

Politechnika Warszawska

W Y D Z I A Ł   M E C H A T R O N I K I



# Praca dyplomowa inżynierska

na kierunku Mechatronika  
w specjalności Mikrotechnologie i nanotechnologie

Realizacja sterownika zespołu grzewczego stanowiska do gięcia  
materiałów termoplastycznych

numer pracy według wydziałowej ewidencji prac: 114B-ISP-MT/278279/1124487

**Marcin Wiesław Łykowski**

numer albumu 278279

promotor  
dr inż. Andrzej Skalski

konsultacje  
—

WARSZAWA 2019

<b>PRACA DYPLOMOWA</b> <b>inżynierska</b>	
<u>Specjalność:</u> Mikrotechnologie i Nanotechnologie	
<u>Instytut prowadzący specjalność:</u> Instytut inżynierii precyzyjnej i biomedycznej <u>Instytut prowadzący pracę:</u> Instytut inżynierii precyzyjnej i biomedycznej	
<b>Temat pracy:</b> Realizacja sterownika zespołu grzewczego stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych	
<b>Temat pracy (w jęz. ang.):</b> Implementation of the heating unit controller for the bending station for thermoplastic materials	
<b><u>Zakres pracy:</u></b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Dobór odpowiedniego algorytmu regulacji temperatury</li> <li>2. Zaprojektowanie i wytworzenie obwodu drukowanego</li> <li>3. Oprogramowanie komponentów układu</li> <li>4. Przeprowadzenie testów sterownika</li> </ol>	
<b><u>Podstawowe wymagania:</u></b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Projekt i wykonanie sterownika zespołu grzewczego giętarki, regulującego temperaturę materiałów termoplastycznych</li> </ol>	
<b><u>Literatura:</u></b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. „Technika regulacji temperatury”; S. Skoczowski; Redakcja Czasopisma Pomiary Automatyka; 2000; ISBN 83-87982-60-1</li> <li>2. „Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych”; L. Michalski, K. Kuźmiński, J. Sadowski; Wydawnictwo Naukowo-Techniczne; 1981; ISBN 83-204-0190-9</li> </ol>	
<b>Słowa kluczowe:</b> Regulacja temperatury, mikrokontroler, gięcie materiałów termoplastycznych	
<i>Praca dyplomowa jest realizowana we współpracy z przemysłem</i> <div style="text-align: center;">Nie,</div> <i>Nazwa firmy: Praca dyplomowa nie jest realizowana we współpracy z przemysłem</i>	
<b>Imię i nazwisko dyplomanta:</b>  <div style="text-align: center;">Marcin Łykowski</div>	<b>Imię i nazwisko promotora:</b> <div style="text-align: center;">Dr inż. Andrzej Skalski</div>
	<b>Imię i nazwisko konsultanta:</b> <div style="text-align: center;">Mgr inż. Piotr Walter</div>
<b>Temat wydano dnia:</b>  <div style="text-align: center;">20.09.2018</div>	<b>Termin ukończenia pracy:</b>  <div style="text-align: center;">27.01.2019</div>
<b>Miejsce wykonywania praktyki przeddyplomowej:</b> Asseco Business Solutions S.A.	
<b>Zatwierdzenie tematu</b>	
Opiekun specjalności	Z-ca Dyrektora Instytutu

## Streszczenie

**Temat:** Realizacja sterownika zespołu grzewczego stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych

Niniejsza praca dyplomowa inżynierska przedstawia projekt i realizację sterownika zespołu grzewczego. Praca zawiera wstęp teoretyczny przedstawiający najważniejsze informacje dotyczące stosowanych technik regulacji temperatury. Scharakteryzowano algorytmy regulacji rozmytej, dwustawnej, PID (ang. *Proportional–Integral–Derivative*) oraz MFC (ang. *Model Following Control*). Opisane zostało również zjawisko gięcia materiałów termoplastycznych. Wskazano najpopularniejsze tworzywa poddawane kształtowaniu termoplastycznemu i ich zastosowania. Następnie przedstawiono istniejące rozwiązania związane z regulatorami przemysłowymi w kontekście regulacji temperatury.

W trzecim rozdziale zawarty został projekt sterownika zespołu grzewczego. Urządzenie oparte jest o układ Arduino Mega2560 wyposażony w mikrokontroler Atmega2560. Wskazano wymagania techniczne sterownika. Poza utrzymaniem zadanej temperatury w miejscu gięcia materiału, regulator powinien odczytywać kąt wychylenia ramienia stołu giętarki i zapewniać komfortową obsługę za pomocą graficznego interfejsu. Przywiązano dużą uwagę do zapewnienia jak najwyższego poziomu bezpieczeństwa. Urządzenie potrafi wyłączyć grzałkę po określonym czasie bezczynności lub w momencie przegrzania stołu giętarki. W następnych podrozdziałach uzasadniono wybór algorytmu regulacji i scharakteryzowano poszczególne komponenty układu. Zamieszczony diagram przepływu danych pozwala łatwiej zrozumieć zasadę działania sterownika. W kolejnych częściach pracy przedstawiono projekt płytki PCB wraz ze schematem elektrycznym oraz opisano proces wytworzenia obwodu drukowanego.

