

Міністерство освіти і науки України  
Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

(повна назва)

Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та  
робототехніки

(повна назва)

## КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

### Пояснювальна записка

рівень вищої освіти другий (магістерський).

Розроблення технологічного процесу з'єднання виробів на базі паяльної станції

(тема)

Виконав:

здобувач 2 року навчання

групи КІТПВзм-23-1

Глушенко Олександр Геннадійович

(прізвище, ініціали)

Спеціальність 174 Автоматизація та комп'ю-  
терно-інтегровані технології та робототехніка

Освітня програма Комп'ютерно-інтегровані  
технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна

(повна назва освітньої програми)

Керівник проф. Андрусевич А.О.

(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту  
зав. кафедри

(підпис)

Невлюдов І.Ш.

(прізвище, ініціали)

2025 р.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Навчально-науковий центр заочної форми навчання

Кафедра	Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
Рівень вищої освіти	другий (магістерський)
Спеціальність	174 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка
Тип програми	освітньо-професійна
Освітня програма	Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва

(код і повна назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав. кафедри \_\_\_\_\_

(підпис)

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 р.

## ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачеві \_\_\_\_\_

Глушенку Олександрю Геннадійовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розроблення технологічного процесу з'єднання виробів на базі паяльної станції

затверджена наказом по університету від 22.11.2024 №197Стз

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 27.01.2025

3. Вихідні дані до роботи: \_\_\_\_\_

3.1 Припій: SAC305, SAC405, Sn100С, ПОС-61;

3.2 Напруга живлення: 220 В 50 Гц;

3.3 Параметри якості: механічна міцність, відсутність дефектів, температурний режим.

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі:

4.1 Аналіз предметної області;

4.2 Розробка ІЧ паяльної станції;

4.3 Розробка програмного забезпечення;

4.4 Експериментальні дослідження;

4.5 Охорона праці.

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій (слайдів) Демонстраційний матеріал представлений у форматі презентації PowerPoint  
*Демонстраційний матеріал представлений у форматі PowerPoint (\*.ppt) – 17с. формату А4*

6. Консультанти розділів роботи (п.6 включається до завдання за наявності консультантів згідно з наказом, зазначеним у п.1 )

Найменування розділу	Керівник (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Терміни виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз предметної області	30.11.2024	виконано
2	Розробка ІЧ паяльної станції	05.12.2024	виконано
3	Розробка програмного забезпечення	10.12.2024	виконано
4	Експериментальні дослідження	20.12.2024	виконано
5	Охорона праці	25.12.2024	виконано
6	Оформлення пояснювальної записки	30.12.2024	виконано
7	Подання у ЕК	24.01.2025	виконано

Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 22.11.2024 \_\_\_\_\_

Здобувач \_\_\_\_\_  
(підпис)

Керівник роботи \_\_\_\_\_  
(підпис)

проф. Андрусевич А.О.  
(посада, прізвище, ініціали)

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надав та не одержував недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

06.01.2025



Глушенко Олександр Геннадійович

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 101 с., 54 рис., 7 таб., 1 дод., 22 джерел.

### ІНФРАЧЕРВОНА ПАЯЛЬНА СТАНЦІЯ, НАГРІВАЛЬНИЙ ЕЛЕМЕНТ, ТЕМПЕРАТУРА, ТЕРМОПРОФІЛЬ, BGA МІКРОСХЕМА.

Актуальність теми – технологічний процес пайки є важливою складовою у виробництві електронних компонентів, зокрема при виробництві друкованих плат. Останнім часом у сучасній електроніці все ширше використовуються BGA-чіпи завдяки їх високій щільності контактів. Технологія ІЧ пайки створює оптимальні умови для роботи з BGA компонентами, що робить її важливим інструментом для сучасного виробництва та ремонту електроніки. Ця технологія забезпечує рівномірне нагрівання поверхні, що є особливо важливим під час монтажу компонентів формату BGA.

Монтаж BGA-чипів є складним процесом через низку факторів. По-перше, розташування контактів у вигляді матриці кульок (BGA) на нижній поверхні чіпа ускладнює їх візуальний контроль і доступність для стандартних методів пайки. По-друге, недостатнє або нерівномірне прогрівання може призвести до появи холодних паяних з'єднань, тоді як надмірне нагрівання здатне пошкодити як сам чіп, так і прилеглі компоненти.

Об'єкт дослідження – технологічний процес пайки.

Предмет дослідження – оптимізація технологічних параметрів пайки з використанням ІЧ станції.

Мета – розробка інфрачервоної паяльної станції з оптимізованими параметрами нагрівання, що забезпечує рівномірний розподіл температури на робочій поверхні та мінімізує ризик деформації плат.

Методи дослідження – експеримент, спостереження, математичний аналіз.

Проведено дослідження температурних профілів розробленої станції, які показали можливості станції для виконання монтажу BGA-чіпів без ризику пошкодження компонентів.

Результати дослідження можуть стати основою для виробництва нових ПЧ паяльних станцій.

Отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку середньо- та високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

## ABSTRACT

Explanatory note: 101 pp., 54 figs., 7 tab., 1 app, 22 sources.

BGA MICROCHIP, INFRARED SOLDERING STATION, HEATING ELEMENT, TEMPERATURE, THERMOPROFILE.

The relevance of the topic is the technological process of soldering, which is an important warehouse in the production of electronic components, as well as in the production of other circuit boards. Nowadays, today's electronics are increasingly using BGA chips due to their high contact density. IR soldering technology creates an optimal solution for working with BGA components, making them an important tool for daily manufacturing and repair of electronics. This technology ensures uniform heating of the surface, which is especially important when installing BGA format components.

Mounting BGA chips is a complex process due to a number of factors. First, the arrangement of contacts in the form of a ball array (BGA) on the bottom surface of the chip makes them difficult to visually inspect and accessible for standard soldering methods. Second, insufficient or uneven heating can lead to the appearance of cold solder joints, while excessive heating can damage both the chip itself and adjacent components.

The object of the study is the soldering process.

The subject of the study is the optimization of the soldering process parameters using an IR station.

The goal is to develop an infrared soldering station with optimized heating parameters, which ensures uniform temperature distribution on the working surface and minimizes the risk of board deformation.

Research methods are experiment, observation, mathematical analysis.

The temperature profiles of the developed station were studied, which showed the station's capabilities for mounting BGA chips without the risk of damaging components.

The results of the study can become the basis for the production of new IR soldering stations.

The results obtained can be attributed to Sustainable Development Goal 9 “Industry, Innovation and Infrastructure”, namely item 9.4 “Promote the accelerated development of medium- and high-tech sectors of the processing industry, which are formed on the basis of the use of the “education - science - production” chains and a cluster approach in the following areas: development of an innovation ecosystem; development of information and telecommunications technologies (ICT); application of ICT in agro-industrial complex, energy, transport and industry; high-tech mechanical engineering; creation of new materials; development of pharmaceutical and bioengineering industries”.

## ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень .....	10
Вступ.....	11
1 Аналіз предметної області.....	13
1.1 Огляд і аналіз технологій пайки.....	13
1.1.1 Ручна пайка .....	13
1.1.2 Конвекційна пайка .....	16
1.1.3 Хвильова пайка.....	17
1.1.4 Селективна пайка .....	19
1.2 Різновиди припоїв .....	22
1.3 Флюси для електромонтажного паяння.....	25
1.4 Інфрачервоні паяльні станції .....	26
1.5 Висновок до першого розділу.....	35
2 Розробка інфрачервоної паяльної станції.....	36
2.1 Розробка електричної частини інфрачервоної паяльної станції .....	36
2.2 Вибір електронних компонентів для паяльної станції.....	37
2.2.1 Мікроконтролер.....	37
2.2.2 Блок вводу/виводу.....	42
2.2.3 Вибір датчика температури.....	44
2.2.4 Вибір нагрівачів .....	48
2.2.5 Вибір регулятора потужності для нагрівачів .....	51
2.2.7 Блок живлення.....	58
2.2.8 Збірка пристрою .....	59
2.3 Висновки до другого розділу .....	63
3 Розробка програмного забезпечення.....	64
3.1 Середовище розробки та бібліотеки .....	64
3.2 Вимір температури.....	65
3.3 PID контроль температури .....	69

3.4 Загальна робота системи .....	73
3.5 Висновки до третього розділу .....	76
4 Експериментальні дослідження.....	78
4.1 Розрахунок коефіцієнтів PID-регулятора .....	78
4.2 Розробка моделі управління.....	80
4.3 Тестування паяльної станції.....	84
4.5 Висновки до четвертого розділу.....	87
5 Охорона праці.....	88
Висновки .....	96
Перелік джерел посилань .....	98
Додаток А Демонстраційний матеріал.....	101

**ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ**

ДП – друкована плата;

ДСТУ – державний стандарт України;

ІЧ – інфрачервоний;

МК – мікроконтролер;

ПС – паяльна станція;

BGA – ball grid array;

PID – proportional-Integral-Derivative.

## ВСТУП

Процес з'єднання електронних компонентів на друкованих платах (ДП) є одним із ключових етапів у виробництві сучасної електроніки. Останніми роками особливого значення набуває використання інфрачервоних (ІЧ) паяльних станцій, які забезпечують рівномірне та контрольоване нагрівання поверхні без фізичного контакту. Це особливо важливо при монтажі компонентів типу BGA (Ball Grid Array), які потребують точного регулювання температури. нині є невід'ємною частиною сучасних електронних пристроїв – вони розповсюджені в побутовій електроніці, комунікаційних системах, комп'ютерах, автомобільній електроніці тощо. Однак процес монтажу BGA-компонентів є складним і має низку технічних проблем, оскільки перегрів або нерівномірний розподіл тепла можуть призвести до деформації плат і порушення з'єднання.

Особливо важливо забезпечити надійність і довговічність з'єднання, дефекти пайки можуть призвести до збоїв у роботі кінцевого пристрою. Сучасний ринок пропонує дорогі та технологічно досконалі паяльні станції, здатні забезпечити високу точність процесу, однак їхня вартість часто стає перешкодою для малого виробництва чи сервісних центрів. У цьому контексті актуальним є дослідження можливостей доступних ІЧ-паяльних станцій, які можуть забезпечити аналогічну якість.

Сучасний рівень розвитку технологічних рішень, спрямованих на оптимізацію процесів монтажу BGA-компонентів для забезпечення надійності та довговічності з'єднань, без ризику деформації друкованих плат і втрати якості. Технологія ІЧ паяння, що зарекомендувала себе рядом переваг, зокрема швидким і вибірковим нагріванням, а також можливістю налаштування термопрофілю – вимагає подальшого вдосконалення для покращення процесів монтажу та якості демонтажу поверхневих компонентів на електронних модулях із високою щільністю.

Об'єкт дослідження – технологічний процес пайки.

Предмет дослідження – оптимізація технологічних параметрів пайки з використанням ІЧ станції.

Мета – розробка інфрачервоної паяльної станції з оптимізованими параметрами нагрівання, що забезпечує рівномірний розподіл температури на робочій поверхні та мінімізує ризик деформації плат.

Методи дослідження – експеримент, спостереження, математичний аналіз.

Результати роботи можуть бути корисними для виробництва нових ІЧ станцій з бюджетних компонентів, де потрібно забезпечення високоякісних паяльних з'єднань із мінімальними витратами, а також для навчальних закладів і дослідницьких лабораторій, які займаються вивченням технологій монтажу електронних компонентів.

Кваліфікаційна робота виконана згідно державного стандарту України (ДСТУ) 3008 – 15 [1] та керуючись методичними вказівками з підготовки й оформлення кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої [2], методичними вказівками та публікацією, що була надрукована в збірнику студентських наукових статей «Автоматизація та приладобудування» «Automation and Development of Electronic Devices» ADED 2024 (випуск 2) [електронне видання] [3].

## 1 АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ОБЛАСТІ

### 1.1 Огляд і аналіз технологій пайки

#### 1.1.1 Ручна пайка

Потреба в більш точних та ефективних виробничих процесах сприяла зростанню популярності певних методів у технології пайки. Пайка – це метод створення міцного з'єднання між різними матеріалами за допомогою розплавленого металу (припою), який заповнює проміжок між деталями та твердне, утворюючи міцний шов. Серед провідних методів виділяють ручну пайку, конвекційну пайку, хвильову пайку і селективну пайку.

Ручна пайка – це процес з'єднання металевих деталей, за допомогою розплавленого припою, який наносять на місце з'єднання за допомогою паяльника. Це один з найпоширеніших і найдоступніших методів з'єднання в електроніці, який використовується як професіоналами, так і любителями, рисунок 1.1.



Рисунок 1.1 – Ручна пайка

Відмінною особливістю паяння є можливість з'єднувати матеріали за відносно низьких температур, що запобігає їх пошкодженню. Цей метод універсальний і застосовується для металевих, так неметалевих матеріалів. У

зоні контакту повинен утворюватися проміжний шар, що складається з припою і продуктів його взаємодії з паяними матеріалами, рисунок 1.2.

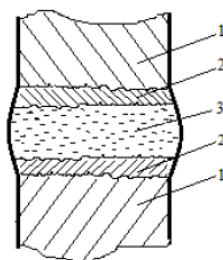


Рисунок 1.2 – Структура паяного з'єднання: 1 – з'єднувані метали, 2 – зона дифузії, 3 – припій

Ключовим моментом якісного паяння є формування міцного з'єднання між матеріалами за рахунок утворення проміжного шару з розплавленого припою. Для цього необхідно виконати комплекс підготовчих операцій: очистити поверхні, активувати матеріали, видалити оксидні плівки і забезпечити оптимальні умови для кристалізації розплавленого металу [4].

Механічна очистка, що включає використання абразивних інструментів та гідроабразивну обробку, дозволяє ефективно видаляти продукти корозії та оксиди з поверхні металу. Шорсткість, що утворюється, сприяє кращому розтіканню припою за рахунок створення безлічі мікроскопічних капілярів.

Для видалення тонких поверхневих плівок, що перешкоджають змочуванню припоєм, застосовують хімічну очистку. Деталі обробляють лужними розчинами або органічними розчинниками за допомогою різних методів (протирання, занурення, розпилення, ультразвукове очищення). Хімічне знежирення деталей проводять у 5%-му розчині лугу або в органічних розчинниках (ацетон, бензин, спирт, чотирихлористий вуглець), спиртобензинових і спиртофреонових сумішах шляхом протирання, занурення, розпилення, обробки в паровій фазі або ультразвуковій ванні.

Очищені деталі необхідно негайно направляти на складання та паяння, оскільки можливість пайки міді зберігається від 3 діб до 5 діб. При нагріванні

металу та припою, через взаємодію з киснем повітря на поверхні основного металу та розплавленого припою утворюються оксидні плівки. Ці плівки перешкоджають формуванню міцного з'єднання. Для забезпечення якісного паяння необхідно ефективно видаляти оксидні плівки. Існує кілька методів очищення: обробка в контрольованих газових середовищах, застосування флюсів, ультразвукове очищення, механічна обробка абразивними матеріалами та плазмохімічна обробка.

Після очищення деталі йде процес лудіння, який є універсальним, найефективнішим і найпоширенішим методом, що забезпечує високу паяємість елементів без додаткових покриттів. До того ж, лудіння – єдиний спосіб видалення золотих покриттів з виводів навісних елементів, що дозволяє уникнути утворення інтерметаллідів і крихких з'єднань.

Типовий технологічний процес лудіння монтажних елементів, друкованих плат та конструктивних деталей включає такі етапи: нанесення флюсу на поверхню, які будуть лудитися, лудіння, видалення надлишків припою, промивання залишків флюсу та сушіння.

Найпоширенішим методом видалення оксидів під час процесу паяння є використання флюсів. Флюс, як хімічний реагент, виконує дві основні функції: очищає поверхню металу від оксидів і зменшує поверхневий натяг разом із кутом змочування.

Типовими прикладами активних флюсів є ті, що мають воду або спирти як розчинники. Активаторами в них виступають неорганічні та органічні кислоти або їх солі, наприклад, соляна чи фосфорна кислота, а також неорганічні солі ( $ZnCl_2$ ,  $NH_3Cl$ ,  $SnCl_2$ ,  $CuCl$  тощо).

Процеси лудіння можуть виконуватися як вручну за допомогою електропаяльників, так і механізованими методами – зануренням у припій або використанням хвилі припою. Лудіння поштучно електропаяльником застосовується для невеликих партій деталей або для виправлення дефектів, що виконується під час механізованого групового лудіння.

Після лудіння деталей вони ставляться на свої місця та нагріваються у місці з'єднання за допомогою паяльника, додаючи необхідну кількість припою.

Для забезпечення надійності паяних з'єднань передбачають:

- механічне закріплення елементів та монтажних провідників на контактних пелюстках та гніздах при об'ємному монтажі;
- вибір оптимальних зазорів в конструкції з'єднань між поверхнями монтажних елементів.

Зазвичай після процесу паяння на платі залишаються залишки флюсу та його продукти розкладу. Ці речовини можуть викликати корозію, погіршити електричні характеристики схеми та призвести до деградації паяних з'єднань. Потреба в очищенні плати залежить від вимог до надійності обладнання, умов експлуатації та призначення виробу. Якщо використовують захисні масла, очищення є обов'язковим у будь-якому випадку.

Для промивання плат різноманітні розчинники та спеціальні склади, зокрема й воду. Миючі склади повинні ефективно розчиняти як сполучну речовину, так і основний матеріал флюсу.

### 1.1.2 Конвекційна пайка

Конвекційна пайка – це високотехнологічний процес з'єднання компонентів на друкованих платах із використанням гарячого повітря, водню, азоту, аргону чи суміші газів. На відміну від ручного паяння, де тепло передається від жала паяльника, тут нагрівання відбувається за рахунок конвекції – переміщення нагрітого повітря всередині спеціальної печі.

Газ або гаряче повітря, що подається під високим тиском, проходить через спеціальні нагрівальні елементи, після чого прямує до сопла робочих головок. Ці головки оснащені соплами, якими з великою швидкістю виходить потік нагрітого газу. Друкована плата із встановленими компонентами та попередньо нанесеним припоєм та флюсом переміщається під цими соплами. За рахунок точного регулювання температури та швидкості потоку газу, а також швидкості переміщення плати забезпечується оптимальний температурний режим для

плавлення припою та створення надійного з'єднання. Для запобігання перегріву окремих компонентів використовується додатковий потік холодного повітря, спрямований на найбільш чутливі елементи.

Переваги конвекційного паяння перед ручним паянням:

- висока продуктивність – можливість обробляти велику кількість плат за короткий час;
- висока якість паяння – рівномірне нагрівання забезпечує надійні та однорідні з'єднання;
- мінімізація браку – автоматизація процесу знижує ймовірність людської помилки;
- повторюваність – можливість точного відтворення процесу паяння;
- використання безсвинцевих припоїв – Відповідність екологічним вимогам.

На рисунку 1.3 ви можете побачити сучасні конвеєрні пічі для конвекційної пайки. Такі печі використовуються у великосерійному виробництві електроніки для забезпечення високої продуктивності та якості [5].



Рисунок 1.3 – Конвеєрні пічі для конвекційної пайки

### 1.1.3 Хвильова пайка

Хвильова пайка – перевірена технологія, яка використовується переважно для друкованих плат із більшими проміжками між компонентами та для компонентів із крізними отворами. Під час цього процесу нижня сторона плати занурюється у ванну з розплавленим припоєм, який утворює хвилю й паяє з'єднання. Це дозволяє швидко та ефективно паяти велику кількість з'єднань за

один прохід. Однак через високе теплове навантаження цей метод менш придатний для делікатних або дуже щільно розташованих компонентів.

