

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

Радіотехнічний факультет

Кафедра Прикладної Радіоелектроніки

До захисту допущено:

Зав. Кафедрою

 Андрій МОВЧАНЮК

«__» _____ 20__ р.

Дипломний проєкт

на здобуття ступеня бакалавра

за освітньо-професійною програмою «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки» за спеціальністю 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

на тему: Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача

Виконав (-ла):

студент (-ка) IV курсу, групи РЕ-12

Петруненко Олександр Валерійович

Прізвище, ім'я, по батькові



Керівник: доцент, к.т.н., Приходько Ірина Олександрівна

Посада, науковий ступінь, вчене звання

Прізвище, ім'я, по батькові



Рецензент: доц., к.т.н. каф. РТС, Катін Павло Юрійович

Посада, науковий ступінь, вчене звання,

Прізвище, ім'я, по батькові

Засвідчую, що у цьому дипломному проєкті немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент (-ка) _____



Київ – 2025 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Радіотехнічний факультет

Кафедра радіоприймання та оброблення сигналів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 172 «Телекомунікації та радіотехніка»

Освітня програма – «Інтелектуальні технології радіоелектронної техніки»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Зав. кафедрою

 Андрій МОВЧАНЮК

«___» _____ 20__ р.

ЗАВДАННЯ

на дипломний проєкт студенту

Петруненку Олександр Валерійовичу

1. Тема проєкту «Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача»

2. Керівник проєкту Приходько Ірина Олександрівна, доцент, к.т.н., затверджені наказом по університету від «29» травня 2025 р. №1840-с

Строк подання студентом проєкту 10 червня 2025 року

3. Вихідні дані до проєкту: Напруга 12 та 5 В, струм до 2 А, можливість підключення через Wi-Fi для отримання інформації, вимірювання маси філаменту на котушці.

4. Зміст пояснювальної записки: 1) Основні положення; 2) Створення сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача; 3) Розробка корпусу сушарки.

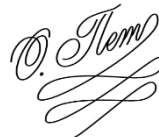
5. Перелік графічного матеріалу (із зазначенням обов'язкових креслеників, плакатів, презентацій тощо): схема структурна, схема електрична принципова, зображення трасування друкованої плати, складальний кресленик пристрою, зображення готового пристрою, презентація 13 сторінок.

6. Дата видачі завдання 14 квітня 2025 року

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проєкту	Термін виконання етапів проєкту	Примітка
1	Огляд існуючих рішень	14.04.25 – 06.05.25	
2	Розробка та аналіз завдання на проєкт	07.05.25 – 10.05.25	
3	Розробка функціональної схеми та вибір компонентів	11.05.25 – 18.05.25	
4	Розробка схеми електричної принципової	19.05.25 – 23.05.25	
5	Розробка друкованої плати	24.05.25 – 29.05.25	
6	Розробка конструкторської документації	30.05.25 – 05.06.25	
7	Оформлення текстової та графічної документації	06.06.25 – 09.06.25	

Студент



Олександр ПЕТРУНЕНКО

Керівник



Ірина ПРИХОДЬКО

АНОТАЦІЯ

Дипломний проект на тему «Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача» виконано на 75 сторінках, що включають 58 ілюстрацій, 6 таблиць, 5 додатків, 30 бібліографічних посилань.

Пояснювальна записка містить 3 Розділи: Розділ 1 «Основні положення», Розділ 2 «Створення сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача», Розділ 3 «Розробка корпусу сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача» і графічний матеріал – А3 Електрична принципова схема пристрою, А3 Структурна схема, А3 Складальний кресленик пристрою.

Метою даного проекту є розробка сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача.

Для вирішення поставленої мети було проаналізовано існуючі рішення, прилади з аналогічною функціональністю, переваги та недоліки кожного з них, зручність використання та інші фактори.

Ключові слова : сушильна установка, філамент, 3D-друк, ESP32, контроль вологості, датчик температури, осушування полімеру, маса матеріалу, інформування користувача, автоматизоване керування.

ANNOTATION

The graduation project on the topic “Drying unit for filament with mass control and user notification functions” consists of 75 pages, including 58 illustrations, 6 tables, 5 appendices, and 30 bibliographic references.

The explanatory note contains 3 sections: Section 1 “Basic provisions”, Section 2 “Creation of a drying unit for filament with mass control and user notification functions”, Section 3 “Development of the housing for a drying unit for filament with mass control and user notification functions” and graphic material – A3 Electrical schematic diagram of the device, A3 Structural diagram, A3 Assembly drawing of the device.

The purpose of this project is to develop a drying unit for filament with a mass control and user notification function.

To achieve this goal, existing solutions, devices with similar functionality, the advantages and disadvantages of each of them, ease of use, and other factors were analysed.

Keywords: drying unit, filament, 3D printing, ESP32, humidity control, temperature sensor, polymer drying, material weight, user notification, automated control.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
до дипломного проекту

на тему: «Сушильна установка для філаменту з функцією контролю
маси та інформування користувача»

Київ — 2025 року

ЗМІСТ

Перелік скорочень.....	4
ВСТУП	5
1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ.....	6
1.1 Основні принципи і особливості сушіння філаменту для 3Д-друку6	
1.1.1 Класифікація сушильних установок	6
1.1.2 Будова та принцип дії сушарки	8
1.1.3 Характеристики й функціонал.....	10
1.1.4 Застосування приладу.....	12
1.1.5 Сушарки: основні види.....	14
1.2 Характеристика аналогів пристрою	18
1.2.1 Сушарка Eibos Cyclopes	18
1.2.2 Сушильна установка eSun eBOX.....	19
1.2.3 Creality Space Pi Filament Dryer	21
1.3 Висновки до розділу	22
2 СТВОРЕННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФІЛАМЕНТУ З ФУНКЦІЄЮ КОНТРОЛЮ МАСИ ТА ІНФОРМУВАННЯ КОРИСТУВАЧА	23
2.1 Огляд комплектуючих для сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача	24
2.1.1 Живлення 12 В з понижуючим перетворювачем.	25
2.1.2 Модуль керування.....	25
2.1.3 Звукова індикація.....	26

					PE12.421413.001 ПЗ			
ЗМ.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата	Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача	Літ.	Лист	Листів
Розробив	Петруненко О.В.						1	75
Перевірів	Приходько І.О.							
Н. Контр.	П.І.Б.							
Затвердив	П.І.Б.					PE-12 РТФ		

2.1.4 Керування	27
2.1.5 Сенсори температури та вологи	27
2.1.6 Таймер	29
2.1.7 Вентилятор.....	29
2.1.8 Нагрівальний елемент.....	30
2.1.9 Мосфет	30
2.1.10 Екран	31
2.1.11 Тензодатчики.....	32
2.1.12 Адаптер I2C-LCD	32
2.2 Схема електрична принципова	33
2.3 Розроблення друкованої плати	34
2.3.1 Визначення габаритів друкованої плати, параметрів друкованого монтажу	34
2.3.2 Розрахунок ширини друкованих провідників.....	36
2.3.3 Трасування плати	38
2.4 Розрахунки працездатності	39
2.4.1 Розрахунок надійності.....	39
2.4.2 Механічні розрахунки	51
2.5 Висновки до розділу	53
3 РОЗРОБКА КОРПУСУ СУШИЛЬНА УСТАНОВКА ДЛЯ ФІЛАМЕНТУ З ФУНКЦІЄЮ КОНТРОЛЮ МАСИ ТА ІН-ФОРМУВАННЯ КОРИСТУВАЧА	54
3.1 Розробка корпусу	54

3.2 Опис та рендери корпусу	54
3.3 Висновки до розділу	58
ВИСНОВКИ.....	59
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ.....	60
Додаток А. Технічне завдання	64
Додаток Б. Схема електрична принципова	68
Додаток В. Трасування друкованої плати	69
Додаток Г. Рендери корпусу	70
Додаток Д. Перелік елементів	73
Додаток Е. Складальний кресленик	75

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

БПЛА — Безпілотний Літальний Апарат

ЗСУ — Збройні Сили України

ІЧ — ІнфраЧервоний

ТЕН — Трубчастий Електронагрівач

ЦмП — Цифровий мікропроцесор

ПК — Персональний комп'ютер

AMS — Automated multi-material system

CE — Conformité Européenne

FCC — Federal Communications Commission

RoHS — Restriction of Hazardous Substances

REACH — Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

					<i>РЕ12.421413.001 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		4

ВСТУП

У сучасних умовах, коли країна переживає важкий період війни, все більше людей шукають можливості для волонтерства або створення корисної продукції, у компаніях з виготовлення БПЛА, для ЗСУ. Одним із таких напрямів є 3D-друк, який активно використовується як в побуті, так і у волонтерських ініціативах. З його допомогою виготовляють певні запчастини БПЛА. Проте для якісного друку важливо забезпечити належні умови зберігання та використання пластику — основного витратного матеріалу для 3D-принтерів.

Філамент[1] гігроскопічний, тобто активно вбирає вологу з повітря, що може призвести до погіршення якості друку та поганих характеристик готової деталі або кінцевого продукту. Саме тому сушильна установка для розхідників стала незамінним пристроєм для кожного, хто займається 3D-друком[2]. Окрім сушіння, не менш важливо мати можливість контролювати залишки, адже це дозволяє заздалегідь планувати друк і уникати його зупинки через нестачу матеріалу.

Більшість існуючих сушильних установок не мають функції визначення залишкової маси нитки, що створює певні незручності, які можуть призвести до неочікуваних зупинок процесу, або навіть браку. Тому це є актуальною розробку багатофункціонального пристрою, який би поєднував функції сушіння матеріалу, вимірювання його маси в реальному часі та інформування користувача про критичні значення.

Метою даного проекту є розробка сушильної установки для філаменту з вбудованими вагами та функцією інформування користувача про стан матеріалу.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		5

1 ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

1.1 Основні принципи і особливості сушіння філаменту для 3Д-друку

Сушіння філаменту є важливим етапом підготовки матеріалу для 3Д-друку, оскільки більшість термопластичних ниток мають властивість активно поглинати вологу з навколишнього середовища. Навіть незначна кількість води всередині матеріалу під час екструзії може призвести до утворення бульбашок, погіршення адгезії шарів, волосіння й зниження механічної міцності надрукованих виробів. Щоб уникнути цих дефектів, нитка піддається сушінню за контрольованих температур, часто із застосуванням конвекції, осушеного повітря або навіть вакууму. Правильно підібраний режим сушіння залежить від типу матеріалу (PLA, ABS, PETG, нейлон, PEEK тощо) та забезпечує стабільність якості друку й довговічність виробів.

1.1.1 Класифікація сушильних установок

Основний спосіб сушіння філаменту – нагрівання повітря в контрольованому середовищі, у якому буде знаходитися пластик. Сушарки можна розділити на 5 типи (Рисунок 1.1):

- a) Звичайні (пасивне нагрівання);
- b) Конвекційні (активна циркуляція повітря);
- c) З осушувачем повітря (десікаторні установки);
- d) Інфрачервоні (ІЧ-нагрівач);
- e) Промислові (гідроохолоджувач + зони контролю).

У нашому випадку добре підходять «Конвекційні» або «З осушувачем повітря», оскільки вони не є складними у використанні та розробці і підходять для друкарів, які будуть працювати в межах волонтерства або виробництва БПЛА.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		6



Рисунок 1.1 — Класифікація установок

У сучасних технологічних процесах, особливо при 3D-друку та виробництві полімерних виробів, виникає потреба у видаленні вологи з матеріалів для забезпечення їхньої стабільності, міцності та високої якості друку. Для цього використовують різні за принципом роботи сушильні установки.

Одним із найпоширеніших типів є конвекційні сушарки[3], які здійснюють сушіння матеріалів завдяки активній циркуляції гарячого повітря. Основною особливістю конвекційних сушильних установок є використання потоку нагрітого повітря, який омиває поверхню філаменту або іншого матеріалу, прискорюючи випаровування вологи. Температура та швидкість повітряного потоку є ключовими характеристиками таких сушарок. Конвекційні установки зазвичай забезпечують рівномірне прогрівання всього об'єму камери, що робить їх ефективними для сушіння широкого спектра матеріалів. Однак при неправильному налаштуванні температури існує ризик перегріву делікатних полімерів.

Іншим типом сушильних систем є установки з осушувачем повітря, які забезпечують особливо ефективне видалення вологи навіть при відносно низьких температурах. Принцип їхньої роботи полягає у створенні середовища з дуже низьким рівнем відносної вологості за допомогою спеціальних осушувальних матеріалів(десікаторів)[4], таких як силікагель або молекулярні сита. Деякі установки мають систему регенерації осушувача, що дозволяє підтримувати постійно низьку вологість без частого обслуговування. Сушарки з осушувачем повітря дозволяють уникнути ризику перегріву філаменту та є незамінними для роботи з гігроскопічними матеріалами, такими як Нейлон, PETG

або TPU/Elastan. Їх основними характеристиками є рівень залишкової вологості повітря, температура сушіння та об'єм камери. Завдяки стабільному мікроклімату всередині, такі установки гарантують якісну підготовку матеріалу навіть для відповідальних інженерних задач.

Основними особливостями «сушарок» є температурний діапазон та його регулювання, час сушки, ємність, герметичність, керування та певні додаткові функції. Для середньостатистичного друкаря вибірка матеріалів містить у собі PLA, PETg, HIPS та ABS. Більш досвідчені користувачі можуть переходити на TPU/Elastan, ASA або ж Нейлон.

1.1.2 Будова та принцип дії сушарки

У процесі сушіння пластику для 3D-друку конвекційні сушарки (Рисунок 1.2) працюють за принципом обдуву матеріалу гарячим повітрям. Основою конструкції є камера сушіння, всередині якої розміщуються філамент. Під камерою встановлений нагрівальний елемент — зазвичай це трубчастий електронагрівач (ТЕН), що нагріває повітря. Нагріте повітря циркулює по камері за допомогою вентилятора, забезпечуючи рівномірний прогрів матеріалу. Температуру контролює термометр або температурний сенсор, який передає дані на контролер, що підтримує заданий режим. Через спеціальні отвори у корпусі вологе повітря виводиться назовні, що прискорює процес сушіння. Камера часто має теплоізоляцію для підвищення енергоефективності та стабільності роботи.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		8

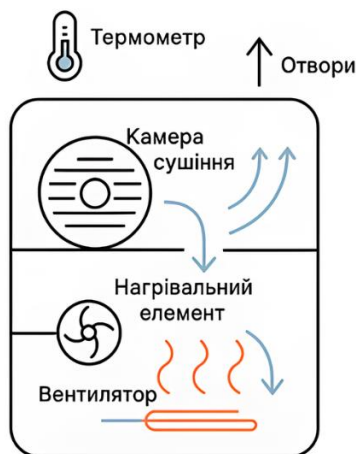


Рисунок 1.2 — Схематичне креслення будови конвекційної сушарки

Десікаторні сушарки (Рисунок 1.3) мають дещо інший принцип дії, орієнтований на максимальне видалення вологи без значного нагрівання матеріалу. Усередині герметичної камери розміщується філамент, а через неї постійно циркулює надзвичайно сухе повітря. Це повітря осушується за допомогою спеціального осушувача, наприклад, силікагелю або молекулярного сита. Коли осушувач насичується вологою, він регенерується за допомогою окремого нагрівача, що випаровує зібрану воду й дозволяє осушувачу працювати далі. Для контролю процесу використовуються гігрометри, які відстежують рівень вологості та забезпечують точну підтримку умов сушіння. Такий підхід дозволяє сушити навіть найчутливіші до вологи полімери без ризику їх перегріву чи пошкодження.

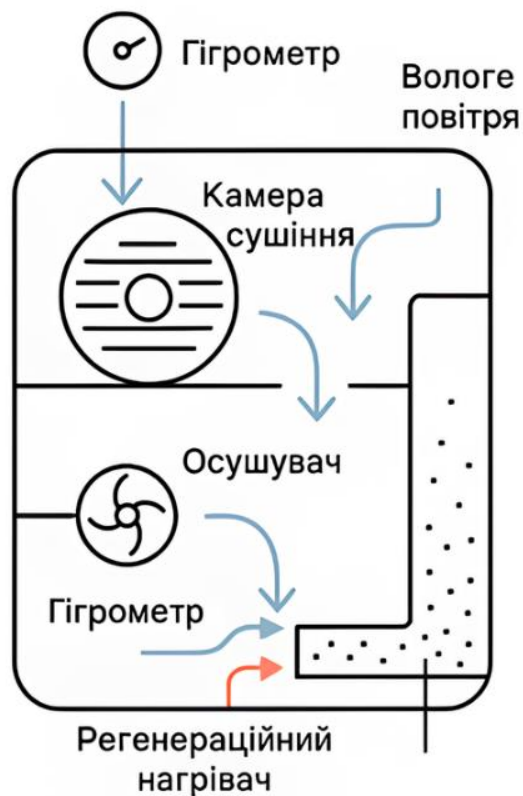


Рисунок 1.3 — Схематичне креслення внутрішньої будови десікаторної сушарки

1.1.3 Характеристики й функціонал

При виборі сушильної установки необхідно враховувати наступні технічні параметри:

- а) Діапазон робочої температури;
- б) Швидкість сушки;
- с) Точність та стабільність підтримки температури;
- д) Розмір та місткість;
- е) Можливість друку під час сушки;
- ф) Керування;
- г) Матеріал установки;
- h) Захист від перегріву;

Дуже часто сушарки мають додаткові функції для зручності використання так, як:

- а) Таймер автоматичного вимкнення;
- б) Профілі для різних типів філаменту;
- с) Підтримка Bluetooth та/або Wi-Fi (для моніторингу з телефону/ПК);

І характеристики, і функціонал впливають на кінцеву вартість пристрою.

Як ми можемо дізнатися з інтернет-ресурсів, основний температурний діапазон — 40 – 85 °С, а період сушіння від 4 годин. Стандартні варіації котушок для філаменту це намотки на 0,85/1 та 2,5/3 кг, тому при розробці сушильної установки потрібно буде враховувати даний пункт, оскільки більшість сушарок зроблені для зберігання кілограмових котушок, а на більші варіанти — немає у продажу, або ж виготовляють тільки під замовлення.

