

Міністерство освіти і науки України

Луцький національний технічний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Факультет комп'ютерних та інформаційних технологій
(повне найменування факультету)

Кафедра електроніки та телекомунікацій
(повне найменування кафедри)

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
ЗА СТУПЕНЕМ ВИЩОЇ ОСВІТИ «МАГІСТР»**

**РОЗРОБКА МІКРОКОНТРОЛЕРНОГО ТЕРМОРЕГУЛЯТОРА
ПАЯЛЬНОЇ СТАНЦІЇ**

**DEVELOPMENT OF A MICROCONTROLLER TEMPERATURE
CONTROLLER FOR A SOLDERING STATION**

спеціальність 171 Електроніка
(шифр і назва спеціальності)

освітня програма «Електроніка»
(назва освітньої програми)

Виконав: здобувач вищої освіти
групи ЕІМ-21
Лотоцький Володимир Ігорович

(підпис)

Керівник: к.т.н., доцент
Приступа Станіслав Олексійович

(підпис)

Кваліфікаційну роботу
допущено до захисту
«05» грудня 2025 р.
Гарант освітньої програми:
к.т.н., доцент
Заблоцький Валентин Юрійович

(підпис)

Луцьк – 2025 року

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет: *комп'ютерних та інформаційних технологій*

Кафедра: *електроніки та телекомунікацій*

Ступінь вищої освіти: *магістр*

Галузь знань: *17 Електроніка, автоматизація та електронні комунікації*

Спеціальність: *171 Електроніка*

Освітня програма: *«Електроніка»*

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

«15» 01 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

Лотоцькому Володимирі Ігоровичу

1. Тема кваліфікаційної роботи: *«Розробка мікроконтролерного терморегулятора паяльної станції»*

Керівник роботи: *к.т.н., доцент Приступа Станіслав Олексійович*

затверджені наказом закладу вищої освіти від «15» січня 2025 р. № 23/01-02

2. Строк подання здобувачем вищої освіти кваліфікаційної роботи: *05.12.2025 р.*

3. Вихідні дані до роботи: *технічна документація на складові елементи проекту; мікроконтролер ATmega328P; робоча напруга 24 В; струм навантаження до 2 А.*

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

Вступ

Розділ 1 Аналітичний огляд інформаційних джерел

Розділ 2 Теоретична частина

Розділ 3 Проектно-конструкторська частина

Розділ 4 Спеціальна частина

Висновки

5. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

10 слайдів презентаційного матеріалу

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис	
		завдання видав	завдання прийняв
Розділ 1 Аналітичний огляд інформаційних джерел	<i>Пристуна С. О.</i>		
Розділ 2 Теоретична частина	<i>Пристуна С. О.</i>		
Розділ 3 Проектно-конструкторська частина	<i>Пристуна С. О.</i>		
Розділ 4 Спеціальна частина	<i>Пристуна С. О.</i>		
Нормоконтроль	<i>Селепина Й. Р.</i>		
Гарант ОП	<i>Заблоцький В. Ю.</i>		
Показник запозичень тексту		_____ %	
Академічна доброчесність	<i>Пристуна С. О.</i>		

7. Дата видачі завдання 15.01.2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Огляд інформаційних джерел по темі кваліфікаційної роботи	<i>До 06.09.2025</i>	
2.	Розділ 1 Аналітичний огляд інформаційних джерел	<i>До 25.09.2025 р.</i>	
3.	Розділ 2 Теоретична частина	<i>До 2.11.2025 р.</i>	
4.	Розділ 3 Проектно-конструкторська частина	<i>До 20.11.2025 р.</i>	
5.	Розділ 4 Спеціальна частина	<i>До 27.11.2025 р.</i>	
6.	Оформлення пояснювальної записки та графічного матеріалу	<i>До 06.11.2025 р.</i>	
7.	Нормоконтроль	<i>До 04.12.2025 р.</i>	
8.	Інструментальна перевірка на академічний плагіат	<i>До 5.12.2025 р.</i>	
9.	Представлення кваліфікаційної роботи до захисту	<i>До 30.12.2025 р.</i>	

Здобувач вищої освіти

(підпис)

Лотоцький В. І.

(прізвище, ініціали)

Керівник кваліфікаційної роботи

(підпис)

Пристуна С. О.

(прізвище, ініціали)

АНОТАЦІЯ

Лотоцький В. І. Розробка мікроконтролерного терморегулятора паяльної станції. Рукопис.

Кваліфікаційна робота магістра ОП «Електроніка» спеціальності 171 Електроніка. Луцький національний технічний університет. Луцьк, 2025. 85 с.

Кваліфікаційна робота магістра складається з вступу, чотирьох розділів, висновку та переліку використаних джерел. У першому розділі роботи проведено аналітичний огляд сучасних інформаційних джерел щодо методів температурного регулювання, законів автоматичного регулювання та схемотехнічного аналізу регулювання температури паяльника.

У другому розділі висвітлено теоретичні основи роботи сучасних паяльних станцій, зокрема теплові характеристики нагрівальних елементів та процеси нагрівання і охолодження жала паяльного інструменту.

У проектно-конструкторській частині запропоновано загальну будову нагрівальних елементів паяльної станції та розроблено електричну принципову схему терморегулятора. Виконано функціональний опис складових частин регулятора та спроектовано друковану плату з урахуванням сучасних програмних платформ.

У спеціальній частині розглянуто способи програмування мікроконтролера ATmega328P, включаючи використання середовищ Arduino та CodeVisionAVR.

Результати дослідження мають практичне значення для створення високоточних паяльних станцій з автоматичним регулюванням температури та застосовуються для вдосконалення схемотехнічних і програмних рішень терморегуляторів.

Ключові слова: паяльна станція, температура, регулювання, мікроконтролер, програмування.

ANNOTATION

Lototsky V. Development of a microcontroller temperature regulator for a soldering station. Manuscript.

Master's qualification work OP «Electronics» specialty 171 Electronics. Lutsk National Technical University. Lutsk, 2025. 85 p.

Master's qualification work consists of an introduction, four chapters, a conclusion and a list of sources used. The first section of the work provides an analytical review of modern information sources on temperature control methods, laws of automatic control and circuit analysis of soldering iron temperature control.

The second section highlights the theoretical foundations of the operation of modern soldering stations, in particular the thermal characteristics of heating elements and the processes of heating and cooling the soldering tool tip.

In the design and construction part, the general structure of the heating elements of the soldering station is proposed and an electrical schematic diagram of the temperature regulator is developed. A functional description of the regulator components was performed and a printed circuit board was designed taking into account modern software platforms.

In a special part, methods of programming the ATmega328P microcontroller are considered, including the use of the Arduino and CodeVisionAVR environments.

The results of the study are of practical importance for the creation of high-precision soldering stations with automatic temperature control and are used to improve the circuit and software solutions of temperature regulators.

Keywords: Soldering Station, Temperature, Control, Microcontroller, Programming.

ЗМІСТ

ВСТУП	7
РОЗДІЛ 1 АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ....	9
1.1 Методи температурного регулювання	9
1.2 Аналіз законів регулювання	12
1.3. Схемотехнічний аналіз регулювання температури паяльника ...	22
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА	29
2.1 Аналіз теплових характеристик та функціонування сучасних паяльних станцій	29
2.2 Процеси нагрівання та охолодження жала паяльного інструменту.....	31
2.3 Фізичні основи нагрівання паяльника індукційним методом	38
2.4 Генерація електромагнітного поля для індукційного нагрівання	41
РОЗДІЛ 3 ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА	45
3.1 Загальна будова нагрівальних елементів паяльної станції	45
3.2 Електрична принципова схема терморегулятора	50
3.3 Функціональний опис складових частин терморегулятора	52
3.4 Створення друкованої плати регулятора	61
РОЗДІЛ 4 СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА	64
4.1 Способи програмування мікроконтролера ATMEGA328	64
4.2 Програмування ATmega328P за допомогою Arduino	65
4.3 Програмування ATmega328P за допомогою CodeVisionAVR	67
ВИСНОВКИ	72
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	72
ДОДАТКИ	75

ВСТУП

У сучасному електронному виробництві, незважаючи на активний розвиток механізованих і автоматизованих технологій паяння, ручні паяльні інструменти залишаються основним засобом для монтажу, ремонту, регулювання та відновлення електронних пристроїв. Саме точність і стабільність температури жала визначають якість паяного з'єднання, надійність компонентів та загальну ефективність технологічного процесу. Аналіз сфери проектування показує достатню складність розроблення паяльних станцій із точним температурним контролем через наявність нестационарних теплових процесів, що супроводжують нагрівання та охолодження інструменту. Тому все більшого поширення набувають мікропроцесорні системи керування, що дозволяють реалізовувати складні алгоритми стабілізації температури, контролювати режими нагрівання, компенсувати теплові втрати та забезпечувати захист від аварійних станів. Мікроконтролер ATmega328P, що використовується в Arduino-платформах, поєднує достатні обчислювальні можливості, широкий набір інтерфейсів і гнучкість програмування у різних середовищах – Arduino IDE, AVRDUDE, ISP-програмування чи CodeVisionAVR. Це робить його придатним для побудови високоточних регуляторів температури паяльних станцій із використанням ПІ або ПІД-алгоритмів.

Тому створення мікроконтролерного терморегулятора паяльної станції є важливим завданням як у науковому, так і в практичному аспектах.

Мета роботи: розробити та реалізувати систему керування температурою паяльної станції на основі мікроконтролера ATmega328P.

Завдання роботи:

1. Провести порівняльний аналіз методів регулювання температури та схемо технічних рішень в напрямку регулювання температури паяльника.
2. Проаналізувати конструктивні особливості інструменту та їх вплив на теплову поведінку інструменту під час реального процесу паяння.
3. Розробити мікроконтролерну систему терморегулювання на базі

ATmega328P з реалізацією ПД-алгоритму, яка забезпечує розширені функціональні можливості паяльної станції та високу точність підтримання заданої температури нагрівачів.

4. Дослідити способи програмування мікроконтролера ATmega328P у середовищі Arduino IDE, зокрема підготовку Arduino як ISP-програмактора, процес запису bootloader та завантаження скетчу через інтерфейс SPI.

Об'єкт дослідження – мікроконтролерний терморегулятор паяльної станції.

Предмет дослідження – методи проектування та алгоритми функціонування мікроконтролерного терморегулятора паяльної станції.

Для виконання окремих розділів кваліфікаційної роботи в процесі дослідження використовувалися різні емпіричні методи такі як порівняння, експеримент, опис, вимірювання.

Наукова новизна роботи полягає в запропонованому комплексному підході до побудови температурного регулятора паяльної станції, який полягає у поєднанні різних методів програмування ATmega328P для підвищення гнучкості та універсальності розробки; використанні цифрового ПД-регулятора з фільтрацією сигналів АЦП та автоматичним контролем аварійних режимів термопари; інтеграції апаратних рішень із програмним алгоритмом управління.

Окремі результати роботи були представлені у тезах доповіді: Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання. XIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». м. Луцьк. ІВВ ЛНТУ, 28 листопада 2025 року. С. 134-137 (додаток А).

РОЗДІЛ 1

АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ІНФОРМАЦІЙНИХ ДЖЕРЕЛ

1.1 Методи температурного регулювання

Температурне регулювання є одним з ключових технологічних процесів у промисловості, енергетиці, електроніці, будівництві, харчових виробництвах та системах життєзабезпечення. Ефективне керування температурою забезпечує стабільність параметрів технологічного середовища, точність виробничих операцій, підвищення енергоефективності та надійності обладнання. У зв'язку з цим розроблення та застосування сучасних методів температурного регулювання має важливе науково-практичне значення.

Температурне регулювання є фундаментальним процесом у технічних системах, де необхідно підтримувати тепловий режим у визначених межах. Ефективність таких систем визначається здатністю керування тепловими потоками та компенсацією зовнішніх і внутрішніх збурень.

Температура об'єкта змінюється згідно з рівнянням теплового балансу [1]:

$$C \frac{dT}{dt} = Q_{in} - Q_{out} + Q_{dist}, \quad (1.1)$$

де C – теплоємність об'єкта;

Q_{in} – підведена теплова потужність;

Q_{out} – тепловтрати;

Q_{dist} – збурення (нагрів зовнішнім середовищем, сонячною радіацією тощо).

Методи регулювання температури можуть бути класифіковані за різними класифікаційними ознаками. Класифікують методи регулювання за типом впливу на пасивні, активні та комбіновані. Пасивні методи ґрунтуються на властивостях матеріалів і конструктивних рішеннях, що забезпечують природний теплообмін без застосування додаткової енергії. До таких методів належать теплоізоляція, використання матеріалів з високою тепловою інерцією, теплові бар'єри, тепловідбивні поверхні та природна вентиляція.

Пасивні підходи особливо ефективні в системах, де допускаються повільні зміни температури та мінімальне обслуговування.

Активні методи реалізують цілеспрямований вплив на тепловий стан об'єкта за допомогою зовнішніх джерел енергії. Найпоширенішими є електричне, індукційне та інфрачервоне нагрівання, циркуляційні системи охолодження, компресійні та абсорбційні холодильні установки, термоелектричні елементи (ефект Пельтьє), а також системи рідинного та повітряного охолодження з примусовою циркуляцією. Активні методи забезпечують високу швидкість та точність регулювання і застосовуються у високотехнологічних виробництвах, електроніці, медицині та авіакосмічній техніці. Електричне нагрівання – найпоширеніший метод, який реалізується у вигляді нагрівальних елементів (резистивних, плівкових, індукційних, інфрачервоних). Найпростіший резистивний нагрів – це «процес виділення теплової енергії в провіднику, крізь який протікає електричний струм» [2]. Його фізична основа описується законом Джоуля–Ленца:

$$Q = I^2 R t, \quad (1.2)$$

де Q – кількість тепла, Дж;

I – сила струму, А;

R – опір провідника, Ом;

t – час, с.

Особливе місце займають комбіновані методи, які поєднують переваги пасивного та активного керування. Вони використовуються в умовах, де необхідно забезпечити стабільність температури при мінімальних енергетичних витратах. Сюди належать інтелектуальні системи керування з адаптивними алгоритмами, рекуперація тепла, використання термостатованих оболонки, а також інтегровані механізми пасивного розсіювання з підтримувальним активним контуром.

При класифікації за способом здійснення керування методи регулювання поділяються на ручні та автоматичні.

Ручне регулювання не передбачає застосування спеціалізованих технічних засобів, здатних підтримувати необхідні параметри процесу без участі оператора. Керуючі дії виконуються користувачем у режимі безпосереднього втручання.

Автоматичне (безперервне) регулювання передбачає використання вимірювальних і виконавчих пристроїв, які у реальному часі визначають поточні значення технологічного параметра (наприклад, температури) та формують відповідний керуючий вплив без участі оператора [3].

Сучасні системи температурного регулювання широко застосовують автоматизовані методи керування, серед яких особливе значення мають ПД-регулятори, нечітка логіка, методи прогнозованого моделювання (MPC) та системи з машинним навчанням. Вони забезпечують оптимізацію енергоспоживання, мінімізацію перехідних процесів і підвищення стабільності роботи обладнання.

Автоматичні системи забезпечують значно вищу точність підтримання встановленого режиму та ефективніше використовують енергоресурси. Обов'язковою умовою реалізації автоматичного термостатування є наявність негативного зворотного зв'язку (НЗЗ) між активними елементами системи та її теплочутливими компонентами. Узагальнена структурна схема термостатування із застосуванням зворотного зв'язку наведена на рисунку 1.1.



Рисунок 1.1 – Узагальнена схема термостатування зі зворотним зв'язком [3]

Розвиток методів температурного регулювання визначається потребами у підвищенні точності, надійності та енергоефективності технологічних процесів. Перспективними напрямками є вдосконалення термоелектричних

технологій, створення матеріалів із керованою теплопровідністю, застосування адаптивних та предиктивних систем керування, а також інтеграція температурних контурів у кіберфізичні системи та «розумні» виробничі комплекси.

1.2 Аналіз законів регулювання

Розглянемо закони регулювання, в тому числі і температури, та пристрої, які ці закони використовують у своєму функціонуванні.

Регулятор – це повнофункціональний апаратний модуль, сконструйований як окремий пристрій, що забезпечує перетворення та обробку сигналів у системі автоматичного регулювання (САР). Він містить вхід для отримання інформації від датчика контрольованої величини, вихід для формування керуючого сигналу, а також інтерфейс взаємодії з оператором (пульт завдання параметрів) або систему обміну з обчислювальним комплексом, який координує перебіг технологічного процесу. До складу регулятора входить обчислювальний блок, що продукує сигнал керування на основі встановленого завдання, виміряного поточного значення та заданого алгоритму обробки.

У загальному випадку регулятор виконує чотири базові функції:

1. Вимірювання – приймання та обробка сигналу від первинного перетворювача.
2. Порівняння – визначення відхилення між поточним значенням та заданою величиною.
3. Обчислення – формування коригувальної дії відповідно до вибраного закону регулювання.
4. Коригування – подання керуючої дії на виконавчий механізм, що є кінцевим елементом САР.

Оскільки вхідний сигнал регулятора відображає динаміку змін контрольованої технологічної змінної, він може набувати різних типових форм: ступінчастої, імпульсної, лінійно-змінної або синусоїдальної. У

промислових умовах вхідні впливи зазвичай є суперпозицією кількох видів сигналів. Вихідний (коригувальний) сигнал регулятора здатний мати аналогічні форми – ступінчасту, імпульсну, лінійно змінну, синусоїдальну або комбіновану. Цей сигнал впливає на регулюючий орган, змінюючи стан об'єкта та, відповідно, значення контрольованої величини.

Форма вихідного сигналу, характер перехідних процесів та якість регулювання визначаються функціональними можливостями регулятора, зокрема обраним законом регулювання, що реалізує відповідний алгоритм динамічної корекції.

Закони регулювання визначають математичні алгоритми, згідно з якими в системах автоматичного регулювання (САР) із керуванням за відхиленням сигнал помилки стеження (відхилення між заданою та поточною величинами) перетворюється у керуючий вплив, що подається на виконавчий механізм або безпосередньо на об'єкт керування.

Для теплотехнічних систем найбільш широке застосування отримали шість базових законів автоматичного регулювання: двопозиційний, (трипозиційний); пропорційний; диференціальний; інтегральний; пропорційно-інтегральний (ПІ); пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД).

Кожен із зазначених алгоритмів має специфічні експлуатаційні властивості, переваги та обмеження, що визначає сферу його оптимального застосування. Вибір конкретного закону регулювання здійснюється з урахуванням динаміки теплового об'єкта, допустимих коливань температури та вимог до точності стабілізації.

У більшості промислових і лабораторних термостатів реалізуються методи двопозиційного або трипозиційного регулювання. Найпростішою є схема двопозиційного регулювання, за якої нагрівальний елемент працює у режимі повного вмикання або повного вимикання. Керування здійснюється таким чином: нагрівач подає номінальну потужність доти, доки фактична температура робочої камери не перевищить задану величину SP на величину гістерезису H . Після цього живлення нагрівача повністю вимикається і знову подається лише тоді, коли температура знижується до значення, що на

величину гістерезису H менше за встановлену температуру SP .

Введення гістерезису є необхідним для уникнення надто частих комутацій силових елементів, що керують роботою нагрівача. Часті перемикання небажані через значні перехідні процеси в електричних колах, які можуть знижувати довговічність та надійність комутаційної апаратури [4].

Процес двопозиційного регулювання має автоколивальний характер: як у перехідному, так і в усталеному режимі контрольована величина періодично відхиляється від заданого значення (рис. 1.2). Іншими словами, вимірювана величина (X) демонструє стійкі незатухаючі коливання.

Основними параметрами автоколивального режиму є амплітуда автоколивань A_k та період автоколивань T_k .

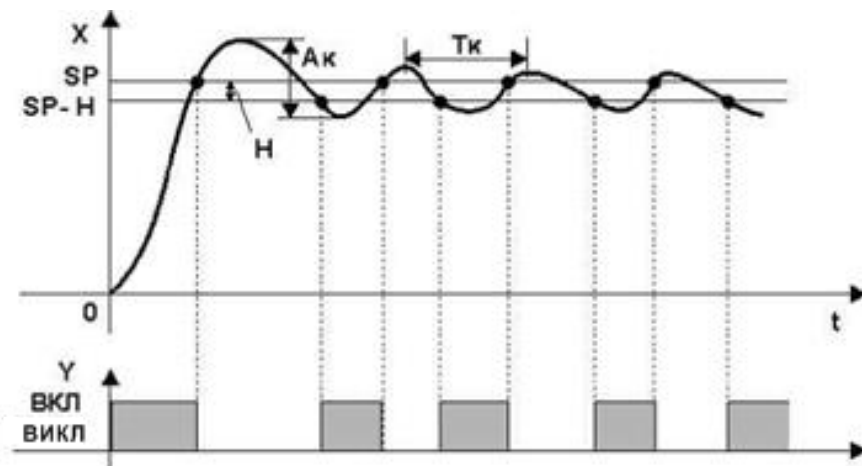


Рисунок 1.2 – Процес регулювання температури за 2-х позиційним законом [4]

Як показано на рисунку 1.2, збільшення величини гістерезису, регульованого параметра двопозиційної системи, призводить до зменшення частоти комутацій нагрівача. Це позитивно позначається на ресурсі та надійності комутаційних елементів. Однак одночасно зростає амплітуда температурних коливань у робочому об'ємі, що погіршує точність підтримання заданої температури.

Основним недоліком двопозиційного регулювання є значне відхилення фактичної температури від заданої, спричинене як величиною гістерезису, так і тепловою інерційністю нагрівального елемента. До його переваг належить максимально швидке нарощування температури до рівня, близького до

встановленого значення.

Трипозиційне регулювання передбачає наявність двох незалежних каналів керування, які, залежно від їх комбінації, забезпечують різні рівні теплової потужності нагрівача. У системі задаються дві температурні межі, що відрізняються на певну величину (рис. 1.3). Якщо поточна температура X нижча за обидві межові величини, активними є обидва канали, що забезпечує максимальну потужність нагрівання. Коли температура X потрапляє в допустимий інтервал, один із каналів вимикається, і таким чином потужність зменшується до середнього рівня. Після перевищення заданої температури SP обидва канали вимикаються.

