарі наведено на рисунку 1.1.

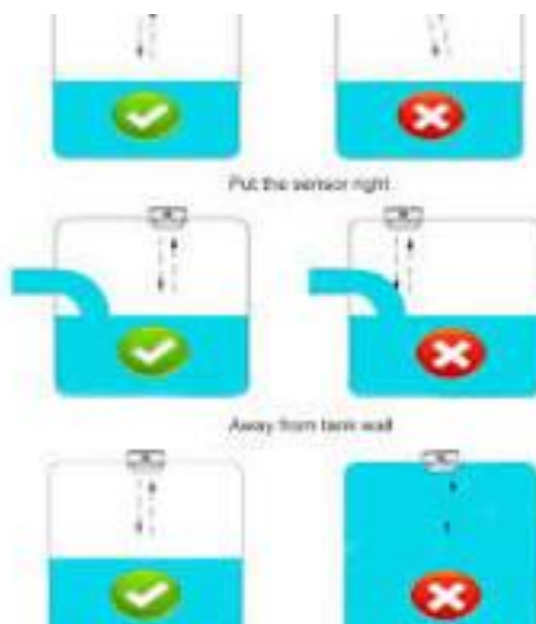


Рисунок 1.1 – Використання ультразвукового датчика для визначення рівня заповнення резервуара з фарбою

В умовах агресивного середовища (утворення піни, густі пари) ультразвукові рішення доповнюють мікрохвильовими (радарними) або гідростатичними датчиками, нечутливими до змін газового простору, що гарантує стабільність даних [24].

Безпосереднє дозування здійснюється високоточними волюметричними витратомірами та електромагнітними клапанами. Для базової фарби використовують швидкісні магістралі, а для кольорових пігментів прецизійні мікродозатори з мінімальною швидкістю подачі [25]. Приклад реалізації дозувальної системи з високоточними витратомірами наведено на рисунку 1.2.

Надійність роботи такої апаратної конфігурації забезпечується інтеграцією весовимірювальних тензодатчиків, які реалізують метод гравіметричного контролю як дублюючого контуру безпеки.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата





Рисунок 1.3 – Комбінований модуль мікродозування та перемішування у складі КФС [59]

Інноваційною категорією є використання систем комп'ютерного зору та цифрової спектрофотометрії для автоматизованого контролю якості. Спектрофотометр порівнює оптичний спектр змішаної фарби з цифровим еталоном [28]. Інтеграція з машинним навчанням дозволяє системі автоматично розраховувати коригувальні мікродози для вирівнювання відтінку [29]. Проте через високу вартість їх застосовують переважно на лініях преміальних покриттів [30]. Приклад використання оптичних сенсорів для спектрального аналізу наведено на рисунку 1.4.

На зазначеному ілюстративному матеріалі відображено архітектуру безперервного моніторингу спектральних характеристик відбивної здатності досліджуваних поверхонь безпосередньо у контурі технологічного процесу.



Рисунок 1.4 – Використання оптичних систем для спектрального аналізу змішаної фарби [60]

Передача телеметрії на нижньому рівні зазвичай реалізується через польові шини (PROFIBUS, Modbus RTU) або інтерфейс IO-Link [31]. Для зв'язку ПЛК із серверами застосовують протоколи промислового Ethernet і бездротові технології (Industrial Wi-Fi, 5G) [32]. Де-факто стандартом уніфікації обміну даними між різним обладнанням став відкритий протокол OPC UA [33]. Узагальнену топологію промислової мережі наведено на рисунку 1.5.

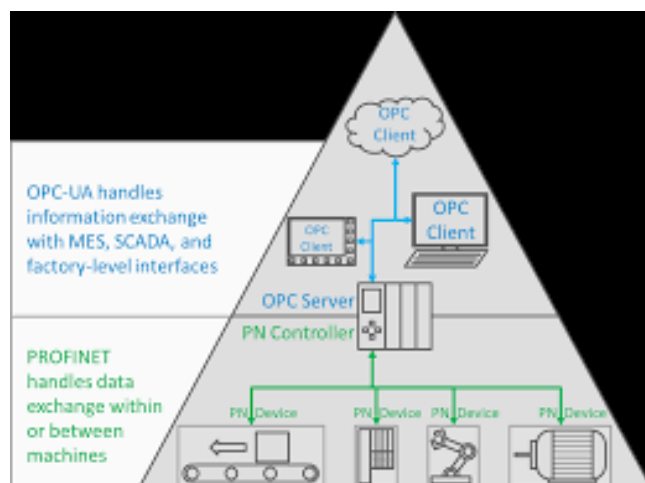


Рисунок 1.5 – Топологія передачі телеметричних та керуючих даних у промисловій кіберфізичній системі

Програмне забезпечення має багаторівневу архітектуру. На нижньому рівні ПЛК під управлінням операційних систем реального часу (RTOS) забезпечують безперервне сканування входів і миттєве формування керуючих сигналів [34]. Над ними функціонує програмне забезпечення SCADA/MES для управління рецептурами [35]. Ці ядра перетворюють параметри замовлення (цільовий колір) у конкретні масові або об'ємні частки для кожного клапана [36]. Приклад архітектури серверної обробки даних наведено на рисунку 1.6.

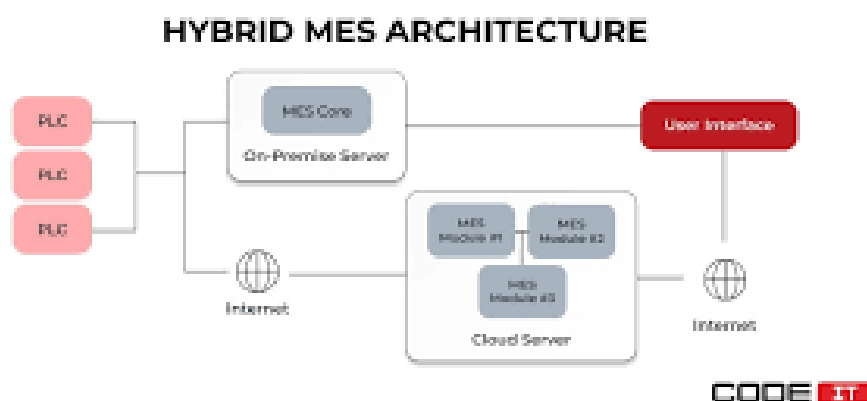


Рисунок 1.6 – Архітектура програмного комплексу керування рецептурами (SCADA/MES)

Для взаємодії персоналу з системою застосовуються веб-орієнтовані людино-машинні інтерфейси, що дозволяють здійснювати моніторинг через браузер з будь-якого пристрою [37]. Такі інтерфейси містять динамічні мнемосхеми та інструменти вибору кольору з миттєвим розрахунком витрат [38].

Критично важливою є функція простежуваності. Системи ведення електронних досьє серій (Electronic Batch Records) автоматично фіксують кожну транзакцію (час, масу, відхилення) [39]. Ці масиви даних є основою для сертифікації, аудиту та прогнозної аналітики стану обладнання (Predictive

Maintenance) [40]. Приклад модуля звітності та моніторингу транзакцій наведено на рисунку 1.7.



Рисунок 1.7 – Веб-інтерфейс модуля електронного логування транзакцій та аналітики

Таким чином, створення сучасної кіберфізичної системи дозування фарб вимагає комплексного підходу до інтеграції прецизійної промислової сенсорики (волюметричних та гравіметричних датчиків), надійних мережевих протоколів (OPC UA, PROFINET) та потужного програмного забезпечення рівня SCADA і MES. Такий технологічний стек гарантує найвищу точність відтворення кольору, мінімізацію впливу людського фактора та повну прозорість виробничого циклу.

### 1.3 Постановка задачі

Головною метою кваліфікаційної роботи є розробка функціонального прототипу кіберфізичної системи автоматизованого дозування фарб для розрахунку та змішування інгредієнтів у режимі реального часу, керування процесами дозування та їх візуалізації.

Для досягнення поставленої мети необхідно виконати наступні завдання:

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 15
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

- визначення функціональних та нефункціональних вимог до системи;
- розробка загальної клієнт-серверної архітектури комплексу;
- створення математичної та симуляційної моделей для розрахунку пропорцій компонентів;
- проєктування логічних алгоритмів та схем мережевого обміну даними;
- вибір програмних технологій та інструментів розробки;
- програмна реалізація серверної (Backend) та клієнтської (Frontend) частин системи;
- загальне тестування розробленого прототипу.

Таким чином, дотримуючись вищезазначених етапів, можна виконати поставлену задачу та досягти мети кваліфікаційної роботи створення ефективної та гнучкої кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану систем автоматизованого дозування із застосуванням технологій кіберфізичних систем (КФС). Обґрунтовано актуальність впровадження інтелектуального управління для підвищення точності відтворення кольору, мінімізації витрат сировини та забезпечення гнучкості виробництва.

Здійснено огляд базових апаратних рішень (промислові сенсори, прецизійні дозатори, виконавчі механізми) та програмних підходів (клієнт-серверна архітектура, математичні моделі конвертації колірних просторів).

Проведений аналіз формує надійну науково-технічну базу для розробки власного функціонального прототипу кіберфізичної системи. Це дозволить на практиці реалізувати точний розрахунок пропорцій інгредієнтів, програмно зімітувати процеси їх дозування в режимі реального часу та забезпечити зручний контроль за виробництвом через веб-інтерфейс.

## 2 ПРОЄКТУВАННЯ СИСТЕМИ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ У КІБЕРФІЗИЧНІЙ СИСТЕМІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОЗУВАННЯ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ФАРБ З ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОЛЬОРУ

2.1 Визначення мети та встановлення вимог до проєктованої кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Будь-який інженерний процес створення складних програмно-апаратних комплексів починається з чіткого формулювання кінцевої мети. Для розробки кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів цей етап є критично важливим, оскільки він задає вектор розвитку архітектури, впливає на вибір технологічного стека та математичних алгоритмів. Розмиті орієнтири або їх зміна в процесі імплементації неминуче призводять до розростання технічного боргу, збільшення витрат часу та неефективності готового прототипу.

Слід зазначити, що у контексті кіберфізичних систем формулювання мети виходить за межі класичного програмного проєктування, оскільки охоплює не лише програмну складову, але й фізичні компоненти системи датчики, магістралі передачі рідин та виконавчі механізми. Таким чином, мета повинна враховувати особливості взаємодії між цифровим і фізичним середовищем, зокрема затримки передачі сигналів керування, можливі похибки дозування через інерційність рідин та обмеження апаратного забезпечення.

Крім того, важливо враховувати зовнішні фактори, які можуть впливати на функціонування системи, такі як зміна температурного режиму в приміщенні, що впливає на в'язкість базової фарби, або утворення піни під час швидкого змішування. Ігнорування цих аспектів на етапі постановки задачі може призвести до системних похибок у передачі кольору та повної непридатності макета в умовах експлуатації.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 17
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Фундаментальним завданням даного проєкту є проєктування та розробка інтелектуального програмного рішення для автоматизації процесу створення фарб за заданими користувачем параметрами. Головна ідея полягає в тому, щоб на основі введеного колірному коду система могла миттєво генерувати точну математичну рецептуру пропорцій і самостійно керувати фізичним процесом дозування. Це дозволить повністю виключити людський фактор, уникнути помилок при ручному змішуванні та гарантувати абсолютну повторюваність складних відтінків для будь-яких партій.

Важливою складовою поставленої мети є також економічний та екологічний аспект. Оптимізація процесу дозування сприяє мінімізації перевитрат високовартісних пігментів та суттєво зменшує обсяги некондиційної фарби, яка підлягає складній хімічній утилізації. Таким чином, впровадження системи має не лише комерційний, але й екологічний ефект, що відповідає сучасним концепціям сталого промислового виробництва.

Окрім цього, система може виступати як інструмент для прийняття управлінських рішень. На основі накопичених даних в електронному журналі транзакцій можливо аналізувати динаміку витрат базової фарби та пігментів, визначати найбільш затребувані відтінки та оптимізувати графіки закупівель сировини з урахуванням реального навантаження на обладнання.

Спираючись на затверджену мету, проводиться декомпозиція завдання на конкретні технічні критерії. Вони встановлюють межі можливостей системи, специфіку обробки даних та умови її надійної експлуатації. Крім того, виявлення логічних помилок на стадії формування вимог обходиться значно дешевше, ніж рефакторинг коду на етапі запуску. Традиційно ці критерії класифікують на функціональні та нефункціональні вимоги.

Процес формування вимог також передбачає визначення зацікавлених сторін (stakeholders), до яких належать інженери-технологи, колористи, оператори ліній та керівництво підприємства. Кожна з цих груп має власні

очікування від системи, що повинні бути враховані для забезпечення її практичної цінності.

Також доцільно враховувати можливість подальшої інтеграції системи з іншими корпоративними інформаційними платформами, такими як ERP або MES-системи, що дозволить розширити функціональність та підвищити ефективність використання даних у межах всього підприємства.

До функціональних вимог розроблюваної системи автоматизованого дозування фарб належать:

- безперервний контроль ресурсів, програмний комплекс має своєчасно приймати показники від датчиків рівня (або їх симуляційної моделі), актуалізуючи дані про залишки рідини у резервуарах для запобігання запуску обладнання при нестачі сировини;

- математична трансляція моделей, алгоритми системи повинні самостійно конвертувати цифрові кольорні координати (HEX/RGB) у фізичні об'ємні величини (мілілітри), враховуючи, що загальна частка пігментів не має перевищувати встановленого ліміту у 20% від об'єму;

- диференційоване керування дозаторами, система повинна послідовно керувати виконавчими механізмами з різною пропускною здатністю, забезпечуючи швидку подачу бази (100 мл/с) та точне мікродозування пігментів (20 мл/с), з подальшою активацією міксерів;

- візуальний моніторинг, обов'язковою є наявність диспетчерського веб-інтерфейсу, який відображатиме рівень залишків у ємностях та поточний статус обладнання у режимі реального часу;

- збір аналітики та логування, система повинна фіксувати історію створених партій, зберігаючи час, параметри кольору, об'єм та статуси успішності для формування статистичної бази даних.

Окрему увагу слід приділити точності та достовірності отриманих даних, оскільки саме вони є основою для подальших обчислень і прийняття рішень. Використання неякісних або некоректно відкаліброваних датчиків може

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

призвести до порушення пропорцій та зниження загальної якості виробленої фарби.

Крім того, функціональні можливості системи можуть бути розширені за рахунок впровадження механізмів прогнозування. Застосування методів аналітики дозволить передбачати швидкість падіння рівня в резервуарах на основі історичних даних, що відкриває можливість своєчасного їх поповнення.

Серед вирішальних нефункціональних вимог до кіберфізичної системи виділяють наступні:

- висока продуктивність обчислень, розрахунок пропорцій та ініціалізація керуючих сигналів має відбуватися швидко, а дані на диспетчерській панелі повинні оновлюватися асинхронно без видимих затримок чи блокування інтерфейсу;

- відмовостійкість архітектури, додаток повинен гарантувати стабільну роботу, коректно обробляти помилки логіки (запити на надмірний об'єм) та блокувати запуск нової партії до повного завершення поточного циклу гомогенізації;

- масштабованість рішення, структура бази даних та модульний підхід до написання коду повинні забезпечувати можливість легкого додавання нових резервуарів (для лаку чи розчинників) без необхідності глобального переписування ядра системи;

- ергономічність інтерфейсу, подання технологічної інформації має бути структурованим, інтуїтивно зрозумілим (використання кольорової індикації, шкал заповненості) і не перевантажувати оператора зайвими візуальними елементами.

Важливим нефункціональним аспектом є також безпека даних та процесу. Оскільки система працює з підключеним обладнанням, необхідно передбачити механізми валідації вхідних параметрів та захисту API-ендпоінтів від несанкціонованого втручання в налаштування рецептур.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 20
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Не менш значущою є підтримка та супровід системи після її впровадження. Архітектура повинна передбачати можливість оновлення програмного забезпечення, логування помилок та швидкого скидання станів резервуарів через вбудовану функцію технічного обслуговування.

З урахуванням усіх вищезазначених вимог формується цілісне бачення майбутньої системи як складного багаторівневого рішення, що поєднує апаратні засоби виконання, програмні модулі обчислень та інтерфейси взаємодії з користувачем. Такий підхід дозволяє забезпечити гнучкість, адаптивність та високу ефективність функціонування системи.

Успішне виконання перелічених вимог стане запорукою створення не просто робочого макета, а повноцінного інструменту для автоматизації виробництва. Впровадження такої системи забезпечить якісно новий рівень контролю за ресурсами, перетворюючи звичайне змішування фарб на високотехнологічний та ресурсоефективний процес.