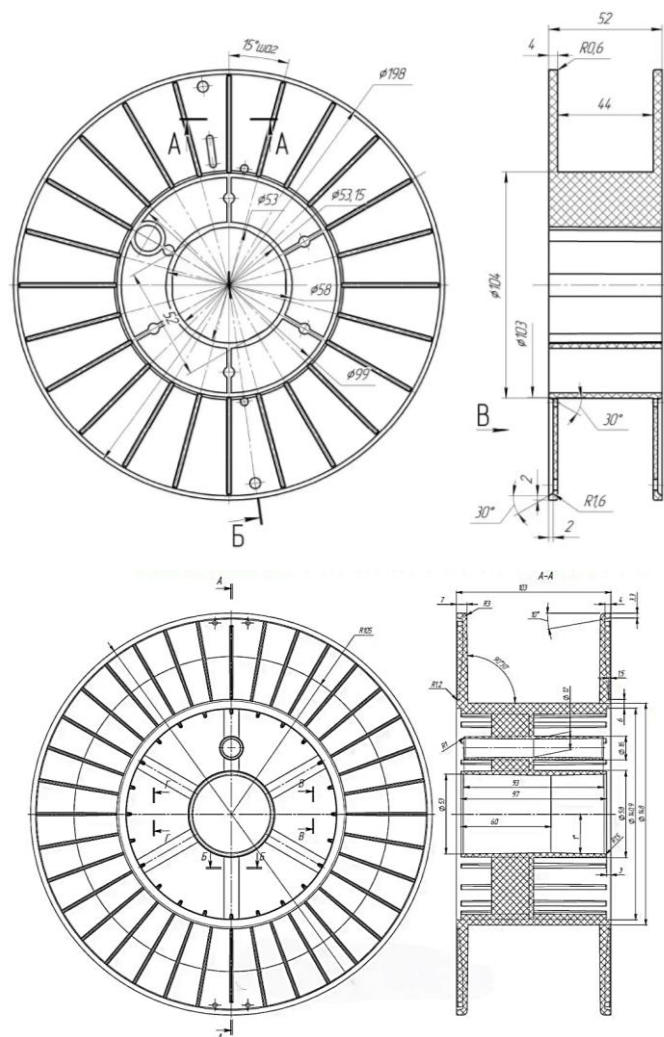


Рисунок 1.4 — Розміри котушок намоткою 0,85 та 3 кг відповідно[5][6]

Герметичність також є важливим моментом при висушуванні пластику, адже потрапляння вологого повітря у камеру буде погіршувати та сповільнювати процес сушіння. Також отримання інформації та контроль над вологістю та температурою всередині камери є важливим для користувача та самого матеріалу для друку.

Додаткові функції представляють можливість друку під час сушіння, тобто наявність вихідного отвору не тільки для вологого повітря, а й для філаменту. Також, як вже було зазначено раніше, вбудований вимірювач вологості, для контролю процесу сушіння та розуміння, чи готовий пластик до використання. Непоганою функцією може бути автоматичне підтримання низької вологості після сушіння.

1.1.4 Застосування приладу

На сьогоднішній день застосування сушильних установок для філаменту почало збільшуватися через нинішні потреби в компаніях по виготовленню БПЛА та в лавах ЗСУ, оскільки багато деталей можливо створити у певних CAD програмах та потім роздрукувати, не кажучи про все сторонність моделювання та різноманітність матеріалів для друку.

Дані пристрої застосовуються у таких напрямках:

а) 3D-друк у побутових умовах

- 1) Використовуються для підготовки до друку найпоширеніших матеріалів, таких як PLA, PETG, ABS.

— Перед друком декоративних моделей або корпусів для електроніки користувач сушить PLA у простій конвекційній сушарці при 45–50 °C.

- 2) Застосовуються для роботи з матеріалами, які особливо чутливі до вологи (наприклад, TPU, Nylon).

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		12

— Для друку гнучких ущільнювачів чи механічних деталей із нейлону використовують десікаторну сушарку, яка тримає вологість нижче 10%.

b) Промисловий 3D-друк

1) У промислових умовах використовують для сушіння великих обсягів філаменту одночасно.

— Відразу кілька котушок ABS або PETG сушаться перед багатогодинним друком партій деталей для машинобудування.

2) Підходять для спеціалізованих інженерних полімерів: PEEK, Ultem, Nylon 12.

— Перед друком запчастин для авіації або медицини філамент сушиться у сушарках з контрольованою вологістю до <5%.

c) Лабораторні дослідження та прототипування

1) Використовуються для базової підготовки матеріалів у прототипуванні.

— При створенні прототипів корпусів для нових приладів або дослідних моделей студентська лабораторія використовує доступні конвекційні сушарки.

2) Застосовуються для експериментального друку із новими волокнами або сумішами.

— Під час розробки нових композитних матеріалів (карбон-нейлон) сушіння здійснюється у десікаторних установках для збереження їх властивостей.

d) Друк спеціалізованих виробів для медицини

1) Можуть використовуватися для сушіння PLA при створенні тимчасових імплантів, моделей кісток.

— Перед друком моделей черепа для планування операцій.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		13

2) Обов'язкові при підготовці стерильних або біосумісних матеріалів (наприклад, полієфіркетону PEEK).

— Сушіння високотехнологічного філаменту для друку персоналізованих імплантів.

е) Виробництво та підготовка філаменту

1) Під час виробництва матеріалу (екструзія) конвекційні сушарки використовуються для сушіння гранул перед плавленням.

— Сушіння гранул PETG перед їх екструзією у виробничому цеху.

2) Застосовуються для преміальних продуктів, де важлива ідеально низька вологість гранул або нитки.

— Підготовка нейлону або карбоновмісних композитних ниток перед упаковкою.

1.1.5 Сушарки: основні види

Існують різні види сушильних установок

а) Настільні сушарки

Це компактні пристрої, розраховані на 1–2 котушки. Зазвичай мають герметичну камеру з нагрівачем, вентилятором і контролером температури. Можуть мати окремі відсіки для осушувача (якщо поєднують типи). Деякі моделі дозволяють подавати філамент безпосередньо в екструдер через отвір — навіть не витягуючи котушку.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		14



Рисунок 1.5 — Настільна «Sunlu FilaDryer S2»[7]

б) Промислові сушарки-гідробокси

Це великогабаритні шафи або герметичні камери, розраховані на кілька котушок філаменту або навіть сушіння полімерних гранул перед екструзією. Всередині розміщується активна система нагріву, потужна вентиляція, багатозонний контроль температури, часто — і система осушення повітря.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		15



Рисунок 1.6 — Промислова «Thought3D Drywise Filament Dryer»[8]

с) Мобільні сушарки

Це невеликі портативні пристрої, які можна легко переносити або встановити поруч із різними принтерами. Вони зазвичай обладнані колесами або ручками, мають середній об'єм. Конструкція нагадує переносну шафу або тумбу з герметичними дверцятами.



Рисунок 1.7 — Мобільна «Flashforge Filament Drying Station»[9]

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		16

d) Вбудовані сушарки в 3D-принтери

Ці сушарки є інтегрованою частиною 3D-принтера. Вони зазвичай виконують функцію зберігання і підготовки філаменту в реальному часі — подаючи вже висушений матеріал безпосередньо до екструдера. Оснащуються нагрівом, датчиками температури й вологості.

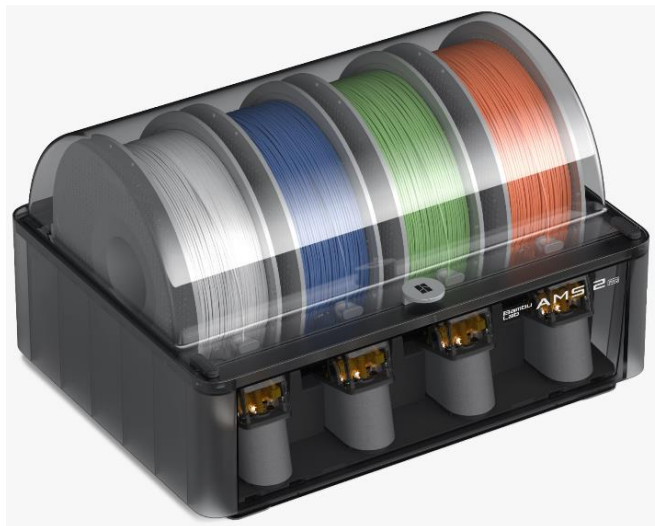


Рисунок 1.8 — Мульти-матеріальна система AMS 2 Pro[10]

е) Камерні вакуумні сушарки

Це спеціалізовані герметичні установки, де тиск всередині суттєво знижується (вакуум), що дозволяє сушити філамент при нижчих температурах, без окиснення і перегріву. Часто використовуються в лабораторіях або при роботі з дорогими або чутливими до перегріву матеріалами.



Рисунок 1.9 — Вакуумна «LabVac»[11]

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		17

1.2 Характеристика аналогів пристрою

При аналізі ринкових аналогів було виявлено лише одна сушарка, у якій є функція вимірювання маси матеріалу, але функціонал гірший чим в інших пристроях. У більшості сушильних установок не передбачуються заміри залишків нитки. У подальших пунктах буде розглянуті сушильні установки, які користуються попитом серед користувачів.

1.2.1 Сушарка Eibos Cyclopes

Сушарка Eibos Cyclopes[12] (Рисунок 1.10) поєднує в собі легкість користування та ефективність сушіння.



Рисунок 1.10 — Сушарка Eibos Cyclopes

Цей пристрій являє собою високоякісну сушильну установку для 3D-друку, яка поєднує функції зберігання, сушіння та подачі філаменту. Вона оснащена потужним РТС-нагрівачем, вбудованим вентилятором для рівномірної циркуляції гарячого повітря та реальним моніторингом вологості, що за-

безпечує ефективне видалення вологи з матеріалу під час друку. Завдяки великій місткості та підтримці різних діаметрів нитки, Eibos Cyclopes ідеально підходить як для домашніх майстерень, так і для професійних 3D-друкарських студій.

Основні характеристики:

- a) *Діапазон робочої температури:* від 40 °C до 70 °C.
- b) *Швидкість сушіння:* залежить від типу філаменту. Наприклад, для PLA рекомендується сушити при 40–45 °C протягом ≥ 4 годин, для нейлону — при 60-65 °C протягом ≥ 12 годин.
- c) *Точність та стабільність підтримки температури:* $\pm 2^{\circ}\text{C}$, забезпечується за допомогою вбудованого датчика температури та PID-контролера.
- d) *Розмір та місткість:* розміри 213×280×305 мм; вміщує дві катушки діаметром до 217 мм і шириною до 80 мм або одну катушку шириною до 174 мм.
- e) *Можливість друку під час сушки:* так, завдяки наявності 10 вихідних отворів для нитки, розташованих на верхній, передній та задній частинах корпусу.
- f) *Керування:* цифровий дисплей з фізичними кнопками; налаштування температури та таймера (від 1 хвилини до 24 годин або без обмеження).
- g) *Матеріал установки:* вогнестійкий пластик, що відповідає стандартам безпеки CE, FCC, RoHS та REACH.
- h) *Захист від перегріву:* наявний; забезпечується термостатом та вогнестійким корпусом.

Беручи до уваги вартість даного пристрою, у середньому 6700 грн, вона повністю «відпрацьовує» свою ціну.

1.2.2 Сушильна установка eSun eBOX

eSun eBOX[13] (Рисунок 1.11) — це одна з небагатьох сушильна установка, яка оснащена контролем ваги нитки.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		19



Рисунок 1.11 — Сушильна установка eSun eBOX

Сушарка для філаменту eSUN eBOX — це багатофункціональний пристрій, призначений для зберігання, сушіння та подачі під час 3D-друку. Вона забезпечує підтримку стабільної температури та вологості, що дозволяє зменшити вологість матеріалу та покращити якість друку. Пристрій оснащений вбудованими вагами для контролю залишку розхідників, а також має дисплей для налаштування температури та таймера.

Основні характеристики:

- а) *Діапазон робочої температури:* від 15 °C до 80 °C.
- б) *Швидкість сушіння:* залежить від типу та встановленої температури.
- в) *Точність та стабільність підтримки температури:* забезпечується за допомогою вбудованого нагрівача потужністю 36 Вт; точність вагів — $\pm 0,02$ кг.
- г) *Розмір та місткість:* розміри 215×104×238,5 мм; вміщує котушки діаметром до 200 мм і шириною до 73 мм.

- е) *Можливість друку під час сушки:* так, завдяки наявності отворів для подачі філаменту безпосередньо до принтера.
- ф) *Керування:* цифровий дисплей з можливістю налаштування температури, таймера (до 10 годин) та дізнатися вагу нитки.
- г) *Матеріал установки:* вогнестійкий пластик з прозорою кришкою для спостереження за розхідником.
- h) *Захист від перегріву:* наявний, забезпечується термостатом та вогнестійким корпусом.

Ціна даного пристрою близьиться до 4500 грн, за таку вартість сушарка надає гарний функціонал, але рівномірність нагріву нитки та легкість керування має певні недоліки.

1.2.3 Creality Space Pi Filament Dryer

Дана сушка (Рисунок 1.12) є «золотою серединою» серед інших, адже вартість невелика, а ефективність та ергономічність — висока.



Рисунок 1.12 — Creality Space Pi Filament Dryer[14]

Creality Space Pi Filament Dryer — це сучасна сушарка для розхідників, яка забезпечує ефективне сушіння завдяки циркуляції гарячого повітря на 360°, що покращує якість 3D-друку. Вона оснащена потужним РТС-нагрівачем, сенсорним екраном для зручного керування та підтримує до 12 типів філаменту.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		21

Основні характеристики:

- a) *Діапазон робочої температури:* від 45 °С до 70 °С.
- b) *Швидкість сушіння:* залежить від типу філаменту; наприклад, для PLA рекомендується сушити при 50 °С протягом 4–8 годин, для PA — при 65 °С протягом 12 годин.
- c) *Точність та стабільність підтримки температури:* забезпечується за допомогою вбудованого РТС-нагрівача потужністю 145 Вт та вентилятора для рівномірної циркуляції повітря.
- d) *Розмір та місткість:* розміри 315×125×300 мм; вміщує котушки діаметром до 200 мм і шириною до 73 мм.
- e) *Можливість друку під час сушки:* так, завдяки наявності отвору для подачі нитки безпосередньо до принтера.
- f) *Керування:* 3,7-дюймовий сенсорний екран з можливістю налаштування температури, таймера (від 0 до 48 годин) та вибору типу матеріалу.
- g) *Матеріал установки:* вогнестійкий пластик з прозорою кришкою для спостереження за філаментом.
- h) *Захист від перегріву:* наявний, забезпечується термостатом та вогнестійким корпусом.

1.3 Висновки до розділу

У першому розділі було досліджено основні принципи сушіння філаменту для 3D-друку, проаналізовано сучасні типи сушильних установок та особливості їхньої будови. Було виокремлено ключові технічні характеристики, які впливають на ефективність сушіння, такі як температурний режим, вологість, герметичність та зручність керування. Також було розглянуто найбільш поширені приклади готових пристроїв, проаналізовано їх переваги й недоліки, що дозволило визначити основні вимоги до майбутньої розробки сушильної установки з розширеним функціоналом.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		22

2 СТВОРЕННЯ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФІЛАМЕНТУ З ФУНКЦІЄЮ КОНТРОЛЮ МАСИ ТА ІНФОРМУВАННЯ КОРИСТУВАЧА

В даному розділі представлено структурну схему сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача (Рисунок 2.1). З блоку живлення 12 В подається електроживлення на всі компоненти сушильної установки. Живлення напругу надходить на вентилятор 12 В, а також на понижуючий перетворювач напруги 12→5 В, який живить мікроконтролер та підключені до нього низьковольтні елементи. Центральним елементом системи є мікроконтролер, що виконує функції обробки даних від сенсорів і керування виконавчими пристроями. Для моніторингу умов усередині камери використовується сенсор температури камери, сенсор температури нагрівального елемента та сенсор вологості повітря, які передають дані до контролера. Через MOSFET мікроконтролер керує увімкненням і вимкненням нагрівача відповідно до встановлених умов. Для індикації завершення сушіння або виникнення аварійних ситуацій ЦмП активує світлове або звукове оповіщення. Для керування параметрами сушіння використовується енкодер-модуль, а часова логіка задається через модуль реального часу. Інформація про поточний стан процесу виводиться на екран. Окрім цього, до мікроконтролера підключено тензодатчики, що дозволяють зчитувати вагу філаменту всередині сушильної камери, забезпечуючи контроль витрати матеріалу. Уся система працює узгоджено для забезпечення стабільного, безпечного та ефективного процесу сушіння філаменту перед 3D-друком.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		23

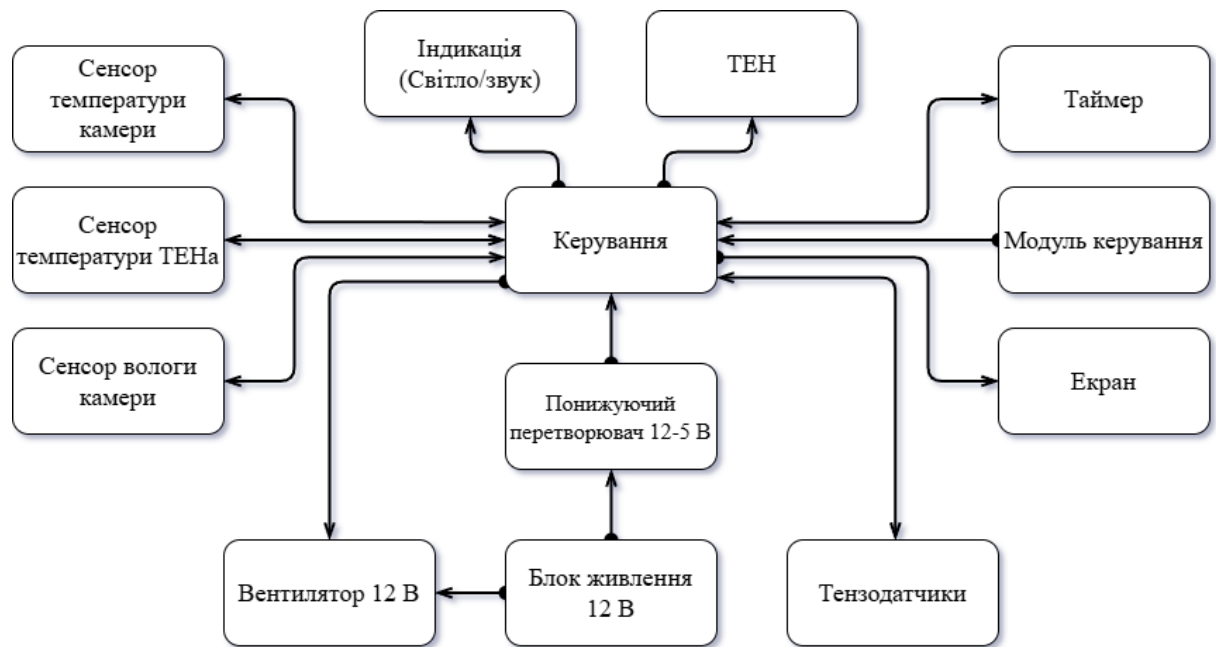


Рисунок 2.1 — Структурну схема сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача

2.1 Огляд комплектуючих для сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача

Для розробки сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача потрібні наступні компоненти:

- Блок живлення 12 В;
- Понижуючий перетворювач 12→5 В;
- Керування;
- Світлова та звукова індикація;
- Сенсори температури та вологи;
- Таймер
- Модуль керування
- Екран
- Нагрівальний елемент
- Мосфет (для керування нагрівачем)

Варто зауважити, що принцип роботи даного пристрою базується на принципі конвекційної сушильної установки.

2.1.1 Живлення 12 В з понижуючим перетворювачем.

Для живлення буде використана схема з входом на DC 12 В та понижуючим перетворювачем з 12 до 5 В (Рисунок 2.2). Пониження напруги відбувається через DC-DC модуль HX-MINI-360, який отримує на вході 12 В та за допомогою імпульсної схеми генерує стабільні 5 В на виході для ESP32 і периферії. Модуль містить керуючу схему та індуктивність, що забезпечує високу ефективність перетворення і стабільну регуляцію вихідної напруги під навантаженням. Для захисту від перевантажень і коротких замикань на вході використовується запобіжник 2 А. Також встановлений діод зворотного включення FR307, який захищає схему від неправильної полярності: при зворотному підключенні діод замикає лінію живлення на «землю», викликаючи спрацювання запобіжника і тим самим оберігаючи інші компоненти.

