

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з
віддаленим моніторингом

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.2301106.23.01.47 ПЗ

Виконав здобувач III курсу, група КІ2с-23-1


Підпис

Віталій КОВАЛЬ

Ініціали, прізвище

Керівник

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Марія КАПУСТЯН

Ініціали, прізвище

Нормоконтролер

Науковий ступінь, учене звання


Підпис

Сергій ЛИСЕНКО

Ініціали, прізвище

До захисту допускаю:
завідувач кафедри КІС

«04» червня 2026 р.


Підпис

Ольга ПАВЛОВА

Ініціали, прізвище

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

Ковалю Віталію Дмитровичу

Прізвище, ім'я, по батькові студента

1. Тема проекту (роботи) Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом

Керівник проекту (роботи) Капустян Марія Вікторівна, к.т.н., доцент.

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) _____

Теоретичні аспекти побудови кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку

Проектування кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3d-друку з віддаленим моніторингом

Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту

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

Блок-схема логіки роботи

Архітектура програмного забезпечення

Апаратне забезпечення проекту


6. Консультанти розділів кваліфікаційної роботи

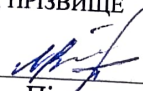
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

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 напряму 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 сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом	01.04.2026	Виконано
5	Робота над розділом 3 – проєктування системи сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом	29.04.2026	Виконано
6	Оформлення пояснювальної записки згідно вимог	25.05.2026	Виконано
7	Попередній захист ВКР	26.05.2026	Виконано
8	Захист ВКР на засіданні ЕК	Червень 2026 року	

Здобувач  Віталій КОВАЛЬ
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

Керівник кваліфікаційної роботи  Марія КАПУСТЯН
Підпис Імя, ПРІЗВИЩЕ

АНОТАЦІЯ

Тема кваліфікаційної роботи: «Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом».

Автор роботи: Віталій КОВАЛЬ.

Керівник роботи: Марія КАПУСТЯН.

Пояснювальна записка: 62 с., 12 рис., 2 табл., 3 дод., 55 джерел.

Графічна частина: 3 креслення.

3D-ДРУК, ВІДДАЛЕНИЙ МОНІТОРИНГ, ВОЛОГІСТЬ, КІБЕРФІЗИЧНА СИСТЕМА, МІКРОКОНТРОЛЕР, СУШІННЯ, ФІЛАМЕНТ.

Кваліфікаційна робота бакалавра присвячена розробці програмно-апаратної кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з можливістю віддаленого моніторингу параметрів середовища. Актуальність теми умовлена тим, що якість 3D-друку значною мірою залежить не лише від алаштувань принтера, а й від стану полімерного матеріалу.

Метою роботи є проектування, реалізація та перевірка кіберфізичної системи, яка забезпечує сушіння філаменту, підтримання контрольованих умов його зберігання та передавання поточних параметрів для локального й віддаленого перегляду. Для досягнення поставленої мети проаналізовано особливості використання філаменту в 3D-друці, розглянуто наявні рішення для сушіння та зберігання матеріалу, обґрунтовано вибір апаратних компонентів, сформовано структурну і функціональну схеми системи, реалізовано програмну логіку ерування температурою та вологістю, а також організовано відображення апаратів через дисплей і вебінтерфейс.



Підпис здобувача





30.05.2026

Дата

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Теоретичні аспекти побудови кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3d-друку	6
1.1 Особливості використання філаменту в 3D-друці та вплив умов зберігання на якість друку	6
1.2 Аналіз існуючих підходів і рішень для сушіння та зберігання філаменту	8
1.3 Кіберфізичні системи як основа автоматизованого контролю фізичних процесів	13
1.4 Засоби збору, обробки та передавання даних у системах віддаленого моніторингу	15
1.5 Постановка задачі створення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту з віддаленим моніторингом	17
2 Проектування кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3d-друку з віддаленим моніторингом	19
2.1 Загальна архітектура кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту	19
2.2 Обґрунтування вибору апаратних компонентів системи	22
2.3 Розроблення структурної та функціональної схеми системи	26
2.4 Організація збору, обробки та аналізу даних про температуру і вологість	30
2.5 Організація передавання даних і віддаленого моніторингу системи	36
3 Програмно-апаратна реалізація кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту	40
3.1 Налаштування взаємодії електронних модулів і виконавчих елементів	40

КВРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ

Зм.	Арк.	№ док.ум.	Підпис	Дата	Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом	Літера	Арк.ум.	Арк.лістів
Виконав		Віталій КОВАЛЬ		01.06.23		у		62
Перевір.		Марія КАПУСТЯН		01.06.23	Пояснювальна записка	ХНУ КІ2с-23-1		
Н.КОНТР.		Сергій Лисенко		01.06.23				
Затвер.		Ольга ПАВЛОВА		01.06.23				

3.2 Реалізація програмної логіки підтримання температури та вологості	44
3.3 Реалізація локального та віддаленого відображення параметрів системи	49
3.4 Перевірка роботи системи в режимах сушіння та зберігання	53
3.5 Оцінка практичної придатності та обмежень розробленого пристрою	58
Висновки	64
Додаток А Блок-схема логіки роботи	72
Додаток Б Архітектура програмного забезпечення.....	73
Додаток В Схема електрична принципова	74

ВСТУП

Адитивні технології за останні роки перетворилися з експериментального інструменту на повноцінний засіб виготовлення прототипів, функціональних деталей і малосерійних виробів. 3D-друк активно застосовується в освіті, інженерній практиці, невеликих виробничих майстернях та сервісних центрах, де важливими стають не лише швидкість отримання результату, а й стабільність якості готових виробів. У цьому контексті дедалі більшої уваги набуває не тільки налаштування обладнання, а й стан матеріалів, що використовуються в процесі друку.

Філамент, який подається в екструдер 3D-принтера, уже не розглядається як звичайний витратний матеріал. Його фізичний стан безпосередньо впливає на стабільність подачі розплаву, якість поверхні, точність геометрії та механічні властивості надрукованих деталей. Більшість поширених полімерів, зокрема PLA, ABS, PETG, нейлон та інженерні композити, характеризуються гігроскопічністю і з часом накопичують вологу з навколишнього середовища.

У реальних умовах експлуатації філамент часто зберігається у приміщеннях із неконтрольованою температурою та вологістю. Зміни мікроклімату, сезонні коливання та особливості вентиляції поступово погіршують властивості матеріалу, що не завжди помітно одразу, але проявляється у вигляді погіршення якості виробів. Практика використання 3D-друку показує, що попереднє сушіння матеріалу та підтримання контрольованих умов зберігання дозволяє суттєво підвищити стабільність технологічного процесу та передбачуваність результатів. Унаслідок цього сушіння і зберігання філаменту перестають бути допоміжними операціями і перетворюються на важливу частину підготовки матеріалу до друку.

Сучасний ринок пропонує різні пристрої для сушіння та зберігання філаменту, проте більшість із них орієнтована на локальне використання і не забезпечує повноцінного контролю параметрів середовища з можливістю

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк.
						4
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналізу їх зміни в часі. Інформація про температуру та вологість зазвичай або відсутня, або використовується лише для поточного спостереження без накопичення та обробки. Це обмежує можливості оцінки реального стану матеріалу та ускладнює прийняття обґрунтованих рішень щодо режимів сушіння і зберігання.

На тлі розвитку вбудованих систем, мережевих технологій і засобів автоматизації дедалі більшої актуальності набуває кіберфізичний підхід, у межах якого фізичні процеси поєднуються з обчислювальною частиною, засобами збору даних і керування. Застосування такого підходу до задачі сушіння та зберігання філаменту дозволяє перейти від окремих пристроїв до цілісної системи, здатної не лише підтримувати задані умови, а й здійснювати моніторинг, накопичення та аналіз даних про стан матеріалу в реальному часі.

У цій кваліфікаційній роботі бакалавра розглядається задача створення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту з віддаленим моніторингом, орієнтованої на підвищення стабільності та передбачуваності процесу 3D-друку. Основна ідея полягає в поєднанні засобів вимірювання температури та вологості, керуючої логіки, виконавчих елементів і програмної частини для збору та візуалізації даних у єдиній автоматизованій системі. Такий підхід дозволяє забезпечити контроль стану матеріалу, своєчасно реагувати на відхилення параметрів і створити умови для збереження властивостей філаменту протягом тривалого часу.

Актуальність обраної теми зумовлена зростаючими вимогами до якості та повторюваності результатів адитивного виробництва, а також потребою у більш надійних і інформативних засобах контролю стану матеріалів. Реалізація кіберфізичної системи в цій сфері створює передумови для підвищення ефективності використання 3D-принтерів, зменшення кількості технологічних дефектів і переходу до більш усвідомленого керування процесом підготовки філаменту до друку.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 5
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1 ТЕОРЕТИЧНІ АСПЕКТИ ПОБУДОВИ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ФІЛАМЕНТУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ

1.1 Особливості використання філаменту в 3D-друці та вплив умов зберігання на якість друку

У цій кваліфікаційній роботі бакалавра розглянуто особливості застосування філаменту в процесі 3D-друку та проаналізовано вплив умов його зберігання на стабільність і якість виготовлення виробів [1, 2, 3]. У сучасних адитивних технологіях філамент уже сприймається не просто як витратний матеріал, а як один із ключових елементів технологічного ланцюга, від стану якого безпосередньо залежить передбачуваність процесу формування деталей [4, 5]. Полімерна нитка, що подається в зону плавлення, повинна мати стабільні фізичні та механічні властивості, оскільки будь-які відхилення у її структурі або складі одразу відображаються на характері екструзії та якості накладання шарів [6, 7].

Переважає більшість поширених матеріалів для 3D-друку, зокрема PLA, ABS, PETG, нейлон та гнучкі полімери, у тій чи іншій мірі характеризуються гігроскопічністю, тобто здатністю поглинати вологу з навколишнього повітря [8, 9, 10]. Цей процес відбувається поступово і часто не супроводжується помітними зовнішніми змінами котушки з матеріалом [11]. Водночас на молекулярному рівні структура полімеру змінюється, що призводить до накопичення вологи всередині нитки [12, 13]. Під час нагрівання в екструдері ця волога переходить у пароподібний стан, утворюючи мікропухирці, які порушують рівномірність подачі розплаву через сопло [14, 15]. У результаті спостерігається нестабільний потік матеріалу, поява характерних потріскувань, мікропорожнин у структурі шару та погіршення зчеплення між шарами [16, 17].

У процесі експлуатації 3D-принтера важливу роль відіграє повторюваність результатів друку, коли однакові налаштування повинні давати однакову якість виробів [18, 19]. Проте за наявності зволоженого філаменту ця повторюваність

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк.
						6
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

порушується, оскільки матеріал починає поводитися непередбачувано [20]. Навіть за коректно підібраних температурних режимів і швидкостей подачі можуть виникати дефекти поверхні, ниткоподібні витікання, зниження точності геометричних розмірів та погіршення механічних характеристик готової деталі [21, 22, 23]. Особливо чутливими до цього є інженерні матеріали, такі як нейлон або полікарбонат, для яких контроль вологості є критичним чинником стабільної роботи [24, 25].

Окремої уваги заслуговує питання тривалого зберігання філаменту між циклами використання [26]. У реальних умовах майстерень, навчальних лабораторій або невеликих виробничих приміщень катушки з матеріалом часто зберігаються у відкритому просторі, де рівень вологості та температура повітря змінюються залежно від пори року, погодних умов або режиму вентиляції [27, 28]. За таких обставин навіть новий матеріал поступово втрачає свої первинні властивості [29]. Це призводить до того, що якість друку з часом погіршується без видимих змін у налаштуваннях обладнання, а причину дефектів не завжди вдається одразу пов'язати саме зі станом філаменту [30, 31].

Крім вологи, на властивості матеріалу впливають і температурні умови зберігання [32]. Перепади температур можуть спричинити внутрішні напруження у полімерній нитці, що згодом проявляється у зміні її жорсткості, крихкості або схильності до нерівномірного плавлення [33, 34]. У поєднанні з підвищеною вологістю це створює додаткові передумови для зниження стабільності технологічного процесу [35]. У підсумку стан філаменту перестає бути другорядним фактором і починає визначати загальну надійність роботи всієї системи 3D-друку [36, 37].

Практика використання адитивних технологій показала, що попереднє сушіння матеріалу та підтримання контрольованих умов його зберігання дозволяє суттєво підвищити якість і передбачуваність результатів [38, 39]. За умови зниження вмісту вологи в полімері процес екструзії стає більш стабільним, зменшується кількість дефектів поверхні, покращується адгезія між

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 7
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шарами та загальна міцність виробів [40, 41, 42]. Це дозволяє розглядати сушіння і зберігання філаменту не як допоміжну операцію, а як повноцінний етап технологічної підготовки матеріалу до друку [43, 44].

З огляду на це, контроль параметрів середовища, у якому зберігається філамент, набуває системного значення [45]. Підтримання стабільної температури та вологості створює умови для збереження властивостей матеріалу протягом тривалого часу та забезпечує відтворюваність результатів друку [46, 47]. Унаслідок цього задача організації контрольованого середовища для філаменту природно переходить у площину автоматизованих рішень, де поєднання засобів вимірювання, керування та обробки даних дозволяє забезпечити більш надійний і передбачуваний технологічний процес [48, 49, 50].

Отже, особливості використання філаменту в 3D-друці тісно пов'язані з його фізичним станом і умовами зберігання [51]. Саме ці фактори визначають стабільність екструзії, якість поверхні, механічні властивості виробів і загальну повторюваність результатів [52]. У підсумку питання контролю стану матеріалу логічно розглядається як одна з ключових передумов підвищення ефективності адитивного виробництва та обґрунтовує доцільність створення спеціалізованих автоматизованих систем для сушіння й зберігання філаменту [38, 45, 50].

1.2 Аналіз існуючих підходів і рішень для сушіння та зберігання філаменту

Практика використання 3D-друку вже сформувала цілий клас пристроїв і допоміжних засобів, призначених для підтримання філаменту в належному стані [1, 2]. З розвитком адитивних технологій увага до якості матеріалу поступово змістилася від суто налаштувань принтера до питань підготовки та зберігання полімерної нитки [3, 4]. У результаті на ринку з'явилися як прості рішення для пасивного захисту від вологи, так і повноцінні пристрої з функціями активного сушіння та елементарного контролю параметрів середовища [5, 6].

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 8
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільш доступним і поширеним підходом тривалий час залишалося зберігання філаменту в герметичних контейнерах із використанням вологопоглинальних матеріалів [7, 8]. Подібні бокси широко застосовуються як у домашніх майстернях, так і в навчальних лабораторіях, оскільки не потребують складної електроніки та практично не мають обмежень щодо типу матеріалу [9]. Проте такий підхід забезпечує лише пасивний захист від повторного зволоження і не дозволяє ефективно відновити властивості вже насиченого вологою філаменту [10, 11]. Крім того, реальний стан середовища всередині контейнера часто залишається невідомим, а контроль зводиться до періодичної заміни або регенерації осушувача [12].

Більш технологічний напрям представлено спеціалізованими сушарками для філаменту, які поєднують функції нагріву та підтримання матеріалу в підвищеній температурі [13, 14]. До таких пристроїв належать, зокрема, серії Creality Space Pi Filament Dryer який зображено на рисунку 1.1 та Creality Space Pi Filament Dryer Plus, що орієнтовані на побутове й напівпрофесійне використання [37, 41].



Рисунок 1.1 - Creality Space Pi Filament Dryer [53]

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 9
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

У подібних моделях реалізовано нагрівальну камеру з можливістю встановлення температурного режиму, а також циркуляцію повітря для прискорення процесу видалення вологи з полімеру [15, 16]. Аналогічний підхід застосовано в пристроях Sovol Filament Dryer Box та Caydo Filament Dryer, які призначені для підготовки однієї або двох котушок перед друком, зображено на рисунку 1.2 [39, 40].



Рисунок 1.2 - Caydo Filament Dryer [54]

Такі рішення дозволяють у відносно короткий час покращити стан матеріалу та зменшити кількість дефектів, пов'язаних із наявністю вологи [17, 18]. Водночас у більшості випадків контроль процесу обмежується лише температурою та часом сушіння, тоді як реальний рівень вологості або не вимірюється безпосередньо, або відображається з обмеженою точністю [19, 20].

Окрему нішу займають пристрої, розраховані на роботу з кількома котушками одночасно та на тривале зберігання матеріалу в контрольованих умовах [21]. Прикладом такого підходу є Sunlu S4 Filament Dryer Box, у якому

передбачено розміщення до кількох катушок і підтримання стабільного температурного режиму впродовж усього часу використання [39]. Sunlu S4 Filament Dryer Box зображено на рисунку 1.3.



Рисунок 1.3 - Sunlu S4 Filament Dryer Box [55]

Подібні системи орієнтовані на інтенсивніший режим експлуатації та дозволяють зменшити час простою між підготовкою матеріалу і власне друком [22]. Проте навіть у цьому класі пристроїв основний акцент зроблено на локальне керування, а можливості збереження історії параметрів або віддаленого контролю, як правило, відсутні [23, 24].

Для професійного середовища пропонуються більш герметичні та технологічно розвинені рішення, серед яких можна відзначити Prusa Pro Filament Drybox [43]. Такі системи орієнтовані на стабільне зберігання матеріалів із підвищеними вимогами до вологості, зокрема інженерних полімерів [25, 26]. У подібних пристроях підвищену увагу приділено якості ізоляції внутрішнього об'єму та надійності підтримання заданих умов [27]. Водночас навіть у цьому сегменті основні функції зосереджено на локальному контролі, а інтеграція в більш широкі інформаційні або керувальні системи реалізується рідко [28].

Паралельно з комерційними виробами широкого поширення набули саморобні та напівпрофесійні рішення, створені на базі побутових сушильних шаф, харчових дегідраторів або термобоксів із додатковими нагрівальними елементами та вентиляцією [29, 30]. У таких конструкціях зазвичай реалізовано базове керування температурою, інколи додається вимірювання вологості, а керування здійснюється за допомогою простих регуляторів або мікроконтролерних модулів [31, 32]. Подібний підхід приваблює гнучкістю та можливістю адаптації під конкретні потреби, проте стабільність режимів і повторюваність результатів часто залежать від якості реалізації та налаштування конкретного пристрою [33, 34].

Загальною рисою більшості наявних рішень залишається обмеженість засобів моніторингу та аналізу стану філаменту в часі [35]. Навіть у випадках, коли пристрій оснащено індикаторами температури або вологості, ці дані зазвичай використовуються лише для поточного спостереження і не накопичуються для подальшого аналізу [36]. Можливість віддаленого доступу до інформації про стан матеріалу, перегляду історії змін параметрів або оцінки ефективності режимів сушіння реалізується лише в окремих, більш дорогих системах [24, 28].

У підсумку можна відзначити, що сучасний ринок пропонує широкий спектр пристроїв - від простих боксів із осушувачами до багатокамерних сушарок для кількох котушок [37, 38]. Ці рішення дозволяють частково вирішити проблему впливу вологи на якість 3D-друку, проте здебільшого вони зосереджені на окремих аспектах процесу і не формують цілісної системи контролю стану матеріалу [18, 35]. Це створює передумови для переходу до більш комплексного підходу, у якому процеси сушіння та зберігання поєднуються з вимірюванням параметрів, обробкою даних і можливістю віддаленого моніторингу, що відповідає концепції кіберфізичних систем [48, 49, 50].