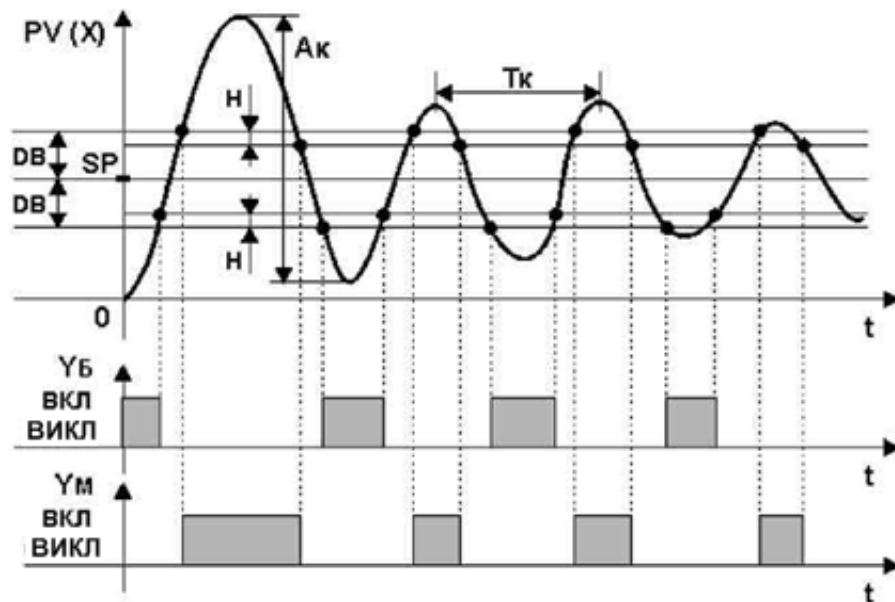


Рисунок 1.3 – Процес регулювання за трипозиційним законом [4]

Такий підхід забезпечує більш плавний, хоча й повільніший вихід системи на робочий режим, а також зменшує амплітуду коливань температури поблизу $T_{зад}$ у порівнянні з двопозиційним керуванням.

Зазначені методи регулювання ефективні у високінерційних системах, де температура змінюється повільно через значну теплоємність об'єкта термостатування або середовища, в яке він занурений, і де не висуваються жорсткі вимоги до високоточної стабілізації температури.

Пропорційний закон регулювання формує керуючий сигнал,

пропорційній величині відхилення між заданим та фактичним значенням:

$$u(t) = K_p \cdot e(t), \quad (1.3)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал;

$e(t)$ – сигнал відхилення;

K_p – коефіцієнт підсилення пропорційної ланки.

Характерні властивості П-регулятора:

- швидка реакція на зміну керованої величини;
- відносна простота реалізації;
- наявність сталого статичного відхилення, яке неможливо повністю усунути лише пропорційною дією;
- потенційний ризик перерегулювання при надмірно великому K_p .

П-регулятор застосовується в системах, де точність підтримання параметра не є критичною або допускається невелике стале відхилення.

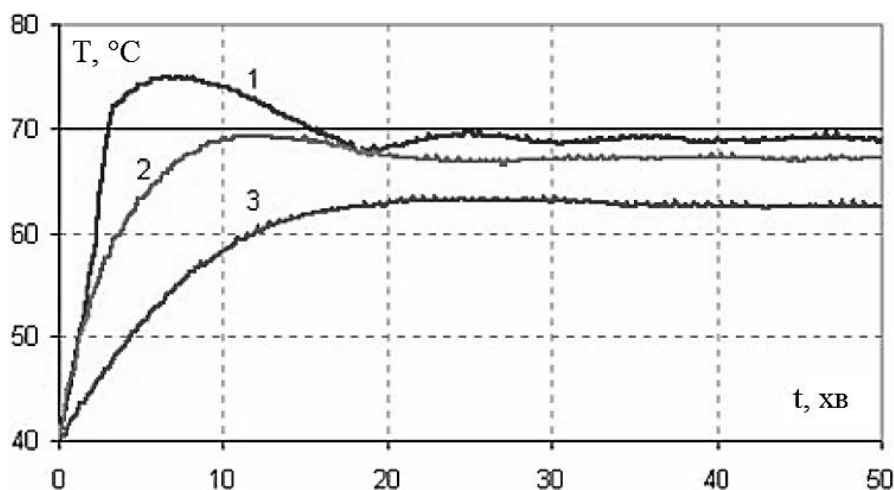
Пропорційний метод регулювання ґрунтується на плавній зміні потужності нагрівача в міру наближення температури до заданої. У кожний момент часу потужність, що подається на нагрівальний елемент, є пропорційною різниці між заданою температурою $T_{зад}$ та поточною температурою $T_{пот}$:

$$u(t) = K_p \cdot (T_{зад} - T_{пот}). \quad (1.4)$$

Фізичний зміст пропорційного коефіцієнта полягає в тому, що він визначає ширину зони пропорційності – температурного діапазону, у межах якого здійснюється плавне, пропорційне зменшення потужності, що підводиться до нагрівального елемента. За межами цього інтервалу керуючий пристрій подає на нагрівач повну потужність, забезпечуючи максимальну швидкість нагрівання об'єкта.

На рисунку 1.4 представлено приклад роботи пропорційного регулятора для трьох різних значень пропорційного коефіцієнта K_p . Зміна K_p впливає на

ширину зони пропорційності: зі збільшенням коефіцієнта зона звужується, що призводить до зменшення регулюючого впливу поблизу заданої температури, тоді як менші значення K_p формують широку зону пропорційності та забезпечують більш м'який характер виходу системи на режим стабілізації.



Рисунк 1.4 – Пропорційний метод регулювання температури (1. $K_p = 9$; 2. $K_p = 27$; 3. $K_p = 90$ °C) [4]

Аналіз графічних залежностей, наведених на рисунку 1.4, дає підстави стверджувати, що зі збільшенням коефіцієнта пропорційності K_p розширюється зона пропорційного регулювання. Це забезпечує більш плавний характер підстроювання температури в околі заданого значення $T_{зад}$. Однак значне зростання K_p призводить до суттєвого зниження підводимої потужності при наближенні температури до заданої, що може унеможливити досягнення $T_{зад}$.

Причина полягає в тому, що теплова потужність, яку система розсіює в навколишнє середовище, з підвищенням її температури зростає за логарифмічною залежністю. У певний момент ця потужність перевищує потужність нагрівача, що обмежує подальше підвищення температури. Одним із методів компенсації цього ефекту є введення постійної складової потужності P_0 , значення якої визначають відповідно до вимог конкретного застосування. Проте на практиці зазвичай прагнуть до мінімізації зони пропорційності, оскільки плавний вихід на $T_{зад}$ не завжди є технологічно

необхідним.

Пропорційний метод дає змогу значно зменшити амплітуду температурних коливань поблизу встановленої температури порівняно з позиційними методами регулювання, але при цьому збільшується час виходу системи на режим.

Інтегральний закон регулювання ґрунтується на тому, що регулювальна дія пропорційна інтегралу від сигналу відхилення за часом, тобто враховує як величину відхилення, так і тривалість його існування. Таким чином, вплив регулятора продовжується доти, доки відхилення не буде повністю усунуте:

$$u(t) = K_I \int_0^t e(t) dt, \quad (1.5)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал;

$e(t)$ – сигнал відхилення (різниця між заданим та фактичним значенням);

K_I – коефіцієнт інтегральної дії.

Інтегральний метод практично завжди реалізується у поєднанні з пропорційною складовою. У цьому випадку вихідний сигнал формується як сума пропорційної компоненти та інтегральної, що відображає накопичену інтегральну суму похибки.

На рисунку 1.5 подано часові епюри відхилення, вихідного сигналу регулятора та стану каналу керування. Аналіз наведених залежностей показує, що за відсутності відхилення вихідний сигнал дорівнює нулю, а регулювальний канал перебуває у вимкненому стані. З появою відхилення в керуючому каналі виникають імпульси, тривалість яких є пропорційною величині цього відхилення. Подальше зростання імпульсів зумовлене накопиченням інтегральної складової (позначеної затемненою ділянкою), величина якої залежить від вибраної сталої часу інтегрування.

Основною перевагою інтегрального методу регулювання є забезпечення високої точності стабілізації керованої температури, оскільки інтегральна складова повністю компенсує статичну похибку. Водночас суттєвим недоліком цього методу є найбільша тривалість виходу системи на

встановлений режим серед усіх розглянутих законів регулювання.

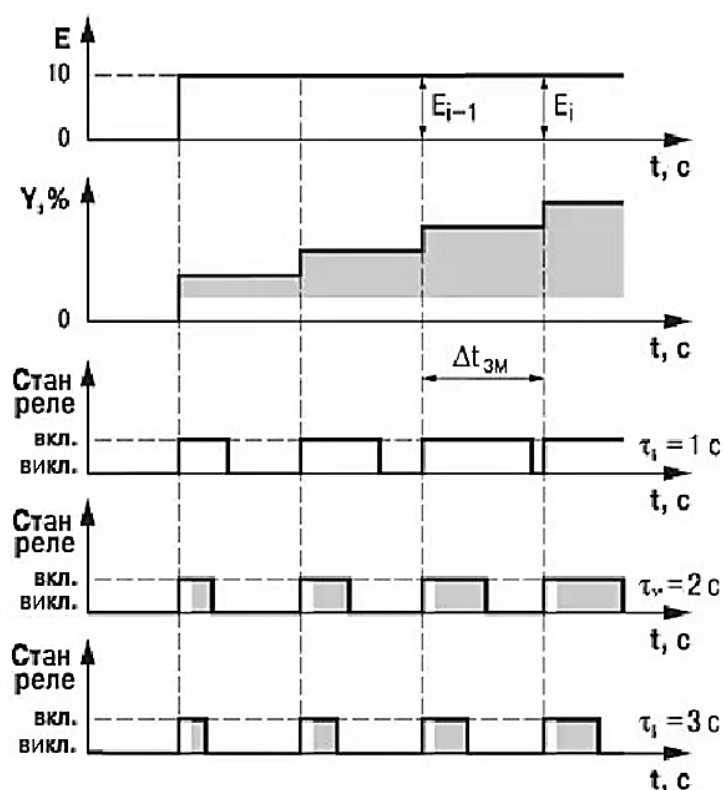


Рисунок 1.5 – Епюри вихідних сигналів і відхилень [4]

Метод пропорційно-диференціального (ПД) регулювання ґрунтується на прогнозуванні подальшої величини відхилення на основі аналізу зміни похибки у часі. Різниця між поточним та попереднім значеннями відхилення дає змогу оцінити швидкість його зміни, яка й формує диференціальну складову регулювального впливу. Ця складова створює пропорційний за величиною коригувальний вплив, спрямований на випереджувальну компенсацію зростання похибки.

В результаті миттєве значення підведеної до нагрівача потужності у момент часу t визначається як сума пропорційної та диференціальної складових:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}, \quad (1.6)$$

де $u(t)$ – керуючий сигнал;

$e(t)$ – сигнал відхилення (різниця між заданим та фактичним значенням);

K_p – коефіцієнт пропорційності;

K_d – коефіцієнт диференціювання.

Перевагою даного методу є висока швидкодія, оскільки регулятор формує керувальну дію не лише на основі поточної величини відхилення, але й з урахуванням швидкості зміни цього відхилення. Завдяки цьому система здатна оперативно реагувати на динамічні зміни зовнішніх умов. Однак суттєвим недоліком є порівняно низька точність стабілізації та підвищена чутливість до шумів. Останні проявляються у вигляді малих, але небажаних коливань вихідних параметрів, що зумовлені як інструментальною похибкою давачів, так і короткочасними імпульсними збуреннями з боку оточення. В окремих випадках така чутливість може потребувати застосування фільтрації сигналів або зменшення ваги диференціальної складової.

Пропорційно-інтегрально-диференціальне (ПІД) регулювання являє собою метод, у якому на програмному рівні здійснюється обчислення та сумування трьох компонент керування – пропорційної, інтегральної та диференціальної. Реалізація цього алгоритму забезпечується ПІД-контролером (рис. 1.6). Такий підхід дозволяє гнучко формувати керувальний сигнал, оптимізуючи як швидкість реакції системи, так і точність досягнення встановленого значення:

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + \int_0^t e(t)dt + K_d \cdot \frac{de(t)}{dt}. \quad (1.7)$$

Основна перевага ПІД-регулювання перед суто пропорційним методом полягає в тому, що потужність нагрівача визначається комплексно: диференціальна складова враховує швидкість зміни температури, дозволяючи завчасно пригнічувати майбутні відхилення, тоді як інтегральна складова компенсує накопичені систематичні помилки, усуваючи сталу складову відхилення. У результаті формується середнє значення потужності, яке з високою точністю відповідає потребам термостатованого об'єкта. Це забезпечує поступове та гарантоване наближення середньої температури до

заданого значення T_3 [4].

Додатково варто зазначити, що коректне налаштування коефіцієнтів П-, І- та Д-складових істотно впливає на якість регулювання. Неправильний вибір параметрів може призвести до коливань, затягування перехідного процесу або навіть втрати стійкості системи, що потребує застосування процедур автоматичного або напівавтоматичного тюнінгу ПД-контролера.

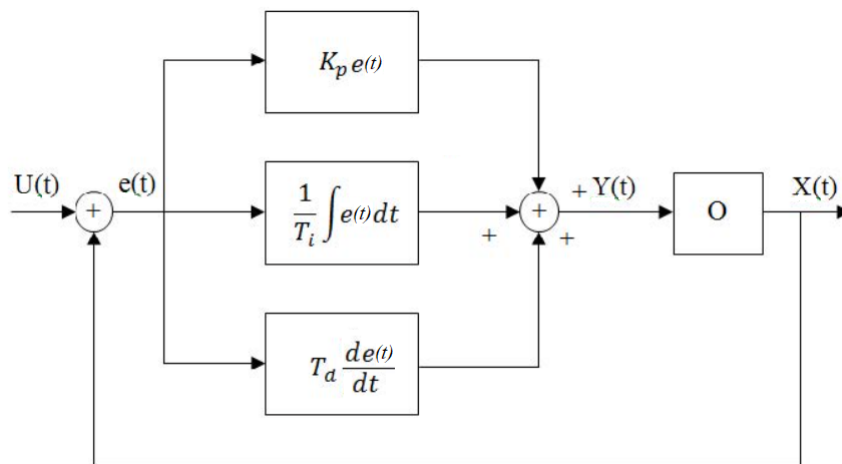


Рисунок 1.6 – Блок схема ПД регулятора [4]

На рисунку 1.7 представлено приклад температурного регулювання об'єкта в процесі термостабілізації за різних значень коефіцієнтів K_p , K_i та K_d . Крива 1 відображає реакцію системи за умови використання оптимально підібраних параметрів ПД-регулятора, які забезпечують мінімальне перерегулювання та найкоротший час досягнення заданої температури $T_{зад}$.

Крива 2 демонструє результат зміненої (завищеної або некоректно налаштованої) диференціальної складової, що призводить до суттєвого збільшення перерегулювання та подовження часу виходу на $T_{зад}$. Це пояснюється тим, що амплітуда перерегулювань і величина загасання коливань прямо залежать від швидкості реакції системи на відхилення сигналу [4].

Крива 3, аналогічно до кривої 2, відповідає режиму без урахування диференціальної складової. Однак у цьому випадку збільшення пропорційного коефіцієнта, а отже і ширини пропорційної зони, забезпечує більш згладжений та стабільний вихід на температуру $T_{зад}$.

До основних показників, що визначають якість процесу регулювання, належать величина неузгодженості, перерегулювання, час наростання, тривалість перехідного процесу та ступінь загасання коливань [4].

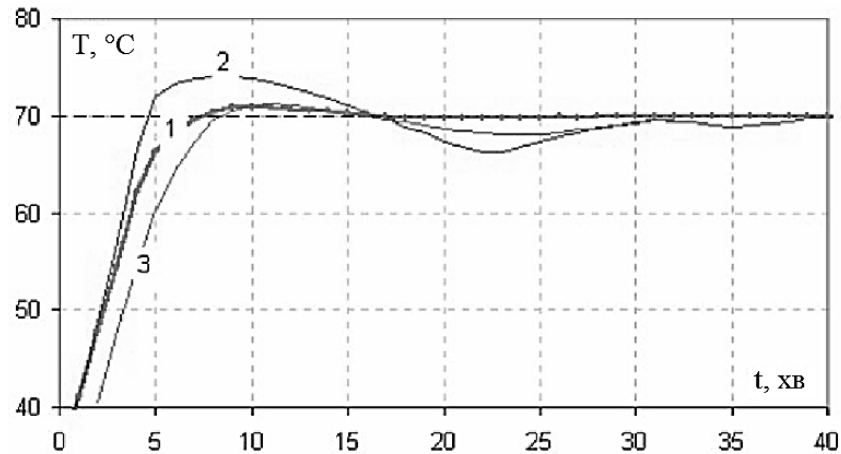


Рисунок 1.7 – Приклад термостабілізації об'єкта за часом методом ПІД регулювання (1: $K_p = 9$, $K_i = 600$, $K_d = 100$, $KZ = 13\%$; 2: $K_p = 9$, $K_i = 600$, $K_d = 0$, $KZ = 13\%$; 3: $K_p = 27$, $K_i = 600$, $K_d = 0$, $KZ = 13\%$) [4]

Сфера застосування ПІД-регуляторів охоплює високоточні системи автоматичного керування, зокрема термостатичні прилади, що забезпечують стабілізацію температури з високою точністю (похибка підтримання $\Delta T \approx 0,1^\circ\text{C}$). Застосування таких регуляторів дає змогу ефективно компенсувати зовнішні та внутрішні збурення, забезпечуючи високий рівень стабільності параметрів.

Водночас суттєвим недоліком ПІД-методу є його порівняно складна практична реалізація, що передбачає використання обчислювальних засобів та відповідних алгоритмів цифрової обробки сигналів. Це зумовлює необхідність застосування мікроконтролерів або інших елементів сучасної обчислювальної техніки для коректного функціонування регулятора.

1.3 Схемотехнічний аналіз регулювання температури паяльника

Для отримання якісного паяного з'єднання необхідно коректно вибрати потужність паяльного обладнання та забезпечити відповідний температурний

режим жала, який визначається маркою та температурою плавлення застосовуваного припою.

Регулятор потужності паяльника може бути реалізований за різними електричними схемами, кожна з яких має свої конструктивні та функціональні особливості. Розглянемо типові схемотехнічні рішення регулювання температури паяльника.

Регулятор з обмеженням потужності на основі тиристора забезпечує можливість плавного регулювання температури паяльника в діапазоні від 50 до 100 % номінальної потужності. Для розширення робочого діапазону до повного шкалювання (0...100 %) до схеми доцільно додати діодний міст. Принцип побудови регуляторів на тиристорі та симісторі є аналогічним і відрізняється переважно типом силового елемента. Тиристори малої потужності є недорогими та компактними, що робить їх зручними для використання у побутових і малогабаритних пристроях. Водночас вони характеризуються підвищеною чутливістю до керувальних сигналів. Формування цих сигналів зазвичай здійснюється за допомогою змінного резистора та конденсатора. Застосування таких тиристорних регуляторів доцільне для обладнання з потужністю до 40 Вт (рис. 1.8).

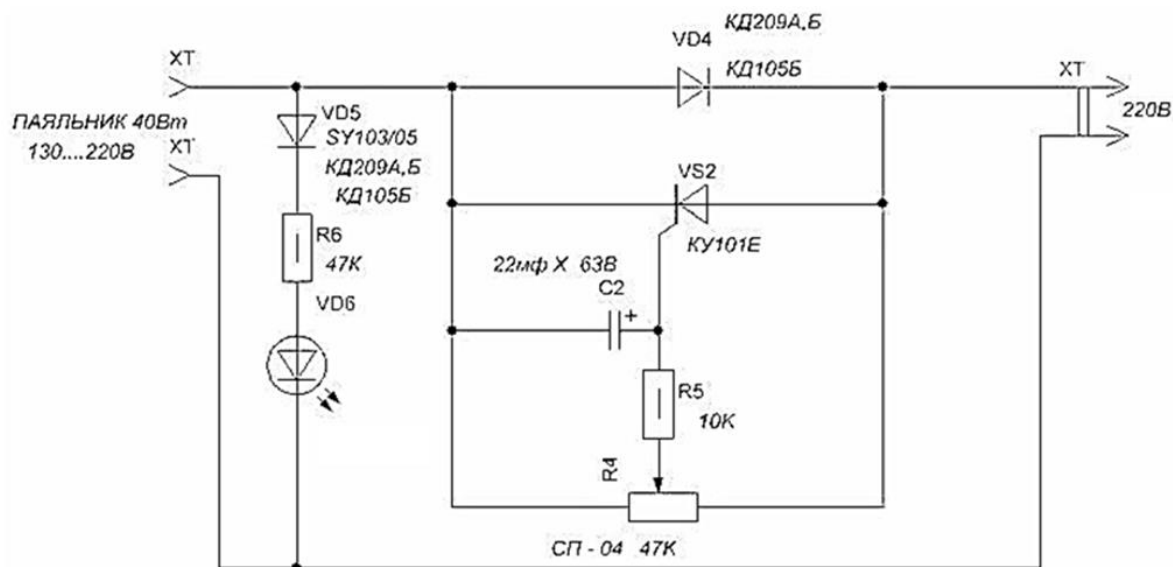


Рисунок 1.8 – Схема регулювання температури паяльника з малопотужним тиристором [5]

Такий тип регулятора не потребує встановлення додаткових елементів охолодження.

Схема, реалізована на тиристорі в поєднанні з діодним мостом (рис. 1.9), забезпечує можливість плавного керування вихідною потужністю в повному діапазоні – від 0 до 100 %. Конструкція пристрою є достатньо простою, оскільки для його роботи використовується мінімальна кількість радіоелементів.

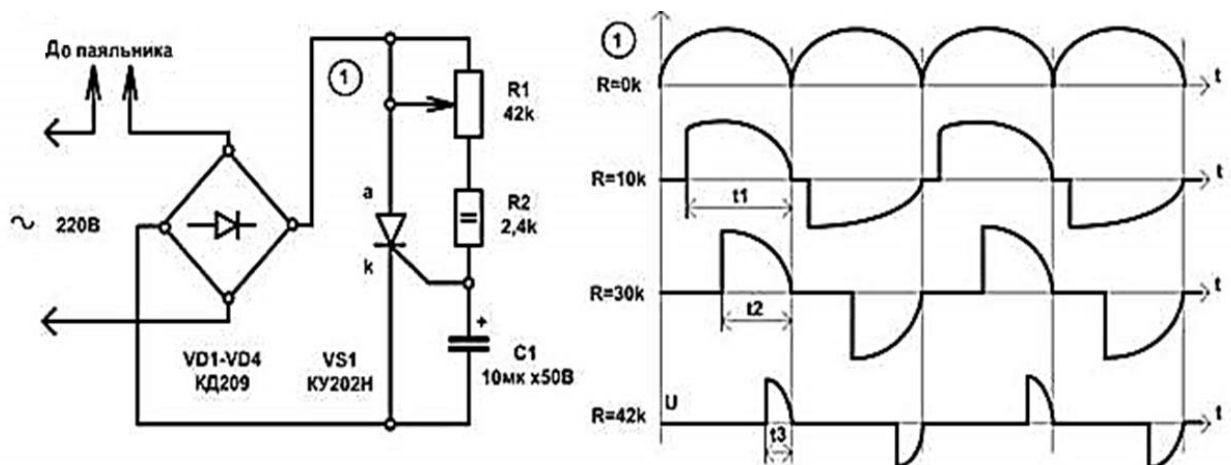


Рисунок 1.9 – Схема регулювання температури паяльника з тиристором і діодним мостом [5]

Розглянемо схему регулятора на основі симістора (рис. 1.10). Симістори, на відміну від тиристорів, можуть працювати не лише в колах постійного струму, але й у колах змінного струму. Це є їх основною відмінністю. Симістор функціонує в ключовому режимі – він може перебувати або у відкритому, або у закритому стані. Для відкривання основного переходу А1–А2 на керувальний електрод G необхідно подати напругу величиною приблизно 2...5 В відносно виводу А1. Після цього симістор переходить у відкритий стан і не закриється, доки напруга між виводами А1–А2 не зменшиться до нуля.

