



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,  
TELEKOMUNIKACJI  
I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Marcin Jankowski  
Nr albumu: 180161  
Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Automatyka, cybernetyka i robotyka  
Profil: Systemy automatyki

Imię i nazwisko studenta: Kacper Wierciński  
Nr albumu: 180293  
Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Automatyka, cybernetyka i robotyka  
Profil: Systemy automatyki

## **PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI**

Tytuł projektu w języku polskim: Piec do montażu układów elektronicznych zbudowanych z elementów SMD

Tytuł projektu w języku angielskim: A furnace for assembling electronic circuits made of SMD components

Opiekun pracy: dr inż. Marcin Pazio

## Streszczenie

Praca ma na celu zaprojektowanie i zbudowanie maszyny do lutowania rozpliwowego z oraz opracowanie regulatora do tej maszyny. W pierwszej części teoretycznej przedstawiono różne metody lutowania oraz omówiono lutowanie rozpliwowe. Następnie przedstawiono piece konwekcyjne, które są wykorzystywane do lutowania rozpliwowego oraz omówiono sposoby sterowania maszynami do lutowania.

W kolejnej części pracy przedstawiono drukowanie szablonowe, czyli proces nanoszenia pasty na płytkę drukowaną za pomocą szablonu z otworami odpowiadającymi położeniu elementów. Omówiono także proces rozkładania elementów, czyli umieszczania elementów na płytce drukowanej za pomocą specjalnych maszyn.

W części praktycznej pracy przedstawiono proces projektowania i budowy maszyny do lutowania rozpliwowego, w tym dobór konstrukcji mechanicznej oraz elementów grzejnych. Opisano także dobór podzespołów pomiarowych, takich jak czujniki temperatury oraz elementów sterujących i wykonawczych. Następnie opisano proces projektowania sterownika oraz interfejsu użytkownika, czyli oprogramowania umożliwiającego obsługę maszyny przez operatora. Na końcu przeprowadzono badanie dokładności pracy sterownika oraz jakości lutowania.

W podsumowaniu pracy przedstawiono główne wnioski oraz zaprezentowano możliwości rozszerzenia pracy w przyszłości. W treściach dodatkowych zamieszczono kod źródłowy użyty w projekcie.

## Abstract

The goal of the work is to design and build a machine for reflow soldering and to design and implement a controller for this machine. In the first theoretical part, different soldering methods are presented and infrared reflow soldering is discussed. Convection ovens, which are used for reflow soldering are then presented and methods of controlling soldering machines are discussed.

In the next part of the work, stencil printing, the process of applying solder paste to a printed circuit board using a stencil with holes corresponding to the position of the components, is presented. The process of component placement on a printed circuit board using a special machine, is also discussed. In the practical part of the work, the process of designing and building the reflow soldering machine is presented, including the selection of the mechanical structure and heating elements. The selection of measurement components, such as temperature sensors, and control and execution elements are also described. The process of designing the controller and user interface, or the software that allows the operator to control the machine, is also described. Finally, the accuracy of the controller's operation and the quality of soldering are tested.

In the summary of the work, the main conclusions are presented and the possibilities for extending the work in the future are shown. The additional content includes the source code used in the project.

## SPIS TREŚCI

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW .....	1
1. WSTĘP I CEL PRACY .....	1
2. PODSTAWOWE ZAGADNIENIA PROCESU LutowANIA .....	2
2.1. Przegląd wykorzystywanych metod lutowania (Kacper Wierciński) .....	2
2.2. Wprowadzenie do lutowania rozpliwowego (Kacper Wierciński) .....	4
2.3. Lutowanie z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego (Kacper Wierciński) .....	8
2.4. Piece konwekcyjne do lutowania rozpliwowego (Kacper Wierciński) .....	12
2.5. Sterowanie maszynami do lutowania rozpliwowego (Marcin Jankowski) .....	14
2.6. Drukowanie szablonowe (Marcin Jankowski) .....	16
2.7. Rozkładanie elementów (Marcin Jankowski) .....	18
3. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA .....	21
3.1 Wybór konstrukcji mechanicznej (Kacper Wierciński) .....	21
3.2 Dobór podzespołów pomiarowych (Marcin Jankowski) .....	24
Dostępne przyrządy pomiarowe .....	24
Dobór przyrządu pomiarowego .....	27
3.3 Dobór elementów grzejnych (Kacper Wierciński) .....	28
3.4 Elementy sterujące oraz wykonawcze (Marcin Jankowski) .....	29
3.5 Projektowanie interfejsu użytkownika (Marcin Jankowski) .....	31
3.6 Badanie dokładności pracy sterownika i jakości lutowania (Marcin Jankowski) .....	33
4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI .....	37
WYKAZ LITERATURY .....	38
SPIS RYSUNKÓW .....	39
SPIS TABEL .....	40
TREŚCI DODATKOWE .....	40

## WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

$f$  - częstotliwość [Hz]

$k$  - stała Boltzmanna  $1,38 \cdot 10^{-23}$  Ws/K

$Re$  - Liczba Reynoldsa

$Pr$  - Liczba Prandtla

$R_0$  - stała termistora

$W$  – szerokość pasma zabronionego półprzewodnika

SMD - urządzenia elektroniczne do montażu powierzchniowego

## 1. WSTĘP I CEL PRACY

Lutowanie jest najczęściej wykorzystywaną metodą montażu układów elektronicznych. Podstawowym elementem każdego urządzenia półprzewodnikowego jest tranzystor, który w momencie wynależenia był wielkości kostki do gry. Wraz z postępem technologii i wzrostem zapotrzebowania na małą elektronikę użytkową obecnie pojedyncze tranzystory jak i pozostałe elementy dyskretnie mogą mieć wielkość rzędu nanometrów. Miniaturyzacja układów elektronicznych postępuje w myśl prawa Moore'a, które mówi, że optymalna ekonomicznie liczba tranzystorów w układzie scalonym ulega podwojeniu co 18 miesięcy. Miniaturyzacja ta determinuje konieczność umieszczania coraz większej ilości elementów elektronicznych na jak najmniejszej powierzchni płytek obwodów drukowanych. W przypadku montażu elementów elektronicznych wykonanych w technologii SMD o dużym zagęszczeniu lutowanie ręczne może być zbyt kosztowne, dlatego opracowane zostały technologie przyspieszające i ułatwiające ten proces.

Celem pracy jest zbudowanie małego pieca lutowniczego do układów elektronicznych wykonanych w technologii SMD. Budowane urządzenie powinno być wyposażone w sterownik umożliwiający zadawanie odpowiedniego profilu zmian temperatury. Przewidywane jest również stworzenie interfejsu użytkownika prezentującego w czasie rzeczywistym parametry pracy urządzenia, charakterystykę temperaturowo-czasową a także dobór nastaw i profili temperaturowych zdefiniowanych dla kilku rodzajów spoiwa.

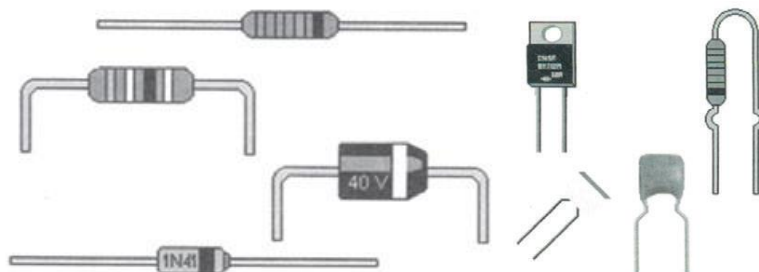
## 2. PODSTAWOWE ZAGADNIENIA PROCESU LutowANIA

W tej części pracy dyplomowej pt. „piec do montażu układów elektronicznych zbudowanych z elementów SMD” omówiono stosowane metody montażu w elektronice oraz przedstawiono proces lutowania rozpliwowego. Omówiono istniejące rozwiązania stosowane w maszynach komercyjnych a także przemysłowych. W rozdziale przedstawiono także metody sterowania omawianymi urządzeniami.

### 2.1. *Przegląd wykorzystywanych metod lutowania (Kacper Wierciński)*

Lutowanie [1] to proces, w którym dwa lub więcej elementów wykonanych z metalu łączy za pomocą spoiwa (lutu), przy czym spoiwo ma niższą temperaturę topnienia niż łączone ze sobą metale. Wprowadzone spoiwo wypełnia szczelinę pomiędzy łączonymi elementami tworząc między nimi trwałe połączenie. Jest to jedna z nielicznych metod umożliwiających łączenie ze sobą metali i ich stopów o różnych własnościach, a nawet metali ze szkłem, porcelaną czy ceramiką. W wielu gałęziach przemysłu, takich jak elektronika, elektrotechnika czy telekomunikacja, lutowanie jest jedyną metodą zapewniającą połączenia właściwej jakości. Podstawowym kryterium klasyfikacji metod lutowania jest podział ze względu na temperaturę topnienia lutu. Rozróżnia się trzy podstawowe kategorie: lutowanie miękkie, w którym spoiwo zmienia swój stan skupienia na ciekły w temperaturze do 450 °C, lutowanie twarde o temperaturze topnienia lutu powyżej 450 °C oraz lutowanie wysokotemperaturowe dla spoiw, które topią się w temperaturze powyżej 900 °C. W elektronice, ze względu na wymagania stawiane produkowanym urządzeniom a także konstrukcję elementów elektronicznych oraz płytek obwodów drukowanych (ang. PCB – printed circuit board) we większości przypadków stosowane jest lutowanie miękkie.

Metody montażu elementów elektronicznych i układów scalonych na płytkach obwodów drukowanych można podzielić ze względu na rodzaj elementów wykorzystywanych do budowy układu oraz skalę produkcji [2]. W przypadku konstruowania urządzeń jednostkowych, nietypowych czy też wymagających specjalnego traktowania najczęściej wykorzystywaną metodą jest lutowanie ręczne. Proces ten można przeprowadzać na elementach elektronicznych wykonanych w technologii przewlekanej (ang. THT – through hole technology), jak i elementach przeznaczonych do montażu powierzchniowego (ang. SMT – surface mount technology). Pojedynczy element wykonany w technologii THT (rezystor, cewka, kondensator) posiada dwa wyprowadzenia osiowe (rys. 2.1.1) w postaci drutów miedzianych o średnicy od 0,38 do 0,81 mm, które przewleka się przez otwory w obwodzie drukowanym. Przeznaczone są głównie do osadzania ręcznego, a następnie lutowania ręcznie lub na fali. Elementy produkowane ze stosunkowo długimi wyprowadzeniami dają pewną swobodę w rozmieszczeniu pól montażowych na powierzchni płytki obwodów drukowanych. Do ręcznego, jak i automatycznego osadzania przeznaczone są także elementy o wyprowadzeniach jednostronnych (rys. 2.1.1), gdzie wyprowadzenia są do siebie równoległe a odległość pomiędzy nimi jest znormalizowana jako wielokrotność 0,1 cala (2,54 mm).



Rysunek 2.1.1. Elementy elektroniczne do montażu przewlekanego z wyprowadzeniem osiowym oraz jednostronnym [2]

Lutowanie elementów przewlekanych w produkcji małoseryjnej odbywa się ręcznie. Jako materiały lutownicze stosowany jest drut wykonany ze stopu metali lutowniczych oraz topik. Nie wykonuje się lutowania ręcznego z wykorzystaniem past lutowniczych. W lutowaniu elementów przeznaczonych do montażu przewlekanego wymagane jest stosowanie lutownicy o mocy, rozmiarach grota i zakresie temperatur wskazanych przez producentów łączonych elementów. W przypadku braku dostępu do tych danych zaleca się, aby temperatura grotu lutownicy znajdowała się w przedziale 300-375 °C. Również spoiwo dobierane jest z uwzględnieniem temperatury pracy i materiałów, które mają być połączone za jego udziałem.

Przy lutowaniu ręcznym należy pamiętać o zagrożeniu wynikającym z obecności ładunków elektrostatycznych. Ładować elektrostatycznie mogą się montowane elementy oraz osoba wykonująca montaż. W normalnych warunkach pracy ciało ludzkie może ładować się do wysokiego potencjału poprzez ruch względem podłogi, mebli, ubioru i innych nieprzewodzących elektrycznie elementów. Potencjał ten jest zależny od wielu czynników, przy czym istotną rolę może odgrywać wilgotność względna powietrza. W najbardziej niesprzyjających warunkach (wilgotność względna 20%, nylonowa wykładzina podłogowa) potencjał ten może przekraczać 10 kV. Proces rozładowania zachodzi w sposób gwałtowny i można go zaobserwować w postaci iskry. Jest to właściwe wyładowanie elektrostatyczne, określane akronimem ESD (ang. *Electrostatic Discharge*). Wyładowania takie mogą prowadzić do przebieć międzyelektrodowych i trwałych uszkodzeń. Metodą zapobiegającą występowaniu zjawiska ESD jest uziemienie środowiska pracy oraz samego operatora lutownicy.

W produkcji masowej płytek obwodów drukowanych z elementami w obudowie przewlekanej wykorzystywane jest lutowanie na fali (ang. – wave soldering) [2]. Płytkę drukowaną jest przesuwana nad misą stopionego lutu, w której pompa wytwarza ciśnienie w dyszy powodujące uniesienie lutu. Gdy płytka drukowana styka się z falą spoiwa, komponenty zostają przylutowane do płytki. Lutowanie na fali jest stosowane zarówno w przypadku zespołów obwodów drukowanych z otworami przelotowymi, jak i montażu powierzchniowego. W tym drugim przypadku komponenty są przyklejane do powierzchni płytki drukowanej (PCB) za pomocą maszyn i urządzeń do umieszczania i przyklejane do niej, zanim zostaną przepuszczone przez falę stopionego lutu. Lutowanie na fali stosuje się głównie do lutowania elementów przewlekanych. Ponieważ elementy z otworami przelotowymi zostały w dużej mierze zastąpione

elementami do montażu powierzchniowego, lutowanie falowe zostało wyparte przez metody lutowania rozpliwowego w wielu zastosowaniach elektronicznych dużej skali. Nadal jednak lutowanie na fali znajduje szerokie zastosowanie w sytuacjach, w których technologia montażu powierzchniowego nie jest odpowiednia do zastosowania (np. urządzenia o dużej mocy i złącza o dużej liczbie styków) lub gdzie dominuje prosta technologia otworów przelotowych (niektóre duże urządzenia).