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 12
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

1.3 Кіберфізичні системи як основа автоматизованого контролю фізичних процесів

Сучасний етап розвитку вбудованих і розподілених технологій характеризується поступовим переходом від окремих автоматизованих пристроїв до цілісних комплексів, у яких фізичні процеси тісно поєднуються з обчислювальними засобами [48, 49]. Саме в цьому контексті сформувалося поняття кіберфізичних систем, під якими розуміються програмно-апаратні комплекси, здатні не лише вимірювати параметри реального середовища, а й активно впливати на нього на основі результатів обробки даних [50, 51]. Такий підхід дозволяє розглядати керування фізичними процесами не як набір ізольованих операцій, а як безперервний цикл спостереження, аналізу та керуючого впливу [45, 46].

Ключовою особливістю кіберфізичних систем є інтеграція сенсорних, обчислювальних і виконавчих компонентів у єдину логічну структуру [31, 32]. Фізичне середовище в такій системі описується через сукупність вимірюваних параметрів, наприклад температури, вологості, тиску або швидкості, які зчитуються датчиками та передаються до обчислювального ядра [18, 19, 20]. Далі ці дані обробляються за заданими алгоритмами, на основі чого формується керуючий вплив на виконавчі механізми [21, 22]. Унаслідок цього система не лише фіксує стан об'єкта керування, а й підтримує його в заданих межах або переводить у потрібний режим роботи [23, 24].

Важливою рисою такого підходу є наявність зворотного зв'язку, який забезпечує адаптацію поведінки системи до змін зовнішніх умов або внутрішніх параметрів [25, 26]. На відміну від простих автоматів із жорстко заданими режимами, кіберфізичні системи орієнтовані на безперервний аналіз поточного стану та корекцію керуючих дій [27, 28]. Це дозволяє підвищити точність підтримання режимів, зменшити вплив випадкових факторів і забезпечити більш стабільну роботу в умовах невизначеності або змінного середовища [29, 30].

Розвиток мікроконтролерних платформ, вбудованих обчислювальних модулів і мережевих інтерфейсів суттєво спростили практичну реалізацію кіберфізичних систем у прикладних задачах [16, 17]. Сьогодні подібні рішення застосовуються в промисловій автоматизації, енергетиці, транспорті, системах «розумного дому», медичних пристроях і багатьох інших сферах [47, 48]. У кожному з цих випадків спільною залишається ідея поєднання фізичного об'єкта керування з програмною логікою, яка відповідає за прийняття рішень і координацію роботи всіх компонентів [49, 50].

Окрему роль у структурі кіберфізичних систем відіграють засоби збору та обробки даних [21, 35]. Сучасні підходи передбачають не лише поточне використання вимірювань для керування, а й накопичення інформації про роботу системи в часі [36, 37]. Це створює можливість аналізу тенденцій, виявлення відхилень від нормального режиму та оцінки ефективності прийнятих рішень [38, 39]. Унаслідок цього система поступово перетворюється з простого регулятора на інструмент підтримки прийняття рішень, здатний працювати на основі об'єктивних даних про реальний стан процесів [40, 41].

У контексті автоматизованого контролю фізичних процесів кіберфізичний підхід дозволяє реалізувати більш гнучкі та надійні схеми керування [42, 43]. Замість фіксованих налаштувань з'являється можливість динамічної адаптації режимів, урахування поточних умов і прогнозування подальшої поведінки системи [44, 45]. Це особливо важливо для процесів, у яких параметри середовища можуть змінюватися в широких межах і де просте підтримання одного заданого значення не забезпечує стабільної якості результату [46, 47].

Застосування кіберфізичних систем у задачах контролю температури та вологості демонструє практичну цінність такого підходу [18, 19, 25]. Поєднання датчиків, керуючої логіки та виконавчих елементів дозволяє не лише підтримувати задані умови, а й оперативно реагувати на відхилення, компенсуючи їх у режимі реального часу [22, 23, 26]. Крім того, можливість інтеграції з мережевими сервісами та інформаційними системами відкриває

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 14
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

шлях до віддаленого моніторингу, централізованого збору даних і аналізу роботи обладнання на більш високому рівні [48, 49, 50].

Отже, кіберфізичні системи формують концептуальну основу для побудови сучасних автоматизованих рішень у сфері керування фізичними процесами [50, 51]. Вони поєднують у собі вимірювання, обчислення та керуючий вплив у єдиному циклі, що забезпечує більш високу точність, адаптивність і надійність роботи [29, 30, 45]. Такий підхід створює передумови для розроблення систем, у яких контроль стану об'єкта та керування його параметрами здійснюється на основі постійного аналізу даних і узгодженої взаємодії всіх компонентів [40, 41, 49].

1.4 Засоби збору, обробки та передавання даних у системах віддаленого моніторингу

Системи віддаленого моніторингу спираються на безперервний обмін даними між фізичним об'єктом і обчислювальною частиною, унаслідок чого ключовим елементом стає ланцюг «вимірювання - обробка - передавання - відображення» [48, 49]. У сучасних технічних рішеннях цей ланцюг уже формується як єдине ціле, де кожен етап впливає на точність, надійність і корисність отриманої інформації [35, 36]. Якість моніторингу визначається не лише характеристиками датчиків, а й тим, як дані обробляються, зберігаються та доставляються до користувача або керуючої підсистеми [21, 40].

Збір інформації в подібних системах зазвичай реалізується за допомогою цифрових або аналогових сенсорів, що вимірюють параметри фізичного середовища [18, 19, 20]. Для задач контролю мікроклімату найчастіше застосовуються датчики температури та вологості, які перетворюють фізичні величини на електричні сигнали або цифрові коди [18, 19]. Ці дані надходять до мікроконтролерного або вбудованого обчислювального модуля, де відбувається їх первинна фільтрація, усереднення та перевірка на коректність [16, 17, 31].

Такий етап попередньої обробки дозволяє зменшити вплив шумів, випадкових коливань і похибок вимірювання, що підвищує стабільність подальшого аналізу [32, 33].

Обробка даних у системах віддаленого моніторингу зазвичай включає не лише приведення вимірювань до зручного для використання формату, а й обчислення похідних показників, порівняння з заданими межами та формування подій або попереджень [36, 37]. У результаті «сирі» значення сенсорів перетворюються на інформацію, придатну для прийняття рішень [38, 39]. На цьому етапі реалізується логіка керування, яка визначає, чи перебуває система в нормальному режимі, чи спостерігається відхилення, що потребує реакції виконавчих елементів або сповіщення оператора [21, 22, 23].

Передавання даних є наступною критичною ланкою, оскільки саме воно забезпечує можливість спостереження за станом об'єкта на відстані [48, 50]. У сучасних системах для цього використовуються як дротові, так і бездротові канали зв'язку, включно з локальними мережами та інтернет-з'єднанням [49, 51]. Дані можуть передаватися у вигляді періодичних вимірювань, подієвих повідомлень або агрегованих зведень за певний інтервал часу [24, 53]. Важливою вимогою до такого обміну стає надійність доставки та захист від спотворення інформації, оскільки помилки на цьому етапі безпосередньо впливають на коректність відображення стану системи та ефективність керування [47, 50].

Окреме значення має організація зберігання інформації, яка надходить із об'єкта моніторингу [21, 31]. Накопичення історії вимірювань дозволяє не лише відстежувати поточний стан, а й аналізувати динаміку змін у часі, виявляти тенденції та оцінювати ефективність обраних режимів роботи [36, 38]. За рахунок цього система перестає бути лише інструментом поточного контролю і набуває властивостей аналітичної платформи, що підтримує прийняття обґрунтованих рішень на основі фактичних даних [40, 41].

Візуалізація та доступ до даних у віддаленому режимі завершують логічний ланцюг обробки інформації [22, 28]. Вбудовані дисплеї, веб-інтерфейси

або спеціалізовані програмні панелі дозволяють у зручній формі відображати поточні значення параметрів, їх зміну в часі та стан системи загалом [23, 24, 52]. Такий підхід забезпечує прозорість роботи обладнання і спрощує контроль без необхідності фізичної присутності біля об'єкта [49, 50]. Унаслідок цього користувач отримує можливість оперативно реагувати на зміни умов і коригувати режими роботи на основі актуальної інформації [45, 46].

У підсумку засоби збору, обробки та передавання даних формують технологічну основу систем віддаленого моніторингу [48, 49]. Вони забезпечують безперервний обмін інформацією між фізичним середовищем і обчислювальною частиною, перетворюючи окремі вимірювання на цілісну картину стану об'єкта [35, 40]. Такий підхід дозволяє реалізувати більш надійний контроль параметрів, підвищити інформативність системи та створити умови для інтеграції моніторингу в ширші автоматизовані та кіберфізичні комплекси [50, 51].

1.5 Постановка задачі створення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту з віддаленим моніторингом

Сучасна практика використання 3D-друку показує, що стабільність якості виготовлення виробів значною мірою визначається не лише налаштуваннями обладнання, а й станом матеріалу, який подається в екструдер. Філамент, що зберігається в умовах підвищеної вологості або температурних коливань, поступово втрачає передбачуваність своїх властивостей, унаслідок чого з'являються дефекти поверхні, погіршується адгезія між шарами та знижується механічна міцність деталей.

У реальних умовах експлуатації обладнання для 3D-друку часто виникає потреба не лише одноразово підготувати філамент до роботи, а й підтримувати його в стабільному стані протягом тривалого часу. Це особливо актуально для навчальних лабораторій, майстерень і невеликих виробничих ділянок, де

матеріали використовуються нерегулярно, а умови навколишнього середовища можуть суттєво змінюватися.

Окрему роль у формуванні вимог до системи відіграє потреба у віддаленому доступі до інформації. У сучасних умовах контроль обладнання дедалі частіше виходить за межі безпосередньої присутності оператора біля пристрою, тому засоби мережевого передавання даних і візуалізації стану системи стають невід'ємною складовою. Наявність віддаленого моніторингу дозволяє оперативно отримувати інформацію про стан філаменту, оцінювати умови його зберігання та за потреби коригувати режими роботи без фізичного втручання в процес.

З технічної точки зору поставлена задача передбачає побудову кіберфізичної системи, у якій фізичні процеси сушіння та підтримання мікроклімату поєднуються з обчислювальною частиною, що відповідає за збір, обробку та передавання даних. У такій структурі датчики температури та вологості формують інформаційну основу для прийняття рішень, керуючі алгоритми визначають необхідні дії, а виконавчі елементи реалізують підтримання заданих режимів. Інтеграція цих компонентів у єдину систему дозволяє забезпечити замкнений цикл керування з урахуванням зворотного зв'язку та поточного стану середовища.

Отже, у межах цієї кваліфікаційної роботи сформульовано задачу розроблення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту з віддаленим моніторингом, яка має забезпечувати стабільні умови зберігання матеріалу, автоматизований контроль ключових параметрів і можливість спостереження за станом системи в реальному часі. Реалізація такого підходу створює передумови для підвищення відтворюваності результатів 3D-друку, зменшення впливу зовнішніх факторів на властивості матеріалу та переходу від окремих допоміжних пристроїв до цілісної автоматизованої системи підготовки філаменту до використання.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 18
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

2 ПРОЄКТУВАННЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ФІЛАМЕНТУ ДЛЯ 3D-ДРУКУ З ВІДДАЛЕНИМ МОНІТОРИНГОМ

2.1 Загальна архітектура кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту

Загальна архітектура кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту сформована як поєднання апаратної частини, програмної логіки керування та засобів віддаленого моніторингу. Основою системи виступає мікроконтролерна платформа ESP32, яка забезпечує зчитування показників із датчика температури та вологості, обробку отриманих даних, керування нагрівальними й вентиляційними елементами, а також передавання інформації для подальшого відображення у віддаленому інтерфейсі. Такий підхід дозволяє об'єднати фізичний процес сушіння філаменту з цифровим контролем параметрів середовища.

У складі системи передбачено камеру сушіння та зберігання філаменту, у якій розміщується котушка з полімерною ниткою. Саме в цій камері відбувається підтримання контрольованого мікроклімату, що є основною умовою збереження властивостей матеріалу. У середині камери встановлюється датчик DHT22, також відомий як AM2302, який виконує вимірювання температури та відносної вологості повітря. Отримані значення передаються до ESP32, де вони аналізуються відповідно до заданої логіки роботи системи. Якщо температура або вологість виходять за встановлені межі, мікроконтролер формує керуючий сигнал для виконавчих елементів.

Нагрівальна частина системи побудована на основі РТС-нагрівачів 12 В потужністю 30 Вт. Використання кількох нагрівальних елементів дозволяє рівномірніше прогрівати внутрішній простір камери та забезпечувати достатню інтенсивність сушіння філаменту. Для безпечного керування нагрівачами між мікроконтролером і силовим навантаженням застосовується транзисторний

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 19
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ключ або MOSFET-модуль. Це потрібно тому, що ESP32 не може напряду живити нагрівальні елементи, а лише подає керуючий сигнал на силову частину. У результаті низьковольтна логіка мікроконтролера відокремлюється від ланцюгів, у яких протікає більший струм.

Для стабілізації живлення в архітектурі системи використовується DC-DC перетворювач LM2596. Його призначення полягає у перетворенні та стабілізації напруги для окремих модулів системи. Наявність такого елемента є важливою, оскільки нагрівачі, вентилятори, мікроконтролер і дисплей можуть мати різні вимоги до живлення. Стабільне електроживлення зменшує ризик збоїв у роботі ESP32, помилок зчитування даних із датчика та нестабільної роботи виконавчих елементів.

Окрему роль у системі відіграє вентиляційна частина. Для рівномірного розподілу теплого повітря всередині камери передбачено використання кулерів і радіаторів. Радіатори допомагають відводити та розсіювати тепло від нагрівальних елементів, а кулери забезпечують циркуляцію повітря. Завдяки цьому температура в камері розподіляється більш рівномірно, а філамент прогрівається не лише в окремій зоні біля нагрівача, а по всьому об'єму камери. Це особливо важливо для якісного сушіння, оскільки локальний перегрів може бути небажаним для полімерної нитки, а недостатня циркуляція повітря знижує ефективність видалення вологи.

Для локального контролю стану системи передбачено використання дисплея. На ньому можуть відображатися поточні значення температури, вологості, режим роботи, стан нагріву та вентиляції. Такий елемент робить систему зручнішою під час безпосередньої експлуатації, оскільки основні параметри можна переглядати без підключення до віддаленого інтерфейсу. Водночас головною перевагою використання ESP32 є наявність вбудованого модуля Wi-Fi, що дозволяє реалізувати віддалений моніторинг параметрів середовища. За рахунок цього дані можуть передаватися на вебінтерфейс або

іншу програмну панель, де користувач отримує можливість спостерігати за роботою системи на відстані.

Архітектура системи побудована за принципом замкненого циклу керування. Спочатку датчик температури та вологості фіксує поточний стан середовища всередині камери. Далі ESP32 отримує ці значення, порівнює їх із заданими межами та визначає, чи потрібно активувати нагрів або вентиляцію. Після ввімкнення виконавчих елементів умови в камері змінюються, і датчик знову фіксує оновлені параметри. Завдяки такому циклу система не просто відображає поточний стан, а постійно підтримує потрібні умови для сушіння та зберігання філаменту.

На рисунку 2.1 зображено загальну архітектуру кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту, у якій показано взаємозв'язок між камерою зберігання, датчиком температури й вологості, мікроконтролером ESP32, нагрівальними елементами, вентиляторами, блоком живлення, дисплеєм та засобами віддаленого моніторингу. Центральним елементом схеми виступає ESP32, оскільки саме цей модуль приймає дані, обробляє їх і формує керуючі сигнали для інших компонентів.

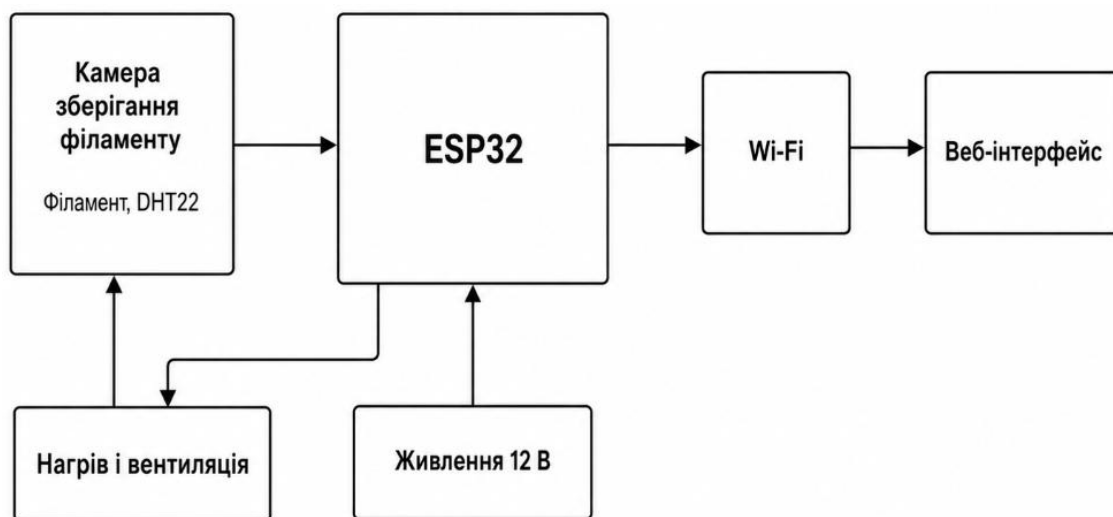


Рисунок 2.1 – Загальна архітектура кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту

Запропонована архітектура дозволяє реалізувати не лише просте сушіння філаменту, а повноцінну кіберфізичну систему з вимірюванням параметрів, керуванням фізичними процесами та віддаленим контролем. Поєднання ESP32, датчика DHT22, РТС-нагрівачів, вентиляційних елементів, DC-DC перетворювача та дисплея створює основу для подальшої програмної реалізації системи, її тестування та вдосконалення в межах кваліфікаційної роботи.

2.2 Обґрунтування вибору апаратних компонентів системи

Вибір апаратних компонентів кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту виконано з урахуванням функціонального призначення пристрою, умов його подальшої експлуатації та потреби у поєднанні фізичного процесу сушіння з цифровим контролем параметрів середовища. Основна увага приділена тому, щоб система залишалася доступною за вартістю, достатньо простою у збиранні, придатною для подальшого програмування та водночас мала можливість віддаленого моніторингу. Саме тому в основу пристрою покладено мікроконтролерну платформу ESP32, яка поєднує обчислювальні можливості, достатню кількість портів введення-виведення та вбудований модуль Wi-Fi.

ESP32 у цій системі виконує роль центрального керуючого елемента. На нього покладено завдання зчитування даних із датчика температури та вологості, обробки отриманих значень, керування нагрівальними елементами, взаємодії з дисплеєм і передавання інформації до віддаленого інтерфейсу. Вибір саме цієї платформи є доцільним через її універсальність і придатність для побудови невеликих кіберфізичних систем.

Для вимірювання параметрів середовища обрано датчик DHT22, також відомий як AM2302. Його застосування є логічним для цієї системи, оскільки один модуль дозволяє одночасно отримувати два основні параметри, необхідні для контролю стану камери сушіння: температуру та відносну вологість повітря.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 22
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Це спрощує апаратну частину пристрою, оскільки замість двох окремих сенсорів використовується один комбінований датчик. Для задачі сушіння філаменту така інформація є основною, адже саме температура визначає інтенсивність нагріву, а вологість показує, наскільки ефективно зменшується вміст вологи в середовищі навколо котушки. У прототипі одного датчика достатньо для загального контролю параметрів камери, хоча в подальшому конструкцію можна розширити додатковими сенсорами для вимірювання параметрів у різних точках внутрішнього простору.