## 2.2 Загальна структура апаратної реалізації кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Сучасна кіберфізична система (КФС) автоматизованого дозування лакофарбових матеріалів є високоінтегрованим комплексом, здатним динамічно коригувати роботу в режимі реального часу завдяки замкненому контуру керування. Архітектура розробленої системи побудована за багаторівневим ієрархічним принципом (відповідно до парадигми Індустрії 4.0), що чітко розмежовує апаратне управління, збір даних та серверну бізнес-логіку. Схематичне зображення загальної структури проєктованої системи та векторів інформаційних потоків наведено на рисунку 2.1.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
						21
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

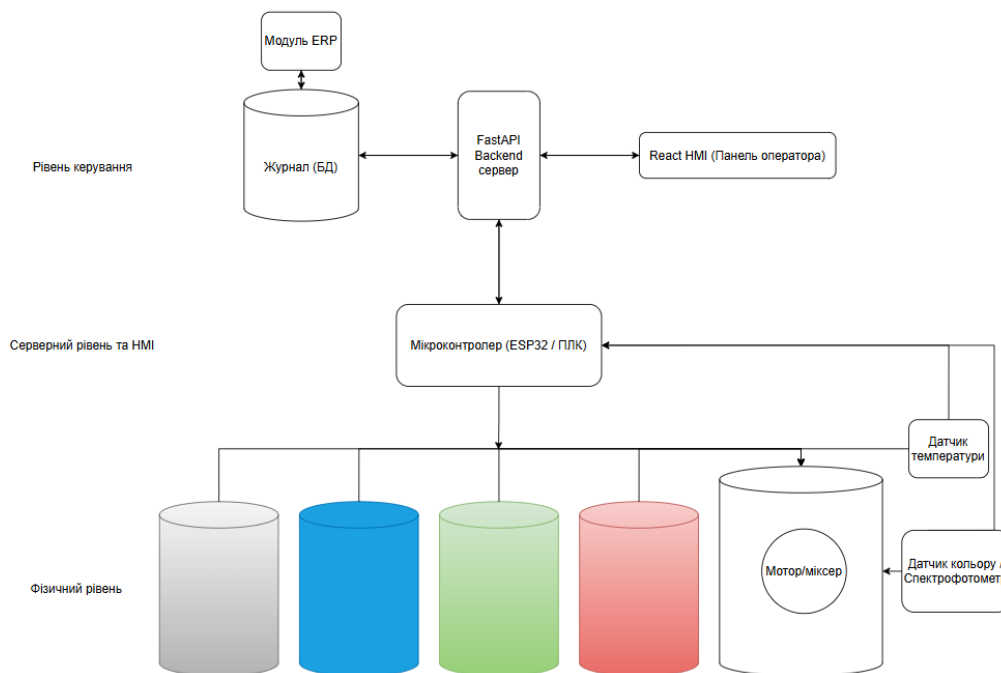


Рисунок 2.1 – Загальна багаторівнева архітектура кіберфізичної системи

Відповідно до наведеної структурної схеми, найнижчий фізичний рівень охоплює безпосереднє виробниче обладнання: чотири резервуари (базова фарба та три пігменти) і загальну ємність із міксером (дисольвером). Подача базової основи здійснюється високопродуктивними насосами, а кольорових пігментів – прецизійними системами мікродозування. Даний рівень також оснащений розгалуженою мережею вимірювальних пристроїв, серед яких датчики залишків рідини, датчики температури та спектрофотометр. Останній відіграє ключову роль, забезпечуючи систему безперервним оптичним зворотним зв'язком щодо фактичного кольору отриманої суміші.

Над фізичним обладнанням розташовується Edge-рівень (рівень керування та зв'язку), реалізований на базі мікроконтролерного вузла (архітектури ESP32 або промислового ПЛК). Цей модуль виконує роль високошвидкісного апаратного мосту: він збирає та фільтрує телеметрію з польової сенсорики, транслюючи очищені дані на сервер. У зворотному напрямку локальний контролер перетворює отримані цифрові команди на керівні електричні імпульси. Деталізовану схему взаємодії виконавчих

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

механізмів та вимірювальних пристроїв на нижніх рівнях наведено на рисунку 2.2.

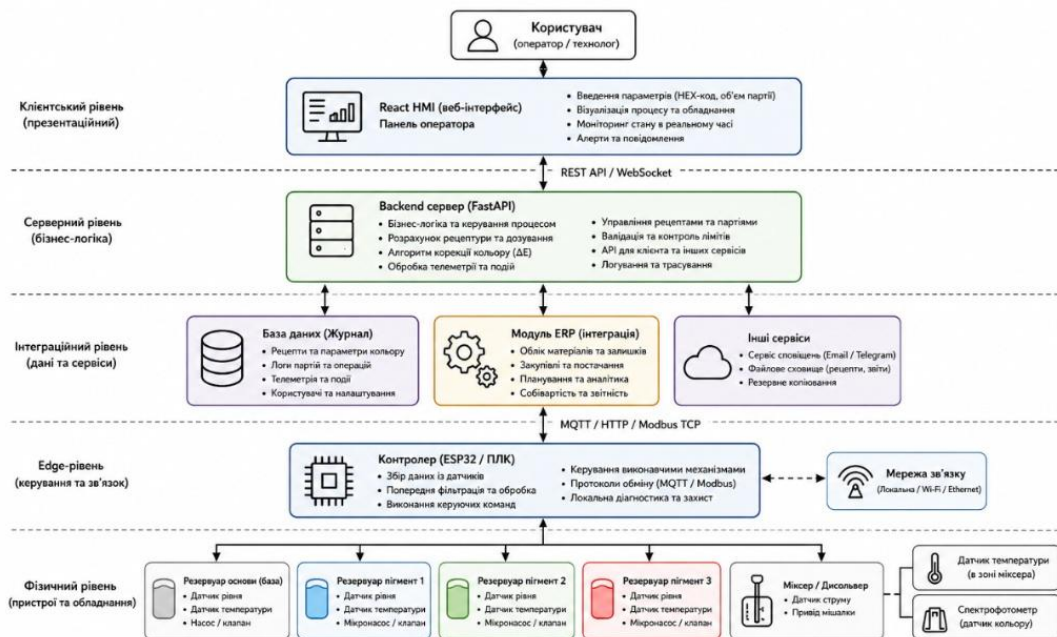


Рисунок 2.2 – Структура взаємодії компонентів на фізичному та Edge-рівнях

Центральним інтелектуальним ядром усього комплексу виступає серверний рівень (бізнес-логіка), представлений бекенд-сервером на базі сучасних асинхронних фреймворків, таких як FastAPI. Він приймає цифрові параметри замовлення, запускає математичні алгоритми субтрактивного синтезу для розрахунку пропорцій інгредієнтів та ініціює цикли мікрокоригування на основі колірної похибки ( $\Delta E$ ). Асинхронна архітектура дозволяє серверу виконувати тривалі процеси дозування у фоновому режимі, залишаючись відкритим для миттєвої обробки телеметрії.

Для забезпечення повної електронної простежуваності виробничого процесу передбачено інтеграційний рівень. Усі технологічні транзакції, задані параметри кольору та фактичні витрати матеріалів синхронно записуються у базу даних (Журнал). Інтеграція бази даних із модулем ERP дозволяє автоматизувати формування замовлень на закупівлю сировини при досягненні

критичний мінімумів, вести аналітику собівартості кожної виробленої партії та реалізовувати системи прогнозного обслуговування обладнання.

Безпосередня взаємодія оператора або технолога з апаратно-програмним комплексом здійснюється через клієнтський рівень, реалізований у вигляді диспетчерського веб-інтерфейсу (React HMI). Використовуючи REST API та протокол WebSockets, панель оператора виступає повноцінним «цифровим двійником» фізичного обладнання. У режимі реального часу інтерфейс дозволяє вводити цільовий HEX-код, задавати об'єм партії, а також візуалізувати процес спустошення резервуарів та поточний статус системи.

У підсумку, чітке розмежування обов'язків між мікроконтролером, що працює в жорсткому реальному часі, та сервером, що виконує масивний математичний аналіз, дозволяє створити максимально стійку до відмов архітектуру. Вона повною мірою реалізує філософію сучасного цифрового виробництва, поєднуючи фізичні виконавчі механізми з потужними інструментами алгоритмічної аналітики та дистанційного моніторингу.

### 2.3 Схема електрична принципова системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Принципова електрична схема визначає архітектуру апаратної частини кіберфізичної системи (КФС) та логіку взаємодії обчислювального ядра із сенсорною мережею і виконавчими механізмами. Вона реалізує механізм замкненого зворотного зв'язку для адаптації до змінних фізичних параметрів у реальному часі. Схема є базою для трасування друкованої плати, розрахунку енергетичного балансу та забезпечення відмовостійкості компонентів. Схему відображено на рисунку 2.3.

На наведеній схемі (рисунок 2.3) чітко розмежовано цифрову (керуючу) та силову (виконавчу) частини пристрою, що мінімізує вплив комутаційних завад на прецизійні вимірювальні тракти.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 24
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

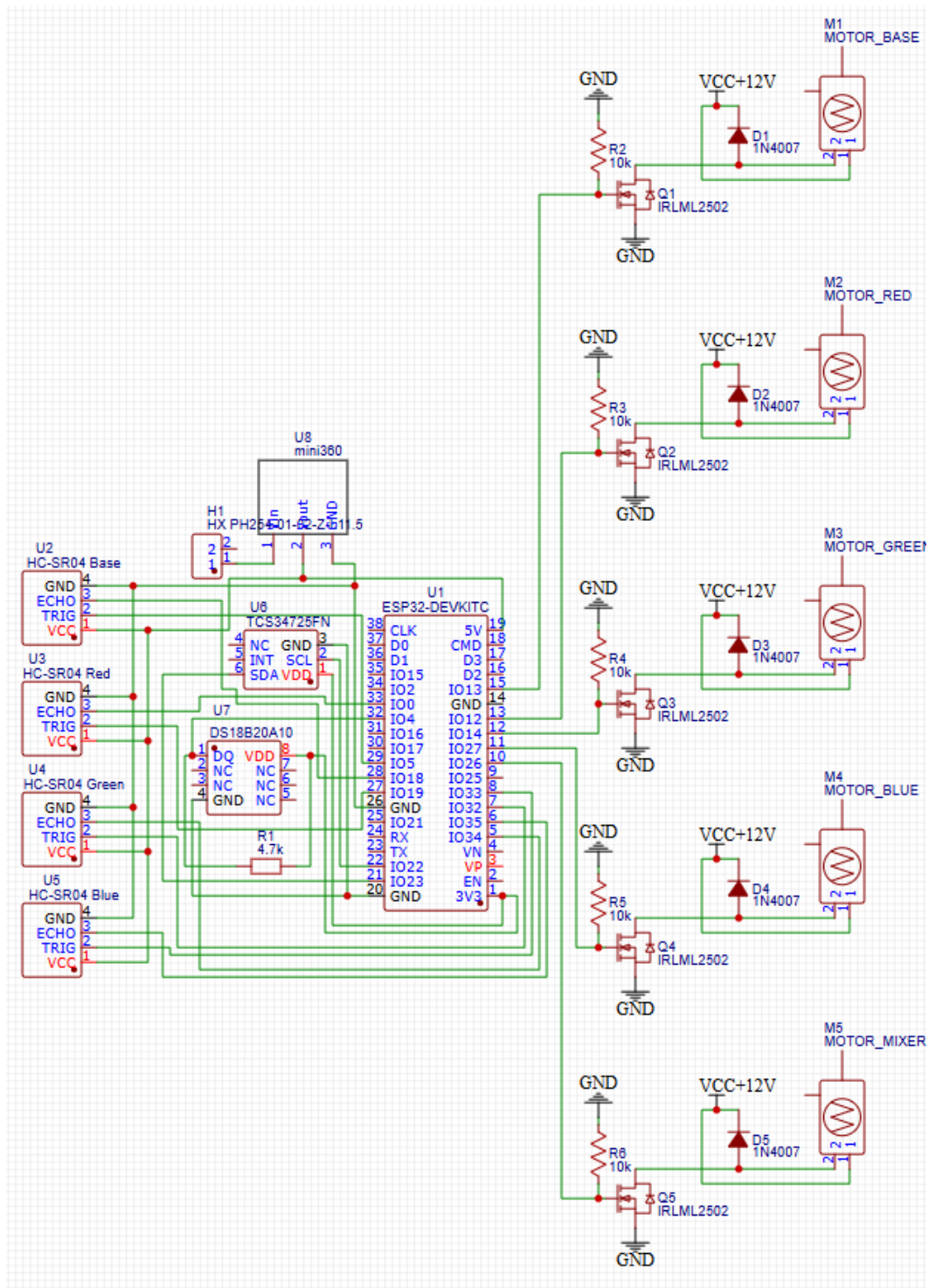


Рисунок 2.3 – Схема електрична принципова

Центральним обчислювальним вузлом обрано 32-бітний двоядерний мікроконтролер ESP32-DEVKITC (U1). Детермінований розподіл задач між ядрами (одне для підтримки Wi-Fi та взаємодії з сервером, друге для

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

опитування сенсорів і генерації ШІМ) гарантує стабільну роботу в режимі жорсткого реального часу.

Енергетична підсистема розділяє силові та логічні лінії. Зовнішня напруга 12V (H1) живить помпи та міксер. Для стабілізації живлення мікроконтролера та ультразвукових сенсорів інтегровано високоефективний понижуючий DC-DC перетворювач mini360 (U8) на 5V. Чутливі елементи живляться від внутрішнього малошумного регулятора ESP32 напругою 3.3V.

Сенсорна мережа включає чотири ультразвукові модулі HC-SR04 для безперервного контролю об'ємних залишків рідин. Спектрофотометрична верифікація здійснюється 16-бітним датчиком кольору TCS34725 по шині I2C. Для термокомпенсації в'язкості фарби використовується датчик DS18B20 на шині 1-Wire, стабільність якої забезпечується підтягуючим резистором R1.

Керування індуктивним навантаженням (електродвигунами) реалізовано через п'ять силових каскадів на N-каналних MOSFET-транзисторах логічного рівня IRLML2502 (Q1–Q5). Для забезпечення відмовостійкості кожен канал оснащено стягуючими резисторами R2–R6 (10 кОм) для фіксації закритого стану при ініціалізації, та захисними діодами 1N4007 (D1–D5) для гасіння сплесків самоіндукції під час ШІМ-комутації.

Експлуатаційна надійність в агресивному промисловому середовищі досягається використанням фільтруючих конденсаторів та просторовим розділенням цифрових і силових ліній на етапі проектування плати. Розроблена схема надійно трансформує програмні команди у фізичні дії, забезпечуючи високі метрологічні характеристики технологічного циклу.

## 2.4 Монтажна схема проекрованої кіберфізичної системи

На етапі апаратної реалізації кіберфізичної системи (КФС) автоматизованого дозування інгредієнтів критичне значення має розробка монтажною схеми. Цей документ є деталізованим візуальним планом фізичного

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

розміщення компонентів та їхнього електричного сполучення, що враховує логіку з'єднань, геометричні параметри модулів та ергономіку конструкції. На відміну від принципової схеми, монтажний план орієнтований на оптимізацію внутрішнього простору та мінімізацію ризиків електромагнітних перехресних завад, що є вирішальним фактором для систем із прецизійним керуванням.

Для створення функціонального прототипу дозувальної установки обрано модульний підхід із застосуванням безпайкових макетних плат (Breadboards). Це дозволяє об'єднати всі складові частини в єдину мережу для первинних випробувань без ризику помилок при підключенні великої кількості GPIO-пінів мікроконтролера. Висока деталізація плану забезпечує відмінну діагностичну здатність: у разі відмови інженер може миттєво ідентифікувати точку розриву чи конфлікт ліній даних. Відповідну монтажну схему відображено на рисунку 2.4.