Робота схеми симісторного регулятора потужності відбувається таким чином. Синусоїдальна мережна напруга подається через навантаження (наприклад, лампу розжарювання або нагрівач паяльника) на вивід А1 симістора VS2 та один з виводів резистора R2. Якщо повзунок змінного

резистора R2 установлений у крайнє лівє положення, його опір практично дорівнює нулю, і конденсатор C1 починає швидко заряджатися з моменту зростання напруги мережі. Коли напруга на C1 досягає приблизно 30 В, відбувається пробій діністора VS1, і імпульс струму надходить на керувальний електрод G симістора VS2, що спричиняє відкриття переходу A1–A2.

Під час повертання ручки змінного резистора R2 його опір збільшується, що зменшує струм заряду конденсатора C1. Для досягнення порогової напруги 30 В потрібен більший час, тому відкриття симістора відбувається із затримкою. Чим більше значення опору R2, тим довшим буде період заряду C1 і тим пізніше у кожному напівперіоді симістор відкриватиметься. Унаслідок цього навантаження отримує меншу середню потужність.

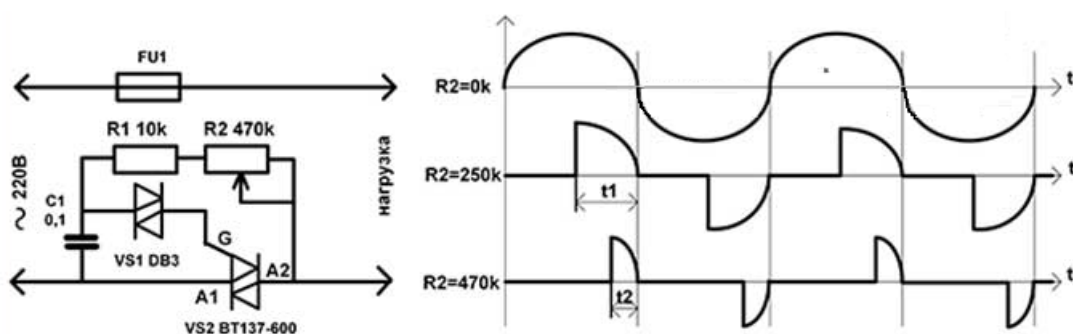


Рисунок 1.10 – Схема регулювання температури паяльника на симісторі [6]

Схема регулятора на симісторі з діодним мостом (рис. 1.11) є конструктивно нескладною, водночас забезпечує широкі можливості зміни потужності навантаження.

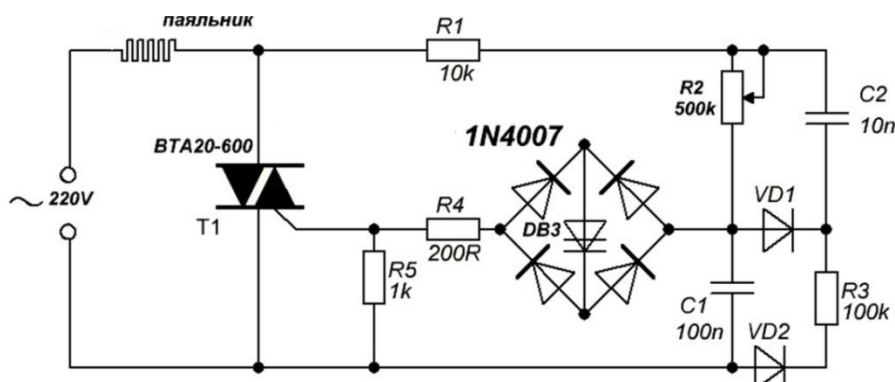


Рисунок 1.11 – Регулятор на симісторі з діодним мостом [6]

За потужності навантаження понад 60 Вт доцільно встановлювати симістор на радіатор для ефективного відведення тепла. За менших потужностей додаткове охолодження, як правило, не потрібне.

Розглянемо схему регулювання температури паяльника з мікросхемами (рис. 1.12).

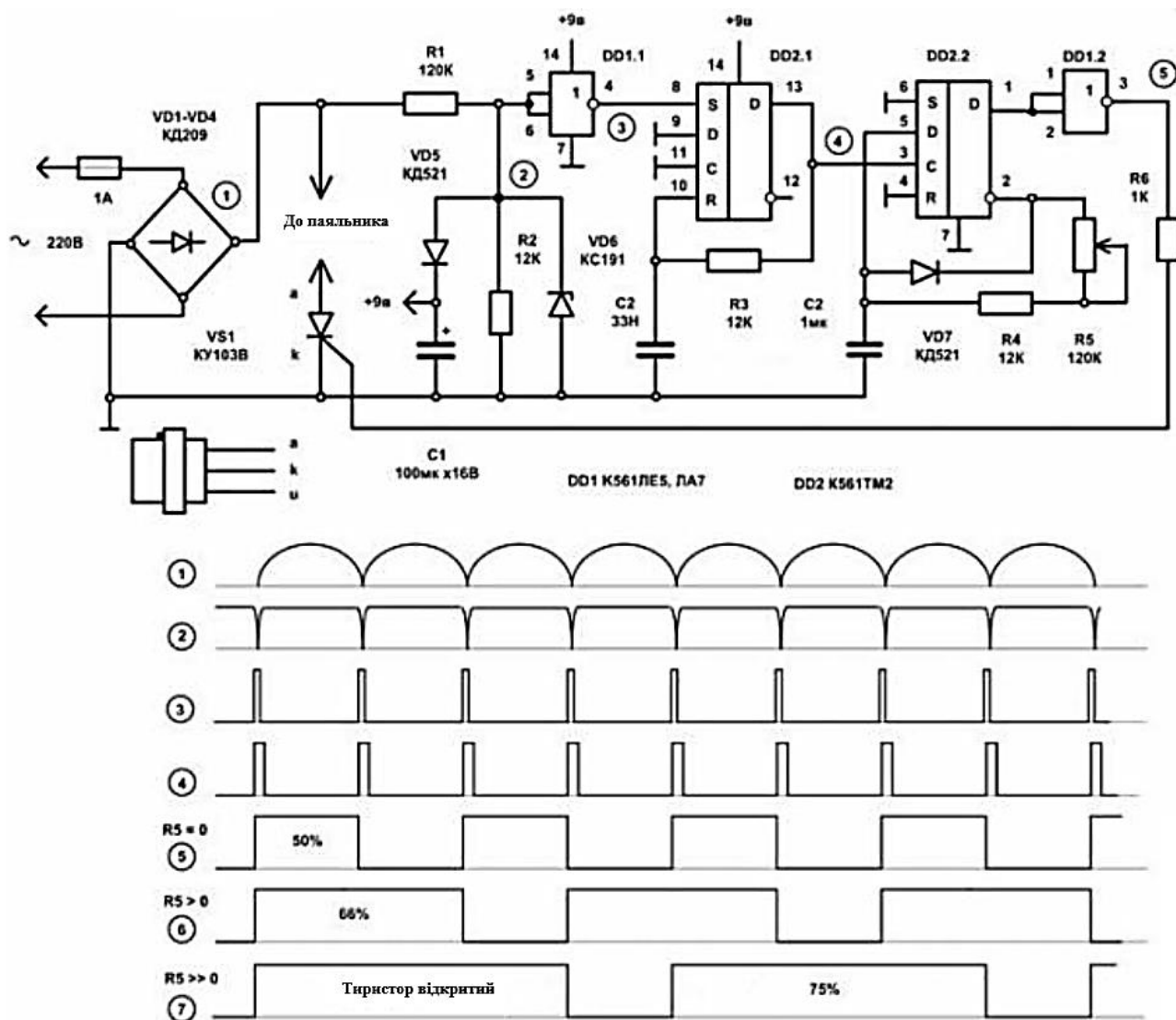


Рисунок 1.12 – Схема регулювання температури паяльника на основі мікросхеми [7]

Робота схеми регулювання температури відбувається таким чином. Напряга мережі живлення випрямляється діодним мостом VD1–VD4. У результаті синусоїдальна напруга перетворюється на пульсуючу постійну, амплітуда якої змінюється за законом половинної синусоїди з частотою 100 Гц (діаграма 1). Далі струм проходить через обмежувальний резистор R1 до

стабілітрона VD6, де напруга стабілізується на рівні близько 9 В та набуває іншої форми (діаграма 2). Ці імпульси через діод VD5 заряджають електролітичний конденсатор C1, формуючи напругу живлення приблизно 9 В для мікросхем DD1 і DD2. Резистор R2 виконує захисну функцію – обмежує максимальну напругу на VD5 і VD6 до 22 В та одночасно забезпечує формування тактових імпульсів для роботи вузла.

Сигнал, сформований на R1, подається також на виводи 5 і 6 елемента 2I-АБО-НІ цифрової логічної мікросхеми DD1.1, яка інвертує вхідний сигнал та перетворює його на короткі прямокутні імпульси (діаграма 3). З виводу 4 DD1 ці імпульси надходять на вивід 8 D-тригера DD2.1, що працює в режимі RS-тригера. Елемент DD2.1 також виконує функції інвертування та формування форми сигналу (діаграма 4). Важливо зазначити: сигнали на діаграмах 2 та 4 майже ідентичні, тому теоретично сигнал після R1 можна було б подавати безпосередньо на вивід 5 DD2.1. Проте експериментально встановлено, що сигнал після R1 містить значні мережеві завади, і без подвійного формування схема працювала нестабільно. Використання додаткових LC-фільтрів недоцільне за умови наявності вільних логічних елементів.

На тригері DD2.2 реалізовано схему керування температурним регулятором паяльника. Прямокутні імпульси з виводу 13 DD2.1 подаються на вивід 3 DD2.2 і позитивним фронтом переписують на вивід 1 логічний рівень, присутній у цей момент на вході D (вивід 5). На виводі 2 формується сигнал протилежної полярності. Розглянемо роботу DD2.2 докладніше. Якщо на виводі 2 встановлено логічну одиницю, то через резистори R4 і R5 конденсатор C2 заряджається до напруги живлення. Після появи першого імпульсу з позитивним перепадом на виводі 2 встановлюється логічний нуль, а конденсатор C2 швидко розряджається через діод VD7. Наступний імпульс з позитивним фронтом знову встановлює логічну одиницю на виводі 2 і C2 починає заряджатися. Тривалість заряджання визначається сталою часу $R5 \cdot C2$: що більший опір R5, то більший час заряджання. Поки C2 не досягне половини напруги живлення, на виводі 5 зберігається логічний нуль, і

позитивні фронти на вході 3 не змінюють стан виводу 2. Після повного заряджання процес повторюється.

Таким чином, через DD2.2 пропускається лише та кількість імпульсів мережевої частоти, яка визначається номіналом R5. Важливо, що фронти цих імпульсів відповідають моментам переходу напруги мережі через нуль, що забезпечує відсутність радіоперешкод під час роботи регулятора температури.

Імпульси з виводу 1 мікросхеми DD2.2 подаються на інвертор DD1.2, який запобігає впливу тиристора VS1 на роботу DD2.2. Резистор R6 обмежує струм керування тиристором. При надходженні позитивного потенціалу на керуючий електрод VS1 тиристор відкривається, і на паяльник подається напруга живлення. Схема забезпечує регулювання потужності нагрівача в діапазоні 50...99%. Незважаючи на те, що R5 є змінним резистором, регулювання температури, що формується DD2.2, має ступінчастий характер. За $R5 = 0$ забезпечується рівень потужності 50% (діаграма 5), при певному повороті – 66% (діаграма 6), ще далі – 75% (діаграма 7). Тобто, чим ближча робоча потужність до номінальної для конкретного паяльника, тим плавніше відбувається регулювання, що дозволяє точно встановити температуру жала. Наприклад, для паяльника потужністю 40 Вт можливе регулювання в межах від 20 до 40 Вт.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНА ЧАСТИНА

2.1 Аналіз теплових характеристик та функціонування сучасних паяльних станцій

Незважаючи на широке впровадження механізованих та автоматизованих технологій паяння, ручний паяльний інструмент залишається необхідним у дослідному виробництві, під час ремонтних робіт, налаштування та регулювання електронних пристроїв [8-11]. Останніми роками поряд із традиційними паяльниками без системи терморегулювання значного поширення набули паяльники з вбудованими терморегуляторами, паяльні станції іноземного виробництва, а також спеціалізовані напівавтомати та автомати для контактного паяння. Розглянемо паяльний інструмент для контактного паяння провідних виробників та проаналізуємо питання, пов'язані з тепловими процесами, що визначають якість паяних з'єднань, а також впливають на продуктивність монтажного інструменту та обладнання.

Згідно з [9], паяльні станції ERSA забезпечують значний запас потужності, що дає змогу швидко компенсувати теплові втрати у зоні паяння та стабілізувати температуру під час роботи з масивними елементами. Висока швидкість термокомпенсації обумовлена двома чинниками: перший – керамічні нагрівальні елементи здатні передавати утричі більшу потужність порівняно з ніхромовими; другий – у кінцевій частині нових жал ERSA використовується срібло, що підвищує швидкість теплопередачі. Основу жала становить гальванічна мідь, покрита шаром заліза, що збільшує його ресурс (рис. 2.1). Робоча частина жала попередньо залужена. У паяльно-ремонтних операціях широко застосовуються термопінцети та мікропаяльники з жалами діаметром до 0,2 мм.

У технічних описах обладнання Weller [10] зазначено, що температура на робочому жалі серії Temtronic контролюється автоматично з максимальною температурою 450 °С та допустимим відхиленням $\pm 2\%$. Мікропаяльник MLR 21 потужністю 25 Вт придатний для більшості операцій мініатюрного

паяння, тоді як 80-ватний LR 82 призначений для роботи з масивними компонентами. Наконечники виготовляються з чистої міді, що забезпечує ефективну теплопередачу.

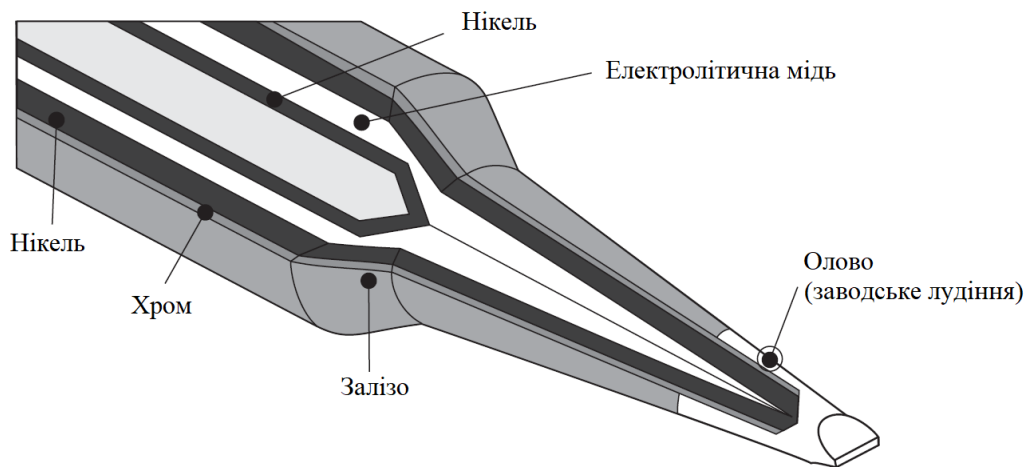


Рисунок 2.1 – Жало фірми ERSA для паяльних станцій із внутрішнім розігрівом [9]

Компанія Раса застосовує класичний обмотувальний нагрівач на мідному сердечнику, із використанням високопровідних ізоляційних матеріалів. Наконечник фіксується бічним гвинтом, що забезпечує щільний контакт з нагрівачем на всій довжині. Для підвищення теплопровідності та ресурсу наконечники Раса виготовляються з міді, очищеної від кисню, та захищені багатошаровим покриттям із заліза, хрому та нікелю [11].

Паяльні жала станцій НАККО кріпляться на нагрівач зовні та фіксуються гільзою і гайкою, що забезпечує надійний тепловий контакт. Стрижневий нагрівач підвищує ККД та швидкість розігріву. Основу жала складає чиста мідь, захищена 300-мікронним шаром заліза. Жала можуть мати робочий радіус 0,1...0,2 мм. Температурна стабільність станцій моделей 936, 937 і 928 становить 0,5 °С у режимі холостого ходу [8]. На рисунку 2.2 наведено характеристику нагріву станції НАККО 941, згідно з якою досягнення температури 400 °С відбувається за 28 с. Потужність паяльника станції НАККО 931 становить 90 Вт, що втричі скорочує час виходу на робочу температуру порівняно зі звичайними паяльниками [8].

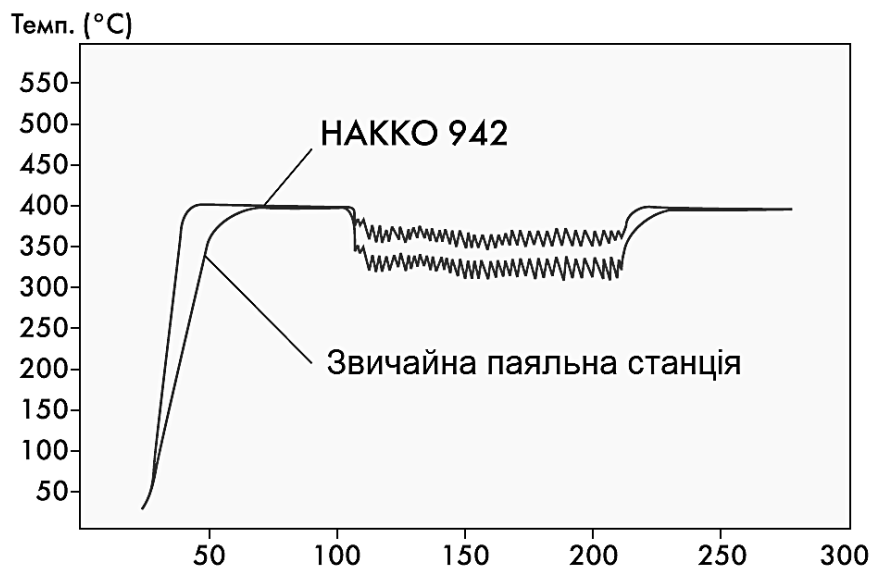


Рисунок 2.2 – Зміна температури паяльної станції НАККО 942 в режимі розігріву та багаторазового паяння [8]

Проведений огляд сучасних паяльних станцій показав, що:

- покази термодавача паяльної станції не відповідають температурі робочого кінця жала; різниця може становити десятки градусів і повинна враховуватися в технологічних процесах;
- виробники підкреслюють короткий час розігріву інструменту (менше 20 с), однак не деталізують механізми теплопередачі;
- використання широкої номенклатури наконечників не супроводжується описом впливу геометричних та матеріальних параметрів на теплову поведінку інструменту;
- виробники вказують похибку підтримання температури в режимі «холостого ходу», проте не подають даних про точність у реальних умовах паяння.

2.2 Процеси нагрівання та охолодження жала паяльного інструменту

Серед усіх експлуатаційних вимог, що висуваються до паяльного інструменту (зручність та легкість у роботі, простота обслуговування і ремонту, економічність, довговічність, ергономічність тощо), ключовою є

вимога забезпечення стабільного та заданого температурного режиму паяння. Відомо, що потужність паяльника та його теплоємність мають відповідати середньому теплопоглинанню під час багаторазового паяння; за порушення цієї відповідності доводиться обмежувати кількість послідовних операцій, щоб уникнути виходу за нижню межу теплової зони та забезпечити необхідну стабільність процесу.

Таким чином, дослідження нестационарних теплових процесів у паяльному інструменті є актуальним завданням, оскільки від їх особливостей залежить якість паяних з'єднань та надійність електронних приладів.

Для розроблення паяльного інструменту з покращеними теплотехнічними характеристиками необхідно встановити залежності цих характеристик від конструктивних параметрів.

Водночас слід зазначити, що математична складність теоретичних моделей не гарантує їх точності або практичної доцільності. Надмірне ускладнення моделі може відволікати увагу від фізичної сутності явища, ускладнювати аналіз та інтерпретацію результатів. З огляду на це доцільно використати низку припущень, що спрощують опис процесів та дозволяють отримати розрахункові співвідношення, які забезпечують задовільну відповідність реальним умовам:

- температура паяльника t ($^{\circ}\text{C}$) приймається однаковою в усьому об'ємі, включаючи його поверхню;
- коефіцієнт теплообміну α' ($\text{Вт}/^{\circ}\text{C}\cdot\text{см}^2$) між поверхнею інструменту та навколишнім середовищем вважається сталим;
- температура навколишнього повітря приймається постійною.

Температурні значення подаються відносно температури навколишнього повітря, тобто у вигляді надлишкових температур. Запропонована модель, яка ґрунтується на суттєвому спрощенні задачі нестационарного теплообміну складного теплотехнічного об'єкта, забезпечує достатньо коректний опис основних теплових режимів паяльного інструменту (рис. 2.3). Зокрема, вона адекватно відтворює процес його розігріву до температури холостого ходу (крива 1), подальше охолодження під час багаторазових операцій паяння

(крива 2), наступний етап розігріву після теплового навантаження (крива 3), а також охолодження після вимкнення живлення (крива 4):

$$t = t_{xx}(1 - e^{-\tau/\tau_0}), \quad (2.1)$$

де t_{xx} – температура (°C) режиму, що встановився (холостого ходу), при якому пайка не виробляється, а кількість тепла, що виділяється обмоткою нагрівача паяльного інструменту і розсіяного в атмосферу, рівні:

$$t_{xx} = \frac{P}{\alpha' \cdot S_n}, \quad (2.2)$$

де α' – коефіцієнт теплообміну (Вт/(САСм²)) між поверхнею паяльного інструменту та навколишнім середовищем;

τ – час (с);

S_n – площа поверхні нагрітої частини паяльного інструменту (см²);

τ_0 – постійна години розігріву (охолодження) паяльного інструменту (с):

$$\tau_0 = \frac{C_n}{\alpha' \cdot S}, \quad (2.3)$$

де C_n – теплоємність нагрітої частини паяльного інструменту (Дж/°С).