Залежно від характеру руху друкованої плати щодо розплавленого припою розрізняють кілька способів паяння. При вертикальному або похилому зануренні платню занурюють у ванну з розплавленим припоєм на глибину, що не перевищує її товщини, забезпечуючи рівномірне змочування всіх контактних майданчиків. Коливальний рух плати дозволяє більш точно дозувати припій та покращити якість паяння дрібних компонентів, проте потребує більш складного обладнання. Протягування плати по поверхні розплавленого припою є високопродуктивним методом, широко застосовуваним у масовому виробництві, але може призвести до нерівномірного нагрівання плати та утворення дефектів паяння. Вибірча подача припою на окремі ділянки плати мінімізує витрату припою та знижує ризик утворення перемичок, але потребує точного налаштування обладнання та може бути дорогим. Вибір оптимального способу паяння залежить від конструкції друкованої плати, типу компонентів, вимог до якості паяння та продуктивності процесу.

Технологічний процес паяння здійснюється за суворого дотримання температурного режиму: розплавлений припій підтримується в діапазоні від 260°C до 280°C з точністю  $\pm 5^\circ\text{C}$ . Час занурення друкованої плати розплавленим припій становить від 4 секунд до 6 секунд. Для забезпечення якісного з'єднання необхідно підтримувати чистоту поверхні припою, регулярно видаляючи окисли скребком.

Незважаючи на простоту, вертикальне занурення і вилучення плати пов'язане з рядом труднощів. Через обмежений час перебування у розплавленому припої, залишки флюсу та надлишки припою не встигають повністю стекти з поверхні плати. Це може призвести до таких негативних наслідків: захоплення флюсу припоєм (залишки флюсу, що не встигли випаруватися, можуть бути захоплені припоєм, що призводить до утворення дефектів пайки), утворення бурульки (надлишок припою, що не встиг стекти,

може застигнути у вигляді бурульки, створюючи ризик короткого замикання між сусідніми елементами).

Недоліками процесу: низька продуктивність, що визначає його придатність для дрібносерійного виробництва; невисока якість паяних сполук; значний відсоток дефектних сполук; підвищена витрата припою; значний термічний вплив на плату. Ряд цих недоліків усувається при похилому зануренні та витягу плати. При зануренні під кутом від  $5^\circ$  до  $7^\circ$  забезпечується видалення газових фракцій флюсу і продуктів реакції, а також стікання припою з поверхні плати, що паяється [6].

На рисунку 1.4 показано приклад устаткування для хвильової пайки.



Рисунок 1.4 – Устаткування хвильової пайки GTF/330 (а) та MSW 2340 (б)

#### 1.1.4 Селективна пайка

Селективна пайка – це сучасний метод пайки електронних компонентів на друкованій платі, який дозволяє з'єднувати тільки певні, заздалегідь визначені ділянки. На відміну від традиційної хвильової пайки, де припій контактує з усією поверхнею плати, селективна пайка використовує спеціальні інструменти для точного нанесення припою лише на потрібні місця. Цей підхід дозволяє значно підвищити якість з'єднання, зменшити кількість дефектів та оптимізувати витрати на виробництво.

Особливістю цього методу є використання спеціалізованого обладнання, зображено на рисунку 1.5 яке забезпечує точне позиціонування друкованої плати щодо джерела тепла і припою. У процесі залучаються автоматизовані

маніпулятори та програмне забезпечення, що контролюють подачу припою та температури, забезпечуючи виконання пайки лише там, де це необхідно.



Рисунок 1.5 – Зовнішній вигляд селективного паяльного апарата

Процес селективної пайки можна умовно розділити на кілька основних етапів, кожен із яких забезпечує точність і якість з'єднання:

- перед початком пайки друкована плата та всі її компоненти перевіряються на відповідність технічним вимогам, поверхню плати очищають від забруднень, пилу та окислів, а на контактні зони наноситься флюс;
- підготовлена плата встановлюється в автоматизоване обладнання для селективної пайки, такі установки оснащені високоточними маніпуляторами та сенсорами, які забезпечують точне позиціонування плати щодо ділянок, що підлягають пайці;
- перед нанесенням припою виконується додаткова обробка флюсом, це дозволяє зменшити ризики дефектів у з'єднаннях, після чого флюс ефективно видаляє окислення залишків і забезпечує кращу адгезію припою з платою та компонентами;
- припій нагрівається до необхідної температури, після чого спеціальними соплами або мініатюрними головками він наноситься на визначені ділянки, точний контроль температурного режиму та пайки мінімізує ризик перегріву або пошкодження компонентів;
- завершальним етапом є перевірка якості з'єднання, яка проводиться як видно, так і автоматично за допомогою оптичного обладнання та

рентгенографії, цей крок можна зробити з дефектів, наприклад, короткі замикання, неповні з'єднання або мікротріщини.

Селективна пайка має безліч переваг, щоб застосовувати саме її у сучасному виробництві друкованих плат. Вона є більш економічно вигідною, ніж традиційні методи, такі як пайка хвилею, особливо для монтажу компонентів із наскрізними отворами на друкованих платах змішаного типу. Завдяки меншому споживанню ресурсів та зниженню витрат на експлуатацію обладнання, цей підхід сприяє оптимізації собівартості продукції.

Крім економічності, автоматизація процесу мінімізує необхідність ручного втручання, що суттєво знижує ризик людських помилок і погіршує підвищення якості готових виробів [7].

Основні переваги селективної пайки :

- контроль кожного з'єднання, використовуючи однотрубчасті насадки можна точно регулювати параметри пайки для кожного з'єднання;
- програмована автоматизація, сучасні установки для пайки легко програмуються, що дозволяє швидко адаптувати процес до різних типів плат і компонентів;
- зниження термічного впливу, процес пайки відбувається з мінімальним тепловим навантаженням на плату, що зменшує ризик пошкодження чутливих елементів;
- ефективність у захищеній атмосфері, пайка проходить в інертному середовищі, що забезпечує захист від окиснення;
- підходити до різних обсягів виробництва, вибіркова пайка ефективна як для дрібносерійного, так і для масового виробництва;
- стабільність і повторюваність, процес забезпечує однакову якість з'єднання в кожній серії;
- безконтактне нанесення припою, припій наноситься без дотику до поверхні, що зменшує ризик механічних пошкоджень.

## 1.2 Різновиди припоїв

Припій – це спеціальний металевий сплав, який використовується для створення електричних з'єднань між різними компонентами електронних пристроїв. Його основне завдання – забезпечити надійний електричний контакт і механічну міцність з'єднання.

Припій являє собою металевий сплав, який має набагато більш низьку температуру плавлення, ніж основні складові, і таким чином він може бути розплавлений при температурах, які можна досягти відносно легко і без дуже спеціалізованого обладнання.

За температурою плавлення припої поділяються на такі групи: особливо легкоплавкі  $T_{пл} \leq 145^{\circ}\text{C}$ , легкоплавкі  $145^{\circ}\text{C} < T_{пл} \leq 450^{\circ}\text{C}$ , середньоплавкі  $450^{\circ}\text{C} < T_{пл} \leq 1100^{\circ}\text{C}$ , та високоплавкі  $T_{пл} > 1100^{\circ}\text{C}$ .

Із 1 січня 2006 року, згідно директиві 2002/96/EC Європейського парламенту та Ради щодо відходів електричного й електронного обладнання (WEEE) всі електротехнічні і електронні вироби, що поставляються в Європу не повинні мати свинцю та деяких інших шкідливих речовин.

Для електронної промисловості найбільш прийнятний припій для заміни традиційних сплавів (Sn63 Pb 37) і (Sn62 Pb36 Ag2) – SAC305, придатний для пайки оплавленням (в пасті) і для пайки хвилею. Наявність міді перешкоджає утворенню інтерметалідів.

Sn100C – сплав для ручної пайки та паяльних ванн (але має вищу температуру плавлення ніж SAC305), є економічною альтернативою традиційним олов'яно-свинцевим припоєм.

SAC305 – універсальний безсвинцевий припій з відносно низькою температурою плавлення та поліпшеними характеристиками змочування. Найпоширеніший припій у сучасній електронній промисловості через баланс вартості, міцності та продуктивності [8].

Перехід на безсвинцеву пайку в електроніці викликав низку технологічних викликів. Одним із основних є несумісність матеріалів. Індій, що

часто використовується в безсвинцевих припоях, може вступати в небажані реакції із залишками свинцю на друкованих платах або компонентах. Крім того, безсвинцеві припої мають ширший діапазон температур плавлення порівняно зі свинцево-олов'яними. Низькотемпературні припої, наприклад, на основі індію та вісмуту, вимагають спеціальних флюсів і можуть мати обмежену змочуваність. Високотемпературні безсвинцеві припої, такі як сплави на основі олова та міді, збільшують ризик пошкодження термочутливих компонентів, особливо при пайці хвилею. Висока температура плавлення таких припоїв потребує більш жорстких температурних профілів паяння, що підвищує ризик термічного шоку для компонентів, особливо керамічних конденсаторів. Для вирішення цих проблем необхідно ретельно очищати поверхні перед паянням, використовувати спеціальні флюси, оптимізувати температурні профілі та застосовувати додаткові технології, такі як паяння в азотній атмосфері або пайка з попереднім нагріванням. Вибір оптимального безсвинцевого припою та технології паяння залежить від конкретних вимог до виробу та характеристик компонентів. Незважаючи на складнощі, перехід на безсвинцеву пайку є важливим кроком для забезпечення екологічної безпеки та довговічності електронних пристроїв.

Безсвинцеві припої мають як переваги, так і недоліки. З одного боку, вони більш екологічні та безпечні для здоров'я людини. З іншого боку, вони вимагають більш ретельного контролю за технологічним процесом і можуть призвести до підвищення вартості виробництва. Крім того, характеристики паяних з'єднань, отриманих з використанням безсвинцевих припоїв, можуть відрізнятися від характеристик з'єднань, отриманих з використанням свинцево-олов'яних припоїв.

У таблиці 1.1 перераховані найбільш поширені припої та їх характеристики для порівняння їх ефективності та сфер застосування.

Таблиця 1.1 – Характеристики припоїв

Назва припою	Склад	T, °C	Міцність з'єднання	Вартість	Область застосування
ПОС 61	61% олова (Sn), 39% свинцю (Pb)	183	Середня	Низька	Використовується приватними користувачами та приватними ремонтними центрами.
SAC305	96,5% олова (Sn), 3% срібла (Ag), 0,5% міді (Cu)	217	Висока	Середня	Виробництво друкованих плат (PCB), пайка компонентів у споживчій електроніці.
SAC405	95,5% олова (Sn), 4% срібла (Ag), 0,5% міді (Cu)	218	Більш висока	Вище середньої	Пайка пристроїв із високими механічними навантаженнями (автомобільна промисловість, авіація).
Sn100C	99,3% олова (Sn), 0,7% міді (Cu)	227	Середня	Висока	Масове виробництво електроніки. Використовується для з'єднання з менш жорсткими вимогами до механічної міцності.
Сплав Розе	50% бісмуту (Bi), 25% свинцю (Pb), 25% олова (Sn)	94	Низька	Середня	Демонтаж чутливих компонентів, лудіння доріжок на платі або низькотемпературна пайка.
Сплав Філдса	58% бісмуту (Bi), 17% індія (In), 25% олова (Sn)	70	Над-низька	Висока	Екологічний демонтаж чутливих компонентів, лудіння доріжок на платі або низькотемпературна пайка.

У результаті порівняння визначено наступне:

- SAC305 і SAC405 надають переваги там, де потрібна висока міцність і стабільність з'єднання.
- Sn100C підходить для більш бюджетних рішень у виробництві з

менш жорсткими вимогами до механічної міцності.

### 1.3 Флюси для електромонтажного паяння

Флюси відіграють ключову роль у процесі паяння, забезпечуючи видалення оксидних плівок з поверхні паяних металів і покращуючи змочування припоєм. Для ефективного паяння флюс повинен задовольняти ряд вимог: мати температуру плавлення нижче температури плавлення припою, повністю розчиняти оксиди, не утворювати з металом шкідливих сполук і легко видалятися після паяння. Крім того, флюс та продукти його розкладання не повинні виділяти токсичних речовин.

Одним з найбільш поширених типів флюсів є смоловмісні флюси на основі каніфолі. Каніфоль, будучи природною смолистою речовиною, має низку переваг: вона нетоксична, не викликає корозії та легко доступна. Кислоти, що входять до складу каніфолі, ефективно розчиняють тонкі оксидні плівки на міді та олові. Однак каніфольні флюси мають і свої недоліки: вони мають відносно низьку активність, що може призвести до недостатнього змочування припоєм, особливо при паянні забруднених поверхонь. Крім того, залишки каніфолі можуть бути важко видалені і залишати липкі плівки, що погіршують електричні властивості паяних з'єднань. У сучасній електроніці, де потрібна висока надійність і чистота виробів, все частіше застосовуються активніші флюси, наприклад, на основі органічних кислот або галогенідів. Ці флюси забезпечують більш ефективне видалення оксидів і краще змочування, але вимагають ретельнішого очищення після паяння.

Для підвищення ефективності паяння до складу флюсів додають спеціальні речовини – активатори. Вони покращують здатність флюсу видаляти оксидні плівки з поверхні металу та сприяють кращому змочуванню припоєм. Як активатори використовують різні органічні сполуки, такі як анілін, гідразин, триетаноламін та органічні кислоти. Для досягнення оптимального балансу

кислотності у флюсі кислотні компоненти (наприклад, саліцилова кислота) нейтралізуються лужними (триетаноламін).

Вибір способу видалення флюсу залежить від його складу. Смолівмісні флюси зазвичай видаляють органічними розчинниками або ультразвуковим очищенням. Для скорочення викиду легколетких органічних компонентів з 90% до 1% хвилею паяння застосовують флюси MF220 і MF300 на водній основі з вмістом твердих речовин  $4,6 \pm 0,2$  %, кислотним числом  $37 \pm 2,5$  мг КОН/г, легко видаляються водою. Такі флюси широко застосовуються в хвильовій пайці, так як вони дозволяють знизити кількість летких органічних сполук і покращити якість паяння. При використанні важливо дотримуватись температурного режиму попереднього нагріву для запобігання утворенню термошоку на друкованій платі. Кількість дефектів при хвильовому паянні безсвинцевими припоями з флюсами на водній основі скорочується в 2,5 рази.

#### 1.4 Інфрачервоні паяльні станції

Існує безліч різних типів та конфігурацій паяльних станцій (ПС), кожен з яких має свої переваги та недоліки в залежності від конкретних умов роботи: контактні, термоповітряні, комбіновані, інфрачервоні [9].

Інфрачервоні (ІЧ) паяльні станції є багато-функціональними рішеннями на ринку обладнання для обслуговування та ремонту сучасної електронної техніки. Основний принцип їх роботи обґрунтовується на ефективне нагрівання через інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі від 2 мкм до 8 мкм. При цьому, паяння може відбуватися із чітко заданим розподілом температур у часі (температурним профілем), який підбирається у відповідності до рекомендацій виробників електронних компонентів. Більшість моделей, за винятком деяких бюджетних, являють собою складні ремонтні комплекси, що включають такі компоненти [10]:

- верхній нагрівач;
- нижній нагрівач (для попереднього прогріву);

- робочий стіл із фіксатором для плати;
- система контролю температури, що складається з термопари та програмованого контролера.

Сучасні моделі паяльних станцій підтримують підключення до комп'ютера, що дає можливість контролювати процес пайки за попередньо налаштованим температурним профілем.

Цей тип паяльного обладнання створений для вирішення декількох складних завдань:

- монтаж / демонтаж середніх і великих BGA-мікросхем;
- зменшення теплового впливу на пластикові елементи при паянні;
- відмова від використання великої кількості насадок під конкретний тип мікросхем, як в термоповітряних станціях, з огляду на те, що нові мікросхеми з'являються на ринку постійно;
- система терморегулювання (термопара із кріпленням).

Інфрачервона паяльна станція забезпечує прецизійний контроль процесу пайки завдяки можливості точно регулювати розмір і форму зони нагріву в діапазоні від 10 до 60 мм. Це дозволяє адаптувати станцію до різних розмірів компонентів і плати. Спеціальний стіл для плат та система терморегулювання з індивідуальними температурними профілями гарантують якісний і безпечний процес пайки. Верхній нагрівач відповідає за основний процес паяння. Нижній нагрівач попередньо нагріває елементи і таким чином запобігає їх тепловому пошкодженню. Система терморегулювання дозволяє користувачеві вибрати потрібний температурний профіль (температурний та часовий розріз), порівняти температурні дані та керувати процесом паяння за заданими параметрами.

ІЧ паяльні станції класифікуються за своїм функціональним призначенням [11].

Станції для ремонтних робіт (Rework stations) – призначені для демонтажу і монтажу компонентів на друкованих платах. такі станції мають високий

контроль температури та остаточно використовуються для відновлення або заміни пошкоджених компонентів.

Промислові ІЧ-паяльні станції – використовуються на виробничих лініях для масової пайки друкованих плат. Вони мають високу продуктивність, автоматизовані процеси та точне регулювання температурних профілів.

Портативні ІЧ-паяльні станції – більш компактні, призначені для польових робіт або домашнього використання. Їх використовують для простих ремонтів, де не потрібна велика точність нагріву.

Існують як більш прості напівавтоматичні а також автоматичні станції.

Напівавтоматичні станції – оснащені базовою автоматизацією, таких як контроль температурного профілю та таймери. Вони можуть налаштувати простий температурний профіль і вимагають менше ручного втручання. Такі як станція ACHI IR6500 [12].

Автоматичні ІЧ-паяльні станції – мають складні алгоритми контролю, можливість програмування температурних профілів через підключення до персонального комп'ютера і автоматичне регулювання параметрів на основі типу плати, такі станції використовують у виробничих лініях, професійних сервісних центрів, де важлива стабільність і повторюваність, такі як станція ACHI IR-PRO-SC, на рис 1.6 [13].



Рисунок 1.6 – Приклад автоматичної ІЧ-паяльні станції ACHI IR-PRO-SC

Для точного контролю процесу пайки такі станції використовують температурний профіль ІЧ паяльних станцій – графік зміни температури в часі, який використовується для забезпечення точного контролю процесу пайки. Завдяки використанню температурного профілю ІЧ станції забезпечується рівномірний нагрів без ризику пошкодження компонентів чи перегріву плати.

Усього два типи керування температурним профілем:

- станції з ручним налаштуванням температури, у яких оператор самостійно задає температуру та контролює нагрів, вони менш складні, але вимагають постійної уваги та точності дій від людини, сильно залежать від людського фактора;

- станції з програмованими температурними профілями дають можливість створювати і зберігати профілі нагріву для різних компонентів та матеріалів, такі станції необхідно встановити попередньо задані температурні цикли для різних процесів пайки.

Для традиційної основи профілю трапецієподібного типу на безсвинцевій паяльній пасті є такі етапи:

- зона попереднього нагрівання – попередній нагрів зазвичай означає підвищення температури від нормальної температури до 150 °C і від 150 °C до 200 °C, зміна температури від нормальної до 150 °C становить менше 5 °C/сек (при 1,5 °C ~ 3 °C / сек), а час між 150 °C і 200 °C становить близько 60 ~ 120 секунд, перевага повільного нагрівання полягає в тому, що розчинник і вода в парах пасти виходять вчасно, що також дозволяє великим компонентам нагріватися рівномірно з іншими маленькими компонентами;

- зона витримки – паяльна паста у цій зоні видаляє вологу, а флюс активується, також видаляється оксид на поверхнях компонентів і контактних площадок ДП, температури на етапі витримки зростають повільніше, ніж на етапі попереднього нагріву, вона досягає приблизно 217 °C, а швидкість підвищення температури становить приблизно від 0,5 °C/с до 1 °C/с, етап витримки без свинцю триває приблизно від 60 секунд до 120 секунд;

- зона оплавлення – це етап, коли паяльна паста повністю

оплавляється, температура оплавлення без свинцю досягає приблизно від 240 °С до 248 °С, і до того, як температура досягне піку, порошок сплаву плавиться та просочує мідні контакти ДП та її компоненти, етап оплавлення без свинцю триває приблизно від 40 секунд до 70 секунд, а максимальна температура триває приблизно від 10 секунд до 30 секунд;

– зона охолодження – у цій зоні температура поступово знижується до 75°С, створюючи тверді паяні з'єднання, також необхідно враховувати максимально допустимий нахил охолодження, щоб уникнути будь-яких дефектів, рекомендована швидкість охолодження 4°С/с [14].