Istnieje wiele rodzajów maszyn do lutowania na fali, jednak podstawowe komponenty i zasady działania tych maszyn są takie same. Podstawowym wyposażeniem wykorzystywanym podczas procesu jest przenośnik, który przesuwa płytkę obwodów drukowanych przez różne strefy, pompa wytwarzająca właściwą falę, rozpylacz topnika i element grzewczy. Omawiany typ lutowania można podzielić na cztery fazy. Pierwszą z nich jest dyszowa aplikacja topnika. Jego rolą w procesie jest oczyszczenie powierzchni lutowanego obwodu oraz elementów elektronicznych w miejscach połączenia z płytką, głównie z tlenków metali powstających na skutek korozji poprawiając tym samym przyczepność lutu do podłoża. W kolejnym kroku wykonywane jest grzanie wstępne, dzięki któremu w trakcie lutowania właściwego nie dochodzi do szoku termicznego, którego skutkami mogą być pęknięcia lub deformacje płytki oraz uszkodzenia lutowanych elementów elektronicznych. W strefie grzania wstępnego źródłem ciepła może być gorące powietrze unoszone konwekcyjnie lub w sposób wymuszony, albo promienniki bliskiej lub dalekiej podczerwieni. W lutowaniu właściwym fala stopionego lutu styka się z powierzchnią, na której przeprowadzany jest proces, łącząc tym samym płytkę z zamontowanymi na niej wcześniej podzespołami w sposób trwały. Podzespoły do montażu muszą być stabilnie zamontowane po to, aby uderzenie fali lutowniczej nie powodowało zmiany ich położenia. Dlatego też wyprowadzenia elementów do montażu przewlekanych są wprowadzane w metalizowane otwory płytek, a elementy SMD są przyklejone. Lutowanie na fali kończy się fazą czyszczenia. W tym etapie pozostałości topnika usuwane są przy pomocy rozpuszczalników lub wody dejonizowanej. Jakość procesu lutowania na fali jest zależna od nastaw temperatur podczas wygrzewania, lutowania i chłodzenia oraz od jakości przygotowania powierzchni styku podzespołów z płytką obwodów drukowanych.

Montaż elementów elektronicznych wykonanych w technologii SMD (ang. – surface mount devices) odbywa się w procesie lutowania rozpliwowego, który zostanie przedstawiony szerzej w kolejnej części pracy.

## **2.2. Wprowadzenie do lutowania rozpliwowego (Kacper Wierciński)**

Lutowanie rozpliwowe jest podstawową metodą montażu elementów elektronicznych wykonanych w technologii SMD. Jest to najczęściej stosowana metoda lutowania miękkiego elementów do montażu powierzchniowego na płytkach obwodów drukowanych. Celem procesu lutowania rozpliwowego jest osiągnięcie połączeń lutowanych poprzez jednoczesne podgrzewanie elementów elektronicznych oraz płytki drukowanej na której naniesiona została wcześniej pasta lutownicza w taki sposób, aby nie



dopuścić do uszkodzenia montowanych komponentów. Technika lutowania rozpliwowego przypomina tradycyjny proces lutowania, jednak w przypadku lutowania rozpliwowego do wykonywania połączeń wykorzystywana jest energia cieplna oddziałująca w danej chwili czasu na całą przestrzeń montażu.

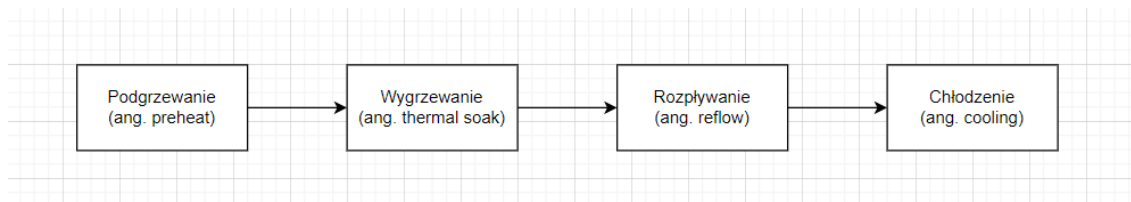
Lutowanie rozpliwowe rozpoczyna się od nałożenia pasty lutowniczej na płytkę drukowaną. Ważne jest, aby pasta była nałożona jedynie w miejscach w których ma nastąpić trwałe połączenie elementów. Aby uzyskać ten efekt wykorzystuje się szablony lutownicze (ang. solder stencil). Są to przygotowane wcześniej arkusze z otworami w miejscach lutowania, dzięki którym możliwe jest pokrycie płytki drukowanej pastą lutowniczą jedynie w wymaganych miejscach. Na tak przygotowanej płytce umieszczone zostają wszystkie elementy elektroniczne, które mają być z nią trwałe połączone. Proces lutowania rozpliwowego składa się z kilku etapów w celu zapewnienia odpowiedniego oraz trwałego połączenia elementów a także uniknięcia szoku termicznego. Szok termiczny jest zjawiskiem wynikającym ze zbyt gwałtownego lub punktowego ogrzewania powierzchni montażu. Proces lutowania rozpliwowego można podzielić na 4 główne etapy [11], które zaprezentowano w formie schematu blokowego na rysunku 2.2.1.

Pierwszym etapem jest podgrzewanie (ang. – preheat). W tym etapie następuje wstępne nagrzewanie lutowanej płytki drukowanej od temperatury pokojowej do ustalonego pułapu. Musi być on przeprowadzony w sposób łagodny, ponieważ zbyt szybkie podgrzewanie płytki spowoduje wystąpienie szoku termicznego, wskutek którego może dojść do uszkodzenia lutowanych elementów. Objawić się to może przez widoczne pęknięcia na powierzchni montowanej płytki, odkształcenia od pierwotnej płaszczyzny czy przerwaniem ciągłości obwodów na płytce. Drugim, równie ważnym problemem występującym na skutek zbyt szybkiego podgrzewania jest występowanie zimnych i ciepłych stref na jej powierzchni. Jest to spowodowane niejednorodną odległością poszczególnych punktów płytki od źródła ciepła, przez co również wystąpić może szok termiczny. Na tym etapie, w zależności od zastosowanych materiałów, płytkę należy ogrzewać do temperatury około  $150^{\circ}\text{C}$  z prędkością  $1-3 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ .

Po osiągnięciu wymaganej temperatury na powierzchni płytki następuje przejście do etapu wygrzewania termicznego. Podczas wygrzewania utrzymuje się zadaną temperaturę przez określoną ilość czasu. Proces ten pozwala na odpowiednie nagrzanie całej powierzchni płytki drukowanej w sposób równomierny i przygotowanie jej do głównego etapu lutowania.

Kolejnym etapem jest etap rozpliwania. W tej strefie temperatura przez krótki okres czasu osiąga swoją szczytową wartość. Osiągnięcie temperatury topnienia gwarantuje trwałe połączenie powierzchni, które mają być ze sobą zlutowane. Ważne jest, aby stosować się do zaleceń producenta pasty lutowniczej jak również obwodu drukowanego, ponieważ zbyt długie wygrzewanie płytki w zbyt wysokiej temperaturze może prowadzić do uszkodzenia zarówno komponentów elektronicznych jak i samej płytki PCB.



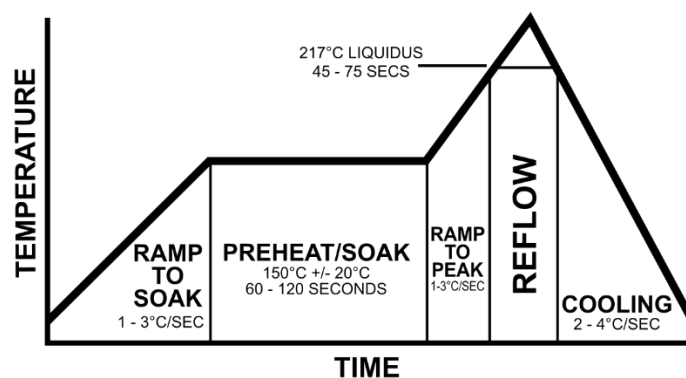


Rysunek 2.2.1. Schemat blokowy procesu lutowania rozpliwowego

Na zakończenie procesu lutowania montowana płytką musi zostać schłodzona. Nie może to jednak, podobnie jak w przypadku etapu podgrzewania, odbywać się zbyt gwałtownie. Różnice temperatur i gwałtowna jej zmiana może spowodować uszkodzenia mechaniczne obwodu. Optymalną prędkością chłodzenia płytki drukowanej podczas lutowania rozpliwowego jest około  $2-4 \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ .

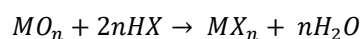
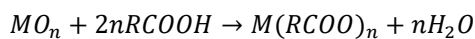
Spełniająca powyższe warunki charakterystyka temperaturowo-czasowa przedstawiona na rysunku 2.2.2 jest tylko wtedy właściwa, gdy nie powoduje uszkodzenia żadnego elementu, który jest przeznaczony do lutowania. Co więcej, powinna zapewniać formowanie połączenia lutowanego o dobrej integralności. Charakterystyka ta determinuje również nastawy pieca, wymagane do utrzymania odpowiedniego połączenia lutowanego. Uwzględnia to rodzaj pieca, liczbę stref grzewczych, długość każdej strefy, masę cieplną części przeznaczonych do lutowania i stosowaną pastę lutowniczą.

Spoiwem wykorzystywanym w lutowaniu rozpliwowym jest pasta lutownicza. Wykorzystanie pasty lutowniczej zapewnia kilka istotnych zalet w stosunku do technologii lutowania na fali. Pasta lutownicza służy nie tylko jako materiał lutowniczy, ale także jako klej. Pozwala to wyeliminować potrzebę wykorzystania kleju do osadzania elementów elektronicznych wykonanych w technologii SMD jak ma to miejsce w przypadku lutowania na fali. Ponadto, zwykle przeprowadza się dozowanie pasty lutowniczej przez szablon. Odpowiednie nałożenie materiału lutowniczego w miejscach, które mają być lutowane, zapewnia stałą i równomierną objętość spoiwa dla połączeń eliminując przez to problemy z niewystarczającą ilością spoiwa - efekt cienia występujący podczas lutowania na fali. Nie ma również ryzyka wystąpienia mostkowania, czyli łączenia się pól lutowniczych w miejscach na to nie przewidzianych. Jest to szczególnie istotne w montażu elementów osadzonych w bliskich od siebie odległościach. Pasty lutownicze mają konsystencję gęstej zawiesiny składającej się z cyny lub stopów kilku metali oraz topnika. W zależności od ilości elementów elektronicznych i ich gęstości na płycie obwodu drukowanego wykorzystywane są różne pasty zawierające spoiwo o różnej gradacji, których kategorie zebrano w tabeli 2.2.1. Główną rolą topnika w procesie lutowania rozpliwowego jest oczyszczenie powierzchni lutowanych z tlenków metali.



Rysunek 2.2.2. Charakterystyka temperaturowo-czasowa procesu lutowania rozpliwowego [12]

Reakcje te mogą być realizowane za pomocą kwasów organicznych, takich jak kwasy karboksylowe lub kwasów nieorganicznych. Reakcje między topnikiem a tlenkami metali można zilustrować uproszczonymi równaniami [9]:



Gdzie:

M – metal,

O – tlen,

RCOOH – kwas karboksylowy,

X – halogenki (np. fluor, chlor, brom)

Tabela 2.2.1. Kategorie past lutowniczych ze względu na rozmiar cząstek spoiwa [9].

GRADACJA PASTY LUTOWNICZEJ	ROZMIAR CZĄSTKI SPOIWA [ $\mu\text{m}$ ]
Typ 1	75 - 150
Typ 2	45 - 75
Typ 3	25 - 45
Typ 4	20 - 38
Typ 5	10 - 25
Typ 6	5 - 15
Typ 7	2 - 11
Typ 8	2 - 8

### 2.3. Lutowanie z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego (Kacper Wierciński)

Przemysłowe metody montażu elementów elektronicznych przeznaczonych do montażu powierzchniowego z wykorzystaniem lutowania rozpliwowego można sklasyfikować ze względu na źródła emitujące ciepło [3]. Pierwszym sposobem, stosowanym głównie w maszynach do produkcji jednostkowych obwodów lub do produkcji o małej skali, jest dostarczanie ciepła z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego. Najważniejszą zaletą tej konstrukcji jest możliwość wykorzystania jej zarówno w piecu wsadowym jak również w maszynach o ruchu ciągłym, wykorzystujących podajnik taśmowy do przenoszenia płytek pomiędzy strefami. Piece do lutowania rozpliwowego wykorzystujące promienniki podczerwieni są stosunkowo proste w sterowaniu oraz kontroli, jednakże ilość ciepła przekazywanego do płytki obwodów drukowanych na której zachodzi montaż jest zależna od medium, w jakim się znajduje oraz odległości grzałek od płaszczyzny płytki.

Ogrzewanie wykorzystujące promieniowanie podczerwone jest procesem, w którym energia jest przekazywana za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Do opisu promieniowania punktem wyjścia jest prawo Stefana-Boltzmann, które można zapisać w najprostszej postaci za pomocą wzoru:

$$\phi = \frac{P}{A} = \sigma T^4$$

Gdzie:

$\phi$  – strumień energii wypromieniowany z jednostki powierzchni ciała [ $W/m^2$ ],

P – moc całkowita wyemitowana z obiektu,

A – Pole powierzchni obiektu

$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,

T – temperatura

Dla ciepłych obiektów promieniowane energii do zimniejszego otoczenia opisuje wyrażenie:

$$\frac{dQ}{dT} = \epsilon \sigma_0 A (T_b^4 - T_a^4)$$

Gdzie:

$\epsilon$  - emisyjność ciała,

$\sigma_0$  - stała Stefana-Boltzmana,

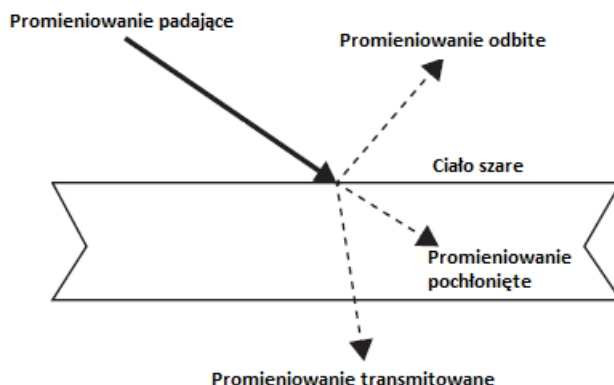
$T_b$  - temperatura ciała emitującego,

$T_a$  - temperatura ciała absorbującego.