Нагрівальна частина системи побудована на основі РТС-нагрівачів напругою 12 В і потужністю 30 Вт. Обраний тип нагрівального елемента є зручним для компактних пристроїв, оскільки РТС-нагрівачі мають відносно просту конструкцію, швидко виходять на робочий режим і можуть застосовуватися разом із вентиляторами для формування потоку теплого повітря. Використання трьох нагрівальних елементів дозволяє отримати достатній тепловий ресурс для прогріву камери та рівномірнішого сушіння філаменту. Водночас така частина системи потребує уважного керування, оскільки нагрівачі споживають значно більший струм, ніж може забезпечити вихід мікроконтролера.

Для керування силовим навантаженням передбачено використання транзистора або MOSFET-модуля. Такий компонент виконує роль електронного ключа між мікроконтролером і нагрівальними елементами або вентиляторами. ESP32 у цьому випадку не живить навантаження напругою, а лише формує керуючий сигнал. Силова частина вже окремо вмикає або вимикає нагрівачі відповідно до логіки програми. Це рішення є необхідним для безпечної роботи системи, оскільки GPIO-виводи ESP32 розраховані на невеликі струми та не можуть безпосередньо керувати потужними виконавчими елементами.

Для живлення окремих модулів використано DC-DC перетворювач LM2596. Його роль полягає у стабілізації напруги та забезпеченні потрібного рівня живлення для електронної частини системи. Оскільки нагрівачі працюють

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 23
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

від 12 В, а мікроконтролер ESP32 та допоміжні модулі потребують нижчої стабілізованої напруги, застосування понижувального перетворювача дозволяє організувати більш зручну систему живлення від одного основного джерела. Це спрощує конструкцію, зменшує кількість окремих блоків живлення та підвищує зручність експлуатації. Основні апаратні компоненти кіберфізичної системи та їх призначення подано на рисунку 2.1

Таблиця 2.1 – Основні апаратні компоненти кіберфізичної системи та їх призначення

Компонент	Призначення в системі
ESP32	Центральний мікроконтролер для збору даних, керування виконавчими елементами та організації віддаленого моніторингу
DHT22 / AM2302	Вимірювання температури та відносної вологості повітря в камері сушіння
PTC-нагрівачі 12 В 30 Вт	Нагрівання повітря всередині камери для сушіння філаменту
Транзистор або MOSFET-модуль	Керування силовим навантаженням за сигналом від ESP32
DC-DC перетворювач LM2596	Стабілізація та пониження напруги живлення для електронних модулів
Кулери	Забезпечення циркуляції теплого повітря всередині камери
Радіатори	Розсіювання тепла та покращення теплового режиму нагрівальної частини
Дисплей	Локальне відображення температури, вологості та стану системи
Макетна плата та провідники	Монтаж і з'єднання апаратних компонентів на етапі прототипування

Для покращення теплового режиму пристрою передбачено використання радіаторів і кулерів. Радіатори допомагають розсіювати тепло від нагрівальних елементів, а кулери забезпечують циркуляцію повітря всередині камери. У системі сушіння філаменту це має велике значення, оскільки простий локальний нагрів не завжди забезпечує рівномірне прогрівання котушки. Завдяки примусовій циркуляції тепле повітря краще розподіляється по внутрішньому об'єму, а волога ефективніше відводиться від поверхні матеріалу. Це дозволяє уникнути ситуації, коли частина філаменту прогрівається інтенсивніше, а інша залишається в менш сприятливих умовах.

Дисплей використовується як засіб локального контролю стану системи. На нього може виводитися температура, вологість, режим роботи, стан нагрівачів і вентиляторів. Такий елемент є важливим навіть за наявності віддаленого моніторингу, оскільки дозволяє швидко перевірити стан пристрою без підключення до вебінтерфейсу. Це особливо зручно під час налаштування, тестування та першого запуску системи.

Для монтажу компонентів застосовується макетна плата, провідники та допоміжні з'єднувальні елементи. Такий варіант є зручним на етапі створення прототипу, оскільки дозволяє перевірити працездатність окремих вузлів, змінити схему підключення та внести коригування без виготовлення друкованої плати. Після перевірки логіки роботи пристрою така схема може бути перенесена на більш надійну монтажну основу або окрему друковану плату.

Наведені компоненти утворюють збалансовану апаратну основу для побудови кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту. ESP32 забезпечує керування й мережеву взаємодію, DHT22 формує інформацію про стан середовища, нагрівачі та вентилятори впливають на фізичний процес сушіння, а LM2596 стабілізує живлення електронної частини. Така конфігурація дозволяє створити працездатний прототип, у якому поєднано вимірювання, керування, локальне відображення та можливість віддаленого моніторингу.

2.3 Розроблення структурної та функціональної схеми системи

Розроблення структурної та функціональної схеми кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту виконано для того, щоб чітко показати склад основних вузлів пристрою та логіку їх взаємодії під час роботи. На відміну від загального опису архітектури, структурна схема дає можливість розділити систему на окремі апаратні та програмні блоки, а функціональна схема пояснює, як ці блоки працюють у спільному циклі вимірювання, обробки, керування й передавання даних. Для розроблюваного пристрою такий поділ є важливим, оскільки система поєднує фізичний процес нагрівання повітря в камері з електронним контролем температури, вологості та стану виконавчих елементів.

Структурно система складається з камери сушіння і зберігання філаменту, блока вимірювання параметрів середовища, керуючого блока на основі ESP32, силового блока керування нагрівачами й вентиляторами, блока живлення, локального блока індикації та блока віддаленого моніторингу. Кожен із цих елементів виконує власну функцію, але повноцінна робота пристрою забезпечується лише за умови їх узгодженої взаємодії. Центральним елементом структури виступає мікроконтролер ESP32, оскільки саме він приймає показники датчика, аналізує їх, формує керуючі сигнали та забезпечує передавання інформації через бездротове з'єднання.

Камера сушіння є фізичною частиною системи, у якій розміщується котушка з філаментом. Її призначення полягає у створенні замкнутого або частково ізольованого простору, де можна підтримувати температуру й вологість у заданих межах. У цій камері встановлюється датчик DHT22 / AM2302, який одночасно вимірює температуру та відносну вологість повітря. Розміщення датчика всередині камери дозволяє отримувати інформацію саме про той мікроклімат, у якому перебуває філамент, а не про загальні умови в приміщенні. Це підвищує практичну цінність вимірювань і робить керування більш прив'язаним до реального стану матеріалу.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 26
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Блок вимірювання параметрів середовища передає дані до ESP32 у цифровому вигляді. Мікроконтролер отримує значення температури та вологості, перевіряє їх коректність і порівнює з установленими порогами. Якщо температура нижча за необхідне значення або вологість перевищує допустимий рівень, система переходить до активного режиму сушіння. У цьому режимі ESP32 подає керуючий сигнал на силовий ключ, який вмикає РТС-нагрівачі та вентилятори. Якщо параметри середовища досягають потрібного рівня, нагрівання може зменшуватися або вимикатися, а система переходить у режим підтримання умов зберігання.

Силовий блок системи включає транзистор або MOSFET-модуль, через який здійснюється керування нагрівальними елементами та вентиляторами. Така організація потрібна через те, що мікроконтролер не може напряму комутувати навантаження, яке споживає значний струм. GPIO-виводи ESP32 лише формують логічний сигнал, а силова частина вже забезпечує подавання живлення на нагрівачі та кулери. Завдяки цьому апаратна частина залишається безпечнішою, а навантаження на мікроконтролер не перевищує допустимих меж.

Блок живлення побудовано з урахуванням різних вимог компонентів до напруги. Нагрівальні елементи та вентилятори працюють від лінії 12 В, тоді як ESP32, датчик і дисплей потребують нижчої стабілізованої напруги. Для цього використовується DC-DC перетворювач LM2596, який понижує та стабілізує напругу для електронної частини системи. Такий підхід дозволяє жити пристрій від одного джерела та водночас забезпечувати стабільну роботу як силових, так і керуючих модулів.

Локальний блок індикації призначений для виведення основної інформації безпосередньо на корпусі пристрою. На дисплей можуть виводитися поточна температура, відносна вологість, стан нагрівачів, стан вентиляторів і поточний режим роботи. Наявність такого блока зручна під час налаштування та тестування системи, оскільки дозволяє швидко перевірити стан пристрою без

відкриття вебінтерфейсу. Водночас дисплей не замінює віддалений моніторинг, а доповнює його як локальний засіб контролю.

Блок віддаленого моніторингу реалізується завдяки використанню вбудованого Wi-Fi-модуля ESP32. Після підключення до мережі система може передавати дані про температуру, вологість і стан виконавчих елементів до вебінтерфейсу або іншої програмної панелі. Це дозволяє контролювати пристрій на відстані та отримувати актуальну інформацію про стан камери зберігання філаменту. У подальшій реалізації цей блок може бути розширений засобами журналювання, побудови графіків і сповіщення про перевищення порогових значень. На рисунку 2.2 подано структурну схему кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту.



Рисунок 2.2 – Структурна схема кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту

У схемі центральним блоком визначено ESP32, до якого підключено датчик температури й вологості, дисплей, силовий ключ керування навантаженням і модуль бездротового передавання даних. Окремо показано камеру з філаментом, нагрівальні елементи, вентилятори, блок живлення та DC-DC перетворювач. Така схема наочно демонструє, що система складається не з

одного пристрою, а з кількох взаємопов'язаних вузлів, які разом забезпечують автоматизоване сушіння, зберігання та моніторинг.

Функціональна схема системи описує не стільки склад компонентів, скільки послідовність дій під час роботи пристрою. Після подавання живлення система переходить до етапу ініціалізації, під час якого запускається ESP32, перевіряється доступність датчика, дисплея та мережевого підключення. Після цього пристрій переходить у робочий цикл, у якому періодично виконується зчитування температури та вологості з датчика DHT22 / AM2302. Отримані значення проходять первинну перевірку, оскільки випадкові помилки зчитування або некоректні значення не повинні безпосередньо впливати на роботу нагрівачів.

Після перевірки дані порівнюються з установленими пороговими значеннями. Якщо температура в камері нижча за задану або вологість перевищує допустимий рівень, система активує нагрівальні елементи та вентилятори. Нагрівачі підвищують температуру всередині камери, а кулери забезпечують рух повітря для рівномірного розподілу тепла. Якщо температура наближається до верхньої межі, система вимикає або обмежує нагрівання, щоб не допустити перегріву філаменту. За нормальних умов пристрій переходить у режим підтримання, у якому параметри лише контролюються, а виконавчі елементи вмикаються за потреби.

Паралельно з керуванням фізичними процесами система оновлює інформацію на дисплеї та передає дані до віддаленого інтерфейсу. Це означає, що кожен цикл роботи містить не лише вимірювання і керування, а й інформування користувача про поточний стан пристрою. Така логіка відповідає принципам кіберфізичних систем, оскільки фізичний об'єкт не просто працює автономно, а постійно пов'язаний із цифровою частиною, яка відображає його стан і забезпечує контроль у реальному часі.

Розроблена структурна та функціональна схеми створюють основу для подальшої реалізації пристрою. Структурна схема дозволяє чітко визначити

склад апаратних блоків і характер їх підключення, а функціональна схема пояснює логіку роботи системи в часі. Разом вони показують, що система сушіння та зберігання філаменту побудована як замкнений керований комплекс, у якому вимірювання параметрів середовища безпосередньо впливає на роботу виконавчих елементів, а результати роботи відображаються локально та передаються для віддаленого моніторингу.

2.4 Організація збору, обробки та аналізу даних про температуру і вологість

Організація збору, обробки та аналізу даних про температуру і вологість є однією з основних частин проектування кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту. Саме ці параметри визначають, у якому стані перебуває середовище всередині камери, наскільки ефективно відбувається процес сушіння та чи зберігаються умови, придатні для тривалого утримання полімерної нитки в стабільному стані. Для розробленої системи температура і відносна вологість не розглядаються як допоміжні показники, оскільки вони безпосередньо впливають на рішення щодо ввімкнення нагрівачів, роботи вентиляції та переходу між режимами функціонування.

Збір даних у системі організовано за допомогою датчика DHT22 / AM2302, який одночасно вимірює температуру та відносну вологість повітря в камері сушіння. Такий вибір спрощує апаратну частину, оскільки один сенсор забезпечує отримання двох основних параметрів, потрібних для контролю стану філаменту. Датчик розміщено всередині камери таким чином, щоб він фіксував параметри саме в зоні перебування котушки, а не біля зовнішніх стінок або безпосередньо поряд із нагрівальним елементом. Це має важливе значення, оскільки занадто близьке розташування сенсора до нагрівача може призвести до завищення температурних показників, а розміщення біля вентиляційного отвору може спотворити фактичну картину вологості в основному об'ємі камери.

Передавання даних від датчика до мікроконтролера ESP32 відбувається в цифровому вигляді. Після запуску системи мікроконтролер ініціалізує сенсор, перевіряє його доступність і переходить до циклічного зчитування показників. У робочому режимі температура та вологість зчитуються через заданий інтервал часу. Такий інтервал не повинен бути надто малим, оскільки мікроклімат усередині камери змінюється не миттєво, а поступово. Надмірно часте опитування сенсора не дає суттєвої переваги, але може створювати зайве навантаження на програмну частину. Через це для системи сушіння доцільним є періодичне зчитування, за якого мікроконтролер отримує достатньо актуальні дані й водночас не перевантажує цикл керування.

Після отримання значень із датчика виконується первинна перевірка коректності даних. Це потрібно для того, щоб випадкові помилки зчитування не спричиняли неправильну реакцію виконавчих елементів. У практичній роботі цифрові датчики можуть інколи повертати некоректне значення або не відповідати на запит через короткочасний збій живлення, електричну заваду чи нестабільне з'єднання. Тому в алгоритмі передбачено перевірку на наявність реальних числових значень, допустимий діапазон показників і логічну узгодженість результатів. Якщо значення не проходить перевірку, система не повинна одразу змінювати режим роботи нагрівачів. У такій ситуації попередній коректний результат може тимчасово залишатися актуальним, а помилка зчитування фіксується для подальшого відображення або аналізу.

Для підвищення стабільності роботи системи отримані показники можуть проходити просту програмну фільтрацію. У найпростішому варіанті застосовується усереднення кількох останніх значень температури та вологості. Це дозволяє зменшити вплив короткочасних коливань, які не відображають реальної зміни мікроклімату в камері. Наприклад, під час увімкнення вентилятора повітряний потік може на короткий час змінити локальні показники біля датчика, але це ще не означає, що середовище в усьому об'ємі камери

суттєво змінилося. Усереднення допомагає уникнути зайвого вмикання або вимикання нагрівачів і робить керування плавнішим.

Обробка даних у системі базується на порівнянні поточних показників із заданими пороговими значеннями. Температурний поріг визначає, чи потрібно активувати нагрівальні елементи, а показник вологості показує, наскільки ефективно зменшується вміст вологи в середовищі. Якщо температура нижча за встановлену межу, а вологість залишається підвищеною, система переходить до активного режиму сушіння. У цьому режимі ESP32 подає керуючий сигнал на силовий ключ, через який вмикаються РТС-нагрівачі та вентилятори. Нагрівачі підвищують температуру повітря, а вентилятори забезпечують його циркуляцію всередині камери, що сприяє рівномірному прогріванню котушки та відведенню вологи від поверхні матеріалу.

Важливим елементом алгоритму є застосування гістерезису під час керування нагрівом. Якщо нагрівачі вмикати й вимикати строго в момент досягнення одного порогового значення, система може почати працювати нестабільно, часто перемикаючи виконавчі елементи через незначні коливання температури. Для уникнення такої ситуації передбачено невеликий діапазон між температурою ввімкнення та вимкнення нагріву. Наприклад, якщо система має підтримувати температуру в заданому робочому діапазоні, нагрів вмикається після зниження нижче нижньої межі, а вимикається тільки після досягнення верхньої межі.

Аналіз вологості виконується не лише за поточним значенням, а й за характером її зміни в часі. Для процесу сушіння важливо оцінити, чи зменшується вологість після запуску нагрівачів і вентиляції. Якщо температура підвищується, але вологість тривалий час не знижується, це може свідчити про недостатню циркуляцію повітря, надмірну кількість вологи в матеріалі або недостатню герметичність камери. У такій ситуації система може продовжувати сушіння, а у віддаленому інтерфейсі доцільно відобразити попередження про тривалий режим роботи без помітного покращення параметрів. Такий підхід

робить систему не лише виконавчим пристроєм, а й засобом контролю ефективності самого процесу сушіння.

У логіці роботи системи передбачено кілька основних режимів. Першим є режим очікування, у якому система зчитує параметри середовища, але не активує нагрів, якщо показники перебувають у допустимих межах. Другим є режим активного сушіння, коли нагрівачі та вентилятори працюють для зменшення вологості й досягнення потрібної температури всередині камери. Третім є режим підтримання умов зберігання, за якого система періодично контролює параметри й короткочасно активує виконавчі елементи лише тоді, коли температура або вологість виходять за допустимий діапазон. Окремо може бути передбачено аварійний режим, який спрацьовує за перегріву, відсутності сигналу від датчика або некоректної роботи силової частини.

Локальна індикація забезпечує швидко перевірку стану пристрою без використання додаткових засобів. На дисплеї можуть послідовно або одночасно відображатися температура, вологість, режим сушіння чи зберігання, а також стан виконавчих елементів.

Віддалений моніторинг розширює можливості аналізу, оскільки дозволяє спостерігати за зміною параметрів у часі. Дані, що передаються через Wi-Fi, можуть відображатися у вебінтерфейсі у вигляді поточних значень, статусних індикаторів або графіків. Для системи сушіння філаменту це має практичне значення, оскільки користувач може оцінити, як швидко піднімається температура, наскільки поступово зменшується вологість і чи не виникають різкі коливання під час роботи вентиляції. За рахунок цього процес сушіння стає більш прозорим і контрольованим.

Особливе значення має накопичення історії параметрів. Якщо система зберігає хоча б базові записи про температуру й вологість упродовж роботи, з'являється можливість порівнювати різні режими сушіння, оцінювати тривалість досягнення потрібних умов і виявляти слабкі місця в конструкції камери. Наприклад, якщо після вимкнення нагріву вологість швидко зростає, це

може вказувати на недостатню герметичність або на те, що філамент ще не досяг потрібного стану. Якщо температура підвищується занадто повільно, це може свідчити про недостатню потужність нагрівачів, втрати тепла або слабку циркуляцію повітря. У таких випадках аналіз даних допомагає зробити висновки не лише про програмну логіку, а й про якість апаратної реалізації.

На рисунку 2.3 зображено алгоритм збору, обробки та аналізу параметрів середовища в камері зберігання філаменту.