Термопрофіль для пайки без свинцю наведений на рис 1.7.

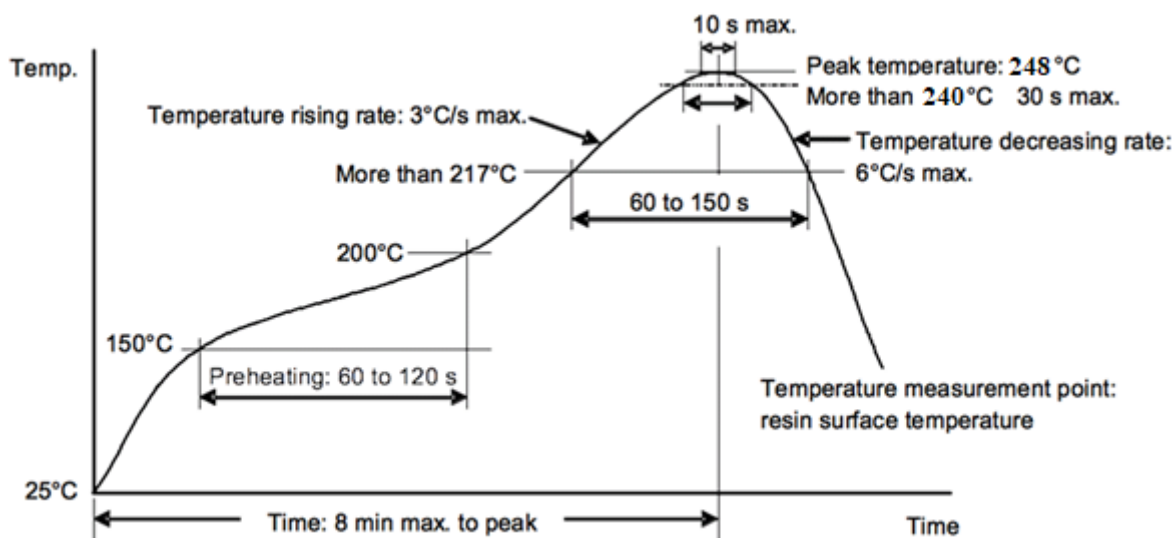


Рисунок 1.7 – Термопрофіль для пайки без свинцю

У процесі оплавлення зазвичай використовують два різні профілі – для пайки безсвинцевою пастою (SAC305) та зі свинцем (Sn37Pb).

Термопрофіль для паст SAC305, Sn37Pb на рисунку 1.8.

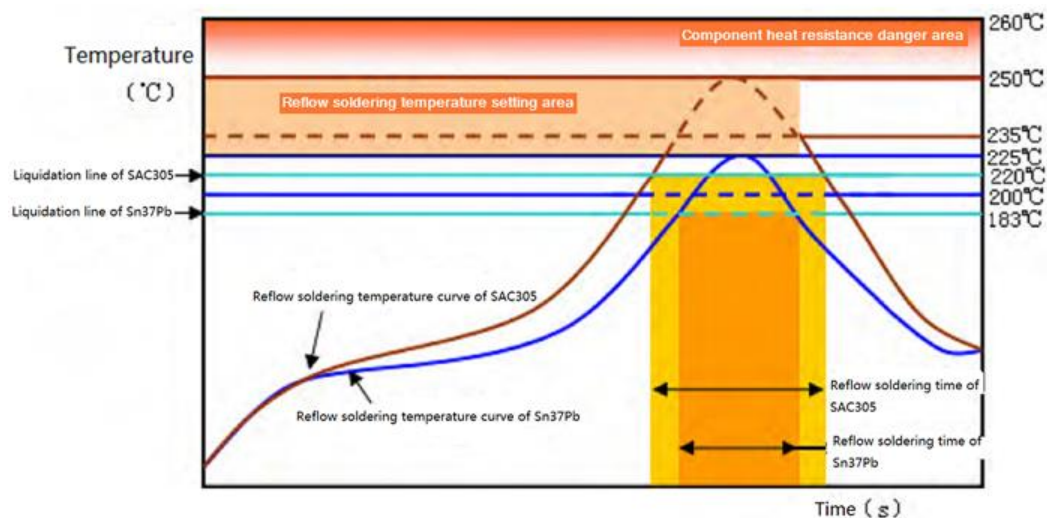


Рисунок 1.8 – Термопрофіль для паст SAC305, Sn37Pb

Безсвинцеве паяння оплавленням відрізняється від традиційного олов'яно-свинцевого паяння оплавленням:

- температура оплавлення без вмісту свинцю приблизно на 30°C вища, ніж традиційна температура оплавлення олова та свинцю;
- олов'яно-свинцеве оплавлення допускає діапазон коливань температури оплавлення 30°C, але безсвинцеве оплавлення допускає діапазон коливань температури оплавлення лише 5°C;
- швидкість нагріву оплавлення без свинцю вища, ніж у оплавлення свинцю; безсвинцеве оплавлення викликає більше труднощів, ніж олов'яно-свинцеве;
- контроль температури безсвинцевого оплавлення більш точний, ніж олов'яно-свинцевий оплавлення, і становить близько  $\pm 2^\circ\text{C}$  ;
- безсвинцеве оплавлення нетоксичне, менше забруднює навколишнє середовище, ніж олов'яно-свинцева оплавлення, і забезпечує переробку азоту.

В ІЧ станціях використовують три типи ІЧ нагрівачів, перший це кварцові ІЧ-нагрівачі, які використовують кварцові лампи, вони швидко нагріваються і забезпечують потужний тепловий потік. Вони підходять для швидкого розігріву компонентів і часто використовують у високопродуктивних системах. Кварцові інфрачервоні обігрівачі являють собою блок трубчастих інфрачервоних

випромінювачів в спеціальному відбивачі. Випромінювачі працюють в діапазоні середніх хвиль, тому під час роботи випромінюють світло. Для таких випромінювачів характерний швидкий нагрів по температурі.

Приклад наведений на рис 1.9 [15].



Рисунок 1.9 – Кварцовий ІЧ-нагрівач

Кварцові нагрівачі, у свою чергу, відрізняються меншою інерційністю і забезпечують більшу однорідність зони нагрівання, хоча вони використовують, крім невидимого, ще й видимий і, тому, небезпечний для зору діапазон інфрачервоного випромінювання. Тому, як правило, в комплекті до станції поставляються захисні окуляри. У кварцових інфрачервоних нагрівачах дровий нагрівальний елемент у вигляді спіралі або поміщений в середину кварцової трубки, або обгортає її зовнішню поверхню. Завдяки прозорості кварца до інфрачервоного випромінювання, уся енергія, що генерує нагрівальний елемент, передається через кварц разом до об'єкта. Інфрачервона енергія, що випромінюється такими елементами, здебільшого належить до середнього або короткохвильового сегмента. Оскільки кварц не поглинає цю енергію, основний потік інфрачервоного випромінювання спрямовується прямо до продукту, завдяки чому менш ефективна передача енергії за допомогою конвекції.

Як приклад такої станції, на рис. 1.10:



Рисунок 1.10 – Інфрачервона паяльна станція AOYUE Int 732

Другий тип нагрівачів – керамічні ІЧ-нагрівачі, які забезпечує більш рівномірний нагрів і стабільний температурний профіль, який важливий для компонентів, чутливих до перегріву.

Одна з переваг керамічних нагрівачів – це паяння за допомогою випромінювання електромагнітними хвилями невидимого спектру, які є абсолютно безпечними для людського ока і дозволяють оператору проводити візуальне спостереження за процесом. Вони також є найбільш надійними та забезпечують довгий час експлуатації до відмови. Більшість керамічних інфрачервоних обігрівачів мають дротяний нагрівальний елемент у вигляді спіралі, який інтегрований у керамічну основу. Нагрівальний елемент генерує інфрачервоне випромінювання, яке спочатку поглинається керамікою, а потім знову випромінюється в сторону об'єкта. Це повторне випромінювання складається переважно з інфрачервоного випромінювання з довгою хвилею. Нагріта керамічна поверхня також створює додатковий ефект конвекції, доповнюючи основне інфрачервоне нагрівання.

Приклад зображений на рисунку 1.11 [16].



Рисунок 1.11 – Приклад керамічного ІЧ-нагрівача

Приклад станції з таким нагрівачем, на рис. 1.12:



Рисунок 1.12 – ІЧ паяльна станція АСНІ ІR-6500

Галогенні нагрівачі нечасто застосовуються у паяльних станціях з кількох причин, пов'язаних з особливостями їх роботи.

Галогенні нагрівачі випромінюють інфрачервоні хвилі в короткохвильовій частині (від 0,7 мкм до 2 мкм). Таке випромінювання проникає глибоко в матеріали та може спричинити нерівномірний нагрів, що є небажаним при роботі з делікатними компонентами, як ВGА-чіпи. Припій та компоненти на платах потребують рівномірного поверхневого нагріву, який забезпечує середньо- або довгохвильові випромінювачі.

Галогенні лампи швидко нагріваються до високих температур, що робить контроль за температурним профілем складним. У процесі пайки потрібен точний контроль температури з поступовим нагрівом і плавним охолодженням, щоб уникнути термічних пошкоджень плати та компонентів.

Галогенні лампи споживають більше енергії для досягнення необхідної температури, що є менш ефективним для процесів, які потребують тривалого контролю нагріву. Інші типи інфрачервоних нагрівачів, наприклад, керамічні або кварцові, є більш енергоефективними в умовах довготривалої пайки.

Приклад наведений на рис 1.13.

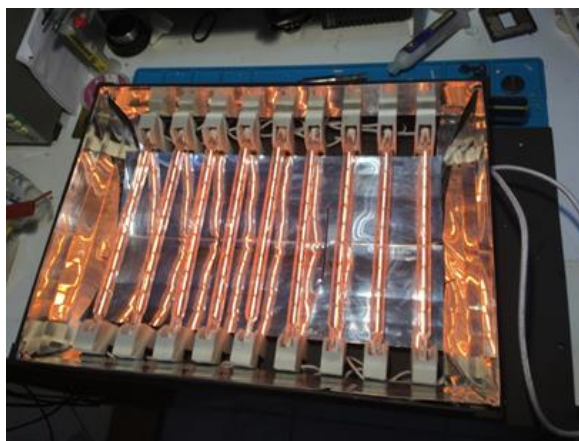


Рисунок 1.13 – Приклад галогенного нагрівача

### 1.5 Висновок до першого розділу

Вибір безсвинцевої пайки обумовлений потребою в підвищеній екологічній безпеці та довготривалій надійності об'єднаних в сучасних електронних пристроях. Враховуючи посилення стандартів щодо вмісту свинцю у виробках, безсвинцева пайка стає основною технологією для забезпечення відповідності вимогам екологічності. Хоча безсвинцева пайка має вищу температуру плавлення, що ускладнює термопрофільний процес, її правильна реалізація забезпечує довговічність з'єднання та мінімізує негативний вплив на навколишнє середовище.

У межах дослідження буде проведено аналіз роботи керамічних нагрівачів, при безсвинцевій пайці. Це дослідження сприятиме розробці рекомендацій щодо вибору відповідного обладнання для безсвинцевої пайки, зокрема в умовах критично важливої енергетичної ефективності та збереження якості разом.

## 2 РОЗРОБКА ІНФРАЧЕРВОНОЇ ПАЯЛЬНОЇ СТАНЦІЇ

### 2.1 Розробка електричної частини інфрачервоної паяльної станції

В результаті роботи, для керування станцією використаний мікроконтролер (МК) Arduino UNO R3, який буде виконувати усі розрахунки, регулювати потужність нагрівачів, зчитувати інформацію з датчиків та виводити її на індикатор та у персональний комп'ютер. Структурна схема ІЧ паяльної станції приведена на рисунку 2.1.

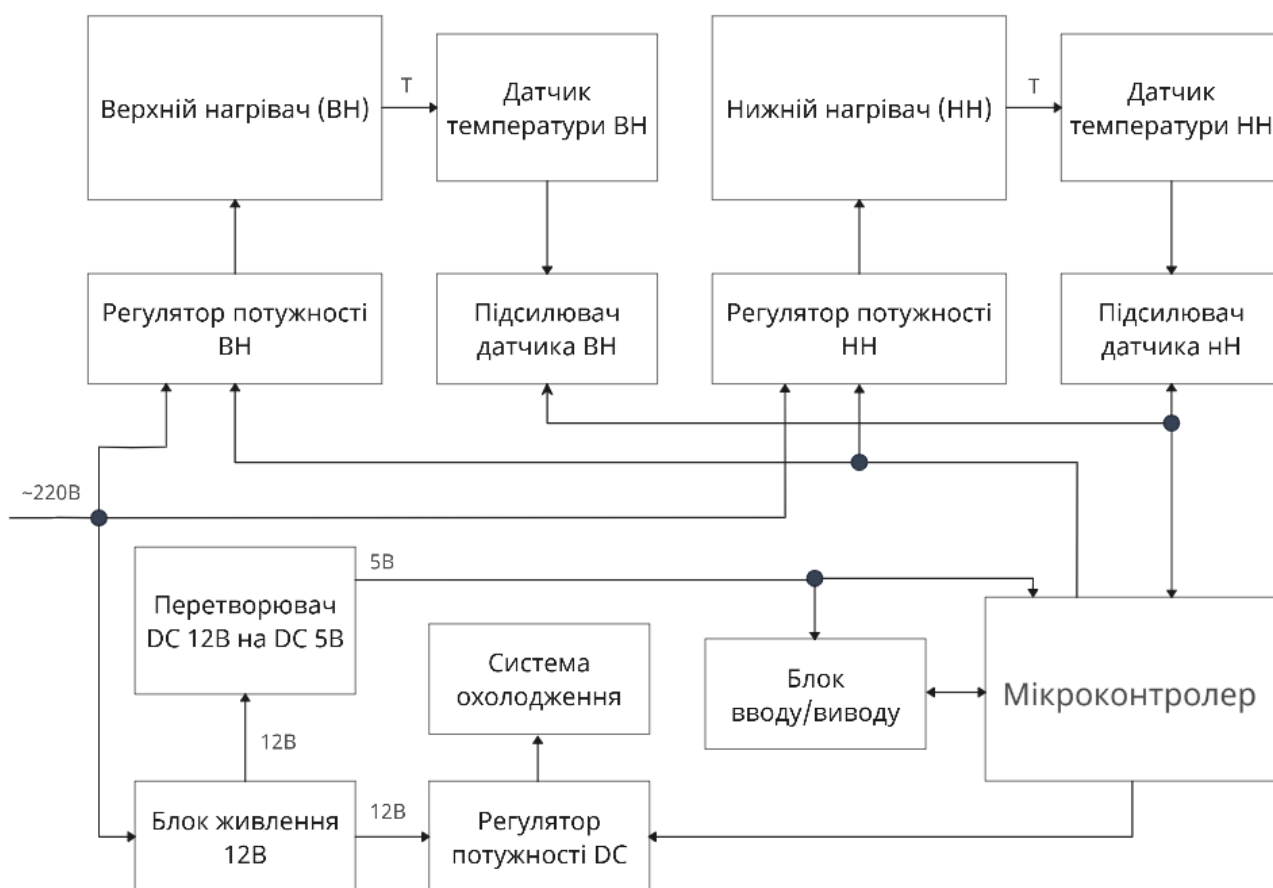


Рисунок 2.1 – Структурна схема ІЧ паяльної станції

Для пайки BGA мікросхем необхідний точний контроль температури нагріву верхнім та нижнім нагрівачами та зчитування даних з датчиків температури. За цим слідкує плата МК, за допомогою датчиків температури,

розташованих безпосередньо біля місця нагріву через підсилювач сигналу. Інформацію з цих датчиків мікроконтролер аналізує і контролює нагрівачі через регулятори потужності ВН та НН. Ці регулятори з'єднуються послідовно з нагрівачами та виконують функцію ключів, розриваючи та підключаючи живлення мережі 220В до нагрівачів. Також МК передає та отримує інформацію від "блока вводу/вивода" безпосередньо від оператора. Блок "система охолодження" слугує для прискорення охолодження плати на фінальному етапі пайки, обдуваючи плату з боку та зверху. Блок живлення на 12В живить систему охолодження та "Перетворювач DC 12В на DC 5В". "Перетворювач DC 12В на DC 5В" живить плату МК, підсилювачі сигналів датчиків та блок вводу/виводу.

## 2.2 Вибір електронних компонентів для паяльної станції

### 2.2.1 Мікроконтролер

Перед початком розробки електричної частини паяльної інфрачервоної станції, спрямованої на дослідження процесу пайки, необхідно ретельно підібрати відповідний МК. Оскільки основна мета проекту – дослідження, а не розробка електроніки з нуля, доцільно використовувати готові платформи для МК, такі як плати для розробки по типу "Arduino". Цей вибір обумовлений бажанням спростити та прискорити процес розробки макету для дослідження, уникнувши необхідності проектування друкованих плат, підбору компонентів та паяння. Готові платформи забезпечують зручний інтерфейс для програмування та багату бібліотеку функцій, що дозволяє зосередитись на основних завданнях проекту.

Вибір конкретної платформи залежить від таких факторів, як необхідна обчислювальна потужність, наявність аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) для зчитування даних з температурних сенсорів, ШІМ-контролера для управління потужністю нагрівача, а також комунікаційних інтерфейсів для підключення дисплея та інших пристроїв. Популярні платформи, такі як

Arduino, ESP32 та STM32, пропонують різноманітні варіанти, що дозволяє підібрати оптимальне рішення для конкретного проекту. Використання готових платформ не лише скорочує час розробки, але й знижує ризик помилок, пов'язаних з проектуванням та виготовленням електроніки. Роздивимося існуючі рішення.

Arduino UNO R3 – це одна з найпопулярніших платформ для навчання роботи з мікроконтролерами. Це невелика плата, на якій встановлений мікроконтролер ATmega328P. Вона має простий інтерфейс, багато вводів/виводів, підтримує широкий спектр датчиків та виконавчих пристроїв.

Переваги: легкість у використанні, велика спільнота розробників, велика кількість навчальних матеріалів.

Недоліки: обмежена обчислювальна потужність, відносно невелика кількість пам'яті [17].

Зовнішній вигляд Arduino UNO R3 представлений на рисунку 2.2, характеристики представлені у табл. 2.1.



Рисунок 2.2 – Зовнішній вигляд Arduino UNO R3

STM32-Smart Cortex-M3 – це популярна плата для розробки на базі 32-бітного мікроконтролера STM32F103C8T6 від STMicroelectronics. Ця плата широко використовується як для навчання, так і для створення різноманітних електронних пристроїв завдяки своїй потужності, гнучкості та доступності.

Переваги: вища продуктивність, порівняно з Arduino UNO R3, багата периферія, багато вільних GPIO-портів, великої кількості навчальних матеріалів, бібліотек та прикладів коду.

Недоліки: більш складна конфігурація.

Зовнішній вигляд STM32-Smart Cortex-M3 представлений на рисунку 2.3, характеристики представлені у табл. 2.1.



Рисунок 2.3 – Зовнішній вигляд STM32-Smart Cortex-M3

WEMOS D1 WIFI ESP-12F – це популярна платформа для розробки, заснована на мікроконтролері ESP8266. Вона пропонує більше можливостей, ніж її менший аналог D1 mini, завдяки більшій кількості GPIO, більшій кількості пам'яті та іншим додатковим функціям.

Переваги: вбудований Wi-Fi, більше ресурсів, велику кількість бібліотек та щитів, розроблених для Arduino, які сумісні з WEMOS D1.

Недоліки: мала кількість цифрових контактів вводу/виводу, налаштування Wi-Fi потребує більше навичок програмування та ресурсів МК.

Зовнішній вигляд WEMOS D1 WIFI ESP-12F представлений на рисунку 2.4, характеристики представлені у табл. 2.1.