W części programistycznej krótko scharakteryzowano zastosowane środowisko programistyczne Microsoft Visual Studio 2017 z dodatkiem Visual Micro. Praca zawiera podsumowanie wykorzystanych w programie zewnętrznych bibliotek oraz opis implementacji algorytmu dyskretnego regulacji PID w mikrokontrolerze. Ważnym elementem pracy jest zaprezentowany schemat blokowy głównej funkcji programu, która jest odpowiedzialna za sterowanie zespołem grzewczym w trakcie nagrzewania materiału. Na końcu części programistycznej przedstawiono graficzny interfejs użytkownika przeznaczony do opracowywanego sterownika.

Przeprowadzono liczne testy urządzenia w docelowym układzie stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych, które opisano w kolejnym rozdziale pracy. Sporządzono wykresy zależności temperatury grzałki od czasu, przedstawiające działanie regulatora. W trakcie testów zauważono różnice między temperaturą wskazywaną przez pirometr, a zmierzoną przy pomocy kamery termowizyjnej o wyższej dokładności. W celu minimalizacji błędów wskazań została przeprowadzona seria pomiarów, na podstawie której sporządzono krzywą kalibracyjną. W kolejnym rozdziale przedstawiono wnioski z wykonanej pracy. Wskazano najważniejsze cechy wykonanego układu na tle dostępnych na rynku rozwiązań. Opisane zostały również problemy inżynierskie, które należało rozwiązać w trakcie realizacji projektu. Ostatni rozdział podsumowuje pracę oraz opisuje możliwości dalszego rozwoju układu sterownika.

**Słowa kluczowe:** Regulacja temperatury, mikrokontroler, gięcie materiałów termoplastycznych

## **Abstract**

**Topic:** Implementation of the heating unit controller for the bending station for thermoplastic materials

This thesis presents the design and implementation of a heating unit controller. The work contains a theoretical introduction presenting the most important information on the applied temperature control techniques. The fuzzy logic, on-off, PID (Proportional–Integral–Derivative) and MFC (Model Following Control) algorithms are characterized. Line bending of thermoplastic materials has also been described. The most popular plastics subjected to thermoplastic shaping and their applications are listed. Then, the existing temperature control solutions connected with industrial regulators are presented.

The third chapter includes the design of the heating unit controller. The device is based on the Arduino Mega2560 chip equipped with the Atmega2560 microcontroller. The technical requirements of the controller are listed. In addition to maintaining the set temperature in the place of material bending, the regulator should measure the bend angle of the thermoplastic material and provide a user-friendly control by ergonomic graphical interface. Special attention was paid to ensure the safety of usage. The device can turn off the heater after a certain period of inactivity or when the bending machine overheats. In the following subsections, the choice of the regulation algorithm is justified and the individual components of the system are characterized. The provided data flow diagram eases the understanding of the operation's principle of the controller. In the following parts of the work the design of the PCB together with the electrical diagram are presented and the process of making the printed circuit is also described.

In the programming part, the applied Microsoft Visual Studio 2017 development environment with the addition of Visual Micro is briefly characterized. The work contains a summary of the external libraries used in the program and a description of the implementation of the discrete PID control algorithm in the microcontroller. An important element of the work is the presented block diagram of the main program function, which is responsible for controlling the heating unit during material heating. At the end of the programming part, a graphical user interface for the developed controller is presented.

Numerous device tests were carried out on the line bending station for thermoplastic materials, which are described in the next chapter of the work. Graphs of the temperature of the heater dependence on time are presented, showing the operation of the regulator. During the tests, the difference between the temperature indicated by the pyrometer and the temperature measured with a higher accuracy thermal imaging camera was observed. In order to minimize indication errors, a series of measurements was carried out, on the basis of which a calibration curve is prepared. The next chapter presents the conclusions from the performed work. The most important features of the system were shown against the background of solutions available on the market. There were also described engineering problems which had to be solved during the project implementation. The last chapter summarizes the work and describes the possibilities of further development of the controller.

**Keywords:** Temperature regulation, microcontroller, bending of thermoplastic materials



Politechnika Warszawska

załącznik do zarządzenia nr 28/2016 r.  
Rektora PW

„załącznik nr 3 do zarządzenia nr 24/2016 Rektora PW

Warszawa 27.01.18r.  
miejsowość i data

Marcin Żykowski  
.....  
imię i nazwisko studenta  
278 278  
.....  
numer albumu  
Mechatronika  
.....  
kierunek studiów

### OŚWIADCZENIE

Świadomy/-a odpowiedzialności karnej za składanie fałszywych zeznań oświadczam, że niniejsza praca dyplomowa została napisana przeze mnie samodzielnie, pod opieką kierującego pracą dyplomową.