Prawo Stefana-Boltzmana stanowi, że energia emitowana przez promieniowanie jest proporcjonalna do czwartej potęgi temperatury powierzchni promieniującego ciała czarnego. Stała Stefana-Boltzmann opisaną w jednostkach SI ma wartość:

$$\sigma_0 = 5,6670373 * 10^{-8} \left( \frac{W}{m^2 K^4} \right)$$

Jeśli omawiane ciało jest dobrym emiterym, to zazwyczaj można je uznać również za dobry absorber. W przypadku ciał czarnych poziom emitowanego lub pochłanianego promieniowania zależy od temperatury i jest niezależny od długości fali. W ciałach czarnych emisyjność i absorpcja są równe jedności. Elementy elektroniczne nie wykazują właściwości ciała czarnego, tak więc tzw. ciało szare emituje i absorbuje energię, która jest niezależna od długości fali a wartości emitancji i absorpcji są mniejsze od jedności. Promieniowanie padające na ciało szare przedstawiono na rysunku 2.3.1, gdzie część promieniowania może być odbita, zaabsorbowana lub w określonych przypadkach, transmitowana. Absorpcyjność, refleksyjność i transmisyjność ciała szarego można opisać za pomocą równania:



Rysunek 2.3.1 Promieniowanie padające na ciało szare

$$\alpha + \rho + \tau = 1$$

Gdzie:

$\alpha$  - ilość zaabsorbowanej energii,

$\rho$  - ilość energii odbitej,

$\tau$  - ilość energii transmitowanej.

Promieniowanie ciepła między powierzchniami omawianych ciał można obliczyć jako współczynniki przekazywania energii, między powierzchnią ciała pierwszego a powierzchnią ciała drugiego. W takich przypadkach równanie radiacyjnej wymiany ciepła można zapisać jako:

$$\frac{dQ_{1-2}}{dt} = \sigma(\epsilon_1 A_1 F_{1-2} T_1^4 - \epsilon_2 A_2 F_{2-1} T_2^4)$$

Gdzie:

$\sigma$  - stała Stefana-Boltzmana,

$\epsilon_1, \epsilon_2$  - emisyjność ciała,

$F_1, F_2$  - współczynnik przenikalności ciała,

$T_1, T_2$  - temperatura ciała [°C].

Współczynnik widoku, czyli stosunek podczerwieni przyjętej przez obiekt do całkowitej energii wypromieniowanej ze źródła opisuje równanie:

$$F_{1-2} = \frac{1}{A_1} \iint \frac{\cos \beta_1 \cos \beta_2 dA_1 dA_2}{\pi r^2}$$

Gdzie:

$\beta_1, \beta_2$  - kąt wektora normalnego do płaszczyzny powierzchni ciała,

$r$  - odległość między punktami obu powierzchni.

Z punktu widzenia procesu lutowania rozpliwowego, zasady działania pieca i jego funkcjonalności, istotna jest także długość fali. Długość fali zależna jest temperatury, co określa prawo Wiena [19]:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Gdzie:

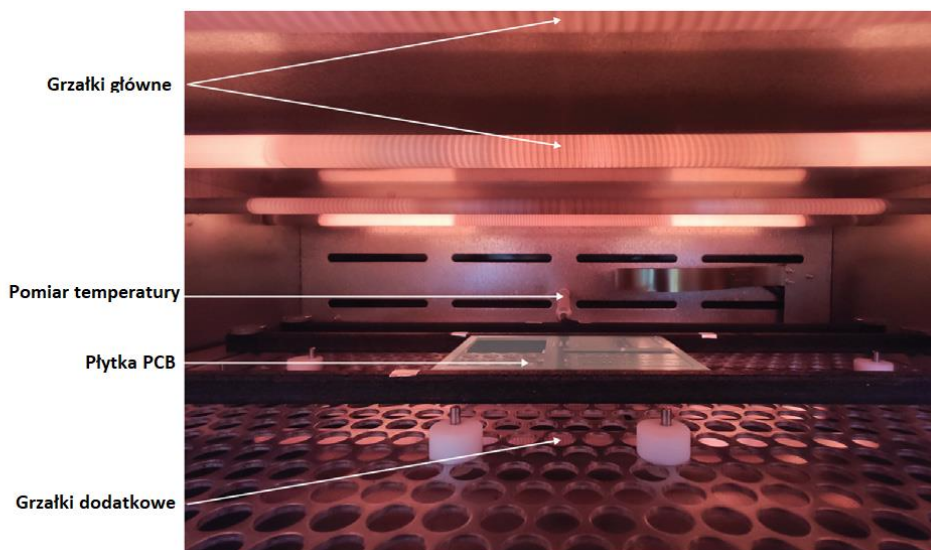
$\lambda_{max}$  - długość fali o maksymalnej mocy promieniowania,

$b = 5215.6 \mu m^{\circ}C$  – stała Wiena,

T – temperatura ciała doskonale czarnego.

Piece do lutowania rozpliwowego z wykorzystaniem promieniowania podczerwonego można podzielić na dwie kategorie [3]. Pierwszą z nich stanowią piece wykorzystujące promieniowanie o krótkiej długości fali elektromagnetycznej. Długość fali wynosi od 0,75 do 2,5  $\mu m$ . W drugiej kategorii wykorzystywane są fale o średniej długości – od 2,5 do 5  $\mu m$  [6-7]. Biorąc pod uwagę płaszczyznę lutowania rozpliwowego uznaje się, że w przypadku zastosowania źródeł o krótkiej długości fali elementy elektroniczne umieszczone na płytce drukowanej są bardziej narażone na przegrzanie i uszkodzenie, natomiast przy wykorzystaniu dłuższej fali większa część energii przekazywana jest do powietrza otaczającego płytkę co w połączeniu z konwekcją skutkuje bardziej równomiernym nagrzewaniem wszystkich elementów.

Bliska podczerwień jest uznawana za metodę wydajną ze względu na całkowite rozpliwanie (ang. reflow) oraz rozgrzewanie powierzchni płytki drukowanej i znajdującej się na niej elementów elektronicznych. Najczęściej spotykanym problemem w tego rodzaju piecach jest zjawisko cieniowania, czyli przesłaniania fal elektromagnetycznych przez sąsiadujące ze sobą montowane elementy. Jest to widoczne szczególnie w trakcie montażu płytek o rozmiarach zbliżonych do maksymalnej pojemności danej maszyny. Niedogodnością opisywanej metody jest również niejednakowe pochłanianie promieniowania przez elementy o różnych zdolnościach absorbowania promieniowania podczerwonego, czego efektem są nierównomierne rozkłady ciepła oraz niepoprawne luty elementów do pól lutowniczych. Technologia lutowania rozpliwowego oparta na promieniowaniu podczerwonym wykorzystywana jest najczęściej w piecach wsadowych (ang. batch-type). Strefa robocza pieca wsadowego (rysunek 2.3.2) składa się z grzałek głównych oraz pomocniczych, czujnika temperatury oraz kratki lub elementów, na których spoczywa montowana płytka obwodów drukowanych.



Rysunek 2.3.2. Strefa robocza pieca wsadowego [3]

#### 2.4. Piece konwekcyjne do lutowania rozpliwowego (Kacper Wierciński)

Zjawisko konwekcji [20] definiuje się jako makroskopowy proces przekazywania ciepła w cieczach oraz gazach. Zjawisko to ma swoje zastosowanie w zakresie maszyn do lutowania rozpliwowego, szczególnie w urządzeniach przeznaczonych do pracy w ruchu ciągłym z pasem transportującym płytki pomiędzy kolejnymi strefami. Aby w pełni przedstawić zjawiska zachodzące w konwekcyjnych piecach do lutowania rozpliwowego konieczne jest poznanie podstawowych praw fizycznych determinujących ogrzewanie przez wymuszoną konwekcję. Badanie dynamiki płynów dla potrzeb lutowania rozpliwowego jest zasadne jedynie w stanie ustalonym, ponieważ przejściowe charakterystyki procesu nie są istotne dla przebiegu procesu lutowania. Efektywność konwekcyjnej wymiany ciepła zależy od współczynnika wymiany ciepła (ang. HTC – heat transfer coefficient) (jednostka  $[\frac{W}{m^2K}]$ ), który może być wyznaczony ze wzoru:

$$\frac{dQ_c}{dt} = HTC * A * (T_f(t) - T_s(t))$$

Gdzie:

A – pole ogrzewanej powierzchni,

$T_f(t)$  – temperatura ośrodka [K],

$T_s(t)$  – temperatura ogrzewanego materiału [K].

Współczynnik wymiany ciepła jest zależny od prędkości i rodzaju przepływu (laminarny lub turbulentny), gęstości i temperatury substancji grzewczej, kąta padania pomiędzy strukturą stałą a płynem grzewczym oraz chropowatości powierzchni ogrzewanej. Wartość parametru HTC może się wahać od 5 do 500  $\frac{W}{m^2K}$  w przypadku gazów [3]. W większości zastosowań gęstość płynu grzewczego i



chropowatość powierzchni ogrzewanej nie zmieniają się podczas procesu, dlatego też, głównie parametry związane z przepływem, takie jak prędkość, rodzaj i kąt padania określają wartość współczynnika wymiany ciepła. W większości przypadków wartość ta jest znana jedynie w przybliżeniu, ponieważ pomimo tego, że parametry takie jak prędkość przepływu czy gęstość płynu są mierzalne to zakres parametrów procesu zmienia się w zależności od zastosowania. Jednoznaczne wzory do obliczenia współczynnika wymiany ciepła są możliwe do zastosowania jedynie w podstawowych, często uproszczonych przypadkach. W przypadku konwekcyjnego lutowania rozplwowego współczynnik wymiany ciepła został przybliżony wzorem:

$$HTC = \frac{\lambda \sqrt{\frac{\pi D^2}{4 l}} (1 - 2,2 \sqrt{\frac{\pi D^2}{4 l}})}{1 + 0,2 \left( \frac{H}{D} - 6 \right) \frac{\pi D^2}{4 l}} * Re^{0,66} Pr^{0,42} \left[ 1 + \left( \frac{\frac{H}{d}}{\frac{0,6}{\sqrt{\frac{\pi D^2}{4 l}}}} \right)^6 \right]^{-0,05}$$

Gdzie:

$\lambda$  - przewodność cieplna gazu [ $\frac{W}{mK}$ ],

$d$  – średnica wlotów gazu [m],

$H$  – wysokość komory [m],

$l$  – długość komory [m],

$Re$  – liczba Reynoldsa,

$Pr$  – liczba Prandtla.

Powyższe równanie zostało wyprowadzone po przeprowadzeniu serii doświadczeń, jednak wciąż jest to jedynie średnia wartość współczynnika HTC. Jego wartość może być różna w zależności od strefy pieca przez zmiany warunków przepływu, zmianami w cyrkulacji gazu oraz występowanie zanieczyszczeń w systemach dostarczających gaz. Do jednoznacznego określenia wartości współczynnika wymiany ciepła wykorzystywane są numeryczne metody symulacyjne, dzięki którym możliwe jest dokładne określenie parametrów procesu lutowania rozplwowego.

Piec typu przenośnikowego do lutowania rozplwowego jest najczęściej spotykaną maszyną wykorzystującą zjawisko konwekcji. Przestrzeń robocza takich maszyn podzielona jest na kilka stref, najczęściej od 8 do 16. Maszyny te wykonane są ze stali nierdzewnej, posiadają warstwę materiału izolującego oddzielającą przestrzeń roboczą od środowiska zewnętrznego, nie występują natomiast fizyczne granice pomiędzy poszczególnymi strefami. Piece konwekcyjne, których przykład pokazano na rysunku 2.4.1, ze względu na koszt produkcji, wydajność oraz gabaryty są wykorzystywane głównie w dużych przedsiębiorstwach do masowego montażu urządzeń elektronicznych. Każda ze stref pieca konwekcyjnego składa się z grzałki, wentylatora wprawiającego gaz w ruch oraz systemu kierującego ogrzany gaz na powierzchnię montażu.



Rysunek 2.4.1. Konwekcyjny piec do lutowania rozpliwowego [30]

## 2.5. Sterowanie maszynami do lutowania rozpliwowego (Marcin Jankowski)

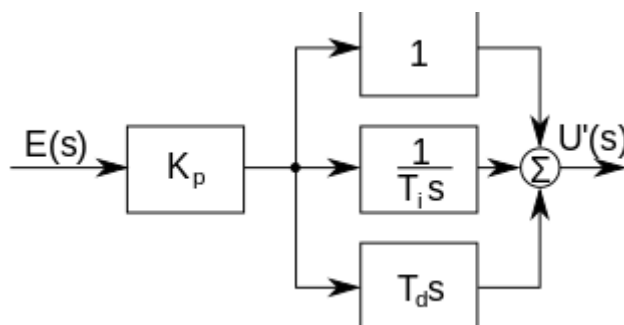
W procesie lutowania ważnym zagadnieniem jest prawidłowe wysterowanie temperatury. Spoglądając na charakterystykę z rysunku 2.2.2. widać, że trzeba zmierzyć się z problem utrzymania temperatury i osiągnięciem konkretnej prędkości jej narastania. W najprostszymi rozwiązaniach, budując piec przystosowany do jednej pasty lutowniczej, można sterować grzałką bez pomiaru temperatury (w otwartej pętli), używając sygnału PWM. Poprzez ustawienie odpowiednich parametrów sygnału sterującego dla każdego etapu, można uzyskać pożądaną charakterystykę temperaturową. Jest to rozwiązanie, które nie daje powtarzalnych wyników. Piec przy każdym lutowaniu może zachowywać się inaczej, zatem potrzebny byłby regulator, który kontrolowałby obecny stan temperatury. Z tego powodu konieczna jest możliwość sterowania mocą grzałek.