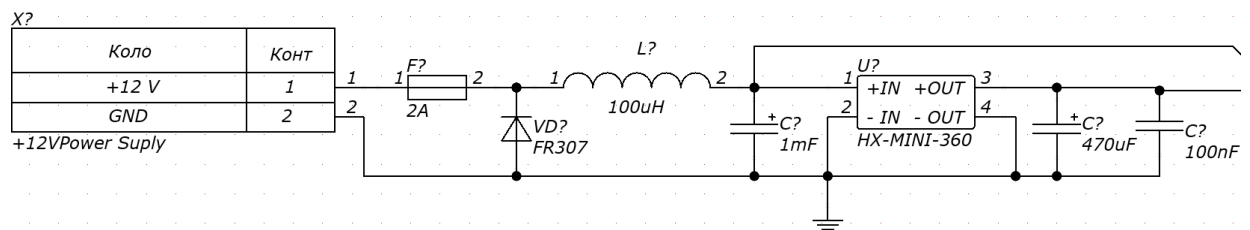


Рисунок 2.2 — Живлення та понижуючий перетворювач

2.1.2 Модуль керування

Керування буде відбуватися через Модуль КУ-040 енкодера ЕС11 (Рисунок 2.3). Даний елемент був обраний через свою зручність підключення та простоту у використанні. Модуль енкодера має 20 фіксованих позицій на один оборот валу. Сенсор кута повороту має 3 контакти, позначені буквами А(CLK), В(DT) і С(GND). Принцип роботи енкодера ґрунтується на зміні положення перемикачів, один з яких відповідає за з'єднання контактів А і В, а другий – за В і С. Кожна зміна положення осі датчика змінює стан перемикачів.

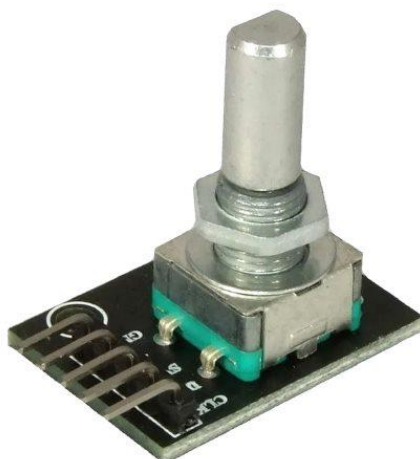


Рисунок 2.3 — KY-040 енкодера EC11[15]

2.1.3 Звукова індикація

Для звукової індикації було створену таку схему (Рисунок 2.4). Вона працює з використанням п'єзоелектричного зумера (BZ1), який активується через транзисторний ключ. Така схема використовується, щоб сигналізувати про завершення сушіння або про аварійну ситуацію, наприклад, перевищення температури чи зникнення живлення.

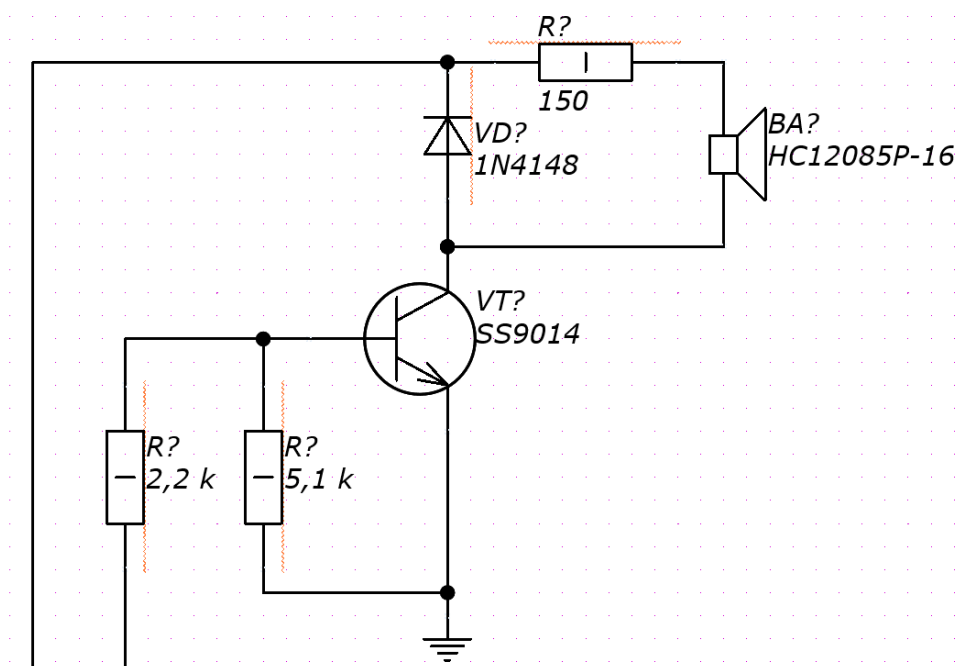


Рисунок 2.4 — Схема звукової індикації

2.1.4 Керування

Основним елементом даної схеми буде виконувати роль мікропроцесор ESP32. Саме такий елемент було обрано оскільки сушильна установка повинна мати дистанційне/безпроводне інформування користувача через Wi-Fi, а даний компонент має такий модуль. Також у даному пристрої не буде виконуватися складних обрахунків/процесів, тому цей цифровий модуль є найбільш підходящим у даній схемі.

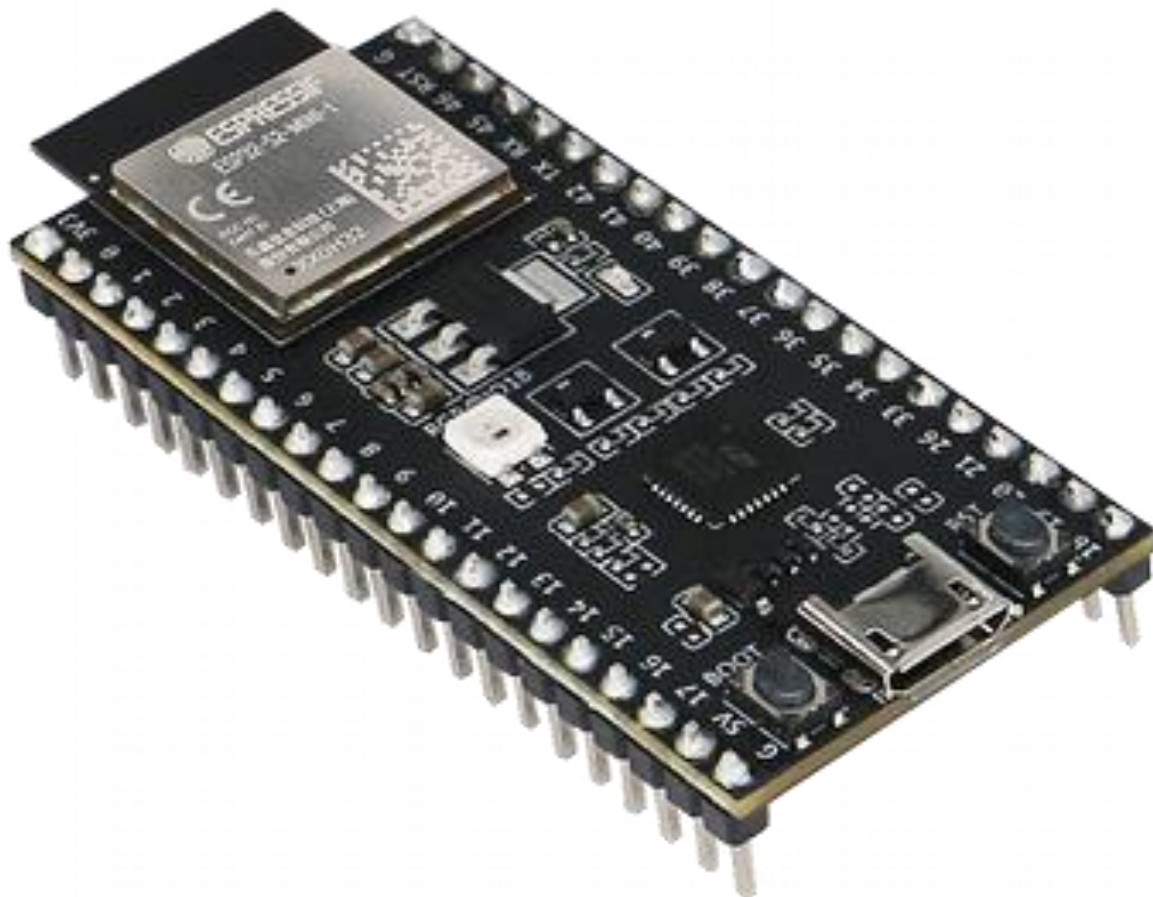


Рисунок 2.5 — Мікропроцесор ESP32-S2-DevKitM-1[16]

2.1.5 Сенсори температури та вологості

Для контролю температури і вологості у камері з філаментом та самого нагрівального елемента обрано 2 сенсора температури та 1 вологості. За зчитування температури в камері з ниткою буде відповідати сенсор DS18B20[17] (Рисунок 2.7), температура нагрівального елемента — MAX6675[18] (Рисунок 2.8).

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		27



Рисунок 2.6 — Датчик температури DS18B20 в захищеному корпусі

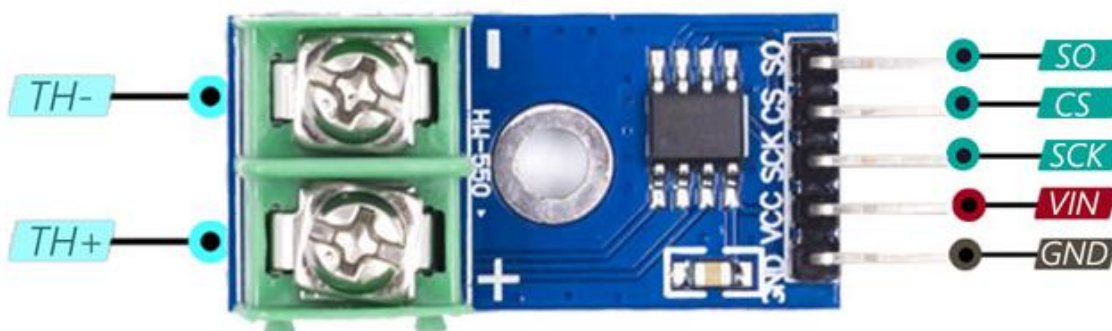


Рисунок 2.7 — Модуль MAX6675 для вимірювання температури

На рахунок вологості повітря в камері з матеріалом для друку, за це буде відповідати сенсор SHT31[19] (Рисунок 2.9).



Рисунок 2.8 — Вимірювач вологи SHT31

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE12.421413.001 ПЗ

Лист

28

2.1.6 Таймер

Для реалізації часу процесу сушіння буде використано модуль годинника реального часу DS1307[20] (Рисунок 2.10). Він буде використовуватися як таймер для контролю тривалості процесу сушки, адже це є невід’ємною частиною пристрою. Це дозволяє точно фіксувати момент початку й завершення сушіння, реалізовувати таймери для автоматичного вимкнення нагрівача та створювати розширену логіку роботи пристрою — наприклад, затримку запуску, нагадування або планування роботи за графіком.



Рисунок 2.9 — Модуль годинника реального часу DS1307

2.1.7 Вентилятор

Для циркуляції повітря в камері з філаментом потрібно встановити вентилятор на 12 В для прямого підключення до блоку живлення. У нашому випадку підходить вентилятор 80x80 мм (Рисунок 2.11), оскільки розмір та потужність грають роль при розробці пристрою, а дані габарити підійдуть для пристрою та не будуть заважати користувачу при експлуатації.



Рисунок 2.10 — Вентилятор 12 В 80x80 мм Chieftec Thermal Killer AF-0825S[21]

2.1.8 Нагрівальний елемент

Основоположним елементом у даному пристрої буде керамічний нагрівач, який живиться від блоку 12 В. Це буде малопотужний нагрівальний елемент, оскільки температурний режим невисокий та час на нагрівання не грає критичну роль. Завдяки своїм невеликим розмірам та стабільній роботі, він ідеально підходить для використання в сушильних установках для філаменту.



Рисунок 2.11 — Керамічний обігрівач 50 Вт 12 В кондуктивного типу[22]

2.1.9 Мосфет

Для керування вище зазначеним нагрівачем буде використовуватися Польовий транзистор АО3400 у корпусі SOT-23. Оскільки опір відкритого каналу ($R_{DS(on)}$) складає не більше 25 мОм при $V_{GS} = 4,5$ В і близько 35 мОм при $V_{GS} = 2,5$ В, що забезпечує мінімальні втрати потужності та нагрівання, а також поріг відкривання ($V_{GS(th)}$) лежить у межах 1 ... 2 В, тому при 3,3 В на затворі транзистор входить у лінійну зону насичення для надійного керування керамічним нагрівачем потужністю до 50 Вт.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		30



Рисунок 2.12 — Транзистор польовий АО3400 (SOT-23)[23]

2.1.10 *Екран*

Екран у даному пристрої буде 4,3-дюймовий дисплей Waveshare з роздільною здатністю 800×480 пікселів. У сушильній установці дисплей буде підключено до мікроконтролера ESP32 через адаптер-перехідник, що конвертує інтерфейс DSI у I2C. Це дозволяє ESP32, який не має вбудованого DSI-інтерфейсу, керувати дисплеєм та обробляти сенсорні введення через стандартний I2C-шин. Такий підхід забезпечує ефективну інтеграцію дисплея в систему та дозволяє виводити інформацію про процес сушіння філаменту.



Рисунок 2.13 — 4.3" DSI LCD дисплей 800x480 від Waveshare[24]

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		31

2.1.11 Тензодатчики

Додатковою функцією у сушильній установці є вимірювання ваги нитки на катушці для інформування користувача про залишкову кількість матеріалу. Для цього буде використовуватися датчик сили FSR402[25] (Force Sensing Resistor). Це тонкий, полімерний сенсор, що змінює свій опір залежно від прикладеної сили тиску. У схемі FSR402 прикріплюється під катушкою філаменту, яка створює навантаження на поверхню сенсора. Змінний опір перетворюється в аналогову напругу через подільник напруги, і цей сигнал зчитується аналоговим входом ESP32.



Рисунок 2.14 — датчик сили FSR402

2.1.12 Адаптер I2C-LCD

У нашій схемі адаптер PCF8574 використовується як I²C-порт-експандер для підключення сенсорного дисплея Waveshare 4.3inch DSI LCD до мікроконтролера ESP32, з огляду на те, що ESP32 не має підтримки інтерфейсу DSI, на якому працює цей дисплей. Оскільки сам дисплей передає зображення через DSI доцільно використати саме PCF8574 для розширення кількості цифрових входів/виходів ESP32.

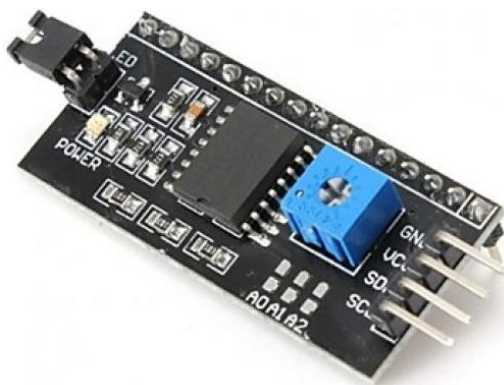


Рисунок 2.15 — Адаптер I2C для LCD дисплеїв на PCF8574[26]

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		32

2.2 Схема електрична принципова

Електрична принципова схема пристрою наведена на рис. 2.16.

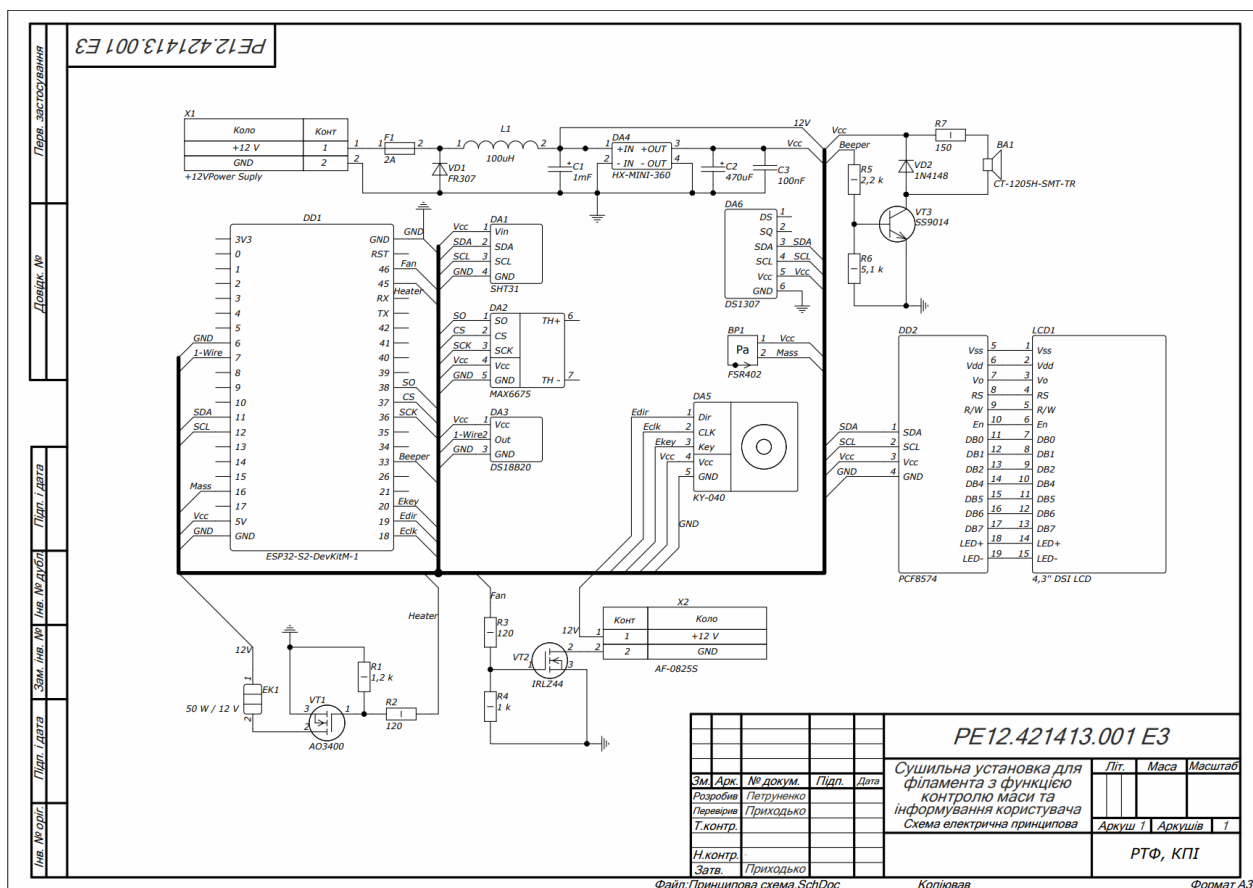


Рисунок 2.16 — Схема електрична принципова

Представлена принципова схема описує електронну частину сушильної установки для філаменту, яка побудована на основі мікроконтролера ESP32-S2-DevKitM-1 і виконує функції нагріву, вимірювання температури, вологості, маси філаменту та інформування користувача про стан сушки. Живлення подається від джерела 12 В постійного струму. Через запобіжник (F1) та діод захисту від зворотної полярності (VD1), напруга подається на фільтруючий LC-контур (L1, C1 – C3), а далі — на виконавчі елементи, зокрема вентилятор і нагрівач. Окремо через понижуючий перетворювач HX-MINI-360 формується 5 В для живлення логіки.