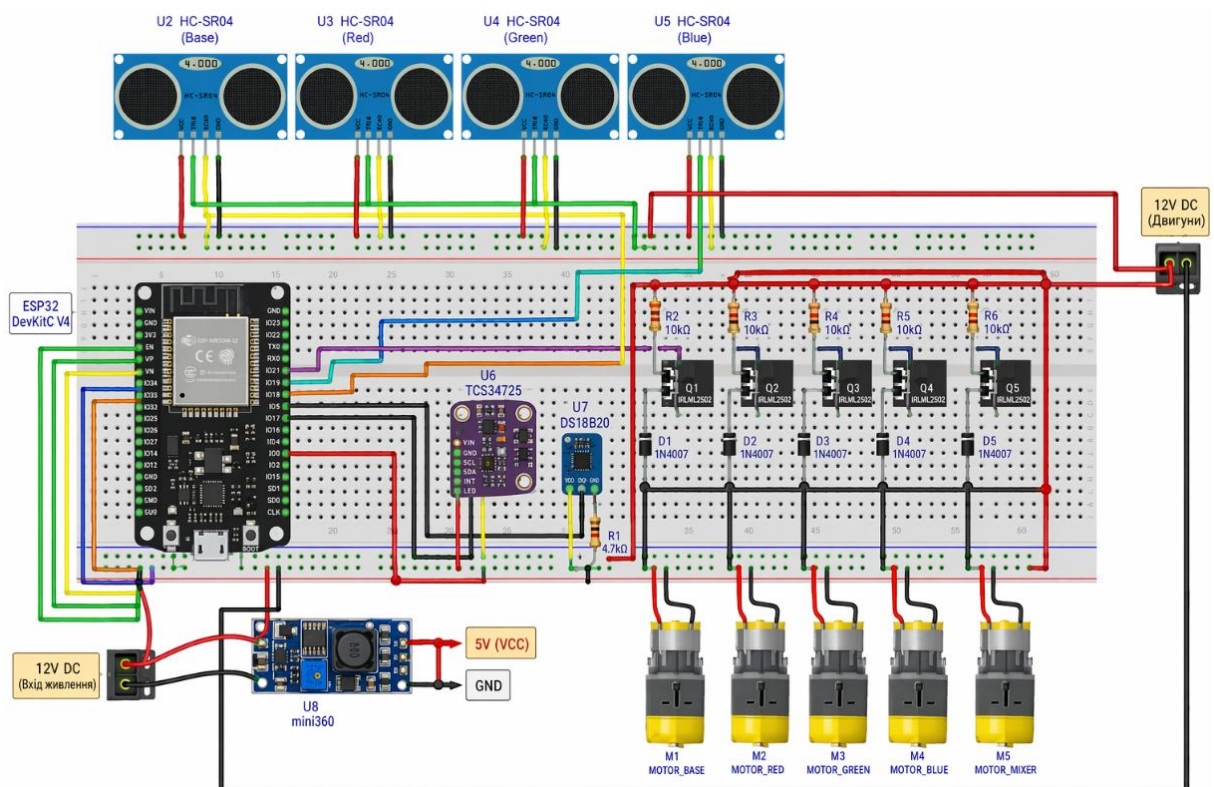


Рисунок 2.4 – Монтажна схема апаратного вузла кіберфізичної системи дозування фарб

Основою фізичного компонування є мікроконтролер ESP32 DevKitC V4, розміщений у центральній частині монтажного поля. Таке розташування забезпечує рівномірний доступ до периферійних вузлів та симетричність сигнальних трас. У монтажній схемі реалізовано чітке функціональне зонування: окремо виділено блоки слабкострумової логіки та зони силової комутації для мінімізації наведень.

Система отримує живлення від зовнішнього джерела 12V через стабілізований роз'єм H1 для живлення силового каскаду двигунів. Імпульсний перетворювач mini360 здійснює трансформацію напруги до 5V для мікроконтролера та ультразвукових далекомірів. Такий підхід ефективно ізолювати обчислювальне ядро від високочастотного шуму щіткових двигунів.

При фізичній реалізації збірки застосовано суворе кольове кодування: червоне маркування (+5V та +12V), чорне (GND), сигнальні магістралі диференційовані за кольорами (зелений, жовтий, синій, білий) для інтерфейсів I2C, 1-Wire та ШІМ-керування. Використання прецизійних перемичок гарантує надійність контактів в умовах вібрацій.

Силовий каскад (для чотирьох pomp M1–M4 та міксера M5) сконцентровано у правій частині простору. Кожен канал включає MOSFET транзистор (Q1–Q5), стягуючий резистор 10 кОм (R2–R6) та захисний діод 1N4007 (D1–D5). Компактне групування силових елементів дозволяє ефективно керувати тепловим режимом та спрощує підключення гідравлічних магістралей.

Сенсорний блок (спектрофотометр TCS34725, термометр DS18B20 та далекоміри HC-SR04) підключений еластичними шлейфами, що дає змогу винести чутливі елементи безпосередньо у технологічні зони резервуарів. Цифрова шина I2C має мінімальну довжину, а силові провідники максимально віддалені від входів мікроконтролера.

Оскільки процес передбачає роботу з рідинами, план передбачає подальшу інтеграцію вузла у герметичний корпус (IP65) з використанням

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 28
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

авіаційних роз'ємів (GX16) для підключення зовнішніх механізмів, що підвищить механічну стійкість та спростить обслуговування.

Аналіз розробленої монтажною схемою підтверджує оптимальне розташування компонентів, що мінімізує вплив завад та підвищує метрологічну точність системи. Це є надійним фундаментом для переходу від макетного прототипу до проектування спеціалізованої друкованої плати та інтеграції в промисловий корпус.

## 2.5 Аналіз обраних рішень

Завершальним етапом проектування апаратного забезпечення кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів є комплексне оцінювання обраної елементної бази, її апаратної сумісності та застосованих архітектурних підходів. На відміну від простих систем автоматизації, КФС вимагає високого ступеня інтеграції між обчислювальними алгоритмами та фізичними процесами. Враховуючи специфіку експлуатації установки роботу з хімічно активними речовинами, необхідність прецизійної точності мікродозування та потребу в безперервному аналізі оптичних характеристик суміші обґрунтований вибір мікроконтролера, сенсорів та силових ключів стає критичним фактором забезпечення метрологічної надійності системи.

Аналіз обраних рішень охоплює не лише технічні характеристики окремих компонентів, але й оцінку їх синергічної взаємодії в межах єдиного замкненого контуру керування (Closed-loop control). Ключовим аспектом є повна узгодженість параметрів між низьковольтною логікою ESP32 та силовими виконавчими механізмами. Застосування MOSFET-транзисторів із логічним рівнем керування дозволило уникнути використання додаткових драйверів, що спростило архітектуру без втрати швидкодії. Використання імпульсного перетворювача напруги mini360 забезпечило стабільний

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 29
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

енергетичний баланс системи, нівелюючи вплив пікових навантажень при старті двигунів на стабільність роботи цифрових шин I2C та 1-Wire.

З іншого боку, впровадження інтелектуальних датчиків кольору та температури дозволило реалізувати принцип адаптивного керування. Програмно-логічні рішення, що базуються на обробці даних від спектрофотометра TCS34725, гарантують високу точність відтворення цільового відтінку, автоматично компенсуючи фізичні похибки дозування. Це перетворює систему з лінійного автомата на повноцінну кіберфізичну одиницю, здатну до самокорекції.

Особливу увагу приділено питанням масштабованості та економічної доцільності розробленого рішення. Обрана платформа ESP32 забезпечує високу обчислювальну потужність за відносно низької вартості, що робить систему конкурентоспроможною у порівнянні з промисловими ПЛК (програмованими логічними контролерами). Архітектура силового каскаду та сенсорної мережі дозволяє легко масштабувати установку, збільшуючи кількість каналів дозування пігментів без радикальної зміни центрального апаратного вузла. Сумісність із сучасними стандартами IoT (через протоколи Wi-Fi та MQTT/HTTP) інтегрує систему в загальну концепцію цифрового виробництва («Розумний завод»), дозволяючи здійснювати дистанційний моніторинг залишків сировини та аналітику продуктивності через ERP-системи.

Проведення такого комплексного аналізу дає змогу об'єктивно підтвердити, що імплементовані технічні рішення повністю задовольняють початкові функціональні вимоги щодо точності, швидкодії та надійності КФС. Виявлені під час проектування особливості взаємодії компонентів дозволяють окреслити чіткі перспективи для подальшої модернізації пристрою, зокрема в напрямку впровадження алгоритмів машинного навчання для прогнозування витрат пігментів та інтеграції більш складних систем гомогенізації. Таким чином, розроблена апаратна база є стійким фундаментом для програмної

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 30
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

реалізації алгоритмів керування та створення високоефективного продукту для лакофарбової промисловості.

### 2.5.1 Аналіз обраних апаратних рішень та їх технічних характеристик

Для забезпечення повноцінного, прецизійного та безперебійного функціонування проєктованої кіберфізичної системи дозування інгредієнтів був сформований комплексний перелік апаратних компонентів. На відміну від автономних мобільних IoT-пристроїв, дана установка є стаціонарною складовою виробничого процесу. Це знімає жорсткі обмеження щодо енергоспоживання, проте висуває підвищені вимоги до обчислювальної потужності, електромагнітної сумісності (ЕМС) та здатності керувати потужними індуктивними навантаженнями. Апаратна база системи логічно поділяється на чотири кластери: обчислювально-комунікаційне ядро, підсистема живлення, сенсорна мережа та силовий виконавчий каскад.

Вибір мікроконтролера є найвідповідальнішим етапом апаратного проєктування, оскільки він визначає архітектуру всієї системи, її швидкодію та накладає обмеження на вибір периферії. У результаті детального порівняльного аналізу від використання популярних 8-бітних рішень (Arduino Mega) або одноплатних (ESP8266) було вирішено відмовитися через нестачу апаратних ресурсів для паралельної роботи з мережею та ШІМ-генераторами. Оптимальним вибором стала відлагоджувальна плата ESP32-DevKitC V4, побудована на базі високоінтегрованого чіпа ESP32-WROOM-32E [41].

Обчислювальним серцем модуля є двоядерний 32-розрядний мікропроцесор Xtensa Dual-Core 32-bit LX6. Його базова тактова частота становить 240 МГц, що забезпечує продуктивність на рівні 600 DMIPS. Наявність двох незалежних ядер є критично важливою: ядро PRO\_CPU (Protocol CPU) виділене для підтримки Wi-Fi стеку та безперервної HTTP-комунікації з сервером FastAPI, тоді як ядро APP\_CPU (Application CPU) в

режимі жорсткого реального часу опитує I2C-датчики та керує швидкостями двигунів. Обсяг інтегрованої оперативної пам'яті (SRAM) складає 520 КБ, а об'єм зовнішньої флеш-пам'яті 4 МБ, що з великим запасом перекриває потреби вбудованого програмного забезпечення.

Плата DevKitC містить необхідну обв'язку: лінійний стабілізатор напруги AMS1117-3.3, що забезпечує живлення чіпа, та мікросхему-міст CP2102 для прошивання та відлагодження через порт Micro-USB.

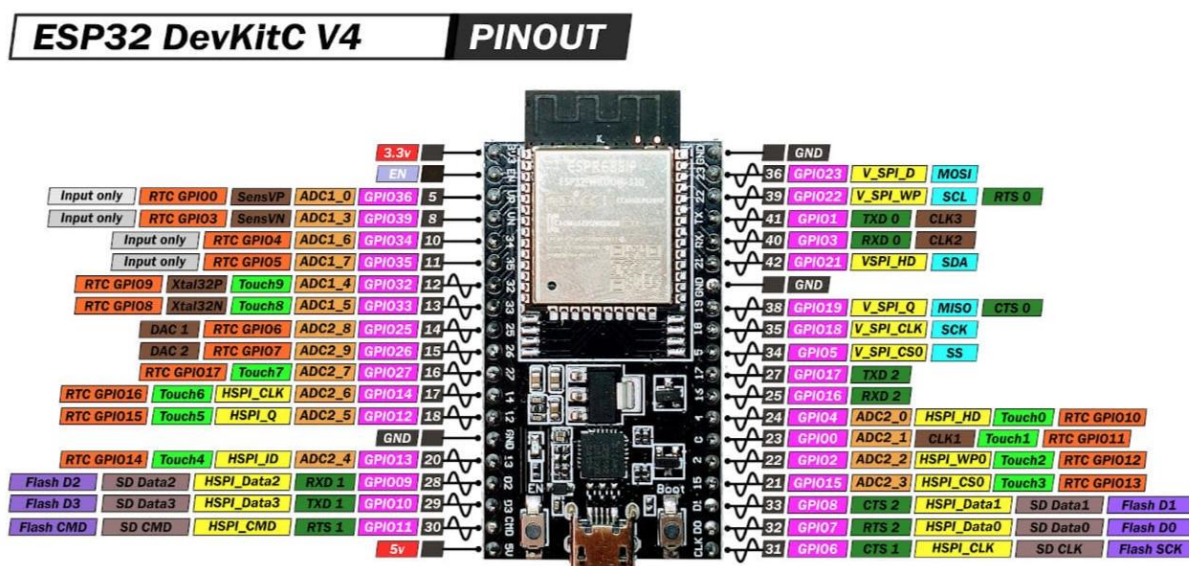


Рисунок 2.5 – Апаратне компонування та розташування контактів плати ESP32-DevKitC V4

Враховуючи, що основним джерелом енергії для електродвигунів є зовнішній блок живлення на 12V, використання класичних лінійних стабілізаторів (на зразок LM7805) для живлення мікроконтролера є технічно недоцільним через колосальні теплові втрати. Тому для забезпечення логічної частини системи напругою 5V був обраний надкомпактний імпульсний понижуючий DC-DC перетворювач mini360, побудований на базі мікросхеми MP2307 [42].

Даний модуль працює за топологією Synchronous Rectified Buck Converter. Завдяки високій частоті перемикання (340 кГц) перетворювач використовує мініатюрний дросель, що суттєво зменшує загальні габарити. Коефіцієнт корисної дії (ККД) модуля досягає 95%, що дозволяє йому віддавати струм до 1.8 А (до 3 А у піку) без використання радіатора. Вихідна напруга 5V із цього модуля ідеально підходить для живлення ультразвукових датчиків HC-SR04 та подається на пін VIN мікроконтролера ESP32.

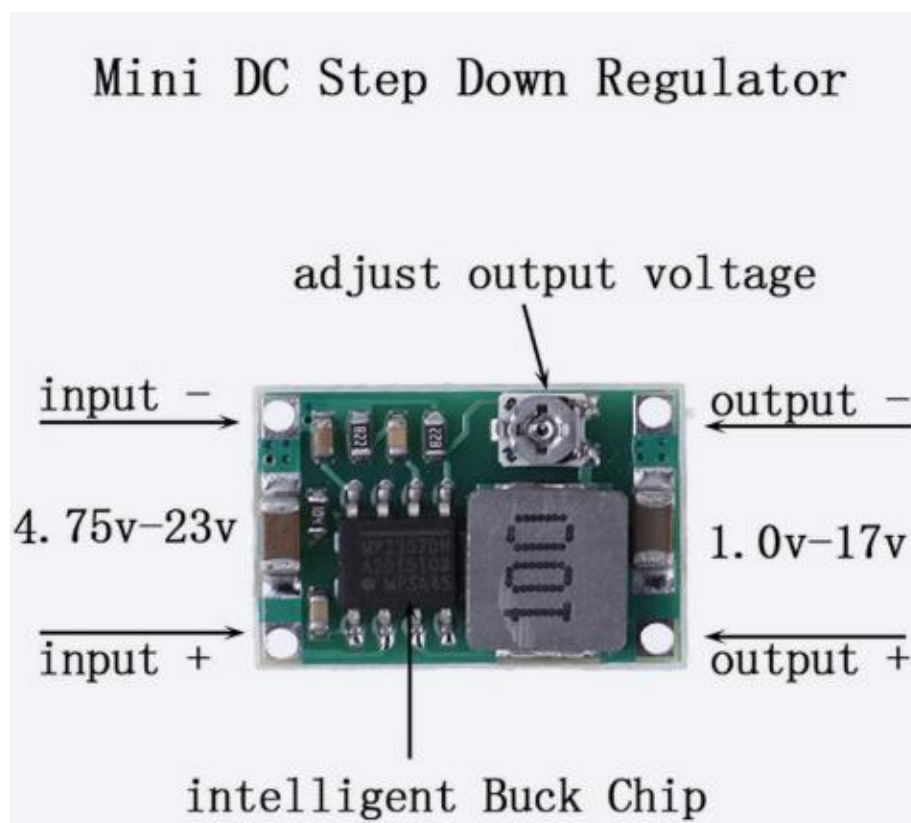


Рисунок 2.6 – Імпульсний понижуючий перетворювач mini360

Для забезпечення замкненого контуру керування (Closed-loop control) ключовим сенсором системи виступає датчик кольору TCS34725 [43]. Вибір саме цього цифрового спектрофотометра замість дешевих аналогових фоторезисторів обґрунтований його надвисокою чутливістю та наявністю інфрачервоного (IR) блокуючого фільтра. Цей фільтр мінімізує вплив

зовнішнього освітлення та теплового випромінювання на результати вимірювання, що є критичним для точного визначення відтінку рідких фарб, які мають складний коефіцієнт відбиття світла.