Idealnym rozwiązaniem jest użycie regulatora PID, którego schemat blokowy przedstawiony został na rysunku 2.5.1. Regulator składa się z trzech członów:

- proporcjonalnego P,
- całkującego I,
- różniczkującego D.

Transmitancja regulatora wygląda w następujący sposób:

$$G_{PID} = Kp + K_I \frac{1}{s} + K_D s$$



Rysunek 2.5.1. Schemat blokowy idealnego regulatora PID [15]

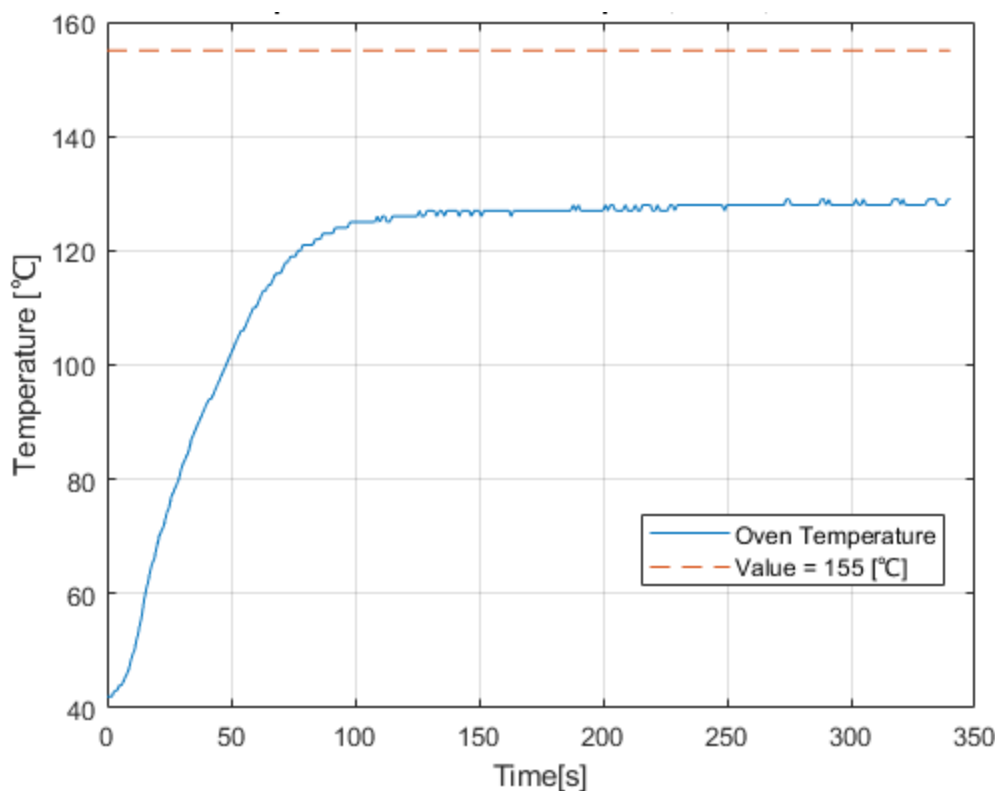
Składowa proporcjonalna reaguje na różnicę między wielkością zadaną i mierzoną. Im większa różnica tym większy wpływ tego elementu na sygnał wyjściowy. Składowa całkująca odpowiada za sprowadzenie wartości błędu do zera, reaguje ona na wielkość i czas trwania błędu. Składowa różniczkująca reaguje na szybkość zmian wartości błędu.

Dobór właściwych wartości współczynników PID jest kluczowy dla skutecznego działania regulatora. Zbyt duże wartości współczynników mogą spowodować, że regulator będzie zbyt wrażliwy i niestabilny, co prowadzić może do oscylacji wokół wartości zadanej. Zbyt małe wartości współczynników spowodują, że regulator będzie zbyt wolny w reagowaniu na zmiany w układzie i nie będzie w stanie utrzymać wartości zadanej. Istnieje kilka różnych metod doboru nastaw regulatora PID:

- metoda Zieglera-Nicholsa,
- metoda Cohena-Coona,
- metoda Lambda.

Każda z tych metod polega na wyznaczeniu odpowiednich wartości współczynników poprzez pomiar odpowiedzi regulatora na różne sygnały wejściowe i analizę jego działania. Oprócz doboru nastaw, ważne jest również regularne sprawdzanie i ewentualne korekty nastaw regulatora. Zmiany w układzie, w którym działa regulator, mogą prowadzić do konieczności dostosowania nastaw. Odpowiedź układu z nieustawionym regulatorem PID przedstawia rysunek 2.5.2. Widać na nim duży uchyb w stanie ustalonym.

Komercyjne maszyny posiadają specjalne oprogramowanie, które umożliwia automatyczny dobór nastaw regulatora PID lub pozwala na ręczną regulację nastaw przez operatora. Oprogramowanie to może być również wyposażone w funkcje monitorowania i diagnozowania działania regulatora, co umożliwia szybkie wykrywanie i usuwanie ewentualnych problemów. W zaawansowanych maszynach do lutowania rozpyłowego regulator odpowiadać może również za sterowanie przepływem powietrza. Układ taki wyposażony jest w wentylator, który poprawia jakość procesu lutowania.



Rysunek 2.5.2. Przykładowa odpowiedź układu

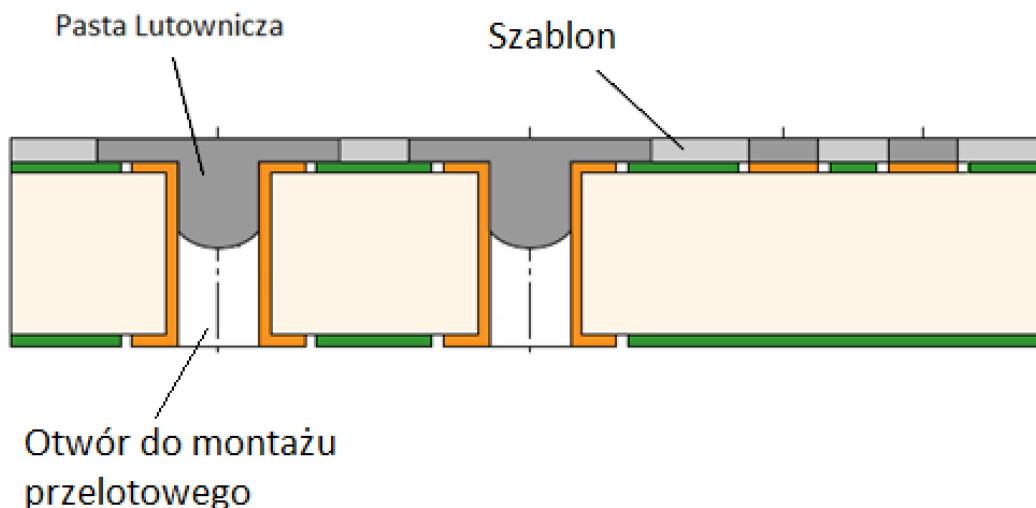
## 2.6. Drukowanie szablonowe (Marcin Jankowski)

Lutowanie rozplýwowe rozpoczyna się od nałożenia pasty lutowniczej na płytkę drukowaną. Ważne jest, aby pasta była nałożona jedynie w miejscach w których ma nastąpić trwałe połączenie elementów. W tym celu wykorzystuje się szablony. Są to przygotowane wcześniej arkusze z otworami w miejscach nanoszenia pasty. Etap ten nazywamy drukowaniem szablonowym. Jest to kluczowy etap w lutowaniu rozplýwowym, gdyż około 60-70% nieudanych prób spowodowanych jest przez nieprawidłowe nałożenie pasty [3]. Nałożenie pasty za pomocą szablonu przedstawia rysunek 2.6.1. Proces drukowania szablonowego możemy podzielić na trzy podetapy:

- nałożenie szablonu na płytkę,
- wtłoczenie pasty przez otwory,
- oddzielenie szablonu od płytki.

Szablon jest to metalowa folia zwykle wykonana z niklu lub stali nierdzewnej o grubości od 50 do 200  $\mu\text{m}$ . Otwory w szablonie wytwarzane są za pomocą:

- wytrawienia chemicznego,
- cięcia laserowego,
- elektroformowania.



Rysunek 2.6.1. Przykład drukowania szablonowego [3]

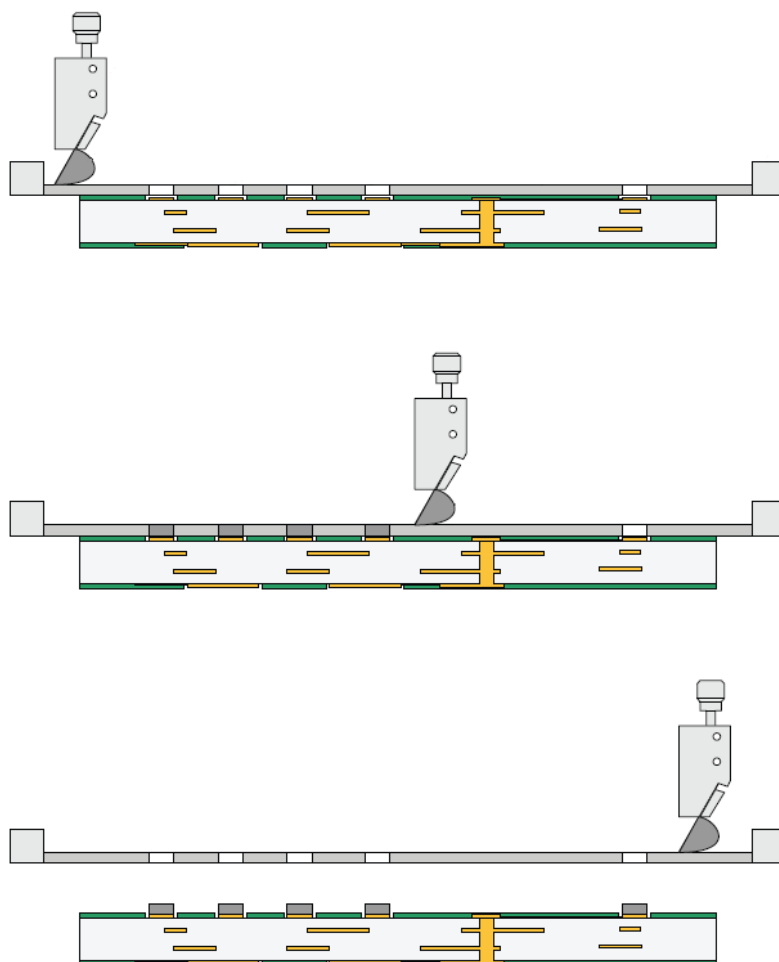
Najtańszą metodą i jednocześnie najgorszą pod względem jakości jest wytrawianie chemiczne. Cięcie laserowe jest obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą, zapewnia lepszą jakość i precyzję względem wytrawiania. Szablony najlepszej jakości uzyskuje się korzystając z techniki elektroformowania. Inną techniką produkcji szablonoów jest VectorGuard [14] (szablony z nanopokryciem). Takie szablony nanoszone są na folie w procesie plazmochemicznym lub za pomocą dedykowanej ściereczki NanoClear nasączonej nanopłynem. Obecnie w Polsce jedynie firma Semicon posiada licencję na produkowanie szablonoów VectorGuard. Dużą zaletą tego systemu w porównaniu do tradycyjnego jest cieńszy szablon.

Po nałożeniu pasty za pomocą rakla rozprowadzana jest ona po całym szablonie i osadza się na płycie w miejscach przyszłego lutowania. W tym etapie ważne jest, aby ustalić:

- kąt natarcia rakla,
- prędkość drukowania,
- siłę nacisku na rakiel,

aby uzyskać zadowalającą nas wydajność transferu. Jest to stosunek objętości osadzonej pasty lutowniczej do objętości otworu szablonu. Z reguły oczekuje się wydajności transferu na poziomie większym niż 75%. Wydajność ta jednak nie zależy tylko od ustalonych wyżej parametrów, ale także od wielkości otworu szablonu i technologii produkcji szablonu. Ważne jest, aby prędkość i siła zostały dobrane prawidłowo. Typowe wartości prędkości drukowania wynoszą od 30 do 70 mm/s, zaś siły 0,3 N/mm. Zbyt wolne drukowanie i ze zbyt małym naciskiem powodować mogą nadmierne osadzanie się pasty co będzie skutkowało powstawaniem mostów lutowniczych. Zbyt szybkie drukowanie może spowodować osadzanie się zbyt małej ilości pasty co może kosztować powstaniem otwartych połączeń. Ustawienie zbyt dużej siły nacisku może skutkować zbyt szybkim zużywaniem się rakla i szablonu.

Kolejnym etapem jest ściągnięcie szablonu z płytki PCB. Ważne jest by prędkość ściągania również była dobrze ustawiona. Zwykle prędkość ta wynosi od 1 do 10mm/s. Zbyt szybkie ściągnięcie może powodować zachwianie kształtu osadzonej pasty na płytce, zaś zbyt wolne spowoduje podniesienie pasty na krawędziach (efekt „psich uszu”). Podczas drukowania w określonym stopniu pasta lutownicza może przykleić się do otworów szablonu. Z kolejnym drukiem pasta będzie gromadzić się w większym stopniu co będzie skutkowało spadkiem wydajności transferu. Dlatego ważne jest o regularne czyszczenie szablonów, tak by wydajność nie spadła poniżej 75%. Ilustracja wszystkich trzech etapów jest zwarta na rysunku 2.6.2.