Керування нагрівачем на 12 В / 50 Вт (ЕК1) реалізовано через MOSFET АО3400 (VT1), керований із виходу ESP32. Додатково у схемі присутній зумер (BA1) для звукової індикації, який комутується через транзистор SS9014

Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE12.421413.001 ПЗ

Лист

33

(VT3). У якості температурних сенсорів використано DS18B20 (температура камери) та MAX6675 (контроль нагрівального елемента), обидва з'єднані відповідно через 1-Wire та SPI. Для вимірювання вологості повітря застосовується цифровий датчик SHT31, а для відстеження часу — модуль DS1307, підключений по шині I²C.

Важливою особливістю установки є наявність датчика сили FSR402 (BP1), який дозволяє визначати залишкову масу філаменту на котушці. Користувач взаємодіє з системою через енкодер KY-040, підключений до GPIO ESP32. Інформування користувача також буде виконуватися через дисплей 4.3" Waveshare DSI, керування яким організовано через порт-експандер PCF8574 (DD2), що також підключений через I²C. Для повної підтримки дисплея реалізовано логічні сигнали Enable, RS, DataBus тощо.

2.3 Розроблення друкованої плати

У даному підрозділі ми будемо розробляти друковану плату, а саме обробувати мінімальну площу плати, мінімальну ширину провідників та робити компонування та трасування елементів.

2.3.1 *Визначення габаритів друкованої плати, параметрів друкового монтажу*

Розрахунок мінімальної площі (2.1) та вибір форми плати потрібний для того, щоб плата не займала багато місця в корпусі, але також для зменшення вартості плати, покращення надійності та ефективного використання місця на самій платі для елементів.

$$S_{\text{дп}} = \sum S_{\text{мг}} + 1,5 \cdot \sum S_{\text{ср}} + \sum S_{\text{вг}} + S_{\text{кр}}; \quad (2.1)$$

де: $S_{\text{дп}}$ — мінімальна допустима площа друкованої плати; $S_{\text{мг}}$ — площа малогабаритних елементів; $S_{\text{ср}}$ — площа середньогабаритних компонентів; $S_{\text{вг}}$ — площа високогабаритних компонентів; $S_{\text{кр}}$ — площа, зарезервована для кріплення плати, зон під монтажні елементи або додаткові технічні області.

Результати розрахунку наведені на рис. 2.17

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		34

	Найменування	Площа (S)	Коефіцієнт (K)	Кількість (N)	Сума (S)
Малогабаритні елементи	Резистори 2512 (1,2 кОм; 120 Ом; 1 кОм; 2,2 кОм; 5,1 кОм; 150 Ом)	35,573	1	7	249,011
	МОСФЕТ АО3400	17,611	1	1	17,611
	3-пін роз'єм для вентилятора	33,756	1	1	33,756
	Конденсатор 1206 (100 мФ)	16,222	1	1	16,222
	Запобіжник 2А	33,823	1	1	33,823
	Індуктивність 1210 (100 мГн)	21,373	1	1	21,373
Середньогабаритні елементи	Місце для підключення нагрівального елементу	33,756	1,5	1	50,634
	МОСФЕТ IRLZ44	65,968	1,5	1	98,952
	Датчик температури DS18B20	25,211	1,5	1	37,817
	Датчик сили FSR402	36,385	1,5	1	54,578
	Транзистор NPN SS9014	48,449	1,5	1	72,674
	Діод 1N4148	25,573	1,5	1	38,360
	Діод FR307	108,875	1,5	1	163,313
Високогабаритні елементи	KY-040 енкодера EC11	600,602	1,75	1	1051,054
	Адаптер I2C - LCD PCF8574	285,811	1,75	1	500,169
	Модуль MAX6675 для вимірювання температури	577,098	1,75	1	1009,922
	Вимірювач вологості BHT3.1	178,262	1,75	1	311,959
	Мікропроцесор ESP32-S2-DevKitM-1	1481,163	2,25	1	3332,617
	Модуль годинника реального часу DS1307	810,836	1,75	1	1418,963
	Електролітичний Конденсатор SMD sizeF (1000 нФ; 470 нФ)	135,126	2	2	540,504
	Магнітний динамік CT-1205H-SMT-TR	193,946	2	1	387,892
	Понизжуючий модуль FX-MIN-360	220,523	1,75	1	385,915
	Роз'єм DC для живлення	170,316	1,75	1	298,053
Кріплення плати до корпусу	Місце для кріплення плати (Гвинт M4)	144	1	4	576,000
Загальна площа [мм2]		7135			
Кількість елементів [шт]		30			
Габарити плати [мм x мм]		55,000 130,000			
Площа плати з даними габаритами [мм2]		7150			

Рисунок 2.17 — Зображення таблиці з результатами розрахунків площі

Відповідно до розрахунків мінімальна площа плати становить 7150 мм². Виходячи з викладеного вище обрано плату прямокутної форми з габаритними розмірами 130x55 мм. Кріплення плати буде здійснено за допомогою шурупів М4. Кріплення плати шурупами – це простий і надійний спосіб фіксації плат до корпусу. Він швидкий у монтажі, універсальний та економічний.

За основу було обрано матеріал: FR-4 35/0 1,5, що означає використання плати, виготовлену з склотекстоліту FR-4 з товщиною мідного шару 35 мкм

та товщиною плати 1,5 мм. Отже плата буде одношарова, монтаж елементів буде здійснюватися з двох сторін ДП, яка відповідатиме 1 класу згідно ІРС 6011.

2.3.2 Розрахунок ширини друкованих провідників

Проаналізуємо основні ланцюги нашої схеми:

Таблиця 2.1 — Ланцюги схеми та їх струм

Назва (Net)	I [A]
+12 V	2
+5 V	4,8
Signal	0,25

Розрахуємо, яка має бути ширина провідника, для забезпечення коректної роботи ДП за допомогою онлайн-калькулятора[27].

Для розрахунку +12 V внесені параметри (Рисунок 2.18):

Current (I)
2 A

Ambient Temperature
25 °C

Thickness (t)
35 μm

Trace Length
130 mm

Temperature Rise (T_{rise})
30 °C

Minimum Trace Width
1.043625713 mm

Minimum Trace Width
0.4011723418 mm

*Internal Layers:
Required Trace Width (W)
1.043625713 mm

Resistance
0.06758224768 Ω

Voltage Drop
0.1351644954 V

Power Loss
0.2703289907 W

*External Layers in Air:
Required Trace Width (W)
0.4011723418 mm

Resistance
0.1758111517 Ω

Voltage Drop
0.3516223033 V

Power Loss
0.7032446066 W

Рисунок 2.18 — Розрахунок ширини провідника для ланцюга +12 V

Для розрахунку +5 V внесені параметри (Рисунок 2.19):

Current (I)	Ambient Temperature
4.8 A	25 °C
Thickness (t)	Trace Length
35 μm	130 mm
Temperature Rise (T _{Rise})	
30 °C	

↓ ↓ ↓

Minimum Trace Width	Minimum Trace Width
3.491194701 mm	1.342024000 mm
*Internal Layers:	*External Layers in Air:
Required Trace Width (W)	Required Trace Width (W)
3.491194701 mm	1.342024000 mm
Resistance	Resistance
0.02020241707 Ω	0.05255537265 Ω
Voltage Drop	Voltage Drop
0.09697160195 V	0.2522657887 V
Power Loss	Power Loss
0.4654636894 W	1.210875786 W

Рисунок 2.19 — Розрахунок ширини провідника для ланцюга +5 V

Для розрахунку ланцюга Signal внесені параметри (Рисунок 2.20):

Current (I)	Ambient Temperature
0.25 A	25 °C
Thickness (t)	Trace Length
35 μm	130 mm
Temperature Rise (T _{Rise})	
30 °C	

↓ ↓ ↓

Minimum Trace Width	Minimum Trace Width
0.05927934679 mm	0.02278712960 mm
*Internal Layers:	*External Layers in Air:
Required Trace Width (W)	Required Trace Width (W)
0.05927934679 mm	0.02278712960 mm
Resistance	Resistance
1.189800078 Ω	3.095193325 Ω
Voltage Drop	Voltage Drop
0.2974500195 V	0.7737983313 V
Power Loss	Power Loss
0.07436250487 W	0.1934495828 W

Рисунок 2.20 — Розрахунок ширини провідника для ланцюга Signal

З урахуванням всіх розрахунків отримуємо наступні параметри:

Таблиця 2.2 — Ланцюги схеми та товщина доріжок

Назва (Net)	t [мм]
+12 V	0,4
+5 V	1,35
Signal	0,02

Оскільки у більшості виробників мінімальна товщина доріжок складає 0,1 мм, то для ланцюгу Signal ми використаємо дане значення.

2.3.3 Трасування плати

Проектування плати, а саме компоновання та трасування (Рисунок 2.21) проводилося в програмному середовищі Altium Designer. За схемою електричною принциповою було створено РСВ бібліотеку з усіма наявним на схемі елементами. Отвори для кріплення та встановлення елементів поверхневого монтажу не металізовані оскільки це не є доцільним при проектуванні одношарової плати. Вільний простір на платі під'єднано до землі та залите шаром міді.

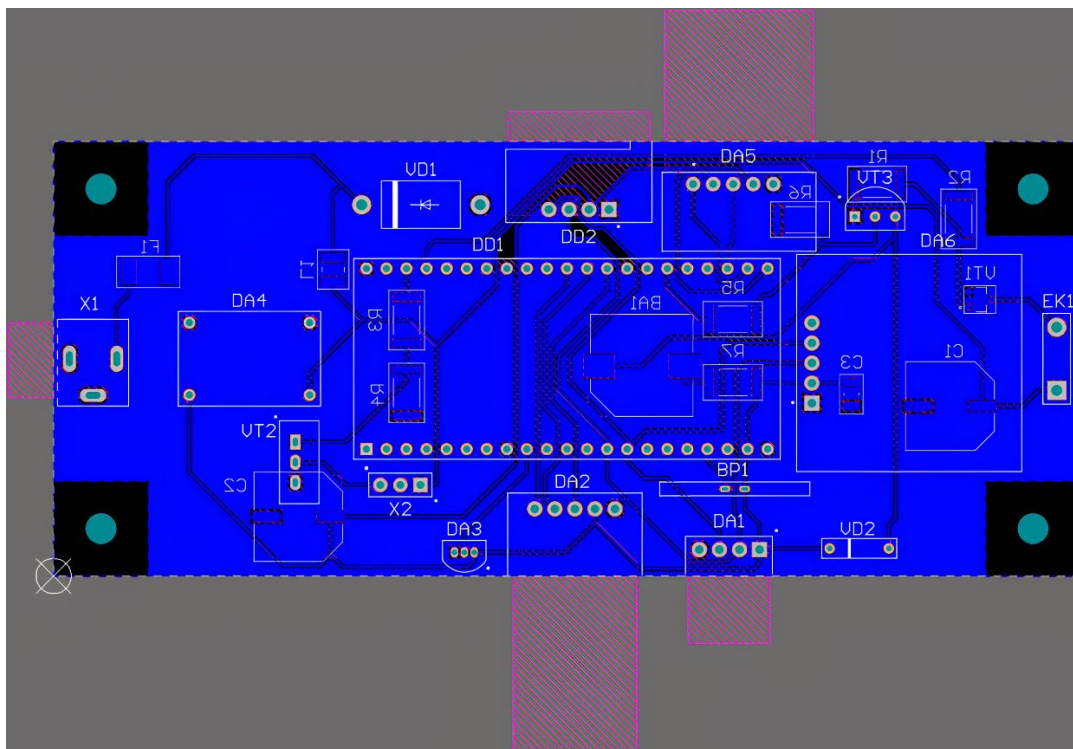


Рисунок 2.21 — Зображення скомпонованої, протрасованої друкованої плати

Як бачимо, для зменшення розмірів плати та для зручності користування, нагрівальний елемент та дисплей винесено за межі плати, замість нього там розташовано місця для дротів для під'єднання та виконане підключення до адаптера I2C відповідно.

2.4 Розрахунки працездатності

У даному підрозділі проведемо розрахунки надійності[28] та захисту від вібродій. Це потрібно для уникання несподіваної поломки від зовнішніх та внутрішніх чинників.

2.4.1 Розрахунок надійності

На даній схемі є такі елементи:

- а) 7 резистори (різні номінали);
- б) 3 конденсатори (2 електролітичних |полярні| та 1 керамічний |неполярний|);
- с) 2 діоди;
- д) 2 польових транзистори;
- е) 1 транзистор;
- ф) 8 мікросхем

Інтенсивність відмов резисторів (2.2):

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_R \quad (2.2)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

K_R — коефіцієнт, що враховує номінальний опір;

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

У нашому випадку ми візьмемо інтенсивність відмов резисторів постійних недротяних (металодіелектричних) – $\lambda_0 = \frac{0,05}{10^6} = 5 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Коефіцієнт режиму роботи (Рисунок 2.22) ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія та ККД 90%, оскільки 100% неможливе, адже

деяка частина піде на нагрів, але і не така велика, щоб брати менше значення, тому візьмемо найближче до 100%, яке є в табличних значеннях. Коефіцієнт, який враховує номінальний опір (Рисунок 2.23) візьмемо відповідно до даних характеристик пасивних елементів:

$t, ^\circ\text{C}$	K_p при P/P_n									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Резистори постійні недротові										
25	0,35	0,40	0,45	0,51	0,58	0,65	0,72	0,81	0,90	1,00

Рисунок 2.22 — Значення коефіцієнта режиму роботи резисторів

Діапазон опорів	K_R
Резистори постійні недротові	
До 1 кОм	1,0
Більше кОм до 100 кОм	0,7

Рисунок 2.23 — Значення коефіцієнта, який враховує номінальний опір

Отже інтенсивність для заданих резисторів:

Таблиця 2.3 — Інтенсивність відмов для резисторів

Позначення	Номінал	Інтенсивність
R_1	1,2 кОм	$3,15 \cdot 10^{-8}$
R_2, R_3	120 Ом	$4,5 \cdot 10^{-8}$
R_4	1 кОм	$4,5 \cdot 10^{-8}$
R_5	2,2 кОм	$3,15 \cdot 10^{-8}$
R_6	5,1 кОм	$3,15 \cdot 10^{-8}$
R_7	150 Ом	$4,5 \cdot 10^{-8}$

Інтенсивність відмов конденсаторів:

Керамічні

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_C \quad (2.3)$$

Електролітичні

$$\lambda_p = \lambda_0 K_T K_C \quad (2.4)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

K_T — температурний коефіцієнт, що залежить від температур навколишнього середовища для імпульсних конденсаторів;

K_C — коефіцієнт, що враховує номінальну ємність та математичну модель розрахунку для окремих груп конденсаторів.

Для керамічних конденсаторів інтенсивність відмов ми візьмемо «Керамічні на номінальну напругу менше 1600 В» — $\lambda_0 = \frac{0,019}{10^6} = 1,9 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Коефіцієнт режиму роботи (Рисунок 2.24) ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія та відношенню $\frac{U}{U_H} = 0,8$. Коефіцієнт, який враховує номінальну ємність (Рисунок 2.25) також візьмемо відповідно до даних характеристик пасивних елементів:

$t, ^\circ\text{C}$	K_p при U/U_H									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
Конденсатори керамічні, тонкоплівкові з неорганічним діелектриком										
25	0,027	0,034	0,053	0,089	0,149	0,238	0,362	0,527	0,739	1,004

Рисунок 2.24 — Значення коефіцієнта режиму роботи керамічних конденсаторів

Ємність	K_C
Конденсатори керамічні $K_C = 0,4 C^{0,12}$ (C - ємність, пФ)	
1	0,40
10	0,53
100	0,70
10^3	0,92
10^4	1,21
10^5	1,59
10^6	2,10
$6,8 \cdot 10^6$	2,64

Рисунок 2.25 — Значення коефіцієнта, який враховує номінальну ємність

Отже інтенсивність для керамічного конденсатора — $\lambda_p = 1,594 \cdot 10^{-8}$

Для електролітичних — «Оксидно-електролітичні алюмінієві» — $\lambda_0 = \frac{0,19}{10^6} = 19 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Температурний коефіцієнт (Рисунок 2.26) ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія. Коефіцієнт, який враховує номінальну ємність (Рисунок 2.27) також візьмемо відповідно до даних характеристик пасивних елементів:

$t, ^\circ\text{C}$	K_t	
	Конденсатори оксидно-електролітичні алюмінієві	Конденсатори комбіновані високовольтні
25	1,01	1

Рисунок 2.26 — Значення температурний коефіцієнт, що залежить від температур навколишнього середовища

Ємність	K_C
Конденсатори оксидно-електролітичні алюмінієві	
До 10^3 мкФ	1
Більше 10^3 до $22 \cdot 10^3$ мкФ	2
Більше $22 \cdot 10^3$ мкФ	2,5

Рисунок 2.27 — Значення коефіцієнта, який враховує номінальну ємність

Отже інтенсивність для заданих електролітичних конденсаторів:

Таблиця 2.4 — Інтенсивність відмов для конденсаторів

Позначення	Номінал	Інтенсивність
C_1	1 мкФ	$19,19 \cdot 10^{-8}$
C_2	0,47 мкФ	$19,19 \cdot 10^{-8}$

Інтенсивність відмов діодів, діодних збірок (2.5):

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_\phi K_{s_1} \quad (2.5)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

K_ϕ — коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою;

K_{s1} — коефіцієнт, що враховує відношення робочої напруги до максимально допустимої по ТУ.

Для діодів VD1, VD2 інтенсивність відмов ми візьмемо «Діоди кремнієві випрямні» — $\lambda_0 = \frac{0,1}{10^6} = 1 \cdot 10^{-7} \text{ ч}^{-1}$.

Коефіцієнт режиму роботи (Рисунок 2.28) для кремнієвих діодів ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія та відношенню $\frac{I_{\text{роб}}}{I_{\text{макс}}} = 0,7$.

Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою (Рисунок 2.29) та відношення робочої напруги до максимально допустимої по ТУ (Рисунок 2.30)

$t, ^\circ\text{C}$	K_p для кремнієвих діодів та діодних збірок при $I_{\text{роб}}/I_{\text{макс}}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,0477	0,0654	0,0873	0,1146	0,1486	0,1930	0,2553	0,3552	0,5467	1,0143

Рисунок 2.28 — Значення коефіцієнта режиму роботи

Група приборів	Функціональне призначення (режим роботи)	K_ϕ
Діоди (крім стабілітронів), діодні збірки	Аналоговий сигнал	1,0
	Перемикаючий	0,6
	Випрямний	1,5

Рисунок 2.29 — Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою

Група приборів	Навантаження по напрузі S1, %	K_{s1}
Діоди (крім стабілітронів), діодні збірки	От 0 до 60	0,70
	70	0,75
	80	0,80
	90	0,90
	100	1,00

Рисунок 2.30 — Коефіцієнт, що враховує відношення робочої напруги до максимально допустимої по ТУ

Отже інтенсивність для заданих діодів:

Таблиця 2.5 — Інтенсивність відмов для діодів

Позначення	Інтенсивність
VD ₁	$3,447 \cdot 10^{-8}$
VD ₂	$1,787 \cdot 10^{-8}$

Інтенсивність відмов польових транзисторів (2.6):

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_\Phi \quad (2.6)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

K_Φ — коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою.