Датчик працює за шиною I2C (швидкість до 400 кбіт/с) і повертає 16-бітні значення для чотирьох каналів: червоного (R), зеленого (G), синього (B) та загального рівня освітленості (Clear). Вбудовані аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) гарантують відсутність наведень при передачі даних. Динамічний діапазон вимірювання становить вражаючі 3 800 000: 1, що дозволяє системі розрізняти найменші коливання відтінку навіть при поганому освітленні резервуару гомогенізації.

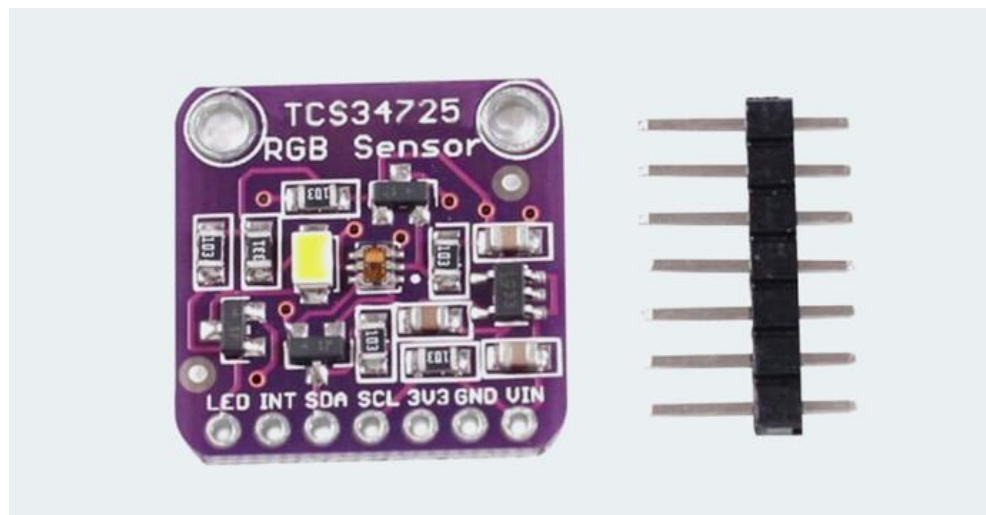


Рисунок 2.7 – Модуль прецизійного датчика кольору TCS34725 [61]

Контроль об'ємних залишків сировини у чотирьох дозувальних резервуарах реалізовано за допомогою масиву ультразвукових далекомірів HC-SR04 [44]. Відмова від інфрачервоних або оптичних датчиків рівня аргументована фізичними властивостями пігментів: темні та густі рідини повністю поглинають інфрачервоне випромінювання, що робить оптичні датчики «сліпими». Натомість акустичні хвилі (частота 40 кГц) стабільно

відбиваються від межі розділу фаз «повітря – рідина» незалежно від кольору останньої.

Датчик забезпечує точність вимірювання до 3 мм у діапазоні від 2 до 400 см. Оскільки модуль працює від логічного рівня 5V, лінії Echo підключені до спеціальних пінів ESP32 (IO34, IO35), які здатні працювати виключно в режимі входу та краще толерують підвищені напруги.



Рисунок 2.8 – Ультразвуковий далекомір HC-SR04 [62]

В'язкість базової фарби та пігментів має яскраво виражену температурну залежність, що безпосередньо впливає на швидкість потоку через дозатор. Для компенсації цієї похибки в систему інтегровано цифровий датчик температури DS18B20 [45]. Його фундаментальна перевага використання інтерфейсу 1-Wire, що дозволяє здійснювати двосторонню комунікацію з мікроконтролером, використовуючи лише один GPIO-пін (у нашому випадку IO4). Датчик забезпечує вимірювання в діапазоні від  $-55^{\circ}\text{C}$  до  $+125^{\circ}\text{C}$  з базовою точністю  $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ . Для стабілізації цифрової лінії 1-Wire на апаратному рівні у схему включено прецизійний підтягуючий резистор R1 номіналом 4.7 кОм.

Фізичне переміщення рідин у КФС здійснюється за допомогою п'яти електродвигунів постійного струму (DC-моторів), що керують мембранними або перистальтичними помпами (M1–M4) та міксером (M5). Керування їхньою продуктивністю реалізовано методом широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

Оскільки максимальний струм GPIO-пінів ESP32 становить лише 40 мА, а вихідна напруга 3.3V, пряме підключення моторів є неможливим. Використання класичних електромагнітних реле було відхилено через неможливість плавного регулювання швидкості та малий ресурс перемикачів. Відтак, силовий каскад реалізовано за топологією «нижнього ключа» (Low-side switch) на базі п'яти N-канальних польових транзисторів IRLML2502 [46].

Транзистор IRLML2502 належить до спеціалізованого класу Logic-Level MOSFET. Його порогова напруга відкриття затвора  $V_{GS(th)}$  становить усього 0.6В – 1.2В. Це означає, що логічної одиниці у 3.3V від ESP32 абсолютно достатньо для повного відкриття (насичення) транзистора. У відкритому стані його опір каналу ( $R_{DS(on)}$ ) дорівнює мізерним 0.045 Ом, що дозволяє комутувати струми до 4.2 А без застосування зовнішніх радіаторів, мінімізуючи втрати на нагрівання.



Рисунок 2.9 – MOSFET-транзистор IRLML2502 у корпусі SOT-23 [63]

Для забезпечення надійності та довговічності силового каскаду кожен канал додатково укомплектований двома пасивними компонентами безпеки:

1. Стягуючий резистор (Pull-down) 10 кОм (R2–R6): Встановлений між затвором (Gate) транзистора та землею (GND). При перезавантаженні мікроконтролера всі його піни переходять у високоімпедансний стан (Hi-Z).

Стягуючий резистор гарантує, що на затворі буде нульовий потенціал, транзистор залишиться закритим, а помпи не ввімкнуться самовільно, що могло б призвести до катастрофічного розливу фарби;

2. Захисний (демпферний) діод 1N4007 (D1–D5) [47]: Увімкнений у зворотному напрямку паралельно обмоткам кожного двигуна. Електродвигун є потужним індуктивним навантаженням. Коли ШІМ-сигнал різко закриває транзистор, енергія магнітного поля двигуна генерує зворотний імпульс напруги (ЕРС самоіндукції), який може досягати сотень вольт і миттєво пробити (спалити) MOSFET. Діод 1N4007 безпечно замикає цей імпульс сам на себе, надійно захищаючи напівпровідникову структуру силового ключа.

Таким чином, проаналізована та обґрунтована елементна база демонструє високий рівень інженерної продуманості. Синтез потужної обчислювальної платформи ESP32, прецизійних цифрових сенсорів та енергоефективної силової електроніки на базі Logic-Level MOSFET дозволив створити апаратний вузол, який повністю відповідає парадигмі Індустрії 4.0. Запропоновані рішення мінімізують апаратні ризики, гарантують високу точність мікродозування та забезпечують міцний фундамент для подальшої програмної реалізації керуючих кібернетичних алгоритмів.

### 2.5.2. Аналіз обраних програмних рішень

Під час розробки програмної частини кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів критично важливим етапом є вибір оптимального стека технологій. Від архітектурних рішень залежить не лише стабільність прийому телеметрії від сенсорної мережі (спектрофотометра, рівнемірів, термометра), але й ефективність роботи складних математичних алгоритмів перерахунку колірних просторів та безперебійність генерації керуючих сигналів для виконавчих механізмів [48].

Під час вибору програмних інструментів були сформовані наступні жорсткі критерії:

– модульність та масштабованість: система повинна мати чітко розділену клієнт-серверну архітектуру (Backend та Frontend) для забезпечення можливості незалежного тестування алгоритмів дозування та оновлення користувацького інтерфейсу;

– висока математична продуктивність та асинхронність: серверна частина має швидко обробляти матричні перетворення колірних моделей (з RGB/HEX у субтрактивну модель пропорцій) та паралельно підтримувати асинхронний зв'язок з апаратним вузлом на базі ESP32;

– реактивність інтерфейсу: диспетчерський веб-додаток (HMI-панель) повинен миттєво відображати зміну рівнів у резервуарах та етапи процесу змішування без перезавантаження сторінки;

– простота інтеграції: наявність прозорого програмного інтерфейсу (REST API та WebSockets) для забезпечення двостороннього зв'язку між мікроконтролером, базою даних та клієнтським додатком.

Після глибокого аналізу доступних технологій розробку було вирішено базувати на сучасній сервіс-орієнтованій архітектурі з використанням мови Python для серверної логіки та бібліотеки React.js для клієнтського інтерфейсу оператора [49].

Основним інструментом для реалізації інтелектуального бекенду було обрано сучасний асинхронний веб-фреймворк FastAPI [50]. Вибір мови Python є еталонним для задач обробки даних та реалізації алгоритмів перерахунку. Це дозволило ефективно реалізувати головну бізнес-логіку системи: алгоритми колориметричного синтезу (конвертація введеного HEX-коду у точні об'ємні частки базової фарби та трьох пігментів у мілілітрах) та розрахунок колірної різниці (похибки  $\Delta E$ ) на основі даних від спектрофотометра TCS34725 [51].

Використання фреймворку FastAPI, побудованого на стандарті ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface), забезпечило системі здатність

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 38
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

обробляти велику кількість паралельних запитів без блокування головного потоку обчислень [52]. Завдяки вбудованій системі Dependency Injection та маршрутизації (APIRouter), бізнес-логіка розрахунку пропорцій надійно ізольована від логіки обробки мережових запитів. Для збереження даних (електронного журналу транзакцій, історії створених рецептур, залишків сировини та фіксації помилок) інтегровано реляційну базу даних SQLite 3 із застосуванням ORM-бібліотеки SQLAlchemy [53]. Її вибір обґрунтований легкістю розгортання на етапі прототипування та повною підтримкою транзакційності (ACID), що унеможливорює втрату даних при раптовому відключенні живлення установки.

Для розробки інтерактивного диспетчерського веб-інтерфейсу (HMI) використано бібліотеку React.js у поєднанні зі швидкісним збирачем модулів Vite [54]. React дозволяє побудувати реактивний користувацький інтерфейс на основі ізольованих, повторно використовуваних компонентів (наприклад, ColorPicker, TankLevelsMonitor, DosingDashboard, TransactionHistory) [55]. Важливою перевагою стало використання користувацьких хуків (Custom Hooks, зокрема useDosingState, useTelemetry), які автоматизують процес комунікації із сервером та керують глобальним станом додатку.

Особливістю програмної інфраструктури проєкту є комбінований підхід до організації зв'язку між апаратним рівнем (ESP32) та сервером. Замість використання брокерів повідомлень (MQTT), система поєднує синхронну архітектуру REST API для ініціалізації команд (передача розрахованих пропорцій дозування від сервера до ESP32) та повнодуплексний протокол WebSockets для стрімінгу телеметрії [56].

Завдяки WebSockets, мікроконтролер має змогу відправляти дані про поточний рівень рідин, температуру та статус pomp безперервним потоком, а сервер миттєво транслювати ці зміни на екран диспетчера без необхідності постійного опитування. Таке архітектурне рішення мінімізує мережові затримки, зменшує навантаження на обчислювальне ядро та забезпечує ефект

"живого" керування фізичним обладнанням через веб-браузер, що є ключовою вимогою до сучасних кіберфізичних систем стандарту Індустрії 4.0 [57].

## 2.6 Висновки до другого розділу

Під час роботи над апаратною реалізацією кіберфізичної системи визначено основні вимоги для забезпечення прецизійного мікродозування та точного відтворення колориметричних параметрів. Розроблено багаторівневу структурну архітектуру за концепцією Індустрії 4.0 (польовий, локальний та серверний рівні), що заклала фундамент для системи із замкненим контуром керування на основі оптичного зворотного зв'язку.

Спроектовано принципову електричну схему та монтажний план макета. Вони наочно відображають топологію зв'язків між мікроконтролером (ESP32), мережею цифрових сенсорів та захищеним силовим каскадом керування помпами на базі Logic-Level MOSFET транзисторів, підтверджуючи ергономічність і надійність збірки.

Завершальний аналіз обраних апаратних компонентів та програмного стека (Python/FastAPI, React.js, SQLite) підтвердив їхню синергію, обчислювальну потужність і апаратну відмовостійкість. Це повністю задовольняє інженерні вимоги проєкту та дозволяє перейти безпосередньо до етапу програмної імплементації системи.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
						40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### **3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ДОЗУВАННЯ ІНГРЕДІЄНТІВ ПРИ ВИРОБНИЦТВІ ФАРБ З ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ КОЛЬОРУ**

3.1 Огляд використуваних програмних бібліотек та їх функціональне призначення

Під час програмної реалізації кіберфізичної системи (КФС) автоматизованого дозування інгредієнтів було застосовано комплексний набір сучасних програмних бібліотек та мікрофреймворків. Від правильного вибору технологічного стека залежить не лише коректність роботи математичних алгоритмів колориметричного синтезу, але й стабільність високочастотного обміну телеметрією між апаратним рівнем та диспетчерським інтерфейсом. Враховуючи жорсткі вимоги до обчислювальної продуктивності, мережевої асинхронності та масштабованості, програмна архітектура була чітко розділена на серверну (Backend) та клієнтську (Frontend) частини, кожна з яких базується на вузькоспеціалізованих інструментах.

Для реалізації програмної логіки на апаратному рівні (Edge-рівень), що функціонує на базі двоядерного мікроконтролера ESP32, було використано екосистему Arduino Core for ESP32. Це середовище дозволяє застосовувати об'єктно-орієнтовані можливості мови C++ для прямої взаємодії з апаратними регістрами та периферією. Зокрема, для забезпечення коректної роботи цифрового спектрофотометра TCS34725 було інтегровано спеціалізовану бібліотеку Adafruit\_TCS34725, яка бере на себе ініціалізацію пристрою по шині I2C, налаштування часу інтеграції оптичного сенсора та зчитування сирих 16-бітних значень колірних каналів. Окрім цього, для температурної компенсації реологічних властивостей фарби застосовано зв'язку бібліотек OneWire та DallasTemperature, що забезпечують безперебійний опит датчика DS18B20 в умовах високого рівня електромагнітних завад від промислових pomp. Опитування ультразвукових далекомірів реалізовано без використання

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 41
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надлишкових абстракцій, шляхом прямої маніпуляції таймерами, що гарантує мікросекундну точність вимірювання часу проходження акустичного імпульсу.

Фундаментом серверної архітектури виступає високопродуктивний мікрофреймворк FastAPI, написаний на мові Python. На відміну від класичних синхронних веб-серверів, він побудований на стандарті ASGI (Asynchronous Server Gateway Interface), що дозволяє системі одночасно обробляти десятки паралельних операцій вводу-виводу без блокування головного обчислювального потоку. Цей інструмент відповідає за розгортання REST API, генерацію інтерактивної документації за стандартом OpenAPI та строгу валідацію вхідних параметрів рецептур із використанням бібліотеки Pydantic. Для розв'язання задачі двосторонньої взаємодії в режимі реального часу між сервером та апаратним вузлом на базі ESP32 було імплементовано протокол WebSockets. На відміну від традиційного циклічного опитування (Polling), сервер встановлює з мікроконтролером постійне повнодуплексне з'єднання. Це дозволяє безперервним потоком приймати телеметрію щодо об'ємних рівнів рідин, температури та статусу pomp, мінімізуючи мережеві затримки та гарантуючи миттєву реакцію обчислювального ядра на критичні події у процесі змішування.

Управління реляційною базою даних здійснюється за допомогою потужної ORM-бібліотеки (Object-Relational Mapping) SQLAlchemy, яка абстрагує SQL-запити до рівня об'єктно-орієнтованого коду Python. Вона забезпечує виконання транзакційних CRUD-операцій (створення, читання, оновлення, видалення) у базі даних SQLite3, гарантуючи дотримання принципів ACID (атомарність, узгодженість, ізолюваність, довговічність). Це є абсолютно необхідною умовою для ведення безперервного електронного журналу створених партій фарби та фіксації витрат кожної краплі пігменту. Для забезпечення безпечної крос-доменної взаємодії між клієнтським застосунком та бекендом застосовано middleware-бібліотеку CORSMiddleware, яка налаштовує політики Cross-Origin Resource Sharing. Додатково, для гнучкого

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 42
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

управління конфігураціями та захисту конфіденційних змінних середовища задіяна бібліотека `python-dotenv`, що дозволяє ізолювати системні налаштування від вихідного коду.