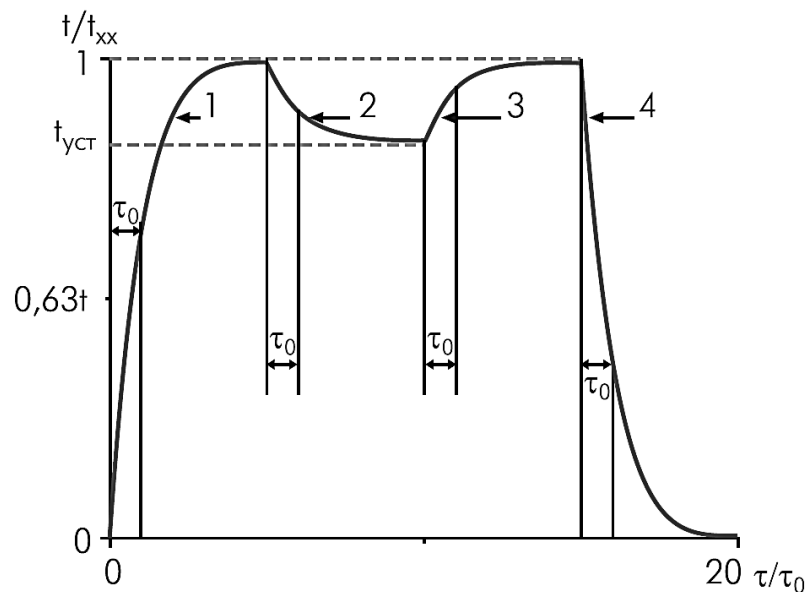


Рисунок 2.3 – Зміна температури паяльного інструменту без терморегулятора під час паяння: 1 – після включення; 2 – в режимі виконання серії паяних з'єднань; 3 – після закінчення багаторазового паяння; 4 – після відключення

Відлік температури здійснюється від температури навколишнього повітря, тобто розглядаються надлишкові температури. Запропонована спрощена модель нестационарного теплообміну складного тіла, попри суттєві припущення, дозволяє адекватно описати основні стадії теплової поведінки паяльного інструменту: його нагрівання до температури холостого ходу (крива 1), охолодження в умовах багаторазового паяння (крива 2), подальшого повторного нагріву (крива 3) та охолодження після відключення від джерела живлення (крива 4).

Формули (2.1...2.3) описують так званий регулярний тепловий режим. Такий режим виникає для будь-яких систем, що складаються з різнорідних тіл, і використовується, зокрема, для аналізу об'єктів з внутрішніми джерелами тепла постійної потужності. Запропонована модель дозволяє коректно визначити шляхи мінімізації охолодження паяльного інструменту при виконанні паяння за рахунок зменшення теплопоглинання відносно його встановленої потужності.

$$t_{уст} = t_{xx} \frac{P - P_1}{P}, \quad (2.4)$$

де $t_{уст}$ – температура паяльного інструменту при режимі паяння, що встановився/

Модель також може бути використана для опису процесу зміни температури паяльного інструменту при багаторазовому паянні $t_{бп}$ (формула 2.5) і наступному розігріві після закінчення $t_{нр}$ (формула 2.6):

$$t_{бп} = \Delta t_{уст} \cdot e^{-\tau/\tau_0} + t_{уст}, \quad (2.5)$$

$$t_{нр} = \Delta t_{уст} (1 - e^{-\tau/\tau_0}) + t_{уст}, \quad (2.6)$$

де $\Delta t_{уст} = t_{xx} - t_{уст}$.

При $P = P_1$ отримаємо рівняння, що описує процес охолодження

ВИМКНЕНОГО ПАЯЛЬНИКА:

$$t_{\text{викл}} = t_{xx} \cdot e^{-\tau/\tau_0}. \quad (2.7)$$

Сформулюємо наслідки застосування запропонованої моделі нестационарного теплообміну для паяльного інструменту.

1. Температура паяльника без системи терморегулювання, виражена у частках від температури t_{xx} у режимі нагрівання, відповідно до формули (2.1), набуває таких значень для різних інтервалів часу: $\tau = \tau_0$, $t = 0,63t_{xx}$; $\tau = 2\tau_0$, $t = 0,86t_{xx}$; $\tau = 3\tau_0$, $t = 0,95t_{xx}$. Отже, час досягнення паяльником без терморегулятора робочого стану практично дорівнює трьом його постійним часу ($\approx 3\tau$).

2. Порівняльний аналіз рівнянь (2.1...2.7) показує, що значення постійних часу є однаковими для таких режимів роботи паяльного інструменту:

- нагрівання паяльника до температури t_{xx} після ввімкнення;
- охолодження до температури $t_{уст}$ під час багаторазового виконання паяних з'єднань;
- повторного нагрівання від $t_{уст}$ до t_{xx} після етапу багаторазового паяння;
- охолодження інструмента після його вимкнення.

3. Потужність паяльника без системи терморегулювання за умови однакої температури t_{xx} є величиною, пропорційною площі його поверхні (тобто геометричним розмірам), що безпосередньо впливає з формули (2.2):

$$P = t_{xx} \cdot \alpha' \cdot S_n. \quad (2.8)$$

4. При однаковій t_{xx} для зменшення зниження температури паяльника без терморегулятора $\Delta t_{уст}$ під час багаторазового паяння необхідно застосовувати паяльний інструмент більшої потужності (великих розмірів), тому що з (2.2) і (2.4) впливає:

$$\Delta t_{\text{уст}} = t_{xx} \cdot \frac{P_1}{P} = \frac{P_1}{\alpha' \cdot S_n}. \quad (2.9)$$

5. Для сповільнення зниження температури паяльного інструменту без системи терморегулювання під час багаторазового паяння необхідно підвищувати його теплоємність (2.3). Водночас збільшення теплоємності неминуче призводить до зростання часу розігріву, оскільки стала часу нагрівання чисельно дорівнює сталій часу охолодження.

6. Для запобігання температурним провалам у паяльних станціях, оснащених терморегулятором, необхідно забезпечити наявність резерву потужності ΔP , достатнього для компенсації додаткових тепловтрат P_1 , що виникають у процесі багаторазового паяння (2.4).

Потужність електропаяльника визначається залежністю:

$$P = \frac{U^2}{R}, \quad (2.10)$$

де U – напруга живлення (В);

R – опір нагрівача (Ом).

Таким чином, потужність конкретного паяльника може змінюватися в діапазоні від 0 до P залежно від напруги живлення, що змінюється в межах $0 \dots U$. Саме тому для порівняння різних паяльників доцільно визначати їхню потужність за фіксованої напруги живлення, спільної для всіх зразків. Однак такий підхід призводить до методологічної похибки: паяльник, розрахований на знижену напругу (і відповідно малий опір), штучно оцінюється як високопотужний, тоді як паяльник, розрахований на підвищену напругу (з великим опором), відповідно оцінюється як малопотужний. Це є наслідком примусового приведення різних конструкцій до однакової напруги живлення.

З огляду на зазначене, для коректного порівняння паяльних інструментів потужність слід визначати за однакової для всіх температури холостого ходу t_{xx} , яка є однією з основних характеристик паяльника. За однакової температури холостого ходу t_{xx} теплова потужність інструменту визначається

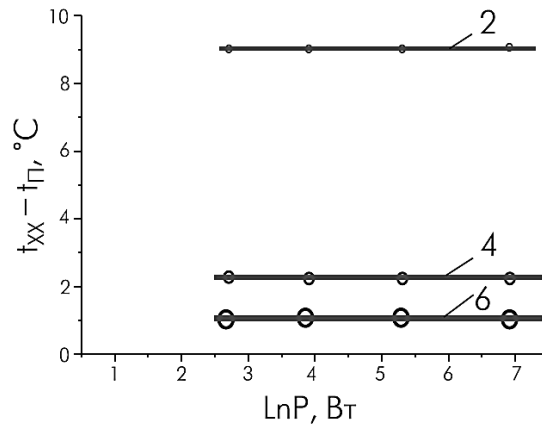
його тепловтратами в навколишнє середовище, що залежать від площі поверхні, температури цієї поверхні та коефіцієнта теплообміну (формула 2.2). Відповідно, отримання залежності зниження температури робочого (паяючого) кінця стрижня від потужності, за фіксованої температури холостого ходу, можливе лише шляхом зміни геометричних розмірів S_n .

У сучасних технічних умовах на напівпровідникові прилади зазвичай міститься вимога обмежувати потужність паяльника. Це зумовлює необхідність з'ясування впливу потужності, теплоємності та конструктивних параметрів паяльного інструменту на нагрівання напівпровідникових елементів під час паяння.

Для визначення впливу конструктивних параметрів паяльника на температуру паяння, а відповідно – і на нагрівання електрорадіоелементів, проведено експеримент [12] із використанням паяльників різної потужності та теплоємності у поєднанні зі змінними стрижнями. Досліджувалося зниження температури після одиночного та багаторазового паяння.

Вимірювання температури стрижнів виконувалися за допомогою хромель–копелевих термопар діаметром 0,2 мм, що закладалися у стрижень та реєструвалися потенціометром КСП-4 класу точності 0,25. Робочий спай термопари розташовувався на відстані не більш ніж 0,5 мм від паяючого торця стрижня, а холодні спаї поміщалися в лід, що танув, температура якого контролювалася еталонним ртутним термометром.

Експериментальні залежності зниження температури робочого кінця стрижня від потужності паяльного інструменту (як із терморегулятором, так і без нього) за однакової температури холостого ходу t_{xx} наведено на рисунку 2.4. З рисунка видно, що температура процесу паяння не залежить від потужності інструменту за умови незмінності вихідної температури холостого ходу, діаметра та довжини стрижня. На рисунку 2.4 наступні пояснення: $t_{п}$ – температура паяння; цифри – діаметр паяльного стрижня; потужність обладнання 1000 Вт (натуральний логарифм близько 7) відповідає ванні з розплавленим припоєм, в який занурений паяльний стрижень.



Рисунка 2.4 – Залежність зниження температури паяючого кінця жала від логарифму потужності паяльного інструменту чи устаткування [12]

2.3 Фізичні основи нагрівання паяльника індукційним методом

У сучасній техніці значна частина пристроїв, призначених для нагрівання за рахунок електричного опору або спалювання традиційного палива, була замінена конструкціями, що працюють на основі індукційного нагрівання. У більшості таких систем нагріванню піддаються феромагнітні матеріали, які, завдяки високій магнітній проник частот десятків кілогерц (наприклад, індукційні плити працюють приблизно на частоті $f \approx 30$ кГц). Ефективність індукційних пристроїв зумовлена безконтактністю нагріву та високою чистотою процесу порівняно з класичними методами. Водночас промислові індукційні системи мають складну структуру силової електроніки та підвищену собівартість.

Процес нагрівання жала паяльника індукційним методом можна розглядати як задачу про протікання змінного струму в циліндричному провіднику радіуса r , у якому виникають вихрові струми. Якщо наконечник виготовлено з феромагнітного матеріалу, він може нагріватися під дією магнітного поля в діапазонах десятків або сотень кілогерц. На рисунку 2.5 подано схему розташування феромагнітного елемента в області змінного магнітного потоку. Поле формується індукційною котушкою з числом витків N , довжиною l та індуктивністю L , що живиться від високочастотного джерела струму.

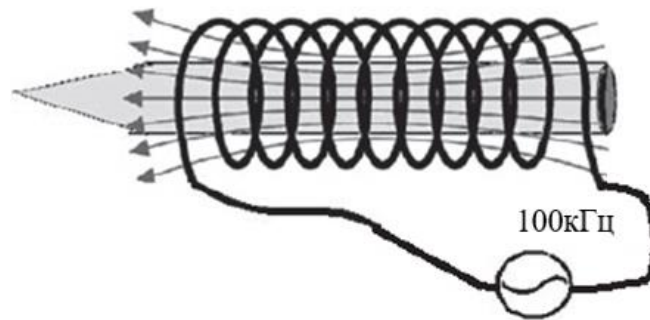


Рисунок 2.5 – Циліндричний феромагнітний стрижень, що нагрівається змінним магнітним полем високої частоти і 50 Гц

Важливо відзначити, що магнітна проникність феромагнітного матеріалу є функцією температури. Коли температура досягає точки Кюрі, матеріал переходить у парамагнітний стан, і його проникність прямує до μ_0 – проникності вакууму, що призводить до зміни індуктивності котушки. Це явище використовується в індукційних паяльниках для автоматичного обмеження температури наконечника.

Відповідно до аналітичних досліджень [13], напруженість магнітного поля H у стрижні задовольняє диференціальному рівнянню (2.11):

$$\frac{d^2H}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dH}{dr} - H(2j \cdot \pi \cdot f \cdot \mu \cdot \sigma) = 0, \quad (2.11)$$

де f – частота хвилі;

μ – магнітна проникність;

σ – провідність матеріалу.

Розв'язки рівняння (2.11) подаються через функції Бесселя першого роду нульового порядку (рівняння 2.12):

$$H = A \cdot J_0 \left(\sqrt{-2j} \cdot \frac{r}{s} \right), \quad (2.12)$$

де A – константа, яка залежить від початкових умов і від товщини шару в матеріалі, яка задається рівнянням (2.13):

$$s = \frac{1}{\sqrt{\frac{\pi \cdot f \cdot \mu}{\rho}}}. \quad (2.13)$$

З фізичної точки зору, це значення є ефективною площею поверхні матеріалу з питомим опором ρ , через яку проходить електричний струм.

Зменшення глибини проникнення сприяє підвищенню щільності струму та, відповідно, інтенсивнішому нагріванні поверхневих шарів.

З рівняння Максвелла-Ампера (при нехтуванні діелектричною проникністю) встановлюється зв'язок між індукованим електричним полем та зовнішнім магнітним полем (рівняння 2.14).

$$\frac{1}{\sigma} \frac{dH}{dr} = E. \quad (2.14)$$

Використовуючи цей зв'язок разом із розв'язками рівняння (2.12), можна визначити поверхневу потужність, яка розсіюється у феромагнітному стрижні (2.15).

$$P = \int_{r=0}^{r=\alpha} 2\pi \cdot r \cdot \sigma \cdot E^2 dr. \quad (2.15)$$

Подальший аналіз дозволяє отримати загальний вираз потужності P , що розсіюється матеріалом, з урахуванням граничних умов (2.16):

$$P = 8\pi \cdot H_0^2 \cdot \alpha \cdot \frac{\rho}{s}; \quad \frac{\alpha}{s} > 5. \quad (2.16)$$

Співвідношення $R_s = \rho/s$, що інтерпретується як поверхневий опір, який визначає інтенсивність виділення теплоти. Чим менша глибина проникнення s , тим вища щільність струму та більша питома потужність нагрівання матеріалу.

Стосовно конструкції паяльних жал, слід урахувати, що вони складаються щонайменше з трьох шарів (рис. 2.6):

- зовнішній шар хрому (≈ 10 мкм), який запобігає корозії;
- проміжний ферромагнітний шар (зазвичай Fe або Ni товщиною ≈ 200 мкм);
- внутрішній шар міді, що забезпечує високу теплопровідність.

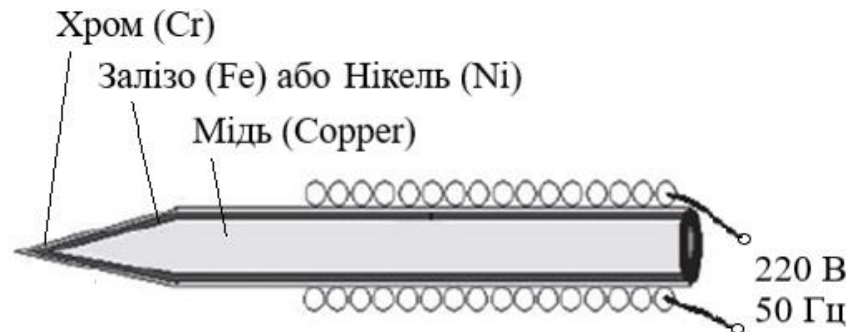


Рисунок 2.6 – Конструкції паяльних жал для нагрівання індукційним методом

Таким чином, вираз потужності (2.16) набуває різних значень для кожного шару через різну провідність, проникність та товщину.

2.4 Генерація електромагнітного поля для індукційного нагрівання

Утворення високочастотних магнітних полів для індукційного нагрівання здійснюється за допомогою силових електронних схем – резонансних інверторів. Вони використовують напівпровідникові ключі: у низькочастотних діапазонах – IGBT (до 200 кГц), у вищих – MOSFET (до 1 МГц). Схеми інверторів можуть реалізовуватися у вигляді повного або напівмостового «Н-моста», схеми «push–pull» та інших топологій, що живлять LC-резонансні контури.

Комутація транзисторів здійснюється через драйвери, що забезпечують правильний робочий цикл та «мертвий час». Для стабілізації частоти можуть застосовуватися давачі струму та системи фазового автопідлаштування (ФАПЧ). Усі ці компоненти суттєво підвищують вартість індукційних систем порівняно з традиційними нагрівачами. Проте завдяки тому, що тепло генерується безпосередньо в металевому елементі, індукційний метод є значно ефективнішим з точки зору енергоспоживання.

З метою спрощення схеми інвертора рекомендується використовувати топологію класу D (рис. 2.7) з напівмостовим підключенням та розділеною резонансною ємністю. Транзистори Q1 (N-канал) та Q2 (P-канал) комутують струм у послідовному LC-контурі, який живиться від джерела постійної напруги VDC. Ідеальна резонансна частота контуру визначається рівнянням (2.17), а потужність, що передається феромагнітному наконечнику, – рівнянням (2.18). Враховуючи закон Джоуля, рівняння (2.18) еквівалентне (2.19). Подальший аналіз із використанням залежності між струмом та магнітним полем (2.10) дозволяє переписати рівняння (2.16) у вигляді (2.21) та отримати вираз для еквівалентного опору інвертора (2.22), який враховує також статичні втрати у силових елементах (Rdc).

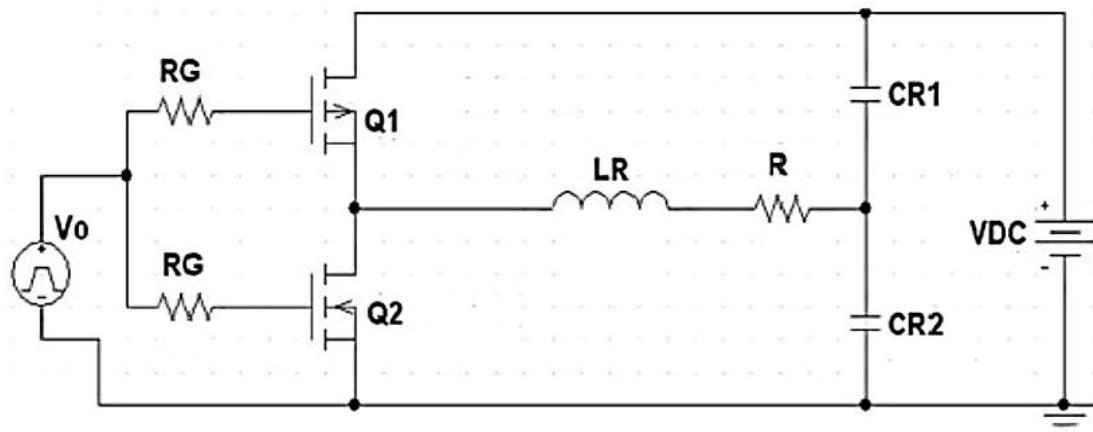


Рисунок 2.7 – Схема резонансного інверторного кола

Слід підкреслити, що резонансна частота індукційного нагрівача визначається стандартним виразом для коливального контуру (2.17), де L та C позначають відповідно індуктивність індукційної котушки та ємність резонансного конденсатора. Резонанс є критично важливим, оскільки саме в цій точці реактивні складові імпедансу взаємно компенсуються, а контур переходить у режим максимального струму при мінімальних витратних потужностях:

$$f_R = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_R(C_{R1} + C_{R2})}}. \quad (2.17)$$

При подачі постійної напруги V на інвертор, який живить цей резонансний контур, потужність, що ефективно передається феромагнітному наконечнику, описується рівнянням (2.18):

$$P_{out} = I_R \cdot V_I \cdot \cos\theta. \quad (2.18)$$

З іншого боку, теплова потужність, що виділяється у феромагнітному шарі з питомим опором R , зумовлена вихровими струмами, які виникають у матеріалі внаслідок змінного магнітного поля. Цей процес підпорядковується закону Джоуля–Ленца, тому рівняння (2.18) може бути подано у вигляді (2.19), що відображає безпосередній зв'язок між електричним струмом у матеріалі та кількістю розсіяного тепла:

$$P_{out} = I_F^2 \cdot R_F. \quad (2.19)$$

Далі, аналізуючи залежність (2.18), враховують, що магнітна напруженість H лінійно пов'язана зі струмом I у першому наближенні, а також визначається конструктивними параметрами індукційної котушки, зокрема її індуктивністю L . Цей взаємозв'язок наведено у формулі (2.20), яка фактично демонструє пропорційність між струмом у котушці та створюваним магнітним полем:

$$H_0 = \frac{N \cdot I_R}{l}. \quad (2.20)$$

Підставивши отриманий зв'язок у рівняння, що описує поверхневі втрати (2.16), його можна переписати у вигляді виразу (2.21). У комбінації з рівнянням (2.19) це дозволяє отримати аналітичний вираз для еквівалентного опору резонансного інвертора, наведений у рівнянні (2.22). До цього еквівалентного опору входить не лише поверхневий імпеданс феромагнітного шару, але й додатковий статичний опір R , який враховує втрати в транзисторах, провідниках та інших електронних компонентах. Варто

підкреслити, що величина цього опору визначає енергетичну ефективність інвертора та рівень корисної потужності, яка передається безпосередньо на нагрівач:

$$P = 8\pi \cdot \alpha \cdot R_s \frac{N^2}{l^2} I_R^2; \quad \frac{\alpha}{s} > 5; \quad (2.21)$$

$$P = \frac{8\pi \cdot \alpha \cdot N^5}{l^2} R_s + R_{dc}. \quad (2.22)$$

РОЗДІЛ 3

ПРОЄКТНО-КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИНА

3.1 Загальна будова нагрівальних елементів паяльної станції

У радіоаматорській практиці часто виникає потреба у компактному паяльнику з низьковольтним живленням та можливістю регулювання температури жала, призначеному для роботи з дрібногабаритними радіoeлементами на друкованих платах. Використання низької напруги живлення та заземленого жала істотно зменшує ймовірність пошкодження електронних компонентів унаслідок електростатичного розряду.