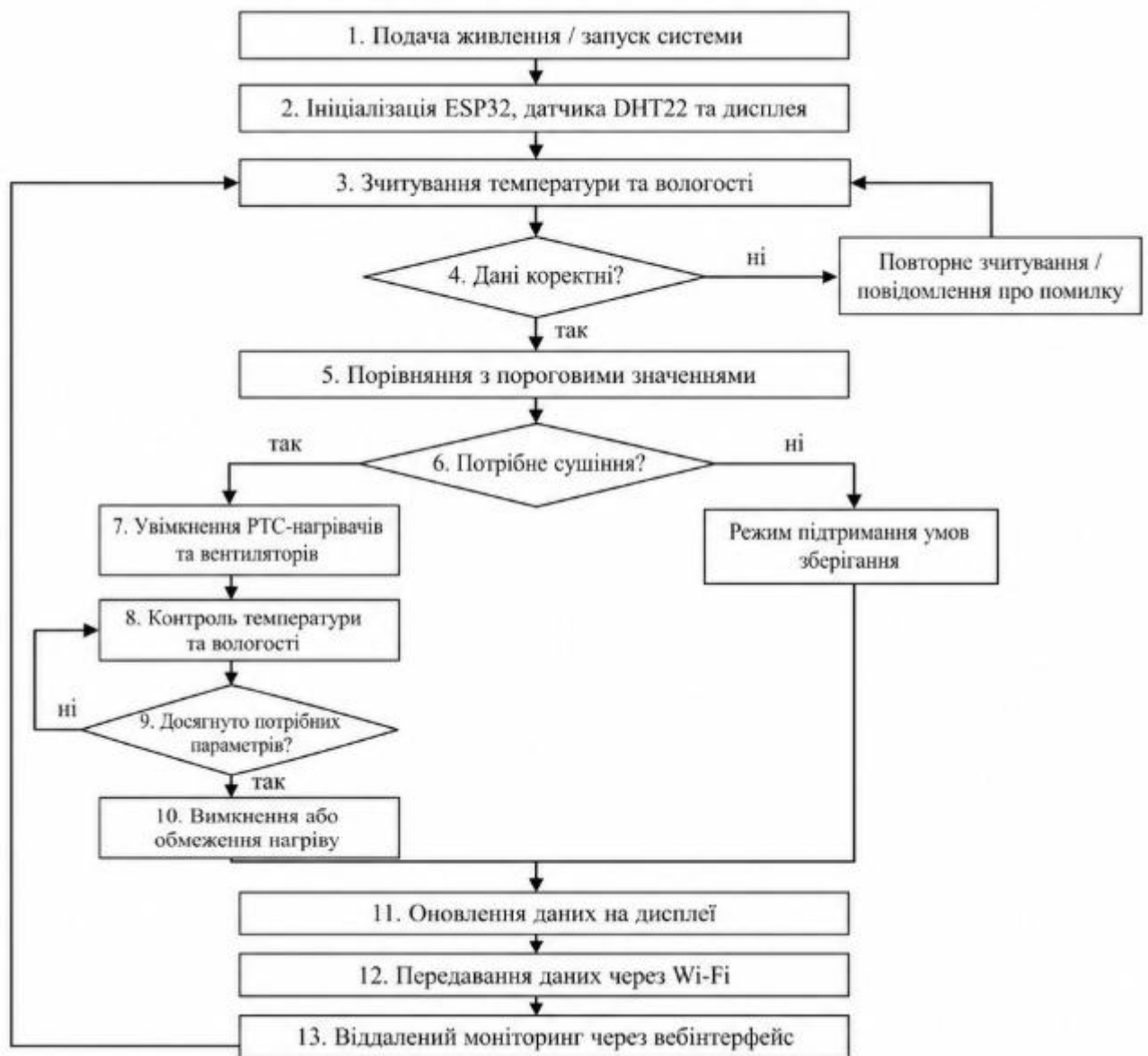


Рисунок 2.3 – Алгоритм збору, обробки та аналізу параметрів середовища в камері зберігання філаменту

У схемі показано послідовність основних дій: запуск системи, ініціалізацію ESP32 і датчика DHT22 / AM2302, зчитування температури та вологості, перевірку коректності даних, фільтрацію показників, порівняння з пороговими значеннями, вибір режиму роботи, керування нагрівачами й вентиляторами, оновлення локального дисплея та передавання інформації до віддаленого інтерфейсу. Така схема дозволяє наочно показати, що керування сушінням не виконується випадково або вручну, а базується на послідовній обробці вимірних параметрів.

На рисунку 2.4 показано схему передавання даних у системі віддаленого моніторингу сушіння та зберігання філаменту. У схемі відображено послідовність руху інформації від датчика температури та вологості до мікроконтролера ESP32, далі до локального дисплея та через Wi-Fi до вебінтерфейсу. Окремо показано, що ESP32 не лише передає дані, а й одночасно формує керуючі сигнали для нагрівачів і вентиляторів. Це підкреслює кіберфізичний характер системи, у якій інформаційний потік безпосередньо пов'язаний із фізичним впливом на середовище в камері.



Рисунок 2.4 – Схема передавання даних у системі віддаленого моніторингу сушіння та зберігання філаменту

У результаті організація збору, обробки та аналізу даних про температуру і вологість забезпечує замкнений цикл роботи кіберфізичної системи. Датчик формує інформацію про стан середовища, ESP32 аналізує ці показники, виконавчі елементи змінюють фізичні умови в камері, а дисплей і віддалений інтерфейс відображають поточний результат. Це дозволяє підтримувати контрольований режим сушіння та зберігання філаменту, зменшити вплив зовнішніх факторів і створити основу для подальшого тестування системи в реальних умовах експлуатації.

2.5 Організація передавання даних і віддаленого моніторингу системи

Організація передавання даних і віддаленого моніторингу є важливою частиною проєктування кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту, оскільки саме цей рівень перетворює звичайний пристрій для підтримання температури й вологості на повноцінну систему контролю. У розроблюваному пристрої передавання даних пов'язане не лише з виведенням поточних показників на локальний дисплей, а й з можливістю перегляду параметрів на відстані. Це дозволяє контролювати стан камери сушіння без постійної фізичної присутності біля пристрою та своєчасно оцінювати, чи відповідають умови зберігання філаменту встановленим межам.

Основою для організації віддаленого моніторингу обрано мікроконтролер ESP32, оскільки він має вбудований модуль Wi-Fi і може працювати як вузол бездротової мережі. Завдяки цьому система не потребує окремого мережевого модуля, що спрощує апаратну частину та зменшує кількість з'єднань між компонентами. ESP32 у цій системі виконує одразу кілька завдань: отримує дані від датчика температури та вологості, обробляє їх, керує нагрівальними й вентиляційними елементами, оновлює інформацію на дисплеї та передає актуальний стан системи через бездротовий канал.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 36
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Передавання даних у системі організовано так, щоб інформація про стан камери формувалася в єдиний набір параметрів. До такого набору входять поточна температура, відносна вологість, стан нагрівачів, стан вентиляторів, режим роботи системи та ознака можливих помилок. Наприклад, якщо датчик не відповідає або повертає некоректні значення, система має не лише припинити неправильне керування виконавчими елементами, а й передати інформацію про помилку до інтерфейсу моніторингу. Це дозволяє розглядати передавання даних не як просте дублювання числових показників, а як повноцінне інформування про стан усієї системи.

У найпростішій реалізації віддалений моніторинг може бути побудований на основі локального вебсервера, який запускається безпосередньо на ESP32. У такому випадку мікроконтролер підключається до Wi-Fi-мережі, отримує локальну IP-адресу та надає доступ до вебсторінки з основними параметрами пристрою. Користувач відкриває цю сторінку з комп'ютера, смартфона або планшета, підключеного до тієї ж мережі, і бачить поточні значення температури, вологості та режим роботи. Такий підхід є зручним для прототипу, оскільки не потребує складної серверної інфраструктури, окремої бази даних або хмарних сервісів.

Для забезпечення актуальності даних вебінтерфейс може оновлювати інформацію через певні проміжки часу. Наприклад, сторінка може періодично надсилати запит до ESP32 і отримувати оновлені значення у вигляді простого тексту або структурованого набору даних. У більш зручному варіанті дані можуть передаватися у форматі JSON, оскільки такий формат легко обробляється у вебінтерфейсі та добре підходить для подання кількох параметрів одночасно. Це дозволяє розділити логіку вимірювання та логіку відображення: ESP32 формує актуальний стан системи, а вебсторінка відображає його у зрозумілій формі.

Під час організації передавання даних важливо врахувати, що температура та вологість усередині камери змінюються поступово. Через це немає потреби

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 37
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

передавати показники занадто часто. Надмірно малий інтервал оновлення може створювати зайве навантаження на мікроконтролер і мережу, але не дає помітної практичної переваги. Для системи сушіння філаменту достатнім є періодичне оновлення з інтервалом у кілька секунд. Така частота дозволяє своєчасно бачити зміну параметрів і водночас не перевантажує ESP32 виконанням мережевих операцій.

Окрему увагу приділено надійності передавання даних. Оскільки система використовує бездротовий зв'язок, можливі короточасні втрати підключення або затримки в оновленні інформації. У такій ситуації система не повинна припиняти базову роботу, адже основний цикл сушіння та зберігання має виконуватися автономно. Навіть якщо вебінтерфейс тимчасово недоступний, ESP32 продовжує зчитувати параметри з датчика, керувати нагрівачами й вентиляторами та підтримувати задані умови всередині камери.

Для зручності контролю в інтерфейсі доцільно відображати не лише числові значення, а й загальний стан системи. Наприклад, температура може супроводжуватися статусом «норма», «нагрівання» або «перегрів», а вологість - статусом «допустима» або «підвищена». Така подача інформації робить моніторинг зрозумілішим, оскільки користувач не просто бачить числа, а одразу отримує уявлення про те, чи потребує система уваги. Для режимів роботи можуть використовуватися окремі текстові позначення: очікування, активне сушіння, підтримання умов зберігання або аварійний режим.

У межах системи також передбачено зв'язок між локальним і віддаленим відображенням даних. Локальний дисплей показує основні параметри безпосередньо на пристрої, а вебінтерфейс дублює ці дані в більш зручному для віддаленого перегляду вигляді. Такий підхід підвищує надійність експлуатації, оскільки інформація доступна двома способами. Якщо немає змоги відкрити вебсторінку, стан системи можна перевірити на дисплеї. Якщо пристрій розташований у закритій камері, шафі або в іншому незручному для постійного доступу місці, основні параметри можна переглянути через мережу.

Захист і стабільність доступу до даних також мають значення, навіть якщо система працює в межах локальної мережі. На етапі прототипу достатньо обмежити доступ до вебінтерфейсу локальною Wi-Fi-мережею, однак у подальшому може бути додано просту авторизацію або пароль для керування налаштуваннями. Це важливо тому, що система працює з нагрівальними елементами, а отже некоректне втручання в режими роботи може призвести до небажаного перегріву або неправильного сушіння матеріалу. Через це віддалений інтерфейс доцільно розділити на інформаційну частину, де лише відображаються дані, і керуючу частину, де змінюються параметри роботи системи.

У процесі передавання даних між апаратною частиною і вебінтерфейсом важливо зберігати зрозумілу структуру інформації. Наприклад, один цикл оновлення може містити значення температури, вологості, стан нагрівача, стан вентилятора і поточний режим. Якщо дані подаються структуровано, надалі простіше додати графіки, кольорові індикатори, повідомлення про помилки або автоматичні сповіщення. Це дозволяє поступово розширювати систему без повної зміни її архітектури.

У результаті організація передавання даних і віддаленого моніторингу забезпечує зручний контроль стану системи сушіння та зберігання філаменту. ESP32 формує центральну ланку між датчиками, виконавчими елементами, локальним дисплеєм і вебінтерфейсом. Завдяки використанню Wi-Fi система отримує можливість передавати актуальні параметри без додаткових мережевих модулів, а користувач може оцінювати стан пристрою на відстані. Це дозволяє підвищити інформативність роботи системи, спростити її експлуатацію та створити основу для подальшого розширення функцій, зокрема журналювання, побудови графіків і сповіщення про відхилення параметрів.

3 ПРОГРАМНО-АПАРАТНА РЕАЛІЗАЦІЯ КІБЕРФІЗИЧНОЇ СИСТЕМИ СУШІННЯ ТА ЗБЕРІГАННЯ ФІЛАМЕНТУ

3.1 Налаштування взаємодії електронних модулів і виконавчих елементів

Практичне втілення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту розпочато з налаштування взаємодії між електронними модулями, силовими елементами та допоміжними вузлами пристрою. На цьому етапі основну увагу приділено не лише фізичному підключенню компонентів, а й узгодженню їх роботи в єдиній системі, де мікроконтролер отримує дані від датчика, аналізує стан середовища та керує нагрівальними і вентиляційними елементами. Такий підхід дозволяє перейти від окремо зібраних деталей до повноцінного програмно-апаратного комплексу, здатного впливати на фізичні умови всередині камери сушіння.

Центральним елементом системи використано плату ESP32, яка виконує роль керуючого блока. До неї підключено датчик температури та вологості DHT22 / AM2302, дисплей для локального відображення параметрів, а також силовий ключ для керування нагрівачами й вентиляторами. Вибір ESP32 є зручним для такого пристрою, оскільки ця плата має достатню кількість виводів для підключення периферійних модулів і водночас підтримує бездротовий зв'язок через Wi-Fi. Це дозволяє не ускладнювати схему окремим мережевим модулем і вже на рівні апаратної частини закладає можливість віддаленого моніторингу.

На початковому етапі монтаж виконано на макетній платі, що дало можливість перевірити правильність підключення компонентів без виготовлення окремої друкованої плати. Такий варіант є доречним для експериментального зразка, оскільки під час налагодження виникає потреба змінювати окремі з'єднання, перевіряти різні варіанти підключення датчика, дисплея та силових елементів, а також поступово додавати нові вузли. Макетна плата забезпечила достатню гнучкість під час складання, хоча в подальшому для підвищення

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 40
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

надійності пристрою таку схему доцільно перенести на більш стійку монтажну основу.

Датчик DHT22 / AM2302 підключено до ESP32 як основне джерело даних про мікроклімат усередині камери. Цей сенсор дає змогу отримувати два показники одночасно: температуру та відносну вологість повітря. Для системи сушіння філаменту це має принципове значення, оскільки температура показує рівень нагрівання камери, а вологість дозволяє оцінити ефективність видалення вологи з середовища навколо котушки. Під час налагодження важливо передбачено правильне розміщення датчика, щоб він не перебував безпосередньо біля нагрівача. У разі надто близького розташування до джерела тепла показники температури можуть бути завищеними, а це спотворює роботу алгоритму керування.

Для нагрівання повітря в камері використано РТС-нагрівачі на 12 В потужністю 30 Вт. У системі передбачено використання кількох таких елементів, що дозволяє отримати достатній тепловий ресурс для прогрівання внутрішнього простору. РТС-нагрівачі є зручними для подібної задачі, оскільки мають компактні розміри, швидко нагріваються та добре поєднуються з вентиляторами. Однак ці елементи не можуть підключатися напряму до ESP32, оскільки мікроконтролер працює зі слабкострумовими сигналами, а нагрівачі потребують окремого силового живлення. Через це між ESP32 і нагрівальною частиною системи використано транзисторний ключ або MOSFET-модуль.

Силовий ключ виконує роль проміжної ланки між логічною частиною та виконавчими елементами. ESP32 подає на нього керуючий сигнал, після чого силова частина відкриває або закриває ланцюг живлення нагрівачів. Така побудова дозволяє безпечно керувати навантаженням, не перевантажуючи виводи мікроконтролера. За таким самим принципом може організовуватися керування вентиляторами, які відповідають за циркуляцію повітря всередині камери. У результаті мікроконтролер не виконує силову роботу напряму, а лише

формує сигнали керування, що є правильним підходом для подібних кіберфізичних пристроїв.

Окрему увагу приділено організації живлення. Оскільки нагрівачі та вентилятори працюють від напруги 12 В, а ESP32, датчик і дисплей потребують нижчої стабілізованої напруги, у схемі використано DC-DC перетворювач LM2596. Він забезпечує пониження напруги до рівня, придатного для живлення електронних модулів. Така організація дозволяє використовувати одне основне джерело живлення для всієї системи, але розділити силову та керуючу частини за рівнями напруги. Це підвищує стабільність роботи пристрою та зменшує ризик збоїв ESP32 під час увімкнення нагрівачів, коли струмове навантаження на систему різко зростає.

Для коректної роботи всіх модулів також забезпечено спільну точку заземлення між джерелом живлення, ESP32, DC-DC перетворювачем і силовим ключем. Це необхідно для того, щоб керуючі сигнали від мікроконтролера правильно сприймалися силовою частиною. Без спільної землі MOSFET або транзистор може працювати нестабільно, що призводить до неправильного вмикання або вимикання виконавчих елементів. Через це під час монтажу особливу увагу приділено не лише підключенню сигнальних ліній, а й правильній організації ланцюгів живлення.

Вентилятори в системі виконують функцію переміщення повітря всередині камери. Їх використання є важливим, оскільки простий нагрів без циркуляції може створювати нерівномірний розподіл температури. У такій ситуації частина котушки може перебувати ближче до теплого потоку, тоді як інша частина прогрівається слабше. Завдяки вентиляторам тепле повітря розподіляється більш рівномірно, а процес сушіння стає стабільнішим. Радіатори, які використовуються разом із нагрівальними елементами, допомагають ефективніше передавати тепло в повітряний потік і зменшують локальне перегрівання окремих ділянок.

Локальний дисплей підключено як допоміжний засіб контролю стану пристрою. На ньому передбачено виведення поточної температури, вологості та режиму роботи системи. Такий елемент особливо корисний на етапі налагодження, оскільки дозволяє одразу бачити, чи правильно зчитуються дані з датчика і чи змінюються параметри після запуску нагрівачів. Локальна індикація також потрібна для подальшої експлуатації, адже стан системи можна перевірити без підключення до вебінтерфейсу або іншого віддаленого засобу моніторингу.

На рисунку 3.1 зображено взаємодію основних електронних модулів і виконавчих елементів системи.

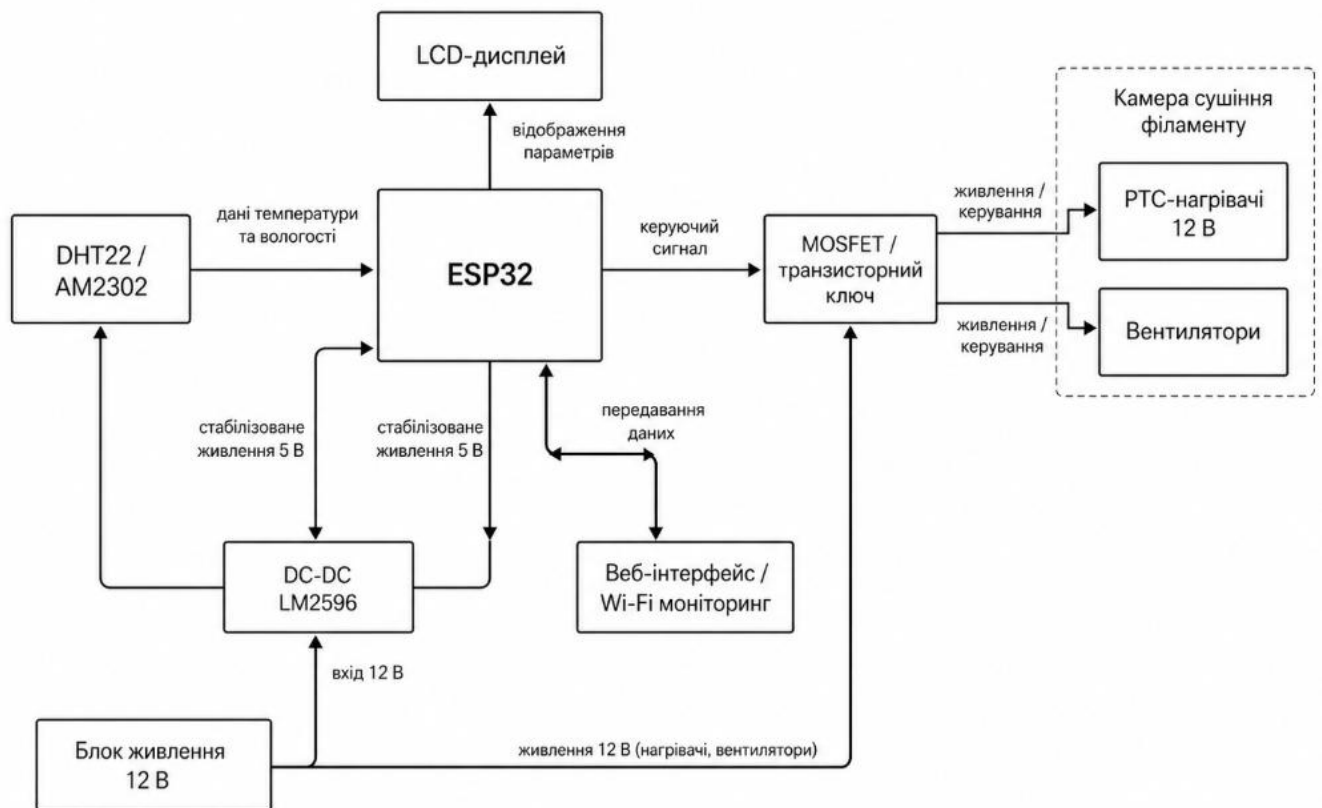


Рисунок 3.1 – Схема взаємодії електронних модулів і виконавчих елементів системи

У процесі налаштування взаємодії модулів перевірено базову послідовність роботи пристрою. Спочатку після подавання живлення запускається ESP32, далі ініціалізується датчик температури та вологості, після

чого значення параметрів передаються до програми керування. Якщо дані зчитуються коректно, вони відображаються на дисплеї та можуть використовуватися для прийняття рішення щодо вмикання нагрівачів і вентиляторів. У випадку некоректного зчитування система має не переходити до активного нагріву, щоб уникнути роботи виконавчих елементів без достовірної інформації про стан середовища.