Важливим аспектом надійності серверної архітектури є імплементація підсистеми асинхронного логування та обробки фонових завдань. Оскільки процес дозування є тривалим у часі фізичним процесом, система використовує вбудовані механізми `BackgroundTasks` мікрофреймворку `FastAPI`. Це дозволяє серверу відправляти керуючі команди на мікроконтролер та одночасно продовжувати обробку HTTP-запитів від клієнтського інтерфейсу без блокування основного циклу подій (`Event Loop`). Для забезпечення глибокої діагностики стану системи та фіксації позаштатних ситуацій інтегровано бібліотеку структурованого логування `loguru`. На відміну від стандартних засобів Python, вона дозволяє автоматично формувати лог-файли, здійснювати їх ротацію за об'ємом або часом, а також розділяти рівні критичності повідомлень. Це створює надійний інформаційний слід, який дозволяє технологам швидко виявляти причини можливих відхилень у роботі гідравлічної системи чи збоїв у мережевій комунікації.

Окремої уваги заслуговує програмна реалізація математичного ядра, що відповідає за перерахунок цільового кольору у фізичні об'єми рідин. Для виконання багатовимірних операцій над колірними просторами та нелінійної інтерполяції матриць коефіцієнтів конвертації залучено бібліотеку `NumPy`. Її векторизовані обчислення дозволяють системі миттєво перетворювати координати RGB або HEX у субтрактивну модель пропорцій пігментів, знімаючи навантаження з центрального процесора. Алгоритм розрахунку колірної різниці реалізовано з використанням стандартного модуля `math`, який надає необхідний інструментарій для обчислення метрики  $\Delta E$  за формулами стандарту CIE76. Це дозволяє колориметричному модулю точно визначати похибку між еталонним відтінком та фактичним оптичним відбитком суміші, зчитаним спектрофотометром безпосередньо у зоні міксеру. Візуалізація

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 43
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

диспетчерського HMI-інтерфейсу (Human-Machine Interface) повністю базується на екосистемі JavaScript-бібліотеки React.js. Цей інструмент дозволяє побудувати реактивний односторінковий застосунок (SPA), структурований у вигляді незалежних, повторно використовуваних компонентів. Важливою архітектурною перевагою стало використання користувацьких хуків (Custom Hooks), які інкапсулюють та автоматизують складну логіку підтримки WebSocket-з'єднання із сервером. Це дозволяє керувати глобальним станом інтерфейсу в реальному часі без примусового перезавантаження структури сторінки. Для організації навігації між функціональними екранами панелі оператора (моніторинг дозування, історія транзакцій, конфігурація обладнання) інтегровано бібліотеку React Router DOM, яка забезпечує миттєву клієнтську маршрутизацію.

Для забезпечення узгодженості даних між різними модулями диспетчерської панелі додатково реалізовано патерн управління глобальним станом за допомогою React Context API. Враховуючи високу інтенсивність оновлення телеметричних даних, цей підхід дозволив уникнути проблеми надмірного прокидання параметрів (props drilling) через багаторівневе дерево компонентів. Усі критичні дані, такі як поточний статус з'єднання з обладнанням, залишки у резервуарах та поточний етап змішування, акумулюються у єдиному централізованому сховищі. При зміні цих параметрів алгоритми React автоматично перемальовують лише ті віджети, які безпосередньо залежать від оновлених даних, залишаючи решту інтерфейсу статичною. Це суттєво оптимізує споживання оперативної пам'яті браузера та забезпечує плавність роботи інтерфейсу навіть на малопотужних промислових планшетах чи смартфонах, що використовуються безпосередньо у виробничому цеху.

Візуалізація технологічних процесів у браузері реалізована за допомогою бібліотеки Chart.js та її спеціалізованої обгортки react-chartjs-2. На відміну від статичних числових таблиць, ці інструменти генерують динамічні діаграми, які

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 44
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

анімовано відображають фізичні рівні залишків у резервуарах та надають наочну аналітику витрат сировини. Для зручного введення еталонного відтінку оператором імплементовано бібліотеку react-color, яка формує професійний віджет вибору кольору. Організація асинхронної взаємодії з REST API покладена на бібліотеку Axios, яка формує стандартизовані HTTP-запити до серверних ендпоінтів, автоматично парсить JSON-відповіді та перехоплює помилки мережі, ізолюючи мережеву логіку від React-компонентів.

Для забезпечення швидкісного процесу збирання фронтенд-модуля було задіяно інструмент Vite. На відміну від класичних бандлерів, він гарантує миттєве оновлення коду (Hot Module Replacement) під час розробки та ефективну мініфікацію кінцевих файлів перед їх розгортанням на робочому сервері. Стилізація диспетчерського інтерфейсу виконана за допомогою підходу CSS Modules, що локалізує каскадні таблиці стилів у межах конкретних компонентів. Це повністю виключає ризик конфліктів глобальних імен класів, полегшує підтримку коду та дозволяє створити сучасний, індустриально ергономічний дизайн з адаптивною сіткою.

З метою підтримки високих стандартів якості програмного коду та забезпечення його масштабованості у майбутньому, до процесу розробки було залучено інструменти статичного аналізу. Зокрема, для фронтенд-частини інтегровано аналізатор ESLint у поєднанні з форматтером Prettier. Це дозволило автоматизувати перевірку синтаксичних конструкцій JavaScript на відповідність суворим правилам написання коду, виявляти потенційні витoki пам'яті у React-компонентах та підтримувати єдиний архітектурний стиль проєкту. На серверному рівні аналогічну функцію виконують інструменти flake8 та black, які гарантують чистоту коду Python та його повну відповідність загальноприйнятим стандартам PEP 8. Такий превентивний контроль якості є невід'ємною частиною розробки промислового програмного забезпечення, оскільки він мінімізує кількість прихованих помилок ще на етапі написання коду.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У підсумку, комплексно інтегрований набір програмних інструментів формує міцний технологічний фундамент, який повною мірою задовольняє жорсткі вимоги до кібернетичної автоматизації, обчислювальної точності та реактивності розробленої системи.

### 3.2 Розробка програмного коду для автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Програмна реалізація серверної частини (Backend) кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів побудована на базі високопродуктивного асинхронного фреймворку FastAPI. Головним завданням цього програмного вузла є прийом команд від диспетчерського веб-інтерфейсу, математичний розрахунок фізичних об'ємів складових фарби на основі цільового кольору, а також безпечне асинхронне керування станами виконавчих механізмів. Розроблений програмний код інкапсулює в собі як REST API контролери для взаємодії з клієнтом, так і ядро бізнес-логіки системи.

Основою архітектури додатка є ініціалізація головного об'єкта FastAPI та налаштування проміжного програмного забезпечення (Middleware) для підтримки CORS (Cross-Origin Resource Sharing). Це дозволяє безпечно приймати HTTP-запити від React-фронтенду, який у середовищі розробки функціонує на іншому мережевому порту.

Для зберігання глобального стану апаратного вузла в режимі реального часу розроблено клас DeviceState. У межах прототипу він виконує роль віртуального «цифрового двійника» (Digital Twin) фізичної установки. Клас містить словник tanks, що відстежує поточні об'ємні залишки базової білої фарби та трьох кольорових пігментів (червоного, зеленого, синього), ініціалізовані максимальним значенням у 1000 мл. Окрім цього, об'єкт стану фіксує поточний етап роботи обладнання через змінну status (з можливими

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 46
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

значеннями: `idle`, `dispensing_base`, `dispensing_rgb`, `mixing`, `ready`), зберігає цільовий HEX-код активного змішування та веде масив системних логів `logs`.

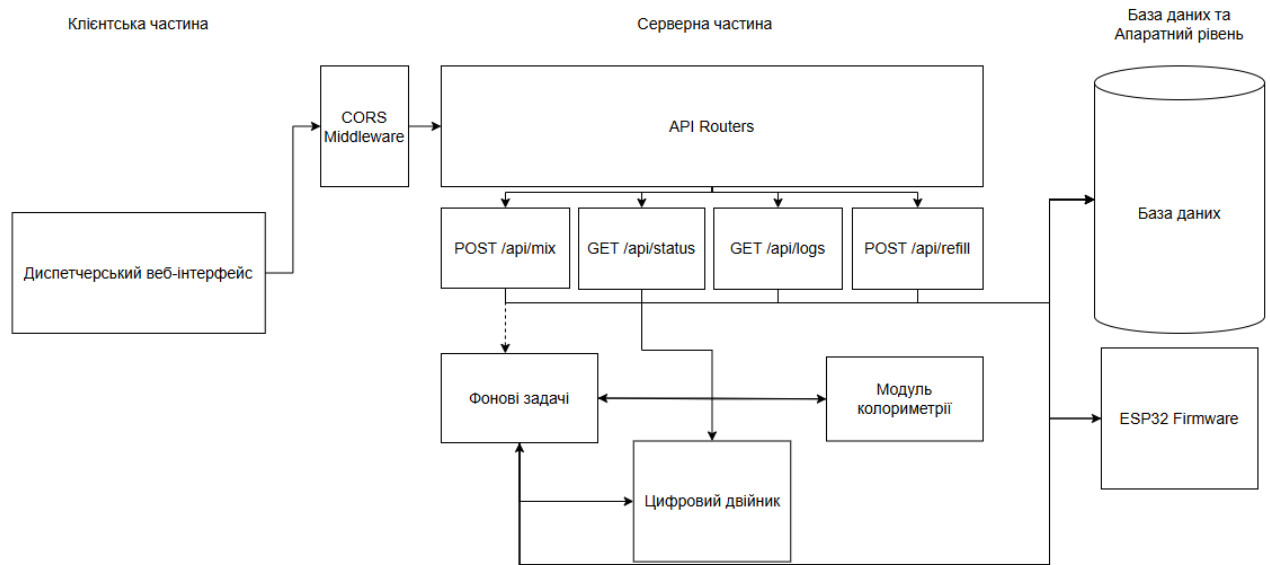


Рисунок 3.1 – Блок-схема архітектури серверної взаємодії та обробки API-запитів

Як детально зображено на рисунку 3.1, архітектура програмної взаємодії побудована за модульним принципом із чітким розподілом зон відповідальності між клієнтським, серверним та апаратно-інформаційним рівнями. Інформаційний потік ініціюється у лівій частині схеми, де диспетчерський веб-інтерфейс (React SPA) формує зовнішні HTTP-запити. Усі вхідні пакети першочергово проходять через безпековий бар'єр блок CORS Middleware. Цей компонент виконує функцію шлюзу, який перевіряє заголовки запитів та дозволяє безпечну крос-доменну взаємодію між фронтендом та бекендом, що є критично важливим при розгортанні системи на різних мережевих портах або серверах.

Після успішної валідації доступу, запит спрямовується до центрального вузла API Routers (Маршрутизатори), де відбувається його демультимплексування відповідно до викликаного кінцевого ресурсу (ендпоінту). Схема ілюструє чотири основні вектори обробки запитів:

ініціалізація змішування (POST /api/mix), запит телеметрії (GET /api/status), отримання історії (GET /api/logs) та сервісне поповнення баків (POST /api/refill).

Окрему увагу на схемі приділено пунктирному зв'язку між контролером POST /api/mix та блоком «Фонові задачі». Ця лінія візуалізує ключову архітектурну перевагу асинхронного сервера: делегування тривалого та ресурсоємного процесу фізичного дозування у фоновий потік обчислень. Завдяки цьому маршрутизатор миттєво звільняється і повертає клієнту статус успішного прийняття команди, не чекаючи фактичного завершення наливання фарби.

Блок фонових задач виступає головним координатором бізнес-логіки. Як видно зі схеми, він здійснює інтенсивний двосторонній обмін даними з «Модулем колориметрії», передаючи туди вхідний HEX-код та отримуючи назад розраховані фізичні мілілітри бази та пігментів. Паралельно фонові задачі взаємодіють з «Цифровим двійником» (об'єктом DeviceState), оновлюючи його внутрішній стан (поточний статус роботи та залишки рідин). До цього ж цифрового двійника постійно звертається контролер GET /api/status, щоб віддавати клієнту актуальну телеметрію для анімації інтерфейсу.

Права частина схеми демонструє рівень персистентності та фізичного виконання. Стрілки від блоків API Routers до «Бази даних» ілюструють процес синхронного логування всіх транзакцій, помилок та дій оператора. Водночас блок фонових задач має прямий канал зв'язку з «ESP32 Firmware» (апаратним рівнем), що відображає процес трансляції розрахованих математичних моделей у конкретні керівні імпульси для мікроконтролера, замикаючи таким чином кіберфізичний контур системи.

Для жорсткої типізації та валідації вхідних даних використано бібліотеку Pydantic. Розроблено моделі даних MixRequest (описує структуру запиту на змішування, включаючи HEX-код, складові RGB та загальний об'єм у мілілітрах) та LogEntry (для стандартизації записів в електронному журналі). Використання Pydantic гарантує, що некоректні дані (наприклад, відсутність

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 48
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

одного з параметрів кольору) будуть відхилені системою ще до етапу математичних обчислень.

Окрім базової перевірки наявності необхідних полів, використання інформаційних моделей Pydantic відіграє ключову роль у забезпеченні кібербезпеки системи. Цей інструмент автоматично виконує санітацію вхідних даних, запобігаючи виконанню шкідливого коду або ін'єкцій через неконтрольовані API-запити. Завдяки строгій типізації, будь-які спроби передати рядкові значення замість числових об'ємів, або ж передати HEX-код, що не відповідає стандартному регулярному виразу (наприклад, містить недопустимі символи), будуть миттєво заблоковані. У такому випадку сервер автоматично згенерує стандартизовану відповідь із HTTP-статусом 422 Unprocessable Entity, у тілі якої буде чітко вказано локалізацію помилки. Це значно спрощує процес налагодження взаємодії між клієнтською та серверною частинами, оскільки фронтенд-розробник миттєво отримує вичерпну інформацію про те, яке саме поле не пройшло валідацію, без необхідності аналізувати серверні логи. Крім того, така архітектура забезпечує стабільність так званого «контракту API» (API Contract), гарантуючи, що ядро бізнес-логіки завжди оперуватиме виключно чистими та передбачуваними структурами даних.

Найбільш критичним елементом програмного коду є асинхронна функція `mix_paint_task()`, яка виступає математичним ядром та диспетчером станів системи. Її робота починається з перевірки поточного статусу пристрою: якщо система не перебуває у стані очікування (`idle`), виконання блокується для запобігання апаратним конфліктам. Далі алгоритм переходить до перерахунку кольорових параметрів. Враховуючи хімічні властивості фарб, система має технологічне обмеження: загальна частка пігментів не повинна перевищувати 20% від загального об'єму (константа 0.2), інакше фарба втратить свої покривні (адгезійні) властивості.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Математична модель розрахунку реалізована наступним чином. Спочатку обчислюється `total_pigment_ratio` відношення суми введених значень RGB до максимально можливої суми ( $255 \times 3$ ). Загальний фізичний об'єм пігменту (`pigment_volume`) розраховується як добуток заданого користувачем загального об'єму (`amount_ml`), граничного ліміту (0.2) та знайденого коефіцієнта. Об'єм базової фарби обчислюється як різниця між загальним об'ємом партії та об'ємом пігментів. Далі алгоритм розподіляє загальний об'єм пігментів між червоним, зеленим та синім дозаторами пропорційно їхній ваговій частці у цільовому кольорі (через відношення конкретного каналу до загальної суми `rgb_sum`).

Варто зазначити, що алгоритм розрахунку також передбачає обробку специфічних крайових випадків (Edge Cases), які неминуче виникають при перетворенні ідеальної цифрової колірної моделі у фізичні субстанції. Наприклад, при запиті на виготовлення абсолютно білої фарби (координати RGB: 255, 255, 255) математична сума каналів є максимальною, однак, відповідно до логіки субтрактивного синтезу, для отримання чистого білого кольору додавання кольорових пігментів взагалі не потрібне. У такому сценарії алгоритм адаптивно встановлює об'єм пігментів на нуль, а вся замовлена партія формується виключно за рахунок відкриття клапана базової основи. Зворотна ситуація виникає при спробі синтезувати глибокі темні відтінки або абсолютно чорний колір (RGB: 0, 0, 0). У цьому випадку система жорстко спирається на закладений двадцятивідсотковий ліміт концентрації пігментів, розподіляючи цей максимальний об'єм рівномірно між усіма кольоровими дозаторами. Такий підхід запобігає «перенасиченню» суміші, зберігаючи в'язкість фарби та час її полімеризації на поверхні в межах затверджених технологічних норм підприємства.

Перед запуском фізичного процесу алгоритм здійснює превентивну валідацію: перевіряє, чи достатньо залишків у всіх чотирьох резервуарах для виконання розрахованої рецептури. У разі нестачі сировини процес миттєво

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 50
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

переривається, генерується повідомлення про помилку та статус системи повертається до idle.