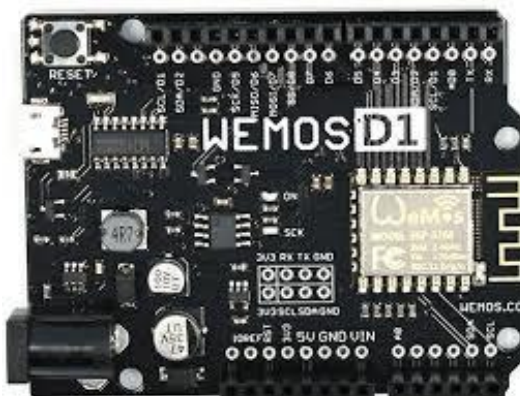


Рисунок 2.4 – Зовнішній вигляд WEMOS D1 WIFI ESP-12F

Arduino Due – це 32-бітна мікроконтролерна плата на базі Atmel SAM3X8E ARM Cortex-M3, яка забезпечує високу обчислювальну потужність для складних проектів.

Її переваги включають швидкодію, великий обсяг пам'яті, багато периферійних можливостей.

Недоліки: велика вартість.

Зовнішній вигляд представлений на рисунку 2.5, характеристики представлені у табл. 2.1.



Рисунок 2.5 – Зовнішній вигляд Arduino Due

Таблиця 2.1 – Характеристики МК

Плата		Arduino UNO R3	STM32-Smart Cortex-M3	WEMOS D1 WIFI ESP-12F	Arduino Due
1		2	3	4	5
Мікроконтролер		ATmega 328p	STM32F103C8T6	ESP8266	AT91SAM3X8E
Категорія	Характеристика	Значення			
Пам'ять, частота	Розмір пам'яті Flash:	32 Кб	64 Кб	4 Мб	512 Кб
	Розмір пам'яті (RAM):	2 Кб	20 Кб	64 Кб	96 Кб
	Частота кварцу на платі:	16 МГц	72МГц	80 МГц	84 МГц
	Таймерів:	3	4	3	9
Піни	Кількість цифрових контактів вводу/виводу:	14	34	11	54
	Кількість аналогових вхідних контактів:	6	12	1	12
	Контакти ШІМ:	6	16	8	11
Вбудовані інтерфейси:		I2C/TWI, SPI, UART, PWM	UART, SPI, I2C, USB 2.0, CAN, PWM	Wi-Fi, I2C, SPI, UART, OTA	UART, SPI, I2C, CAN, DAC, USB OTG
Живлення	DC Напруга на вході/виході пінів:	5 В	3,3 В	3,3 В	3,3 В
	Напруга живлення МК/плати:	5 В/ від 7 В до 12 В	3,3В/ від 4,5 В до 15 В	3,3В/ від 5 В до 24 В	3,3В/ від 6 В до 16 В
	Струм споживання	25 мА	30 мА	80 мА	220 мА
	Макс струм на пін	40 мА	24 мА	12 мА	130 мА
	Струм стабілізації	500 мА	800 мА	1000 мА	800 мА

Для проекту інфрачервоної паяльної станції Arduino UNO R3 є оптимальним вибором завдяки простоті використання, достатній кількості виводів та широкій підтримці спільноти. У порівнянні з іншими платформами, такими як STM32-Smart Cortex-M3, WEMOS D1 ESP-12F та Arduino Due, Arduino UNO R3 пропонує ідеальний баланс між функціональністю та зручністю. Оскільки проект не передбачає великої складності програми,

обчислювальної потужності 8-бітного МК ATmega328P цілком вистачає для виконання завдань керування нагрівальним елементом, моніторингу температури та взаємодії з користувачем.

На відміну від WEMOS D1 ESP-12F, у якого обмежена кількість GPIO-пінів і фокус на проекти з Wi-Fi, Arduino UNO R3 має достатню кількість цифрових і аналогових виводів для підключення дисплея, термодатчиків і кнопок. STM32-Smart Cortex-M3, хоча і пропонує вищу продуктивність, вимагає глибшого знання МК і складнішого налаштування програмного забезпечення, що ускладнює реалізацію простих проектів. Arduino Due, хоч і потужніший, має обмеження у вигляді роботи з напругою 3.3 В, що збільшує ризик пошкодження компонентів під час роботи. У свою чергу, Arduino UNO R3 працює з 5 В, що забезпечує сумісність із багатьма датчиками і периферією, без необхідності додаткових адаптерів.

Таким чином, Arduino UNO R3 є найкращим вибором для створення інфрачервоної паяльної станції, оскільки він поєднує необхідну функціональність із простотою розробки, доступністю комплектуючих та надійністю у роботі.

### 2.2.2 Блок вводу/виводу

Для виводу інформації вибраний символьний індикатор LCD1602 з конвертером ІС/I2С. Зовнішній вигляд LCD1602 наведений на рис. 2.6. Дисплей містить два рядки, у кожному вміщається по 16 символів, напруга живлення може перебувати в межах від 4,5 В до 5,5 В.

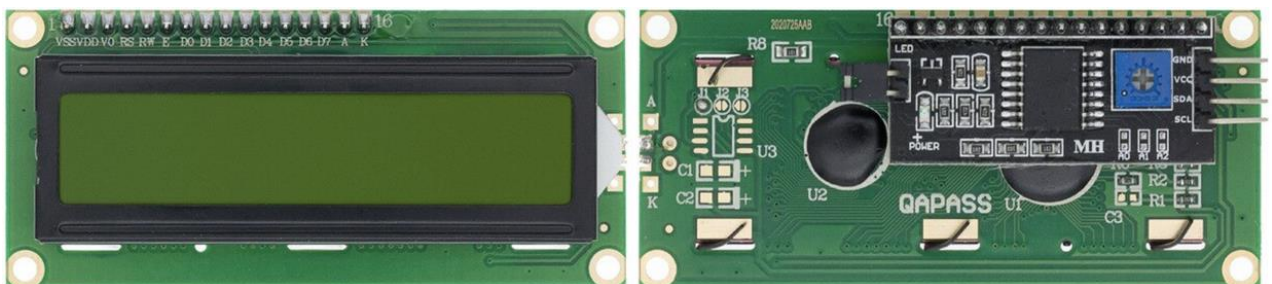


Рисунок 2.6 – Зовнішній вигляд LCD1602

LCD1602 можна замінити аналогами LCD2004, рисунок 2.7 або Arduino TFT LCD 3.5" SPI, рисунок 2.8. Усі вони сумісні з Arduino та мають готові бібліотеки. LCD2004 має більше символів та рядків, що дасть змогу контролювати процес пайки більш ретельно, але коштує дорожче. TFT LCD 3.5" може замінити монітор комп'ютера та малювати графіки термопрофілів, проте коштує набагато дорожче та вимагатиме від МК більших витрат на обчислення. У наявності є ПК, який можна буде підключити до станції та малювати графіки на великому моніторі, тому використовувати Arduino TFT LCD 3.5" немає сенсу. Конвертер ІС/І2С необхідний для зменшення кількості пінів МК, що використовуються.



Рисунок 2.7 – Зовнішній вигляд LCD2004



Рисунок 2.8 – Зовнішній вигляд Arduino TFT LCD 3.5" SPI

Також для керування станцією, встановлення термопрофілей, на створення звукового сповіщення будуть застосовані енкодер KLS4-EC1101S, вимикач з фіксацією стану та бужер, рисунку 2.9. Вимикач з фіксацією стану та бужер вибираємо найпростіші для зниження витрат, а енкодер по розміру, для зручного користування.



Рисунок 2.9 – Енкодер KLS4-EC1101S, вимикач з фіксацією стану та бузер

### 2.2.3 Вибір датчика температури

Для вимірювання температури в діапазоні від 100 °C до 500 °C можна використовувати такі типи датчиків:

Термопари, типи та їх характеристики наведені у таблиці 2.2 [18].

Таблиця 2.2 – Порівняння типів термопар

Тип термопари	Матеріали	Діапазон температур (°C)	Точність	Вартість	Застосування
Тип К	хромель-алюмель	від -200 до +1250	хороша	Низька	Паяльні станції, загальні промислові процеси
Тип J	залізо-константан	від -40 до +750	помірна	Низька	Паяння, вимірювання в обмежених діапазонах
Тип Т	мідь-константан	від -200 до +350	висока	Середня	Низькотемпературні вимірювання, наука
Тип Е	хромель-купрель	від -200 до +900	висока	Середня	Лабораторії, промислові процеси
Тип N	нікель-нікельбор	від -200 до +1300	хороша	Середня	Високі температури, термостійкість
Тип S	платина-платина	від -50 до +1600	дуже висока	Висока	Наукові дослідження, екстремальні умови

Для дослідження процесу пайки термопара типу К є найкращим вибором з кількох причин:

- тип К є одним з найбільш доступних варіантів серед термопар. Це

робить його ідеальним вибором для дослідницьких проектів з обмеженими фінансовими ресурсами, де необхідно знизити витрати на обладнання, не жертвуючи основними характеристиками;

- має діапазон вимірювання від  $-200^{\circ}\text{C}$  до  $+1250^{\circ}\text{C}$ , що покриває типові температури пайки, які зазвичай коливаються в межах від  $200^{\circ}\text{C}$  до  $400^{\circ}\text{C}$ . Це дозволяє точно контролювати температурні режими в процесі пайки;

- для досліджень, що вимагають швидкої реакції на зміни температури, термопара типу К забезпечує досить швидкий відгук, що важливо для точного вимірювання в реальному часі під час процесу пайки;

- має хорошу стійкість до агресивних середовищ, що дозволяє використовувати його для різноманітних видів паяння та дослідження різних умов. Це робить термопару типу К універсальним вибором для лабораторних досліджень;

- легко інтегруються в систему вимірювання та контролю температури, що важливо для дослідницьких лабораторій, де потрібно швидко налаштувати експериментальні установки.

Отже, термопара типу К забезпечує оптимальне поєднання низької вартості, точності та швидкості відгуку, що робить її ідеальним варіантом для дослідження проекту.

Зовнішній вигляд приведений на рисунку 2.10.



Рисунок 2.10 – Зовнішній вигляд термопари типу К ТХА

Інфрачервоні (ІЧ) пірометри, мають такі переваги:

- діапазон температур: від  $-50$  до  $+3000^{\circ}\text{C}$  (залежно від моделі);
- точність:  $\pm$  від  $2^{\circ}\text{C}$  до  $3^{\circ}\text{C}$  або від  $2\%$  до  $5\%$ ;

- простота та висока швидкість вимірювання температури;
- можливість використання апарату для точкових вимірів, безперервного сканування поверхні великих об'єктів;
- визначення різниці температур у порівнянні окремих показань один з одним;
- простий безконтактний спосіб виміру;
- підходить для вимірювання об'єктів, що рухаються або важкодоступні;
- безпека для вимірювання гарячих чи небезпечних поверхонь.

Недоліки: залежність від емісійної здатності поверхні, обмеження в агресивних умовах.

Зовнішній вигляд приведений на рисунку 2.11.



Рисунок 2.11 – Зовнішній вигляд інфрачервоного пірометра

Термістор (NTC/PTC) – це напівпровідниковий прилад, у якого величина електричного опору суттєво залежить від температури.

До переваг термісторів у порівнянні з іншими типами температурних датчиків можна віднести:

- особливу температурну чутливість та точність вимірювання температури;
- широкий діапазон функціонування (від  $-80$  до  $+500$  °C);
- малі розміри та маса;
- висока надійність та стабільність параметрів при правильному доборі та експлуатації.

До недоліків термісторних датчиків температури можна віднести:

- вища похибка порівняно з платиновими термометрами опору;
- нелінійний характер залежності опору від температури;
- свій температурний інтервал (для кожного конкретного типу термісторів);
- обмежений діапазон допустимих потужностей, що розсіюються;
- можливість старіння та дрейфу характеристик при роботі на граничних електричних та теплових режимах.

Зовнішній вигляд приведений на рисунку 2.12.



Рисунок 2.12 – Зовнішній вигляд термісторного датчика температури

Термопара типу К є оптимальним вибором для дослідження процесу пайки завдяки кільком ключовим перевагам. По-перше, її температурний діапазон, що охоплює температури від  $-200$  до  $+1250$  °С, ідеально підходить для діапазону від  $100$  °С до  $500$  °С, що є типовим для пайки. По-друге, термопари типу К є одними з найдешевших варіантів, що робить їх доступними порівняно з іншими датчиками. Крім того, вони мають високу механічну та хімічну стійкість, що дозволяє використовувати їх в агресивних або забруднених середовищах. Важливою перевагою є також швидкий час відгуку, що забезпечує точність вимірювань під час динамічних процесів. Окрім того, термопари типу К легко інтегруються в систему завдяки простоті підключення до контролерів через підсилювачі або інтерфейси. Усі ці характеристики забезпечують оптимальне поєднання низької вартості, точності та швидкості

відгуку, що робить термопару типу К ідеальним варіантом для дослідження процесу пайки.

Для роботи термопару типу К необхідна мікросхема МАХ6675, яка здійснює перетворення температури, вимірної термопарою, в цифровий сигнал, сумісний з МК Arduino UNO R3. Вона забезпечує точне вимірювання температури та полегшує інтеграцію термопару в електронні системи на основі мікросхеми МАХ6675, наведеної на рисунок 2.13 [19].



Рисунок 2.13 – Зовнішній вигляд мікросхеми МАХ6675

Характеристики мікросхеми МАХ6675:

- напруга живлення, від 3 В до 5,5 В;
- споживаний струм, 1,5 мА;
- діапазон вимірюваних температур модулем, від 0 °С до 1024 °С;
- діапазон робочих температур термопару, від 0 °С до 600 °С.

#### 2.2.4 Вибір нагрівачів

Вибір потужності верхнього та нижнього нагрівача ІЧ паяльної станції залежить від типу та розміру друкованих плат, які будуть паятися, а також від матеріалів та компонентів.

Нижній нагрівач використовується для рівномірного нагрівання всієї друкованої плати, щоб запобігти температурним деформаціям і мінімізувати напругу в матеріалі плати. Як з'ясовано у розділі 1, найкраще для цього підходять керамічні або кварцеві нагрівальні елементи.

Розмір зони нижнього підігріву має бути не менше розміру друкованої плати, стандарт АТХ – це материнські плати розміру 305 мм х 244 мм. Для

середніх і великих плат (материнські або серверні плати) потрібна потужність від 1000 Вт до 4000 Вт.

Керамічний нагрівальний елемент ECP 1, рисунок 2.14, характеристики якого:

- напруга живлення нагрівача: від 220 В до 230 В;
- корисний діапазон довжин хвиль: від 2,9 мкм до 5,0 мкм;
- потужність: від 100 Вт до 1000 Вт;
- мінімальний рекомендований проміжок між елементами: 5 мм;
- розмір: 245 мм x 60 мм x 34 мм.



Рисунок 2.14 – Зовнішній вигляд керамічного нагрівального елемента ECP 1  
245 x 60 x 34 мм

Для досягнення рекомендованої площини нагріву, враховуючи відстань між елементами, необхідно використати 5 елементів.  $60 \text{ мм} \times 5 + 5 \text{ мм} \times 4 = 320 \text{ мм}$ . Зона нагріву буде мати розмір  $330 \times 255 \text{ мм}$ . Для отримання потужності 2кВт, кожен елемент повинен бути потужністю:  $2000 / 5 = 400 \text{ Вт}$  (довжина хвилі: 3,9 мкм, середня температура  $500^\circ\text{C}$ ).

Кварцевий нагрівальний елемент QP1, зображено на рисунку 2.15, характеристики якого:

- напруга живлення нагрівача: від 220 В до 230 В;
- корисний діапазон довжин хвиль: від 2,5 мкм до 6,0 мкм;
- потужність: від 100 Вт до 1000 Вт;
- розмір: 248 мм x 62 мм x 34 мм.



Рисунок 2.15 – Зовнішній вигляд кварцевого нагрівального елемента QR1

Як і у попередньому випадку беремо 5 елементів, відстань між елементами може бути мінімальними:  $62 \text{ мм} \times 5 = 310 \text{ мм}$ . Кожен елемент повинен бути потужністю –  $2000 / 5 = 400 \text{ Вт}$ .

Для попереднього нагріву вибрали керамічні елементи, через їх довговічність, стійкість до ударів, що продовжує термін їх служби, а також керамічні нагрівачі забезпечують більш безпечну роботу через випромінювання електромагнітними хвилями невидимого спектру.

Верхній нагрівач виконує основну роботу з паяння, відповідає за локальне нагрівання області навколо компонента. Оптимальний розмір верхньої зони нагріву від 60 мм до 80 мм, потужність залежить від розміру зони пайки та елементів, для більшості задач універсальних ПЧ станцій оптимальним є діапазон потужності від 300 Вт до 600 Вт, оскільки він забезпечує достатню швидкість і точність нагріву без надмірного енергоспоживання, будемо використовувати 450Вт.

Кварцевий нагрівач QR 1/3, зображено на рисунку 2.16, має такі характеристики:

- потужність 450 Вт;
- розмір 80 мм x 62 мм;
- напруга живлення: від 220 В до 230 В.



Рисунок 2.16 – Кварцовий ІЧ-нагрівач QR 1/3

Керамічний нагрівач для верхнього нагрівача, зображено на рисунку 2.17, має такі характеристики:

- потужність 450 Вт;
- розмір 80 мм х 80 мм;
- напруга живлення: від 220 В до 230 В.



Рисунок 2.17 – Керамічний ІЧ-нагрівач

#### 2.2.5 Вибір регулятора потужності для нагрівачів

Є декілька способів керуванням змінним навантаженням, через МК. Перший спосіб це електромагнітне реле, яке фактично є керованим механічним вимикачем: при подачі струму воно замикає контакти, а при знятті струму – розмикає їх, зображено на рисунку 2.18. Контакти в реле – це металеві пластини, які притискаються одна до одної. Завдяки цьому реле може керувати навантаженнями як постійного, так і змінного струму.



Рисунок 2.18 – Приклади електромагнітного реле

Катушка реле є потужним індуктивним навантаженням, тому для його керування потрібна додаткова силова та захисна схема. Існують готові модулі реле – це плати, на яких встановлено саме реле, а також схеми комутації, захисту а також оптична розв’язка. Як приклад – одноканальне реле модуль для Arduino SRD-24VDC-SL-C, зображено на рисунку 2.19.



Рисунок 2.19 – Реле модуль SRD-24VDC-SL-C

Електромагнітне реле має ряд недоліків перед іншими способами, ви повинні:

- механічні контакти реле поступово зношуються, особливо під час роботи з великим або індуктивним навантаженням, що обмежує кількість перемикачів;
- робота реле супроводжується гучним клацанням, яке може бути неприємним для слуху;
- при значних струмових навантаженнях контакти реле можуть застрягати в замкнутому стані, що вимагає використання більш потужних реле, які вмикаються через менші реле або транзистори;
- для керування реле потрібні додаткові електричні схеми, оскільки катушка є індуктивним навантаженням, яке перевищує можливості виводів

мікроконтролера;

- у процесі комутації індуктивного навантаження виникають значні електромагнітні наведення, що впливають на всю лінію живлення;
- тривалий час перемикання реле не дозволяє використовувати детектори нуля, а під час роботи з індуктивними ланцюгами змінного струму виникають значні індуктивні викиди, які потребують встановлення іскрогасних ланцюгів.

Другий спосіб це застосування симістора. Симістор є радіоелементом, який схожий на транзистор, але використовується для комутації в колах змінного струму. Оскільки висока напруга становить небезпеку для МК та електроніки невеликого струму, для управління симістором застосовують оптопару із симісторним виходом. У найпростішій схемі підключення для керування навантаженням у режимі лише увімкнення або вимкнення рекомендується використовувати оптопару з детектором нуля (наприклад, МОС306х). Вона забезпечує автоматичне вмикання і вимкнення навантаження тільки в моменти, коли напруга в мережі переходить через нуль, що суттєво знижує рівень перешкод у мережі, рисунок 2.20 (а).