Jednocześnie oświadczam, że:

- niniejsza praca dyplomowa nie narusza praw autorskich w rozumieniu ustawy z dnia 4 lutego 1994 roku o prawie autorskim i prawach pokrewnych (Dz.U. z 2006 r. Nr 90, poz. 631 z późn. zm.) oraz dóbr osobistych chronionych prawem cywilnym,
- niniejsza praca dyplomowa nie zawiera danych i informacji, które uzyskałem/-am w sposób niedozwolony,
- niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanej z nadawaniem dyplomów lub tytułów zawodowych,
- wszystkie informacje umieszczone w niniejszej pracy, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami,
- znam regulacje prawne Politechniki Warszawskiej w sprawie zarządzania prawami autorskimi i prawami pokrewnymi, prawami własności przemysłowej oraz zasadami komercjalizacji.

Oświadczam, że treść pracy dyplomowej w wersji drukowanej, treść pracy dyplomowej zawartej na nośniku elektronicznym (płycie kompaktowej) oraz treść pracy dyplomowej w module APD systemu USOS są identyczne.

Żykowski  
.....  
czytelny podpis studenta

# Spis treści

Rozdział 1. Cel pracy .....	2
Rozdział 2. Wprowadzenie teoretyczne .....	3
2.1. Regulacja temperatury .....	3
2.2. Gięcie materiałów termoplastycznych .....	7
2.3. Przegląd urządzeń dostępnych na rynku .....	9
Rozdział 3. Sterownik zespołu grzewczego .....	12
3.1 Wymagania techniczne .....	12
3.2 Dobór algorytmu regulacji .....	12
3.3 Zasada działania .....	12
3.4 Elementy składowe .....	13
3.4.1 Arduino Mega2560 .....	14
3.4.2 Wyświetlacz LCD .....	14
3.4.3 Czujnik temperatury .....	15
3.4.4 Drążek do sterowania urządzeniem .....	16
3.4.5 Akcelerometr .....	17
3.4.6 Tranzystor MOSFET .....	18
3.4.7 Termistor NTC 110 .....	19
3.5 Projekt obwodu drukowanego .....	19
3.6 Wytworzenie obwodu drukowanego .....	21
Rozdział 4. Oprogramowanie .....	24
4.1 Środowisko programistyczne .....	24
4.2 Wykorzystane biblioteki .....	24
4.3 Programowa regulacja temperatury .....	26
4.4 Interfejs graficzny użytkownika .....	29
Rozdział 5. Testy .....	33
Rozdział 6. Wnioski .....	37
Rozdział 7. Podsumowanie .....	39
Rozdział 8. Bibliografia .....	40
Rozdział 9. Spis rysunków .....	42
Rozdział 10. Spis tabel .....	43
Rozdział 11. Załączniki .....	44

## Rozdział 1. Cel pracy

Celem pracy jest zaprojektowanie i wykonanie sterownika zespołu grzewczego dla stanowiska do precyzyjnego gięcia materiałów termoplastycznych.

W rozumieniu automatyki przemysłowej sterownikiem programowalnym nazywamy „cyfrowy system elektroniczny do stosowania w środowisku przemysłowym, który posługuje się pamięcią programowalną do przechowywania zorientowanych na użytkownika instrukcji w celu sterowania przez cyfrowe lub analogowe wejścia i wyjścia szeroką gamą maszyn i procesów” [1]. Głównym zadaniem opisanego w niniejszej pracy układu była regulacja temperatury. Ze względu na fakt, że opracowywany sterownik jest częścią stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych, niezbędna była implementacja dodatkowych funkcjonalności – m.in. algorytmów bezpieczeństwa, śledzenia temperatury materiału czy graficznego interfejsu użytkownika.

Na realizację funkcji głównej urządzenia składają się trzy etapy. Pierwszym z nich jest zaprojektowanie oraz wykonanie elektronicznego układu sterownika. Drugim zadaniem jest odpowiednie dobranie algorytmu sterowania temperaturą oraz jego implementacja w mikrokontrolerze. Ostatnim etapem są testy oraz kalibracja stanowiska. Ponadto opracowywany w niniejszej pracy układ ma na celu ułatwienie pracy przy stanowisku. Poprzez przejrzysty interfejs pozwala on ustawić przed rozpoczęciem pracy najważniejsze parametry obróbki materiału, takie jak temperatura grzałki i materiału oraz wartość kąta, o jaki należy wygiąć obrabiany materiał.