Для забезпечення безперебійної роботи кіберфізичної системи, описана математична модель субтрактивного синтезу та логіка перевірки залишків інкапсульовані у суворий детермінований алгоритм. Оскільки керування виконавчими механізмами (насосами та міксером) вимагає суворої послідовності дій у режимі реального часу, програмне забезпечення функціонує за принципом кінцевого автомата (Finite State Machine). Це означає, що перехід до наступної фізичної стадії дозування неможливий без успішного завершення попередньої, що повністю виключає ризик виникнення апаратних колізій, таких як одночасний запуск несумісних процесів.

Візуалізація цього процесу дозволяє детально відслідкувати життєвий цикл обробки одного запиту на змішування від моменту отримання цифрового колірному коду до фінального запису транзакції в базу даних. Особливістю розробленого алгоритму є наявність механізму самовідновлення: у випадку виявлення логічних чи фізичних невідповідностей система не припиняє аварійно свою роботу, а повертається у стан готовності до прийому нових валідних даних. Блок-схему логіки роботи цього алгоритму наведено на рисунку 3.2.

Як видно з наведеної архітектури, ключовою перевагою детермінованого підходу є повна ліквідація станів невизначеності (Race Conditions). Програмний розподіл пріоритетів побудований таким чином, що будь-яка аномалія — від раптової втрати зв'язку з витратоміром до критичного дисбалансу компонентів за математичною моделлю — інтерпретується системою як ізольований збій поточного циклу.



Рисунок 3.2 – Блок-схема алгоритму обчислення об'ємів та керування станами виконавчих механізмів

Як детально проілюстровано на рисунку 3.2, алгоритм має лінійно-циклічну структуру з одним критичним вузлом прийняття рішень. Процес ініціюється блоком отримання вхідних даних, куди від диспетчера надходять параметри кольору (координати RGB/HEX) та необхідний загальний об'єм партії. Наступним кроком виконується обчислювальний етап: серверне ядро застосовує математичні формули для конвертації адитивної моделі кольору у

фізичні об'єми базової фарби та пігментів у мілілітрах із врахуванням технологічного ліміту концентрації.

Ключовим елементом надійності алгоритму є логічний ромб «Залишків достатньо?». На цьому етапі система порівнює розраховані об'єми з фактичною наявністю рідин у цифровому двійнику пристрою. Якщо сировини недостатньо, алгоритм перериває поточну операцію і через зворотну петлю повертається до початкового стану очікування. Цей зворотний зв'язок гарантує, що система не "зависне" через помилку, а продовжить функціонувати, очікуючи на введення коректних даних оператором або фізичного поповнення резервуарів.

У разі успішного проходження валідації (відгалуження «Так»), алгоритм переходить до фази фізичного виконання, яка складається з трьох послідовних стадій. Спочатку ініціюється дозування базової фарби, після чого відбувається прецизійне паралельне дозування кольорових пігментів. Завершує технологічний ланцюжок активація міксера для гомогенізації суміші. Після успішного фізичного змішування алгоритм виконує фінальний крок — запис деталей транзакції (витрачені мілілітри та час) у реляційну базу даних, після чого процес успішно завершується, вивільняючи систему для нових завдань.

Якщо валідація пройдена успішно, система розпочинає симуляцію роботи апаратного рівня (що в реальній КФС відповідає відправці команд на мікроконтролер). Програмно цей процес реалізовано через асинхронні затримки `asyncio.sleep()`. Алгоритм послідовно перемикає статуси:

- `dispensing_base`, розраховується час роботи помпи бази з урахуванням пропускної здатності 100 мл/с, відповідно оновлюються залишки в об'єкті `DeviceState`;
- `dispensing_rgb`, одночасне дозування кольорових пігментів (з продуктивністю прецизійних pomp 20 мл/с), тривалість операції визначається по максимальному розрахованому об'єму серед трьох пігментів;
- `mixing`, активація головного двигуна гомогенізатора (міксера) із заданою тривалістю (у прототипі 3 секунди);

– ready, завершення циклу з відповідним записом в електронний журнал транзакцій та поверненням у стан idle після невеликої паузи.

Застосування асинхронних затримок за допомогою модуля `asyncio.sleep()` на даному етапі розробки є не просто засобом програмної візуалізації, а повноцінним фундаментом для інтеграції реального промислового обладнання. У класичних синхронних системах команда затримки (наприклад, `time.sleep()`) повністю паралізувала б роботу сервера, унеможливаючи паралельний прийом нових запитів. Асинхронний підхід делегує це очікування системному циклу подій (Event Loop). У перспективі масштабування комплексу та підключення реального мікроконтролера ESP32, ці програмні затримки будуть безшовно замінені на виклики асинхронних клієнтів протоколу MQTT або функції запису у послідовний порт. Сервер відправлятиме команду на відкриття електромагнітного клапана і переходитиме у стан асинхронного очікування апаратного підтвердження (Acknowledge) про закриття клапана від мікроконтролера. Якщо мікроконтролер не надішле відповідь протягом заданого тайм-ауту (наприклад, через фізичний обрив мережевого кабелю), сервер автоматично згенерує команду аварійної зупинки та переведе систему у безпечний режим, запобігаючи неконтрольованому витoku реальної фарби.

Зовнішня комунікація із сервером забезпечується чотирма REST API маршрутизаторами (ендпоінтами):

– `get /api/status`, повертає поточні залишки в баках, статус системи та час. Використовується фронтендом для частого опитування та анімації інтерфейсу;

– `post /api/mix`, головний контролер для прийому команд на дозування, його ключовою архітектурною особливістю є використання інструменту `BackgroundTasks`;

– `post /api/refill`, ендпоінт сервісного обслуговування, який імітує фізичне поповнення резервуарів оператором, скидаючи їх об'єми до максимальних 1000 мл та фіксує цю подію в логах;

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 54
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

– `get /api/logs`, повертає масив історії транзакцій (успішні змішування, помилки нестачі матеріалів) для відображення в аналітичній панелі диспетчера.

Архітектура зберігання історичних даних та логування транзакцій також заслуговує на окрему увагу, оскільки вона забезпечує інформаційну персистентність системи. Усі успішні цикли дозування, а також критичні помилки (наприклад, нестача певного пігменту) автоматично серіалізуються та записуються до реляційної бази даних SQLite за допомогою технології об'єктно-реляційного відображення. Кожен запис містить мітку точного серверного часу (Timestamp), розраховані об'єми кожного інгредієнта з точністю до мілілітра та ідентифікатор статусу завершення. Наявність такого незмінного електронного журналу (Audit Trail) є критичною вимогою для впровадження системи на сертифікованих ISO виробництвах. Це створює інформаційне підґрунтя для подальшої інтеграції з ERP-системами підприємства, що дозволить автоматизувати процес списання сировини зі складу на основі реальних фізичних витрат, а не теоретичних рецептур. Навіть у випадку раптового знеструмлення керуючого сервера, цілісність історичних даних гарантується механізмами транзакцій (ACID) самої бази даних.

Запуск серверного ядра здійснюється за допомогою ASGI-сервера `uvicorn`, що дозволяє розгорнути додаток на заданому хості та порту з можливістю гарячого перезавантаження коду (`reload=True`) під час розробки.

У підсумку, розроблений програмний код формує стійкий, математично обґрунтований та асинхронний бекенд кіберфізичної системи. Використання фонових задач (`BackgroundTasks`) дозволило ідеально розв'язати проблему блокування інтерфейсу під час тривалих фізичних процесів, а продумана логіка управління станами унеможливило виникнення програмно-апаратних колізій. Розрахована математична модель субтрактивного синтезу повністю відповідає технологічним вимогам виробництва фарб, зберігаючи їх хімічну консистенцію за рахунок контролю концентрації пігментів.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 55
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

### 3.3 Розробка веб-інтерфейсу та візуалізація даних у режимі реального часу

Важливим аспектом будь-якої кіберфізичної системи, орієнтованої на промислове виробництво, є наявність ергономічного, інформативного та високошвидкісного інтерфейсу користувача. Розраховані сервером математичні пропорції та телеметричні дані від мікроконтролера не мають практичної цінності без їх правильної інтерпретації та візуалізації для кінцевого оператора-колориста. З метою забезпечення віддаленого контролю за технологічним процесом та управління обладнанням було розроблено спеціалізований веб-додаток (Frontend) на базі екосистеми React.js.

На відміну від застарілих промислових систем SCADA з громіздкими десктопними клієнтами, розроблений диспетчерський інтерфейс є повноцінним сучасним односторінковим застосунком (SPA), який працює у вікні будь-якого стандартного веб-браузера без необхідності встановлення додаткового програмного забезпечення. Архітектура клієнтської частини побудована за модульним принципом і складається з ізольованих компонентів, кожен з яких відповідає за відображення конкретної частини бізнес-логіки та має власні інкапсульовані стилі.

Важливою архітектурною особливістю клієнтської частини є глибоке застосування компонентного підходу, що дозволяє ефективно масштабувати інтерфейс у майбутньому. Завдяки механізму Virtual DOM, фреймворк React забезпечує надзвичайно високу продуктивність візуалізації: при надходженні нових телеметричних даних система обчислює різницю між поточним та новим станом інтерфейсу, оновлюючи у браузері лише ті вузли DOM-дерева, які безпосередньо зазнали змін. Це гарантує абсолютну плавність роботи застосунку та відсутність візуальних артефактів навіть за умови інтенсивного високочастотного потоку даних від мікроконтролера. Для забезпечення узгодженості між ізольованими компонентами (наприклад, між консоллю

введення параметрів та інформаційними панелями) застосовано централізоване управління станом. Такий підхід повністю виключає розсинхронізацію даних і дозволяє системі миттєво блокувати елементи керування (кнопки запуску, поля вводу) відразу після ініціалізації фізичного процесу змішування, унеможливаючи відправку дублюючих команд оператором.

Головний екран диспетчерського інтерфейсу візуально та логічно поділено на три ключові функціональні зони: панель моніторингу резервуарів, консоль керування (числове програмне управління) та електронний журнал операцій.

Панель моніторингу «Резервуари інгредієнтів» виступає графічним відображенням цифрового двійника системи. Вона містить чотири динамічні шкали (стовпчасті індикатори), які репрезентують фізичні ємності: базову білу фарбу, а також червоний (R), зелений (G) та синій (B) пігменти. Завдяки застосуванню CSS-анімацій та прив'язці висоти блоків до актуальних значень залишків у мілілітрах (з максимумом у 1000 мл), оператор може наочно оцінювати наявність сировини. Тут також розташована сервісна кнопка для програмного скидання рівнів (імітація фізичного поповнення баків персоналом).

Візуалізація резервуарів у цій панелі реалізована не просто як набір статичних індикаторів, а як динамічні цифрові моделі, що імітують фізичну поведінку рідин у реальному часі. Використання апаратного прискорення CSS-транзицій у поєднанні з реактивним оновленням стилів дозволяє створити ефект плавного зниження рівня інгредієнтів, що лінійно корелює із тривалістю роботи відповідних дозувальних pomp. Для кожного резервуара передбачено чітку систему кольорового кодування, яка суворо відповідає його вмісту: прозоро-білий контур для базової основи та насичені червоний, зелений і синій кольори для відповідних пігментів. Окрім кількісних показників, графічний інтерфейс включає механізми превентивного інформування оператора. Наприклад, при наближенні рівня будь-якого компонента до критичного

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 57
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		



бачить, як рівень рідини у резервуарах плавно знижується безпосередньо в момент фізичного відкриття клапанів на апаратному вузлі.

Центральним модулем взаємодії оператора з системою є «Консоль Керування (ЧПУ)». Цей компонент дозволяє користувачу ввести цільовий колір у стандартному HEX-форматі (наприклад, #3498DB) за допомогою інтегрованого інструменту Color Picker, а також вказати бажаний загальний об'єм партії у мілілітрах. Важливою інновацією розробленого інтерфейсу є блок «Попередній розрахунок». Ще до ініціалізації фізичного дозування, клієнтський додаток звертається до серверного ядра для виконання попередньої колориметричної конвертації та виводить оператору точні об'єми кожного інгредієнта (наприклад, Основа: 88.9 мл, Пігмент R: 1.4 мл тощо), а також орієнтовний час дозування. Це дозволяє технологічному персоналу верифікувати рецептуру до початку витрачання реальних матеріалів.

Перед відправкою параметрів замовлення на серверне ядро, фронтенд-додаток здійснює первинну строгу клієнтську валідацію введених даних. Спеціалізовані регулярні вирази (RegEx) перевіряють формат шістнадцяткового коду на відповідність стандартам кольорових моделей, а логічні оператори обмежують максимальний об'єм партії відповідно до допустимої фізичної місткості змішувального резервуара. Це рішення дозволяє суттєво знизити мережеве навантаження, оскільки помилкові або неповні запити відхиляються миттєво на рівні браузера оператора без створення зайвих HTTP-запитів до REST API. Крім того, інструмент попереднього розрахунку функціонує повністю інтерактивно: він автоматично перемальовується та оновлює показники витрат при будь-якій, навіть мінімальній, зміні вхідних параметрів. Це надає оператору можливість вільно експериментувати з відтінками та об'ємами, спостерігаючи за математично прогнозованими витратами дороговартісних пігментів у режимі реального часу, без ризику впливу на фізичне обладнання.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 59
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Після натискання кнопки «Запустити дозування та міксер», фронтенд формує HTTP POST запит та передає об'єкт MixRequest на сервер. Одночасно з цим у нижній частині консолі активується прогрес-бар, який змінює свої стани («ОЧІКУВАННЯ», «ДОЗУВАННЯ ОСНОВИ», «РОБОТА МІКСЕРА») синхронно з фізичними етапами роботи мікроконтролера, забезпечуючи глибокий рівень зворотного зв'язку. Третій блок інтерфейсу, «Журнал Операцій», слугує для виведення історії транзакцій (логів). У ньому в режимі реального часу з'являються записи про успішно змішані партії, повідомлення про помилки (наприклад, нестачу інгредієнтів) та попередження.

Електронний журнал операцій відіграє критично важливу роль у забезпеченні прозорості (Traceability) усього технологічного циклу. Кожен запис у цій інформаційній панелі має продумане структурне та кольорове кодування: системні повідомлення про початок процесу дозування мають нейтральний сірий фон, успішне завершення циклу позначається виразним зеленим індикатором, а потенційні помилки, такі як переривання через нестачу рідини, миттєво виділяються тривожними кольорами. Додатково лог-панель фіксує точний системний час кожної транзакції (Timestamp) та генерує мініатюрний кольоровий маркер (квадрат), що точно відповідає замовленому цільовому відтінку. Такий ергономічний підхід дозволяє технологам здійснювати швидкий візуальний аудит виконаних робіт протягом робочої зміни без необхідності вчитуватися в текстові деталі. Завдяки реактивній природі застосунку, нові записи з'являються у списку динамічно, а алгоритм автоматично прокручує область перегляду до найсвіжішої події, що звільняє оператора від рутинної необхідності самостійно оновлювати сторінку моніторингу. Приклад візуалізації активного процесу дозування та заповнення журналу транзакцій наведено на рисунку 3.4.

Аналіз представленого на рисунку 3.4 інтерфейсу демонструє, що архітектура журналу операцій побудована за принципом FIFO (First-In, First-Out) з інвертованим виведенням, де найактуальніші події завжди

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

позиціонуються у верхній частині робочої області. Кожен інформаційний рядок лог-панелі є декомпозиційним об'єктом даних, який містить унікальний ідентифікатор сесії (Batch ID), масу внесеного компонента з точністю до міліграма та поточний статус виконання операції.