Для польових транзисторів інтенсивність відмов ми візьмемо «Транзистори польові кремнієві» — $\lambda_0 = \frac{0,086}{10^6} = 8,6 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Коефіцієнт режиму роботи для кремнієвих транзисторів (Рисунок 2.31) ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія та відношенню $P_{\text{роб}}/P_{\text{max}} = 0,5$. Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою (Рисунок 2.32) взято як «аналоговий сигнал» для тих, які знаходяться біля нагрівача та вентилятор.

$t, ^\circ\text{C}$	K_p для кремнієвих транзисторів при $P_{\text{роб}}/P_{\text{max}}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,0551	0,0757	0,1021	0,1364	0,1817	0,2432	0,3307	0,4621	0,6737	1,0433

Рисунок 2.31 — Значення коефіцієнта режиму роботи

Група приборів	Функціональне призначення (режим роботи)	K_Φ
Транзистори польові кремнієві	Аналоговий сигнал	1,5
	Перемикаючий	0,7
	Генераторний	1,0
	НВЧ-діапазон	5,0

Рисунок 2.32 — Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою

Отже інтенсивність для заданих транзисторів

Таблиця 2.6 — Інтенсивність відмов для польових транзисторів

Позначення	Інтенсивність
VT₁	$2,344 \cdot 10^{-8}$
VT₂	$2,344 \cdot 10^{-8}$

Інтенсивність відмов транзисторів біполярних (2.7):

$$\lambda_p = \lambda_0 K_p K_\Phi K_{S_1} \quad (2.7)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

K_p — коефіцієнт режиму роботи пристрою, що залежить від навколишньої температури та навантаження по струму;

K_Φ — коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою.

K_{S_1} — коефіцієнт, що враховує відношення робочої напруги до максимально допустимої по ТУ.

Для транзисторів біполярних інтенсивність відмов ми візьмемо «Транзистори біполярні кремнієві» — $\lambda_0 = \frac{0,06}{10^6} = 6 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Коефіцієнт режиму роботи для кремнієвих біполярних транзисторів (Рисунок 2.33) ми візьмемо при кімнатній температурі 25 градусів Цельсія та відношенню $P_{\text{роб}}/P_{\text{мах}} = 0,3$. Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою (Рисунок 2.34) взято як «перемикаючий» для того, який знаходяться біля зумера.

$t, ^\circ\text{C}$	K_p для кремнієвих біполярних транзисторів, транзисторних збірок і діодів НВЧ при $P_{\text{роб}}/P_{\text{мах}}$									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
25	0,1279	0,1525	0,1801	0,2119	0,2499	0,2986	0,3669	0,4738	0,6637	1,0564

Рисунок 2.33 — Значення коефіцієнта режиму роботи

Група приборів	Функціональне призначення (режим роботи)	K_Φ
Транзистори біполярні (крім потужних НВЧ), транзисторні збірки	Аналоговий сигнал	1,5
	Перемикаючий	0,7
	Генераторний	0,7
	Малощумні пристрої	15,0
	Високовольтні пристрої	1,5

Рисунок 2.34 — Коефіцієнт, що враховує функціональне призначення пристрою

Група приборів	Навантаження по навантаженню S1, %	K_{s1}
Транзистори біполярні (крім потужних НВЧ), транзисторні збірки	От 0 до 50	0,50
	50	0,70
	60	0,80
	70	1,00
	80	1,50
	90	2,00
	100	3,00

Рисунок 2.35 — Коефіцієнт, що враховує відношення робочої напруги до максимально допустимої по ТУ

Отже інтенсивність для транзистора біполярного — $\lambda_p = 8,105 \cdot 10^{-9}$

Інтенсивність відмов для мікросхем (2.8):

$$\lambda_p = \lambda_0 K_{c,T} K_{\text{корп}} \quad (2.8)$$

λ_0 — початкова середньостатистична інтенсивність відмов ЕК;

$K_{c,T}$ — коефіцієнт режиму, що враховує складність інтегральних мікросхем та температуру навколишнього середовища;

$K_{\text{корп}}$ — коефіцієнт, що враховує вплив матеріалу корпусу інтегральних мікросхем. ($K_{\text{корп}} = 3$ для пластмасових корпусів і $K_{\text{корп}} = 1$ для всіх інших);

Для мікросхем DA₁₋₆ інтенсивність відмов візьмемо «Мікросхеми інтегральні напівпровідникові аналогові» — $\lambda_0 = \frac{0,037}{10^6} = 3,7 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Для мікросхеми DD₁ інтенсивність відмов візьмемо «Постійно запам'ятовуючі пристрої» — $\lambda_0 = \frac{0,046}{10^6} = 4,6 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$;

Для мікросхеми DD₂ інтенсивність відмов візьмемо «Мікросхема інтегральні гібридні» — $\lambda_0 = \frac{0,044}{10^6} = 4,4 \cdot 10^{-8} \text{ ч}^{-1}$.

Число елементів (біт - для запам'ятовуючих приладів) в інтегральній мікросхемі	$K_{c,T}$ при температурі								
	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Мікросхеми інтегральні									
До 25 компонентів	0,90	1,01	1,14	1,29	1,45	1,64	1,84	2,08	2,34

Рисунок 2.36 — Значення коефіцієнта режиму роботи для DA₁₋₆, DD₂

					PE12.421413.001 ПЗ					Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата						46

Число елементів (біт - для запам'ятовуючих приладів) в інтегральній мікросхемі	$K_{с, T}$ при температурі								
	25	30	35	40	45	50	55	60	65
Постійні запам'ятовуючі прилади і програмовані									
До 4 096 біт	1,00	1,11	1,23	1,37	1,52	1,68	1,87	2,07	2,30

Рисунок 2.36 — Значення коефіцієнта режиму роботи для DD₁

Отже інтенсивність для мікросхем DD₁, DA₁₋₆, DD₂
 $\lambda_{pDD_1} = 4,14 \cdot 10^{-8}$; $\lambda_{pDA_{1-6}} = 3,33 \cdot 10^{-8}$; $\lambda_{pDD_2} = 4,4 \cdot 10^{-8}$ відповідно.

Визначення середнього напрацювання на відмову (2.9)

$$\lambda_p = \sqrt{\frac{T_0}{2\pi t_b^3}} \exp \left[-\frac{(t_b - T_0)^2}{2t_b T_0} \right] \quad (2.9)$$

T_0 — середнє напрацювання на відмову;

t_b — тривалість випробувань ($t_b = 3 \cdot 10^4$ год).

З цього рівняння нам треба знайти T_0 , отже є 2 варіанта знаходження даного значення:

- Вивести формулу з даної, та підставляючи знайти шукане значення;
- Через функцію Given/Find в MathCad знайти шукане значення.

У нашому випадку легше буде скористатися другим варіантом.

- Середнє напрацювання на відмову для резисторів

— Для резисторів R_{1,5,6} — $\lambda_p = 3,15 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 5,057 \cdot 10^5$ год

— Для резистора R_{2-4,7} — $\lambda_p = 4,5 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 4,828 \cdot 10^5$ год

- Середнє напрацювання на відмову для конденсаторів

— Для конденсаторів C_{1,2} — $\lambda_p = 19,19 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 3,888 \cdot 10^5$ год

— Для конденсаторів C₃ — $\lambda_p = 5,492 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 5,492 \cdot 10^5$ год

- Середнє напрацювання на відмову для діодів

— Для діоду VD₁ — $\lambda_p = 3,447 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 4,999 \cdot 10^5$ год

— Для діоду VD₂ — $\lambda_p = 1,787 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 5,419 \cdot 10^5$ год

д) Середнє напруцювання на відмову для транзисторів

— Для польових транзисторів VT_{1-2} — $\lambda_p = 2,344 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 5,246 \cdot 10^5$ год

— Для біполярного транзистору VT_3 — $\lambda_p = 8,105 \cdot 10^{-9}$ — $T_0 = 5,921 \cdot 10^5$ год

е) Середнє напруцювання на відмову для мікросхем

— Для мікросхеми DD_1 — $\lambda_p = 4,14 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 4,882 \cdot 10^5$ год

— Для мікросхеми DA_{1-6} — $\lambda_p = 3,33 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 5,021 \cdot 10^5$ год

— Для мікросхеми DD_2 — $\lambda_p = 4,4 \cdot 10^{-8}$ — $T_0 = 4,843 \cdot 10^5$ год

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи

Імовірність безвідмовної роботи $P(x)$ (2.10) для DN-розподілу в залежності від параметра $x = \frac{t}{T_0}$ та коефіцієнта варіації v

$$P(x) = \Phi\left(\frac{1-x}{v\sqrt{x}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \Phi\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{x}}\right) \quad (2.10)$$

$\Phi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^u \exp(-\frac{u^2}{2}) du$ — функція нормального розподілу;

$P(x)$ — ймовірність безвідмовної роботи;

v — коефіцієнт варіації розподілу відмов ($v = 1$);

Альтернативний варіант визначення імовірності безвідмовної роботи (2.11)

$$P(x) = 0,5 \cdot \left[1 + \operatorname{erf}\left(\frac{1-x}{v\sqrt{2x}}\right) + e^{\frac{2}{v^2}} \cdot \left(1 + \operatorname{erf}\left(-\frac{1+x}{v\sqrt{2x}}\right) \right) \right] \quad (2.11)$$

$\operatorname{erf}(u)$ — функція інтеграла помилок

Далі будуть зображені графіки імовірностей безвідмовних робіт для компонентів (Рисунок 2.37 — Рисунок 2.41)

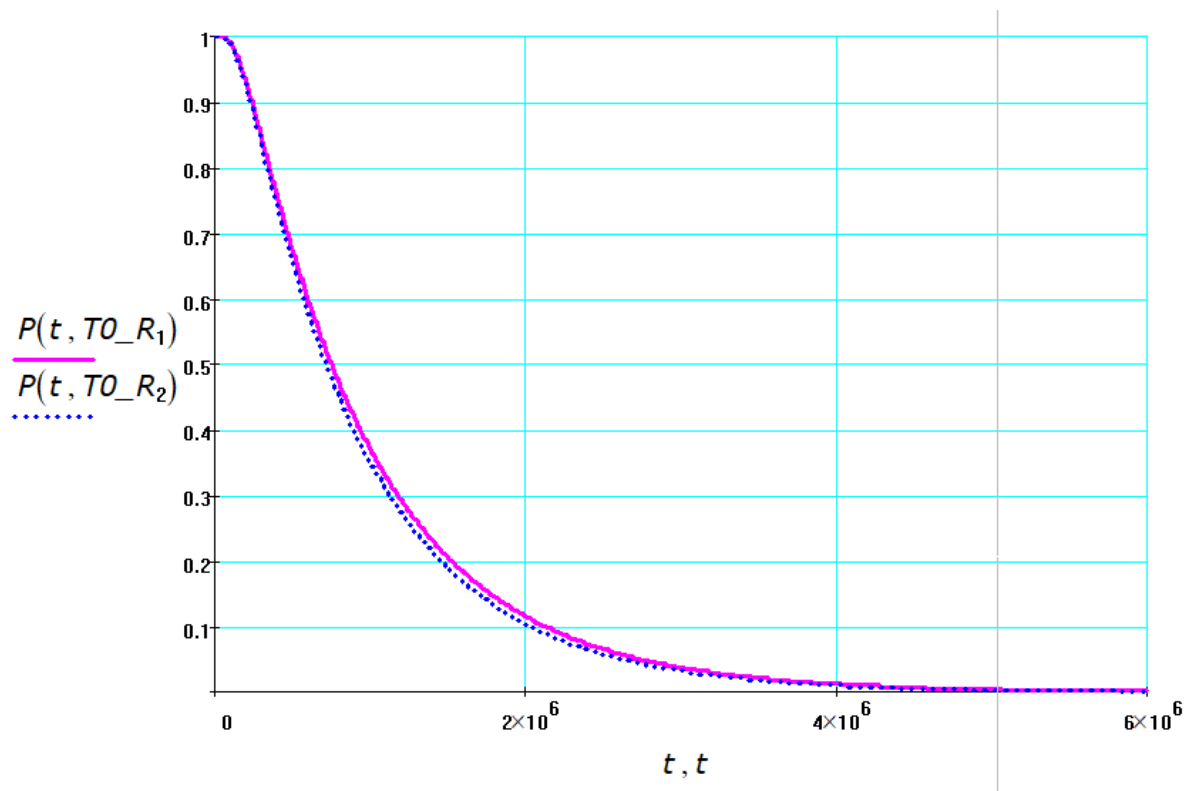


Рисунок 2.37 — Графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ для резисторів

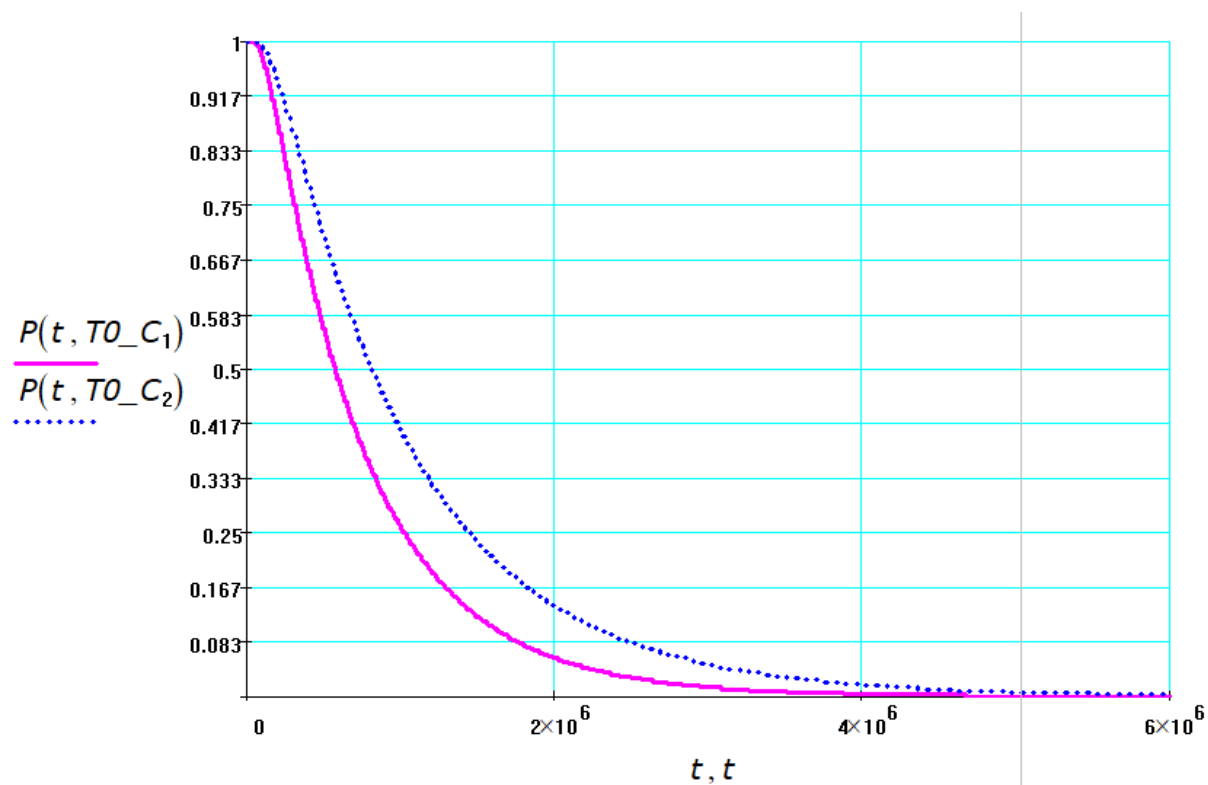


Рисунок 2.38 — Графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ для конденсаторів

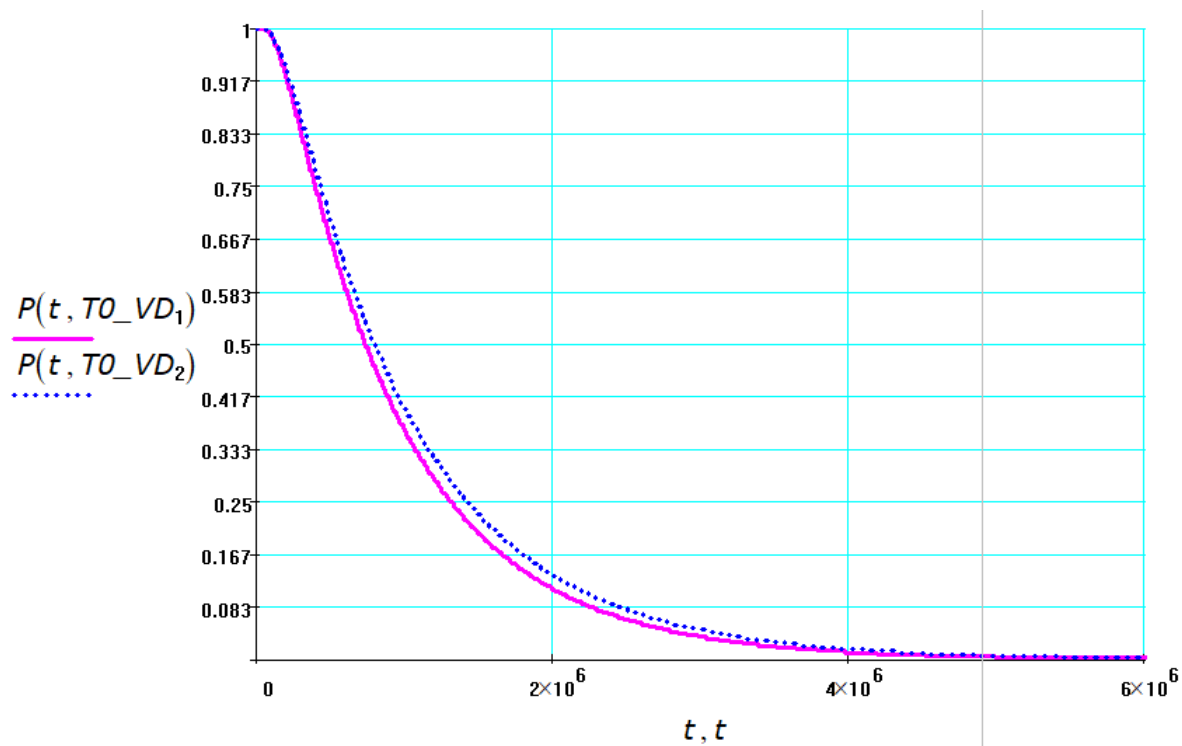


Рисунок 2.39 — Графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ для діодів