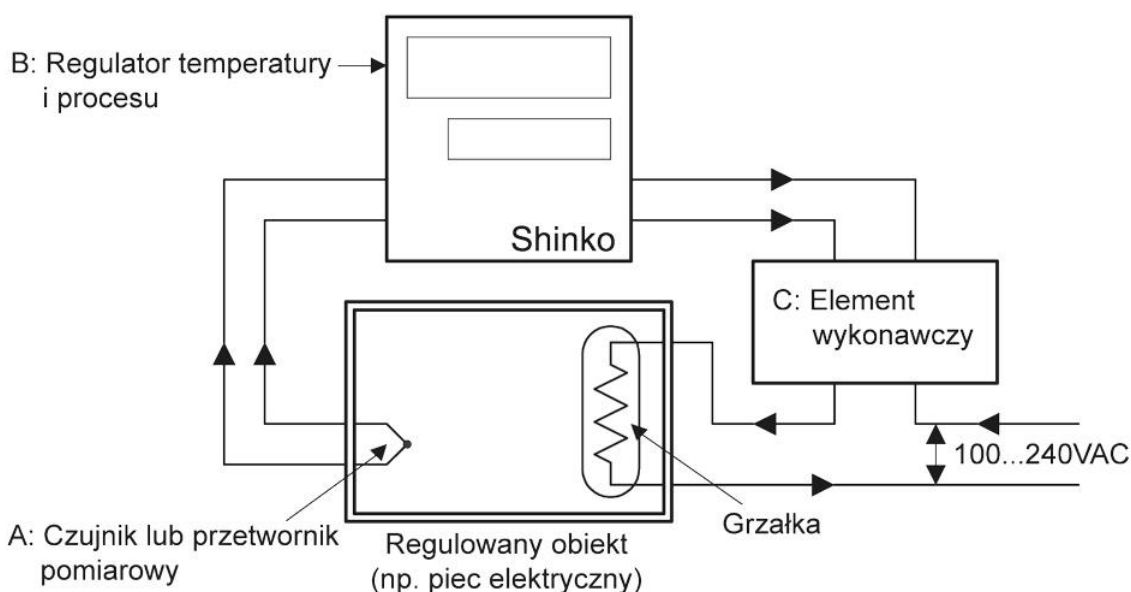
## Rozdział 2. Wprowadzenie teoretyczne

### 2.1. Regulacja temperatury

Obiektem regulacji nazywamy dowolny proces podlegający sterowaniu. Sygnałem wyjściowym obiektu regulacji nazywamy wielkość regulowaną. Może to być np. temperatura pieca, ciśnienie gazu lub poziom cieczy w zbiorniku. Zależy ona od sygnału sterującego, na którego parametry można w zamierzony sposób wpływać oraz od niezależnego sygnału zakłócającego. Celem regulacji jest utrzymywanie wartości regulowanej na poziomie wartości zadanej z określoną dokładnością niezależnie od działania zakłócenia.

W większości przypadków regulacja temperatury przeprowadzana jest w oparciu o pewną wiedzę i informację o obiekcie. Dzięki temu możliwe jest dostosowanie regulatora do konkretnego procesu. Może się jednak zdarzyć, że z biegiem czasu zmienne ulegnie dynamika danego obiektu. Obiekt taki nazywamy niestacjonarnym, ze względu na zmienność w czasie jego parametrów. Im na obiekt działa więcej czynników mających charakter przypadkowy i niekontrolowany, tym trudniej jest zbudować odpowiedni model matematyczny.

Regulacja jest jednym z najistotniejszych elementów złożonych procesów produkcyjnych i technologicznych. Najczęściej układ pomiarowy składa się z elementu pomiarowego oraz wykonawczego i elektronicznego regulatora temperatury (tzw. termoregulatora). Przykładowy układ znajduje się na rys. 1.



Rys. 1. Schemat ideowy standardowego układu regulacji.

Źródło: <https://acse.pl/wp-content/uploads/2015/10/typowy-uklad-regulacji.jpg>

Element pomiarowy mierzy temperaturę i porównuje ją z wartością zadaną. Na podstawie różnicy tych wartości regulator wysyła odpowiedni sygnał sterujący do elementu wykonawczego. Sygnał ten zależy m.in. od odchyłki pomiędzy wartością zadaną i mierzoną. Element wykonawczy włącza lub wyłącza grzałkę, w zależności od rodzaju otrzymanego sygnału. Jako element wykonawczy mogą być stosowane różnego rodzaju przekaźniki oraz styczniki.



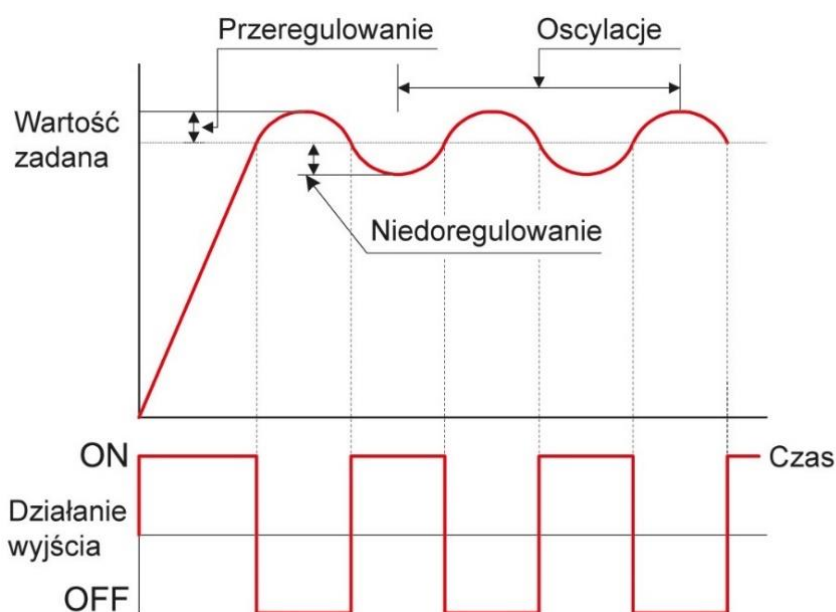
W zależności od zadania jakie ma spełniać układ automatycznej regulacji, należy wyróżnić trzy rodzaje regulacji [2]:

- Regulacja stałowartościowa (stabilizacyjna) – niezależnie od działających zakłóceń, wielkość regulowana powinna być utrzymywana na stałym poziomie równym wartości zadanej
- Regulacja śledząca – wielkość regulowana powinna nadążać za zmianami wartości zadanej
- Regulacja programowa – wielkość regulowana powinna zmieniać się w czasie zgodnie z określonym z góry programem zmiany wartości zadanej

Bez względu na rodzaj postawionego zadania, regulator zawsze działa według określonego algorytmu regulacji. W oparciu o pracę Stanisława Skoczowskiego „Technika regulacji temperatury” [2] przedstawiono poniżej kilka istniejących rozwiązań.

### Regulacja dwustawna

Jednym z prostszych sposobów automatycznej regulacji temperatury obiektów cieplnych jest regulacja dwustawna. Sygnał sterujący może przyjmować tylko dwie wartości: 0 lub 1. W momencie kiedy wartość regulowana jest mniejsza od wartości zadanej, na wyjściu regulatora otrzymujemy ciąg impulsów sterujących dodatnich. W przypadku, gdy różnica pomiędzy wartością zadaną i wielkością regulowaną mieści się w granicach tolerancji, sygnał sterujący ma wartość zerową. Rozwiązanie to znajduje zastosowanie w obiektach, gdzie zachodzi konieczność utrzymania określonej temperatury niezależnie od zakłóceń. Zaletą tego rozwiązania jest jego prostota, niezawodność oraz łatwość konserwacji [3]. Wadą regulacji dwustawnej są oscylacje wielkości regulowanej. Ponadto dużą częstotliwość przełączania elementu sterującego może mieć wpływ na jego żywotność. Schemat działania takiego regulatora przedstawia rys. 2.

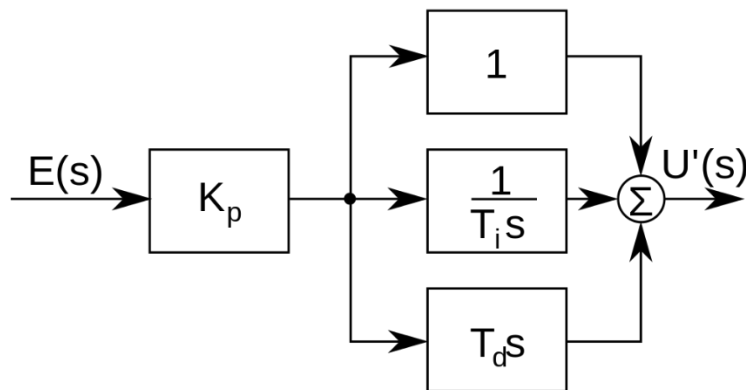


Rys. 2. Schemat działania regulatora dwustawnego.

Źródło: <https://acse.pl/wp-content/uploads/2015/10/regulacja-on-off.jpg>

## Regulacja PID

Algorytm PID (ang. *Proportional-Integral-Differential*) jest najpopularniejszym algorytmem liniowym stosowanym w regulacji procesów przemysłowych. Szacuje się, że ponad 90% układów automatycznej regulacji stosuje to rozwiązanie. Sygnał sterujący jest sumą trzech bloków funkcyjnych mnożenia, całkowania i różniczkowania. Jako argument operacje te przyjmują różnicę pomiędzy wartością zadaną i wielkością regulowaną. Schemat blokowy idealnego regulatora PID przedstawia rys. 3.



Rys. 3. Schemat blokowy idealnego regulatora PID.

Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator\\_PID#Algorytm\\_regulatora](https://pl.wikipedia.org/wiki/Regulator_PID#Algorytm_regulatora)

Algorytm PID charakteryzuje się stosunkowo niewielką wrażliwością na niedokładną znajomość modelu obiektu i zakłócenia. Niewątpliwą zaletą jest fakt, że posiada tylko trzy strojone parametry [2]. Wzór (1) przedstawia sygnał sterujący  $u(t)$  będący sumą trzech wspomnianych oddziaływań na sygnał błędu  $e(t)$ .

$$u(t) = K_P e(t) + \frac{1}{T_C} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_R \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Gdzie:

- $K_P$  – wzmacnienie członu proporcjonalnego P
- $T_C$  – stała całkowania (czas zdwojenia) członu całkującego I
- $T_R$  – stała różniczkowania (czas wyprzedzenia) członu różniczkującego D