Rysunek 2.6.2. Etapy drukowania szablونowego [3]

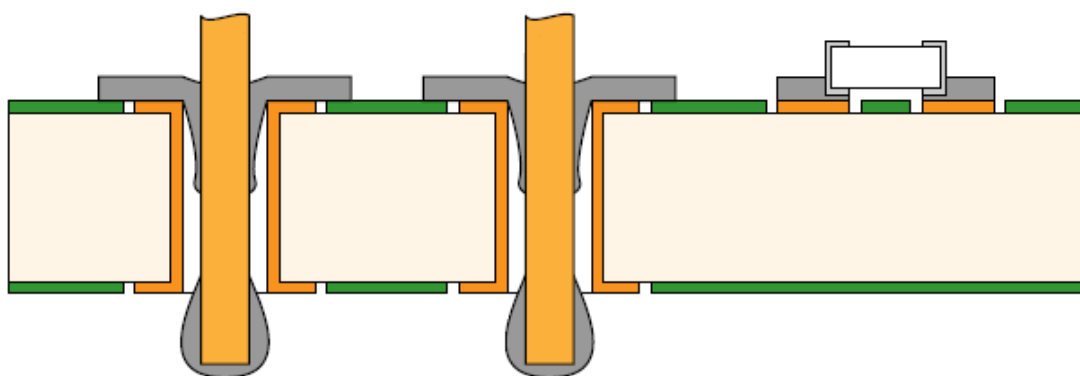
## 2.7. Rozkładanie elementów (Marcin Jankowski)

Wraz z rozwojem technologii i coraz mniejszymi rozmiarami elementów elektronicznych, konieczne jest stosowanie maszyn o coraz większej dokładności, które będą w stanie precyzyjnie umieścić te elementy na płytkach drukowanych. Automatyzacja procesów produkcyjnych pozwala na zwiększenie wydajności i skrócenie czasu potrzebnego na produkcję, dlatego tak ważne jest posiadanie dokładnych maszyn, które będą w stanie zautomatyzować ten proces. Z punktu widzenia głowicy umieszczającej rozróżnia się dwa typy maszyn:

- Pick&Place,
- Collect&Place.

Maszyny Pick&Place składają się z ramienia manipulacyjnego zamontowanego na ramie robota, które może poruszać się we wszystkich kierunkach, a także z chwytaka lub innego narzędzia służącego do przenoszenia elementów. Maszyny Pick&Place mogą być wyposażone w różne narzędzia do chwytania elementów, takie jak chwytaki kleszczowe, szczypce lub specjalne chwytaki dostosowane do konkretnych elementów. Maszyny te mogą pracować z wysoką prędkością i dokładnością, co pozwala na automatyzację procesów produkcyjnych i zwiększenie wydajności.

Maszyny Collect&Place są o wiele szybsze od maszyn Pick&Place, gdyż potrafią umieszczać kilka elementów na raz. Ich prędkość może sięgać do 10000 elementów na godzinę [3]. Ich błąd pozycjonowania jest jednak większy. Może sięgać od 20 do 40  $\mu\text{m}$ . Na rysunku 2.7.1 przedstawiono poprawnie umieszczone elementy na płytce PCB.



Rysunek 2.7.1. Przykład poprawnie umieszczonych elementów [3]



Przez zmniejszenie się elementów do rozmiarów od 100 do 200  $\mu\text{m}$  konieczne jest zwrócenie uwagi na wydajność maszyny. Odtwarzalność i powtarzalność maszyny są ważnymi czynnikami, które na nią wpływają. Wysoki poziom odtwarzalności i powtarzalności pozwala na uniknięcie błędów i przestojów w pracy maszyny, co przekłada się na wyższą wydajność. Powtarzalność maszyny to zdolność maszyny do wykonywania powtarzających się czynności z tą samą dokładnością i precyzją niezależnie od ilości wykonanych cykli, a odtwarzalność to zdolność maszyny do wykonywania powtarzających się czynności z tą samą dokładnością i precyzją niezależnie od pojawiających się zmian w warunkach pracy lub przerw w pracy maszyny. W celu określenia wskaźnika wydajności przeprowadza się doświadczenie, w którym badana jest poprawność rozmieszczenia elementów w zadanych pozycjach. Wskaźnik wydajności maszyny można określić dla różnych wariantów, gdyż możliwa jest zmiana:

- dyszy,
- orientacji dyszy,
- rozmiaru komponentu.

Ważne, aby skorzystać z odpowiedniej płytki testowej, która umożliwi dokładny pomiar pozycji komponentów i by test wykonywał więcej niż jeden operator. Im większa wydajność tym większa szansa na powodzenie procesu lutowania.

### 3. CZĘŚĆ PRAKTYCZNA

Część praktyczna pracy dyplomowej „piec do montażu układów elektronicznych zbudowanych z elementów SMD” przedstawia poszczególne etapy budowy pieca. Omówiono zastosowane rozwiązania mechaniczne i elektroniczne. Przeprowadzono przegląd dostępnych i wykorzystanych elementów pomiarowych a także wykonano badanie poprawności ich działania w zastosowanej konstrukcji pieca. Wykonane zostały także badania dokładności pracy zaimplementowanego sterownika oraz testy jakości montażu układów elektronicznych.

#### 3.1 Wybór konstrukcji mechanicznej (Kacper Wierciński)

Budowa pieca do montażu elementów elektronicznych zbudowanych z elementów SMD została rozpoczęta od wyboru bazowej konstrukcji mechanicznej. Założono, że urządzenie będzie umożliwiało montaż płytek drukowanych o rozmiarach około 10 x 10 cm. Po przeanalizowaniu istniejących rozwiązań oraz literatury zdecydowano, że najlepszą konstrukcją pieca będzie piec wsadowy, który spełnia założenia projektowe. W etapie koncepcyjnym projektu planowano budowę dwupłaszczyznowego pieca w kształcie prostopadłościanu z komorą grzewczą o wymiarach 20x20x10 cm wykonaną ze stali nierdzewnej gatunku 1.4305 według normy EN 10088. Stal nierdzewna jest odporna na korozję występującą na skutek czynników atmosferycznych a także działania kwasów czy roztworów alkalicznych. Ponadto charakteryzuje się niższym współczynnikiem przewodności cieplnej ( $\lambda = 15 \frac{W}{mK}$ ) w stosunku do stali węglowej ( $\lambda = 50 - 60 \frac{W}{mK}$  w zależności od gatunku). Koncepcję tą porzucono z powodu braku narzędzi i umiejętności spawania stali nierdzewnej niezbędnych do skonstruowania działającego urządzenia. Zdecydowano, że budowa pieca będzie oparta o komercyjny piekarnik kuchenny przedstawiony na rysunku 3.1.1. Piekarnik został pozbawiony wszystkich elementów zasilających, sterujących i wykonawczych a do dalszych prac wykorzystano jego korpus. Dzięki wymiarom 21x34,5x22,5 cm oraz dwóm grzałkom o łącznej mocy 900W możliwe jest skonstruowanie w pełni funkcjonalnego pieca do lutowania rozpliwowego.

Korpus piekarnika wymagał adaptacji na potrzeby projektu. Pierwszym napotkanym problemem był materiał wykonania poszycia jego wewnętrznej komory. Producent nie udostępnił jednoznacznej informacji o jego rodzaju, jednak ustalono, że jest to ocynkowana stal węglowa niewiadomego gatunku.



Rysunek 3.1.1 Piekarnik kuchenny firmy Kalorik [26]

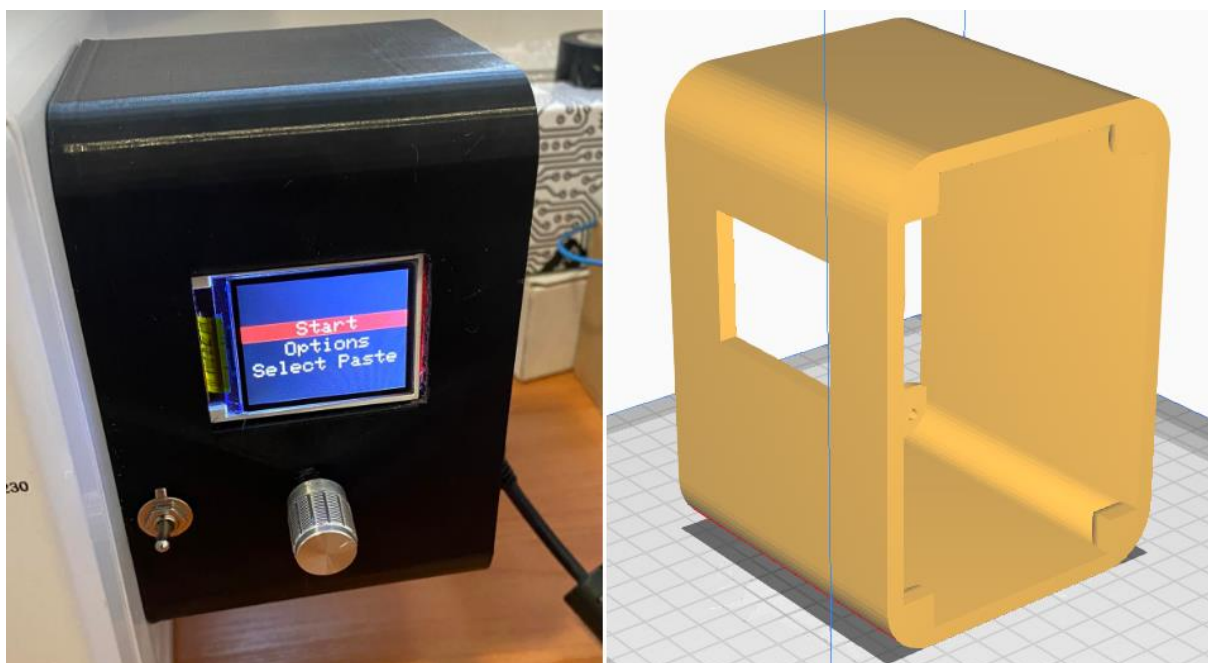
Z powodu niewystarczającej grubości blachy, z której wykonano wewnętrzną komorę, na etapie podgrzewania niemożliwe było uzyskanie wymaganego przyrostu temperatury wynoszącego  $1-2\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$  oraz zauważono znaczne straty ciepła przy pracy grzałek z pełną mocą. Zdeterminowało to konieczność wykonania izolacji termicznej pomiędzy wewnętrzną komorą a obudową piekarnika. Ze względu na dostępną przestrzeń oraz temperaturę osiagającą  $300^{\circ}\text{C}$  zdecydowano się na zaizolowanie komory roboczej tkaniną z włókna szklanego. Materiał ten przeznaczony jest do pracy ciągłej w temperaturach do  $600^{\circ}\text{C}$  oraz dzięki współczynnikowi przewodności cieplnej  $\lambda = 0,02\frac{\text{W}}{\text{mK}}$  oraz 3 mm grubości spełnia wszystkie wymagania, które wynikają z wcześniej postawionych oczekiwań. Rysunek 3.1.2 przedstawia tkaninę zamontowaną na piecu. Przy wyborze materiału brano również pod uwagę wełnę mineralną oraz natryskową pianę poliuretanową. Rozwiązania te zostały jednak porzucone ze względu na grubość warstwy izolacyjnej w przypadku wełny oraz sposób aplikacji w przypadku piany poliuretanowej.

Zamontowana została również dodatkowa obudowa widoczna na rysunku 3.1.3. przeznaczona na wyświetlacz, enkoder, mikrokontroler oraz płytkę łączącą wszystkie podzespoły. Celem jej montażu było oddalenie części elektronicznej urządzenia od strefy oddziaływania wysokiej temperatury. Pierwotnie założono, że podzespoły elektroniczne umieszczone będą w wolnej przestrzeni pomiędzy komorami piekarnika a wyświetlacz umiejscowiony będzie nad oryginalnymi miejscami nastawników temperatury i czasu. Zauważono jednak, że pomimo izolacji termicznej temperatura w omawianej wolnej przestrzeni ma dużą wartość i przeniesienie podzespołów elektronicznych na zewnątrz obudowy stalowej pozwoli uniknąć uszkodzeniom wymienionych wcześniej elementów. Obudowa została

wykonana w technologii druku 3D. Wyposażona jest w otwory na wyświetlacz, enkoder, włącznik zasilania mikrokontrolera oraz demontowalną ścianę boczną, która ułatwia dostęp w przypadku usuwania usterek elementów znajdujących się w jej wnętrzu.



Rysunek 3.1.2. Montaż izolacji termicznej



Rysunek 3.1.3. Model 3D oraz wydruk obudowy części elektronicznej

### 3.2 Dobór podzespołów pomiarowych (Marcin Jankowski)

#### Dostępne przyrządy pomiarowe

Podstawowym przyrządem do pomiaru temperatury są czujniki rezystancyjne (RTD) [17]. Czujniki te opierają się o sensor metalowy najczęściej z platyny bądź niklu. W ich skład wchodzi m.in. PT100, NI100, PT500, PT1000 [16]. Początek nazwy mówi nam z jakiego metalu został wykonany przyrząd, zaś liczba mówi nam jaką wartość rezystancji przyjmuje w temperaturze 0°C. Zasada działania polega na zmianie rezystancji przewodnika, z którego jest on wykonany pod wpływem mierzonej temperatury. Przeważnie stosuje się przewodniki platynowe bądź niklowe. Nie charakteryzują się zbyt dużą precyzją a czas odpowiedzi jest dosyć powolny, jednak mogą się pochwalić bardzo dużym zakresem temperaturowym (platyna) i praktycznie liniową charakterystyką. Na rysunku 3.2.1 przedstawiono przykładowy czujnik PT100. Zakres temperatur dla różnych przewodników przedstawia tabela 3.2.1. Zależność oporu od temperatury wyrażamy wzorem:

$$R_T = R_0[1 + \alpha(T - T_0)]$$

Gdzie:

$\alpha$  – temperaturowy współczynnik zmiany rezystancji,

$T_0$  – temperatura odniesienia [K].

Tabela 3.2.1. Zakres temperatury dla różnych przewodników

Rodzaj materiału czujnika	Zakres temperatury pracy [°C]
Platyna	-250 – 1000
Nikiel	-60 – 180
Miedź	-50 - 150



Rysunek 3.2.1. Czujnik PT100 [33]

Kolejnym przyrządem pomiarowym jest termistor [18]. Jest to rezystor półprzewodnikowy, który jest bardzo wrażliwy na zmiany temperatury. W porównaniu jednak z czujnikiem RTD ma wąski zakres pomiarowy. Najczęściej wykonuje się je z tlenków manganu (Mn), żelaza (Fe), niklu (Ni), miedzi (Cu), tytanu (Ti), cynku (Zn) i kobaltu (Co), spiekanych lub stapianych w temperaturach dochodzących do 1000 °C. Producenci muszą odpowiednio dobrać rodzaj i proporcje użytych tlenków, gdyż od tego zależą właściwości termistora. Rozróżniamy termistory PTC, NTC i CTR. Rodzaj ten mówi nam w jaki sposób zmienia się rezystancja termistora przy zmianie temperatury:

- PTC - wzrost rezystancji przy wzroście temperatury,
- NTC - spadek rezystancji przy wzroście temperatury,
- CTR - skokowa zmiana rezystancji przy zmianie temperatury.