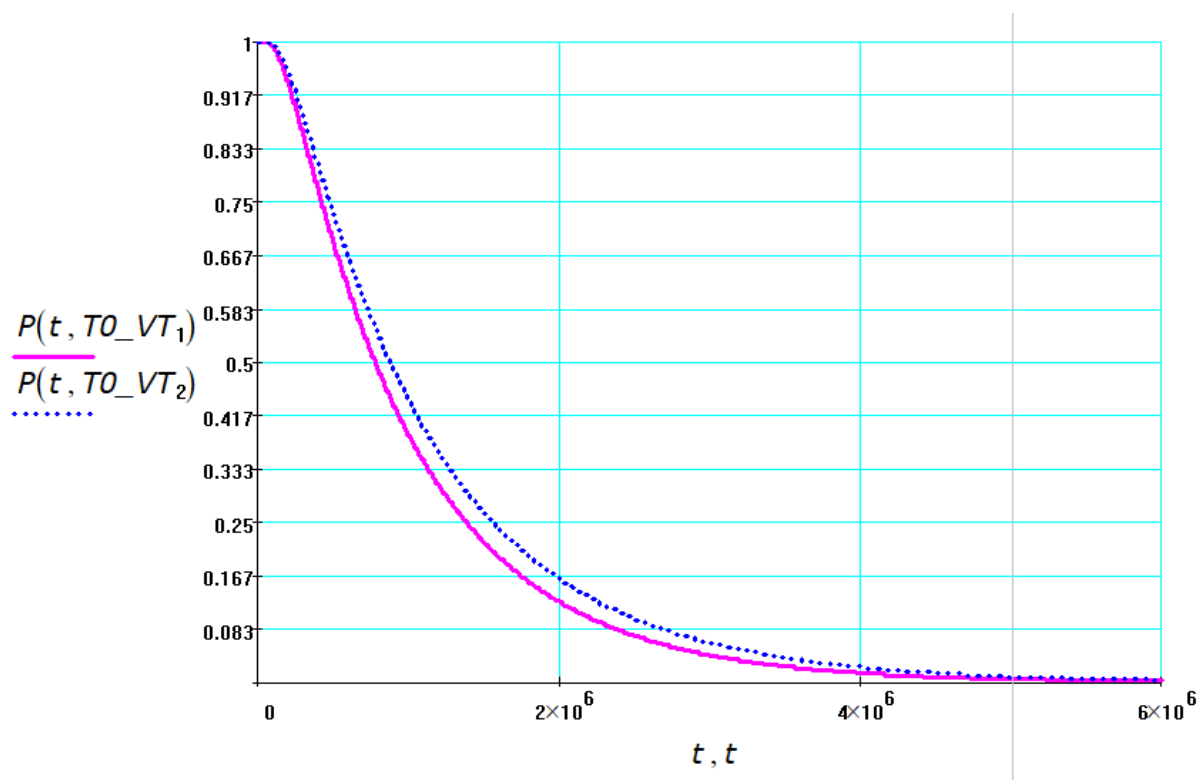


Рисунок 2.40 — Графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ для транзисторів

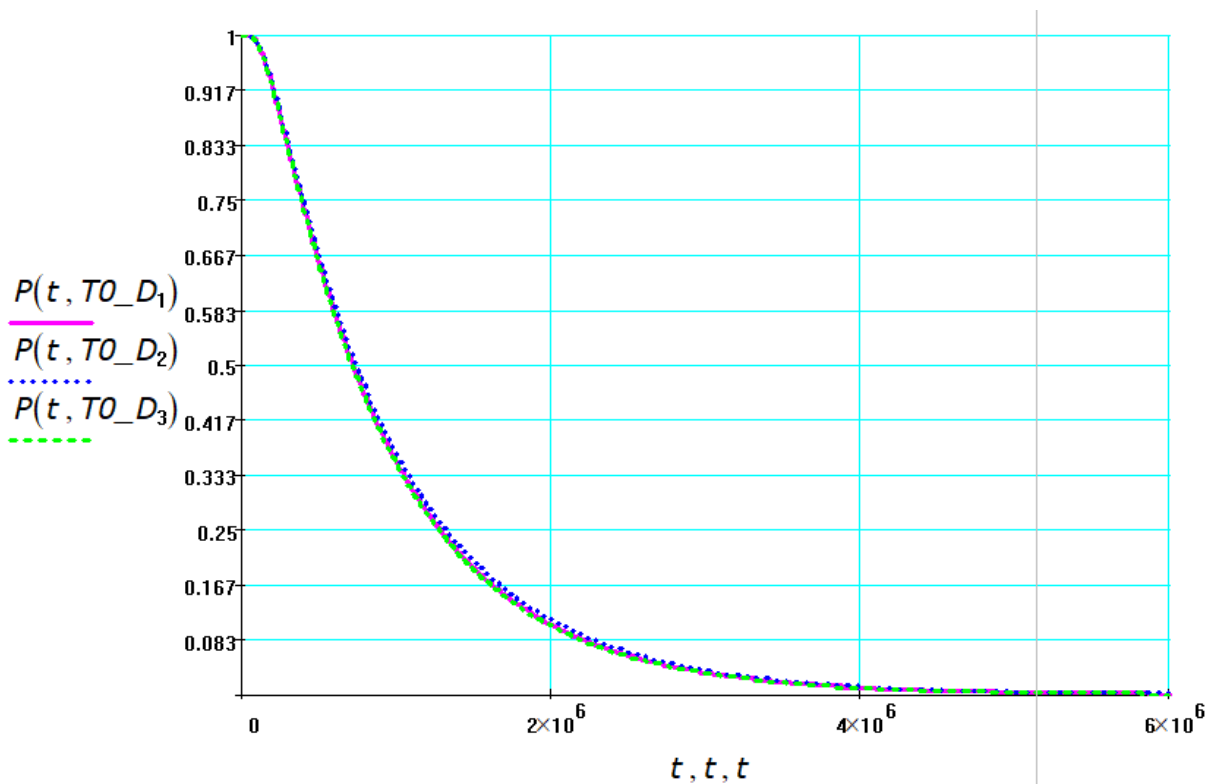


Рисунок 2.41 — Графік імовірності безвідмовної роботи $P(t)$ для мікросхем

2.4.2 Механічні розрахунки

Для захисту друкованої плати від вібрації потрібно, щоб резонансна частота плати та її елементів перебували за межами діапазону вхідних впливів, а саме при умові $f_0 \geq 2 \cdot F_{\max}$, де f_0 — резонансна частота.

Частота власних коливань (2.12)

$$f_0 = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{m_e}{m_{пл}}}} \cdot \frac{\pi}{4\sqrt{3}} \cdot (1 + \Delta^2) \cdot \frac{\lambda \cdot h}{a^2} \cdot \sqrt{\frac{E}{\rho}} \quad (2.12)$$

, де m_e — маса компонентів; $m_{пл}$ — маса самої плати; λ — безрозмірний коефіцієнт, що залежить від умов кріплення; h — товщина плати; a — довжина ДП; E — модуль Юнга; ρ — щільність матеріалу.

Розрахуємо частоту власних коливань друкованої плати.

Визначимо вихідні дані для розрахунку:

- а) Довжина ДП — $a = 0,13$ м;
- б) Ширина ДП — $b = 0,055$ м;
- в) Товщина ДП — $h = 1,5 \cdot 10^{-3}$ м;

- d) Модуль Юнга для фольгованого склотекстоліту товщиною 1,5 мм — $E = 2,25 \cdot 10^{10} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$;
- e) Щільність склотекстоліту — $\rho = 2,05 \cdot 10^3 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$;
- f) Кількість точок кріплення ДП — $n = 4$ шт.;
- g) Елементи на платі розміщені рівномірно;
- h) При кріпленні ДП по кутах, коефіцієнт — $\lambda = 2,5$.
- i) Маса встановлених на платі елементів — $M = 0,05$ кг.
- j) Модуль Пуассона — $\mu = 0,127$

Приведена маса плати з деталями (2.13)

$$m = \rho \cdot h + \frac{M}{a \cdot b} = 2,05 \cdot 10^3 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} + \frac{0,05}{0,13 \cdot 0,055} = 10,068 \frac{\text{кг}}{\text{м}^2} \quad (2.13)$$

Циліндрична жорсткість[29] (2.14) характеризує здатність пластини до деформацій.

$$D = \frac{E \cdot h^3}{12 \cdot (1 - \mu^2)} = \frac{2,25 \cdot 10^{10} \cdot (1,5 \cdot 10^{-3})^3}{12 \cdot (1 - 0,127^2)} = 6,432 \text{ Н} \cdot \text{м} \quad (2.14)$$

Значення функції для кріплення плати в чотирьох точках (2.15):

$$\varphi(\beta) = \pi^2 \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,621 \cdot \frac{\mu}{\beta} + \frac{1}{\beta^2}}{1 + 1,621 \cdot \frac{1}{\beta^3} + \frac{1}{\beta^6}}} \quad (2.15)$$

де $\beta = \frac{a}{b} = \frac{0,13}{0,055} = 2,364$ — коефіцієнт, залежний від співвідношення довжини і ширини плати.

$$\varphi(\beta) = \pi^2 \cdot \sqrt{\frac{1 + 1,621 \cdot \frac{0,127}{2,364} + \frac{1}{5,588}}{1 + 1,621 \cdot \frac{1}{13,211} + \frac{1}{174,536}}} = 10,454 \quad (2.15)$$

Резонансна частота плати[30]:

$$f_0 = \frac{\varphi(\beta)}{2 \cdot \pi \cdot a^2} \cdot \sqrt{\frac{D}{m}} = \frac{10,454}{2 \cdot \pi \cdot 0,13^2} \cdot \sqrt{\frac{6,432}{10,068}} = 78,69 \text{ Гц}$$

$f_{\text{мах}}$ у нашому випадку буде набагато менша ніж частота плати тому, умова виконується, задовольняє вимогу технічним завданням, забезпечуючи відсутність резонансу в необхідному діапазоні частот.

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		52

2.5 Висновки до розділу

Проектування друкованої плати було виконано з урахуванням практичних вимог: мінімальна площа плати склала 7150 мм², що призвело до компактних розмірів 130 x 55 мм. Ретельні розрахунки ширини провідників забезпечили надійну роботу системи, це підкреслює увагу до деталей, що впливають на довговічність та ефективність пристрою.

Кількісна валідація підтвердила високий рівень надійності та механічної стійкості розробленої установки. Розрахунки надійності показали, що середнє напрацювання на відмову (T_0) для більшості компонентів перевищує $4,8 \cdot 10^5$ годин, а для біполярного транзистора VT_3 досягає $5,921 \cdot 10^5$ годин. Ці показники свідчать про значний запас міцності та довговічності системи. Механічні розрахунки підтвердили, що резонансна частота друкованої плати становить 78.69 Гц, що значно перевищує очікувані вібраційні навантаження, забезпечуючи стабільну роботу пристрою в динамічних умовах.

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		53

З РОЗРОБКА КОРПУСУ СУШИЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ФІЛАМЕНТУ З ФУНКЦІЄЮ КОНТРОЛЮ МАСИ ТА ІН- ФОРМУВАННЯ КОРИСТУВАЧА

Розробка корпусу сушильної установки спрямована на створення оптимального середовища для контролю температури і циркуляції повітря, необхідних для якісного зневоднення філаменту.

3.1 Розробка корпусу

Розроблений корпус сушильної установки для філаменту є прикладом технічно виваженого підходу до вирішення проблеми вологовбирання полімерних ниток для 3D-друку. Система створена для забезпечення стабільного та контрольованого середовища з оптимальною температурою і циркуляцією повітря, необхідною для якісного сушіння матеріалу. Її функціональність базується на поєднанні конструктивної інженерії та мікроконтролерного керування, орієнтованого на зручність користувача та автоматизацію процесу. Конструкція передбачає можливість розміщення котушок філаменту різної маси, зокрема на 1 кг та 3 кг, що підвищує універсальність пристрою.

3.2 Опис та рендери корпусу

На розрізі корпусу (Рисунок 3.1, Рисунок 3.2) чітко видно розміщення основного об'єкта сушіння — котушки з ниткою. У зображенні синій колір позначає стандартну котушку масою 3 кг, однак простір конструкції дозволяє встановлення і котушок меншої маси. Це рішення базується на аналізі поширених типорозмірів філаменту в користувацьких та напівпрофесійних середовищах. Безпосередньо під котушкою розташовано блок теплогенерації, який складається з нагрівального елементу та вентилятора. Нагрівач відповідає за підняття температури повітря до заданого значення, тоді як вентилятор забезпечує рівномірний розподіл тепла по всьому об'єму сушильної камери. Ефективна циркуляція дозволяє уникнути зон із застоєм повітря та забезпечує однорідне сушіння матеріалу.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		54

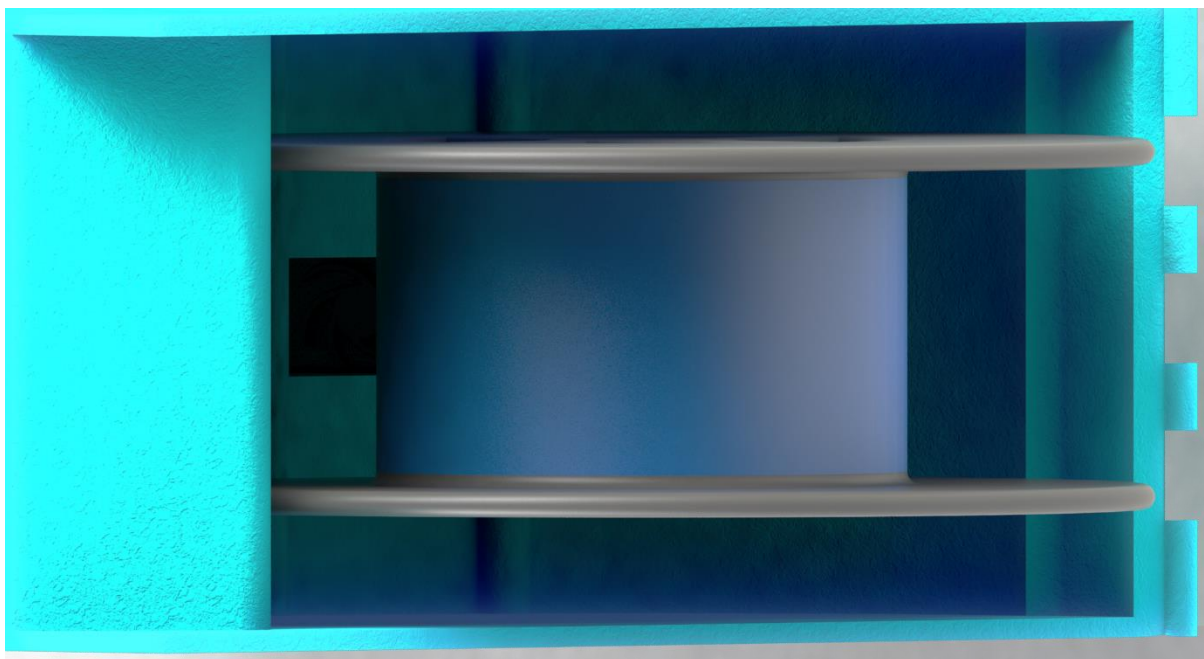


Рисунок 3.1 — Розріз корпусу пристрою з котушкою та нагрівальним блоком

Керування температурним режимом покладено на мікроконтролер ESP32, який відзначається достатньою обчислювальною потужністю для обробки сигналів від термодатчика та взаємодії з користувацьким інтерфейсом. Температурні дані надходять із термопари типу К, яка підключена до перетворювача MAX6675. Цей модуль забезпечує цифрову інтерпретацію аналогового сигналу з термопари, дозволяючи отримувати точні та стабільні показники температури в реальному часі. Також не треба забувати, що дані про температуру будуть зчитуватися не тільки від нагрівального елементу, а й безпосередньо від датчика температури DS18B20, який вмонтовано в задню частину шафи.

На зображенні з верхнім розрізом корпусу (Рисунок 3.2) демонструється компонування основної електронної плати керування. У передній частині конструкції розміщена друкована плата, яка кріпиться на 4 шурупи M4x10, на якій, у свою чергу, встановлено ESP32 разом із периферією.

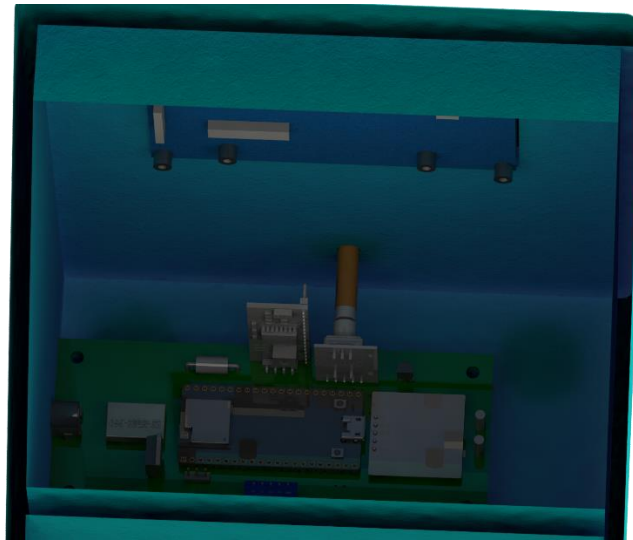


Рисунок 3.2 — Горизонтальний розріз корпусу над нагрівальчем

Зокрема, використовується розширювач шин I²C типу PCF8574, що дає змогу зменшити кількість необхідних пінів керування при підключенні LCD-екрана, та енкодер для зручного керування процесом сушіння. Компактність і логічність розміщення елементів забезпечують належний теплообмін і доступ для технічного обслуговування у разі потреби. Ця частина також забезпечує взаємодію між мікроконтролером та зовнішніми інтерфейсами.

Фронтальна панель корпусу (Рисунок 3.3) виконує роль комунікаційного вузла між пристроєм та користувачем. На ній розміщено LCD-дисплей, який слугує для індикації основних параметрів: поточної температури, встановленого режиму, тривалості сушіння, а також інформації щодо маси філаменту.

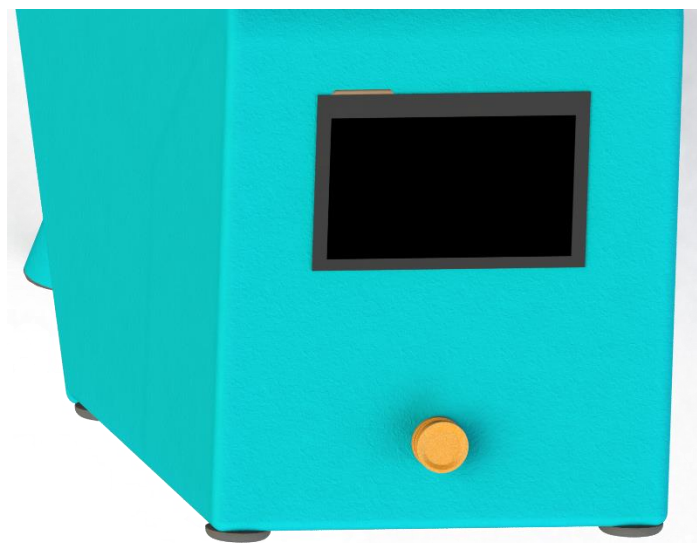


Рисунок 3.3 — Фронтальна панель корпусу

Всі дані відображаються у зрозумілому форматі завдяки використанню інтерфейсного контролера PCF8574. Крім дисплея, на передній панелі знаходиться енкодер з кнопковим натисканням, на якому встановлено захисний ковпачок, що забезпечує повноцінне управління функціоналом пристрою без потреби зовнішнього програмного забезпечення. Обертання ручки дозволяє змінювати параметри, а натискання — підтверджувати вибір.