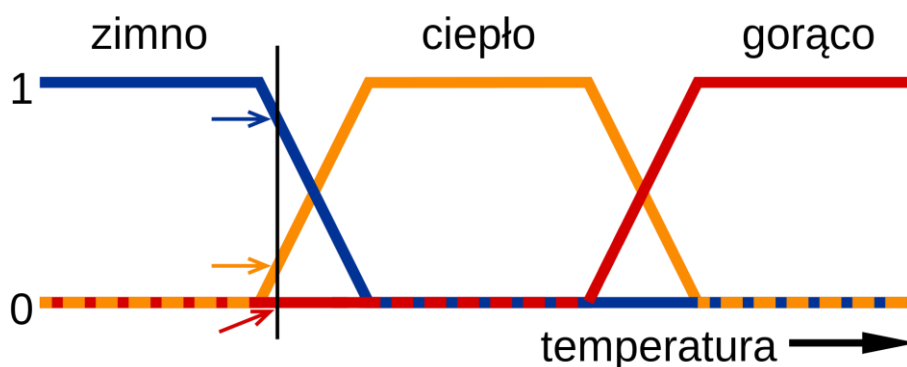
Działanie członu proporcjonalnego polega na zwiększaniu wartości sygnału sterującego wraz ze wzrostem odchyłki pomiędzy wartością regulowaną, a wartością zadaną w zakresie proporcjonalności [4]. Na tle regulatora dwustawnego, regulator proporcjonalny wyróżnia się brakiem oscylacji oraz przeregulowań. Natomiast w trakcie regulacji proporcjonalnej powstaje błąd regulacji (offset). Czas dojścia wartości regulowanej do wartości zadanej zależy od zakresu proporcjonalności. Im większy, tym dłużej będzie trwało wysterowanie temperatury. Wraz ze wzrostem zakresu proporcjonalności rośnie błąd regulacji. W stanie ustalonym człon proporcjonalny charakteryzuje się brakiem reakcji na istnienie uchybu, co jest niewątpliwie wadą tego rozwiązania. Z tego powodu stosuje się dodatkowo człon całkujący. Dzięki takiemu rozwiązaniu, regulator koryguje automatycznie uchyb spowodowany działaniem

proporcjonalnym. Wadą takiego rozwiązania jest fakt, iż w momencie wystąpienia gwałtownej zmiany wartości regulowanej spowodowanej zakłóceniem, regulator potrzebuje czasu do ustabilizowania wartości regulowanej na poziomie wartości zadanej. Wraz ze wzrostem czasu całkowania, rośnie czas potrzebny na skorygowanie błędu regulacji. Działanie członu różniczkującego równoważy szybkie zmiany sygnału błędu, co wpływa stabilizująco na działanie układu regulacji. W dużej mierze pozwala to na zwiększenie intensywności działania pozostałych parametrów regulatora. Wraz ze zmniejszaniem czasu działania członu różniczkującego, działanie korekcyjne staje się słabsze. W efekcie odpowiedź regulatora na szybką zmianę wartości staje się wolniejsza.

Przy założeniu, że parametry operacji mnożenia, całkowania i różniczkowania są odpowiednio dobrane, regulacja PID pozwala osiągnąć dobrą jakość sterowania. Przy wyborze parametrów należy kierować się dynamiką danego procesu. Należy przy tym zachować szczególną ostrożność, gdyż nieprawidłowy dobór może skutkować znaczącym pogorszeniem jakości sterowania.

### Regulacja rozmyta

Jednym z niestandardowych pomysłów na realizację sterowania może być wykorzystanie logiki rozmytej. W zależności od złożoności parametrów procesów i związków zachodzących pomiędzy nimi, budowa modelu obiektu regulacji może być niemożliwa. W tego typu przypadkach można jedynie określić w sposób jakościowy, a nie ilościowy właściwości procesu [2]. W przeciwieństwie do tzw. logiki ostrej, w której element  $x$  zawiera się lub nie zawiera w zbiorze  $A$ , w rozumieniu logiki rozmytej element  $x$  będzie należał do zbioru  $A$  częściowo, w granicach 0 do 1. Tak więc w kategoriach logiki rozmytej zaznaczonej na rys. 4. czarną linią temperaturze można przypisać jednocześnie wartości „dość zimna”, „ledwo ciepła”, „jeszcze nie gorąca” mimo, że jest to to samo zjawisko. W ten sposób można opisać dany proces tworząc tzw. funkcje przynależności, do których dany element może należeć jednocześnie. Przykładowymi kategoriami jakościowymi zjawiska mogą być: głęboko, płytko, ciepło, zimno, silnie, słabo, głośno, cicho itp.



Rys. 4. Funkcje przynależności do zbiorów zimno, ciepło, gorąco.