Попри наявність великої кількості різноманітних конструкцій паяльників та паяльних фенів, більшість саморобних рішень потребують спеціального інструменту, відповідних матеріалів та значних витрат часу. Широке поширення промислових паяльних станцій дало змогу легко придбати готовий паяльник або фен із зручним ергономічним виконанням, доступною вартістю та широкою номенклатурою змінних насадок.

Аналіз конструкцій паяльників, призначених для використання у складі паяльних станцій, дає можливість виділити два найбільш поширені типи, які відрізняються принципом нагріву та способом контролю температури жала. У першому типі нагрівальний елемент розташований зовні жала, подібно до класичних побутових паяльників (рис. 3.1, а). Контроль температури здійснюється за допомогою термопари, що притискається до хвостовика жала. Така конструкція відзначається високою надійністю, оскільки ніхромові спіраль ефективно захищена від механічних впливів.

Разом із тим, термодавач, розташований на протилежному кінці жала, характеризується значною тепловою інерційністю, оскільки зниження температури на робочому кінці потребує певного часу, щоб передатися до області встановлення термопари. На практиці ця схема працює достатньо ефективно завдяки значній теплоємності жала, якої вистачає для швидкого прогрівання зони пайки та забезпечення певного запасу температури. Під час тривалої пайки регулятор фіксує зниження температури та відповідно

збільшує потужність, що подається на нагрівач.

Друга конструктивна реалізація (рис. 3.1, б) вважається більш швидкодійною, оскільки нагрівальний елемент інтегровано всередину жала, а датчик температури розташований безпосередньо на кінці нагрівача. У зібраному стані термопара притискається до робочої частини жала значно ближче, ніж у попередньому варіанті конструкції, що забезпечує швидшу та точнішу реакцію системи на зміну температури.

У паяльниках такого типу, як правило, застосовується керамічний нагрівач, який хоча й забезпечує високу ефективність, однак відрізняється підвищеною крихкістю. Через це він може бути пошкоджений у разі падіння інструмента на тверду поверхню, прикладання надмірних механічних навантажень на жало або за умов нерівномірного відведення тепла, наприклад, при використанні нестандартних за геометрією жал.

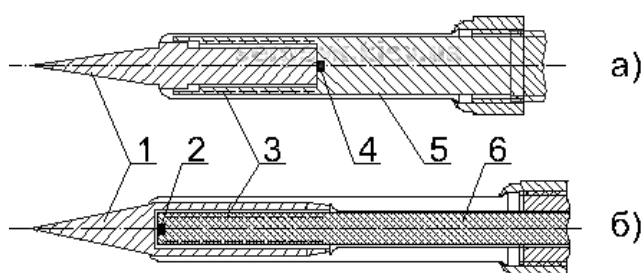


Рисунок 3.1 – Схема нагріву жала: а) нагрів жала зовні; б) нагрівання жала зсередини; 1 – жало; 2,4 – датчик температури; 3 – нагрівач; 5 – металевий корпус нагрівача; 6 – керамічна основа нагрівача

В теперішній час широко використовуються жала серії T12. Вони мають інтегровану конструкцію, у якій нагрівач та датчик температури (термопара) вмонтовані безпосередньо в саме жало (рис. 3.2). Така конструкція забезпечує мінімальну теплову інерцію; дуже швидке нагрівання (10...15 секунд до 300 °С); точний температурний контроль; стабільність температури під час паяння.

Жала T12 споживають менше енергії завдяки локалізованому нагріванню (порівняно з конструкціями з великим корпусним нагрівачем).

Висока ефективність роботи дозволяє підтримувати задану температуру навіть при відборі теплоти у великих паянних майданчиків.

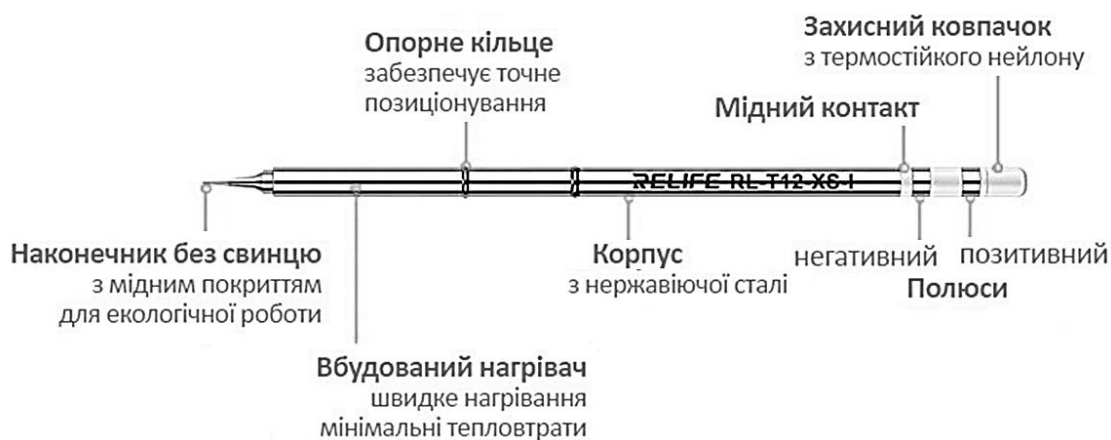


Рисунок 3.2 – Інтегрований нагрівальний елемент серії T12 [14]

Технічні характеристики жала T12: робочі температури 150...480 °C; потужність 65...75 Вт (залежно від станції); тип термопари тип К; час відновлення температури після торкання плати ~0,5 сек.

Жало T12 має багат шарову конструкцію (рис. 3.3), основні елементи якої перелічені нижче.

1. Нагрівальний елемент (heater rod) розміщується всередині жала та забезпечує швидкий локальний нагрів. Як правило, виконаний у вигляді керамічного нагрівача з високою теплопровідністю.

2. Давач температури (термопара або терморезистор), який вбудований у передню частину нагрівача максимально близько до робочого кінчика жала. Завдяки цьому забезпечується швидке реагування на зміну температури та висока точність регулювання.

3. Мідне тіло жала. Робоча частина виготовлена з високотеплопровідної міді, що дозволяє ефективно передавати тепло на область паяння.

4. Захисне покриття (залізо, нікель, хром). Такі покриття захищає від корозії та механічного зношування, підвищує довговічність і стійкість до окислення.

5. Контактна частина. Тильний кінець жала містить електричні контакти для під'єднання до паяльної станції. Забезпечує подачу живлення на нагрівач і передачу сигналу від термодавача.

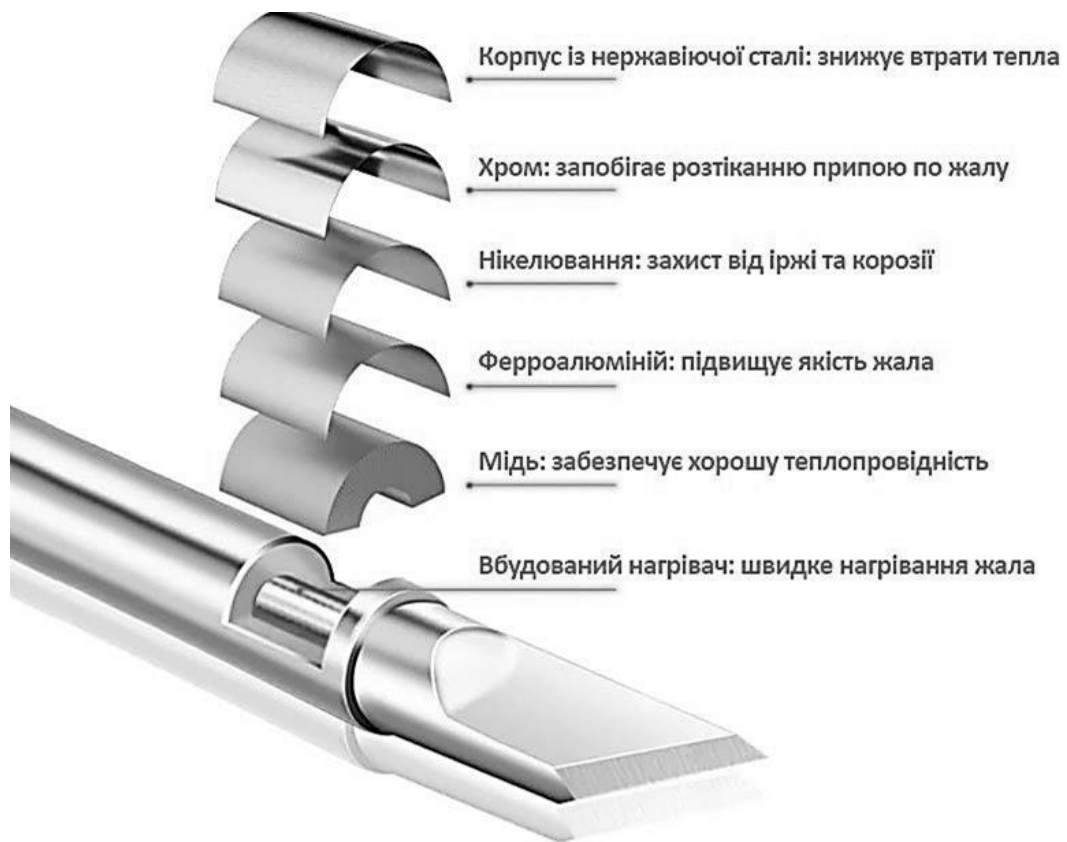


Рисунок 3.3 – Багатошарова конструкція жала T12 [14]

Одним із ключових інструментів сучасних паяльних станцій є гарячо-повітряний фен. Його призначення полягає у формуванні контрольованого повітряного потоку заданої температури та інтенсивності, що забезпечує безконтактний нагрів локальних ділянок друкованої плати до температури плавлення припою. Такий спосіб нагріву є особливо ефективним під час групового монтажу пасивних електронних компонентів, попередньо розміщених на поверхні плати на паяльній пасті: після її розплавлення сили поверхневого натягу автоматично позиціонують компоненти на контактних майданчиках.

Гарячо-повітряний фен здобув значну популярність у сервісному ремонті електронної апаратури, оскільки дає змогу швидко та з мінімальним

ризиком пошкодження демонтувати і монтувати складні мікросхеми з великою кількістю виводів та малим кроком між ними. Крім того, фен широко застосовується при термоусадженні ізоляційних кембріків.

Історично фени оснащувалися окремим компресором, розміщеним у корпусі паяльної станції; повітря від компресора подавалося до ручки через гнучкий шланг, де знаходилися нагрівач і температурний сенсор. Висока вартість та конструкційна складність компресорних систем тривалий час стримували їх широке використання.

Поява ручок фенів із вбудованим вентилятором істотно спростила конструкцію обладнання. Вбудований вентилятор унеможлиблює потребу в масивному компресорі, зменшує габарити та вартість станції, робить її зручнішою у застосуванні. На рисунку 3.4 наведено приклад конструкції фена моделі Lukey 852D+ FAN із інтегрованим вентилятором.

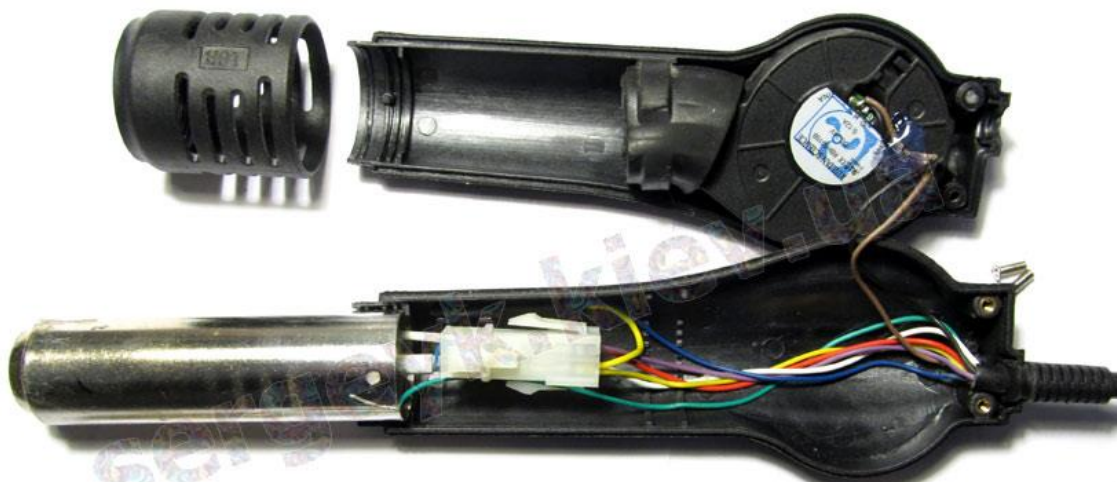


Рисунок 3.4 – Конструкція паяльного фена Lukey 852D + FAN [15]

У передній частині ручки фена, всередині металевого корпусу, розміщується ніхромовий нагрівальний елемент та датчик температури. Конструктивно нагрівач є аналогом елементів, що застосовуються у побутових фенах для сушіння волосся. Нагрівач живиться змінною напругою 230 або 110 В та має номінальну потужність приблизно 700 Вт.

У тильній частині ручки, в її розширеному сегменті, встановлено відцентровий вентилятор з низьковольтним живленням – у цьому випадку

24 В, 120 мА постійного струму.

Варто звернути увагу, що діаметр металевого сопла цього типу фенів становить 25 мм, що відрізняється від поширених компресорних моделей, які мають зовнішній діаметр сопла 22 мм. Тому для таких фенів потрібне використання спеціальних змінних насадок, а для встановлення стандартних насадок необхідне застосування перехідника.

3.2 Електрична принципова схема терморегулятора

Побудова терморегулятора паяльної станції відбувається на основі електричної принципової схеми представленої на рисунку 3.5. Розглянемо особливості мікроконтролерного регулювання паяльної станції на основі даної схеми.

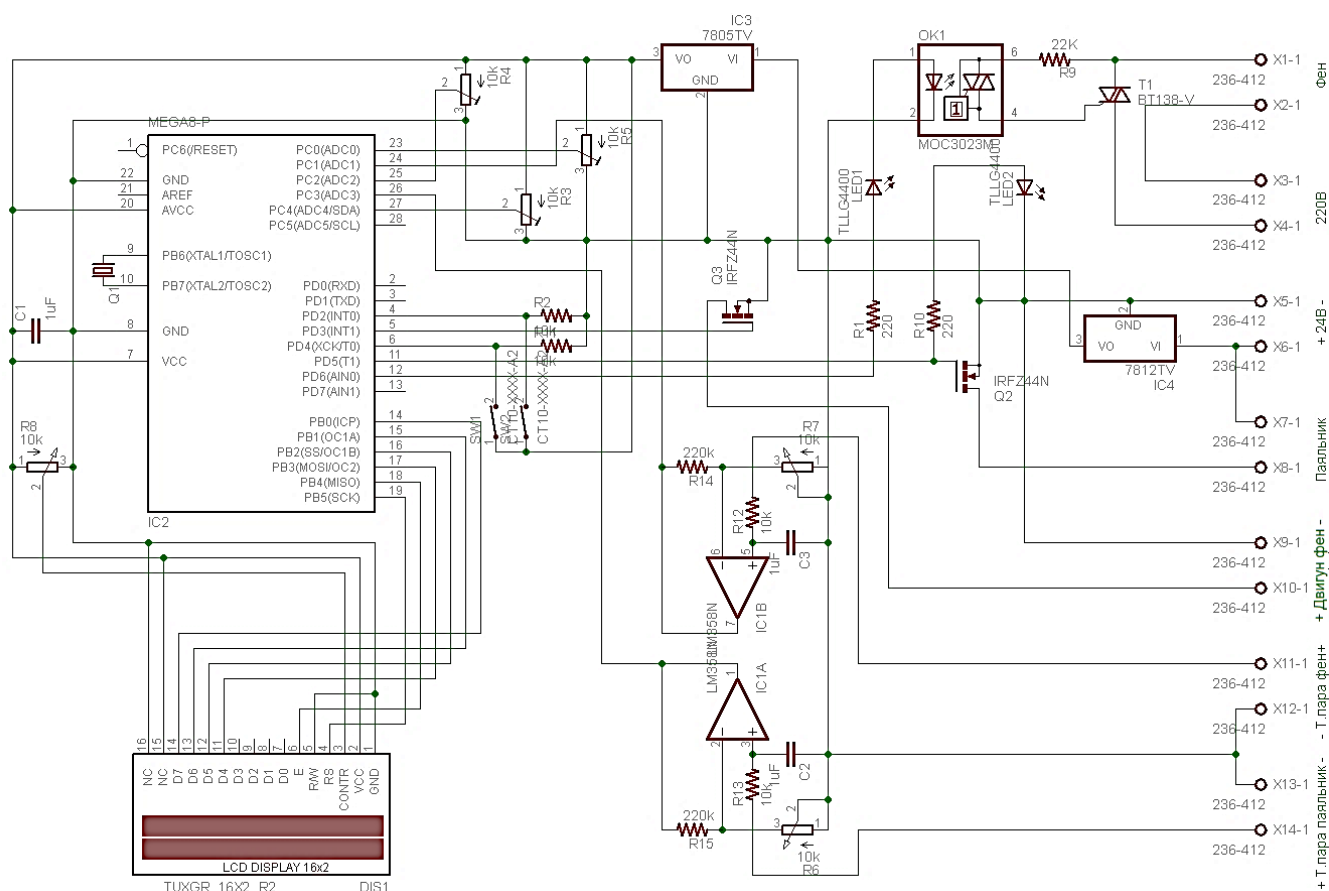


Рисунок 3.5 – Електрична принципова схема терморегулятора паяльної станції

Паяльна станція побудована на базі мікроконтролера Atmega328P, який виконує функції центрального керуючого блока та забезпечує опрацювання сигналів термодавачів, реалізацію алгоритмів терморегулювання та керування виконавчими елементами паяльника і термофена.

Живлення станції забезпечується імпульсним блоком живлення 24 В, 2 А. в складі системи живлення входять стабілізатори: L7812CV формується напруга 12 В, яка використовується для живлення вентилятора фена та підсилювальних каскадів; L7805CV забезпечує стабільне 5 В для живлення мікроконтролера, логічних вузлів та оптичних елементів. Фільтрацію та згладжування імпульсів здійснюють SMD-конденсатори 1 мкФ.

Паяльник та фен оснащені К-термопарами, що забезпечують надійне вимірювання температури в робочій зоні. Сигнал термопари має низький рівень та потребує підсилення, яке реалізується за допомогою операційного підсилювача (ОП) LM358. ОП виконує: попереднє підсилення термоЕРС термопари; фільтрацію сигналу; формування рівня напруги, придатного для АЦП Atmega328P.

АЦП мікроконтролера виконує дискретизацію сигналу та передає результат у модуль регулювання температури. У мікроконтролері реалізовано пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) алгоритм керування.

Потенціометри 10 кОм дозволяють встановити: бажану температуру паяльника; температуру нагріву повітря фена; інтенсивність повітряного потоку. Також додатково є підстроювальні резистори, які застосовуються для калібрування каналів вимірювання температури.

Паяльник нагрівається за допомогою низьковольтного резистивного нагрівача. Керування потужністю здійснюється ключовим елементом – MOSFET IRFZ44N.

У схемі також використано два транзистори IRFZ44N: для керування нагрівачем паяльника; для керування живленням вентилятора та кіл низької напруги.

Мікроконтролер формує ШІМ-сигнал, який через транзистор регулює теплову потужність нагрівача. Таким чином досягається підтримання

стабільної температури жала.

Для проєкту запропонований фен, який має два елементи: нагрівач 220 В та вбудований вентилятор 24 В постійного струму. Для гальванічної розв'язки низьковольтної схеми з мережевою частиною застосовується оптосимістор МОС3063, який управляє силовим симістором ВТ138. МОС3063 отримує керуючий сигнал від мікроконтролера та керує відкриванням ВТ138. ВТ138 подає регульовану потужність на нагрівач фена, реалізуючи фазове регулювання.

Вентилятор живиться від стабілізованої напруги 24 В та регулюється через MOSFET (IRFZ44N) за допомогою ШІМ-керування від контролера.

Для візуального контролю станції встановлено світлодіоди (2,5 мм, 20 мА), що індикують режими роботи: нагрів паяльника; нагрів фена; живлення / статус системи.

Потенціометри та перемикачі (3 шт.) дозволяють керувати режимами станції.

Для підключення інструментів запропоновано використовувати стандартні роз'єми: GX16-8 – для фена (вентилятор + термопара + живлення нагрівача); GX16-5 – для паяльника (нагрівач + термопара). Таке розділення забезпечує уніфіковане та безпечне підключення змінних інструментів.

3.3 Функціональний опис складових частин терморегулятора

Розглянемо технічні характеристики складових елементів мікроконтролерного регулятора паяльної станції

Головний керуючий модуль системи це мікроконтролер АТmega328Р (рис. 3.6). В даному проєкті він виконує наступні функції:

- обробка даних з термопар (через LM358);
- реалізація PID/ПД-регулювання температури;
- формування PWM сигналів для MOSFET;
- керування симістором через оптопару МОС3063;
- обробка входів потенціометрів і перемикачів;

– керування індикацією.

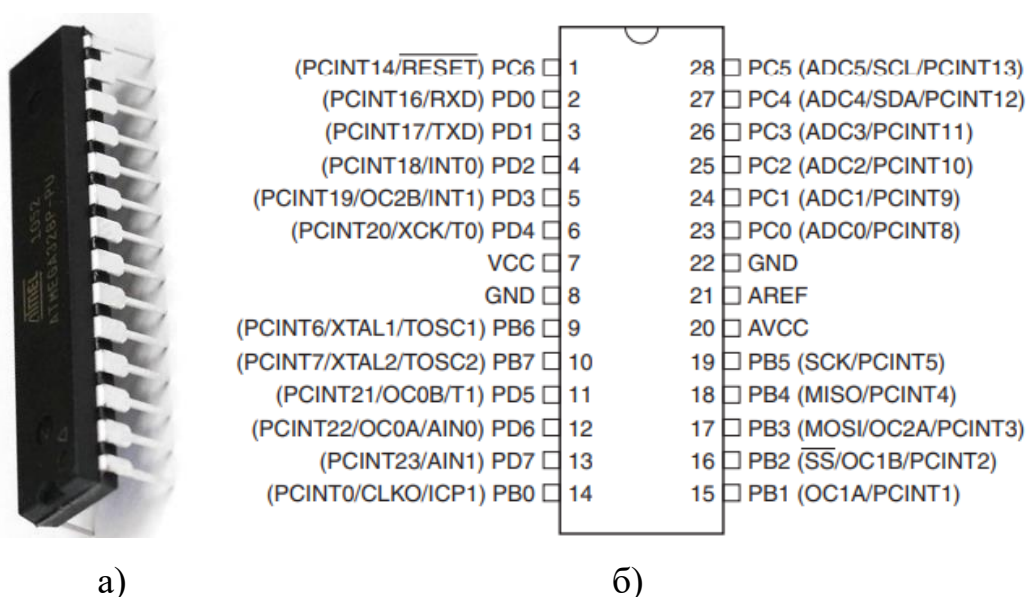


Рисунок 3.6 – Зовнішній вигляд (а) та розпіновка виводів (б) АТmega328P [16]

Мікроконтролер АТmega328P – це 8-бітний контролер, призначений для використання у вбудованих системах. Він виготовлений за енергоощадною КМОП-технологією, яка в поєднанні з удосконаленою архітектурою AVR забезпечує оптимальний баланс між швидкістю та споживанням енергії. Конструктивно мікроконтролер побудований на дворівневій (гарвардській) архітектурі та має окремі шини для пам'яті програм і пам'яті даних.