Ще одним важливим елементом є вузол кріплення прозорої кришки до основного корпусу (Рисунок 3.4). Його конструкція забезпечує надійне з'єднання та герметичність робочої камери, що є необхідним для підтримання стабільної температури та вологості під час сушіння. Прозора кришка виготовлена з термостійкого матеріалу та дозволяє користувачу візуально контролювати стан філаменту, не порушуючи мікроклімат всередині пристрою.

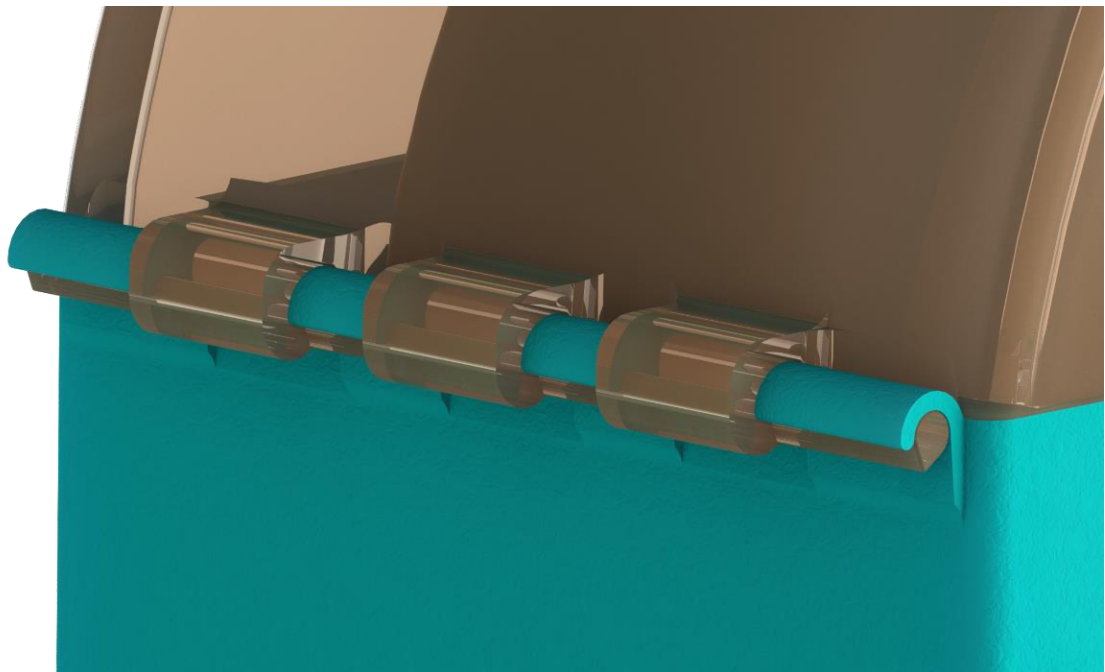


Рисунок 3.4 — Вузол кріплення

На загальному зображенні корпусу (Рисунок 3.5) представлено фінальну геометрію та ергономічні рішення, реалізовані у пристрої. Одна з важливих деталей — це задня опорна ніжка, яка забезпечує нахил пристрою під зручним кутом. Такий нахил полегшує огляд інформаційного дисплею та доступ до енкодера, особливо при розміщенні установки на робочому столі.

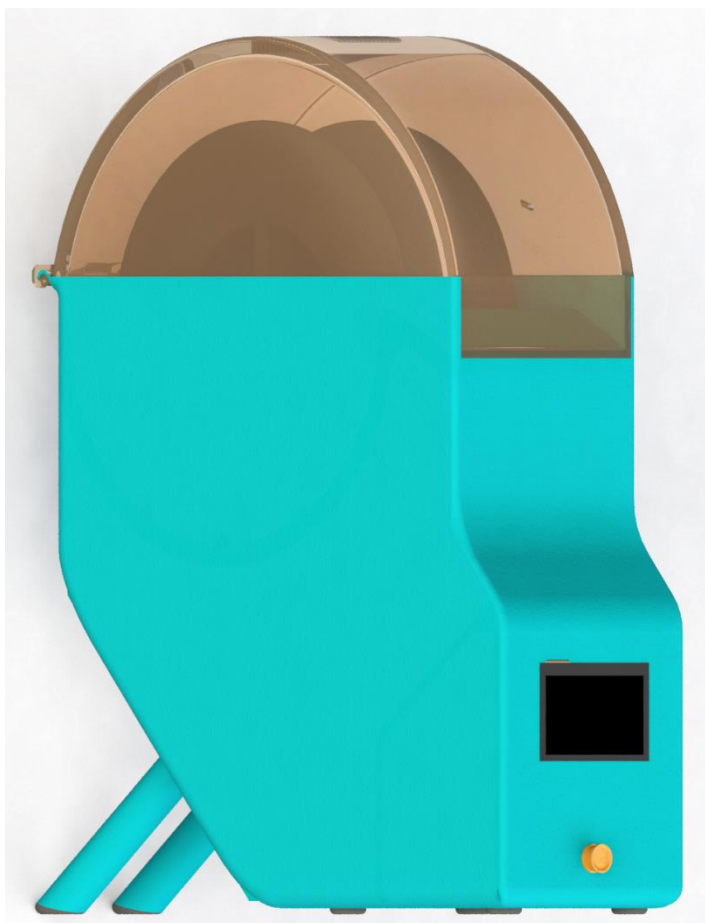


Рисунок 3.5 — Корпус сушильної установки

Верхня частина корпусу містить вентиляційні отвори, які служать для відведення надлишкового тепла після завершення активної фази сушіння. Також важливою деталлю є передній отвір у кришці, через який філамент може подаватись до 3D-принтера без потреби зупинки сушіння. Це дає змогу безперервно друкувати навіть у вологих умовах, що є суттєвою перевагою при роботі з гігроскопічними матеріалами.

3.3 Висновки до розділу

Таким чином, запропонований корпус сушильної установки поєднує у собі інженерну точність, практичність та адаптованість до різних сценаріїв використання. Врахування ергономічних, теплотехнічних та програмно-керованих аспектів дозволило створити надійний та функціонально завершений пристрій, який може бути рекомендований як для аматорських майстерень, так і для професійних лабораторій у сфері адитивного виробництва.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		58

ВИСНОВКИ

В рамках дипломного проекту успішно розроблено сушильну установку для філаменту з інтегрованою функцією контролю маси та інформування користувача. Досягнуто поставленої мети щодо створення функціонального, надійного та зручного у використанні пристрою, який вирішує ключові проблеми, пов'язані з гігроскопічністю філаменту та відсутністю контролю залишків матеріалу на ринку.

Практична цінність розробки полягає в її здатності значно покращити якість 3D-друку та оптимізувати робочий процес, особливо в умовах, що вимагають високої точності та безперебійності, до прикладу — виробництво деталей для БПЛА або використання у волонтерських ініціативах. Інтеграція функції контролю маси та бездротового інформування забезпечує своєчасні дії з матеріалами, мінімізуючи зупинки та брак.

Успіх проекту в інтеграції контролю маси та сповіщень через Wi-Fi, у поєднанні з продемонстрованою високою надійністю, позиціонує цей пристрій як корисний інструмент для більш ефективного та надійного адитивного виробництва. Це може призвести до ширшого впровадження у професійних та критично важливих застосуваннях, потенційно впливаючи на передові практики галузі щодо управління філаментом та сприяючи надійності ланцюгів постачання для друкованих на 3D-принтерах компонентів. Вирішуючи критичну, незадоволену потребу в моніторингу філаменту в реальному часі та забезпечуючи надійну роботу, цей пристрій може встановити новий стандарт для сушильних установок. Його функції можуть стати очікуваними можливостями в майбутніх комерційних продуктах, що підштовхне ринок до більш інтелектуальних та зручних рішень.

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		59

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

- 1) Що таке філамент: характеристики та застосування у 3D-друку. *LBL Corp.* 25.10.2024. URL: <https://lbl-corp.com/blog/shcho-take-filament/> (дата звернення: 05.04.2025).
- 2) Адитивні технології. *Easy3dprint.* 15.03.2022. URL: <https://easy3dprint.com.ua/uk/aditivni-tehnologiyi/> (дата звернення: 05.04.2025).
- 3) Сушарки: види, принцип роботи та застосування. *Нова Каховка.City.* 01.02.2025. URL: <https://novakahovka.city/articles/340575/susharki-vidi-princip-roboti-ta-zastosuvannya> (дата звернення: 05.04.2025).
- 4) Desiccant. *Wikipedia.* 24.01.2025. URL: <https://en.wikipedia.org/wiki/Desiccant> (дата звернення: 07.04.2025).
- 5) Розміри катушки (до 1 кг). *3DPlast.* URL: <https://3dplast.biz/ua/p2506205231-filament-petg-copet.html> (дата звернення: 08.04.2025).
- 6) Розміри катушки (до 3 кг). *3DPlast.* URL: <https://3dplast.biz/ua/p2507836064-filament-petg-copet.html> (дата звернення: 08.04.2025).
- 7) FilaDryer S2. *SUNLU.* URL: <https://3dsunlu.com/products/sunlu-filadryer-s2> (дата звернення: 09.04.2025).
- 8) All about DryWise. *DryWise.* URL: <https://drywise.co> (дата звернення: 09.04.2025).
- 9) Filament Drying Station. *FlashForge Denmark.* URL: <https://www.flashforge.dk/item/filament-drying-station> (дата звернення: 09.04.2025).

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		60

- 10) AMS 2 Pro. Bambu Lab. Accessories. URL:
<https://www.bambulab.net.ua/product/ams-2-pro/> (дата звернення:
 09.04.2025).
- 11) LabVac Series. Fontijne. LabVac. URL:
<https://www.fontijnepresses.com/products/labvac-series/#1598456466829-a09b9f46-7144f6f9-ef00> (дата звернення: 09.04.2025).
- 12) Introduction into "Cyclopes". Eibos 3D. URL:
<https://eibos3d.com/pages/cyclopes-introduce> (дата звернення:
 12.04.2025).
- 13) eSUN eBox Filament Dryer Review. eSUN. Review. 01.02.2023. URL:
<https://www.esun3d.com/news/ebox-filament-dryer-review/> (дата звер-
 нення: 12.04.2025).
- 14) Creality Space Pi Plus Filament Dryer review — Just shy of perfect.
 GamingTrend. Review. 21.01.2025. URL:
[https://gamingtrend.com/reviews/creality-space-pi-plus-filament-dryer-
 review-just-shy-of-perfect/](https://gamingtrend.com/reviews/creality-space-pi-plus-filament-dryer-review-just-shy-of-perfect/) (дата звернення: 12.04.2025).
- 15) Модуль KY-040 енкодера EC11. Arduino. URL:
<https://arduino.ua/prod1223-modyl-enkoder> (дата звернення: 15.04.2025).
- 16) ESP32-S2-DevKitM-1. ESORESSIF. Projects. URL:
[https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s2/esp32-s2-
 devkitm-1/user_guide.html](https://docs.espressif.com/projects/esp-dev-kits/en/latest/esp32s2/esp32-s2-devkitm-1/user_guide.html) (дата звернення: 15.04.2025).
- 17) DS18B20 Datasheet. Alldatasheets. URL:
[https://www.alldatasheet.com/datasheet-
 pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html](https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/58557/DALLAS/DS18B20.html) (дата звернення: 15.04.2025).
- 18) Модуль MAX6675 + термопара К-типу. Mini-Tech. URL:
<https://www.mini-tech.com.ua/ua/modul-termopara> (дата звернення:
 15.04.2025).

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		61

- 19) Датчик вологості SHT31-D ІІС. *Arduino*. URL: <https://arduino.ua/prod2825-datchik-temperatyri-i-vlajnosti-sht31-d-iic> (дата звернення: 15.04.2025).
- 20) Модуль годинника реального часу DS1307 RTC. *ArduShop*. URL: <https://ardushop.in.ua/arduino/real-time-clock-module-ds1307-rtc> (дата звернення: 15.04.2025).
- 21) Кулер Chieftec Thermal Killer (AF-0825S). *E-Server*. URL: <https://e-server.com.ua/uk/kuler-do-korpusu-chieftec-thermal-killer-af-0825s> (дата звернення: 15.04.2025).
- 22) Керамічний обігрівач 50 Вт 12 В кондуктивного типу. *CoolBe*. URL: <https://www.coolbe.com/uk/products/672486ce2f7dd801383c923c> (дата звернення: 16.04.2025).
- 23) AO3400 Datasheet. *Alldatasheets*. URL: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/136084/AOSMD/AO3400.html> (дата звернення: 16.04.2025).
- 24) 4.3inch DSI LCD. *WaveShare*. *Wiki*. URL: https://www.waveshare.com/wiki/4.3inch_DSI_LCD (дата звернення: 17.04.2025).
- 25) FSR 402 Data Sheet. *InterLink Electronics*. URL: <https://cdn.sparkfun.com/assets/8/a/1/2/0/2010-10-26-DataSheet-FSR402-Layout2.pdf> (дата звернення: 20.04.2025).
- 26) Адаптер I2C для LCD дисплеїв на PCF8574. *Mini-Tech*. URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/pcf8574-i2c-adapter> (дата звернення: 20.04.2025).
- 27) PCB Trace Width Calculator. *PCBWay*. URL: https://www.pcbway.com/pcb_prototype/trace-width-calculator.html (дата звернення: 05.05.2025).

					<i>PE12.421413.001 ПЗ</i>	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		62

- 28) Богдан Г. А., Бурау Н. І., Аврутов В. В. НАДІЙНІСТЬ І ДІАГНОСТИКА ПРИЛАДІВ І СИСТЕМ / ред. В. І. Микитенко. 2-ге вид. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2024. 190 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/cff91745-165b-466e-b564-6f3c050a8049/content> (дата звернення: 05.06.2025).
- 29) Методи та засоби вимірювання параметрів технологічних процесів [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 151 «Автоматизація та комп'ютерно- інтегровані технології» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: О. К. Нікітін, В.М. Зайцев. – Електронні текстові дані (1 файл: 1,50 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 68 с
- 30) Vibration Analysis of a Simply Supported PCB with a Component- An Analytical Approach. *ResearchGate*. 15.01.2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/224376425_Vibration_Analysis_o_f_a_Simply_Supported_PCB_with_a_Component-
_An_Analytical_Approach](https://www.researchgate.net/publication/224376425_Vibration_Analysis_of_a_Simply_Supported_PCB_with_a_Component-An_Analytical_Approach) (дата звернення: 12.05.2025).

ДОДАТОК А. ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

ПОГОДЖЕНО

к.т.н., доц. Приходько І. О.
(керівник)

ЗАТВЕРДЖЕНО

к.т.н., професор. Мовчанюк А.В.
(Завідувач кафедри Прикладної
радіоелектроніки)

ДОДАТОК А ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЕКТ

Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інфор-
мування користувача

Петруненко О. В.

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		64

1 ТЕХНІЧНЕ ЗАВДАННЯ

1.1 Назва, Підстава для виконання

Пристрій: Сушильна установка для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача

Підставою для виконання є завдання кафедри ПРЕ, що затверджено наказом факультету №1840—с

1.2 Мета виконання і призначення розробки

Метою є розробка сушильної установки для філаменту з функцією контролю маси та інформування користувача— пристрій сушить пластик для 3Д-друку, проводить зважування залишків та надає основну інформацію по Wi-Fi.

1.3 Технічні вимоги

1.3.1 Показники призначення

Напруга живлення приладу.....12 В.

Максимальна потужність пристрою.....24 Вт.

1.3.2 Вимоги до життєдіяльності та стійкості до зовнішніх впливів та чинників

Кліматичне виконання – У3 (згідно ГОСТ 15150–69).

1.3.3 Вимоги до надійності

Пристрій повинен бути відновлюваний і ремонтпридатний по ГОСТ 27.002-2015.

Середній наробіток на відмовлення, не менше, 3880 годин.

Середній строк служби, не менше 1 року.

1.3.4 Вимоги до технологічності

Вимоги до технологічності по ГОСТ 14.201-83.

1.3.5 Вимоги до конструкції

Пристрій повинен бути відновлюваний та ремонтпридатний згідно ГОСТ 27.002-89.

Маса пристрою не повинна перевищувати 1 кг.

Габарити не більше:

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		65

Довжина.....355 мм.
 Ширина.....141 мм.
 Висота.....520 мм.

1.3.6 Вимоги до стандартизації та уніфікації

Рівень стандартизації та уніфікації повинен відповідати ГОСТ 12.201-83.

Коефіцієнт стандартизації.....не менше 0,3.

Коефіцієнт уніфікації.....не менше 0,6.

1.3.7 Вимоги до дизайну та ергономіки

Розробити сучасний та зручний корпус з елементами керування та інформування

1.3.8 Вимоги до експлуатації, зручності технічного обслуговування та ремонту

Вимоги до технологічності згідно ГОСТ 14.201-83. Всі комплектуючі вироби повинні проходити вхідний контроль на відповідність вимогам ТУ.

Пристрій повинен бути відновлюваний та ремонтпридатний згідно ГОСТ 27.002-89.

1.3.9 Вимоги безпеки життя, здоров'я, майна громадян та охорони довкілля

Керуватися положеннями стандартів про вимоги технічної безпеки, електробезпеки, пожежної безпеки ДБН та ДСТУ.

Утилізація згідно вимог для промислових відходів за ГОСТ 30773-2001.

1.3.10 Вимоги до транспортування, зберігання та експлуатації

Умови транспортування згідно ГОСТ 15150-69.

Зберігання: складське приміщення з частковим опаленням

Зберігання повинно проводитися в сухому, вентильованому приміщенні при температурі від 0 до +40 градусів за Цельсієм.

1.3.11 Вимоги до якості і технічного рівня

Відповідає світовому рівню.

1.4 Вимоги до сировини, матеріалів і ПКВ

					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		66

Вимоги до сировини та матеріалів не висуваються.

1.5 Вимоги до консервації, пакування та маркування

Маркування: вимоги до маркування не висуваються.