Źródło: [https://pl.wikipedia.org/wiki/Logika\\_rozmyta](https://pl.wikipedia.org/wiki/Logika_rozmyta)

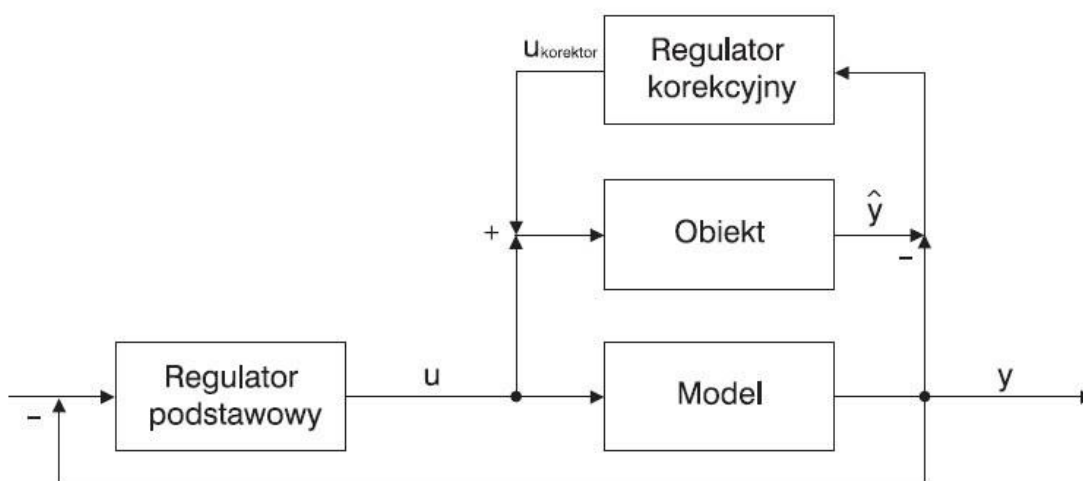
Algorytm regulacji rozmytej jest zbiorem reguł wyznaczonych na podstawie doświadczeń zdobytych w trakcie użytkowania danego procesu. Do opisu funkcji stosuje się instrukcje **AND**, **OR**, **IF**, **THEN**. Regułę można zapisać w następujący sposób:

**Jeżeli (IF) <Temperatura jest za wysoka oraz (AND) temperatura nie zmienia się> to (THEN)**  
**<zmnij sygnał sterujący>**

Dzięki zastosowaniu logiki rozmytej możliwe jest sterowanie obiektem nieliniowym za pomocą funkcji liniowych.

### Regulacja MFC

MFC (ang. *Model Following Control*) jest układem regulacji automatycznej zachowującym swoje własności nie tylko dla pojedynczego procesu regulowanego, ale dla pewnego zbioru procesów, z których każdy należy do tej samej klasy [5]. Struktura MFC zawiera dwa układy regulacji – regulator podstawowy oraz korekcyjny. Regulator podstawowy steruje modelem procesu. Sygnał sterowania regulatora korekcyjnego wypracowany jest na podstawie przewidywanej wartości procesu wychodzącej z modelu i rzeczywistej wartości procesu. Dzięki powyższym rozwiązaniom, występujące zakłócenia są doskonale tłumione, a układ ten zachowuje żądaną jakość regulacji [2]. Schemat ogólny struktury MFC przedstawia rys. 5.



Rys. 5. Schemat struktury Model Following Control.

Źródło: [https://automatykab2b.pl/i/images/0/8/9/dz03NzYmaD0zNDk=\\_src\\_131089-12309automatyzacja\\_rys.jpg](https://automatykab2b.pl/i/images/0/8/9/dz03NzYmaD0zNDk=_src_131089-12309automatyzacja_rys.jpg)

## 2.2. Gięcie materiałów termoplastycznych

Materiały termoplastyczne to materiały, które przy pewnej wartości temperatury i ciśnienia zaczynają mieć własności lepkiego płynu. W takim stanie można dowolnie kształtować ich wygląd. Po osiągnięciu zamierzonego kształtu są one schładzane do temperatury pokojowej, osiągając pierwotną twardość. Mogą być one wielokrotnie przetwarzane, jednak z czasem ich właściwości ulegają pogorszeniu. Dzieje się tak, ponieważ polimery podczas procesu przetwórstwa w stanie plastyczno-płynnym poddawane są obciążeniom termicznym oraz mechanicznym, dzięki którym dochodzi do procesów utleniania i degradacji. W skutek tego zmniejsza się ich ciężar cząsteczkowy, a właściwości przetwórcze ulegają pogorszeniu [6].

Materiały te mają zastosowanie przy produkcji różnego rodzaju kształtek, zabawek, części samochodowych, rur, butelek i innych tego typu produktów. Przykładowy element wykonany z tworzywa termoplastycznego znajduje się na rys. 6.

Poza najbardziej podstawowymi formami kształtowania, jak wtryskiwanie, tłoczenie lub wytłaczanie, materiały termoplastyczne można poddawać procesowi gięcia. Polega ono na zagięciu obrabianego arkusza o dany kąt. Gięcie materiałów termoplastycznych najczęściej nie wymaga dużej siły. Aby było to możliwe, materiał jest najpierw nagrzewany wzdłuż linii gięcia do stanu uplastycznienia, w którym utrzymuje wystarczające naprężenia, niezbędne do zachowania równomiernego promienia gięcia. Po zagięciu materiału, pozostaje on utrzymany w stałym zamocowaniu do czasu ostygnięcia.