Мікроконтролер АТmega328P має модульну структуру (рис. 3.7), де окремі блоки відповідають за обробку даних, генерацію тактових сигналів, взаємодію з периферією та роботу пам'яті. Уся система базується на гарвардській архітектурі з розділенням шин команд і даних, що забезпечує високу ефективність виконання інструкцій.

Центральне процесорне ядро (CPU Core) – це головний обчислювальний блок, який виконує інструкції з пам'яті програм. Функції:

- виконання арифметичних і логічних операцій (ALU);
- робота з регістрами загального призначення (32×8 -біт);
- формування керуючих сигналів для периферії;
- обробка переривань.

ALU працює з одnobайтовими операндами та підтримує операції над бітами, байтами та 16-бітними словами.

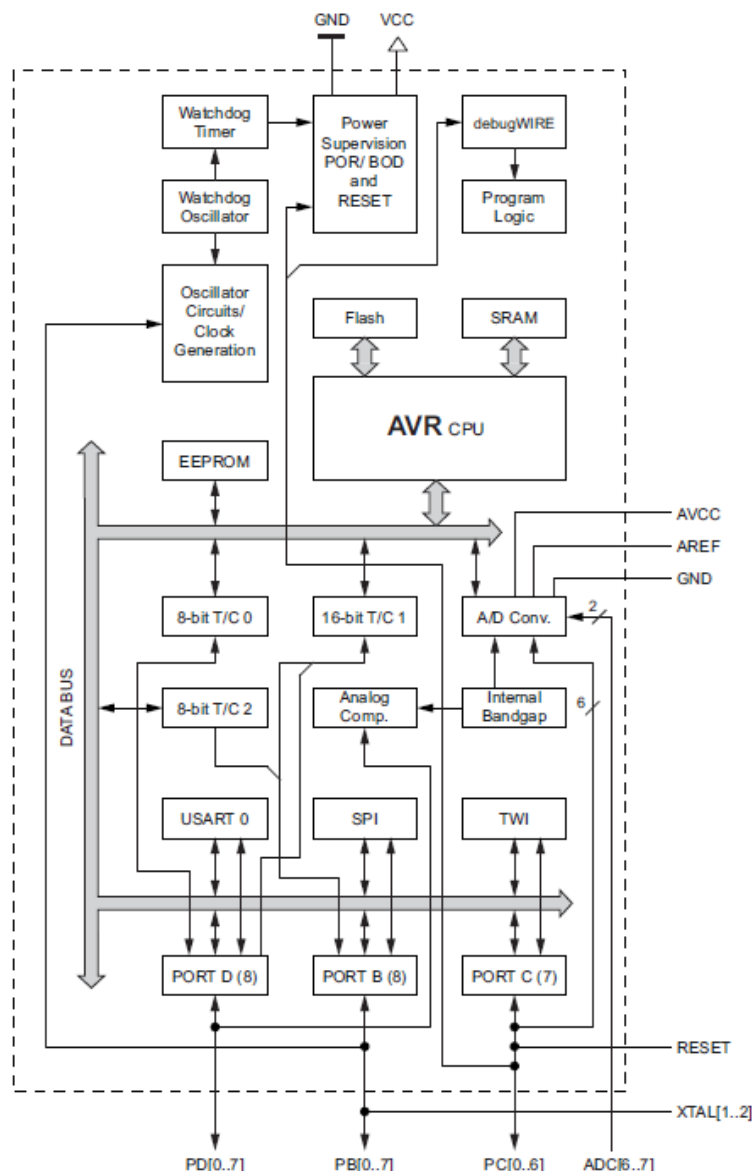


Рисунок 3.7 – Функціональна схема мікроконтролера ATmega328P [16]

Пам'ять програм (Flash Memory) має обсяг 32 КБ. Призначенна для зберігання машинного коду. Працює незалежно від пам'яті даних завдяки гарвардській архітектурі. Має область Boot Loader, що дозволяє перепрограмувати контролер через інтерфейси без зовнішнього програматора

Пам'ять даних SRAM має обсяг 2 КБ. Використовується для змінних під час виконання програми; стеку; буферів даних.

EEPROM має обсяг 1 КБ. Незалежна енергонезалежна пам'ять, яка

зберігає параметри користувача (калібрування, налаштування); не стирається після вимкнення живлення.

Система тактування (Clock System) де джерелами тактового сигналу можуть бути: кварцовий резонатор (16 МГц); внутрішній RC-генератор; зовнішній генератор. Система тактування живить: CPU, таймери, інтерфейси, АЦП (з окремим дільником).

ATmega328P містить три таймери:

1. Timer0 (8-біт) – використовується Arduino для функцій millis() та PWM.

2. Timer1 (16-біт) – точне керування сервоприводами; генерація високоточного PWM; вимірювання періодів/частот.

3. Timer2 (8-біт) – може працювати від окремого тактового джерела (кільцевий генератор); застосовується для звукових сигналів або додаткового PWM.

Аналого-цифровий перетворювач (ADC, 10-біт) має 8 аналогових каналів (A0...A7), точність 10 біт. Виконує функції вимірювання напруги; зчитування датчиків (термопари – через підсилювач LM358); формування аналогових значень для регуляторів.

Інтерфейси зв'язку:

1. USART – послідовний UART-протокол; використовується для комп'ютера, Bluetooth, Wi-Fi (ESP8266).

2. SPI – швидкісний інтерфейс для програмування та периферії (пам'ять, дисплеї).

3. I²C (TWI) – двопровідна шина для датчиків і додаткових мікросхем.

Система переривань (Interrupt System) підтримує зовнішні переривання (INT0, INT1); переривання від таймерів; переривання від АЦП; переповнення та compare-match події. Це забезпечує реакцію реального часу на події: кнопки, датчики, сигнали PWM тощо.

Мікроконтролер має 3 порти: PORTB (8 ліній), PORTC (7 ліній), PORTD (8 ліній), разом 23 лінії I/O.

Watchdog Timer – спеціальний таймер, який перезавантажує

мікроконтролер при зависанні програми.

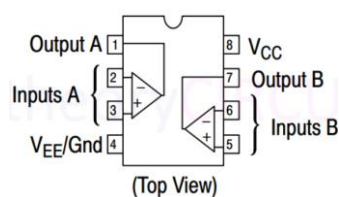
«Основні технічні характеристики мікроконтролера ATmega328P:

- 8-бітний мікроконтролер AVR від Microchip;
- частота роботи – до 20 МГц (у схемі – 16 МГц);
- Flash-пам'ять – 32 КБ;
- SRAM – 2 КБ, EEPROM – 1 КБ;
- кількість портів входу / виходу 23;
- АЦП – 10-біт, 8 каналів;
- напруга живлення 1,8...5,5 В» [16].

Операційний підсилювач (рис. 3.8) LM358 підсилює слабкий сигнал термопари типу К (декілька мілівольт). Він виконує такі операції як попереднє підсилення, фільтрацію шумів, зміщення рівня для АЦП. Кожен канал температури має свій LM358.



а)



б)

Рисунок 3.8 – Зовнішній вигляд (а) та розпіновка виводів операційного підсилювача LM358 [17]

Основні технічні характеристики операційного підсилювача LM358:

- подвійний ОП загального призначення;
- живлення 3...32 В (однополярне) або $\pm 1,5...16$ В (двополярне);
- споживаний струм $\sim 0,5$ мА на підсилювач;
- працює при низьких напругах, що важливо для мікроконтролерних систем.

Опторозв'язка МОС3063 призначена для гальванічної розв'язки мікроконтролера зі змінною мережею 230 В (рис. 3.9). Функції, які виконує даний елемент:

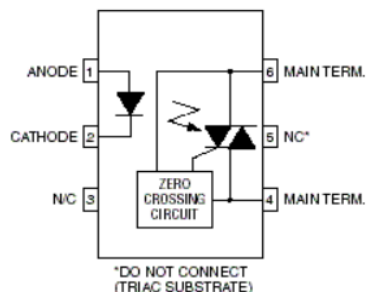
- керує симістором ВТ138 на стороні мережі;

– має zero-cross детектор – плавніше та безпечніше включення нагрівача паяльника;

– захищає електроніку від перешкод з мережі.



а)



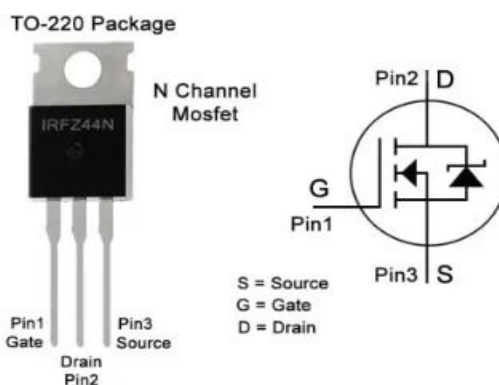
б)

Рисунок 3.9 – Зовнішній вигляд (а) та розпіновка виводів опторозв’язки МOC3063 [19]

Основні технічні характеристики опторозв’язки МOC3063:

- оптосимістор з вбудованим TRIAC-драйвером;
- сумісний із симісторами середньої потужності;
- має нуль-перехід (Zero Cross);
- робочий струм світлодіода 10...15 мА.

MOSFET IRFZ44N – це силовий транзистор для комутації 24 В постійного струму (рис. 3.10). Він керує нагрівачем фена та вбудованим вентилятором фена (регулювання повітря). MOSFET працюють як електронні ключі з великим струмом.



а)

б)

Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд (а) та розпіновка виводів MOSFET IRFZ44N [19]

Основні технічні характеристики MOSFET IRFZ44N:

- N-канальний MOSFET високої потужності;
- максимальна напруга сток-витік 55 В;
- максимальний струм 49 А;
- опір відкритого каналу $R_{ds(on)} \sim 0,028 \text{ Ом}$.

Симістор BT138 комутує змінну напругу. Він виконує наступні функції:

- керує потужністю нагрівача паяльника;
- забезпечує плавне регулювання через опторозв'язку MOC3063;
- витримує високі струми.

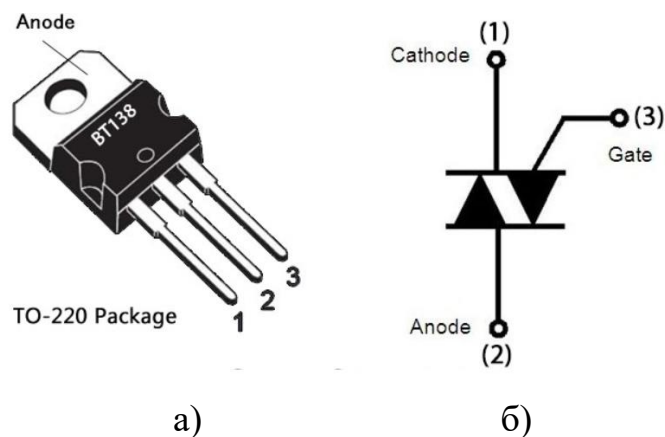


Рисунок 3.10 – Зовнішній вигляд (а) та розпіновка виводів симістора BT138 [20]

Основні технічні характеристики симістора BT138:

- потужний симістор для комутації змінного струму;
- максимальна напруга: 600 В;
- максимальний струм: 12 А.

Стабілізатор L7812CV – лінійний стабілізатор на 12 В (рис. 3.11, а). Він виконує наступні функції: живить LM358 та інші вузли, які потребують 12 В; дає стабільну напругу для аналогових вузлів.

Основні технічні характеристики стабілізатор L7812CV:

- лінійний стабілізатор +12 В;
- максимальний струм до 1,5 А;
- вхідна напруга до 35 В.

Стабілізатор L7805CV – лінійний стабілізатор на 5 В (рис. 3.11, б). Він забезпечує живлення мікроконтролера; живить логічні входи/виходи; стабілізує напругу для датчиків та індикації.

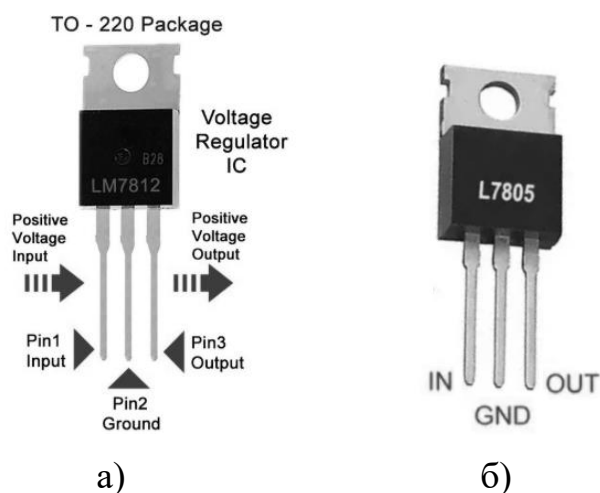


Рисунок 3.11 – Зовнішній вигляд та розпіновка виводів стабілізатора L7812CV (а) та L7805CV (б) [21]

Основні технічні характеристики стабілізатора L7805CV:

- лінійний стабілізатор +5 В;
- максимальний струм до 1,5 А;
- живить мікроконтролер та логіку.

Потенціометри 10 кОм призначені для: встановлення температури паяльника; встановлення температури фена; регулювання потоку повітря; передають мікроконтролеру аналогові значення.

Підналаштовувальні резистори 10 кОм – це внутрішні елементи налаштування. Вони призначені для калібрування температурних каналів; компенсація похибки термопар; точне налаштування ПД-регулятора.

Резистор 22 кОм використовується як резистор зворотного зв'язку в LM358 та як лімітуючий резистор в колі опторозв'язки.

Світлодіоди 2,5 мм, 20 мА використовуються в системі індикації паяльної станції.

Кварцовий резонатор 16 МГц забезпечує тактування АТmega328Р.

Загальний вигляд наведених вище радіоелементів наведено на рисунку 3.12.



Рисунок 3.12 – Навісні радіоелементи [22]

SMD резистори 220 Ом використовуються як струмобмежувальні для світлодіодів.

SMD резистори 10 кОм використовуються для підтягування входів MCU; в якості частини RC-фільтрів та дільників напруги.

SMD резистори 220 кОм виконують роль резисторів у підсилювальних колах LM358 та для стабілізації коефіцієнта підсилення.

SMD конденсатори 1 мкФ використовуються для фільтрація живлення стабілізаторів; згладжування шумів у каналах температури; стабілізація LM358.

Загальний вигляд перелічених SMD елементів наведено а рисунку 3.12.



Рисунок 3.13 – SMD компоненти [22]

Перемикачі виконують функції: вкл/викл паяльної станції; перемикання режимів фена; вибір додаткових режимів або калібрування.

Гніздо GX16-8 – це 8-контактний роз'єм, який використовується для підключення фена (вентилятор, нагрівач, термопара).

Гніздо GX16-5 – це 5-контактний роз'єм, який використовується для підключення паяльника (нагрівач + термопара).

Основне джерело енергії системи це імпульсний блок живлення 24 В, 2 А

Запропонований терморегулятор здатний ефективно працювати з паяльником 24 В з К-термопарою (температурний діапазон 200...480°C) та феном 24 В з вентилятором і К-термопарою (температурний діапазон 100...500°C, потік повітря $\approx 20...30$ л/хв).

3.4 Створення друкованої плати регулятора

Для створення друкованої плати використали програму EasyEDA. EasyEDA – це сучасне онлайн-середовище для розробки електронних схем та друкованих плат (PCB). Вибір програми полягав у тому що вона має онлайн-платформа, тобто працює у браузері без встановлення програм; файли зберігаються у хмарі або локально. Дана програма має модуль для схемотехніки, який містить бібліотеку компонентів (TI, ST, Microchip); має можливість імпорт з KiCad, Eagle, Altium. Під час створення друкованих плат (PCB Layout) є можливість ручного або автоматичного трасування; підтримка багат шарових плат; 3D перегляд плати; контроль правил проєктування (DRC). Ще однією особливістю є вбудоване замовлення виробництва. EasyEDA інтегрована з JLCPCB – плату можна замовити в один клік.

Переваги створення плати саме в EasyEDA: програмою легко користуватися навіть початківцю, без спеціальних глибоких знань або складного навчання; безкоштовне використання; велика бібліотека футпринтів; автоматичне замовлення PCB; 3D-візуалізація; робота в браузері з будь-якого ПК.

Розглянемо поетапно процес створення друкованої плати для мікропроцесорного регулятора температури в EasyEDA (рис. 3.14).

1. Для створення нового проєкту у браузері відкривається EasyEDA → New Project. Проєкт містить схему, PCB, бібліотеки та документи.

2. Створення принципової схеми (Schematic). На цьому етапі виконуються:

– додавання компонентів: (мікронтролер ATmega328P, ОП LM358, опторозв'язка MOC3063, симістор BT138; MOSFET IRFZ44N, стабілізатори

– слаботочні вузли (LM358, терморпари, відгалуження) – розміщуються осторонь;

– мікроконтролер і логіка – в центрі;

– кнопки, потенціометри, дисплей – ближче до краю плати.

Компоненти підписуються: 10k, 220k, 220C_LED, BUTTON, 16MHz.

5. Трасування друкованих доріжок (Routing). Це один із головних етапів. Для силових ліній (24 В) ширина доріжок 1,0...1,5 мм. Для сигналів мікроконтролера ширина 0,25...0,30 мм.

У верхній частині плати створено окрему зону високовольтної ділянки з BT138 та MOC3063 (позначка DANGER!).

Генерація топології залитої землі (Ground Plane) значно покращує: екранування, відведення тепла, стабільність логічних сигналів.

6. Маркування плати (Silkscreen). Наносяться:

– назви компонентів LM358, BT138, IRFZ44N;

– індикатори напруг 230V, 24V+, GND;

– написи DANGER!, DISPLAY, BUTTON, POTENTIOMETER;

– контури компонентів.

7. 3D-перегляд плати. EasyEDA має вбудований 3D рендер, який показує, як плата буде виглядати після виготовлення.

8. Перевірка правил проектування (DRC). DRC дозволяє знайти помилки:

– занадто близькі доріжки;

– конфлікти між дизайном і футпринтами;

– несполучені мережі.

9. Генерація виробничих файлів (Gerber Files). Після завершення проекту:

– генеруються Gerber-файли;

– вивантажуються або надсилаються на JLCPCB.

РОЗДІЛ 4

СПЕЦІАЛЬНА ЧАСТИНА

4.1 Способи програмування мікроконтролера ATMEGA328

Мікроконтролер ATMega328 може програмуватися безпосередньо в середовищах Arduino IDE, CodeVisionAVR, а також за допомогою утиліти AVRDUDE. У разі використання AVRDUDE прошивку необхідно попередньо зкомпілювати в Arduino IDE у формат .hex. Після цього мікроконтролер можна прошивати через інтерфейс ISP.

Для виконання прошивки безпосередньо з Arduino IDE, аналогічно до стандартних плат Arduino та їх сумісних модулів, мікроконтролер повинен мати попередньо встановлений завантажувач (bootloader), що записується через ISP. Надалі програмування можливе через USB-TTL перетворювач. Коректна робота програмування через USB-TTL потребує наявності лінії DTR, яка забезпечує автоматичне скидання мікроконтролера та запуск bootloader для приймання прошивки. Якщо ця лінія відсутня, то на початку процедури завантаження необхідно вручну виконати скидання мікроконтролера за допомогою натискання кнопки Reset. За певної навички прошивання AVR-мікроконтролерів таким способом у середовищі Arduino IDE також є цілком ефективним навіть без DTR-виводу.

Запис завантажувача (bootloader) здійснюється через інтерфейс ISP. На ринку доступні мікроконтролери з уже попередньо прошитим завантажувачем; вони коштують дещо дорожче за повністю «порожні» мікросхеми, проте дозволяють уникнути додаткових операцій із налаштуванням ISP-програмактора, зміною FUSE-бітів та ручним завантаженням bootloader.

USB-TTL перетворювач необхідний не лише для запису скетчів із Arduino IDE, але й для обміну даними з мікроконтролером через послідовний інтерфейс. Оскільки єдиним ефективним способом налагодження в Arduino IDE є виведення діагностичної інформації в Serial-монітор, наявність USB-TTL є обов'язковою. Таким чином, для повноцінної роботи з ATMega328

доцільно мати як ISP-програмактор, так і USB-TTL перетворювач. Розглянемо детальніше способи програмування мікроконтролера ATMEGA328.

4.2 Програмування ATmega328P за допомогою Arduino

ATmega328P можна прошити за допомогою UART чи SPI. Ми розглянемо прошивку через SPI, при цьому можна не використовувати завантажувач (bootloader) (рис. 4.1).

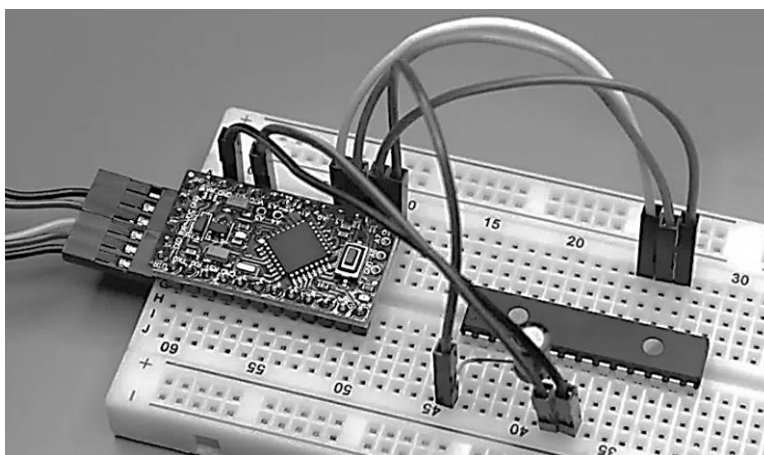


Рисунок 4.1 – Схема підключення Arduino до ATmega328P

У таблиці 4.1 наведені відповідні виводи мікроконтролера Arduino та ATmega328P, які потрібно з'єднати для прошивки через SPI.