Do pomiarów temperatury są stosowane prawie wyłącznie termistory NTC. Zależność oporu termistora NTC od temperatury wyrażamy wzorem:

$$R_T = R_\infty e^{\frac{B}{T}}$$

Gdzie:

$R_\infty$  - graniczna wartość, do której dąży rezystancja  $R_T$  gdy  $T$  dąży do nieskończoności [ $\Omega$ ]

$B$  – stała zależna od materiału termistora [K]

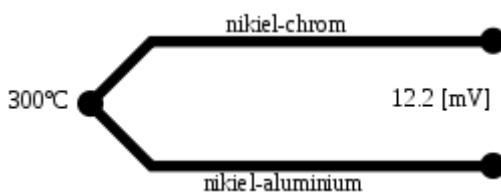


Każdy producent zamieszcza w notach katalogowych tabelę przedstawiającą wartości temperatury dla zmieniających się wartości rezystancji. Charakteryzują się dużą precyzją i szybkim czasem odpowiedzi. Wadą jest dosyć wąski zakres temperatur i nieliniowa charakterystyka. Na rysunku 3.2.2 przedstawiono przykładowy termistor.

Ostatnim rozważanym w projekcie urządzeniem pomiarowym były termopary. Składają się one z dwóch połączonych ze sobą metalowych przewodników o różnej rezystancji, pomiędzy którymi odkłada się napięcie. Wartość napięcia zależy od temperatury i składu chemicznego metali. Elementy te mają bardzo prostą budowę. Przy ich produkcji możemy korzystać z bardzo cienkich drucików nawet o średnicy rzędu jednego mikrometra. Termopary przez ich prostotę są niezawodne, tanie i bardzo szybko reagują na zmianę temperatury, przez co są szeroko stosowane w rozwiązaniach przemysłowych. Termopary typu K składają się z niklu i krzemu i są najczęściej używane, są odpowiednie do pomiaru temperatur od  $-200$  do  $1372$  °C. Termopary typu J składają się z miedzi i konstantanu, co czyni je odpowiednim do pomiaru temperatur od  $-210$  do  $1200$  °C. Termopary typu R składają się z wolframu i krzemu i są odpowiednie do pomiaru temperatur od  $-50$  do  $1768$  °C. W tabeli 3.2.1 przedstawiono zakresy pomiarowe dla różnych typów i rodzajów termopary. Rysunek 3.2.3 przedstawia podstawowy schemat termopary.



Rysunek 3.2.2. Termistor [31]



Rysunek 3.2.3. Przykład termopary [32]

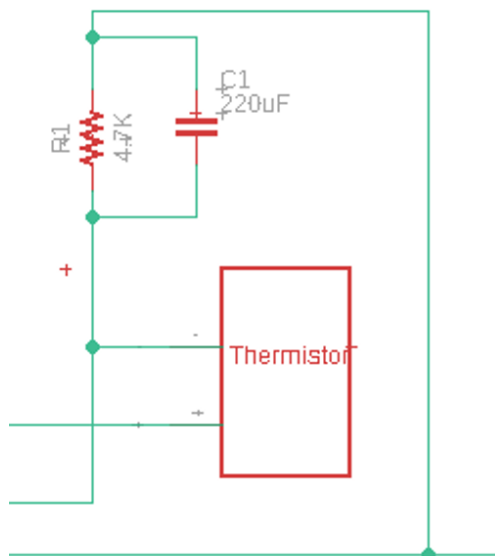


Tabela 3.2.2. Zakres temperatury dla różnych termopar

Typ	Materiał termopary	Zakres temperatury pracy [°C]
B	Pt-30% Rh / Pt-6% Rh	600 - 1800
E	Pt-30% Rh / Pt-6% Rh	-270 - 1000
J	Fe / Cu-Ni	210 - 1200
K	Ni-Cr / Ni-Al	-270 - 1372
N	Ni-Cr-Si / Ni-Si-Mg	-270 - 1300
R	Pt-13% Rh / Pt	-50 - 1768
S	Pt-10% Rh / Pt	-50 - 1768
T	Cu / Cu-Ni	-270 - 400

#### *Dobór przyrządu pomiarowego*

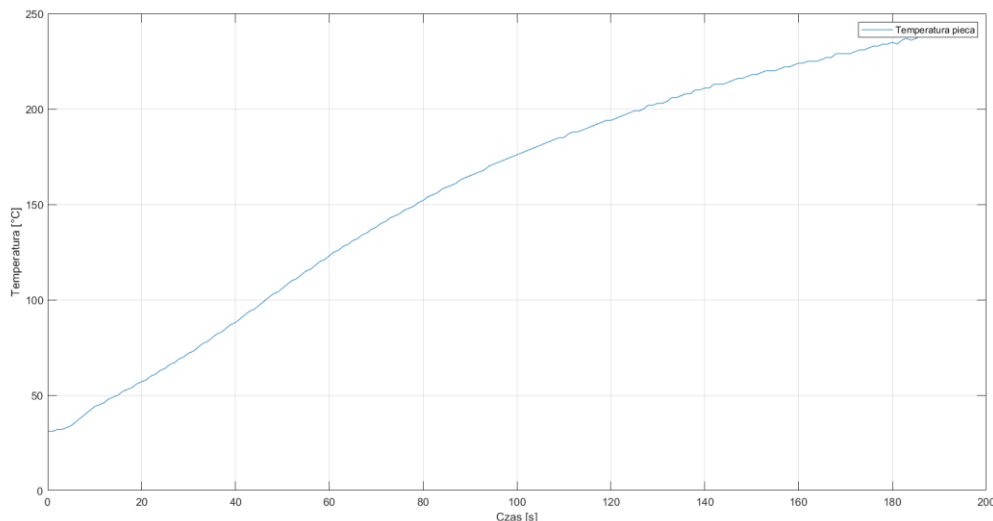
Do budowanego pieca rozpliwowego wybrany został termistor NTC 3950 100K. Wybór dokonany został z powodu potrzeby mierzenia temperatury bezpośrednio na płytce PCB. Termoparę i czujnik PT100 można zamontować tylko z boku obudowy, przez co nie uzyskiwałoby się najdokładniejszych pomiarów temperatury. Wadą termistora jest jego wąski zakres temperaturowy, ale do budowanego pieca jest jak najbardziej wystarczający. Termistor 3950 potrafi zmierzyć temperatury od -30°C do 300°C. Dla zakupionych past lutowniczych szczytowa temperatura wynosi 220°C. Istotna w pracy była nieskomplikowana implementacja, udało się to osiągnąć z wykorzystaniem termistora. Wyliczenie jego rezystancji rozpoczyna się od odczytania napięcia odłożonego na rezystorze 4700Ω, który filtrowany jest kondensatorem 220μF. Tworzą one razem z termistorem dzielnik napięciowy. Schemat podłączenia przedstawia rysunek 3.2.1. Znając napięcie na rezystorze, z prawa Ohma można policzyć natężenie prądu. Korzystając z dzielnika napięciowego wylicza się napięcie na termistorze, jest to różnica napięcia zasilającego od napięcia rezystora. Dzieląc te napięcie przez natężenie uzyskujemy rezystancję termistora. Producent w notach katalogowych zamieścił tabelę, w której podał wartości temperatury dla poszczególnych rezystancji. Korzystając z niej sprawdzana jest wyliczona wartość rezystancji i przypisywana jest do niej konkretna temperatura.



Rysunek 3.2.1. Podłączenie termistora

### 3.3 Dobór elementów grzejnych (Kacper Wierciński)

Elementy grzejne pieca do lutowania rozpliwowego zostały dobrane ze względu na jego konstrukcję, przeznaczenie i rozwiązania istniejące w literaturze oraz przemyśle. Piec został wyposażony w dwie grzałki ceramiczne zamontowane na dole i górze komory grzewczej. Ten rodzaj grzałek jest powszechnie stosowany w piecach wsadowych do lutowania rozpliwowego. Grzałki ceramiczne są zbudowane z drutu oporowego umieszczonego w materiale ceramicznym. Energia wytworzona przez drut oporowy jest przenoszona na otaczający go materiał. Komercyjny piekarnik omówiony w rozdziale 3.1 wyposażony został w dwie grzałki o łącznej mocy 900 W. Przeprowadzono badanie odpowiedzi skokowej układu, którego celem było ustalenie, czy posiadane elementy są w stanie wygenerować energię cieplną konieczną do uzyskania przyrostu temperatury z szybkością powyżej  $1\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ . Badanie zostało przeprowadzone z wykorzystaniem laminatu FR4 a pomiar temperatury odbywał się bezpośrednio przy jego powierzchni. Wynik badania przedstawiony na rysunku 3.3.1 okazał się satysfakcjonujący. Przyrost temperatury w zakresie od temperatury pokojowej do  $160^{\circ}\text{C}$ , czyli temperatury granicznej pierwszej fazy lutowania rozpliwowego, wynosi około  $1,55\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ , na całym zakresie pomiarowym temperatura wzrasta z prędkością około  $1,26\frac{^{\circ}\text{C}}{\text{s}}$ . Moc posiadanych grzałek jest więc odpowiednia do ukształtowania profilu lutowania rozpliwowego dla wszystkich past lutowniczych dostępnych na rynku. Aby profil temperaturowy był zgodny z profilem sugerowanym przez producenta pasty lutowniczej konieczne jest sterowanie mocą grzałek wraz ze zmianami nastaw temperatur, co zostało omówione w dalszej części pracy.

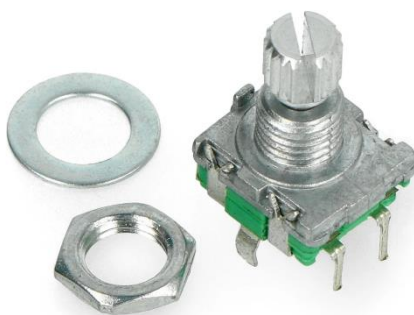


Rysunek 3.3.1. Badanie odpowiedzi skokowej układu

### 3.4 Elementy sterujące oraz wykonawcze (Marcin Jankowski)

Aby budowany piec spełniał założenia projektowe musi być wyposażony w podstawowe elementy sterujące i wykonawcze. W tym podrozdziale omówione zostaną enkoder, przekaźnik oraz mikrokontroler.

Enkoder [24] odpowiada za pełne sterowanie piecem, za pomocą odpowiedniej implementacji kodu, obroty są sczytywane, co umożliwia wybranie odpowiedniej pozycji menu na wyświetlaczu. Przycisk enkodera umożliwia zatwierdzenie wybranej pozycji. Przykładowo wciśnięcie przycisku na pozycji start, rozpocznie proces lutowania. Zastosowany w piecu enkoder jest w stanie wykryć 20 pozycji w skali 360 stopni. Na rysunku 3.4.1 przedstawiono wykorzystany enkoder.



Rysunek 3.4.1. Enkoder z przyciskiem 20 impulsów 12mm - EC11 pionowy [34]

Kolejnym elementem zamontowanym w piecu jest przekaźnik półprzewodnikowy SSR Fotek-10 DA-10A 380VAC / 32VDC, za którego pomocą sterowane są grzałki. Jest on przeznaczony do sterowania obciążeniami do 10A. Przekaźnik zabezpieczony jest przed przegrzaniem, przeciążeniem i zwarcim. Układ elektroniczny przekaźnika wyposażony jest także w detektor przejścia przez zero fali sinusoidalnej, to znaczy, że po pojawieniu się sygnału wyzwalającego układ załączany jest dopiero w momencie przejścia przez zero. Rozwiązanie to pozwala uniknąć występowania zakłóceń elektromagnetycznych (ang. EMI – electromagnetic interference). Aby zastosowany regulator mógł prawidłowo działać, potrzebna jest możliwość kontrolowania mocy grzałek. W naszym piecu uzyskujemy to poprzez modulowanie sygnału PWM podawanego na przekaźnik. Rysunek 3.4.2 przedstawia zastosowany przekaźnik.

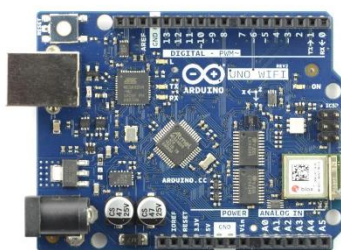
Do kontroli całego układu został wybrany mikrokontroler Arduino UNO. Jest to urządzenie oparte na mikroprocesorze Atmega328, które posiada:

- 14 cyfrowych portów wejścia/wyjścia
- 6 portów analogowych
- interfejs USB,
- interfejs szeregowy,
- złącze zasilania,
- interfejs UART,
- interfejs I2C,
- interfejs SPI.

Charakteryzuje się szerokim zakresem napięcia wejściowego i wyjściowego oraz ma niewielkie rozmiary, co umożliwia łatwe zamontowanie go w obudowie pieca. Można go programować w języku C++ za pomocą edytora Visual Studio Code z rozszerzeniem Platform I/O lub korzystając z dedykowanej platformy Arduino IDE. Wszystkie te cechy sprawiły, że Arduino UNO było idealnym wyborem do zaprojektowania układu sterowania pieca.