Налаштування взаємодії електронних модулів і виконавчих елементів дозволило сформувавши основу для подальшої програмної реалізації системи. На цьому етапі визначено логіку підключення основних вузлів, розділено керуючу та силову частину, організовано стабілізоване живлення електроніки та підготовлено апаратну базу для керування температурою і вологістю. У підсумку створено технічну основу, на якій надалі реалізується програмна логіка підтримання умов сушіння та зберігання філаменту.

3.2 Реалізація програмної логіки підтримання температури та вологості

Програмну логіку кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту реалізовано як послідовний цикл зчитування, перевірки, аналізу та керування виконавчими елементами. Основне завдання цієї логіки полягає в тому, щоб система не просто відображала поточні значення температури й вологості, а самостійно приймала рішення щодо ввімкнення або вимкнення нагрівальних елементів і вентиляторів. За рахунок цього пристрій працює як замкнена керована система, у якій параметри середовища всередині камери безпосередньо впливають на режим роботи апаратної частини.

У ролі основного керуючого модуля використано ESP32. Програма для мікроконтролера організовує взаємодію з датчиком DHT22 / AM2302, обробляє отримані значення, керує силовим ключем нагрівачів і вентиляторів, оновлює локальний дисплей та готує дані для подальшого віддаленого відображення. Така структура програмної частини дозволяє об'єднати всі апаратні вузли в єдину

логічну систему, де кожен компонент виконує свою роль у загальному циклі підтримання мікроклімату.

Після подавання живлення програма виконує початкову ініціалізацію. На цьому етапі налаштовано роботу виводів ESP32, перевірено доступність датчика температури та вологості, підготовлено дисплей і встановлено початкові стани для виконавчих елементів. Нагрівачі та вентилятори на старті переводяться у вимкнений стан, щоб уникнути випадкового нагрівання камери до отримання достовірних показників. Такий підхід є важливим для безпечного запуску системи, оскільки керування нагрівом має виконуватися лише після того, як мікроконтролер отримав коректні дані про стан середовища.

Основний цикл програми побудовано навколо періодичного зчитування температури та вологості. Датчик DHT22 / AM2302 передає значення до ESP32 у цифровому вигляді, після чого програма перевіряє їх на коректність. Якщо датчик не відповідає або повертає некоректні дані, система не активує нагрівачі, а переходить у безпечний режим очікування. У такому випадку на дисплеї або у віддаленому інтерфейсі може відображатися повідомлення про помилку датчика. Це дозволяє уникнути ситуації, коли нагрівальна частина працює без реального контролю температури.

Для стабільної роботи системи передбачено порівняння вимірних значень із заданими межами. Температура використовується як основний параметр для керування нагрівачами, а вологість виступає показником стану середовища та ефективності сушіння. Якщо температура нижча за робочий рівень, а вологість залишається підвищеною, програма активує силовий ключ, через який подається живлення на РТС-нагрівачі та вентилятори. У цей момент система переходить у режим сушіння. Нагрівачі підвищують температуру повітря, а вентилятори забезпечують його рух усередині камери, завдяки чому тепло розподіляється рівномірніше.

Під час роботи нагрівальної частини програма продовжує регулярно зчитувати показники датчика. Це потрібно для того, щоб система не працювала

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 45
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

за застарілими даними, а постійно оцінювала фактичний стан камери. Якщо температура досягає верхньої допустимої межі, нагрів вимикається або обмежується, щоб не допустити перегріву філаменту. Для полімерної нитки надмірна температура є небажаною, оскільки вона може призвести до деформації матеріалу, розм'якшення катушки або погіршення його подальшої подачі в екструдер. Через це програмна логіка не орієнтується на максимальний нагрів, а підтримує контрольований температурний режим.

Щоб уникнути занадто частого перемикання нагрівачів, у програмі передбачено принцип гістерезису. Це означає, що ввімкнення та вимкнення нагріву відбувається не за одним і тим самим значенням температури, а в межах невеликого діапазону. Наприклад, якщо температура опускається нижче нижньої межі, нагрівачі вмикаються, а після досягнення верхньої межі вимикаються. Завдяки цьому система не реагує на кожне незначне коливання показників і працює більш стабільно. Такий підхід також зменшує навантаження на силовий ключ і продовжує ресурс виконавчих елементів.

Вологість у програмній логіці використовується не лише як поточне значення для відображення, а як показник ефективності процесу сушіння. Якщо після запуску нагрівачів і вентиляторів вологість поступово зменшується, це свідчить про нормальний перебіг процесу. Якщо ж температура зростає, а вологість тривалий час залишається майже незмінною, це може вказувати на недостатню циркуляцію повітря, слабку герметичність камери або високу початкову вологість матеріалу. У такому випадку система може продовжувати режим сушіння, а в інтерфейсі доцільно передбачити індикацію тривалого процесу без суттєвого покращення параметрів.

У програмі реалізовано кілька основних режимів роботи. Першим є режим очікування, у якому система лише зчитує параметри середовища та відображає їх. Другим є режим активного сушіння, коли нагрівачі та вентилятори ввімкнені для зниження вологості й досягнення потрібної температури. Третім є режим підтримання умов зберігання, у якому система не працює постійно на нагрів, а

лише періодично вмикає виконавчі елементи за потреби. Окремо передбачено аварійний або захисний стан, який активується при помилці датчика, перегріві або некоректній роботі одного з вузлів.

Важливою частиною програмної логіки є формування статусу системи. Самі числові значення температури та вологості не завжди достатньо зрозуміло пояснюють, що саме відбувається з пристроєм. Через це програма формує додаткові стани, наприклад «очікування», «сушіння», «підтримання», «помилка датчика» або «перегрів». Такі статуси можуть виводитися на дисплей і передаватися у віддалений інтерфейс. Це робить роботу системи більш зрозумілою, оскільки користувач бачить не тільки параметри, а й поточну логіку поведінки пристрою.

Оновлення локального дисплея виконано як частину основного циклу роботи. Після кожного успішного зчитування даних ESP32 передає на дисплей актуальні значення температури, вологості та режиму роботи. Це дозволяє контролювати систему без додаткових пристроїв. На етапі налагодження дисплей також допомагає перевірити правильність роботи датчика, реакцію системи на нагрів і зміну вологості всередині камери. Якщо показники змінюються відповідно до фізичного стану камери, це підтверджує коректність базової програмної логіки.

Для віддаленого моніторингу програма готує набір даних, який може передаватися через Wi-Fi. До такого набору входять температура, вологість, стан нагріву, стан вентиляції та режим роботи системи. У базовій реалізації ці дані можуть оновлюватися з певним інтервалом і відображатися у вебінтерфейсі. При цьому основна логіка керування не залежить від наявності підключення до мережі. Якщо Wi-Fi тимчасово недоступний, ESP32 продовжує виконувати вимірювання та керувати нагрівачами в автономному режимі. Це підвищує надійність системи, оскільки віддалений моніторинг виступає додатковою функцією, а не обов'язковою умовою роботи пристрою.

На рисунку 3.2 зображено логіку програмного керування режимами сушіння та зберігання філаменту.

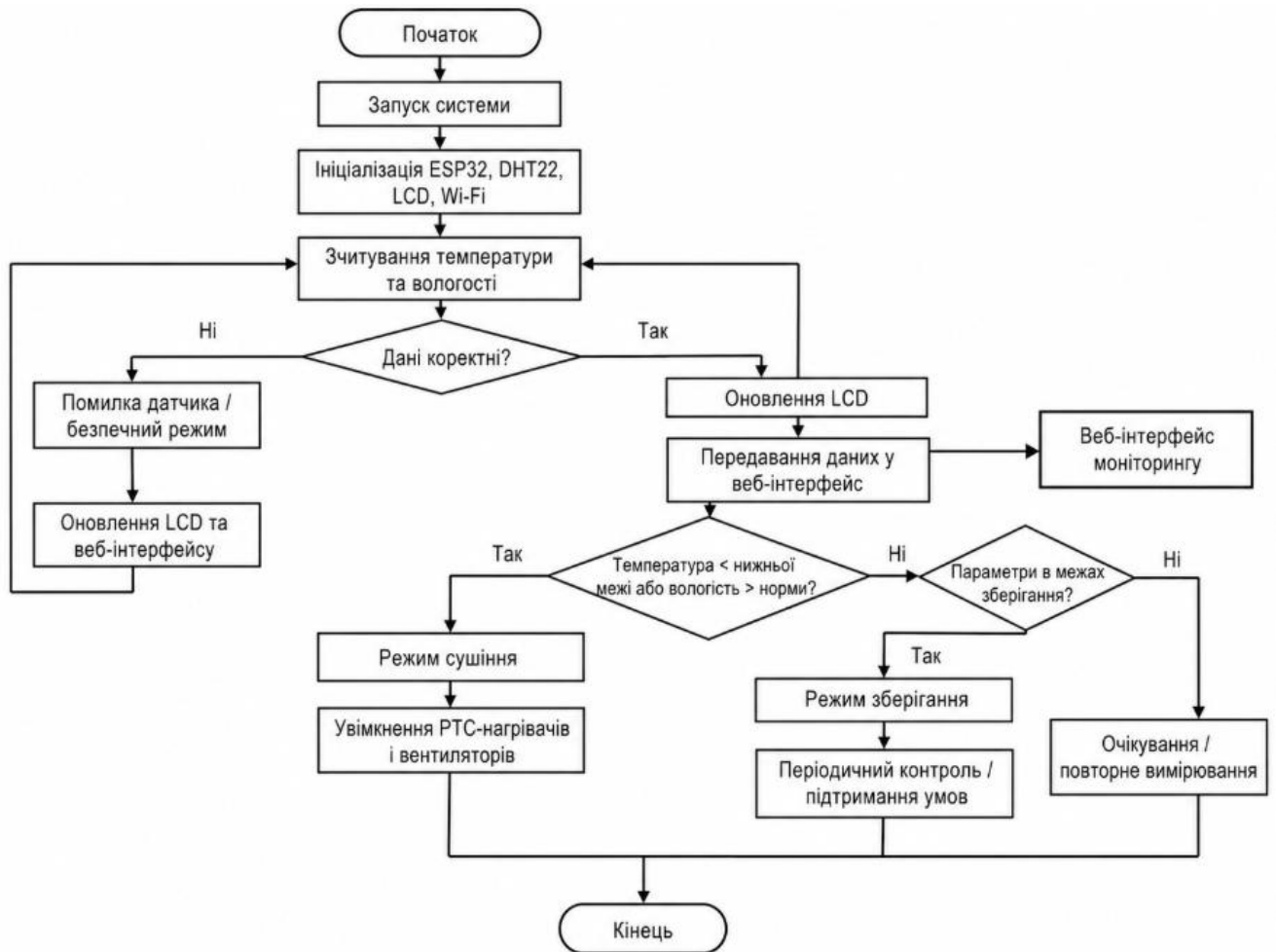


Рисунок 3.2 – Логіка програмного керування режимами сушіння та зберігання філаменту

Програмну логіку побудовано так, щоб система залишалася простою для реалізації, але водночас достатньо надійною для виконання основних функцій. Вона забезпечує регулярне зчитування параметрів середовища, захист від помилкових даних, керування виконавчими елементами, локальне відображення та підготовку даних для віддаленого контролю. У підсумку реалізована логіка створює основу для стабільної роботи пристрою в режимах сушіння та зберігання філаменту, а також дозволяє надалі розширювати систему за рахунок

журналювання даних, побудови графіків і додавання сповіщень про відхилення параметрів.

3.3 Реалізація локального та віддаленого відображення параметрів системи

Реалізація локального та віддаленого відображення параметрів системи виконана для забезпечення зручного контролю за станом камери сушіння і зберігання філаменту. Оскільки пристрій працює з фізичними параметрами середовища, користувач повинен мати можливість швидко оцінити температуру, вологість, стан нагрівачів, роботу вентиляторів і поточний режим системи. Через це в структурі програмно-апаратного засобу передбачено два рівні інформування: локальний, який реалізовано за допомогою дисплея на самому пристрої, та віддалений, який працює через Wi-Fi-з'єднання і вебінтерфейс.

Локальне відображення параметрів реалізовано для швидкого перегляду основних показників без використання додаткових пристроїв. Дисплей підключено до ESP32 як окремий інформаційний модуль, що отримує вже оброблені дані з програми керування. На екран виводяться поточна температура в камері, рівень відносної вологості, режим роботи системи та стан виконавчих елементів. Такий підхід є зручним під час першого запуску, перевірки схеми та повсякденної експлуатації, оскільки основна інформація доступна без підключення до комп'ютера або смартфона.

Під час роботи системи ESP32 циклічно зчитує дані з датчика DHT22 / AM2302, виконує їх перевірку та після цього передає актуальні значення на дисплей. Виведення показників організовано так, щоб на екрані відображалася не лише «сира» інформація з датчика, а й загальний стан пристрою. Наприклад, поряд із температурою та вологістю може зазначатися режим «сушіння», «підтримання» або «очікування». Це дозволяє швидко зрозуміти, чи система активно нагріває камеру, чи лише підтримує стабільні умови зберігання філаменту.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 49
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Особливе значення локальний дисплей має на етапі налагодження. Під час підключення датчика температури та вологості, перевірки живлення, тестування нагрівачів і вентиляторів дисплей дозволяє одразу побачити, чи правильно працює основний цикл зчитування даних. Якщо після запуску нагрівачів температура поступово підвищується, а показник вологості змінюється відповідно до фізичного процесу сушіння, це підтверджує коректність взаємодії між датчиком, мікроконтролером і програмною логікою. У випадку помилки зчитування або відсутності відповіді від датчика на дисплеї може виводитися повідомлення про некоректні дані, що спрощує пошук несправності.

Віддалене відображення параметрів реалізовано на основі можливостей ESP32 працювати з Wi-Fi-мережею. Вбудований модуль бездротового зв'язку дозволяє передавати інформацію про стан системи на вебінтерфейс без використання додаткових мережевих плат. У базовому варіанті ESP32 може працювати як локальний вебсервер, до якого здійснюється доступ із пристрою, підключеного до тієї ж мережі. Після відкриття сторінки користувач отримує інформацію про температуру, вологість, режим роботи, стан нагрівачів і вентиляторів.

Вебінтерфейс виконує роль зручної панелі моніторингу. На відміну від локального дисплея, який має обмежений розмір і показує лише основні дані, віддалений інтерфейс може відображати параметри у більш розгорнутому вигляді. У ньому доцільно передбачити окремі поля для температури, вологості, режиму роботи системи, стану виконавчих елементів і часу останнього оновлення. Це дозволяє не тільки побачити поточні значення, а й оцінити, наскільки стабільно працює пристрій у конкретний момент.

Передавання даних до вебінтерфейсу організовано у вигляді періодичного оновлення параметрів. ESP32 формує інформаційний набір, до якого входять значення температури, вологості, статус нагрівачів, статус вентиляторів і поточний режим. Такий набір може передаватися у вигляді звичайної вебсторінки або структурованих даних, які оновлюються без повного

перезавантаження інтерфейсу. У результаті користувач бачить актуальні показники, а система не створює надмірного навантаження на мікроконтролер.

Важливою особливістю реалізації є те, що віддалене відображення не впливає на автономність основного циклу керування. Навіть якщо Wi-Fi-з'єднання тимчасово недоступне або вебсторінка не відкрита, система продовжує зчитувати параметри середовища, керувати нагрівачами й вентиляторами та підтримувати задані умови всередині камери. Це означає, що віддалений моніторинг виконує інформаційну функцію і не є критичною умовою базової працездатності пристрою. Такий підхід підвищує надійність системи, оскільки фізичний процес сушіння не зупиняється через проблеми з мережею.

Для підвищення зручності сприйняття даних у вебінтерфейсі параметри системи можуть бути подані не лише у вигляді числових значень, а й у вигляді статусних блоків. Наприклад, для температури може відображатися стан «нижче заданого рівня», «норма» або «перевищення», а для вологості - «допустима» або «підвищена». Стан нагрівачів і вентиляторів доцільно подавати як «увімкнено» або «вимкнено». Завдяки цьому інтерфейс стає зрозумілішим, оскільки користувач не повинен самостійно порівнювати числові значення з допустимими межами.

Окремо передбачено відображення режиму роботи системи. Це важливо, оскільки однакові значення температури та вологості можуть відповідати різним станам пристрою. Наприклад, система може перебувати в режимі активного сушіння, коли нагрівачі й вентилятори працюють постійно або з перервами, або в режимі підтримання умов зберігання, коли виконавчі елементи вмикаються лише за потреби. Відображення режиму роботи дозволяє краще розуміти логіку поведінки пристрою та оцінювати, чи відповідає вона очікуваному сценарію.

Під час реалізації віддаленого моніторингу враховано, що камера сушіння філаменту може працювати протягом тривалого часу. Через це інтерфейс має бути простим і не перевантаженим зайвими елементами. Основний акцент зроблено на поточних параметрах, стані виконавчих елементів і зрозумілому

поданні режиму роботи. Надмірна кількість другорядних показників ускладнює сприйняття, тому в базовій версії достатньо відображати саме ті дані, які безпосередньо впливають на контроль процесу сушіння та зберігання.

У подальшому віддалене відображення може бути розширене функціями збереження історії вимірювань і побудови графіків. Для цього ESP32 може передавати дані на серверну частину або в локальне сховище, де параметри температури й вологості накопичуються за час роботи системи. Графічне подання дозволить оцінювати динаміку процесу сушіння, швидкість підвищення температури, характер зниження вологості та стабільність підтримання умов після завершення активного нагріву. Таке розширення є логічним продовженням базового моніторингу, однак для першого робочого прототипу достатньо поточного відображення параметрів.

На рисунку 3.3 подано відображення параметрів системи у локальному та віддаленому інтерфейсі.