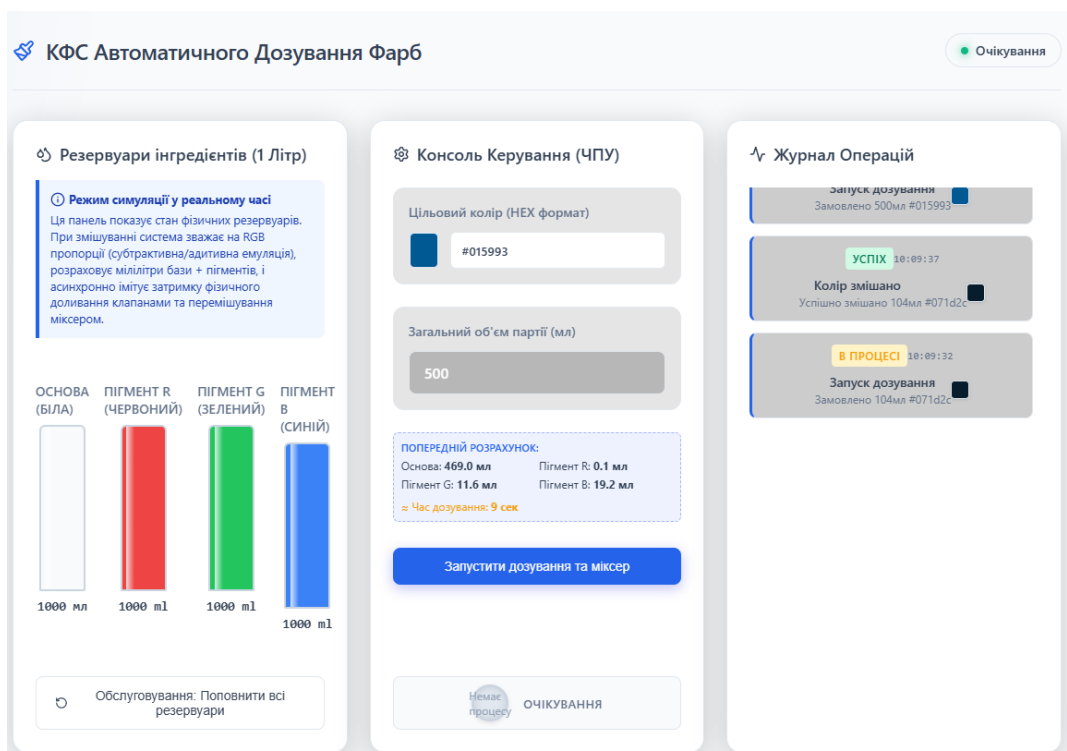


Рисунок 3.4 – Відображення активного процесу дозування та оновлення журналу транзакцій у реальному часі

У результаті було створено комплексний, ергономічний та відмовостійкий диспетчерський веб-інтерфейс. Налаштовано надійну гібридну взаємодію клієнтського React-додатка з асинхронним сервером через REST API (для передачі команд) та WebSockets (для стрімінгу телеметрії). Використання сучасних підходів до побудови користувацьких інтерфейсів дозволило не лише забезпечити оперативний моніторинг фізичних залишків сировини, але й надати колористам потужний візуальний інструмент для керування рецептурами та контролю за якістю синтезу кольору.

Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата

### 3.4 Висновки до третього розділу

В процесі роботи над етапом програмної реалізації було успішно здійснено повний цикл розробки інтелектуального ядра кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів. Архітектуру побудовано на базі сучасного асинхронного стека технологій (Python/FastAPI для серверної частини та React.js для клієнтської). На бекенд-рівні налаштовано надійну транзакційну взаємодію з реляційною базою даних SQLite через ORM SQLAlchemy, що гарантує збереження історії всіх рецептур та телеметричних логів. Ключовим досягненням стала програмна імплементація складного математичного апарату колориметрії: розроблено алгоритм субтрактивного синтезу для точної конвертації цифрових HEX/RGB-координат цільового кольору у фізичні об'єми рідин (мілілітри), а також модуль розрахунку колірної похибки  $\Delta E$  за стандартом CIE76 для реалізації замкненого контуру керування на основі даних спектрофотометра.

Для зручного управління технологічним обладнанням створено інтерактивний диспетчерський веб-інтерфейс (SPA), який відзначається високою реактивністю та індустриальною ергономікою. Завдяки впровадженню гібридної мережевої архітектури, що поєднує REST API для передачі команд та повнодуплексний протокол WebSockets для стрімінгу даних від мікроконтролера ESP32, система забезпечує динамічну візуалізацію рівнів сировини в резервуарах та моніторинг стадій дозування у режимі реального часу. Такий комплексний програмно-апаратний підхід перетворює розроблену кіберфізичну систему на високоефективний інструмент, що мінімізує людський фактор, унеможливорює перевитрати високовартісних пігментів і гарантує абсолютну повторюваність складних відтінків у промисловому виробництві фарб.

					КвРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 62
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ВИСНОВКИ

У роботі за результатами виконаних теоретичних та практичних досліджень було успішно розроблено кіберфізичну систему автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб із заданими параметрами кольору. Система забезпечує прецизійний контроль фізичних об'ємів рідин, математично точний субтрактивний синтез відтінків, безперервний оптичний зворотний зв'язок та зручну візуалізацію технологічного процесу для оператора-колориста через сучасний диспетчерський веб-інтерфейс.

У першому розділі проведено комплексний аналіз сучасного стану автоматизації у лакофарбовій промисловості та впровадження концепцій «Індустрії 4.0». Було обґрунтовано актуальність розробки таких систем як ефективного інструменту для розв'язання проблеми нестабільної якості та перевитрат дорогих пігментів при ручному змішуванні. Розглянуто теоретичні засади колориметрії, принципи колірної синтезу, а також здійснено детальний аналіз існуючих методів дозування рідин та типів промислових сенсорів. У результаті сформовано цілісне бачення архітектури майбутнього комплексу, визначено критерії вибору апаратних і програмних рішень, а також проведено чітку постановку задачі для проектування власної кіберфізичної системи (КФС).

У другому розділі було зосереджено увагу на проектуванні та апаратній реалізації системи дозування. Сформульовано жорсткі функціональні та нефункціональні вимоги до КФС, визначено її багаторівневу структуру. Розроблено принципову електричну та монтажну схеми, які детально відобразили логіку взаємодії двоядерного мікроконтролера ESP32, прецизійного спектрофотометра TCS34725, масиву ультразвукових рівнемірів HC-SR04 та цифрового термометра DS18B20. Окрему увагу приділено проектуванню надійного силового каскаду на базі Logic-Level MOSFET транзисторів для плавного керування п'ятьма індуктивними навантаженнями

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

(помпами та міксером). У результаті створено відмовостійку апаратну платформу із замкненим контуром керування, готову до інтеграції з програмним ядром.

У третьому розділі детально описано програмну реалізацію системи, що базується на гібридній сервіс-орієнтованій архітектурі. Здійснено розробку асинхронного бекенду на мові Python (веб-фреймворк FastAPI) із забезпеченням транзакційності журналу операцій через реляційну базу даних SQLite. Ключовим досягненням стала реалізація математичного апарату: розроблено алгоритм конвертації цифрових колірних координат (HEX/RGB) у фізичні пропорції бази та пігментів (у мілілітрах), а також модуль розрахунку колірної похибки  $\Delta E$  за стандартом CIE76 для мікрокоригування суміші. Для управління розроблено реактивний диспетчерський HMI-інтерфейс (SPA) на базі React.js. Завдяки паралельному використанню REST API та протоколу WebSockets забезпечено динамічну візуалізацію рівнів сировини в резервуарах та моніторинг стадій дозування у режимі реального часу.

Загалом, результати виконаної роботи підтверджують високу ефективність застосування кіберфізичних систем для інтелектуалізації процесів змішування у хімічній промисловості. Розроблений комплекс демонструє здатність самостійно розраховувати складні рецептури, прецизійно керувати гідравлічними магістралями та здійснювати автоматичний оптичний контроль якості готової продукції. Отримані результати відкривають широкі перспективи для практичного впровадження системи на реальних виробництвах, що дозволить суттєво мінімізувати вплив людського фактору, виключити проблему некондиційних партій фарби, зменшити витрати високовартісної сировини та підвищити загальну економічну ефективність підприємства.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. L Smith J., Davis R. Trends in the architectural coatings industry: Automation, efficiency, and color precision. *Journal of Coatings Technology and Research*. 2021. Vol. 18, No. 3. P. 645–658.
2. Петренко В. М., Коваленко О. І. Автоматизація технологічних процесів у хімічній та лакофарбовій промисловості : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. 312 с.
3. Chen L., Wang H. Manual vs. automated dispensing systems in paint production: A comparative efficiency analysis. *Industrial Engineering & Chemistry Research*. 2020. Vol. 59, No. 12. P. 5340–5352.
4. Berns R. S. Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology. 4th ed. New York : John Wiley & Sons, 2019. 304 p.
5. Müller A., Schmidt K. Cost-benefit analysis of automated mixing and dispensing in the coatings industry. *Production Planning & Control*. 2021. Vol. 32, No. 8. P. 612–625.
6. Лисенко В. П., Опришко О. О. Кіберфізичні системи: архітектура, технології та тенденції розвитку : монографія. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. 215 с.
7. Lee E. A. Cyber-Physical Systems: Design Challenges. *11th IEEE International Symposium on Object and Component-Oriented Real-Time Distributed Computing (ISORC)*. IEEE, 2008. P. 363–369.
8. Zhao Y., Li M. Algorithmic approaches to subtractive and additive color mixing for automated dispensing systems. *Color Research & Application*. 2020. Vol. 45, No. 2. P. 234–245.
9. Sharma G. Digital Color Imaging Handbook. Boca Raton : CRC Press, 2017. 816 p.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 65
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

10. Kusiak A. Smart manufacturing and predictive analytics: The role of Industry 4.0. *International Journal of Production Research*. 2018. Vol. 56, No. 1-2. P. 273–290.

11. Мельник А. О. Архітектура кіберфізичних систем : монографія. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2018. 156 с.

12. Gupta P., Kumar S. Client-server architectures for Industrial IoT: Performance and scalability. *IEEE Internet of Things Journal*. 2020. Vol. 7, No. 9. P. 8421–8435.

13. Ковальчук О. А., Романюк С. М. Проєктування інформаційних систем моніторингу на основі мікроконтролерів та IoT-платформ. *Інформаційні технології та комп'ютерна інженерія*. 2022. № 1. С. 12–19.

14. Schmidt K., Wagner M. Digital traceability and electronic batch records in chemical manufacturing. *Journal of Manufacturing Systems*. 2019. Vol. 52. P. 132–145.

15. Згуровський М. З., Панкратова Н. Д. Системний аналіз: проблеми, методологія, застосування. Київ : Наукова думка, 2020. 728 с.

16. Al-Masrut H., et al. Machine learning based framework for smart industrial resource management. *Journal of Cleaner Production*. 2020. Vol. 277. P. 123985.

17. Серeda Т. В. Використання методів прогнозування в системах автоматизованого управління запасами підприємства. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. 2021. Вип. 9. С. 45–54.

18. Evans S., et al. Sustainable manufacturing in the chemical industry: ISO 14001 compliance and waste reduction. *Sustainable Production and Consumption*. 2021. Vol. 26. P. 456–468.

19. Попович В. В. Екологічна безпека та управління професійними ризиками на хімічних виробництвах. *Екологічна безпека та природокористування*. 2019. Вип. 4 (32). С. 56–63.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
						66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

20. Rossi M., Ferrari A. Industry 4.0 applications in fluid processing, dosing, and packaging. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. 2022. Vol. 74. P. 102283.

21. Webster J. G., Eren H. The Measurement, Instrumentation and Sensors Handbook: Spatial, Mechanical, Thermal, and Radiation Measurement. Boca Raton : CRC Press, 2014. 1564 p.

22. Глоба Л. С., Терновий О. С. Архітектура та протоколи взаємодії сенсорних мереж в системах ІоТ. *Зв'язок*. 2018. № 2. С. 14–20.

23. Li H., Zhang Y. Evaluation of ultrasonic and radar level sensors in foamy fluid environments. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2019. Vol. 285. P. 344–352.

24. Lundelin A., et al. Comparative analysis of level measurement technologies for high-viscosity industrial fluids. *Measurement*. 2019. Vol. 134. P. 14–22.

25. Baker R. C. Flow Measurement Handbook: Industrial Designs, Operating Principles, Performance, and Applications. 2nd ed. Cambridge : Cambridge University Press, 2016. 790 p.

26. Davis S., Miller J. Load cell technologies for industrial weighing and gravimetric dosing. *IEEE Sensors Journal*. 2018. Vol. 18, No. 12. P. 5021–5030.

27. Paul M., Adams P. Rheology and mixing processes in the paint and coatings industry. *Chemical Engineering Science*. 2017. Vol. 170. P. 345–356.

28. Kuehni R. G. Color: An Introduction to Practice and Principles. 3rd ed. Hoboken : Wiley, 2012. 416 p.

29. Garcia L., Martinez A. Inline spectrophotometry for real-time quality control in coating manufacturing. *Progress in Organic Coatings*. 2021. Vol. 154. P. 106190.

30. Patel R., Kim S. Machine learning applications for automated color correction in continuous mixing processes. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 45678–45689.

31. Mahalik N. P. Fieldbus Technology: Industrial Network Standards for Real-Time Distributed Control. Berlin : Springer, 2013. 280 p.

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк.
						67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

32. Pitzek M., Huber T. Industrial Ethernet: PROFINET and EtherCAT in real-time control applications. *Computer Standards & Interfaces*. 2019. Vol. 64. P. 103–115.
33. Lange J., Iwanitz F., Burke T. J. OPC: From Data Access to Unified Architecture. VDE Verlag, 2010. 370 p.
34. Bolton W. Programmable Logic Controllers. 6th ed. Oxford : Newnes, 2015. 428 p.
35. Stuart A., Baines T. SCADA and MES integration for Industry 4.0: A framework for smart manufacturing. *Journal of Industrial Information Integration*. 2021. Vol. 23. P. 100216.
36. Ramirez A. Asynchronous Web APIs with Python and FastAPI. Sebastopol : O'Reilly Media, 2021. 250 p.
37. Fielding R. T., Taylor R. N. Principled design of the modern Web architecture. *ACM Transactions on Internet Technology (TOIT)*. 2002. Vol. 2, No. 2. P. 115–150.
38. Banks A., Porcello E. Learning React: Functional Web Development with React and Redux. Sebastopol : O'Reilly Media, 2017. 350 p.
39. Newman S. Building Microservices: Designing Fine-Grained Systems. Sebastopol : O'Reilly Media, 2015. 280 p.
40. Toth P., Vigo D. Industrial Database Management and Traceability Systems. *SIAM Monographs on Discrete Mathematics and Applications*. 2014. 461 p.
41. Espressif Systems. ESP32-WROOM-32E and ESP32-WROOM-32UE Datasheet. Version 1.2. 2023. 58 p. URL: [https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e\\_esp32-wroom-32ue\\_datasheet\\_en.pdf](https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf) (дата звернення: 14.05.2026).
42. Monolithic Power Systems. MP2307: 3A, 23V, 340kHz Synchronous Rectified Step-Down Converter. Datasheet. 2020. 16 p.
43. Ams AG. TCS34725 Color Sensor with IR Filter. Datasheet. 2018. 32 p.

44. Cytron Technologies. HC-SR04 Ultrasonic Sensor Product User's Manual. 2013. 7 p.
45. Maxim Integrated. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. Datasheet. 2019. 22 p.
46. Infineon Technologies. IRLML2502 HEXFET Power MOSFET in a SOT-23 Package. Datasheet. 2021. 8 p.
47. Vishay Semiconductors. 1N4001 thru 1N4007 General Purpose Plastic Rectifier. Datasheet. 2018. 5 p.
48. Bassi L. Industry 4.0: Hope, hype or revolution? IEEE 3rd International Forum on Research and Technologies for Society and Industry (RTSI). IEEE, 2017. P. 1–6.
49. Percival H., Gregory B. Architecture Patterns with Python: Enabling Test-Driven Development, Domain-Driven Design, and Event-Driven Microservices. Sebastopol : O'Reilly Media, 2020. 306 p.
50. Voron M. Building Modern Web Applications with FastAPI. Birmingham : Packt Publishing, 2022. 288 p.
51. Trussell H. J., Saber E. Color Image Processing. *IEEE Signal Processing Magazine*. 2015. Vol. 22, No. 1. P. 14–22.
52. Smith A. ASGI: Asynchronous Server Gateway Interface Specification. Python Software Foundation. 2020. URL: <https://asgi.readthedocs.io/en/latest/> (дата звернення: 15.05.2026).
53. Copeland R. Essential SQLAlchemy: Mapping Python to Databases. 2nd ed. Sebastopol : O'Reilly Media, 2015. 248 p.
54. Chine E. Vite: Next Generation Frontend Tooling. *Journal of Web Engineering*. 2022. Vol. 21, No. 4. P. 110–125.
55. Wieruch R. The Road to React: Your journey to master plain yet pragmatic React.js. 2021. 362 p.

56. Pimentel V., et al. Performance evaluation of RESTful and WebSockets architectures for IoT applications. *Journal of Network and Computer Applications*. 2019. Vol. 132. P. 71–85.

57. Fette I., Melnikov A. The WebSocket Protocol. Internet Engineering Task Force (IETF), RFC 6455. 2011. 71 p.

58. В.Білецький. Ультразвукові датчики витрат газу.JPG. *Вікіпедія : вільна енциклопедія*. URL: wikipedia.org. 2016 (дата звернення: 14.05.2026)

59. SMART. Модуль мікродозування мікрокомпонентів MDK50. URL: [SMART — модуль мікродозування мікрокомпонентів MDK50](#). (дата звернення: 14.05.2026).