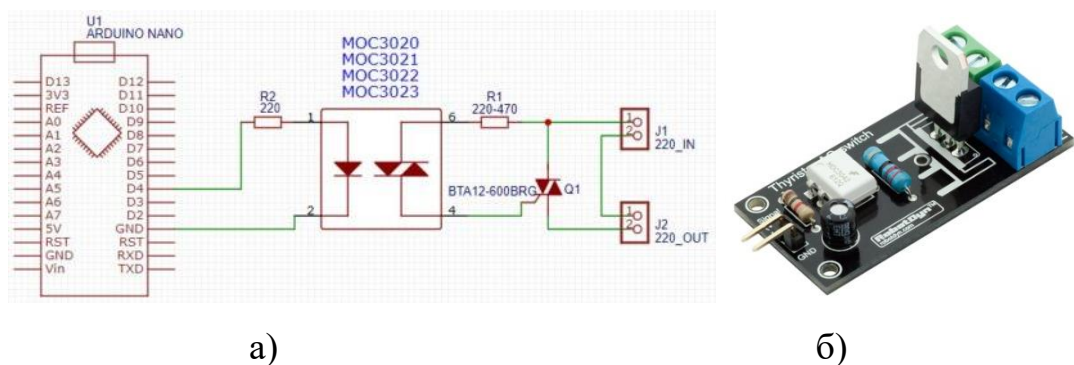


Рисунок 2.20 – Схема керування на симісторі з гальванічною розв'язкою та приклад готового модуля

У схемі використовуються резистори: один на 220 Ом, який обмежує струм для світлодіода оптопару (його характеристики підбирають залежно від характеристик оптопару), а інший, розташований між оптопарою та симістором,

має опір у межах від 220 Ом до 470 Ом і потужність від 1 Вт до 2 Вт (може нагріватися під час роботи). Приклад готового модуля такої схеми є на рисунку 2.20 (б).

Вибір симістора варто здійснювати з великим запасом по струму, що сприяє зниженню його нагрівання. Симістори доступні у серіях ВТА корпус симісторів має ізолювану металеву частину, що підвищує безпеку використання та запобігає удару струмом від радіатора, та ВТВ, що не має ізоляції.

Третій спосіб – використання симістора як димер. Для плавного регулювання навантаження змінного струму необхідно фіксувати момент переходу напруги через нуль, відраховувати час і вимикати симістор, відсікаючи певну частину синусоїдального сигналу. Такий метод називається фазовим керуванням, рисунок 2.21.

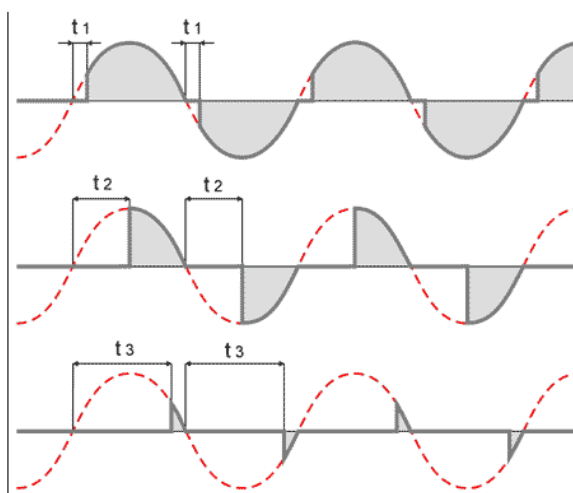


Рисунок 2.21 – Принцип фазового керування

Для цієї схеми, рисунку 2.22 потрібна оптопара без детектора нуля, наприклад, серії МОС302х.

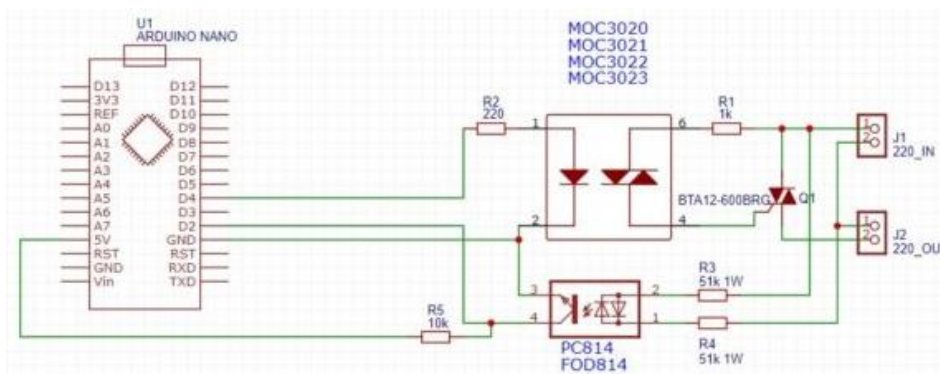


Рисунок 2.22 – Схема з фазовим керуванням

Готовий модуль зображено на рисунку 2.23.



Рисунок 2.23 – Приклад модуля фазового керування

Існує готове твердотільне реле SSR серії LA, має стандартний корпус. У назві реле після позначення SSR зазвичай вказується його струмова характеристика в амперах, наприклад, SSR-25 позначає реле на 25 ампер. Максимальна напруга вказана безпосередньо під вихідними клемми. При великому навантаженні (кілька кіловат) бажано брати SSR з хорошим запасом струму або кріпити на радіатор. Для точного контролю потужності нагрівачів необхідно стежити за температурою датчиків, точно знати момент переходу живлення через нуль, SSR серії LA має вбудовану систему контролю та генерації внутрішньої ШІМ, яка приймає на вхід струм від 0 мА до 20 мА, відкриваючи сімістор у потрібний момент часу та закриваючи при переході через нуль. Для керування, додамо резистор та конденсатор для згладжування, що дасть можливість керувати через ШІМ МК, розрахований через ПД-регулятор. Обов'язковою умовою вибору реле – вхідний опір 250 Ом, для можливості подачі струму 20мА. Цей спосіб є найбільш точним та плавним для регулювання потужності нагрівачів.

Струм верхнього нагрівача  $I_B$  розраховується з потужності нагрівача та струму мережі:

$$I_B = \frac{P_B}{U_M}; \quad (2.1)$$

де  $P_B$  – потужність нагрівача;

$U_M$  – струм мережі.

$$I_B = \frac{450}{220} = 2 \text{ A.}$$

Струм нижнього нагрівача  $I_H$  так само:

$$I_H = \frac{P_B}{U_M} = \frac{2000}{220} = 9,09 \text{ A.}$$

Струм який має витримувати твердотільне реле, без радіатора охолодження має бути з 4-х кратним запасом. Тож для керування верхнім нагрівачем використано твердотільне реле SSR-10 LA (рисунок 2.24 (а)) та SSR-40 LA (рисунок 2.24 (б)) LA для нижнього. Характеристики приведені у таблиці 2.3.



а)



б)

Рисунок 2.24 – Зовнішній вигляд реле SSR-10 LA та SSR-40 LA

Таблиця 2.3 – Характеристики твердотільних реле

Характеристика	SSR-10 LA	SSR-40 LA
Діапазон комутованих напруг	від 24 В до 380 В	від 24 В до 380 В
Максимальний струм навантаження	10 А	40 А
Падіння напруги на модулі	1,6 В	1,6 В
Керуюча напруга (DC)	від 3 В до 32 В	від 3 В до 32 В
Керуючий струм (DC)	від 3 мА до 25 мА	від 3 мА до 25 мА

### 2.2.6 Система охолодження

При відсутності системи охолодження плати відбувається вкрай повільне охолодження зони паяння (особливо на кераміці), що спричиняє занадто довге знаходження чіпа в зоні досить високих температур. А можливі і перевищення за межі позначених температур через інерційність кераміки, різні матеріали плати і ще безліч факторів, що знову ж таки додає ризиків. Не можна включати будь-яке обдування і робити протяги, особливо в момент кристалізації припою. поки не застигне припій, щоб не порушилися конвекційні потоки. А включення обдування через нагрівач верху дозволяє обдути найгарячіше місце плати обдути м'яким, теплим повітрям, що поступово остигає. Після чого увімкнути бокове охолодження, для швидкого охолодження усєї плати.

На станції АСНІ IR6500 застосовується голова з вбудованим кулером, яку можна придбати окремо, розмір якого 60 мм х 60 мм х 15 мм, напруга живлення 12 В, споживаний струм 0,1 А, рисунок 2.25.



Рисунок 2.25 – Верхня головка від станції АСНІ IR6500

Швидкість бокового потоку повітря вентилятора охолодження має складати:  $\leq 3,5 \text{ м}^3/\text{хв}$ . Для цього використовуємо два звичайні кулера 120 мм х 120мм, рисунок 2.26 (а) [20].

- номінальна напруга: 12 В;
- номінальний струм: 0,18 А;
- повітряний потік: 1,75 м<sup>3</sup>/хв.

Керування кулерами реалізовано на модулі електромеханічного реле SRD-05VDC-SL-C 5v з опторозв'язкою, для зниження вартості присторою, рисунок 2.26 (б).



Рисунок 2.26 – Кулер для корпусу 120 мм та модуль електромеханічного реле

### 2.2.7 Блок живлення

Блок має живити:

- Arduino – 5В, 40мА;
- реле – 5В, 25мА 2шт;
- LCD1602 – 5В, 50мА;
- MAX6675 – 5В, 1,5мА 2шт;
- зумер – 5В, 20мА;
- кулери – 12В, 0,18 А 2шт, 0,1 А.

Загалом необхідно два джерела живлення, на 5В 163мА та на 12В 0,46А. Для скорочення витрат, візьмемо звичайний блок живлення 12В та понижуючий DC/DC модуль. Враховуючи коефіцієнт запасу по струму, використовуємо OEM DC12 – 12В 1А, рисунок 2.27 (а), та понижуючий модуль живлення LM2596 DC-DC 3А, рисунок 2.27 (б).

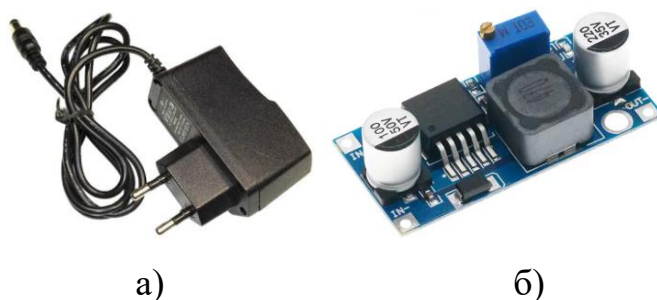


Рисунок 2.27 – Блок живлення OEM DC12 та модуль LM2596 DC-DC

### 2.2.8 Збірка пристрою

Призначення виводів Arduino UNO R3 представлено у табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Призначення виводів Arduino UNO R3

Назва	Тип	Описання
1	2	3
RESET	Input	Сигнал RESET МК (активний рівень – “0”)
3V3	Output	Напруга на виході з LP2985-33DBVR
+5V	PWR	Напруга живлення МК, LED PWR
Vin	PWR	Напруга на вході стабілізатора
GND	PWR	Земля
AREF	Input	Опорна напруга для АЦП МК
D0-D1, TX-RX	DC I/O	Цифровий вхід/вихід, UART TX/RX, LED TX/RX
D2	DC I/O	Цифровий вхід/вихід,
D3	DC I/O	Цифровий вхід/вихід та ШІМ сигнал
D4	DC I/O	Цифровий вхід/вихід
D5, D6	DC I/O	Цифровий вхід/вихід та ШІМ сигнал
D7, D8	DC I/O	Цифровий вхід/вихід
D9- D11	DC I/O	Цифровий вхід/вихід та ШІМ сигнал
D12	DC I/O	Цифровий вхід/вихід
D13	DC I/O	Цифровий вхід/вихід та LED L
A0-A3	AC I, DC I/O	Аналоговий вхід або цифровий вхід/вихід
A4, A5	AC I, DC I/O	Аналоговий вхід, цифровий вхід/вихід, I2C SLA/SCL

Також призначення виводів Arduino UNO R3 зображено на рис. 2.28.



АЦП зчитує 12-бітний результат на вивід SO. Послідовність усіх нулів означає, що показання термопари становлять 0°C. Послідовність усіх одиниць означає, що показання термопари становить +1023,75°C.

Для підключення модуля MAX6675 до МК використовується SPI інтерфейс, для цього на модулі виведені п'яти контактний роз'єм, призначення кожного вивода приведено нижче.

Призначення контактів:

- GND – «-», живлення модуля;
- VCC – «+», живлення модуля;
- SCK – тактові імпульси;
- CS – вивід інтерфейса SPI;
- SO – вивід інтерфейса SPI.

Встановивши низький рівень CS і подаючи тактовий сигнал на SCK, можна зчитати результат на SO. Низький рівень CS негайно зупиняє будь-який процес перетворення, а знову встановивши високий рівень CS процес перетворення почнеться з початку.

Підключаємо живлення, виводи VCC та GND (модуля MAX6675) підключаємо до виводів +5В та GND (Arduino). Тепер можна підключити інтерфейс ISP, для цього виводи CS кожного модуля MAX6675 підключаємо до виводів 8 та 11, SCK обох модулів підключаємо до одного вивода 13, бо зчитувати дані буде можливість тільки з одного модуля MAX6675, також і SO підключаємо до вивода 12 (Arduino).

Керування реле нагрівачів здійснюється з виводів 9 та 10 МК через резистор 50 Ом, електролітичний конденсатор здійснює згладжування ШІМ для плавного керування реле.

Бuzzer приєднується до вивода 7 МК через резистор 200 Ом, для обмеження струму та захисту порта МК. Енкодер приєднується до живлення 5В, GND та 2, 5, 6 виводів МК.

Реле для контролю системи охолодження, має призначення виводів, зображених на рисунку 2.29, керуючі виходи приєднуємо до виводів.

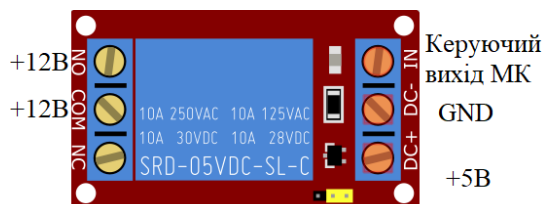


Рисунок 2.29 – Призначення виводів модуля SRD-05VDC-SL-C

Схема підключення компонентів зображена на рисунку 2.30.

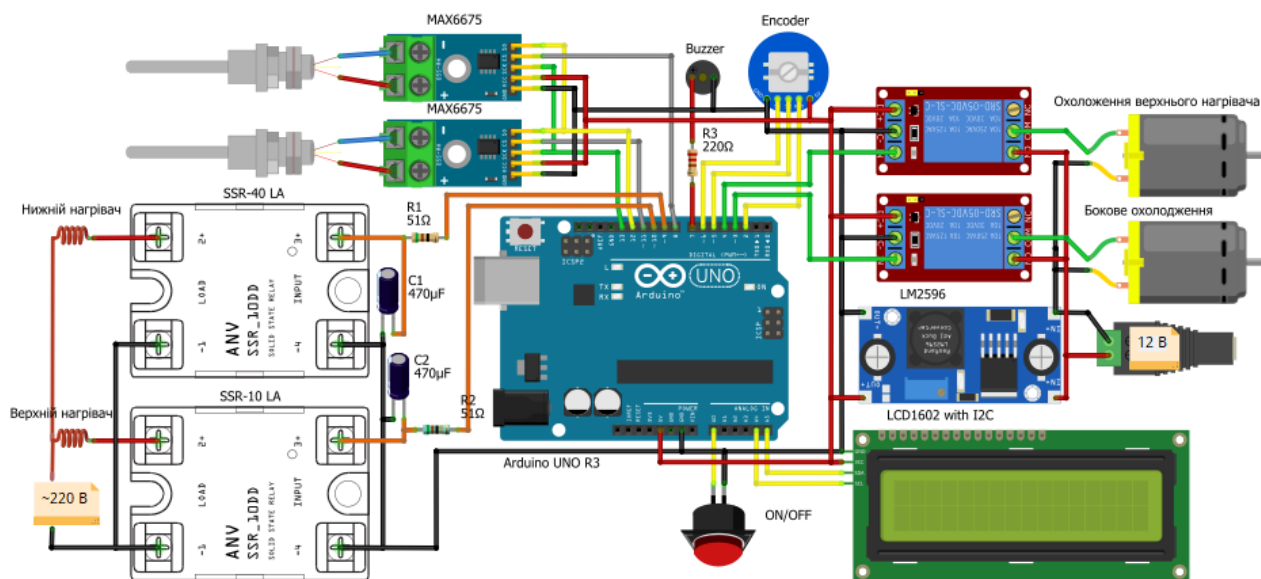


Рисунок 2.30 – Схема підключення компонентів

Наближення виводів Arduino зображено на рисунку 2.30.

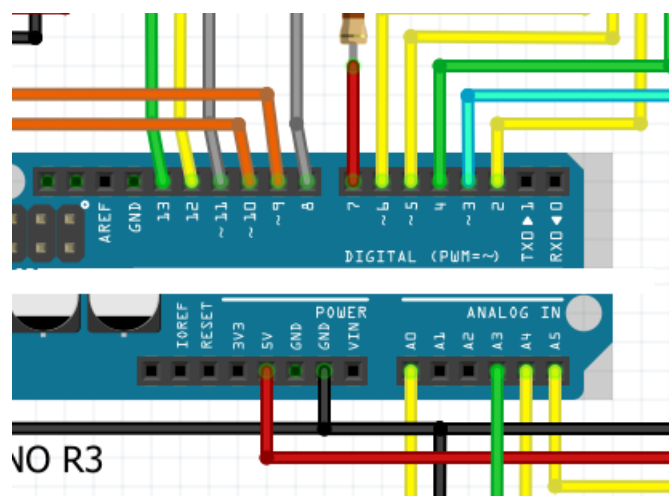


Рисунок 2.31 – Виводи Arduino

### 2.3 Висновки до другого розділу

В результаті виконання роботи, що наведена у третьому розділі виконано:

- проведений аналіз та розробка електричної частини інфрачервоної паяльної станції дозволили створити функціональну та гнучку систему для точного контролю температури при пайці електронних компонентів;
- підібрано оптимальні компоненти, такі як МК Arduino UNO R3, термопари типу К, кварцові нагрівачі, твердотільні реле, забезпечуючи високу точність і надійність системи;
- створена детальна схема з'єднання всіх компонентів, що забезпечує ефективну роботу системи;
- обрано метод ШІМ-керування для забезпечення плавного регулювання потужності нагрівачів;
- створено зручний інтерфейс для налаштування параметрів пайки.

## 3 РОЗРОБКА ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

### 3.1 Середовище розробки та бібліотеки

Розробка програмного забезпечення для ПЧ паяльної станції здійснюється на основі платформи Arduino Uno із застосуванням середовища розробки Arduino IDE. Ця середа забезпечує інтуїтивно зрозумілий інтерфейс, простоту роботи з кодом та підтримує широке коло апаратних платформ. Розробка програмного забезпечення має на меті створення функціонального прототипу для подальшого дослідження і вдосконалення станції.

Arduino IDE обрана як основний інструмент через її відкритість, підтримку різних МК та доступність великої кількості бібліотек. Завантаження середовища здійснюється з офіційного сайту ([arduino.cc](http://arduino.cc)) і потребує попереднього встановлення драйверів для коректної роботи з платою Arduino Uno. Програмування в Arduino IDE здійснюється мовою C/C++ із застосуванням спеціальних макросів та функцій для спрощення роботи з апаратними ресурсами МК.

Програмне забезпечення виконує:

- управління температурою нагрівальних елементів за допомогою PID-регулятора;
- контроль охолодження;
- моніторинг поточних параметрів (температура, стан нагріву, час пайки);
- інтерактивний інтерфейс для користувача, з можливістю змінювати параметри в режимі реального часу.