Таблиця 4.1 – Піни для з'єднання мікроконтролера Arduino та ATmega328P

Arduino	ATmega328P
GND	GND
3,3 V	Vcc
13	PB5 (SCK)
12	PB4 (MISO)
11	PB3 (MOSI)
10	PC6 (RESET)

Для забезпечення стабільного процесу прошивки мікроконтролера ATmega328P додатково рекомендується підключати конденсатор ємністю 10 мкФ. Довгий (позитивний) вивід конденсатора необхідно з'єднати з лінією RESET мікроконтролера, а короткий (негативний) вивід – підключити до GND. Така конфігурація сприяє запобіганню мимовільним перезавантаженням під час програмування.

Підготовка плати Arduino для використання її як ISP-програматора включає такі основні етапи:

- підключення плати Arduino до персонального комп'ютера;
- запуск програмного середовища Arduino IDE;
- завантаження до плати стандартного скетчу ArduinoISP;
- вибір відповідної моделі плати Arduino у меню Tools → Board;
- вибір активного послідовного порту у меню Tools → Port;
- ініціювання процесу прошивки скетчу натисканням кнопки «Завантаження» на панелі керування Arduino IDE.

Після успішного запису скетчу плата Arduino може використовуватися як повноцінний ISP-програматор.

Процедура встановлення завантажувача в мікроконтролер ATmega328P включає послідовне виконання таких операцій:

1. Додавання підтримки ATmega328P у середовище Arduino IDE у меню Arduino → Preferences необхідно вписати URL: https://mcudude.github.io/MiniCore/package_MCUdude_MiniCore_index.json – у поле Additional Boards Manager URLs, після чого перейти до Інструменти → Плата → Менеджер плат, знайти пакет MiniCore та встановити його.

2. Вибір моделі мікроконтролера: у меню Інструменти → Плата слід обрати MiniCore → ATmega328.

3. Конфігурування параметрів мікроконтролера у меню Інструменти:

- Clock → Internal 8 MHz;
- BOD → BOD 1,8V;
- EEPROM → EEPROM retained;
- Compiler LTO → LTO disabled;

– Bootloader → No bootloader.

4. Вибір програматора (у меню Інструменти → Програматор потрібно встановити режим Arduino as ISP (MiniCore)).

5. Запис завантажувача (командою Інструменти → Записати завантажувач ініціюється процес програмування). Після його завершення в нижній частині вікна Arduino IDE з'являється повідомлення «Запис завантажувача завершено».

Завантаження скетчу в мікроконтролер ATmega328P здійснюється за такою послідовністю дій:

– створення нового скетчу в Arduino IDE та вставлення до нього необхідного програмного коду;

– вибір плати ATmega328 у меню Інструменти → Плата та, за потреби, виконання її конфігурування;

– вибір програматора через Інструменти → Програматор, установивши режим Arduino as ISP (MiniCore);

– ініціювання прошивки скетчу командою Скетч → Завантажити через програматор.

4.3 Програмування ATmega328P за допомогою CodeVisionAVR

Розглянемо можливість прошивки ATmega328P за допомогою CodeVisionAVR. Це інтегроване середовище розробки (IDE) з вбудованим C-компілятором для мікроконтролерів AVR, що включає зручний редактор, автоматичний генератор коду CodeWizardAVR, велику бібліотеку периферії та інструменти для програмування й налаштування мікроконтролерів у одному середовищі (рис. 4.2).

Основні характеристики CodeVisionAVR:

– оптимізований C-компілятор для AVR, що створює швидкий і компактний код;

– зручне IDE з підсвіткою синтаксису, автодоповненням і керуванням проектами;

- codeWizardAVR – автоматичний генератор стартового коду для периферії;
- вбудовані бібліотеки для дисплеїв, карт пам'яті, інтерфейсів та давачів;
- можливість програмування AVR прямо з IDE (прошивка, Fuse-біти, перевірка пам'яті).

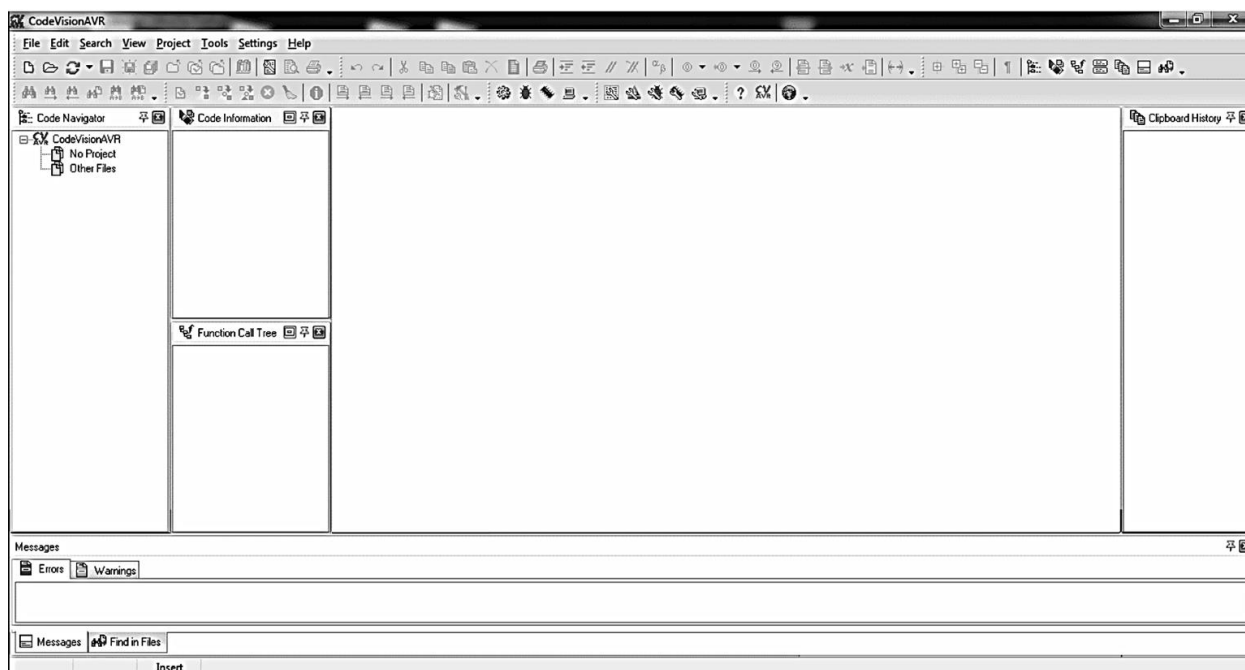


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд програмного середовища CodeVisionAVR

Розглянемо послідовність дій, які потрібно здійснити для програмування ATmega328P за допомогою CodeVisionAVR.

Спочатку потрібно створити новий проєкт (File → New → Project), далі – здійснити вибір мікроконтролера ATmega, ATtiny, ATxmega тощо (рис. 4.3, а).

Також, під час вибору мікроконтролера, рекомендується здійснити налаштування периферії через CodeWizardAVR (Tools → CodeWizardAVR). У вікні (рис. 4.3, а) є можливість вибору параметрів: частота тактова (F_CPU); налаштування портів вводу/виводу; таймери, переривання; UART, SPI, I²C; АЦП, ШІМ.

Після закінчення налаштування мікроконтролера створюємо проєкт File

– Generate, Save and Exit (рис. 4.3, б). Програма створює стартовий файл з правильними регістрами та ініціалізацією. Це дозволяє економити багато часу, тому, що не потрібно вручну писати регістри. Після генерації ми отримаємо файл, який відкривається в редакторі (рис. 4.4).

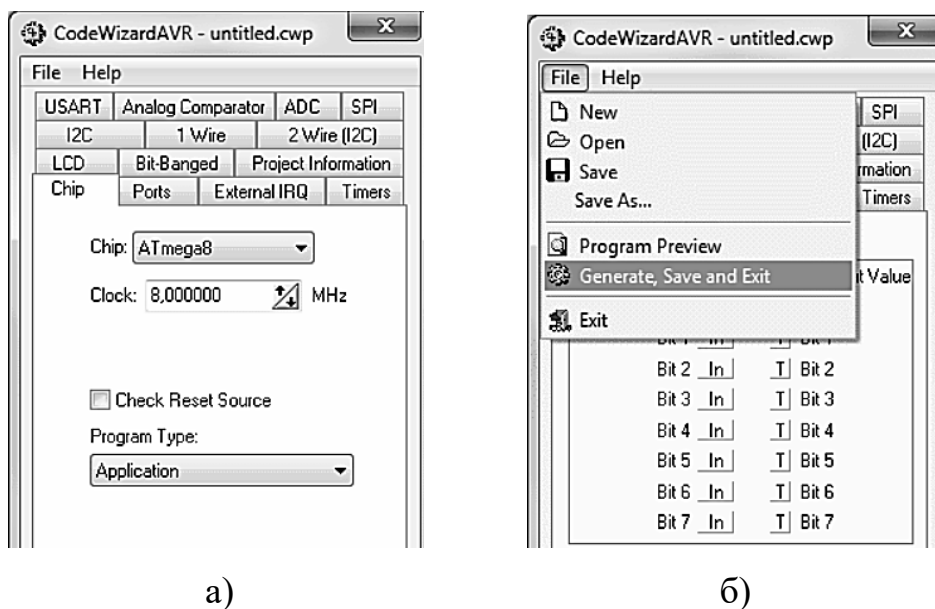


Рисунок 4.3 – Вікно вибору мікроконтролера (а) та підтвердження нового проєкту (б)

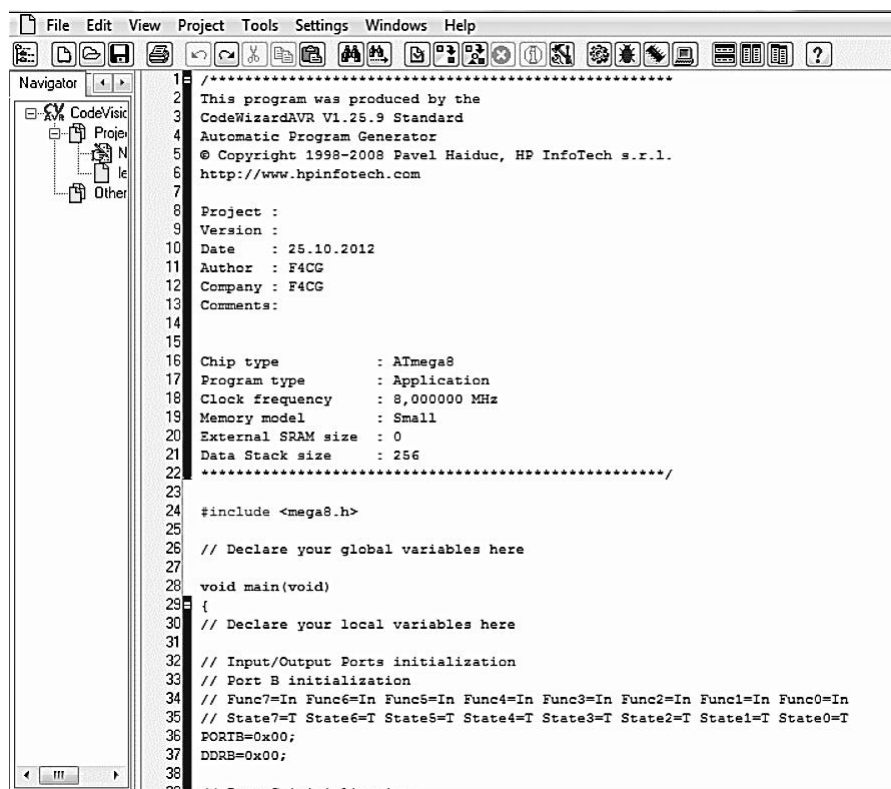


Рисунок 4.4 – Вікно для редагування коду

У CodeVisionAVR є свої бібліотеки: для LCD: <lcd.h>; для I2C: <i2c.h>; для SPI: <spi.h>; для графічних TFT/OLED: <glcd.h>; для SD-карт: <sdcard.h>.

Ми можемо використовувати в коді потрібні заголовки і використовувати готові функції.

Після того як код готовий, потрібно виконати: Build → Make або клавіша F9. Програма CodeVisionAVR:

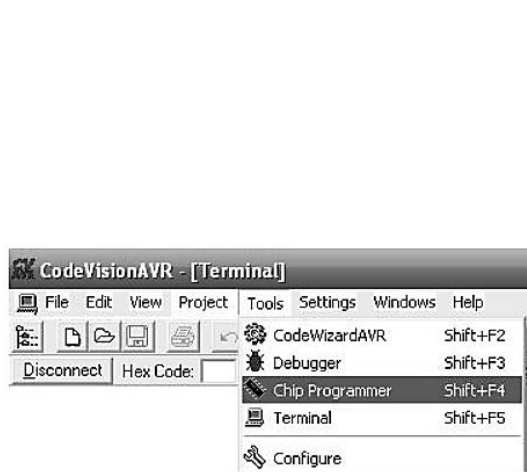
- компілює C-код;
- збирає проект;
- генерує HEX-файл.

У повідомленнях з'являється інформація про те скільки місця займає програма у Flash; скільки RAM використано; чи немає помилок.

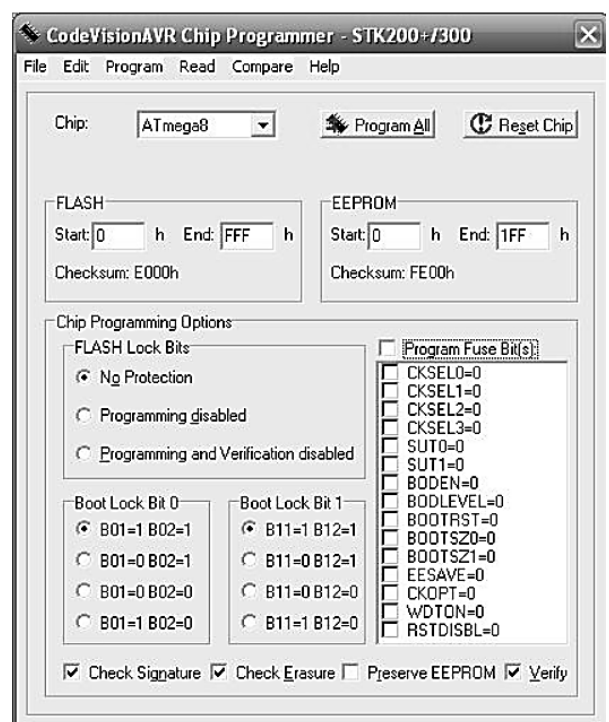
CodeVisionAVR вмiє програмувати мікроконтролери AVR нап'ямую. Для цього потрібно під'єднати програматор (USBasp, AVRISP mkII, Dragon, STK500, тощо) та відкрити Tools → Chip Programmer (рис. 4.5, а).

У вікні програмування вибираємо файл прошивки – HEX-файл (File → Load FLASH), при необхідності налаштовуємо Fuse-біти (рис. 4.5, б).

Мікроконтролер прошивається без виходу з IDE.



а)



б)

Рисунок 4.5 – Вікна вибору Chip Programmer (а) та зміни параметрів (б)

Після прошивки мікроконтролер готовий до роботи. Якщо він некоректно виконує свої функції то потрібно повернутися до коду, внести відповідні зміни і знову здійснити компілювання.

В рамках виконання кваліфікаційної роботи ми пропонуємо програмування мікроконтролера ATmega328P здійснювати через Arduino as ISP / USBasp → з компіляцією в Arduino IDE.

Розроблений код для програмування мікроконтролера ATmega328P наведений у додатку Б.

ВИСНОВКИ

1. Аналіз інформаційних джерел показав, що класичні аналогові схеми на тиристорах і симісторах працюють ефективно, але мають суттєві обмеження (чутливі до шумів, нестабільні при мережевих завадах, неточне регулювання відсутня корекція похибок). Тому при проектуванні високоточних температурних регуляторів доцільно використовувати мікроконтролери, які дозволяють реалізувати цифровий ПІД-контур, проводити фільтрацію шумів, спрощувати налаштування та підвищувати точність регулювання до $\pm 0,1$ °C.

2. Встановлено, що сучасні паяльні станції суттєво відрізняються за конструктивними рішеннями, які визначають їх теплову ефективність, забезпечують швидку теплопередачу й стабільність температури під час роботи з різними типами компонентів. Температура на давачі може суттєво відрізнятися від температури робочого кінця жала, а стабільність температури в динамічних процесах залежить від геометрії жала, його матеріалів та теплового навантаження, тому оцінка теплових властивостей повинна виконуватися з урахуванням реальних експлуатаційних режимів

3. Під час проектування терморегулятора було підтверджено, що застосування мікроконтролера ATmega328P дозволяє значно розширити функціональні можливості паяльної станції та забезпечити високу точність контролю температури. Використання ПІД-алгоритму забезпечило стабільну роботу нагрівачів та мінімальне відхилення від встановленої температури.

4. Програмування ATmega328P через Arduino IDE та режим Arduino as ISP є доступним і ефективним способом прошивки, який дозволяє працювати як із завантажувачем, так і без нього, проте потребує наявності USB-TTL перетворювача для подальшого налагодження та обміну даними.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Тепловий баланс. URL: http://teploviyvucha.blogspot.com/p/blog-page_10.html (дата звернення: 20.09.2025 р.).
2. Як працює резистивний нагрівач? URL: <http://ua.superbheating.com/info/how-does-resistance-heater-work-98147461.html> (дата звернення: 21.09.2025 р.).
3. Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання. XIII Міжнародна науково-практична інтернет-конференція молодих учених та студентів «Актуальні проблеми автоматизації та управління». м. Луцьк. ІВВ ЛНТУ, 28 листопада 2025 року. С. 134-137.
4. Автоматичне регулювання та управління технологічними процесами. URL: <https://www.dstu.dp.ua/Portal/Data/5/7/2-7-kl31.pdf> (дата звернення: 25.09.2025 р.).
5. Схема регулятора температури паяльника на тиристорі. URL: <https://liabumb.mirab.v.ua/articles/shema-reguljatora-temperaturi-pajalnika-na.html> (дата звернення: 30.09.2025 р.).
6. Регулятор температури паяльника на симісторі. URL: <https://wenn.jek.v.ua/articles/reguljator-temperaturi-pajalnika-na-simistori.html> (дата звернення: 30.09.2025 р.).
7. Learnabout Electronics. URL: https://learnabout-electronics.org/Semiconductors/thyristors_64.php (дата звернення: 04.10.2025).
8. HakkoUSA Knowledge Base. User Manuals URL: <https://kb.hakkousa.com/UserManuals/> (дата звернення: 06.10.2025 р.).
9. Kurtz Ersa. URL: <https://kurtzersa.com/> (дата звернення: 07.10.2025).
10. Weller soldering equipment for your best soldering performance. URL: <https://www.weller-tools.com/us/en> (дата звернення: 08.10.2025 р.).
11. Soldering Stations. URL: <https://paceworldwide.com/product-catalog/soldering-stations> (дата звернення: 08.10.2025 р.).
12. How to Solder Wires: Comprehensive Guide for Engineers. URL:

<https://www.wevolver.com/article/how-to-solder-wires-comprehensive-guide-for-engineers> (дата звернення: 09.10.2025 р.).

13. Theory and Application Of Radio-frequency Heating. URL: <https://archive.org/details/dli.ernet.5840> (дата звернення: 10.10.2025 р.).

14. Жало, наконечник Relife RL-T12-XS-I. URL: https://vngsm.com.ua/ua/p2085710480-zhalo-nakonechnik-relife.html?srsId=AfmBOopvEN31Je6qbVkAtV-4QCYAakaKalCwcnMRzKHN_C726TezN-lx. (дата звернення: 15.10.2025 р.).

15. Термоповітряна паяльна станція Lukey 852D+FAN. URL: <https://masteram.com.ua/uk/hot-air-soldering-station-lukey-852dplusfan/?srsId=AfmBOooknJJlKlpUkgyxL1UbKXIHjp-BQPxwoj6c7o18RxSdrRMQe40j> (дата звернення: 15.10.2025 р.).

16. ATmega48A/PA/88A/PA/168A/PA/328/P. URL: <https://storage.googleapis.com/media.amperka.com/products/avr-atmega328/media/atmega328p-datasheet.pdf> (дата звернення: 20.10.2025 р.).

17. LM358 IC Pin Configuration, Working, LM358 Circuit Examples. URL: electronicclinic.com/lm358-ic-pin-configuration-working-lm358-circuit-examples/ (дата звернення: 25.10.2025 р.).

18. MOC3063 Triac Coupler Datasheet. URL: <https://www.futurlec.com/LED/MOC3063.shtml> (дата звернення: 25.10.2025 р.).

19. IRFZ44N: The Ultimate Guide to This Powerful MOSFET Transistor. URL: <https://www.nextpcb.com/blog/irfz44n> (дата звернення: 25.10.2025 р.).

20. BT138 12A 500V TRIAC – Datasheet. URL: <https://www.circuits-diy.com/bt138-12a-500v-triac-datasheet/> (дата звернення: 25.10.2025 р.).

21. L7812CV Voltage Regulator: Pinout, Datasheet, and Schematic Diagram. URL: <https://www.utmel.com/components/l7812cv-voltage-regulator-pinout-datasheet-and-schematic-diagram?id=138> (дата звернення: 26.10.2025 р.).

22. Electronoff. Електронні компоненти та обладнання. URL: <https://electronoff.ua/ua/pages/about-electronoff> (дата звернення: 26.10.2025 р.).