60. X-Rite GmbH. Inline Color Measurement, Model Name/Number: ERX31 [Electronic resource] // IndiaMART : B2B Marketplace. – 2026. – URL: <https://www.indiamart.com/proddetail/inline-color-measurement-21238536691.html> (дата звернення: 14.05.2026).

61. TCS34725 Color Sensor. *The Engineering Projects*. 2024. URL: <https://www.theengineeringprojects.com/2024/12/tcs34725-color-sensor.html> (дата звернення: 14.05.2026).

62. Czujnik odległości Arduino. Arduino Factory. 2025. URL: <https://arduinofactory.fr/pl/czujnik-odleglosci-arduino/> (дата звернення: 14.05.2026).

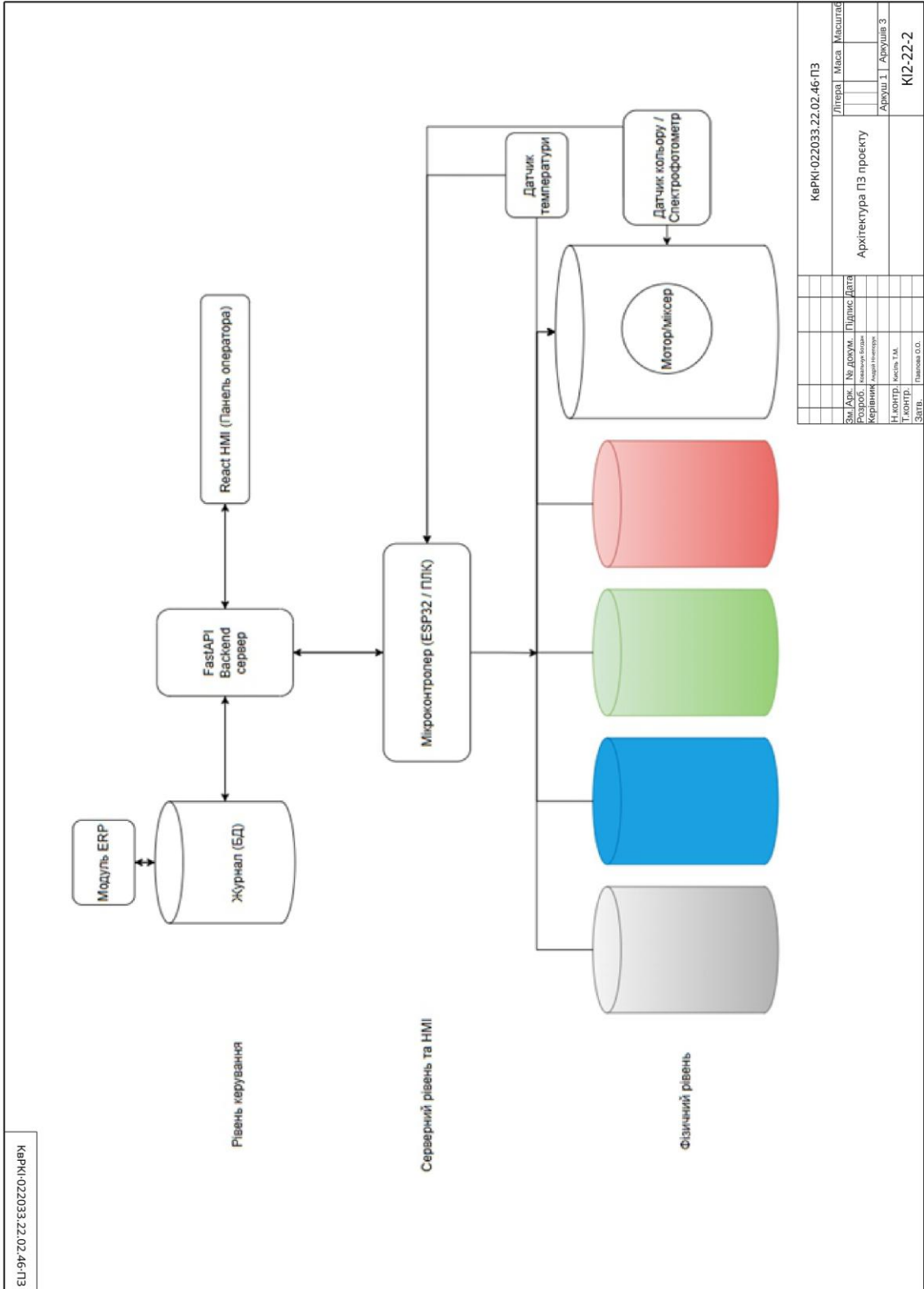
63. 2N7002-HF Comchip Technology. Mouser Electronics. URL: <https://www.mouser.pl/ProductDetail/Comchip-Technology/2N7002-HF?qs=a8qs740VvGNZTNd6pZ%2FAgA%3D%3D> (дата звернення: 14.05.2026).

					КВРКІ·022033.22.02.46·ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

# ДОДАТОК А

(обов'язковий)

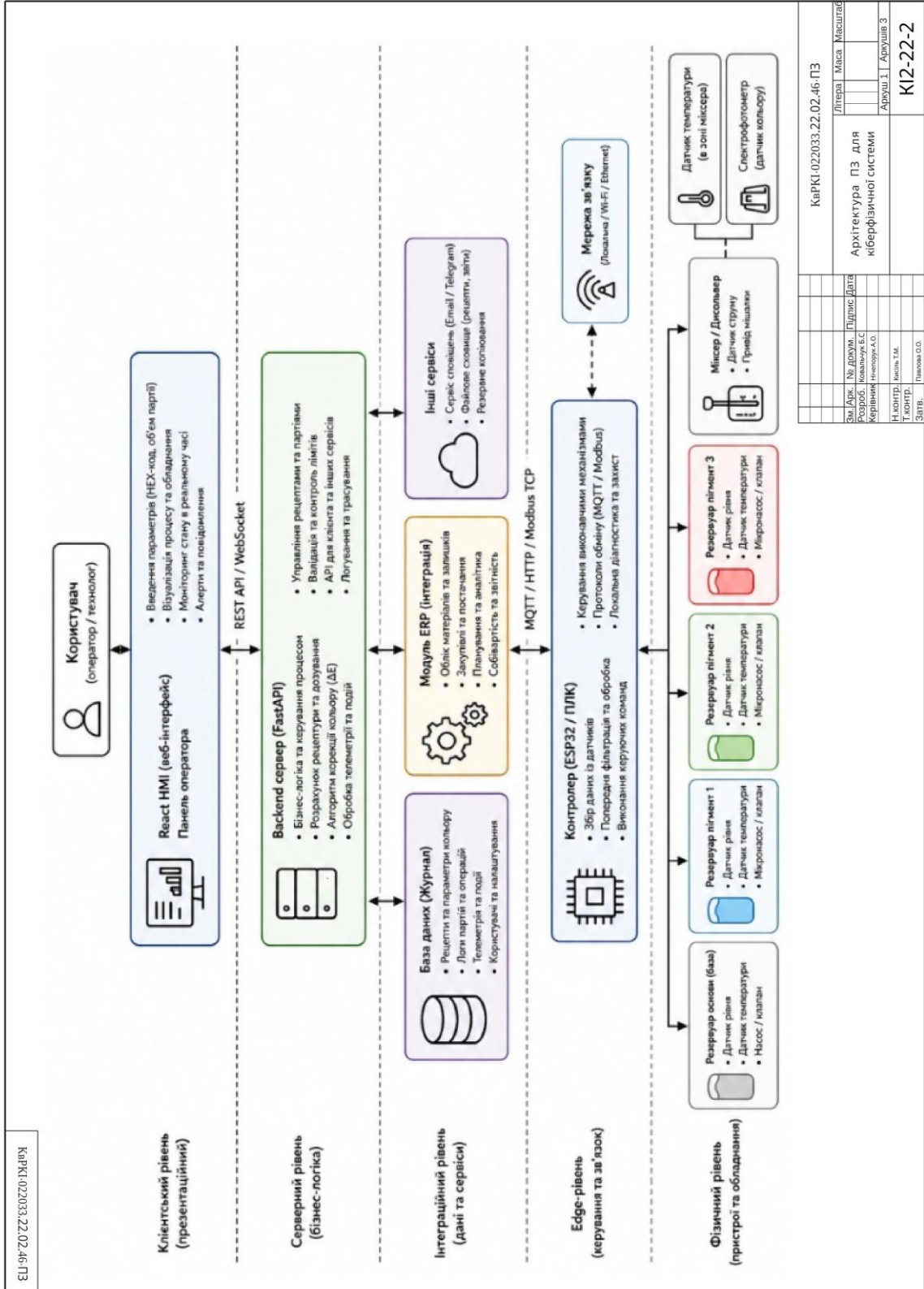
Копія креслення «Архітектура ПЗ проекту»



# ДОДАТОК Б

(обов'язковий)

Копія креслення «Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи»



КерРКІ-022033.22.02.46-ПЗ

КерРКІ-022033.22.02.46-ПЗ

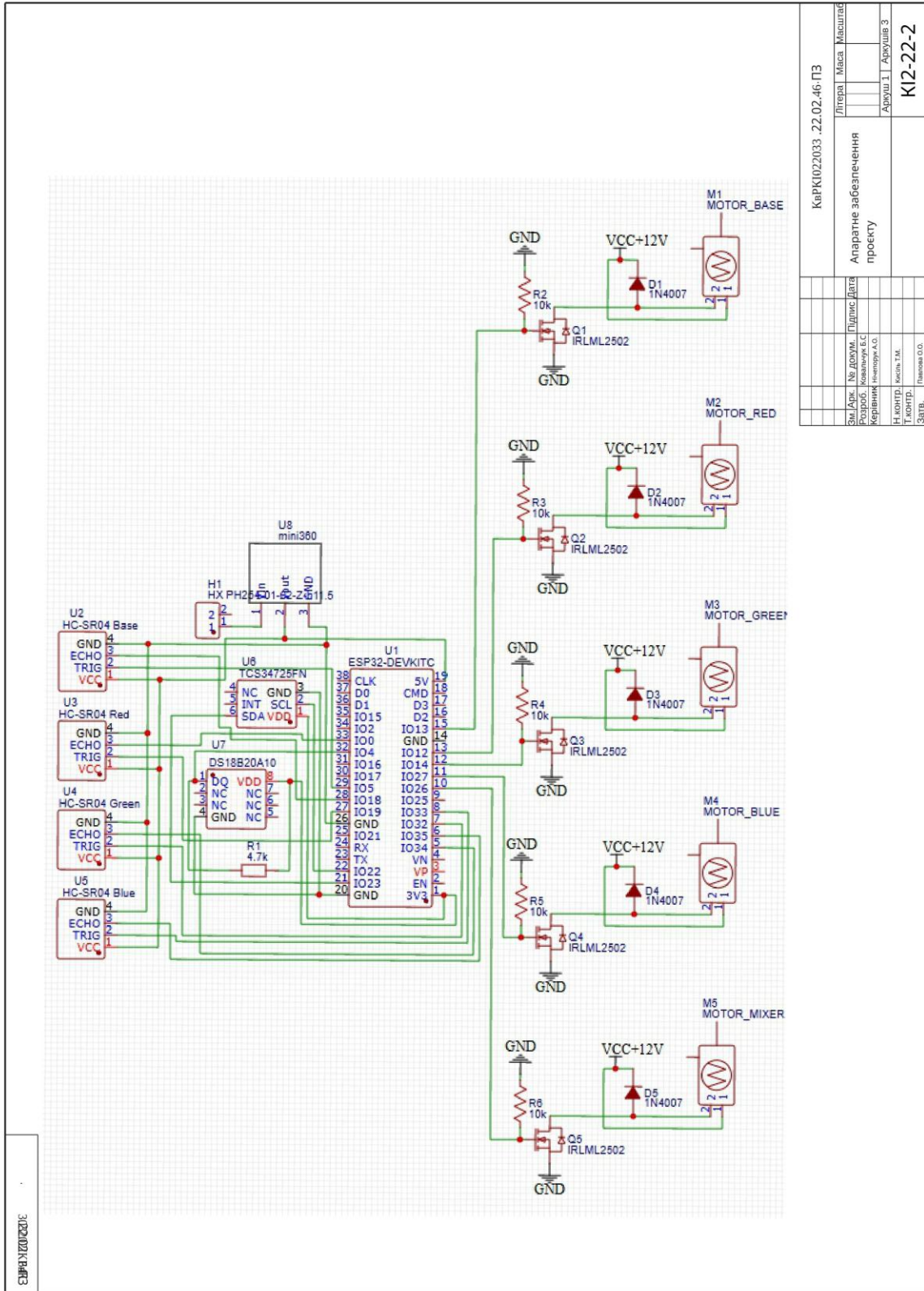
Літера	Масштаб
Архітектура ПЗ для кіберфізичної системи	
Архш.1 / Архш.3	
КІ2-22-2	

ЗМ.Апр.	№ докум.	Підпис	Дата
Керівник проекту А.О.			
Н.КОНТР. Мель Т.М.			
Т.КОНТР.			
З.ІВ.			
Павлова О.О.			

# ДОДАТОК В

(обов'язковий)

Копія креслення «Апаратне забезпечення проєкту»



КаРК1022033_22.02.46-ПЗ		Літера	Масштаб
Апаратне забезпечення проєкту		Підпис	Дата
Вм.Апр.	№ докм.	Кваліфік. Б.С.	
Розроб.	Кваліфік. Б.С.	Керівник проекту	К.С.
Н.контр.	Кільк. ТМ.	Т.контр.	
Затв.	Підпис	Підпис	
			К12-22-2

## 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:** Богдан КОВАЛЬЧУК

**Співавтор:**

**Назва:** Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

**Експерт:** Олександр КОЗЕЛЬСЬКИЙ

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

**Коефіцієнт подібності 1:** 3.4%

**Коефіцієнт подібності 2:** 0.65%

**Мікропробіли:** 3

**Заміна букв:** 1

**Інтервали:** 0

**Білі знаки:** 0

**Дата створення звіту:** 2026-05-27 12:06:23.0

**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 укріття 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:**

2026-05-30

*Дата*



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

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

Максимальне співпадіння з одним документом 1.0%

Словники перевірки: en\_US, ru\_RU, ua\_UA. Помилки в документах: 11%

ID: 272423 Назва: БКР Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору Додано в БД: 2026-05-27 Автора: Богдан КОВАЛЬЧУК Керівники: Олександр КОЗЕЛЬСЬКИЙ Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	99986	641	2438 (2%)	37 (6%)

### Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми

## РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Ковальчук Богдан Сергійович

Тема: Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 77

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є розробка кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб із заданими параметрами кольору, що забезпечує розрахунок пропорцій компонентів, керування процесом дозування та моніторинг роботи системи в режимі реального часу.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: У першому розділі кваліфікаційної роботи проведено аналіз сучасних кіберфізичних систем автоматизованого дозування, досліджено особливості використання промислових датчиків, виконавчих механізмів, мережевих протоколів та програмних платформ керування виробничими процесами. Виконано постановку задачі та сформульовано основні вимоги до проєктованої системи.

У другому розділі виконано проєктування кіберфізичної системи автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб. Розроблено загальну архітектуру системи, схему взаємодії компонентів, принципову електричну схему та монтажну схему апаратного вузла. Обґрунтовано вибір апаратних компонентів та програмних технологій.

У третьому розділі реалізовано програмну частину системи, включаючи серверний модуль обробки даних, алгоритми розрахунку пропорцій інгредієнтів,

засоби керування процесом дозування та веб-інтерфейс для моніторингу й керування системою. Проведено тестування розробленого програмно-апаратного комплексу та аналіз отриманих результатів.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: недостатня увага щодо виконання додатку.

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи: Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно діючих стандартів оформлення документації.

7. Відгук про роботу в цілому: Робота виконана на належному науково-технічному рівні.

8. Інші зауваження: \_\_\_\_\_

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно

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

*Дмитро Володимир Михайлович*  
*доцент кат. Інтернет-технологій*

“ ” \_\_\_\_\_ 2026 р.

*[Підпис]* (підпис)

Зав. кафедри КПС  
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Богдана КОВАЛЬЧУКА

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 4 курсу, групи КІ2-22-2

### 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.

1 травня 2026 року

## РІШЕННЯ ЕКСПЕРТНОЇ КОМІСІЇ

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

Назва кваліфікаційної роботи Кіберфізична система автоматизованого дозування інгредієнтів при виробництві фарб з заданими параметрами кольору

Автор Богдан КОВАЛЬЧУК

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: Олександр КОЗЕЛЬСЬКИЙ

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 3,4 %; та системою Anti-Plagiarism складає 1,0%, що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи

  
Підпис  
  
Підпис  
  
Підпис

Ольга ПАВЛОВА  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Олександр КОЗЕЛЬСЬКИЙ  
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