Для реалізації основних функцій використані такі бібліотеки:

`<avr/interrupt.h>`, `<avr/io.h>`, `<avr/wdt.h>` – забезпечують низькорівневий доступ до апаратного забезпечення МК та дозволяють використовувати

інтерфейси переривань, таймери й апаратний сторожовий таймер для забезпечення стабільності роботи;

"Arduino.h" – базова бібліотека для створення проєктів у середовищі Arduino IDE, забезпечує доступ до основних функцій платформи;

<EEPROM.h> – для збереження налаштувань і даних у вбудованій пам'яті мікроконтролера;

<LiquidCrystal\_I2C.h> та <Wire.h> – для інтеграції та управління LCD-дисплеєм через протокол I2C;

<avr/pgmspace.h> – забезпечує ефективне використання пам'яті програм для збереження статичних даних у флеш-пам'яті МК;

"src/Settings.h" – файл, що містить налаштування проєкту, такі як параметри PID-регулятора, масиви температурних профілів та їхніх етапів, які визначають робочі режими станції, інші параметри, такі як частота зчитування сенсорів та графічного інтерфейсу;

"src/encoder.h" – бібліотека для обробки сигналів від енкодера, що використовується для інтерфейсу управління;

"src/switch.h" – бібліотека для роботи з кнопками та перемикачами;

"src/PID.h" – реалізація алгоритму PID-регулювання для точного управління температурою;

"src/Variables.h" – файл для організації глобальних змінних проєкту;

"src/max6675.h" – бібліотека для роботи з датчиком температури MAX6675, який використовується для вимірювання температури нагрівальних елементів;

"src/system.h" – бібліотека для ініціалізації пінів та таймерів, їх режими роботи.

### 3.2 Вимір температури

Для виміру температури необхідно встановити низький рівень CS, та сигнал такта SCK, щоб вивести перший біт на вивід SO. Повне зчитування

послідовного інтерфейсу вимагає 16 тактів. Кожен такт сигналу буде виводити наступний біт, біти виводяться за спадаючим фронтом тактового сигналу. Перший біт, D15, є фіктивним знаком і завжди дорівнює нулю. Біти D14–D3 містять перетворену температуру в порядку від MSB до LSB. Біт D2 зазвичай низький і стає високим, коли вхід термопари відкритий. D1 має низький рівень, щоб забезпечити ідентифікатор пристрою для MAX6675, а біт D0 має три стани.

На рисунку 3.1 зображено протокол послідовного інтерфейсу.

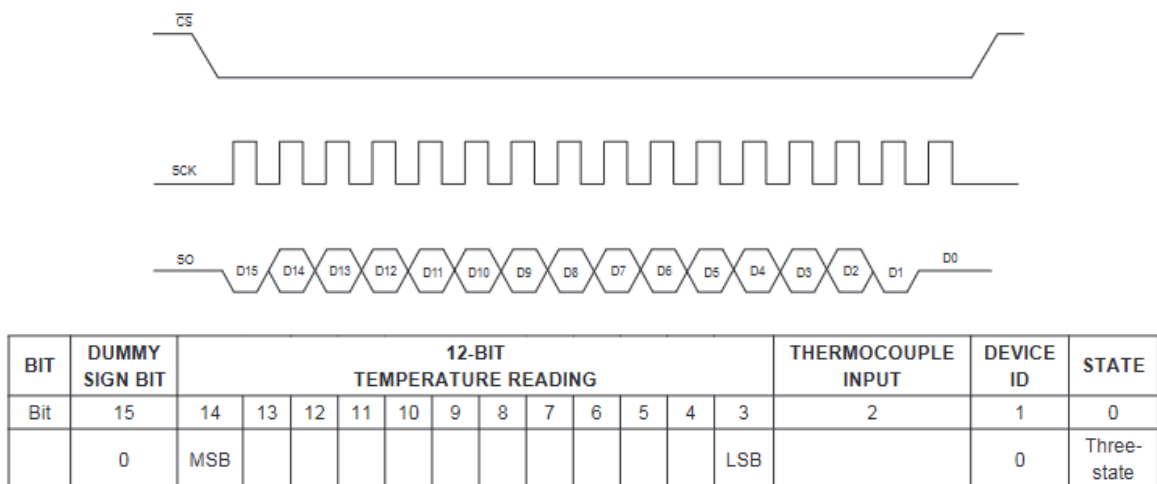


Рисунок 3.1 – Протокол послідовного інтерфейсу

Функція зчитує температуру одного з підключених датчиків MAX6675, в залежності від аргумента p:

```
float readTemp_Max6675(byte p) {
    int a = 0;
    if (p == 1) {
        PORTB &= B11111110;    //Якщо p = 1, вибирається перший датчик,
        встановлюється CS (Chip Select) в LOW для першого датчика
    }
    else if (p == 2) {
        PORTB &= B11110111;    //Якщо p = 2, встановлюється CS для
        другого датчика
    }
}
```

```
}

```

`__asm__ __volatile__ ("nop\n\t");` //забезпечує коротку затримку для стабільної роботи SPI-протокола

Запускається цикл на 16 операцій, для зчитування по одному біту:

```
for (int8_t i = 15; i >= 0; i--) {

```

```
    PORTB |= B00100000;    // вивод SCK (Clock) в HIGH

```

```
    __asm__ __volatile__ ("nop\n\t");    //затримка

```

```
    if (((PINB & B00010000) >> 4)) {    //Зчитування біта даних, якщо

```

біт дорівнює "1", то він запишиться у змінну "a", якщо ні, залишиться "0"

```
        a |= (1 << i);

```

```
    }

```

```
    PORTB &= B11011111;    // Сигнал SCK в LOW

```

```
    __asm__ __volatile__ ("nop\n\t");

```

```
}

```

```
if (p == 1) {

```

```
    PORTB |= B00000001;    // Повернення CS на HIGH після завершення

```

читання

```
    }

```

```
else if (p == 2) {

```

```
    PORTB |= B00001000;

```

```
}

```

```
if (a & 0x4) {    //Перевіряється 3-й біт результату

```

```
    return 255;    //Повернення максимального значення (помилка

```

датчика)

```
    }

```

```
else {

```

```
    return ((a >> 3) × 0.25);    //Конвертація температури в градуси

```

Цельсія

```
}}
```

Функція `float getTempHuman(int8_t sel)` розраховує середнє значення температури на основі багаторазового зчитування.

Використовується функція `readTemp_Max6675` для відповідного датчика:

```
t = readTemp_Max6675(sel);
```

Максимально зчитується 39 разів, і всі значення додаються до змінної `tem`:

```
for (int i = 0; i < 39; i++) {
    tem += t; }

```

Розрахунок середнього значення, обчислюється діленням суми на 40:

```
return tem / 40 - dt[sel - 1];
```

`float dt[] = {2.00, 2.00}` //Цей масив використовується для корекції показання температури з датчиків

Від середнього значення віднімається коригувальне значення з масиву `dt[]` для конкретного датчика, отримуємо точніше значення температури в градусах Цельсія з урахуванням корекції. Значення корекції віднімається від середньої температури, що компенсує апаратні похибки чи некоректність вимірювань.

Функція `getTempHuman` застосовується у головній програмі `void loop()`:

```
if (millis() > nextRead1) {
```

Ця умова перевіряє, чи настав час для наступного зчитування. Якщо поточний час (повернутий функцією `millis()`) більше, ніж запланований час наступного зчитування, то умова виконується.

```
nextRead1 = millis() + SENSOR_SAMPLING_TIME;
```

До попереднього значення додається `SENSOR_SAMPLING_TIME` – це константа, яка визначає інтервал між зчитуваннями датчика, таким чином, ми плануємо наступне зчитування через заданий проміжок часу

```
Input1 = getTempHuman(1);
Input2 = getTempHuman(2); }
```

Отримане значення з `getTempHuman` записується в змінні `Input1`, `Input2` та у подальшому використовується у контролі потужності нагрівачів.

### 3.3 PID контроль температури

Створено клас – `modedPID`, та конструктор із параметрами:

```
modedPID(float new_kp, float new_ki, float new_kd, int16_t new_dt = 496) {
setDt(new_dt); Kp = new_kp; Ki = new_ki; Kd = new_kd; }
```

Ініціалізуємо PID-регулятор з початковими значеннями коефіцієнтів:

- `Kp`, `Ki`, `Kd` коефіцієнти пропорційної, інтегральної та диференційної частин;

- `new_dt` – час дискретизації (за замовчуванням 496 мс).

Публічні методи:

```
void setDirection(boolean direction) { _direction = direction; }
```

Встановлює напрямок роботи PID-регулятора: `false` – стандартний напрямок (застосування для позитивного відхилення), `true` – інвертований

напрямок (для процесів, де помилка повинна бути зменшена в іншому напрямку):

```
void setLimits(int min_output, int max_output) { _minOut = min_output;
_maxOut = max_output; }
```

Встановлює мінімальне та максимальне значення для вихідного сигналу – обмеження потужності нагрівача (від 0 до 255 для ШІМ):

```
void setDt(int16_t new_dt) { _dt_s = new_dt / 1000.0f; _dt = new_dt; }
```

Встановлює час дискретизації: new\_dt – час у мілісекундах, \_dt\_s – час у секундах (для розрахунків інтегральної та диференційної складових).

Процес обчислення PID відбувається у методі getResult(), він використовується для визначення потужності нагрівачів:

```
float getResult() {
    float error = setpoint - input;
    float delta_input = prevInput - input;
    prevInput = input;
    if (_direction) {
        error = -error;
        delta_input = -delta_input;    }
    output = error × Kp;
    output += delta_input × Kd / _dt_s;
    integral += error × Ki × _dt_s;
    if (_mode) integral += delta_input × Kp;
    integral = constrain(integral, _minOut, _maxOut);
    output += integral;
    output = constrain(output, _minOut, _maxOut);
```

```
return output; }
```

Розрахунок помилки (error) – це різниця між заданими значеннями (setpoint) і вимірними значеннями (input):

```
float error = setpoint - input;
```

Для обчислення диференційної складової використовується delta\_input, яка інвертується якщо \_direction увімкнено:

```
float delta_input = prevInput - input;
```

Пропорційна складова (P):

```
output = error × Kp;
```

Інтегральна складова (I) – накопичення помилки для врахування минулих відхилень:

```
integral += error × Ki × _dt_s;
```

integral = constrain(integral, \_minOut, \_maxOut); //Обмеження інтегральної складової.

```
output += integral;
```

output = constrain(output, \_minOut, \_maxOut); //Обмеження вихідного сигналу.

Диференційна складова (D) – реагує на швидкість зміни відхилення помилки:

```
float delta_input = prevInput - input;
```

```
output += delta_input × Kd / _dt_s;
prevInput = input;
```

Вихід обмежується змінними:

```
int _minOut = 0, _maxOut = 255;
output = constrain(output, _minOut, _maxOut);
```

Далі метод повертає результат.

Основні змінні:

- Setpoint – цільове значення температури;
- input – поточне виміряне значення температури;
- output – результат обчислення PID-регулятора;
- integral – накопичення інтегральної помилки;
- prevInput – попереднє значення вхідної змінної для обчислення похідної;
- \_dt\_s – час дискретизації у секундах.

Принцип роботи PID: Введені коефіцієнти PID та інші параметри (setpoint, межі, напрямки тощо). При кожному виклику getResult() розраховується нове значення виходу на основі поточної вхідної помилки, швидкості зміни та накопиченої інтегральної помилки. Інтегральні складові та загальний вихід обмежуються в заданій частині. Повертається обчислене значення, яке використовується для керування нагрівачем.

Параметри PID Значення коефіцієнтів за замовчуванням визначенні в Settings.h.

### 3.4 Загальна робота системи

Програма керування станцією виконує кілька завдань, зокрема, моніторинг температури, регулювання PID, увімкнення/вимкнення вентиляторів і керування нагрівачами, взаємодія з користувачем, дотримання заданого термопрофіля. Розглянемо принцип роботи із основними прикладами коду.

Керування вентиляторами відбувається у кодї:

```
if (Input1 > 50) {
    if (((PIND & B00010000) >> 4) == LOW) {
        PORTD |= B00010000; // Увімкнути вентилятор
    }
} else if (Input1 < 50) {
    if (((PIND & B00010000) >> 4) == HIGH) {
        PORTD &= B11101111; // Вимкнути вентилятор
    }
}}
```

Якщо температура Input1 більше 50 °C, вентилятор вмикається (біт D4 виставляється в HIGH).

Керування нагрівачами відбувається у основному циклі loop(), де перевіряється поточний стан системи (Status):

- Status == 0 – система очікує;
- Status == 1 – виконується термопрофіль;
- інші значення – режими калібрування або відновлення налаштувань.

Ініціалізація PID-регуляторів у setup() відбувається створення двох об'єктів класу modedPID:

- modedPID regulator1(TUNE\_P\_PID, TUNE\_I\_PID, TUNE\_D\_PID, SENSOR\_SAMPLING\_TIME);

– `modedPID regulator2(TUNE_P_PID, TUNE_I_PID, TUNE_D_PID, SENSOR_SAMPLING_TIME)`.

`regulator1` – керує верхнім нагрівачем.

`regulator2` – керує нижнім нагрівачем.

Програма через регулярні проміжки часу (визначені `SENSOR_SAMPLING_TIME`) передає значення `setpoint` (задане) і `input` (поточне) в PID-регулятори та результат обчислення використовується для генерації ШІМ-сигналу для керування нагрівачами:

Якщо активний нижній нагрівач (`flagB`), результат обчислення `P_D = regulator2.getResult()`; передається функції `BottomHeaterON(P_D)`; яка регулює потужність через регулювання сигналу ШІМ;

Якщо активний верхній нагрівач (`TopStart`), аналогічно `P_U = regulator1.getResult()`; використовується у функції `TopHeaterON(P_U)`:

```
void TopHeaterON(int dim) {
    analogWrite(9, dim); //9 – пін верхнього нагрівача dim – ШІМ-сигнал для
верхнього нагрівача
}
void BottomHeaterON(int dim) {
    analogWrite(10, dim);; // dim – ШІМ-сигнал для нижнього нагрівача
}
```

Якщо відповідний нагрівач не активний (`flagB` або `TopStart` не встановлені), програма викликає функції вимкнення нагрівачів (`BottomHeaterOFF`, `TopHeaterOFF`), що вимикають ШІМ-сигнал:

```
void TopHeaterOFF(void) {
    analogWrite(9, 0);
}
void BottomHeaterOFF(void) {
```

```
    analogWrite(10, 0);  
}
```

Для верхнього нагрівача – визначається розрив між заданою (Setpoint1) і фактичною температурою (Input1), якщо розрив менший за 10, використовуються спеціальні значення параметрів авто-налаштування PID ( $K_pU$ ,  $K_iU$ ,  $K_dU$ ), які забезпечують більш точний контроль.

Якщо розрив більший, застосовуються стандартні параметри (TUNE\_P\_PID, TUNE\_I\_PID, TUNE\_D\_PID).

Аналогічно налаштовується PID-регулятор для нижнього нагрівача.

PID Коефіцієнти  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  для кожного нагрівача можуть зберігатися в EEPROM, що дозволяє використовувати їх для різних профілів.

Функція lcdTemp оновлює відображення температури на екрані для верхнього (Input1) і нижнього (Input2) нагрівачів.

У програмі реалізується процес виконання профілю нагріву, який включає кілька етапів: поступовий підйом температури (ramp), утримання на заданому рівні (step), витримку (soak) та завершення (end).

Ramp Process – цей етап відповідає за поступове збільшення температури нагрівачів. Для кожного нагрівача визначається початкова температура, а потім на основі заданої швидкості підйому температури виконується поступове збільшення її значення. Зміни температури відображаються на екрані в реальному часі. Якщо температура нижнього нагрівача досягає заданого значення, активується верхній нагрівач, і починається регулювання його температури. При досягненні заданої температури на верхньому нагрівачі програма переходить до наступного етапу.

Step Process – цей етап забезпечує утримання температури верхнього нагрівача на рівні, визначеному профілем. Програма моніторить поточну температуру та чекає, поки вона стабілізується на заданому рівні. Після цього виконується перехід до наступного етапу.

Soak Process – на цьому етапі система підтримує стабільну температуру протягом визначеного часу. Програма здійснює зворотний відлік часу витримки, а користувач може спостерігати за цим процесом на екрані. Після завершення витримки система або переходить до наступного кроку профілю, або завершує процес, якщо виконано всі етапи.

End Process – на завершальному етапі програма скидає всі параметри, сигналізує про завершення процесу та очікує нового запуску. Користувач може побачити індикацію завершення на екрані, після чого система повертається до початкового стану.

Таким чином, програма забезпечує автоматичне виконання профілів нагріву, включаючи плавний перехід між етапами, контроль температури та візуалізацію процесу для користувача.

Інші функції:

- дані профілів (кількість кроків, температурні значення, швидкість нагріву, тривалість витримки) зберігаються в структурі Profile, збереження відбувається через EEPROM;
- інтерфейс реалізовано на основі LiquidCrystal\_I2C, який виводить поточний стан, профілі, температуру та діагностичні повідомлення та енкодера, через який користувач дає команди та налаштовує систему;
- ініціалізація системи, включає налаштування пінів, таймерів, ініціалізацію дисплея, а також завантаження налаштувань з EEPROM.

Програма має модульну структуру, що дозволяє легко змінювати логіку PID та налаштовувати параметри нагрівачів.

### 3.5 Висновки до третього розділу

Розроблено програмне забезпечення для керування інфрачервоною паяльною станцією на основі платформи Arduino Uno. Програма забезпечує точний контроль температури за допомогою PID-регулятора, моніторинг параметрів процесу пайки та зручний інтерфейс користувача.

Ключові функціональні можливості:

- точне підтримання заданої температури за допомогою PID-регулятора;
- відображення поточних значень температури на дисплеї;
- можливість створення та збереження різних температурних профілів;
- інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для взаємодії користувача з системою.

## 4 ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ

### 4.1 Розрахунок коефіцієнтів PID-регулятора

Для точного контролю температури необхідно мінімізувати помилки регулювання, що створює потребу в забезпеченні високої статичної та динамічної точності. Щоб розробити інфрачервону паяльну станцію, необхідно будувати математичні моделі, які відображають динамічні зміни під час переходу між різними режимами її роботи. Характеристика перехідного процесу значною мірою визначається системою керування, у складі якої використовується PID-регулятор. Будь-який об'єкт, навіть той, що здається простим на перший погляд, неможливо повністю описати за допомогою математичних рівнянь. Наші знання про фізичні процеси, які відбуваються в цьому об'єкті, завжди мають певні межі. Важливо зазначити, що прагнення створити максимально точну модель є концептуально хибним. Навіть якщо врахувати всі відомі аспекти та особливості реального об'єкта в математичній моделі, її складність може зробити таку модель непридатною для використання. Оптимальним підходом є розробка максимально простої моделі, яка зберігає основні характеристики системи.

Для розрахунку PID-регулятора нам необхідно знати передаточну функцію об'єкта керування, для ІЧ керамічного нагрівача вона має вигляд:

$$W(s) = \frac{0,51}{0,94 \times s^2 + 3,37 \times s + 1}$$

PID-регулятори застосовуються в системах управління для покращення характеристик перехідного процесу та підвищення точності в сталому режимі. Для розрахунку коефіцієнтів PID-регулятора скористаємося програмним

середовищем MATLAB та інструментом pidTuner. Передатна функція ідеального PID-регулятора  $W_{PID}(s)$  має вигляд [21]:

$$W_{PID}(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_D s, \quad (4.1)$$

де  $K_p$ , – параметр пропорційного елементу регулятора;

$K_i$  – інтегрального елементу регулятора;

$K_D$  – диференціального елементу регулятора;

$s$  – оператор.