Rysunek 3.4.2 Przekaznik półprzewodnikowy SSR Fotek-10 DA - 10A 380VAC / 32VDC [35]



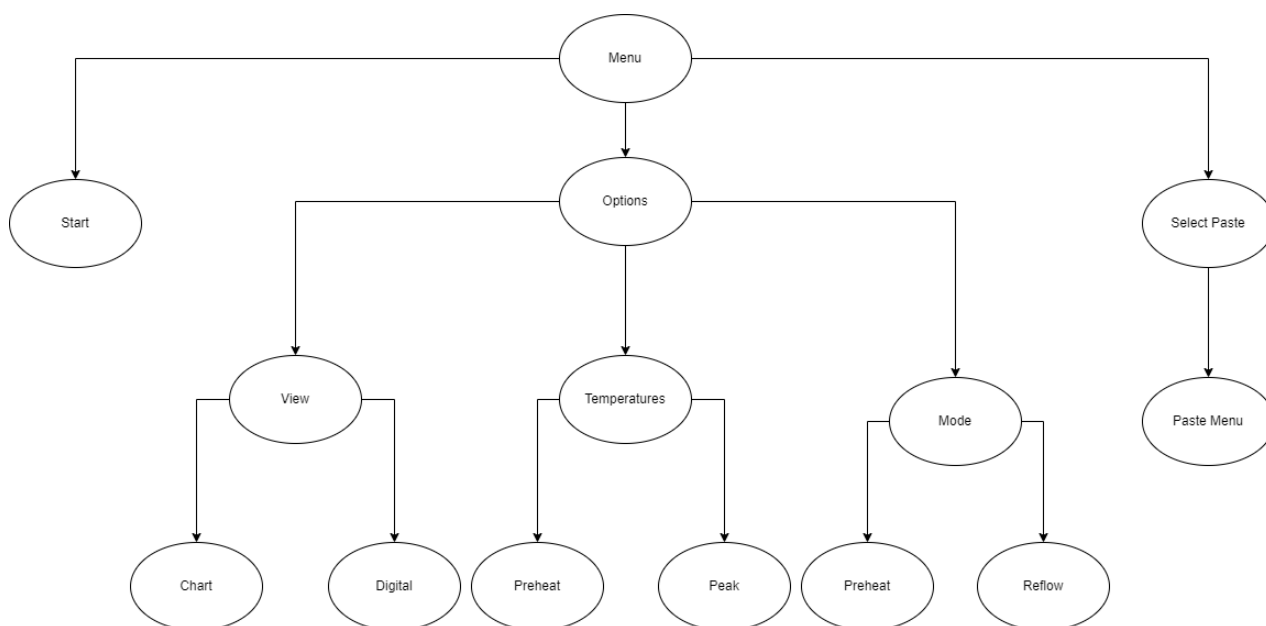
Rysunek 3.4.3 Arduino UNO [36]

### 3.5 Projektowanie interfejsu użytkownika (Marcin Jankowski)

Aby umożliwić wygodne obsługiwane urządzenia, został zainstalowany specjalny panel graficzny. Zdecydowano się na wyświetlacz TFT\_ILI9163C ze względu na potrzebę wizualizacji procesu lutowania rozplwowego za pomocą wykresu rysowanego w czasie rzeczywistym. Ten wyświetlacz ma przekątną 1,44 cala i wysoką rozdzielczość (128 x 160 pikseli). Jest on oparty o interfejs SPI [23]. Jest to szeregowy interfejs peryferyjny do przesyłania danych między różnymi urządzeniami wyposażony w cztery linie:

- MOSI (Master Out Slave In),
- MISO (Master In Slave Out),
- SCK (Serial Clock),
- SS (Slave Select).

Pierwsze dwie linie służą do przesyłania danych pomiędzy urządzeniami. Slave Select służy do wybierania, które urządzenie będzie współpracować z kontrolerem. Aby wyświetlacz TFT\_ILI9163C odebrał dane od Arduino, należy ustawić pin SS wyświetlacza na poziom niski. Do poprawnej implementacji wyświetlacza stworzono klasę Display, która dziedziczy po klasie TFT\_ILI9163C. Utworzono w niej metody, do wyświetlania aktualnej temperatury i czasu pracy, oraz rysowania wykresu w czasie rzeczywistym. Utworzono menu, które współpracuje z enkoderem. Oprócz tego panel graficzny został wyposażony w dodatkowe możliwości. Na przykład, użytkownik może ustawić temperaturę wygrzewania i temperaturę szczytową. Możliwy jest wybór predefiniowanych past, aby użytkownik nie musiał się martwić nastawą temperatur. Niektórzy producenci past umożliwiają, aby proces lutowania odbył się bez wygrzewania, zatem został umożliwiony wybór trybu pracy pieca z wygrzewaniem lub bez. Rysunek 3.5.2 przedstawia menu i tryb rysowania wykresu na wyświetlaczu. Rysunek 3.5.1 przedstawia diagram menu.



Rysunek 3.5.1. Diagram menu



Rysunek 3.5.2. Przykładowe działanie wyświetlacza

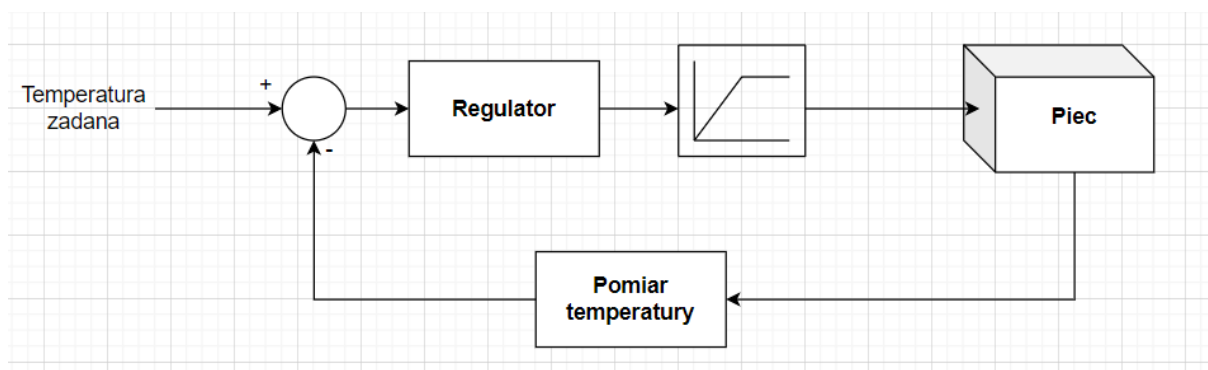
### 3.6 Badanie dokładności pracy sterownika i jakości lutowania (Marcin Jankowski)

Aby możliwa była kontrola temperatury wewnątrz komory pieca konieczna jest możliwość sterowania mocą grzałek. W budowanym układzie odbywa się to przez modulację sygnału PWM o częstotliwości 5Hz, który odpowiada zaysterowanie przekaźnika. Wartość ta została dobrana w sposób umożliwiający kontrolę układu elektronicznego przekaźnika, który zmienia swój stan jedynie w momencie przejścia fali sinusoidalnej sygnału sterowanego przez zero. Zastosowanie modulacji PWM umożliwia nastawę mocy grzałek w zakresie od 0 do 100%. Uproszczony schemat blokowy układu sterowania przedstawiony został na rysunku 3.6.1.

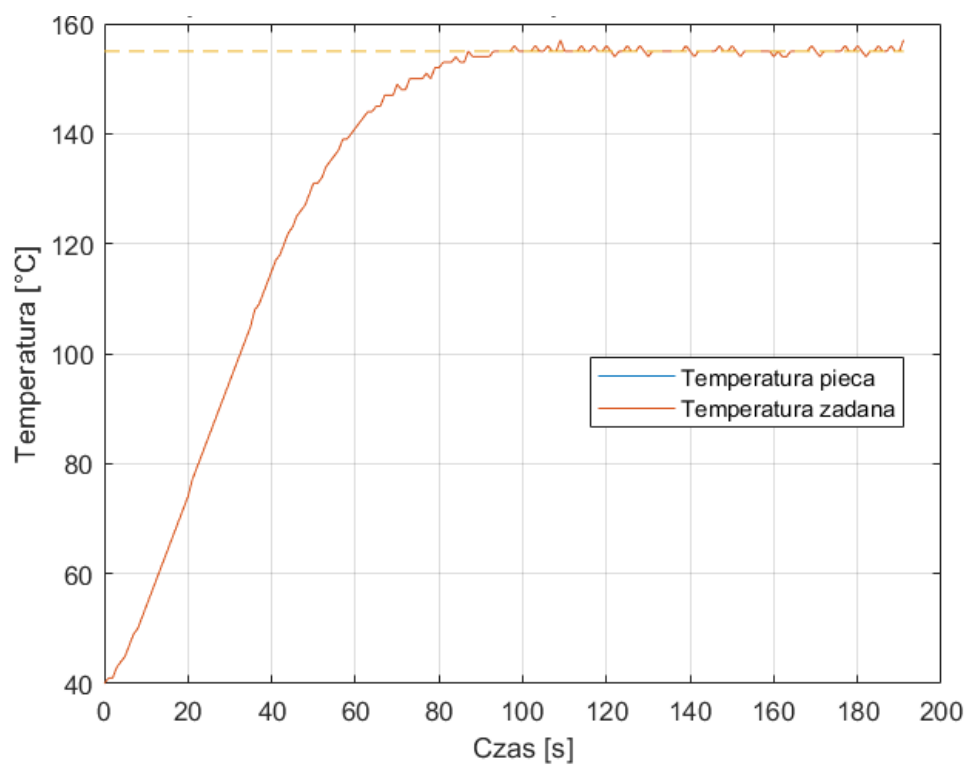
W celu implementacji algorytmu sterowania skonstruowano cyfrowy regulator PID, który pobiera próbki z układu co sekundę. Pierwszą odpowiedź układu otrzymaną z wykorzystaniem regulatora przedstawia rysunek 2.5.2. Wzmocnienie członu proporcjonalnego było równe 1, a wzmocnienie pozostałych członów równe 0. Zauważalny był uchyb ustalony. Następnie wartość wzmocnień członu różniczkującego i całkującego ustawiano eksperymentalnie tak by zachować odpowiedni czas narastania i zniwelować uchyb w stanie ustalonym do zera. W ten sposób uzyskano odpowiedź przedstawioną na rysunku 3.6.2. Testy samego regulatora odbywały się bez płytki PCB. Następnie odbyły się testy pełnego procesu z włożoną płytką PCB. Aby uzyskać jak najbardziej dokładne pomiary, termistor został umieszczony bezpośrednio na płytce, jednak w taki sposób by nie przeszkadzał w procesie lutowania. Okazało się, że sama płytka istotnie wpływa na rozkład temperatury wewnątrz pieca, a regulator zaczyna inaczej się zachowywać. Powstał ponownie uchyb w stanie ustalonym. Rysunek 3.6.3 przedstawia pełną odpowiedź czasową układu z niepoprawionymi nastawami regulatora. Poprawiając wzmocnienie członu całkującego pozbyto się uchybu i uzyskano finalnie wzmocnienia  $K_p = 1$ ,  $K_i = 0.003$ ,  $K_d = 0.7$ . Odpowiedź układu z wymienionymi nastawami przedstawia rysunek 3.6.4.

Aby uzyskać jak najlepszą jakość procesu należy zadbać o jak najdokładniejsze nałożenie pasty i odpowiednie osadzenie na niej elementów. Wiele niepowodzeń może być skutkiem zaniedbania tych czynności. Na płytce lutowano z pomocą dwóch past: Sn9,5 Ag3 Cu0,5 i Sn62 Pb36 Ag2 firmy Easy-Print. Obydwie pasty mają takie same parametry temperaturowe. Na rysunku 3.6.5 przedstawiono efekt lutowania z wykorzystaniem budowanego pieca.

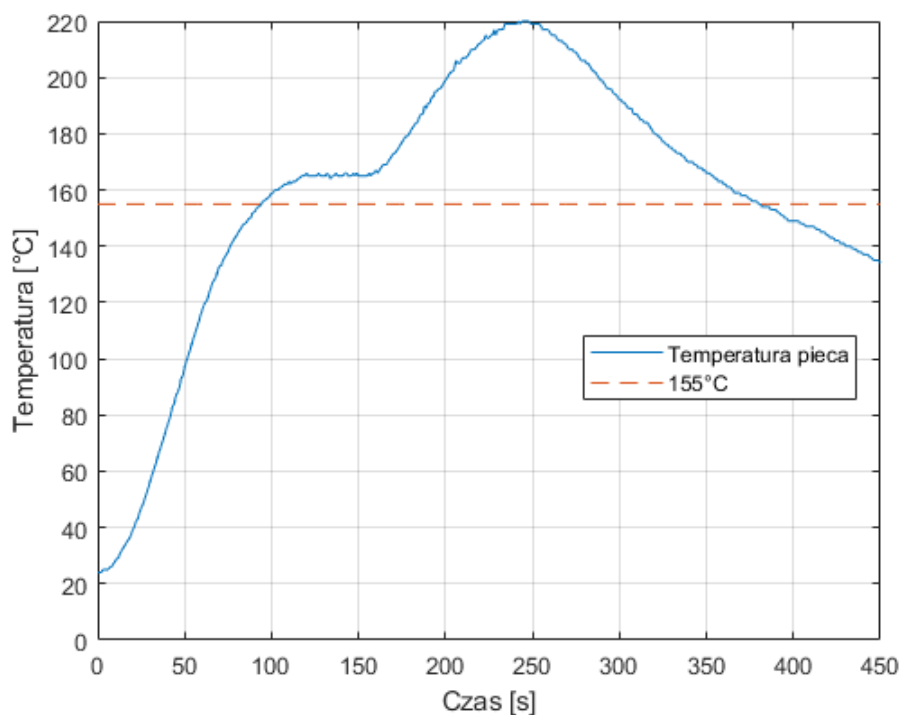




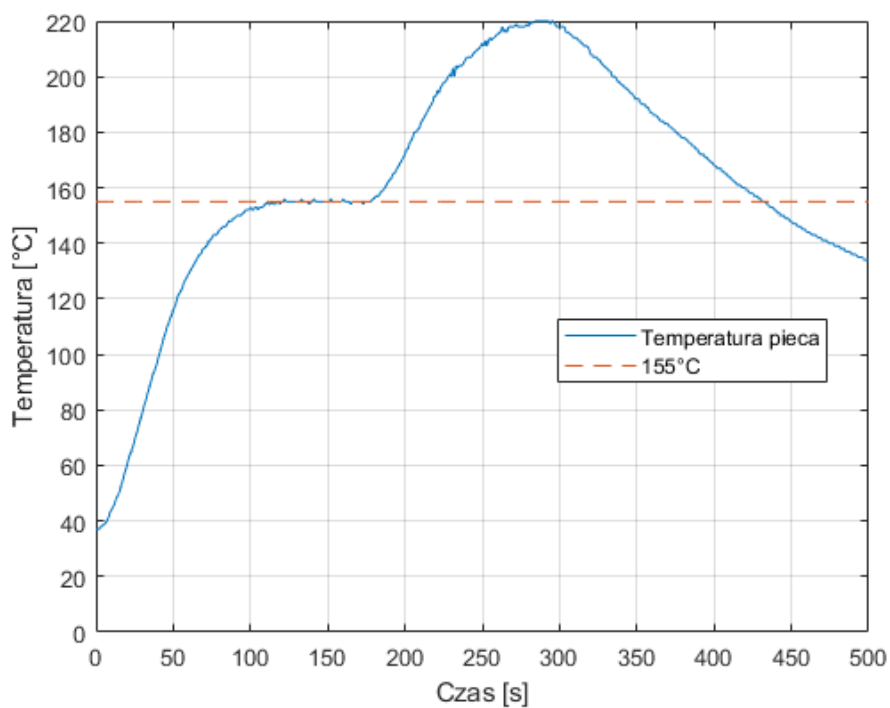
Rysunek 3.6.1 Schemat blokowy układu sterowania