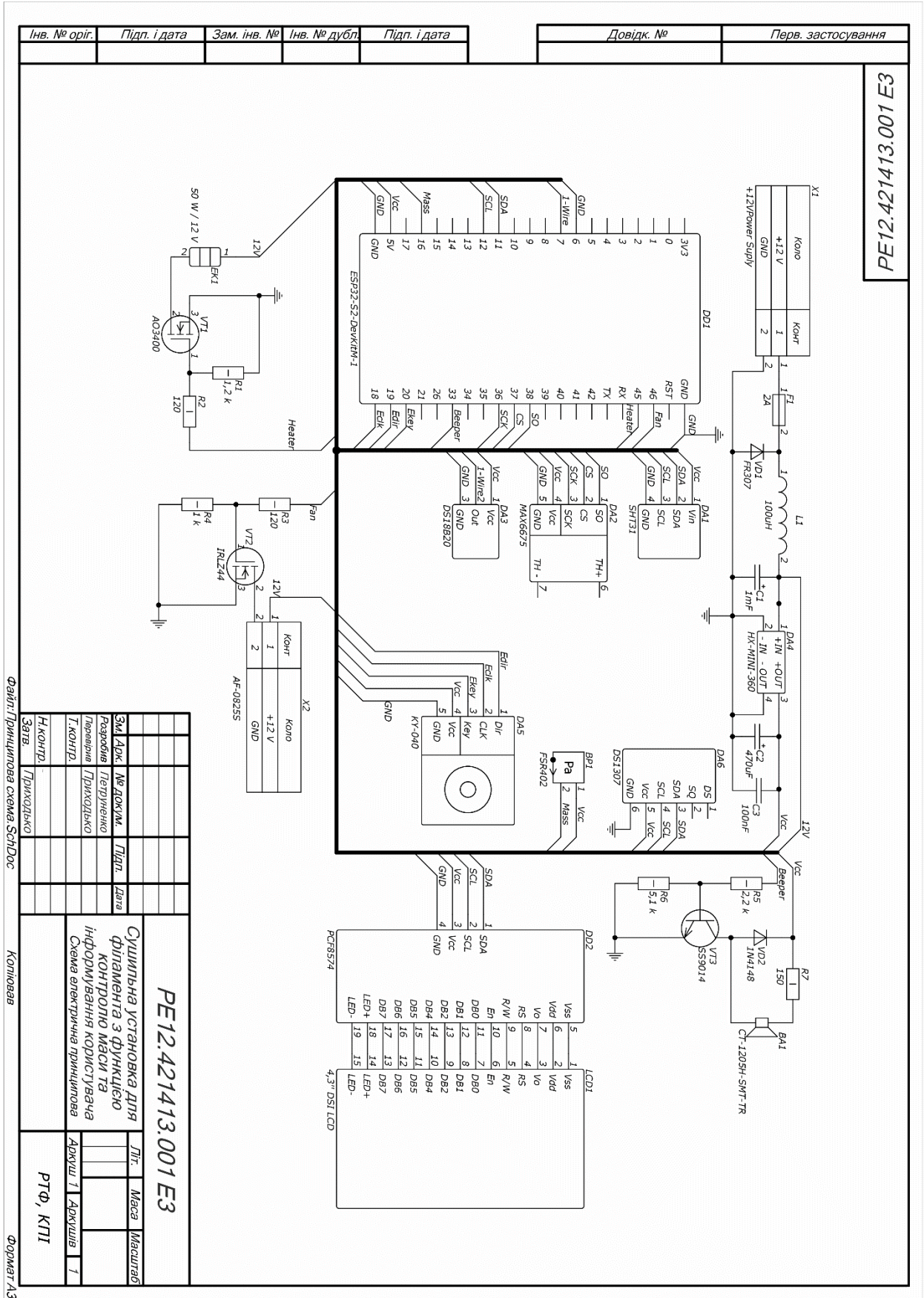
Консервація: не передбачено.

1.6 Вимоги до розроблюваної документації

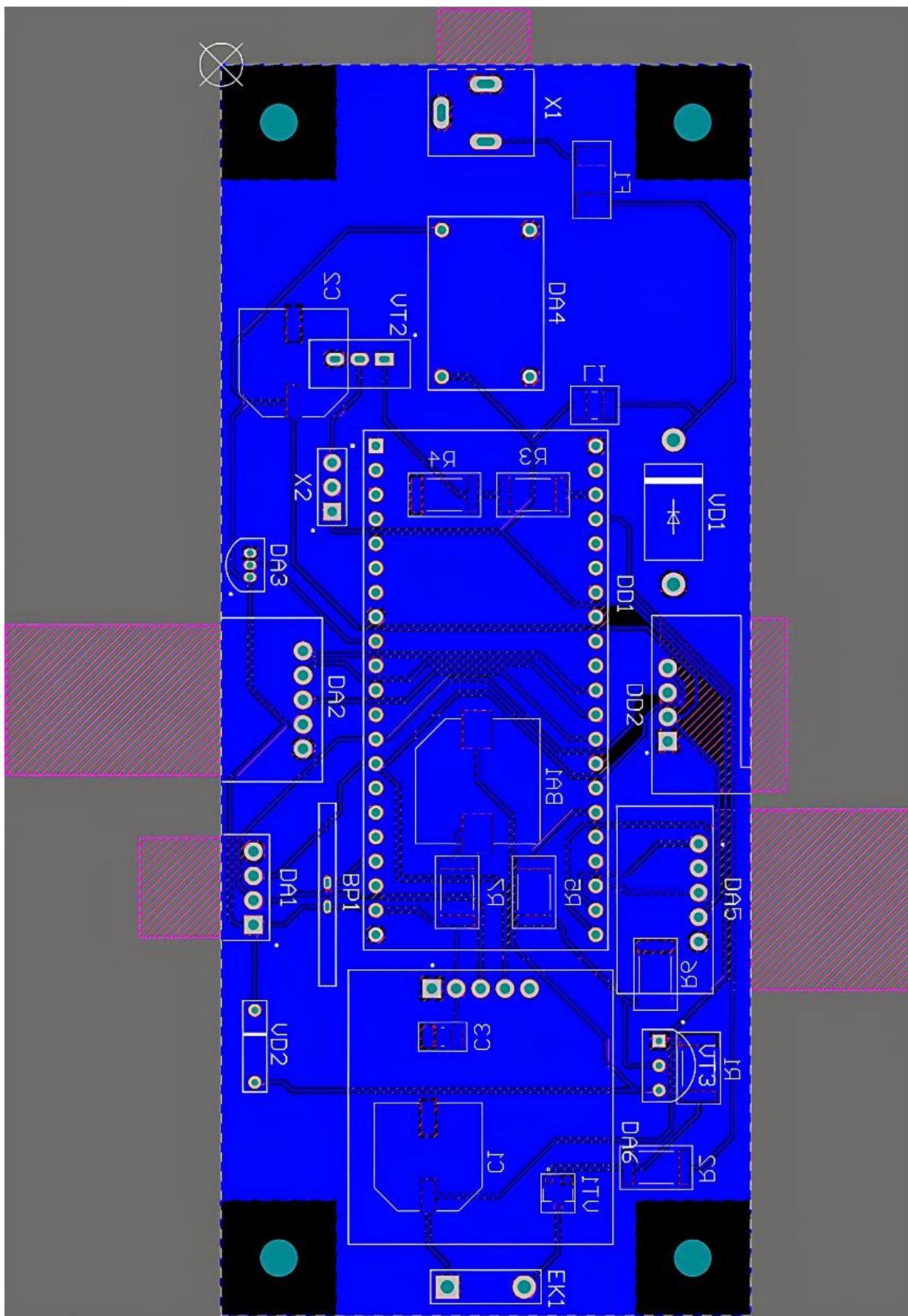
Документація оформлюється згідно ЄСКД.

					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата		67

ДОДАТОК Б. СХЕМА ЕЛЕКТРИЧНА ПРИНЦИПОВА



ДОДАТОК В. ТРАСУВАННЯ ДРУКОВАНОЇ ПЛАТИ



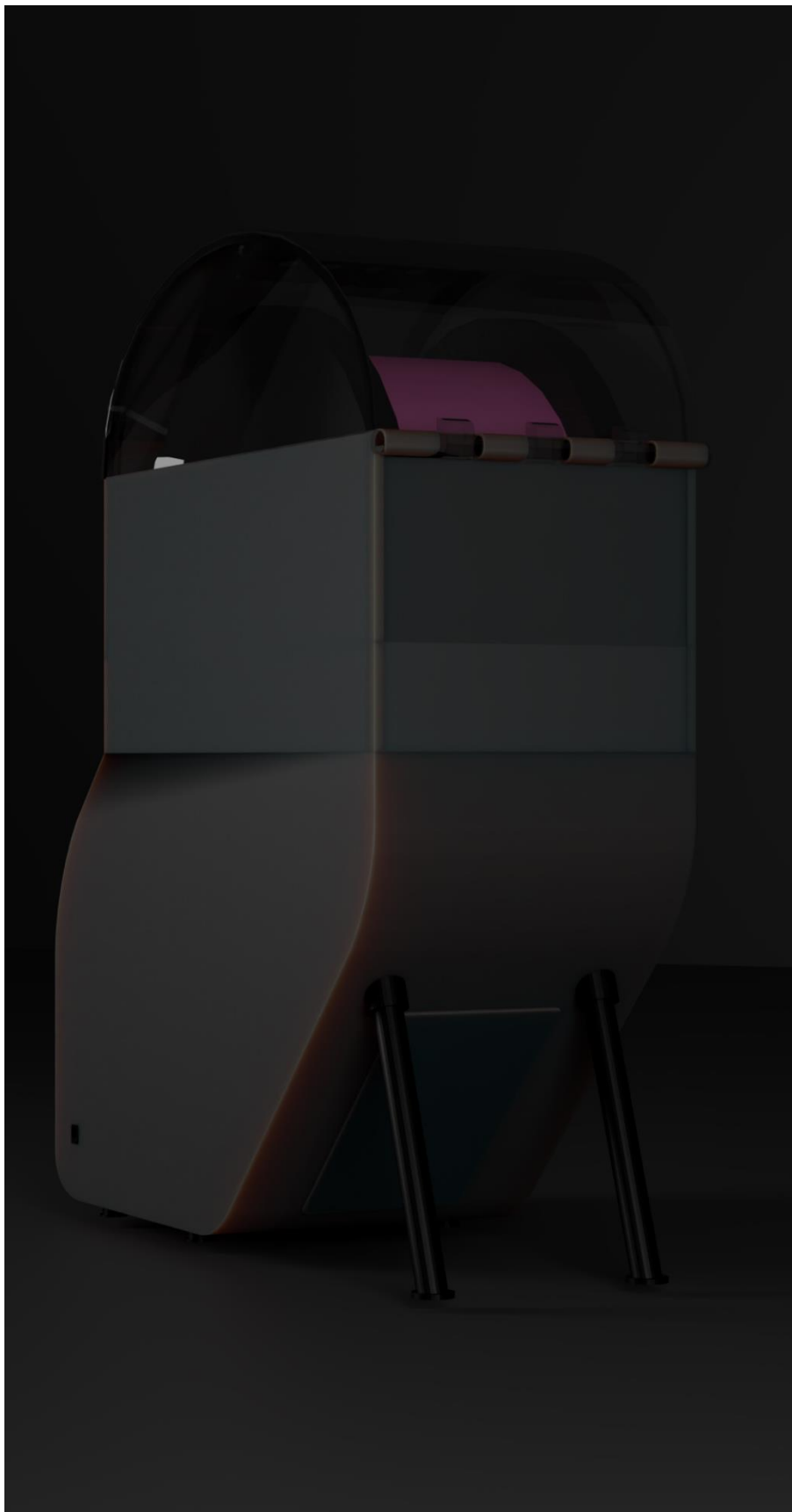
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата

PE12.421413.001 ПЗ

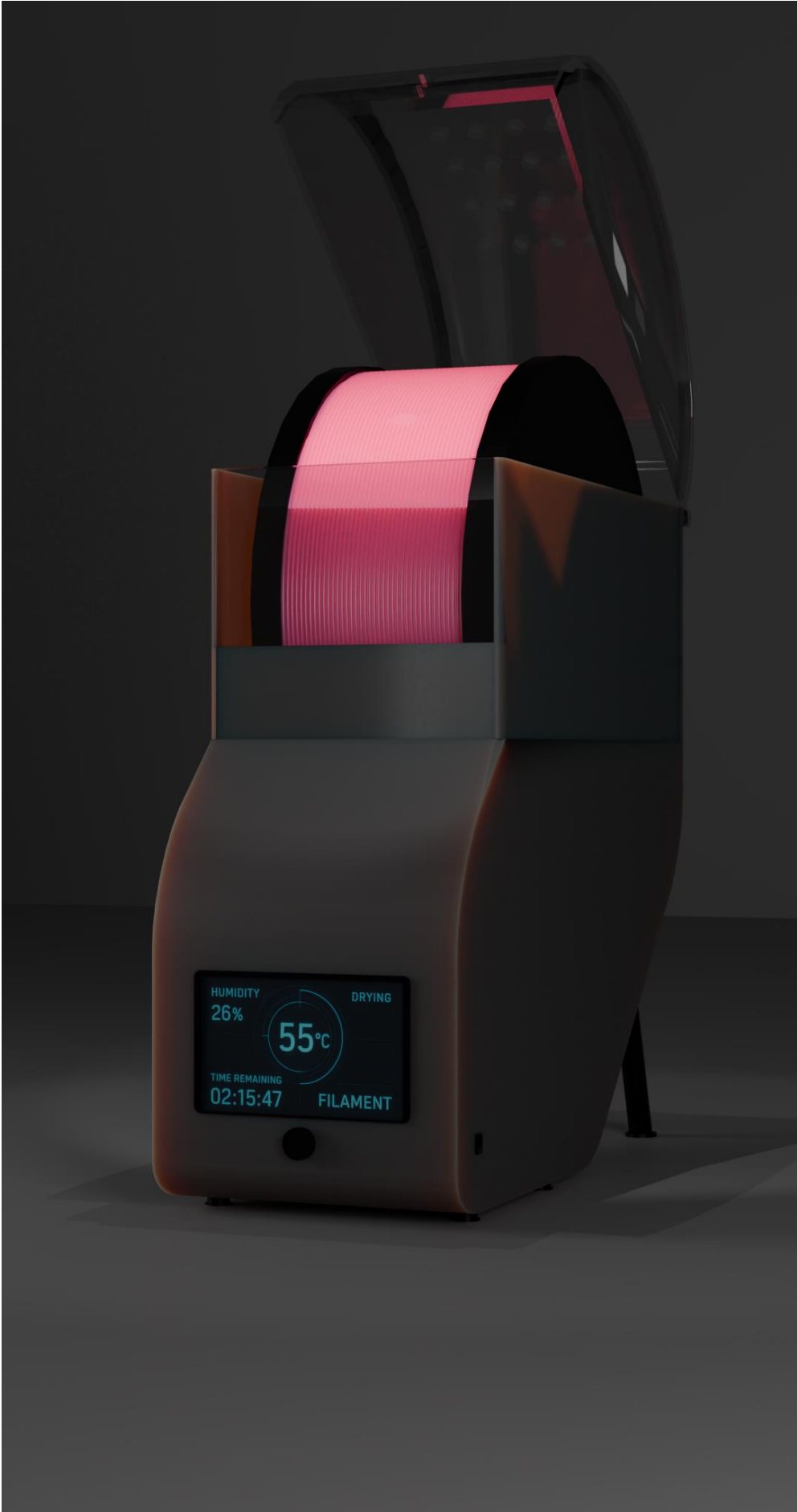
Лист

69

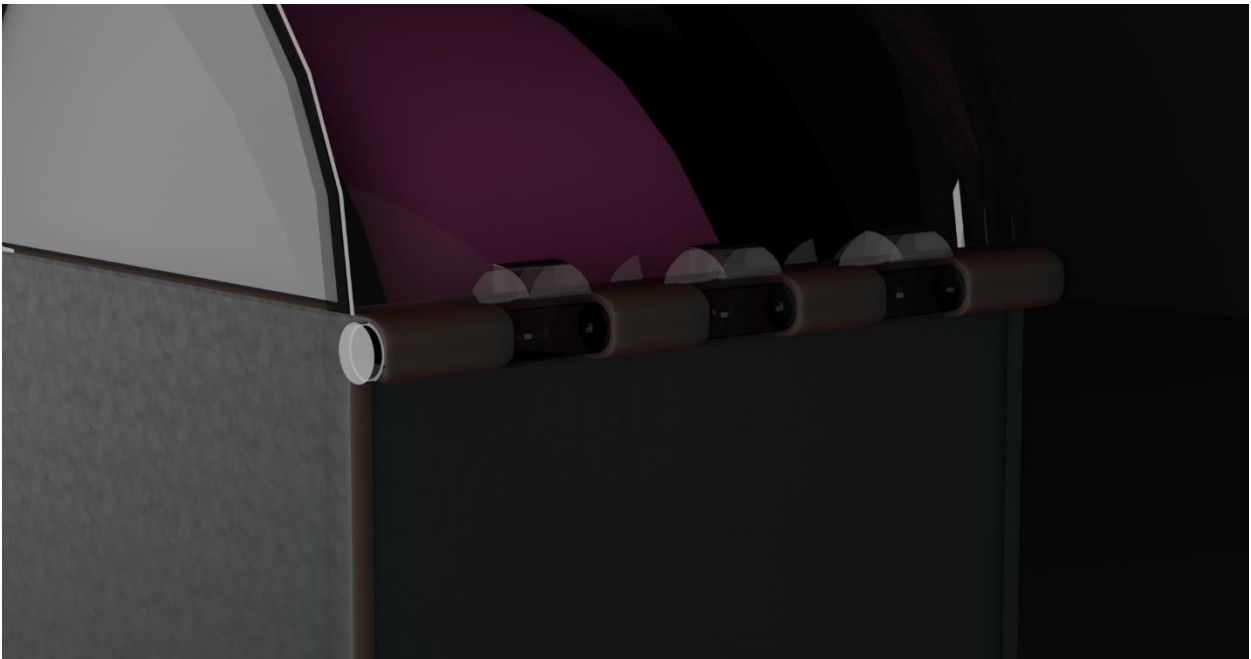
ДОДАТОК Г. РЕНДЕРИ КОРПУСУ



					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		70



					PE12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		71



					РЕ12.421413.001 ПЗ	Лист
Зм.	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		72

ДОДАТОК Д. ПЕРЕЛІК ЕЛЕМЕНТІВ

Позначення	Найменування	Кільк.	Прим.
BA1	Магнітний звуковий перетворювач CT-1205H-SMT-TR	1	
BP1	Датчик тиску FSR 402		
		1	
	<u>Конденсатори</u>		
C1	1000uF 10V EZV SMD <u>sizeF (low imp.) (EZV102M10RF-Hitano)</u>	1	
C2	470uF 25V EZV SMD <u>sizeF (low imp.) (EZV471M25RF-Hitano)</u>	1	
C3	100uF 6,3V X5R 10% 1206 (CL31A107MQHNNNE-Samsung)	1	
	<u>Мікросхеми</u>		
DA1	SHT31-D I2C	1	
DA2	MAX6675	1	
DA3	DS18B20	1	
DA4	HX-MINI-360	1	
DA5	KY-040	1	
DA6	DS1307	1	
DD1	ESP32-S2-DevKitM-1	1	
DD2	PCF8574	1	
EK1	Керамічний обігрівач 50 Вт 12 В <u>кондуктивного типу</u>	1	
F1	Керамічний запобіжник 0679L2000-01	1	
L1	Індуктивність 100uH 20% SMD 1210 (LSQPA322525T101MR-Yuden)	1	

					PE12.421413.001 ПЕ			
		№ докум.	Підпис	Дата				
Розробив	Петруненко О.				Сушильна установка Перелік елементів	Літ.	Арк.	Архувів
Перевір.							1	2
Реценз.						НТУУ «КПІ» РТФ		
Н. Контр.								
Затверд.	Приходько І							

					PE12.421413.001 ПЗ				Лист
Зм.	Лис	№ докум.	Підпис	Дата					73

ДОДАТОК Е. СКЛАДАЛЬНИЙ КРЕСЛЕНИК

[illegible]