Для розрахунку коефіцієнтів ПІД на основі передаточної функції керамічного нагрівача напишемо скрипт у програмного середовищі MATLAB:

```
% Вихідні дані системи
K = 0.51;
T1 = 0.94;
T2 = 3.35;
% Передаточна функція системи
num = K;          % Чисельник
den = [T1^2 2*T2 1]; % Знаменник
W = tf(num, den);
% Відображення передаточної функції
disp('Передаточна функція:');
W
% Налаштування PID-регулятора
opts = pidtuneOptions('CrossoverFrequency',25,'PhaseMargin', 90);
[PID, info] = pidtune(G, 'PID', opts);
% Виведення коефіцієнтів ПІД
Kp = PID.Kp;
Ki = PID.Ki;
Kd = PID.Kd;
```

```

disp('Коефіцієнти ПІД:');
disp(['Kp = ', num2str(Kp)]);
disp(['Ki = ', num2str(Ki)]);
disp(['Kd = ', num2str(Kd)]);

```

Результат виконання програми зображено на рисунку 4.1

```

Передаточна функція:

W =

          0.51
-----
0.8836 s^2 + 6.74 s + 1

Continuous-time transfer function.
Model Properties
Коефіцієнти ПІД:
Kp = 328.4314
Ki = 609.9536
Kd = 44.2112

```

Рисунок 4.1 – Результат виконання програми

## 4.2 Розробка моделі управління

Особливості перехідного процесу значною мірою залежать від системи керування з використанням PID-регулятора. Імітаційну модель системи керування із зворотним зв'язком для паяльної станції, розроблено у середовищі MATLAB & Simulink. Синтез регулятора виконаний за допомогою блоку Block Parameters: PID Controller у середовищі Simulink, зображений на рисунку 4.2.

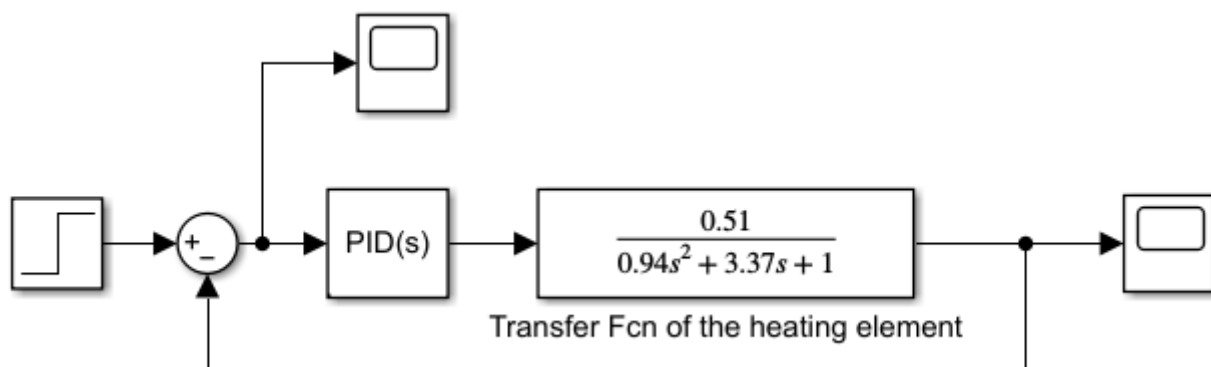


Рисунок 4.2 – Імітаційна модель системи керування із зворотним зв'язком для паяльної станції

Новизна роботи визначається застосуванням сучасних підходів до оптимізації роботи інфрачервоної паяльної станції, включаючи впровадження передових матеріалів, адаптивних алгоритмів керування. Показники якості перехідного процесу для системи керування:

- аперіодичний процес без перерегулювання;
- час регулювання менше ніж 1 с.

Розраховані коефіцієнти PID-регулятора, підставлені у MATLAB&Simulink, представлені на рисунку 4.3.

Controller parameters

Source:

Proportional (P):

Integral (I):   Use I\*Ts (optimal for codegen)

Derivative (D):

Filter coefficient (N):   Use filtered derivative

---

Automated tuning

Select tuning method:

Enable zero-crossing detection

Рисунок 4.3 – Параметри блоку PID Controller середовища Simulink

В попередніх розділах відзначалось, що в автоматичних системах повинні виконуватись умови стійкості. Стійкість автоматичних систем – це їх

властивість повертатись в початковий стан після того, коли будь-яка дія вивела систему з цього стану, побачити таку властивість можна на перехідному процесі. Графік перехідного процесу системи автоматичного регулювання – це графічне зображення, яке показує зміну вихідної величини системи у часі у відповідь на стрибкоподібну або іншу зміну вхідного сигналу. Перехідний процес – це тимчасова реакція системи на зміну вхідного сигналу до моменту встановлення сталого стану. Іншими словами, це поведінка системи від початкового стану до нового рівноважного стану після збурення. На рисунку 4.4 наведено результати моделювання перехідного процесу системи з досліджуваним об'єктом.

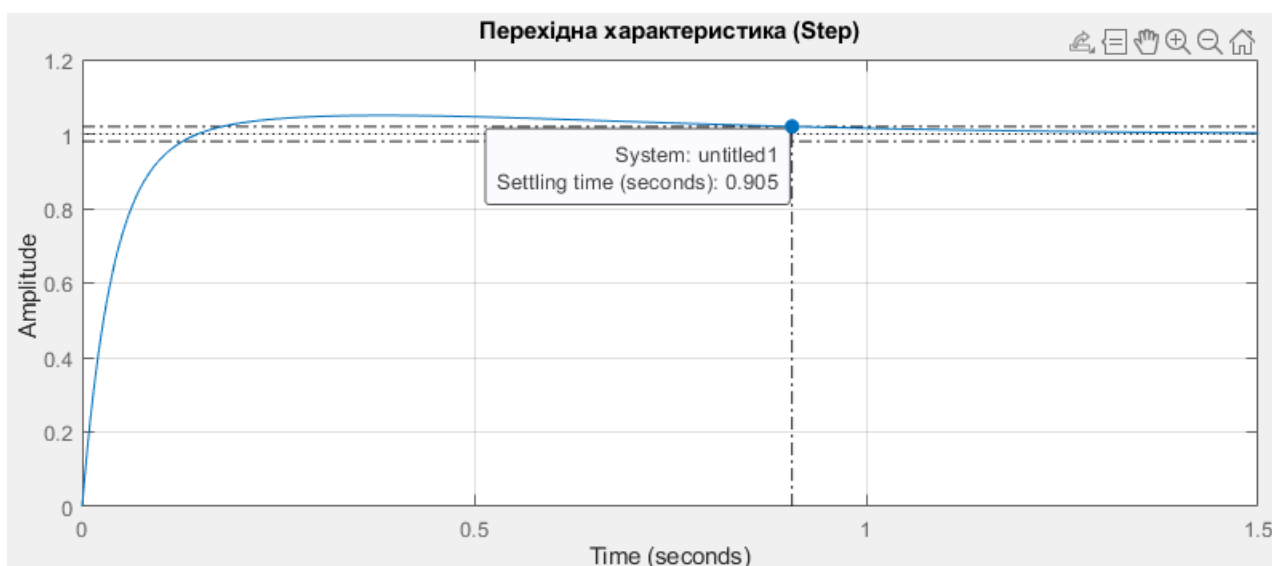


Рисунок 4.4 – Перехідна характеристика

Також побачити властивості системи можна за допомогою імпульсної характеристики – це реакція динамічної системи на одиничний імпульс вхідного сигналу. Вона описує, як система змінює свій вихід у часі після миттєвого короткочасного впливу, зображено на рисунку 4.5.

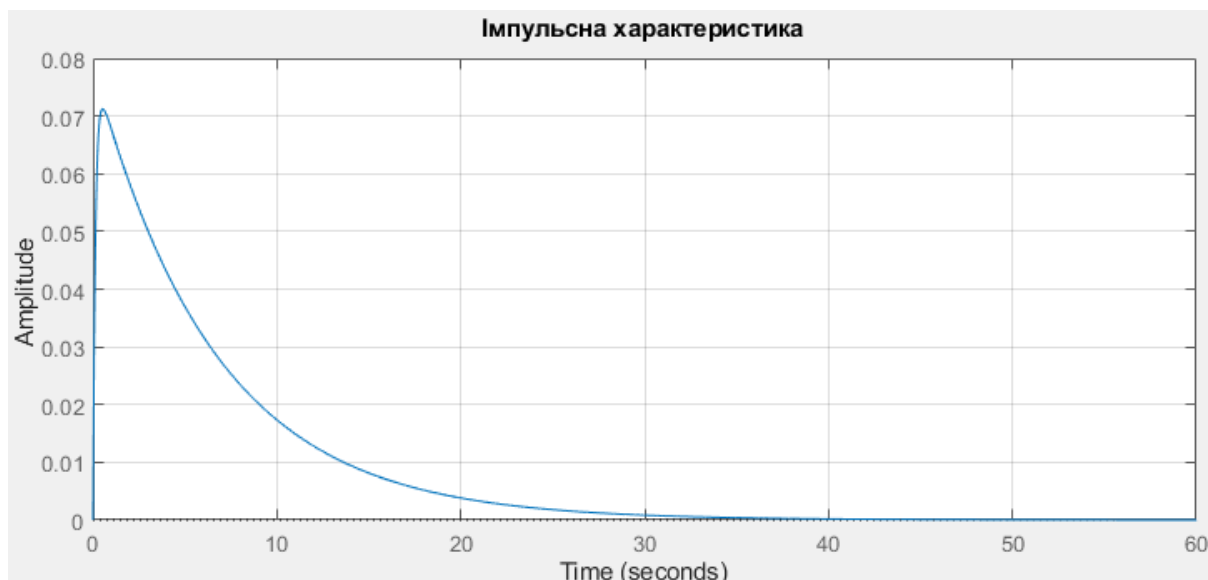


Рисунок 4.5 – Імпульсна характеристика

Дослідження стійкості системи у відкритому стані проведено на основі критерію Найквіста, який є потужним інструментом для аналізу стабільності лінійних замкнутих систем. Критерій Найквіста дозволяє оцінити стійкість системи. Він полягає в аналізі частотної характеристики відкритої системи, зокрема передавальної функції, у комплексній площині.

Згідно з критерієм Найквіста, стійкість замкнутої системи визначається за допомогою аналізу контурного обчислення, якщо система автоматичного керування стійка в розімкненому стані, то для її стійкості в замкненому стані необхідно і достатньо, щоб АФЧХ розімкненої системи  $W(j\omega)$  при зміні  $\omega$  від нуля до нескінченності не охоплювала точку з координатами  $(-1; j0)$  комплексної площини. Виходячи з цього, можна зробити висновок про стійкість системи: система є стійкою, якщо контур не обходить точку  $(-1; j0)$ , а нестійка – якщо будь-які полюси знаходяться в правій півплощині, тобто мають позитивну дійсну частину. З рисунка 4.6, видно що система стійка.

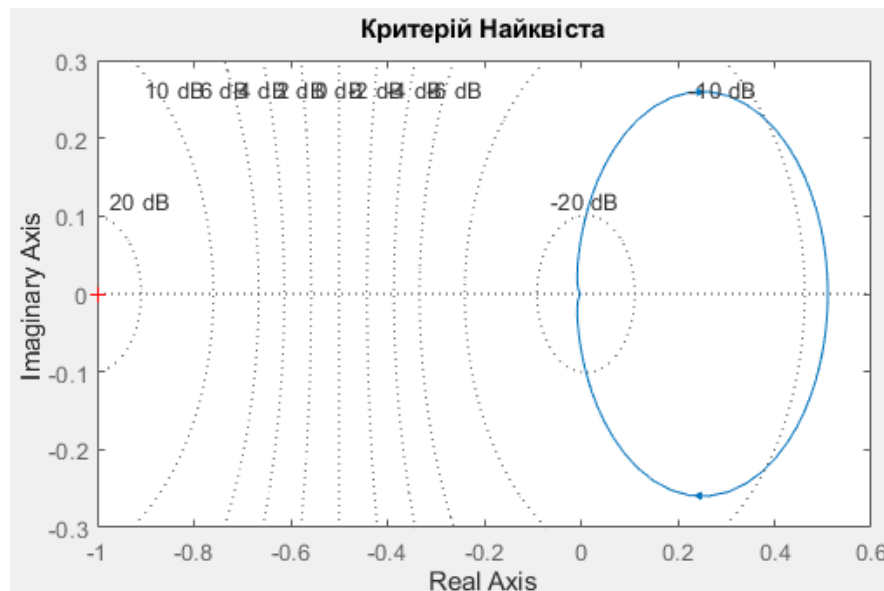


Рисунок 4.6 – Годограф Найквіста

Параметри моделі безперервного PID-регулятора, розроблені для керування ІЧ паяльної станції, дозволяють досягати необхідних показників якості перехідного процесу. Час регулювання складає 0,905 с, і перехідний процес протікає з незначними коливаннями, що не вплине на процес. Така характеристика є критично важливою для досягнення високої точності температури в процесі пайки.

#### 4.3 Тестування паяльної станції

Одним із ключових етапів розробки або оптимізації будь-якого технічного пристрою є його тестування. Воно дозволяє не лише підтвердити відповідність заявленим характеристикам, але й виявити можливі недоліки конструкції або програмного забезпечення. У випадку з ІЧ паяльною станцією тестування є критично важливим, оскільки забезпечення точності температурного профілю є основою якісної пайки, що безпосередньо впливає на надійність електронних компонентів.

При використанні оптимізованої ІЧ паяльної станції процес пайки включає кілька основних етапів. Спочатку оператор встановлює бажаний термопрофіль за допомогою програмного інтерфейсу станції. Цей профіль

визначає, як температура змінюватиметься з часом на різних етапах пайки: попередній нагрів, активація флюсу, плавлення припою та охолодження. Після налаштування термопрофілю станція автоматично контролює нагрів керамічного елемента завдяки фазовому керуванню, яке разом з постійним моніторингом температури плати, забезпечує точність її регулювання.

Оператор розміщує друковану плату на робочій поверхні станції, встановлює датчики термодари (один біля чіпа, інший зі зворотної сторони плати), а також встановлює верхній нагрівач рівно над чіпом на відстані 5см. Після чого запускає процес пайки. Завдяки PID-регулятору система постійно стежить за температурою в зоні пайки та швидко коригує параметри нагріву, щоб уникнути перегріву або недостатнього прогріву компонентів. Після оплавлення кульок BGA чіпів включається охолодження плати (один кулер над верхнім нагрівачем, обдуває вниз і 2 кулера 120 мм збоку від зони паяння), виходить м'яке охолодження з теплим повітрям від верхнього нагрівача, що дає змогу усій платі і нагрівачам швидко і в той же час рівномірно охолонути. На рисунку 4.7 зображений знімок

Під час тестування проведено порівняння роботи оптимізованої ІЧ паяльної станції з аналогічною моделлю іншого виробника. На графіках термопрофілів обох станцій, представлених на рисунках 4.7 та 4.8, видно, що розроблена станція забезпечує краще дотримання встановленого профілю.

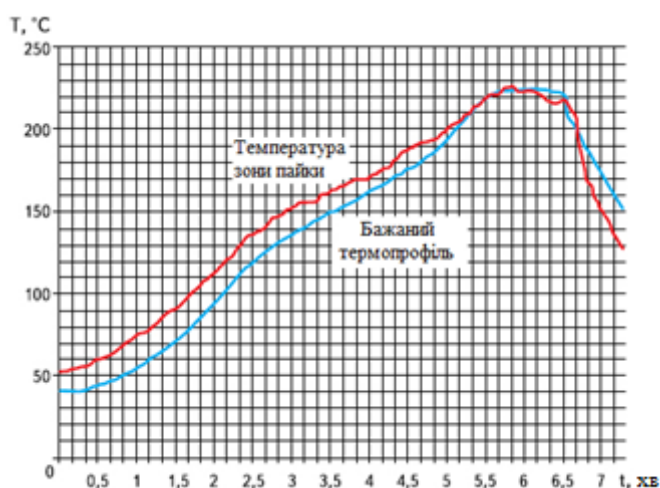


Рисунок 4.7 – Температурний профіль аналогічної ІЧ паяльної станції

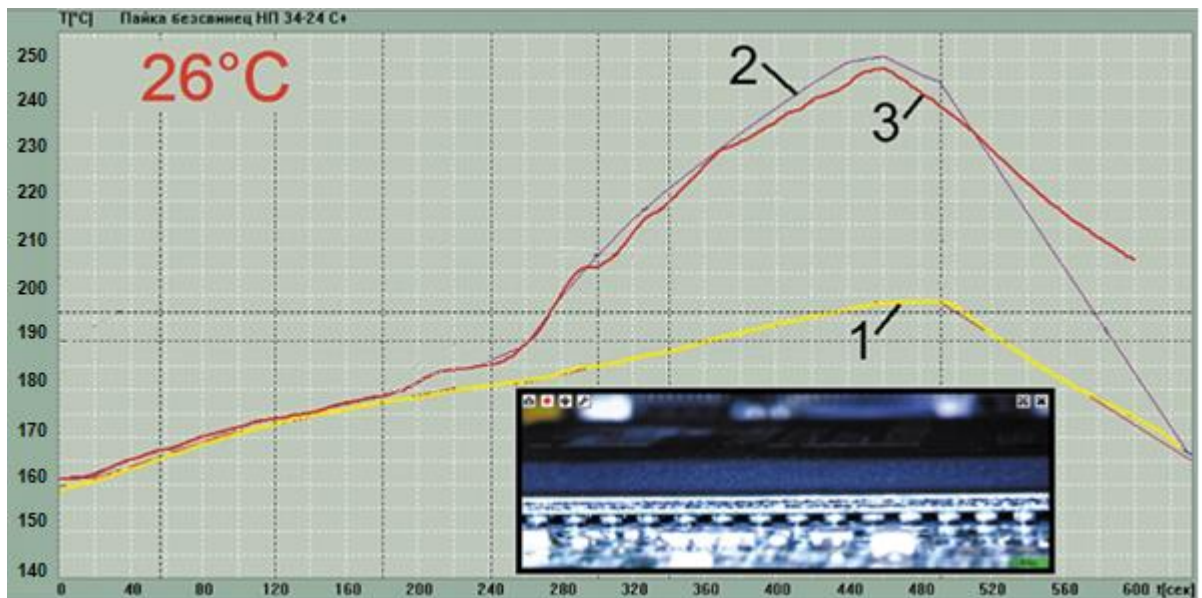


Рисунок 4.8 – Температурний профіль розробленої ПЧ паяльної станції  
 (1 – температура нижнього нагрівача; 2 – встановлений термопрофіль;  
 3 – температура з датчика біля чіпа)

Цього вдалося досягти завдяки кільком ключовим технічним рішенням:

- вибір керамічного нагрівача, який рівномірно розподіляє тепло, що дозволяє точніше регулювати температуру;
- фазове керування живлення нагрівачем (рисунок 4.9), що забезпечує плавність зміни температури та мінімізує термічні коливання;
- оптимізація PID-регулятора, що дозволяє швидко реагувати на відхилення температури, утримуючи її в межах заданого профілю;
- використання рівномірного охолодження зверху та з боку станції, мінімізує ризик термічних пошкоджень компонентів і деформації друкованої плати.

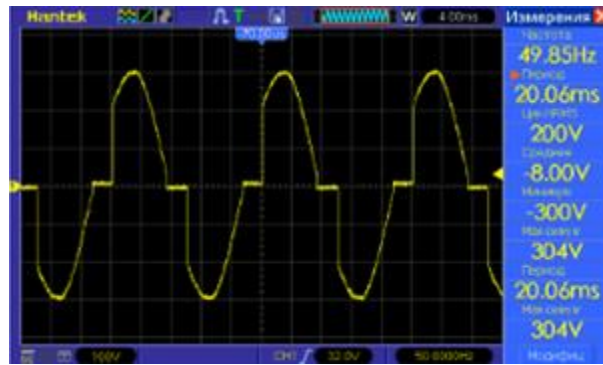


Рисунок 4.9 – Осцилограма живлення нагрівачів

Таким чином, результати тестування підтвердили, що впроваджені технічні рішення значно покращують точність та стабільність роботи ІЧ паяльної станції, що є важливим фактором для забезпечення високої якості пайки.