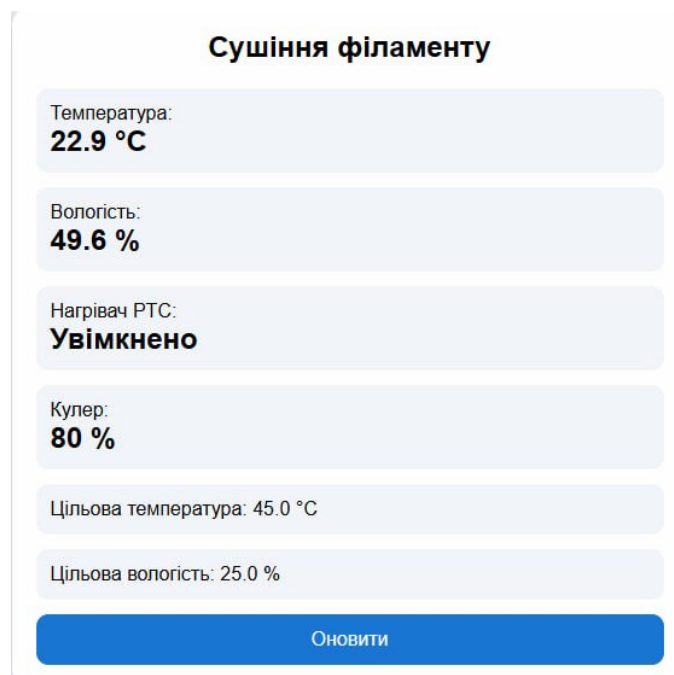


Рисунок 3.3 – Відображення параметрів системи у інтерфейсі

Реалізація локального та віддаленого відображення параметрів дозволила зробити систему більш інформативною та зручною для експлуатації. Локальний

дисплей забезпечує швидкий контроль безпосередньо біля пристрою, а вебінтерфейс відкриває можливість спостереження за параметрами на відстані. У поєднанні з програмною логікою керування це створює цілісну систему, у якій вимірювання, керування й відображення даних працюють узгоджено. У результаті пристрій не лише підтримує необхідні умови для сушіння та зберігання філаменту, а й надає зрозумілу інформацію про власний стан під час роботи.

3.4 Перевірка роботи системи в режимах сушіння та зберігання

Перевірку роботи кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту проведено для підтвердження працездатності основних апаратних і програмних вузлів пристрою. На цьому етапі особливу увагу приділено не лише факту ввімкнення окремих компонентів, а й узгодженості їх роботи в реальних умовах. Система має коректно зчитувати температуру та вологість, обробляти отримані значення, змінювати стан нагрівачів і вентиляторів, відображати параметри на локальному дисплеї та передавати актуальні дані для віддаленого перегляду.

Початкову перевірку виконано після складання електронних модулів на макетній платі та підключення основних елементів системи. Після подавання живлення ESP32 переходить у робочий режим, ініціалізує датчик DHT22 / AM2302, запускає локальне відображення даних і готує мережеве підключення. На цьому етапі перевірено, що мікроконтролер стабільно отримує показники температури й вологості, а значення змінюються відповідно до фактичного стану середовища. Це підтверджує правильність підключення датчика та коректність базової логіки зчитування.

Під час перевірки режиму сушіння основну увагу зосереджено на роботі нагрівальних елементів і вентиляторів. Коли температура в камері є нижчою за задану межу, а рівень вологості залишається підвищеним, ESP32 формує керуючий сигнал для силового ключа. Через транзистор або MOSFET-модуль вмикаються РТС-нагрівачі та вентилятори. Нагрівачі підвищують температуру

повітря всередині камери, а вентилятори забезпечують його переміщення, що сприяє рівномірнішому прогріванню внутрішнього простору. У процесі роботи перевірено, що нагрів не запускається хаотично, а залежить від фактичних значень, отриманих із датчика.

Важливим етапом перевірки стало спостереження за поведінкою системи після досягнення заданого температурного діапазону. Коли температура наближається до верхньої межі, нагрівальні елементи вимикаються або переходять у режим обмеженої роботи.

Режим зберігання перевірено після завершення активного сушіння. У цьому режимі система не повинна постійно підтримувати максимальне нагрівання, оскільки основним завданням стає збереження стабільних умов для філаменту. ESP32 продовжує зчитувати температуру та вологість, однак виконавчі елементи активуються лише тоді, коли параметри виходять за допустимі межі. Такий режим є більш економним і менш навантажує нагрівачі, вентилятори та силовий ключ.

Окремо перевірено роботу локального відображення параметрів. На дисплеї відображаються поточні значення температури, вологості та стан системи. Під час нагрівання температура на екрані поступово зростає, а після стабілізації переходить у відносно рівний режим. Показник вологості змінюється повільніше, що відповідає реальній поведінці середовища під час сушіння. Наявність локальної індикації значно спрощує контроль під час запуску пристрою, оскільки дозволяє одразу переконатися в тому, що датчик, дисплей і програма працюють узгоджено.

Віддалене відображення параметрів перевірено через Wi-Fi-з'єднання. ESP32 передає інформацію про температуру, вологість, стан нагрівачів, вентиляторів і режим роботи до вебінтерфейсу. У процесі перевірки підтверджено, що віддалений моніторинг не порушує автономну роботу пристрою. Навіть за відсутності відкритого вебінтерфейсу система продовжує зчитувати дані та керувати фізичними процесами в камері. Це важливо, оскільки

функція віддаленого перегляду виступає інформаційним доповненням, а не єдиною умовою працездатності пристрою.

На рисунку 3.4 зображено результати перевірки роботи системи в режимах сушіння та зберігання філаменту.

The screenshot shows a control interface titled "Сушіння та зберігання філаменту" (Filament Drying and Storage). It displays several parameters and controls:

- Температура: 22.3 °C
- Вологість: 50.0 %
- Поточний режим керування: Автоматичний
- Профіль матеріалу: General (Target temperature: 45.0 °C, target humidity: 25.0 %, emergency temperature: 60.0 °C)
- Нагрівач PTC: Увімкнено
- Кулер: 70 %
- Вибір профілю сушіння: General (selected), PLA, PETG, ABS, TPU
- Режим керування: Автоматичний (selected), Ручний
- Ручне керування нагрівачем: Увімкнути нагрівач, Вимкнути нагрівач (with a note: "При ручному керуванні захист від перегріву все одно залишається активним.")
- Ручне керування кулером: 0%, 50% (selected), 80%, 100%
- Оновити дані

Рисунок 3.4 – Перевірка роботи системи в режимах сушіння та зберігання філаменту

На рисунку відображено роботу основних вузлів пристрою: мікроконтролера ESP32, датчика температури та вологості, нагрівальних елементів, вентиляторів, дисплея та віддаленого інтерфейсу. Такий рисунок підтверджує, що система працює як єдиний програмно-апаратний комплекс, у якому вимірювання параметрів середовища безпосередньо впливає на стан виконавчих елементів.

Для наочного подання зміни параметрів під час перевірки сформовано таблицю з контрольними значеннями температури (Т, °С) та вологості (φ, %). Дані відображають загальну логіку роботи пристрою: на початку процесу температура є нижчою, а вологість вищою; після запуску нагрівачів температура поступово зростає, а вологість зменшується; після досягнення робочого режиму система переходить до підтримання умов зберігання. Наведені в таблиці 3.1 значення показують, що система реагує на зміну параметрів середовища відповідно до закладеної логіки.

Таблиця 3.1 – Зміна параметрів температури та вологості під час роботи системи

Етап перевірки	Показання датчика (Т, °С / φ, %)	Стан нагрівачів	Стан вентиляторів	Режим роботи
Початковий стан після запуску	24,6 / 58	вимкнено	вимкнено	очікування
Початок активного сушіння	29,8 / 52	увімкнено	увімкнено	сушіння
Проміжний етап нагрівання	38,7 / 43	увімкнено	увімкнено	сушіння
Наближення до робочого діапазону	44,5 / 36	увімкнено	увімкнено	сушіння
Досягнення заданого режиму	48,2 / 31	обмежено / вимкнено	увімкнено	стабілізація
Підтримання умов зберігання	42,1 / 34	вимкнено	періодично	зберігання

На початку роботи вологість є підвищеною, тому система переходить у режим сушіння. Після ввімкнення нагрівачів і вентиляторів температура поступово зростає, а вологість зменшується. Після наближення до заданих меж нагрів обмежується, що дозволяє уникнути перегріву камери та перейти до більш стабільного режиму підтримання.

Під час перевірки також звернено увагу на стабільність роботи силової частини. Оскільки РТС-нагрівачі споживають більший струм, ніж електронні модулі, важливо забезпечити правильну роботу DC-DC перетворювача та силового ключа. У процесі запуску нагрівачів ESP32 не повинна перезавантажуватися або втрачати зв'язок із датчиком. Стабільна робота мікроконтролера під час увімкнення навантаження підтверджує правильність розділення силової та керуючої частини.

Перевірка вентиляції показала, що наявність кулерів позитивно впливає на рівномірність прогрівання камери. Без циркуляції тепле повітря накопичується поблизу нагрівального елемента, що може створити локальний перегрів і неточне вимірювання температури. Після ввімкнення вентиляторів повітря переміщується всередині камери, а показники датчика стають більш стабільними. Це підтверджує доцільність використання активної циркуляції повітря в системі сушіння філаменту.

Окремо перевірено поведінку системи у випадку потенційної помилки зчитування даних. Якщо датчик не передає коректне значення, система не повинна безконтрольно вмикати нагрівачі. У програмній логіці передбачено захисну реакцію, за якої нагрів блокується або залишається вимкненим до отримання достовірних показників. Такий підхід підвищує безпечність роботи пристрою, оскільки нагрівальний елемент не працює без інформації про температуру в камері.

Проведена перевірка підтверджує, що розроблена система виконує основні функції, передбачені тематикою кваліфікаційної роботи. Вона зчитує температуру та вологість, керує нагрівальними й вентиляційними елементами,

відображає стан локально та передає дані для віддаленого моніторингу. Перехід між режимами сушіння, стабілізації та зберігання виконується на основі фактичних значень параметрів, що відповідає логіці кіберфізичної системи.

У підсумку перевірка роботи системи в режимах сушіння та зберігання показала працездатність обраної архітектури та правильність взаємодії апаратної і програмної частин. Пристрій здатний підтримувати контрольований мікроклімат у камері філаменту, реагувати на зміну температури й вологості та надавати користувачу інформацію про поточний стан системи. Отримані результати створюють основу для подальшої оцінки практичної придатності розробленого пристрою та визначення його обмежень.

3.5 Оцінка практичної придатності та обмежень розробленого пристрою

Оцінка практичної придатності розробленого пристрою виконана після перевірки його роботи в основних режимах сушіння та зберігання філаменту. Основна увага приділена тому, наскільки запропонована система здатна виконувати свою прикладну функцію в реальних умовах експлуатації, а саме підтримувати контрольовані параметри середовища, забезпечувати автоматизовану реакцію на зміну температури й вологості, відобразити поточний стан локально та передавати дані для віддаленого моніторингу. Такий підхід дозволяє оцінити пристрій не лише як набір електронних компонентів, а як завершений програмно-апаратний засіб, що має практичне призначення у сфері 3D-друку.

Розроблена система має прикладну цінність насамперед через те, що вирішує одну з поширених проблем підготовки матеріалів до друку. Філамент під час зберігання поступово накопичує вологу з навколишнього повітря, через що погіршується якість екструзії, з'являються дефекти поверхні, знижується стабільність формування шарів і збільшується ризик невдалого друку. Запропонований пристрій дозволяє не залишати цей процес без контролю, оскільки температура й вологість усередині камери постійно вимірюються,

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 58
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

аналізуються та використовуються для керування нагрівальними і вентиляційними елементами. За рахунок цього сушіння та зберігання філаменту переходять із ручного або умовно контрольованого процесу в автоматизований режим.

Практична придатність системи підтверджується тим, що її архітектура побудована на доступних і поширених компонентах. Використання ESP32 забезпечує достатню обчислювальну продуктивність для виконання основної логіки керування, а також дає змогу реалізувати віддалений моніторинг без додаткових мережевих модулів. Датчик DHT22 / AM2302 дозволяє одночасно отримувати два ключові параметри середовища, а РТС-нагрівачі разом із вентиляторами забезпечують фізичний вплив на мікроклімат у камері. Така конфігурація не потребує складної промислової автоматики, але водночас забезпечує основні функції, необхідні для прототипу кіберфізичної системи.

Окремою перевагою пристрою є поєднання локального та віддаленого контролю. Локальний дисплей дозволяє швидко перевірити стан системи без використання зовнішніх пристроїв, що зручно під час запуску, налагодження та повсякденної експлуатації. Віддалений моніторинг через Wi-Fi розширює можливості контролю, оскільки параметри температури, вологості та режиму роботи можна переглядати на відстані. Це особливо корисно у випадках, коли камера з філаментом розміщена в майстерні, лабораторії або технічному приміщенні, де немає потреби постійно перебувати поруч із пристроєм.

Розроблений пристрій також має перевагу з погляду гнучкості. Програмна логіка на ESP32 може змінюватися відповідно до типу філаменту, потрібного температурного режиму та допустимого рівня вологості. Для різних матеріалів можуть задаватися різні порогові значення, оскільки PLA, PETG, ABS, TPU або нейлон мають різну чутливість до вологості й температурного впливу. Така можливість налаштування робить систему більш універсальною, ніж прості пасивні бокси або сушарки з фіксованим режимом роботи.

Важливою практичною особливістю є автономність базового циклу керування. Система продовжує зчитувати показники з датчика та керувати виконавчими елементами навіть у випадку тимчасової недоступності віддаленого інтерфейсу. Це означає, що Wi-Fi-з'єднання використовується як інформаційний канал, але не є критичною умовою для виконання основної функції сушіння. Такий принцип підвищує надійність пристрою, оскільки процес підтримання температури й вологості не зупиняється через можливі проблеми з мережею.

Разом із цим розроблений пристрій має певні обмеження, які потрібно враховувати під час оцінювання його практичного застосування. Перше обмеження пов'язане з використанням одного датчика температури та вологості. Якщо сенсор розміщений лише в одній точці камери, він не завжди відображає повну картину розподілу параметрів усередині всього об'єму. У невеликій камері таке рішення є прийнятним, однак у більшій конструкції можливі температурні зони, де повітря прогрівається нерівномірно. Через це показники одного датчика можуть бути достатніми для базового контролю, але не гарантують повної точності в кожній точці розміщення котушки.

Друге обмеження стосується точності самого датчика DHT22 / AM2302. Для навчального або експериментального прототипу його характеристик достатньо, однак цей сенсор не належить до високоточних лабораторних засобів вимірювання. Його показники можуть мати похибку, а швидкість реакції на зміну вологості не завжди є миттєвою. У практичному пристрої це не є критичним недоліком, оскільки процес сушіння має певну інерційність і не потребує надшвидкого реагування.

Ще одним обмеженням є залежність ефективності сушіння від конструкції корпусу. Навіть правильно підібрані нагрівачі та вентилятори не забезпечують високої ефективності, якщо камера має значні втрати тепла або недостатню герметичність. Якщо тепле повітря швидко виходить назовні, система витрачає більше енергії на підтримання температури. Якщо камера погано ізольована,

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 60
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

процес сушіння триває довше, а рівень вологості може знижуватися повільніше. Через це практична ефективність пристрою залежить не лише від електроніки, а й від якості механічної реалізації камери сушіння.

Окрему увагу варто приділити тепловій безпеці. У системі використано РТС-нагрівачі, які створюють достатній тепловий вплив для сушіння філаменту. Разом із цим нагрівальні елементи потребують правильного розміщення, надійного кріплення та достатньої циркуляції повітря. Якщо повітряний потік організований недостатньо добре, поблизу нагрівачів може виникати локальне перегрівання. Це небажано як для електронних компонентів, так і для самого філаменту. Саме тому в системі використано вентилятори та радіатори, які допомагають рівномірніше розподіляти тепло, проте остаточна ефективність цього рішення залежить від конструкції внутрішнього простору камери.

Силова частина пристрою також має власні обмеження. Нагрівачі та вентилятори працюють із більшими струмами, ніж сигнальна частина ESP32, тому якість підключення MOSFET-модуля або транзисторного ключа має суттєве значення. Ненадійні контакти, тонкі провідники або недостатній запас за струмом можуть призвести до нагрівання з'єднань, нестабільної роботи або передчасного виходу елементів із ладу.

Практичне використання системи також обмежується потужністю нагрівальних елементів. Три РТС-нагрівачі 12 В потужністю 30 Вт можуть бути достатніми для компактної камери, однак за збільшення об'єму внутрішнього простору або використання масивнішої котушки час виходу на робочий температурний режим може зрости.

З погляду програмної реалізації система має достатню базову логіку для підтримання температури та вологості, однак її можна розширювати. На поточному етапі основними функціями є зчитування параметрів, порівняння з порогами, керування нагрівом і вентиляцією, локальне та віддалене відображення. Разом із цим для подальшого розвитку доцільними є журналювання даних, побудова графіків, збереження профілів для різних типів

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 61
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

філаменту, сповіщення про аварійні стани та автоматичний розрахунок тривалості сушіння.

Ще одним обмеженням є те, що система контролює параметри повітря в камері, а не фактичний вміст вологи всередині самого філаменту. Це важлива відмінність, оскільки зменшення вологості повітря не завжди означає миттєве висушування матеріалу по всій товщині нитки. Філамент віддає вологу поступово, і швидкість цього процесу залежить від типу полімеру, діаметра нитки, стану котушки та часу сушіння. Тому значення вологості повітря слід розглядати як непрямий, але корисний показник ефективності процесу. Для більш точного оцінювання стану матеріалу в майбутньому можуть застосовуватися додаткові методи контролю, проте для практичного прототипу аналіз температури й вологості середовища є достатньою основою.

На рисунку 3.5 подано узагальнену оцінку роботи кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту.

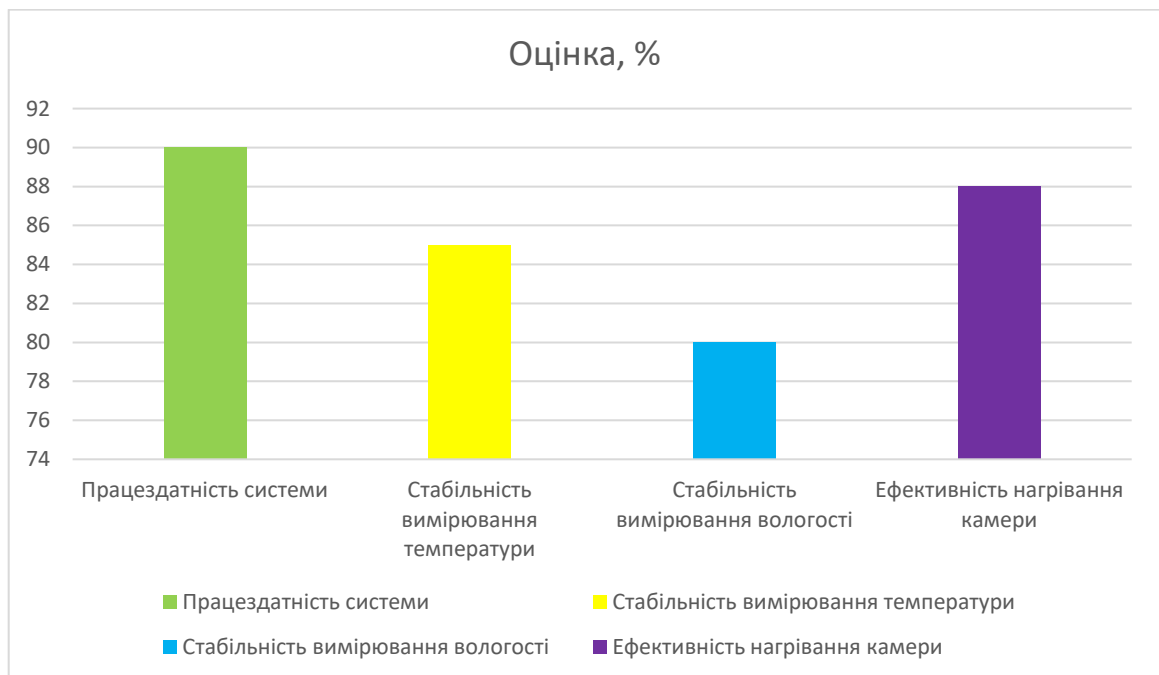


Рисунок 3.5 – Діаграма оцінки роботи кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту

У ньому відображено основні переваги пристрою, зокрема автоматизоване керування мікрокліматом, локальне й віддалене відображення параметрів, доступність компонентів і можливість подальшого розширення. Також позначено основні обмеження, пов'язані з точністю вимірювання, конструкцією камери, використанням одного датчика, потужністю нагрівачів і потребою в надійнішому монтажі для довготривалої експлуатації.