ДОДАТКИ

Додаток А

Тези доповіді на конференції (копія)

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students

об'єктно-орієнтовані технології

ЕОМ

КОНТРОЛЕР

ВИРОБНИЧІ ПРОЦЕСИ

МІКРОПРОЦЕСОРНА ТЕХНІКА

**ACTUAL PROBLEMS
OF AUTOMATION AND CONTROL**

conference materials

АСУ

ІНФОРМАЦІЙНА БАЗА

АСУ ТП

КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ

ЕОМ

Інформаційні системи

Issue № 13**Lutsk - 2025**

СЕКЦІЯ «МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ»

Крупський О. В., Приходько О. С., Вавринюк К. В. Розробка інструменту для генерації анотованих датасетів для навчання AI-агентів	83
Лишук В., Крутий П., Антонюк В. Найпростіша математична модель однофазного випростувача	86
Мищенко Д. О. Оцінка соціально-економічних переваг впровадження систем управління на базі DC-мікромереж у сільських населених пунктах з альтернативними джерелами енергії	89
Нечипорук Р. О. Система інтелектуальної діагностики стану електроенергетичного обладнання на основі багатосенсорних даних та гібридних моделей штучного інтелекту	92
Стьопкін В. В., Білий В. В., Морозов М. В. Розробка математичної моделі електропривода постійного струму зі спостерігачем стану та пружними ланками	94
Юрченко Ю. В, Заковоротний О. Ю. Підготовка та аналіз джерел фінансових даних, як початковий етап стохастичного моделювання часових рядів методами машинного навчання	99

СЕКЦІЯ «МЕХАТРОНІКА ТА РОБОТИЗОВАНІ СИСТЕМИ»

Гончар А. В., Охримович М. Б. Вплив технологічних факторів на кінематичну точність циліндричних зубчатих коліс	104
Павлович А. О. Удосконалення комбінованих захоплюючих пристроїв та особливості їх проектування	108
Слабкий А. В., Котик С. І. Аналіз конструкцій та перспективи модернізації універсальних випробувальних машин	114

СЕКЦІЯ «АВТОМАТИКА В ЕЛЕКТРОНІЦІ ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ»

Герман Б. А., Бартошик О. В., Цюпяшук Я. В. Дистанційне керування сигналізацією за допомогою модуля GSM	117
Євсюк М. М., Ковалюк Н. В. Розроблення мікроконтролерного терміналу для автоматизованого керування системами вуличного освітлення	121
Заблюцький В. Ю., Гикавий С. В. Розроблення системи відеоспостереження промислового підприємства	124
Лишук В., Денисюк К. Застосування принципів спектрального ущільнення для збільшення пропускної здатності оптоволокна	131
Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О. Аналіз методів регулювання температури для паяльного обладнання	134
Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В. Розроблення бездротового комунікаційного пристрою на основі STM32 та LoRa	137
Хвищун М. В., Сидорук В. В., Хвищун Д. М., Бернасюк М. В. Розроблення інтелектуальної системи керування домашнім опаленням з використанням Raspberry Pi 4	142
Шумік А. О., Шибенюк Р. А., Захарчук М.Д., Хвищун М. В. Система розпізнавання голосових команд на базі Raspberry Pi	148
Якимчук Н. М., Карпінський Н. К. Організація UART-комунікації в STM32 для системи комутації кінцевих пристроїв	152
Якимчук Н. М., Лишук В. В. Методологія інтегрованого моделювання та спільного проектування в сучасних електронних системах	156

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

УДК 681.514

Лотоцький В. І., Мельник О. В., Власик О. О.

Луцький національний технічний університет

E-mail: s.moroz@lntu.edu.ua

АНАЛІЗ МЕТОДІВ РЕГУЛЮВАННЯ ТЕМПЕРАТУРИ ДЛЯ ПАЯЛЬНОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто проблему забезпечення точного та стабільного регулювання температури паяльного обладнання, що є критичним для отримання якісних паяних з'єднань та запобігання пошкодженню електронних компонентів. Проаналізовано особливості теплових процесів у нагрівачах паяльників, їхню нелінійність, інерційність та вплив зовнішніх збурень. Проведено огляд сучасних методів регулювання температури – від систем без зворотного зв'язку до П, ІІ та ІІІ-регуляторів, а також розглянуто апаратні й мікроконтролерні засоби їх реалізації. Виконано порівняльний аналіз точності, складності та динамічних характеристик різних підходів. Показано, що найвищу ефективність забезпечують мікроконтролерні системи зі зворотним зв'язком на основі ІІ та ІІІ алгоритмів. Зроблено висновок про перспективність застосування адаптивних цифрових регуляторів для підвищення стабільності та швидкодії сучасних паяльних станцій.

Ключові слова: температура, закони регулювання, методи регулювання температури, паяльне обладнання.

V. Lototsky, O. Melnyk O. Vlasyk. Analysis of temperature control methods for soldering equipment. The article considers the problem of ensuring accurate and stable temperature control of soldering equipment, which is critical for obtaining high-quality solder joints and preventing damage to electronic components. The features of thermal processes in soldering iron heaters, their nonlinearity, inertia and the influence of external disturbances are analyzed. A review of modern temperature control methods is conducted - from systems without feedback to P, PI and PID regulators, and hardware and microcontroller means of their implementation are also considered. A comparative analysis of the accuracy, complexity and dynamic characteristics of different approaches is performed. It is shown that the highest efficiency is provided by microcontroller systems with feedback based on PI and PID algorithms. A conclusion is made about the prospects of using adaptive digital regulators to increase the stability and speed of modern soldering stations.

Keywords: temperature, regulation laws, temperature control methods, soldering equipment.

Постановка проблеми.

Паяльне обладнання широко застосовується у радіоелектронному монтажі, ремонті друкованих плат, мікропайці та виробничих процесах. Одним із ключових чинників, що визначає якість паяння, є стабільність та точність підтримання температури нагрівального елемента [1-3]. Нестабільність температури призводить до низки негативних наслідків: погіршення змочуваності припою, пошкодження електронних компонентів перегрівом, формування холодних або слабких паяних з'єднань. Отже, правильна реалізація системи регулювання температури паяльників має суттєве практичне значення.

Сучасні паяльні станції використовують різні методи регулювання: від простих терморегуляторів, таких як фазові або імпульсні регулятори потужності, до повноцінних систем на базі ІІІ-регуляторів із високоточними датчиками температури [4-6]. Кожен метод має свої переваги, обмеження та області застосування. Крім того, засоби реалізації регуляторів можуть бути як апаратними (аналогові схеми), так і мікропроцесорними, що суттєво впливає на функціональні можливості системи.

Точність керування температурою паяльника є складною інженерною задачею через такі чинники: нелінійність об'єкта керування; постійно змінне теплове навантаження; похибки датчиків температури; вплив мережевої напруги; вимоги до енергоспоживання.

Проблема полягає у виборі та реалізації методу регулювання, який забезпечить: достатню точність підтримання температури; швидку реакцію на зміни теплового навантаження; мінімальні коливання температури; стійкість системи в широкому діапазоні умов; низьку вартість і технологічність реалізації (за потреби).

Огляд актуальних досліджень з проблеми.

Системи регулювання температури широко застосовуються у промисловості, побутових приладах і науковому обладнанні. Для паяльних інструментів характерне використання двох груп

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

регуляторів [7-11].

Перша група – системи без зворотного зв'язку (відкриті системи). Такі регулятори контролюють лише подану потужність нагрівача, не вимірюючи фактичну температуру. До них належать: фазові регулятори на симісторах або тиристорах; імпульсні регулятори на основі широтно-імпульсної модуляції (ШІМ). Вони забезпечують лише зміну середньої потужності, не гарантують стабільної температури та не компенсують зовнішні збурення.

Друга група – системи зі зворотним зв'язком (закриті системи) (рисунк 1). Використовують датчики температури: термопари (тип К, тип J); терморезистори (RTD, наприклад Pt100); термістори (NTC); датчики Холла у спеціалізованих жалах Hakko/T12. Такі системи можуть реалізувати простий релейний контроль або складніші закони регулювання.



Рисунок 1 – Узагальнена схема термостатування зі зворотним зв'язком

Формулювання цілей статті.

У контексті терморегулювання потрібно провести аналіз класичних законів керування (П, ПІ, ПІД) та методів регулювання. Також варто розглянути схемотехнічні рішення: фазових регуляторів, регуляторів на симісторах, широтно-імпульсних регуляторів і мікроконтролерних систем.

Метою цієї роботи є аналіз методів температурного регулювання, порівняння їх характеристик та дослідження технічних засобів, які застосовуються для створення регуляторів паяльного обладнання.

Основна частина.

Проаналізуємо закони регулювання.

Пропорційний (П-регулятор) формує керуючий сигнал, пропорційний відхиленню температури від заданої. Переваги: простота; висока швидкість реакції. Недоліки: статична помилка; можливі коливання при високому коефіцієнті підсилення.

Пропорційно-інтегральний (ПІ-регулятор) додає інтегральну складову, що усуває постійну похибку. Переваги: висока точність; стабільність. Недоліки: більша інерційність; складніша настройка.

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД-регулятор) враховує швидкість зміни температури (диференціальну складову), що зменшує перерегулювання та покращує динаміку. Переваги: найкраща якість регулювання; мінімальні коливання. Недоліки: потребує точного налаштування; чутливий до шумів датчика.

Розглянемо поширені технічні засоби реалізації терморегулювання.

Фазові регулятори на симісторах здійснюють плавне регулювання потужності шляхом контролю кута відкриття симістора. Переваги: низька вартість; простота схеми. Недоліки: високий рівень електромагнітних завад; непридатні для прецизійного регулювання температури.

Імпульсні регулятори з ШІМ керують нагрівачем шляхом чергування увімкнених та вимкнених інтервалів. Переваги: низькі втрати; стабільна робота. Недоліки: нерівномірний нагрів у деяких режимах; потребують фільтрації завад.

Мікроконтролерні регулятори дають змогу реалізувати складні алгоритми, адаптивне керування, калібрування датчиків, автоматичні режими. Переваги: висока точність; цифрова фільтрація сигналів; можливість реалізації ПІД. Недоліки: складніша розробка; вища собівартість.

Нагрівач паяльника є нелінійним тепловим об'єктом зі значною інерційністю. Перехідні процеси відбуваються протягом: 1-3 секунд – для жала картриджного типу (Hakko T12 тощо); 10-30 секунд – для класичних паяльників з ніхромовим нагрівачем.

Модель можна описати аперіодичною ланкою першого або другого порядку. Основні фактори, що ускладнюють регулювання: змінний тепловідвід на жало; шум у сигналі термопари; залежність опору нагрівача від температури; зміна теплових параметрів під час старіння.

Проведемо порівняльний аналіз методів регулювання (таблиця 1).

Метод регулювання без зворотного зв'язку полягає в тому, що зміна потужності прямо

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

впливає на кінцеву температуру, але не враховує зовнішніх збурень. Переваги: дешевизна; мінімальна складність. Недоліки: температура нестабільна; неможливо встановити точне значення; висока залежність від напруги мережі. Цей метод підходить лише для побутових паяльників і не використовується у професійних станціях.

Метод релейного регулювання (двопозиційний закон) полягає в періодичному вмиканні та вимиканні нагрівача, що утворює температурну гістерезисну петлю. Переваги: дуже проста реалізація; стабільність у межах 5–30 °С. Недоліки: сильні коливання температури, непридатність для прецизійної пайки SMD.

Метод пропорційного регулювання плавно змінює подану потужність залежно від помилки. Переваги: швидка реакція; менші коливання. Недоліки: статична похибка, що особливо критично при зміненому тепловому навантаженні.

Метод ПІ-регулювання полягає в тому, що інтегральна складова поступово компенсує залишкове відхилення. Переваги: висока точність (1–3 °С); мінімальні перерегулювання. Недоліки: складніше налаштування; можливість інерційних коливань при поганих параметрах. ПІ-регулятори є найпоширенішими у цифрових паяльних станціях.

Метод ПІД-регулювання враховує динаміку зміни температури (рисунки 2). Переваги: найточніший метод; швидка реакція на тепловий удар (коли жало торкається масивного провідника); мінімальне перерегулювання. Недоліки: потреба у фільтрації диференціальної складової; потребує правильного підбору коефіцієнтів. ПІД-регулятори застосовуються у висококласних станціях для ремонту мікроелектроніки.

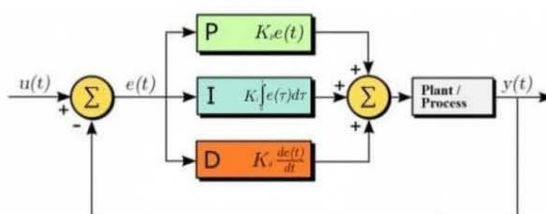


Рисунок 2 – Блок схема ПІД регулятора

Таблиця 1 - Порівняння підходів методів регулювання

Метод	Точність	Складність	Реакція на навантаження	Собівартість	Область застосування
Без зворотного зв'язку	Низька	Дуже низька	Немає компенсації	Найнижча	Побутові паяльники
Релейний	Середня	Низька	Повільна	Низька	Недорогі станції
ПІ-регулятор	Середня	Низька	Середня	Низька	Прості системи
ПІІ-регулятор	Висока	Середня	Висока	Середня	Професійні станції
ПІД-регулятор	Дуже висока	Висока	Дуже висока	Вища	Найякісніше професійне обладнання

З аналізу видно, що найкращі результати дають системи зі зворотним зв'язком на основі ПІ та ПІД законів регулювання, реалізовані на мікроконтролерах.

Висновки.

У статті проведено аналіз методів регулювання температури та засобів реалізації регуляторів, що застосовуються у сучасному паяльному обладнанні. Встановлено, що вибір методу регулювання суттєво впливає на стабільність температури, якість паяних з'єднань і довговічність компонентів.

Системи без зворотного зв'язку не забезпечують необхідної точності температури та не компенсують змінне теплове навантаження, тому придатні лише для найпростіших задач. Релейне керування покращує стабільність, але все ще має значні коливання температури та непридатне для високоточного паяння. Пропорційне та ПІ-регулювання значно підвищують якість регулювання, при цьому ПІ-алгоритм дозволяє повністю усунути статичну похибку. ПІД-регулятор є найбільш

International Scientific and Practical Conference of Young Scientists and Students "Actual Problems of Automation and Control"

ефективним завдяки врахуванню швидкості зміни температури та забезпеченню найкращої динаміки. Мікроконтролерні регулятори дозволяють реалізувати точне вимірювання, цифрову фільтрацію шумів і складні алгоритми керування, що робить їх оптимальним рішенням для високоточного паяльного обладнання.

З технічної точки зору, найраціональніше поєднання — це використання швидкого датчика температури (термопари або датчика вбудованого типу) разом з ПІ або ПІД алгоритмом на базі мікроконтролера.

Таким чином, перспективним напрямом удосконалення паяльного обладнання є застосування адаптивних цифрових регуляторів, здатних компенсувати змінні теплові навантаження, прогнозувати поведінку системи та забезпечувати високоточне підтримання температури в реальних умовах експлуатації.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Аналогові дані, цифрові дані. Дія і застосування аналоговоцифрових і цифро-аналогових перетворювачів, введення і виведення інформації URL: https://elib.lntu.edu.ua/sites/default/files/elib_upload/16,05/other/tema_6_analogovi_dani_czifrovi_dani_diya_i_zastosuvannya_analogovo-czifrovix_i_czifro-analogovix_peretvoryuvachiv_vvedennya_i_vivedennya_informacziyi.pdf (дата звернення 18.11.2025р.).
2. Оптопара із симісторним виходом MOC3063 URL: <https://www.mini-tech.com.ua/ua/optosimistor-moc3063>(дата звернення 19.11.2025р.).
3. Якимчук Н. М., Цизь Т. П., Оксентюк Б. В. Апаратне забезпечення методів температурного регулювання паяльної станції Actual Problems of Automation and Control.2023 №11. С 263-268.
4. Adamy J. Nonlinear Systems and Controls Berlin: Springer Vieweg, 2022. – 754 p.
5. ATMEGA8 Datasheet URL: <https://html.alldatasheet.com/html-pdf/80247/ATMEL/ATMEGA8/1305/10/ATMEGA8.html> (дата звернення 18.11.2025р.).
6. Developing a self-regulating soldering iron based on induction heating URL: <https://www.redalyc.org/journal/496/49645153021/html/#gf4> (дата звернення 8.11.2025р.).
7. Hunter Scott. Designing Electronics that Work. Digital version, v1. 2021. 311 p.
8. Dugdale, J.S. The electrical Properties of Metals and Alloys. Edward Arnold, London. 2020
9. Jäckle, J. Über die Ursache der Thermospannung. Fakultät für Physik, Universität Konstanz. 2020
10. Kanimba E. Modeling of a Thermoelectric Generator Device/ Zhiting Tian. Intechopen.com. 2021.
11. Цирульник С.М. Лисенко Г.Л. Проектування мікропроцесорних систем. Вінниця: ВНТУ, 2021 191с.

УДК 621.396.67:004.383.4

Хвищун М. В., Кречик А. П., Хвищун Д. М., Рубльов В. В.

Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, Україна

РОЗРОБЛЕННЯ БЕЗДРОТОВОГО КОМУНІКАЦІЙНОГО ПРИСТРОЮ НА ОСНОВІ STM32 ТА LORA

У роботі представлено розроблення енергоефективного бездротового комунікаційного вузла на основі мікроконтролера сімейства STM32 та радіомодуля LoRa SX1278, призначеного для передавання телеметричних даних на великі відстані у системах Інтернету речей (IoT). Актуальність дослідження визначається зростаючою потребою у малопотужних автономних пристроях, здатних забезпечувати надійний радіозв'язок у складних електромагнітних та географічних умовах без застосування промізкої інфраструктури.

Проаналізовано обмеження традиційних бездротових технологій (Wi-Fi, BLE, ZigBee), які характеризуються недостатньою дальністю зв'язку або підвищеним енергоспоживанням, що ускладнює їх застосування у розподілених сенсорних мережах. Показано доцільність використання технології LoRa (Long Range), яка забезпечує передавання даних на відстань до кількох кілометрів при мінімальних витратах енергії, що робить її перспективною для систем промислового моніторингу, аграрних об'єктів, розумного міста та екологічного контролю.

Додаток Б

Скетч для функціонування мікроконтролерного регулятора температури

```
#include <LiquidCrystal.h>
#include <PID_v1.h>

LiquidCrystal lcd(13, 12, 11, 10, 9, 8);

// Паяльник
int pinSolderOut = 5;
int pinSolderIn = A4;
int pinSolderTCouple = A3;
int pinSolderButton = 2;

// Фен
int pinHotAirOut = 6;
int pinHotAirIn = A2;
int pinHotAirTCouple = A1;
int pinHotAirCoolerOut = 3;
int pinHotAirCoolerIn = A0;
int pinHotAirButton = 4;

// Додаткові змінні
bool solderOn = false;
bool hotairOn = false;

unsigned long lastBtn1 = 0;
unsigned long lastBtn2 = 0;

// Фільтрація АЦП
int filteredADC(int pin) {
    long s = 0;
    for (int i = 0; i < 15; i++) {
        s += analogRead(pin);
        delayMicroseconds(300);
    }
    return s / 15;
}

// ----- PID ДЛЯ ПАЯЛЬНИКА -----
double solderSetpoint, solderInput, solderOutput;
// PID коефіцієнти (попередньо налаштовані)
double kp_s = 18, ki_s = 0.8, kd_s = 80;
PID pidSolder(&solderInput, &solderOutput, &solderSetpoint, kp_s, ki_s, kd_s,
DIRECT);

// ----- PID ДЛЯ ФЕНА -----
double hotairSetpoint, hotairInput, hotairOutput;
double kp_h = 25, ki_h = 1.0, kd_h = 90;
PID pidHotAir(&hotairInput, &hotairOutput, &hotairSetpoint, kp_h, ki_h, kd_h,
DIRECT);
```

```

// Символ °C
uint8_t char_cel[8] = {
  B00111,
  B00101,
  B00111,
  B00000,
  B00000,
  B00000,
  B00000,
  B00000
};

void setup() {
  pinMode(pinSolderOut, OUTPUT);
  pinMode(pinSolderButton, INPUT);
  pinMode(pinHotAirOut, OUTPUT);
  pinMode(pinHotAirButton, INPUT);
  pinMode(pinHotAirCoolerOut, OUTPUT);

  lcd.begin(16, 2);
  lcd.createChar(1, char_cel);

  // Привітання
  lcd.print("SOLDER STATION");
  lcd.setCursor(0, 1);
  lcd.print("PID ver 1.0");
  delay(2000);
  lcd.clear();

  // Налаштування PID
  pidSolder.SetOutputLimits(0, 255);    // PWM
  pidHotAir.SetOutputLimits(0, 255);

  pidSolder.SetMode(AUTOMATIC);
  pidHotAir.SetMode(AUTOMATIC);
}

void loop() {

  // ----- Зчитування -----
  solderSetpoint = map(filteredADC(pinSolderIn), 0, 1023, 0, 480);
  hotairSetpoint = map(filteredADC(pinHotAirIn), 0, 1023, 0, 480);

  solderInput = map(filteredADC(pinSolderTCouple), 50, 850, 0, 480);
  hotairInput = map(filteredADC(pinHotAirTCouple), 50, 850, 0, 480);

  int coolerPWM = map(filteredADC(pinHotAirCoolerIn), 0, 1023, 130, 255);
  int coolerDisp = map(filteredADC(pinHotAirCoolerIn), 0, 1023, 0, 99);

  // ----- Антидребезг кнопок -----
  if (digitalRead(pinSolderButton) == HIGH && millis() - lastBtn1 > 250) {
    solderOn = !solderOn;
  }
}

```

```

    lastBtn1 = millis();
}

if (digitalRead(pinHotAirButton) == HIGH && millis() - lastBtn2 > 250) {
    hotairOn = !hotairOn;
    lastBtn2 = millis();
}

// ----- Вимкнення при обриві термопары -----
if (solderInput < 0 || solderInput > 480) solderOn = false;
if (hotairInput < 0 || hotairInput > 480) hotairOn = false;

// ===== PID ДЛЯ ПАЯЛЬНИКА =====
if (solderOn) {
    pidSolder.Compute();
    analogWrite(pinSolderOut, solderOutput);
} else {
    analogWrite(pinSolderOut, 0);
}

// ===== PID ДЛЯ ФЕНА =====
if (hotairOn) {
    pidHotAir.Compute();
    analogWrite(pinHotAirOut, hotairOutput);
    analogWrite(pinHotAirCoolerOut, coolerPWM);
}
else {
    // правильне охолодження
    if (hotairInput > 50)
        analogWrite(pinHotAirCoolerOut, 150);
    else
        analogWrite(pinHotAirCoolerOut, 0);

    analogWrite(pinHotAirOut, 0);
}

// ===== Відображення на LCD =====
lcd.setCursor(0, 0);
lcd.print("S:");
if (solderOn) {
    lcd.print((int)solderSetpoint);
    lcd.print((char)1);
    lcd.setCursor(8, 0);
    lcd.print((int)solderInput);
    lcd.print((char)1);
} else lcd.print("Off    ");

lcd.setCursor(0, 1);
lcd.print("H:");
if (hotairOn) {
    lcd.print((int)hotairSetpoint);
    lcd.print((char)1);
    lcd.setCursor(8, 1);
}

```

```
    lcd.print((int)hotairInput);  
    lcd.print((char)1);  
    lcd.setCursor(14, 1);  
    lcd.print(coolerDisp);  
} else lcd.print("Off    ");  
  
    delay(60);  
}
```