#### 4.5 Висновки до четвертого розділу

У результаті виконання робіт, наведених у четвертому розділі, досягнуто наступне:

- проведено аналіз передатної функції інфрачервоного нагрівача;
- реалізовано математичну модель системи керування для розрахунку параметрів PID-регулятора;
- розраховано оптимальні коефіцієнти PID-регулятора з використанням програмного середовища MATLAB та інструмента pidTuner;
- перевірено стійкість системи керування на основі критерію Найквіста;
- забезпечується відповідність характеристикам перехідного процесу вимогам, зокрема досягнуто регулювання часу менше 1 с і мінімальне перерегулювання.

Отримані результати є основою для впровадження ефективного та стабільного управління температурним режимом у розробленій інфрачервоній паяльній станції.

## 5 ОХОРОНА ПРАЦІ

Охорона праці – це система правових, організаційно-технічних, соціально-економічних, лікувально-профілактичних та санітарно-гігієнічних заходів, спрямованих на збереження здоров'я і працездатності людини під час роботи.

У процесі праці людина взаємодіє з виробничим середовищем, засобами виробництва та предметами праці. Вплив різних шкідливих і небезпечних факторів на робочому місці може негативно позначитися на здоров'ї та працездатності працівника.

Небезпечні виробничі фактори – це фактори, які можуть викликати травми або раптове погіршення здоров'я. Шкідливі виробничі фактори можуть спричиняти захворювання або зниження працездатності.

До небезпечних і шкідливих факторів належать:

- фізичні фактори – рухомі механізми, високий рівень вібрації, статична електрика, висока або низька температура поверхонь обладнання, небезпечна напруга в електричних мережах;

- хімічні фактори – токсичні речовини, подразнювальні, алергени, канцерогени;

- психофізіологічні фактори – фізичні та нервово-психічні перевантаження.

Проникнення шкідливих речовин до організму відбувається через органи дихання, шкіру, слизові оболонки або шлунково-кишковий тракт.

Для забезпечення безпеки необхідно встановлювати системи вентиляції, які можуть бути:

- загальнообмінні (витяжні, припливні або комбіновані);

- місцеві (витяжні пристрої, встановлені безпосередньо над джерелами шкідливих викидів).

Системи вентиляції повинні забезпечувати від 8 до 12-кратного повітрообміну на годину. Це знижує концентрацію шкідливих речовин у повітрі робочої зони. ГДК хімічних речовин і матеріалів приведені у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – ГДК хімічних речовин і матеріалів

Найменування речовини	Повітря робочої зони				Атмосферне повітря населених місць	
	Величина ГДК, мг/м <sup>3</sup>	Агрегатні стани	Клас небезпеки	Особливості дії на організм людини	Величина ГДК (ОБРВ), мг/м <sup>3</sup>	
					Макс разова	Середньодобова
ацетон	200	п	4	наркотична	0,35	0,35
бензин БР-1	100	п	4	наркотична	0,05	0,05
уайт-спірит	300	п	4	подразнювальна, алерген	1	–
спирт етиловий	1000	п	4	подразнювальна	5	5
свинець	0,01	а	1	соматична, мутагенна	0,001	3·10 <sup>-4</sup>
олово хлористе	–	–	–	подразнювальна	0,5	0,05
залізо хлорне	10	а	4	фіброгенна	–	–

Використання матеріалів і речовин (розчинів, кислот, лугів) під час виготовлення друкованих плат потребує особливих заходів безпеки. Наприклад:

- при промиванні плат ізопропіловим спиртом та ацетоном враховувати їхню токсичність і пожежонебезпечність;
- хімічне очищення та міднення проводити з використанням засобів індивідуального захисту (фартухи, рукавички, окуляри);
- небезпечні речовини, такі як кислоти, хлорна мідь, хромовий

ангідрид, потребують обов'язкового інструктажу для працівників.

При потраплянні в очі – промийте водою або розчином квасців від 0,5% до 1%, вазеліною або оливковою олією. При ураженні шкіри – обмийте чистою водою, зробіть примочки з 5%-ного розчину оцтової, лимонної або соляної кислоти [22].

Речовини, які використовуються у виробничих процесах, можуть бути пожежонебезпечними. Для зменшення ризику:

- використовувати вогнестійкі матеріали;
- зберігати легкозаймисті речовини у спеціальних контейнерах;
- забезпечити наявність вогнегасників і протипожежного інвентарю.

На робочих місцях повинна бути витяжна вентиляція, а робітники повинні застосовувати засоби індивідуального захисту очей, органів дихання та шкірних покривів.

Під час налагоджувальних, профілактичних робіт або експлуатації обладнання працівник може ненавмисно торкнутися струмопровідних елементів, що перебувають під напругою. У такій ситуації через тіло людини протікає електричний струм, що може спричинити серйозні порушення життєвих функцій організму, такі як зупинка дихання, втрати свідомості або припинення роботи серця. Таке пошкодження називається електричним ударом.

Електричний струм, проходячи через тіло людини, викликає біологічний, механічний, тепловий та хімічний вплив. Ступінь ураженості залежить від багатьох факторів, включаючи силу струму, тривалість його впливу, тип струму, рівень напруги, траєкторію проходження через тіло, опір речовин та умови навколишнього середовища. Сила струму, що стає небезпечною для життя, починається з 0,1 А.

Ураження електричним струмом може бути викликане не лише прямим контактом із струмопровідними частинами під напругою, але й впливом електричної дуги. У таких випадках наявні електричні опіки, розташовані електричні знаки та може відбуватися електromеталізація шкіри. Такі ушкодження називають електричними травмами.

Для забезпечення електробезпеки застосовуються такі технічні засоби та заходи, як окремо, так і в комбінації:

- захисне заземлення;
- занулення;
- захисне відключення;
- використання низької напруги;
- ізоляція струмопровідних частин;
- попереджувальна сигналізація;
- огорожувальні пристрої;
- ізольовані засоби електрозахисту (індикатори напруги, діелектричні рукавички тощо).

Заземлення – це цілеспрямоване підключення до землі або її аналога струмопровідних металевих частин обладнання, які в нормальних умовах не перебувають під напругою. Захист в аварійних ситуаціях, наприклад, через пошкодження ізоляції, вони можуть опинитися під напругою.

Якщо струмопровідні елементи обладнання з'єднати з нульовим провідником мережі, то в разі фази замикання на корпусі виникає однофазне коротке замикання, що змінює роботу системи захисту й автоматичне відключає обладнання. Такий захід називається зануленням . У мережах з напругою до 1000 В це включає з'єднання струмопровідних частин із заземленою нейтраллю трансформатора чи генератора в трифазних мережах або середньою точкою джерела струму в постійних мережах.

Статична електрика , яка може накопичуватися на поверхнях обладнання, є небезпечним фактором, що здатен призвести до вибуху чи зайняття. Для зменшення ризику застосувати такі методи:

- заземлення обладнання та робочих майданчиків, підвищення провідності матеріалів шляхом нанесення антистатичних покриттів;
- використання іонізаторів повітря (високовольтних, індукційних, радіоактивних);
- забезпечення персоналу засобами індивідуального захисту, зокрема

антистатичними халатами, браслетами, спеціальним струмопровідним взуттям.

Для захисту від блискавок застосовуються блискавковідводи. Крім того, для запобігання вторинним наслідкам блискавичних ударів обладнання з'єднується із заземлювачами, що дозволяє ефективно відводити електростатичні заряди на підставі.

Пожежонебезпечність приміщень зростає за наявності кисню, горючих матеріалів та джерел запалювання. Лакофарбові покриття, горючі конструкції, перегородки та інші елементи застосування можуть сприяти поширенню вогню. відповідно до ОНТП 24-86, такі приміщення класифікуються як категорія «В».

Для зменшення ризику пожежі, шкідливості:

- налаштування системи автоматичної пожежної сигналізації (наприклад, комбінованого оповіщувача ДПП-1);
- використання первинних засобів пожежогасіння, таких як повітряно-пінні вогнегасники (ВПП-5, ВПП-10), ручні вогнегасники (ВВ-2, ВВ-5) та азбестові полотна.

Система автоматичної сигналізації здатна виявляти пожежу за слабкими ознаками або підвищенням температури до  $70 \pm 10$  °С у приміщеннях площею до 150 м<sup>2</sup> з висотою стелі до 4 метрів.

Шкідливі фактори на виробництві також пов'язані з процесами пайки. Вони включають випаровування олова, свинцю, каніфолі, соляної кислоти та інших речовин, які індивідуальні аерозолі, небезпечні для здоров'я працівників. Ці частини можуть осідати на шкірі, відвідувати дихальні шляхи та травний тракт, забруднювати одяг і робочі поверхні.

Особливо шкідливі пари свині, які накопичуються в організмі, уражаючи нервову систему, нирки, захворювання та кісткові тканини. Хронічне свинцеве отруєння може виникати навіть при тривалому надходженні малих доз цієї речовини. Для безпеки працівників концентрація свинцю у повітрі не повинна перевищувати 0,01 мг/м<sup>3</sup>.

Додатково проводити оснащувати приміщення системами вентиляції та очищення повітря, а також регулярно проводити навчання персоналу правилам роботи в небезпечних умовах.

На виробництві електронної техніки, окрім традиційних олов'яно-свинцевих припоїв, використовують також припій з домішками літа, міді, кадмію, срібла та інших металів. У певних випадках пайка виконується методом занурення у розплавлені хлориди кадмію, натрію, літію, бору з додаванням фтористих солей. Пари цих речовин можуть суттєво впливати на здоров'я працівників, особливо небезпечними є сполуки фтору, окис міді та кадмію, а також хлористий цинк і літій, які дратують слизову оболонку та дихальні шляхи.

Флюси, що застосовуються в процесі пайки, також несуть велику загрозу для здоров'я. Їхні компоненти діють на організм людини по-різному:

- речовини на основі каніфолі, олеїнової кислоти або етилацетату викликають подразнення;
- етиловий спирт має наркотичний ефект;
- етиленгліколь виявляє високу токсичність;
- вплив деяких кремнійорганічних сполук ще недостатньо вивчених.

Через токсичність деяких флюсів їх використання обмежується або повністю забороняється. Наприклад, етиленгліколь замінює гліцерином, оскільки він проникає в організм навіть через неушкоджену хворобу. Крім того, для видалення залишків флюсів застосовуються спеціальні засоби, які мають токсичні властивості.

Для забезпечення допустимих умов праці на паяльних ділянках слід впроваджувати комплекс заходів:

- відділення зон пайки в окремих приміщеннях, які відповідають суворим санітарно-гігієнічним вимогам;
- покриття стін, повітроводів та інших поверхонь олійною фарбою, облаштування водонепроникної, вогнестійкої підлоги, що легко миється;
- оснащення приміщень припливно-витяжною вентиляцією, де

приплив повітря становить 95% від обсягу витяжки;

– щоденне вологе прибирання ділянок пайки та ретельне миття робочих поверхонь після всіх змін.

Додаткові обмеження:

– працівники молодші за 18 років не допускаються до роботи з припоями, що відповідають свинець і кадмій;

– жінки у період або годування дитини переводяться на інші посади, не пов'язані з паяльними роботами;

– всі працівники повинні проходити інструкції з техніки безпеки при роботі з припоями та флюсами.

Працівники під час роботи повинні носити спеціальний одяг, який забороняється виносити на межі виробництва. Особисті речі, їх та воду не можна зберігати в паяльних приміщеннях, а для прийому їжі слід облаштувати спеціальні кімнати з умивальниками для миття рук. Вода до умивальників подається безперебійно, для попереднього обмивання використовується 1%-й розчин оцтової кислоти, а руки миються теплою водою з милом.

Після роботи працівникам прийняти душ, почистити зуби зубним порошком і прополоскати рот. Питну воду на виробництві дають через фонтанчики, розташовані поблизу паяльних ділянок.

Якщо молоко може посилювати вплив свинцю через високий вміст кальцію, замість цього працівникам видають від 8 г до 10 г пектину у формі мармеладу або концентрату, який вживається з чаєм.

До цих заходів сприяє мінімізація шкідливого впливу токсичних речовин на здоров'я працівників та зниження ризиків професійних захворювань.

Висновки:

Робоче місце має бути розташоване в спеціально забезпеченій паяльній зоні, оснащій ефективною системою припливно-витяжної вентиляції, що забезпечує видалення шкідливих випарів.

Стіл повинен мати термостійке покриття для захисту від високих температур.

Освітлення на робочому місці має бути достатнім, але непрямим, щоб уникнути відблисків від інфрачервоного випромінювання.

Працівники повинні використовувати захисні окуляри , які блокують інфрачервоне випромінювання, для запобігання пошкодженню очей.

Для захисту шкіри від випромінювання використані антистатичні рукавички з термостійкого матеріалу.

Робочий одяг має бути виготовлений із матеріалів, які не накопичують статичний заряд і не займають.

У разі тривалої роботи бажано відмовити респіратори або маски , що захищають від токсичних випарів.

Перед початком роботи необхідно провести візуальний огляд станції для перевірки справності нагрівальних елементів, кабелів живлення та заземлення.

Категорично забороняється торкатися нагрітих керамічних елементів або їх металевих деталей під час роботи.

Температурний режим нагріву повинен бути налаштований відповідно до технічної документації для запобігання перегріву компонентів і мінімізації виділення шкідливих речовин.

## ВИСНОВКИ

В результаті виконання кваліфікаційної роботи на рівень магістра отримано такі результати:

Збільшено надійність приладів, їх довговічність, відсоток браку. Проведено комплексний аналіз сучасних типів нагрівачів, термопрофілів та конструкцій інфрачервоних паяльних станцій. Особливу увагу приділено вивченню керамічних і кварцових нагрівачів, їх характеристик у застосуванні для безсвинцевої пайки.

Застосування керамічних ІЧ джерел середнього діапазону оптимально в ІЧ станціях, призначених для ремонту виробів з компонентами SMD, оскільки для них потрібна висока рівномірність нагрівання поверхні виробу під час проведення монтажних робіт, а за рахунок збільшення часу нагрівання знижуються термічні напруги в обсязі компонентів виробу. В ході аналізу безсвинцевої пайки, з'ясовано, що вона є екологічно безпечною та технологічно перспективною, але вимагає точного дотримання температурних профілів, що потребує розробки програмного забезпечення яке буде автоматично та точно підтримувати температурні профілі.

У процесі виконання роботи проведена комплексна розробка інфрачервоної паяльної станції, яка включає апаратну та програмну складові, що забезпечують точне та стабільне регулювання температурного режиму. Розробка електричної частини станції дозволила створити функціональну систему на основі МК Arduino UNO R3, з використанням термопар, кварцевих нагрівачів і твердотільних реле. Це забезпечило високу точність і надійність роботи пристрою.

Програмне забезпечення станції реалізовано з використанням PID-регуляторів, що дозволило досягти точного контролю температури та стабільної роботи системи. Інтуїтивний інтерфейс сприяє взаємодії користувача з

пристроєм, забезпечуючи можливість налаштування та збереження температурних профілів, а також параметри моніторингу

Системи математичного моделювання керування дозволили провести розрахунок оптимальних коефіцієнтів ПД-регулятора, що забезпечувало відповідність перехідного процесу вимогам щодо точності та швидкості регулювання. Аналіз стійкості системи підтверджує її ефективність і стабільність, що робить розроблену станцію придатною для виконання високоякісної пайки.

Отримані результати можна віднести до Цілі сталого розвитку 9 «Промисловість, інновації та інфраструктура», а саме п. 9.4 «Сприяти прискореному розвитку середньо- та високотехнологічних секторів переробної промисловості, які формуються на основі використання ланцюгів «освіта – наука – виробництво» та кластерного підходу за напрямками: розвиток інноваційної екосистеми; розвиток інформаційно-телекомунікаційних технологій (ІКТ); застосування ІКТ в АПК, енергетиці, транспорті та промисловості; високотехнологічне машинобудування; створення нових матеріалів; розвиток фармацевтичної та біоінженерної галузей».

## ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. ДСТУ 3008 – 15. документація. звіти у сфері науки і техніки. структура і правила оформлення [Текст] – Введ. 2015 – 06 – 22. – К. Держстандарт України, 2017 – 29с.
2. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 174 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка, освітньо-професійних програм: «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. Харків: ХНУРЕ, 2024. 57 с.
3. Глушенко О.Г. Аналіз ефективності інфрачервоних нагрівачів для монтажу та демонтажу SMD та BGA компонентів/ О.Г. Глушенко, Р.Є. Стрілець// «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2024 [Електронний ресурс]; збірник студентських наукових статей / Харківський національний університет радіоелектроніки ; [редкол.: І.Ш. Невлюдов та ін.]. – Харків – ХНУРЕ, 2024. – Вип. 2. – 152с.
4. A Comprehensive Guide to Soldering: Techniques, Tools, and Tips [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://www.instructables.com/A-Comprehensive-Guide-to-Soldering-Techniques-Tool/>.
5. Solder Reflow: An In-Depth Guide to the Process and Techniques [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://www.wevolver.com/article/reflow-soldering>.
6. What is PCB Wave Soldering? A Complete Guide [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://jamindopcba.com/what-is-pcb-wave-soldering/>.

7. Selective Soldering – Everything You Need To Know [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://www.aa-manufacturing.co.uk/blog/selective-soldering-everything-you-need-to-know>).

8. Методичні вказівки з «Технологічні основи електроніки» для студентів спеціальності «Електронні прилади та пристрої» Пайка як метод з'єднання компонентів електронних пристроїв – Київ: ХПІ, 2014. – 11 с.

9. Паяльна станція [Електроннийресурс] – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Soldering\\_station](https://en.wikipedia.org/wiki/Soldering_station).

10. Паяльні станції [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://masteram.com.ua/uk/catalogue/soldering-equipment/soldering-stations/>.

11. Інфрачервоні паяльні станції: переваги технології і знайомство з брендом АСНІ [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://masteram.com.ua/uk/articles-and-video/infrared-rework-stations-technological-benefits-and-achi-brand-review/>.

12. Інфрачервона паяльна станція АСНІ IR-6500 [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://masteram.com.ua/uk/infrared-bga-rework-station-achi-ir-6500/>.

13. Інфрачервона паяльна станція. GSM комплект [Електроннийресурс] – Режим доступу: [https://gsm-komplekt.ua/ua/category/infrakrasnye-pajalnye-stancii/?srsltid=AfmBOopsyk-4uNDCn4DeMJLhQfdid\\_8gZQd3s7z-rw9jOBroVOw0BCD7](https://gsm-komplekt.ua/ua/category/infrakrasnye-pajalnye-stancii/?srsltid=AfmBOopsyk-4uNDCn4DeMJLhQfdid_8gZQd3s7z-rw9jOBroVOw0BCD7).

14. Посібник із безсвинцевого паяння та профілю оплавлення. PCBONLINE [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://www.pcbonline.com/blog/pcb-lead-free-reflow-soldering.html>.

15. Кварцові інфрачервоні обігрівачі QP-1/3 [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://intmax.co/quartz-infrared-heaters/quartz-infrared-heaters-qp1-3/>.

16. Керамічні інфрачервоні нагрівачі. Ten24 [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://ten24.com.ua/ua/catalog/keramicheskie-infrakrasnye-izluchateli/>.

17. Arduino UNO R3 [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>.
18. Thermocouple theory [Електроннийресурс] – Режим доступу: [https://www.pyromation.com/downloads/doc/training\\_tc\\_theory.pdf](https://www.pyromation.com/downloads/doc/training_tc_theory.pdf).
19. Модуль MAX6675 для вимірювання температури до 1024 градусів. 3V3 [Електроннийресурс] – Режим доступу: [https://3v3.com.ua/product\\_7655.html](https://3v3.com.ua/product_7655.html);
20. Вентилятор, кулер для корпуса 120 мм [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://co-di.com.ua/ua/p1128726954-ventilyator-kuler-dlya.html>.
21. Теорія автоматичного управління (збірник задач) [Текст]: навч. посіб. для студентів спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології / І.Ш. Невлюдов, О.В. Токарева; Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків: Панов А.М., 2020. – 240 с.
22. Хімічна безпека ДСНС України [Електроннийресурс] – Режим доступу: <https://dsns.gov.ua/uk/abetka-bezpeki-1/nebezpeki-technogenного-harakteru/ximicna-nebezpeka>.