Оцінка практичної придатності показує, що розроблений пристрій відповідає основним завданням кваліфікаційної роботи. Він забезпечує вимірювання температури та вологості, автоматизовано керує нагріванням і вентиляцією, надає користувачу інформацію про стан системи та може працювати як автономно, так і з віддаленим моніторингом. Пристрій є придатним для використання в навчальних лабораторіях, домашніх майстернях і невеликих робочих зонах 3D-друку, де потрібне недороге та зрозуміле рішення для підготовки філаменту.

У підсумку розроблена кіберфізична система має достатній рівень практичної придатності для виконання базових функцій сушіння та зберігання філаменту. Її сильними сторонами є доступність компонентів, зрозуміла архітектура, можливість віддаленого контролю та гнучкість програмного налаштування. Основні обмеження пов'язані з точністю сенсора, якістю корпусу, тепловою рівномірністю, монтажем силової частини та відсутністю розширеного журналювання в базовій версії. Незважаючи на це, створений пристрій формує працездатну основу для подальшого вдосконалення та може використовуватися як експериментальна платформа для автоматизованого контролю умов зберігання матеріалів для 3D-друку.

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 63
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ВИСНОВКИ

У кваліфікаційній роботі розглянуто задачу створення кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом. Актуальність обраної теми пов'язана з тим, що якість 3D-друку залежить не лише від налаштувань принтера, а й від стану матеріалу, який використовується під час виготовлення виробів. Філамент здатний поглинати вологу з навколишнього середовища, через що погіршується стабільність екструзії, з'являються дефекти поверхні, зменшується міцність деталей і знижується повторюваність результатів друку. Через це контроль умов сушіння та зберігання матеріалу набуває практичного значення для домашніх майстерень, навчальних лабораторій і невеликих виробничих зон, де 3D-друк використовується регулярно або періодично.

У першому розділі проаналізовано особливості використання філаменту в адитивному виробництві та показано вплив температури й вологості на його технологічні властивості. Розглянуто існуючі підходи до сушіння та зберігання полімерної нитки, зокрема пасивні герметичні бокси, сушарки філаменту, комбіновані пристрої та саморобні рішення на базі побутових нагрівальних систем. Аналіз наявних рішень засвідчив, що більшість із них частково вирішує проблему впливу вологи, проте не завжди забезпечує повноцінний контроль параметрів середовища, збереження історії вимірювань і зручний віддалений моніторинг.

У другому розділі сформовано архітектуру кіберфізичної системи сушіння та зберігання філаменту. Центральним елементом обрано мікроконтролер ESP32, оскільки він поєднує достатню кількість портів введення-виведення, підтримку Wi-Fi та можливість реалізації локального вебінтерфейсу. Для вимірювання параметрів середовища використано датчик DHT22 / AM2302, який забезпечує отримання температури та відносної вологості. Виконавчу частину системи сформовано на основі PTC-нагрівачів, вентиляторів, силового ключа та

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 64
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

блока живлення з перетворювачем LM2596. Такий склад компонентів дозволив побудувати доступну, зрозумілу та придатну до подальшого вдосконалення систему.

У третьому розділі описана практична реалізація системи. Налаштовано взаємодію електронних модулів і виконавчих елементів, організовано живлення силової та керуючої частини, підключено ESP32, датчик температури й вологості, дисплей, нагрівачі, вентилятори та силовий ключ. Програмна логіка реалізує зчитування температури й вологості, перевірку коректності даних, вибір режиму роботи, керування нагріванням і вентиляцією, локальне відображення показників та підготовку інформації для віддаленого моніторингу.

Перевірка роботи системи показала, що пристрій здатний реагувати на зміну температури й вологості відповідно до закладеної логіки. У режимі сушіння нагрівачі та вентилятори активуються для підвищення температури й зниження вологості всередині камери. Після досягнення потрібних параметрів система переходить до підтримання умов зберігання, у якому виконавчі елементи працюють лише за потреби. Локальний дисплей забезпечує швидкий контроль стану пристрою без додаткових засобів, а вебінтерфейс дає можливість переглядати параметри на відстані. Це підвищує зручність експлуатації та робить роботу системи більш прозорою.

У підсумку в кваліфікаційній роботі сформовано, спроектовано та описано працездатну кіберфізичну систему сушіння і зберігання філаменту з віддаленим моніторингом. Запропоноване рішення поєднує апаратну частину, програмну логіку та засоби візуалізації параметрів у єдиний комплекс. Така система створює умови для більш стабільного зберігання філаменту, зменшує ризик впливу вологи на якість друку та може стати основою для подальшого вдосконалення, зокрема додавання кількох датчиків, збереження історії параметрів, побудови графіків, профілів сушіння для різних типів матеріалів і сповіщень про відхилення від заданих режимів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Hamrol A., Góral ski B., Wichniarek R. The Influence of Moisture Absorption and Desorption by the ABS Filament on the Properties of Additively Manufactured Parts Using the Fused Deposition Modeling Method. *Materials*. 2024. Vol. 17, No. 9. 1988. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma17091988> (дата звернення: 17.02.2026).

2. Hamrol A., Góral ski B., Wichniarek R., Kuczko W. The Natural Moisture of ABS Filament and Its Influence on the Quality of FFF Products. *Materials*. 2023. Vol. 16, No. 3. 938. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma16030938> (дата звернення: 17.02.2026).

3. Limpadapun K., Sukmanee J. A Study of an Effect on Moisture from 3D Printer Filament Drying Processes. *Key Engineering Materials*. 2021. Vol. 902. P. 101-106. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.902.101.

4. Wichniarek R., Hamrol A., Kuczko W., Góral ski F., Rogalewicz M. ABS filament moisture compensation possibilities in the FDM process. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2021. Vol. 35. P. 550-559. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cirpj.2021.08.011> (дата звернення: 22.02.2026).

5. Banjo A. D., Barsotti E., Fenn J. Moisture-induced changes in the mechanical behavior of 3D printed polymers. *Additive Manufacturing Letters*. 2022. Vol. 2. 100012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100012> (дата звернення: 19.02.2026).

6. Lendvai L., Májlinger K., Karger-Kocsis J. Influence of environmental humidity during filament storage and printing on the properties of MEX 3D-printed objects. *Additive Manufacturing*. 2024. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024012684> (дата звернення: 20.02.2026).

7. Lendvai L., Májlinger K., Karger-Kocsis J. Effect of filament humidity on the properties of material extrusion (MEX) 3D-printed composites. *Progress in*

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 66
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Additive Manufacturing. 2025. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s42247-025-01108-6> (дата звернення: 22.02.2026).

8. Quader R. та ін. Characterizing the Effect of Filament Moisture on Tensile Behavior of Material Extrusion Printed Polymers. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2024. URL: <https://journals.sagepub.com/doi/10.1089/3dp.2022.0222> (дата звернення: 22.02.2026).

9. Sun Q. та ін. Experimental Study on the Effect of Humidity on the Mechanical Properties of 3D-Printed Thermoplastics. *Polymers*. 2025. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC12608748/> (дата звернення: 22.02.2026).

10. Saavedra-Rojas F. A. та ін. Environmental Durability of Bio-Based and Synthetic Large-Format 3D-Printed Thermoplastic Composites under Moisture and Freeze-Thaw Exposure. *Polymers*. 2024. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10975879/> (дата звернення: 22.02.2026).

11. Bhagia S. та ін. Critical review of FDM 3D printing of PLA biocomposites: materials, processes, and properties. *Carbohydrate Polymers*. 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352940721001438> (дата звернення: 22.02.2026).

12. ISO/ASTM 52902:2019. Additive manufacturing - Test artifacts - Geometric capability assessment of additive manufacturing systems. ISO. 2019. URL: <https://www.iso.org/standard/67287.html> (дата звернення: 22.02.2026).

13. ISO/ASTM 52915:2020. Specification for additive manufacturing file format (AMF) Version 1.2. ISO. 2020. URL: <https://www.iso.org/standard/74640.html> (дата звернення: 22.02.2026).

14. ISO/ASTM 52900:2021. Additive manufacturing - General principles - Terminology. ISO. 2021. URL: <https://www.iso.org/standard/74514.html> (дата звернення: 22.02.2026).

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 67
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

15. OASIS Standard. MQTT Version 5.0. OASIS. 2019. URL: <https://docs.oasis-open.org/mqtt/mqtt/v5.0/mqtt-v5.0.html> (дата звернення: 22.02.2026).

16. Espressif Systems. ESP32 Series Datasheet. 2023. URL: <https://www.espressif.com/en/support/documents/technical-documents> (дата звернення: 22.02.2026).

17. Espressif Systems. ESP-IDF Programming Guide. 2024. URL: <https://docs.espressif.com/projects/esp-idf/en/latest/> (дата звернення: 22.02.2026).

18. Sensirion. SHT31-DIS: Digital Humidity and Temperature Sensor (Datasheet/каталог). 2020. URL: <https://sensirion.com/products/catalog/SHT31-DIS/> (дата звернення: 22.02.2026).

19. Bosch Sensortec. BME280 Combined humidity and pressure sensor (product page/datasheet). 2021. URL: <https://www.bosch-sensortec.com/products/environmental-sensors/humidity-sensors-bme280/> (дата звернення: 22.02.2026).

20. Analog Devices. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer (Data Sheet). 2019. URL: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ds18b20.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

21. InfluxData. InfluxDB Documentation. 2024. URL: <https://docs.influxdata.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

22. Grafana Labs. Grafana Documentation. 2025. URL: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/> (дата звернення: 22.02.2026).

23. Grafana Labs. What's new in Grafana v12.0. 2025. URL: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/whatsnew/whats-new-in-v12-0/> (дата звернення: 22.02.2026).

24. Eclipse Foundation. Mosquitto Documentation. 2024. URL: <https://mosquitto.org/documentation/> (дата звернення: 22.02.2026).

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 68
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

25. Eclipse Foundation. Version 2.0.20 released (Mosquitto blog). 2024. URL: <https://mosquitto.org/blog/2024/10/version-2-0-20-released/> (дата звернення: 22.02.2026).

26. Docker Inc. Docker Compose Documentation. 2025. URL: <https://docs.docker.com/compose/> (дата звернення: 22.02.2026).

27. Docker Inc. Compose file reference. 2025. URL: <https://docs.docker.com/reference/compose-file/> (дата звернення: 22.02.2026).

28. FastAPI. FastAPI Documentation. 2025. URL: <https://fastapi.tiangolo.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

29. Python Software Foundation. Python 3 Documentation. 2024. URL: <https://docs.python.org/3/> (дата звернення: 22.02.2026).

30. psutil. psutil Documentation. 2024. URL: <https://psutil.readthedocs.io/> (дата звернення: 22.02.2026).

31. SQLite Consortium. SQLite Documentation. 2024. URL: <https://www.sqlite.org/docs.html> (дата звернення: 22.02.2026).

32. React. React Documentation. 2024. URL: <https://react.dev/> (дата звернення: 22.02.2026).

33. Node.js. Node.js Documentation. 2024. URL: <https://nodejs.org/en/docs> (дата звернення: 22.02.2026).

34. NGINX. NGINX Documentation. 2024. URL: <https://docs.nginx.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

35. Let's Encrypt. Documentation. 2024. URL: <https://letsencrypt.org/docs/> (дата звернення: 22.02.2026).

36. OWASP. OWASP Top 10:2021. 2021. URL: <https://owasp.org/Top10/> (дата звернення: 22.02.2026).

37. Polymaker. PolyDryer™ - Filament Drying & Storage Solution. 2024. URL: <https://polymaker.com/product/polydryer/> (дата звернення: 22.02.2026).

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 69
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

38. Polymaker. Polymaker PolyDryer™ - launch article. 2024. URL: <https://polymaker.com/polymaker-polydryer-your-ultimate-3d-filament-drying-storage-solution/> (дата звернення: 22.02.2026).

39. SUNLU. Filament Dryer (серія сушарок для філаменту). 2023. URL: <https://www.sunlu.com/collections/filament-dryer> (дата звернення: 22.02.2026).

40. EIBOS. EIBOS Filament Dryer Series (каталог/опис). 2023. URL: <https://eibos3d.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

41. Creality. Creality Space Pi Filament Dryer (каталог/опис). 2023. URL: <https://www.creality.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

42. Bambu Lab. Bambu Lab (AMS та екосистема зберігання/подачі філаменту). 2024. URL: <https://bambulab.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

43. Prusa Research. Prusament Materials (довідники з матеріалів, зберігання та сушіння). 2024. URL: <https://prusament.com/materials/> (дата звернення: 22.02.2026).

44. Ultimaker. Ultimaker Support (матеріали, профілі, правила поводження). 2024. URL: <https://support.ultimaker.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

45. BASF Forward AM. Ultrafuse (технічні описи та TDS для філаментів). 2024. URL: <https://forward-am.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

46. DuPont. DuPont (інформація про поліаміди та вплив вологи на властивості полімерів). 2023. URL: <https://www.dupont.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

47. ISO/IEC 27001:2022. Information security, cybersecurity and privacy protection - Information security management systems - Requirements. ISO. 2022. URL: <https://www.iso.org/standard/27001.html> (дата звернення: 22.02.2026).

48. NISTIR 8259A. IoT Device Cybersecurity Capability Core Baseline. NIST. 2020. URL: <https://csrc.nist.gov/publications/detail/nistir/8259a/final> (дата звернення: 22.02.2026).

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 70
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

49. IEC 60529. Degrees of protection provided by enclosures (IP Code) (ДОВІДКОВІ матеріали IEC Webstore). IEC. 2020. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/2452> (дата звернення: 22.02.2026).

50. NIST. Cybersecurity Framework (CSF) 2.0. 2024. URL: <https://www.nist.gov/cyberframework> (дата звернення: 22.02.2026).

51. RFC 9110. HTTP Semantics. IETF. 2022. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc9110> (дата звернення: 22.02.2026).

52. Starlette. Starlette Documentation (ASGI, WebSocket, BackgroundTasks). 2024. URL: <https://www.starlette.io/> (дата звернення: 28.04.2026).

53. Creality Space Pi Filament Dryer. URL: <https://rozetka.com.ua/ua/450705731/p450705731/>

54. Caydo Filament Dryer. URL: <https://www.amazon.com/Caydo-Filament-4-Spool-Humidity-Anti-Moisture/dp/B0GF7W2H22>

55. Sunlu S4 Filament Dryer Box. URL: <https://www.amazon.co.uk/SUNLU-Generation-Dehydrator-Temperature-Filaments/dp/B0CPLNR989>

					КвРКІ.2301106.23.01.47 ПЗ	Арк. 71
Зм.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

ДОДАТОК Г (обов'язковий)

Текст системного програмного забезпечення

```
#include <Arduino.h> // ----- Режими -----
#include <WiFi.h> -----
#include <WebServer.h> enum ControlMode {
#include <Wire.h> MODE_AUTO,
#include <Adafruit_GFX.h> MODE_MANUAL
#include <Adafruit_SSD1306.h> };
#include "DHT.h" ControlMode controlMode = MODE_AUTO;
// ----- Wi-Fi ----- struct DryingProfile {
----- const char* id;
const char* ssid = "YOUR_WIFI_NAME"; const char* name;
const char* password = float targetTemp;
"YOUR_WIFI_PASSWORD"; float targetHumidity;
WebServer server(80); float maxTemp;
// ----- Піни ESP32 ----- int fanWhenHeating;
----- int fanWhenDrying;
#define DHT_PIN 4 int fanIdle;
#define DHT_TYPE DHT22 };
#define FAN_PWM_PIN 25 // MOSFET / PWM DryingProfile profiles[] = {
керування кулером {"general", "General", 45.0, 25.0, 60.0,
#define HEATER_PIN 26 // MOSFET керування 80, 60, 30},
PTC-нагрівачем {"pla", "PLA", 45.0, 25.0, 55.0, 70, 50,
#define OLED_SDA 21 30},
#define OLED_SCL 22 {"petg", "PETG", 55.0, 22.0, 65.0, 80,
// ----- OLED дисплей ----- 60, 35},
----- {"abs", "ABS", 60.0, 20.0, 70.0, 90, 70,
#define SCREEN_WIDTH 128 40},
#define SCREEN_HEIGHT 64 {"tpu", "TPU", 45.0, 25.0, 55.0, 70, 50,
#define OLED_RESET -1 30}
#define OLED_ADDR 0x3C };
Adafruit_SSD1306 display(SCREEN_WIDTH, const int profileCount = sizeof(profiles)
SCREEN_HEIGHT, &Wire, OLED_RESET); / sizeof(profiles[0]);
bool displayFound = false; int currentProfile = 0;
// ----- DHT22 ----- // ----- Дані системи -----
-----
DHT dht(DHT_PIN, DHT_TYPE); float temperature = NAN;
float humidity = NAN;
```

```

bool sensorOk = false;
bool heaterState = false;
bool overheatAlarm = false;
int fanPower = 0;
bool manualHeaterState = false;
int manualFanPower = 0;
float tempHysteresis = 2.0;
unsigned long lastSensorRead = 0;
const unsigned long sensorInterval =
2000;
// Якщо синій PWM-провід кулера керується
через MOSFET,
// сигнал зазвичай інвертований.
bool fanPwmInverted = true;
// Якщо MOSFET нагрівача працює навпаки –
змінити на true.
bool heaterSignalInverted = false;
// Для безпеки нагрівач не вмикається без
справного DHT22.
// Для короткого тесту можна поставити
true, але для роботи краще false.
bool allowManualHeaterWithoutSensor =
false;
// ----- PWM -----
-----
const int pwmResolution = 8;
const int pwmFreqFan = 25000;
const int pwmFreqHeater = 1000;
#if defined(ESP_ARDUINO_VERSION_MAJOR) &&
ESP_ARDUINO_VERSION_MAJOR >= 3
void setupPwm() {
ledcAttach(FAN_PWM_PIN, pwmFreqFan,
pwmResolution);
ledcAttach(HEATER_PIN, pwmFreqHeater,
pwmResolution);
}
void writePwm(int pin, int duty) {
ledcWrite(pin, duty);
}
#else
const int FAN_CHANNEL = 0;
const int HEATER_CHANNEL = 1;
void setupPwm() {
ledcSetup(FAN_CHANNEL, pwmFreqFan,
pwmResolution);
ledcAttachPin(FAN_PWM_PIN, FAN_CHANNEL);
ledcSetup(HEATER_CHANNEL, pwmFreqHeater,
pwmResolution);
ledcAttachPin(HEATER_PIN,
HEATER_CHANNEL);
}
void writePwm(int pin, int duty) {
if (pin == FAN_PWM_PIN) {
ledcWrite(FAN_CHANNEL, duty);
} else if (pin == HEATER_PIN) {
ledcWrite(HEATER_CHANNEL, duty);
}
}
#endif
// ----- Керування кулером
-----
void writeFanPower(int percent) {
percent = constrain(percent, 0, 100);
int duty = map(percent, 0, 100, 0, 255);
if (fanPwmInverted) {
duty = 255 - duty;
}
writePwm(FAN_PWM_PIN, duty);
fanPower = percent;
}
// ----- Керування
нагрівачем -----
void writeHeaterPower(int percent) {
percent = constrain(percent, 0, 100);
int duty = map(percent, 0, 100, 0, 255);
if (heaterSignalInverted) {
duty = 255 - duty;
}
writePwm(HEATER_PIN, duty);
heaterState = percent > 0;
}