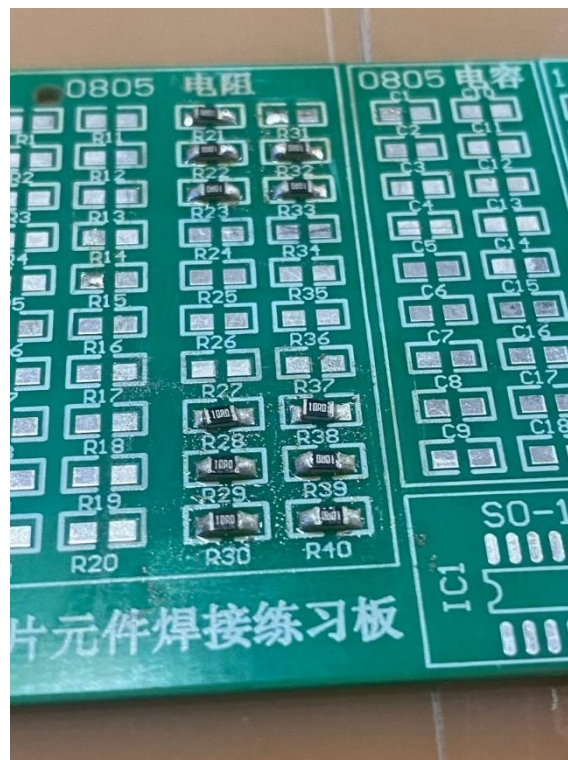
Rysunek 3.6.2 Odpowiedź układu z poprawnie nastawionymi wzmocnieniami członów regulatora PID



Rysunek 3.6.3. Pełna odpowiedź czasowa pieca rozplwowego z niepoprawnymi nastawami regulatora



Rysunek 3.6.4. Pełna odpowiedź czasowa pieca rozplwowego z poprawionymi nastawami regulatora



Rysunek 3.6.5 Efekt lutowania w piecu

#### 4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Wykonanie projektu pieca do montażu elementów elektronicznych wykonanych z elementów SMD wymagało zapoznania się z istniejącymi metodami montażu w zależności od ich przeznaczenia. Konieczne było również wykorzystanie dotychczasowej wiedzy z zakresu elektroniki, teorii sterowania oraz programowania. Udało się zbudować urządzenie, które spełnia założenia projektowe. Zbudowany piec może być wykorzystywany do montażu małych elementów elektronicznych. Problemy napotkane w trakcie prac nad urządzeniem wskazują obszary, które powinny zostać poprawione lub zrobione w inny sposób. W przypadku chęci montażu elementów na płytkach o rozmiarach większych niż 10x10 cm piec powinien zostać wyposażony w wentylator wewnątrz komory grzewczej. Wentylator mieszałby powietrze w jej wnętrzu, czego efektem byłby lepszy rozkład temperatury. Testy montażu na płytkach o takich rozmiarach pokazały rozbieżności w pomiarach temperatury na powierzchni płytki bezpośrednio nad źródłem ciepła oraz krawędzią komory grzewczej. W przypadku montażu płytek do 10 cm długości rozbieżności te nie mają znaczącego wpływu na poprawność montażu, ponieważ producenci past lutowniczych uwzględniają kilkuprocentowe odchylenia od sugerowanych temperatur. Zastosowanie wentylatora mieszającego powietrze zniwelowałoby jednak to zjawisko.

Zauważono również duży wpływ na efekt lutowania rozplývowego warstwy nałożonej pasty lutowniczej oraz idealnego rozmieszczenia elementów. Dokładność wymienionych czynności definiuje poprawność montażu elementów do montażu powierzchniowego. Wpływ zbyt małej ilości pasty lutowniczej widoczny jest na rysunku 3.6.3. Rezystory R27 i R37 zostały zamontowane przy użyciu zbyt małej ilości pasty oraz niesymetrycznie względem pól lutowniczych. Skutkiem takich zaniechań jest niepołączenie elementów z powierzchnią płytki w przypadku zbyt małej ilości pasty. Niepoprawne rozłożenie elementów skutkuje możliwością przesunięcia elementu podczas oddziaływania temperatury i rozplývania pasty, co prowadzi do wykonania połączenia nieodpornego fizycznie lub całkowitego braku połączenia między elementem i płytką. Pokazuje to jak istotną rolę w nakładaniu pasty lutowniczej odgrywają szablony, dzięki którym na każdym polu umieszczona zostanie jednakowa ilość pasty.

## WYKAZ LITERATURY

- [1] Radomski T., Ciszewski A.: Lutowanie.
- [2] Felba J.: Montaż w elektronice. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2010
- [3] Illes B., Krammer O., Geczy A.: Reflow Soldering. Apparatus and Heat Transfer Processes. Elsevier, Budapeszt 2020
- [4] LiupingWang, Shan Chai, Dae Yoo, Lu Gan and Ki Ng: PID and Predictive Control of Electrical Drives and Power Converters using MATLAB / Simulink, Singapur 2015
- [5] R.P. Prasad, Surface Mount Technology, Principles and Practice, Springer Science, New York 1997
- [6] DIN 5031-7 Standard, Optical radiation physics and illumination engineering; terms for wavebands standard by Deutsches Institut Fur Normung E.V. (German National Standard), 01/01/1984.
- [7] ISO 20473:2007, Optics and photonics—Spectral bands (reviewed in 2015).
- [8] M. Judd, K. Brindley, Soldering in Electronics Assembly, BH Newnes, Oxford, UK 1999
- [9] Reflow Soldering Processes and Troubleshooting: SMT, BGA, CSP and Flip Chip Technologies Ning-Cheng Lee, BOSTON
- [10] M. Inoue, T. Koyanagawa, Thermal simulation for predicting substrate temperature during reflow soldering process, in: IEEE Proceedings of 55th Electronic Components and Technology Conference, Lake Buena Vista, FL, 2000
- [11] <https://www.surfacemountprocess.com/reflow-soldering-process.html> (data dostępu 21.11.2022).
- [12] <https://assemteceurope.com/baza-wiedzy> (data dostępu 21.11.2022).
- [13] <https://www.electronicshub.org/reflow-soldering/> (data dostępu 21.11.2022).
- [14] <https://www.semicon.com.pl/szablony-laserowe-smt/> (data dostępu 21.11.2022).
- [15] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator\\_PID#Algorytm\\_regulatora](https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_PID#Algorytm_regulatora) (data dostępu 21.11.2022).
- [16] <https://acse.pl/informacje-techniczne/czujniki-temperatury/> (data dostępu 21.11.2022).
- [17] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Pomiar\\_temperatury](https://pl.wikipedia.org/wiki/Pomiar_temperatury) (data dostępu 22.11.2022).
- [18] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Termistor> (data dostępu 22.11.2022).
- [19] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo\\_Wiena](https://pl.wikipedia.org/wiki/Prawo_Wiena) (data dostępu 22.11.2022).
- [20] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Konwekcja> (data dostępu 24.11.2022).
- [21] [https://en.wikipedia.org/wiki/Euler\\_equations\\_\(fluid\\_dynamics\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Euler_equations_(fluid_dynamics)) (data dostępu 24.11.2022).
- [22] [http://www.etasmt.com/te\\_contactus/0/0.shtml](http://www.etasmt.com/te_contactus/0/0.shtml) (data dostępu 24.11.2022).
- [23] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Serial\\_Peripheral\\_Interface](https://pl.wikipedia.org/wiki/Serial_Peripheral_Interface) (data dostępu 24.11.2022).
- [24] <https://www.ebmia.pl/wiedza/porady/automatyka-porady/enkoder> (data dostępu 26.11.2022).
- [25] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Prze%C5%BAnik> (data dostępu 26.11.2022).

- [26] <https://e-kalorik.pl/pl/p/Kalorik-Mini-Piekarnik-Bialy-9L-900W-OT-2025-WH/1095#galleryName=productGallery.imageNumber=1> (data dostępu 29.11.2022).
- [27] [https://pl.wikipedia.org/wiki/Stal\\_nierdzewna](https://pl.wikipedia.org/wiki/Stal_nierdzewna) (data dostępu 01.12.2022).
- [28] <https://holtex.pl/oferta/tkaniny-i-wlokniny-techniczne/tkaniny-techniczne/tkaniny-szklane/tkanina-szklana-powlekana-aluminium-lub-pu> (data dostępu 01.12.2022).
- [29] [http://akademia.nettigo.pl/arduino\\_uno/](http://akademia.nettigo.pl/arduino_uno/) (data dostępu 01.12.2022).
- [30] smt11.com (data dostępu 03.12.2022).
- [31] <https://x3dshop.com/products/termistor-szklany-ntc100k-1m-bez-wtyczki> (data dostępu 03.12.2022).
- [32] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Termopara> (data dostępu 04.12.2022).
- [33] <https://botland.com.pl/sondy-temperatury-pt100/7467-sonda-pomiarowa-wysokiej-temperatury-pt100-7x200mm-5904422306977.html> (data dostępu 04.12.2022).
- [34] <https://botland.com.pl/enkodery/6903-enkoder-z-przyciskiem-20-impulsow-12mm-ec11-pionowy-5szt-5903351245425.html> (data dostępu 04.12.2022).
- [35] <https://botland.com.pl/przekazniki-polprzewodnikowe-ssr/14498-przekaznik-polprzewodnikowy-ssr-fotek-10-da-10a-380vac-32vdc-5904422348243.html> (data dostępu 04.12.2022).
- [36] <https://botland.com.pl/arduino-seria-podstawowa-oryginalne-plytki/13281-arduino-uno-wifi-rev2-abx00021-7630049200234.html> (data dostępu 04.12.2022).

## SPIS RYSUNKÓW

Rysunek 2.1.1. Elementy elektroniczne do montażu przewlekanego z wyprowadzeniem osiowym oraz jednostronnym [2] .....	3
Rysunek 2.2.1 Schemat blokowy procesu lutowania rozplwowego .....	6
Rysunek 2.2.2 Charakterystyka temperaturowo-czasowa procesu lutowania rozplwowego [12] .....	7
Rysunek 2.3.1 Promieniowanie padające na ciało szare.....	10
Rysunek 2.3.2. Strefa robocza pieca wsadowego [3].....	12
Rysunek 2.4.1 Konwekcyjny piec do lutowania rozplwowego [30].....	14
Rysunek 2.5.1 Schemat blokowy idealnego regulatora PID [15].....	15
Rysunek 2.5.2. Przykładowa odpowiedź układu.....	16
Rysunek 2.6.1 Przykład drukowania szablonowego [3].....	17
Rysunek 2.6.2 Etapy drukowania szablonowego [3].....	18
Rysunek 2.7.1 Przykład poprawnie umieszczonych elementów [3].....	19
Rysunek 3.1.1 Piekarnik kuchenny firmy Kalorik [26].....	22
Rysunek 3.1.2 Montaż izolacji termicznej.....	23
Rysunek 3.1.3 Model 3D oraz wydruk obudowy części elektronicznej.....	23

Rysunek 3.2.1 Czujnik PT100 [33].....	25
Rysunek 3.2.2 Termistor [31].....	26
Rysunek 3.2.3 Przykład termopary [32].....	26
Rysunek 3.2.1 Podłączenie termistora.....	28
Rysunek 3.3.1 Badanie odpowiedzi skokowej układu.....	29
Rysunek 3.4.1 Enkoder z przyciskiem 20 impulsów 12mm - EC11 pionowy [34].....	29
Rysunek 3.4.2 Przekaznik półprzewodnikowy SSR Fotek-10 DA - 10A 380VAC / 32VDC [35].....	31
Rysunek 3.4.3 Arduino UNO [36].....	31
Rysunek 3.5.1 Diagram menu.....	32
Rysunek 3.5.2 Przykładowe działanie wyświetlacza.....	33
Rysunek 3.6.1 Schemat blokowy układu sterowania.....	34
Rysunek 3.6.2 Odpowiedź układu z poprawnie nastawionymi wzmocnieniami członów regulatora PID .....	34
Rysunek 3.6.3 Pełna odpowiedź czasowa pieca rozplwowego z niepoprawnymi nastawami regulatora .....	35
Rysunek 3.6.4 Pełna odpowiedź czasowa pieca rozplwowego z poprawionymi nastawami regulatora .....	35
Rysunek 3.6.5 Efekt lutowania w piecu.....	36

## SPIS TABEL

Tabela 2.2.1 Kategorie past lutowniczych ze względu na rozmiar cząstek spoiwa [9].....	8
Tabela 3.2.1 Zakres temperatury dla różnych przewodników.....	24
<i>Tabela 3.2.2 Zakres temperatury dla różnych termopar.....</i>	<i>27</i>

## TREŚCI DODATKOWE

W celu udostępnienia kodu źródłowego zamieszczono poniżej linku do dysku, w którym zamieszczono załączniki.

[https://drive.google.com/drive/folders/1IKKWBMQKKReLgHfMfIHrOI9\\_GreKokz9?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/1IKKWBMQKKReLgHfMfIHrOI9_GreKokz9?usp=sharing)