```

```

// ----- Зчитування
датчика -----
void readSensor() {
float newHumidity = dht.readHumidity();
float newTemperature =
dht.readTemperature();
if (!isnan(newHumidity) &&
!isnan(newTemperature)) {
humidity = newHumidity;
temperature = newTemperature;
sensorOk = true;
} else {
sensorOk = false;
}
}
// ----- Основна логіка
керування -----
void controlSystem() {
DryingProfile profile =
profiles[currentProfile];
// Захист від перегріву має найвищий
пріоритет
if (sensorOk && temperature >=
profile.maxTemp) {
writeHeaterPower(0);
writeFanPower(100);
overheatAlarm = true;
return;
}
overheatAlarm = false;
// ----- РУЧНИЙ РЕЖИМ -----
-----
if (controlMode == MODE_MANUAL) {
if (manualHeaterState) {
if (sensorOk ||
allowManualHeaterWithoutSensor) {
writeHeaterPower(100);
} else {
writeHeaterPower(0);
}
} else {
writeHeaterPower(0);
}
}
} else {
writeHeaterPower(0);
}
}
return;
}
// ----- АВТОМАТИЧНИЙ
РЕЖИМ -----
if (!sensorOk) {
writeHeaterPower(0);
writeFanPower(100);
return;
}
if (temperature < profile.targetTemp -
tempHysteresis) {
writeHeaterPower(100);
}
else if (temperature > profile.targetTemp
+ tempHysteresis) {
writeHeaterPower(0);
}
if (heaterState) {
writeFanPower(profile.fanWhenHeating);
}
else if (humidity >
profile.targetHumidity) {
writeFanPower(profile.fanWhenDrying);
}
else {
writeFanPower(profile.fanIdle);
}
}
// ----- OLED дисплей -----
-----
void updateDisplay() {
if (!displayFound) return;
DryingProfile profile =
profiles[currentProfile];
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0, 0);

```

```

display.print("Mode: ");
display.println(controlMode == MODE_AUTO
? "AUTO" : "MANUAL");
display.setCursor(0, 10);
display.print("Profile: ");
display.println(profile.name);
display.drawLine(0, 20, 127, 20,
SSD1306_WHITE);
display.setCursor(0, 24);
display.print("Temp: ");
if (sensorOk) {
display.print(temperature, 1);
display.println(" C");
} else {
display.println("--.- C");
}
display.setCursor(0, 35);
display.print("Hum: ");
if (sensorOk) {
display.print(humidity, 1);
display.println(" %");
} else {
display.println("--.- %");
}
display.setCursor(0, 46);
display.print("Heat: ");
display.print(heaterState ? "ON " :
"OFF");
display.print("Fan:");
display.print(fanPower);
display.println("%");
display.setCursor(0, 57);
if (overheatAlarm) {
display.print("ALARM OVERHEAT");
} else if (WiFi.status() == WL_CONNECTED)
{
display.print(WiFi.localIP());
} else {
display.print("WiFi OFF");
}
display.display();
}
// ----- HTML -----
-----
String sensorValueText(float value,
String unit) {
if (!sensorOk) return "--";
return String(value, 1) + " " + unit;
}
String activeStyle(bool active) {
if (active) {
return "style='background:#0b7d2b;'";
}
return "";
}
String htmlPage() {
DryingProfile profile =
profiles[currentProfile];
String page = "";
page += "<!DOCTYPE html><html><head><meta
charset='UTF-8'>";
page += "<meta name='viewport'
content='width=device-width, initial-
scale=1.0'>";
page += "<meta http-equiv='refresh'
content='5'>";
page += "<title>Filament Dryer</title>";
page += "<style>";
page += "body{font-
family:Arial;background:#eef2f6;margin:0;
padding:20px;}";
page +=
".card{background:white;padding:20px;bord
er-radius:16px;max-
width:680px;margin:auto;box-shadow:0 4px
14px #bbb;}";
page += "h2{text-align:center;margin-
top:0;}";
page += ".row{margin:12px
0;padding:12px;background:#f2f6fa;border-
radius:10px;}";

```

```

page += ".value{font-size:24px;font-
weight:bold;}";
page += ".btn{display:inline-block;text-
decoration:none;padding:10px
12px;margin:4px;border-
radius:10px;background:#1976d2;color:whit
e;}";
page += ".red{background:#c62828;}";
page += ".gray{background:#666;}";
page += ".small{font-
size:13px;color:#555;}";
page += "</style></head><body>";
page += "<div class='card'>";
page += "<h2>Сушіння та зберігання
філаменту</h2>";
if (overheatAlarm) {
page += "<div class='row'
style='background:#ffdddd;'><b>УВАГА:</b>
перегрів. Нагрівач вимкнено, кулер працює
на 100%.</div>";
}
if (!sensorOk) {
page += "<div class='row'
style='background:#fff3cd;'><b>УВАГА:</b>
датчик DHT22 не зчитується. Нагрівач
 заблоковано для безпеки.</div>";
}
page += "<div
class='row'>Температура:<div
class='value'>";
page += sensorValueText(temperature,
"°C");
page += "</div></div>";
page += "<div class='row'>Вологість:<div
class='value'>";
page += sensorValueText(humidity, "%");
page += "</div></div>";
page += "<div class='row'>Режим
керування:<div class='value'>";
page += controlMode == MODE_AUTO ?
"Автоматичний" : "Ручний";
page += "</div></div>";
page += "<div class='row'>Профіль
матеріалу:<div class='value'>";
page += profile.name;
page += "</div>";
page += "<div class='small'>Цільова
температура: ";
page += String(profile.targetTemp, 1);
page += " °C | Цільова вологість: ";
page += String(profile.targetHumidity,
1);
page += " % | Максимальна температура: ";
page += String(profile.maxTemp, 1);
page += " °C</div></div>";
page += "<div class='row'>Нагрівач
PTC:<div class='value'>";
page += heaterState ? "Увімкнено" :
"Вимкнено";
page += "</div></div>";
page += "<div class='row'>Кулер:<div
class='value'>";
page += String(fanPower);
page += " %</div></div>";
page += "<div class='row'><b>Вибір
профілю сушіння:</b><br>";
for (int i = 0; i < profileCount; i++) {
page += "<a class='btn' ";
page += activeStyle(i == currentProfile);
page += " href='/setProfile?p=";
page += profiles[i].id;
page += "'>";
page += profiles[i].name;
page += "</a>";
}
page += "</div>";
page += "<div class='row'><b>Режим
роботи:</b><br>";
page += "<a class='btn' ";
page += activeStyle(controlMode ==
MODE_AUTO);

```

```

page += "
href='/setControl?m=auto'>Автоматичний</a
>";
page += "<a class='btn' ";
page += activeStyle(controlMode ==
MODE_MANUAL);
page += "
href='/setControl?m>manual'>Ручний</a>";
page += "</div>";
page += "<div class='row'><b>Ручне
керування нагрівачем:</b><br>";
page += "<a class='btn' ";
page += activeStyle(manualHeaterState);
page += "
href='/manual?heater=on'>Увімкнути
нагрівач</a>";
page += "<a class='btn red' ";
page += activeStyle(!manualHeaterState);
page += "
href='/manual?heater=off'>Вимкнути
нагрівач</a>";
page += "<div class='small'>Ручне
керування нагрівачем працює тільки в
ручному режимі. Захист від перегріву
залишається активним.</div>";
page += "</div>";
page += "<div class='row'><b>Ручне
керування кулером:</b><br>";
int fanButtons[] = {0, 30, 50, 80, 100};
for (int i = 0; i < 5; i++) {
page += "<a class='btn";
if (fanButtons[i] == 0) page += " gray";
page += "' ";
page += activeStyle(manualFanPower ==
fanButtons[i]);
page += " href='/manual?fan=";
page += String(fanButtons[i]);
page += "'>";
page += String(fanButtons[i]);
page += "%</a>";
}

```

```

page += "</div>";
page += "<div class='row'>";
page += "<a class='btn' href='/'>Оновити
дані</a>";
page += "</div>";
page += "</div></body></html>";
return page;
}
// ----- Web handlers -----
void redirectRoot() {
server.setHeader("Location", "/");
server.send(303, "text/plain", "");
}
void handleRoot() {
server.send(200, "text/html",
htmlPage());
}
void handleSetProfile() {
if (server.hasArg("p")) {
String selected = server.arg("p");
for (int i = 0; i < profileCount; i++) {
if (selected == profiles[i].id) {
currentProfile = i;
break;
}
}
}
controlSystem();
updateDisplay();

redirectRoot();
}
void handleSetControl() {
if (server.hasArg("m")) {
String mode = server.arg("m");
if (mode == "auto") {
controlMode = MODE_AUTO;
}
else if (mode == "manual") {
controlMode = MODE_MANUAL;
}
}
}

```

```

}
}
controlSystem();
updateDisplay();
Serial.print("Mode changed: ");
Serial.println(controlMode == MODE_AUTO ?
"AUTO" : "MANUAL");
redirectRoot();
}
void handleManual() {
controlMode = MODE_MANUAL;
if (server.hasArg("heater")) {
String heater = server.arg("heater");
if (heater == "on") {
manualHeaterState = true;
}
else if (heater == "off") {
manualHeaterState = false;
}
}
if (server.hasArg("fan")) {
manualFanPower =
constrain(server.arg("fan").toInt(), 0,
100);
}

controlSystem();
updateDisplay();
Serial.print("Manual control | Heater
request: ");
Serial.print(manualHeaterState ? "ON" :
"OFF");
Serial.print(" | Real heater: ");
Serial.print(heaterState ? "ON" : "OFF");
Serial.print(" | Fan: ");
Serial.print(fanPower);
Serial.println("%");
redirectRoot();
}
void handleData() {
DryingProfile profile =
profiles[currentProfile];

String json = "{";

json += "\"sensorOk\":";
json += String(sensorOk ? 1 : 0);
json += ",";

json += "\"temperature\":";
json += String(temperature, 1);
json += ",";

json += "\"humidity\":";
json += String(humidity, 1);
json += ",";

json += "\"heater\":";
json += String(heaterState ? 1 : 0);
json += ",";

json += "\"fanPower\":";
json += String(fanPower);
json += ",";

json += "\"controlMode\":";
json += controlMode == MODE_AUTO ? "auto"
: "manual";
json += ",";

json += "\"profile\":";
json += profile.name;
json += ",";

json += "\"targetTemp\":";
json += String(profile.targetTemp, 1);
json += ",";

json += "\"targetHumidity\":";
json += String(profile.targetHumidity,
1);
}
}

```

```

json += ",";

json += "\"overheatAlarm\":";
json += String(overheatAlarm ? 1 : 0);

json += "}";

server.send(200, "application/json",
json);
}

// ----- Setup -----
-----

void setup() {
Serial.begin(115200);

dht.begin();

Wire.begin(OLED_SDA, OLED_SCL);

if (display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC,
OLED_ADDR)) {
displayFound = true;
display.clearDisplay();
display.setTextColor(SSD1306_WHITE);
display.setTextSize(1);
display.setCursor(0, 0);
display.println("Filament Dryer");
display.println("Starting...");
display.display();
} else {
displayFound = false;
Serial.println("OLED дисплей не
знайдено");
}

setupPwm();

writeHeaterPower(0);
writeFanPower(0);

delay(1500);
readSensor();
controlSystem();
updateDisplay();

WiFi.begin(ssid, password);

Serial.println("Підключення до Wi-
Fi...");

unsigned long wifiStartTime = millis();

while (WiFi.status() != WL_CONNECTED &&
millis() - wifiStartTime < 15000) {
delay(500);
Serial.print(".");
}

Serial.println();

if (WiFi.status() == WL_CONNECTED) {
Serial.println("Wi-Fi підключено");
Serial.print("IP-адреса ESP32: ");
Serial.println(WiFi.localIP());
} else {
Serial.println("Wi-Fi не підключено,
система працює локально");
}

server.on("/", handleRoot);
server.on("/setProfile",
handleSetProfile);
server.on("/setControl",
handleSetControl);
server.on("/manual", handleManual);
server.on("/data", handleData);

server.begin();

Serial.println("Веб-сервер запущено");

```

```

updateDisplay();
}

// ----- Loop -----
-----

void loop() {
server.handleClient();

if (millis() - lastSensorRead >=
sensorInterval) {
lastSensorRead = millis();

readSensor();
controlSystem();
updateDisplay();

DryingProfile profile =
profiles[currentProfile];

Serial.print("Mode: ");
Serial.print(controlMode == MODE_AUTO ?
"AUTO" : "MANUAL");

Serial.print(" | Profile: ");
Serial.print(profile.name);

Serial.print(" | Temp: ");
if (sensorOk) {
Serial.print(temperature);
Serial.print(" C");
} else {
Serial.print("DHT ERROR");
}

Serial.print(" | Hum: ");
if (sensorOk) {
Serial.print(humidity);
Serial.print("%");
} else {
Serial.print("DHT ERROR");
}

Serial.print(" | Heater: ");
Serial.
print(heaterState ? "ON" : "OFF");

Serial.print(" | Fan: ");
Serial.print(fanPower);
Serial.print("%");

if (overheatAlarm) {
Serial.print(" | ALARM OVERHEAT");
}

Serial.println();
}
}

```

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: Віталій КОВАЛЬ

Співавтор:

Назва: Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом

Експерт: Марія КАПУСТЯН

Підрозділ: Кафедра комп'ютерної інженерії та інформаційних систем

Коефіцієнт подібності 1: 2.03%

Коефіцієнт подібності 2: 0.65%

Мікропробіли: 3

Заміна букв: 0

Інтервали: 0

Білі знаки: 0

Дата створення звіту: 2026-05-22 17:40:41.0

Після аналізу Звіту подібності констатую наступне:

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


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

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

Обґрунтування:

2026-05-22

Дата



Доцент Андрій Нічепорук

експерт

Mon May 25 14:03:50 EEST 2026, Медзятий Дмитро Миколайович, Хмельницький національний університет, ХНУ

Anti-Plagiarism (http://ap.km.ua) v-15.701**Максимальне співпадіння з одним документом 28.0%**

Словники перевірки: en_US, ru_RU, ua_UA. Помилки в документах: 8%

ID: 272226 Назва: БКР Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом Додано в БД: 2026-05-25 Автора: Віталій КОВАЛЬ Керівники: Марія КАПУСТЯН Консультанти: Опоненти:	Документ		Сумарний збіг по Базі Даних	
	Символи	Лексеми	Символи	Лексеми
	113489	830	32785 (29%)	233 (28%)

Джерело плагіату

ID	Опис	Наявність плагіату в документі	
		Символи	Лексеми
269529	Назва: Звіт з ПДП Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом Додано в БД: 2026-02-25 Автора: Нічепорук А.О. Керівники: В.Д.Ковалю Консультанти: Опоненти:	32200 (28.0%)	232 (28.0%)

РЕЦЕНЗІЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

Дипломник: Коваль Віталій Дмитрович

Тема: Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом

Спеціальність: 123 «Комп'ютерна інженерія»

Обсяг кваліфікаційної роботи:

Кількість листів креслень 3 Кількість сторінок записки 62

1. Короткий зміст роботи та прийнятих рішень: Метою кваліфікаційної роботи є проєктування та розробка програмно-апаратної кіберфізичної системи для сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку.

2. Висновок про відповідність роботи дипломному завданню: Робота повністю відповідає поставленому завданню та вимогам до кваліфікаційної роботи.

3. Характеристика виконання кожного розділу, ступінь використання останніх досягнень науки і техніки і передових методів роботи: В першому розділі проаналізовано проблематику використання філаменту, вплив вологи на якість 3D-друку та існуючі рішення для зберігання матеріалів, а також обґрунтовано доцільність застосування кіберфізичного підходу для автоматизації процесу контролю стану полімерної нитки. В другому розділі розроблено загальну архітектуру системи, обґрунтовано вибір апаратних компонентів (мікроконтролер ESP32, датчик температури і вологості DHT22, РТС-нагрівачі), побудовано структурну і функціональну схеми та розроблено алгоритми збору, обробки і передавання даних. В третьому розділі виконано програмно-апаратну реалізацію пристрою: налаштовано взаємодію електронних модулів, реалізовано програмну логіку підтримання температури й вологості (із застосуванням гістерезису для запобігання перегріву), створено локальний та віддалений інтерфейси для моніторингу параметрів, а також проведено успішне тестування системи в реальних режимах сушіння та зберігання.

4. Позитивні сторони роботи: висока практична цінність роботи.

5. Негативні сторони роботи: -

6. Оцінка графічного оформлення та пояснювальної записки роботи:
Пояснювальна записка оформлена коректно, згідно з чинними стандартами оформлення документації.

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

8. Інші зауваження: _____

9. Оцінка дипломної роботи: відмінно (А / 93)

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

*Корсунська Л.О., к.т.н., доцент, зав.зубар кадрами
АКТР*

“*01*” *червня* _____ 2026 р.

Л.О. _____ (підпис)

Зав. кафедри КІС
д-р. філософії Ользі ПАВЛОВІЙ

Віталій КОВАЛЬ

ПІБ здобувача вищої освіти

ФІТ, 3 курсу, групи КІ2с-23-1

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 сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом

Автор Віталій КОВАЛЬ

Освітня програма Комп'ютерна інженерія та програмування

Рівень вищої освіти перший (бакалаврський)

Спеціальність 123 Комп'ютерна інженерія

Науковий керівник: к.т.н., доцент Марія КАПУСТЯН

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) Збіг зі звітом ПДП Кіберфізична система сушіння та зберігання філаменту для 3D-друку з віддаленим моніторингом;
- 4) значна частина знайденого плагіату відноситься до списку використаних джерел


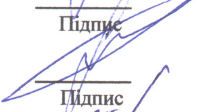
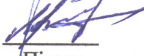
Сумарний обсяг всіх запозичень, визначений системою виявлення збігів/ ідентичності/схожості StrikePlagiarism, складає 2,03%; та системою Anti-Plagiarism складає 28,0% , що, з урахуванням наведених обґрунтувань, відповідає характеру наукового дослідження і свідчить на користь кваліфікаційної роботи.

01.06.2026

Завідувач кафедри

Гарант освітньої програми

Керівник кваліфікаційної роботи


Підпис

Підпис

Підпис

Ольга ПАВЛОВА
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Андрій НІЧЕПОРУК
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ

Марія КАПУСТЯН
Ім'я, ПРІЗВИЩЕ