Przykładowymi materiałami, które mogą zostać poddane gięciu termicznemu są m.in.:

- PMMA (poli(metakrylan etylu))
- PC (poliwęglan)
- PCW (poli(chlorek winylu))
- PET (poli(tereftalan etylenu))
- ABS (poli(akrylonitryl-co-butadien-co-styren))
- HDPE (polietylen dużej gęstości)
- PP (polipropylen)
- HIPS (polistyren wysokoudarowy)

Tworzywa sztuczne poddane procesowi gięcia mogą mieć zastosowanie jako:

- Obudowy
- Przegrody
- Podstawki
- Pudełka
- Kieszenie



Rys. 6. Kieszeń na ulotki wykonana z PMMA.

Źródło: [https://www.jansen-display.pl/image/cache/catalog/C110\\_3-1000x1000.jpg?1518523219](https://www.jansen-display.pl/image/cache/catalog/C110_3-1000x1000.jpg?1518523219)

### 2.3. Przegląd urządzeń dostępnych na rynku

Proces regulacji temperatury jest nieodłącznym elementem wielu procesów technologicznych. Z tego powodu na rynku znajduje się wiele ofert gotowych urządzeń. Poza tymi typowo przemysłowymi, bardzo dużą popularnością cieszą się domowe sterowniki temperatury. Regulatory potrafią bardzo różnić się ceną oraz zakresem zastosowań. Najtańsze urządzenia można kupić już za kilkadziesiąt złotych. Te najbardziej profesjonalne potrafią za to kosztować kilka tys. złotych. Zdecydowana większość ofert przedstawia jednak regulatory z tzw. „średniej półki”, kosztujące w granicach kilkuset złotych. Regulatory temperatury mogą współpracować np. z komorami grzewczymi, piecami centralnego ogrzewania, ciepłarkami, suszarkami itp. Niektóre z urządzeń potrafią regulować też inne wartości, tj. ciśnienie lub wilgotność. Poniżej przedstawiono kilka dostępnych na rynku urządzeń wraz z ich specyfikacją.

#### Termostat PID Enda ETC4420-230 (rys. 7)

Regulator do zastosowań przemysłowych. Posiada dwa wbudowane rodzaje regulacji – ON-OFF oraz PID z samooptymalizacją. Urządzenie wyposażone jest dwa wyświetlacze 7-segmentowe do wyświetlania wartości zadanej (SV) oraz rzeczywistej (PV). Pod spodem znajdują się przyciski do wybierania pozycji w menu termostatu oraz ustawiania wartości. Regulator posiada możliwość zabezpieczenia hasłem przed nieupoważnioną zmianą wartości temperatury. W zależności od użytych czujników, urządzenie może regulować temperatury w zakresie pomiarowym od -200°C do 1600°C. Producent deklaruje dokładność sterownika na poziomie  $\pm 0,2\%$ . Czas próbkowania wynosi 500ms. Charakteryzuje się stopniami ochrony IP60 (z przodu) oraz IP20 (z tyłu). Napięcie robocze wynosi 230V/AC. Sterownik posiada dwa wyjścia przekąźnikowe oraz jedno tranzystorowe [7]. Cena urządzenia wynosi 450 zł netto na dzień 09.12.2018 [8].



Rys. 7. Termostat PID Enda ETC4420-230.

Źródło: <https://www.conrad.pl/p/termostat-pid-enda-etc4420-230-pt100-j-k-t-s-r-przekaznik-2-a-ssr-dxsxw-94-x-48-x-48-mm-197560>

#### Sisel ET2011-T-SM (rys. 8)

W porównaniu do powyższego urządzenia, regulator firmy Sisel jest znacznie prostszy w obsłudze. Jego podstawową funkcją jest wyświetlanie zmierzonej temperatury i jej regulacja jednym z wyjść. Dostępnymi algorytmami regulacji są tryby ON-OFF z pętlą histerezy oraz PID. Urządzenie obsługuje czujniki Pt100 oraz termopary J i K. Wyposażone jest w pamięć EEPROM.

Sterownik posiada jedno wyjście przekaźnikowe, służące do sterowania SSR. Producent deklaruje dokładność sterownika na poziomie  $\pm 0,5\%$  [9]. Cena urządzenia wynosi 190zł netto na dzień 09.12.2018 [10].



Rys. 8. Sterownik temperatury Sisel ET2011-T-SM.

Źródło: [https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury\\_ET2011-T-SM\\_SISEL](https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury_ET2011-T-SM_SISEL)

### Termostat PID Jumo cTRON04 (rys. 9)

Najbardziej zaawansowane urządzenie ze wszystkich przedstawionych. Głównym obszarem zastosowań tego regulatora to ciepłarki, urządzenia do wyrównywania temperatury, piece laboratoryjne, suszarki i urządzenia chłodnicze. W przeciwieństwie do dwóch powyższych urządzeń, poza regulacją temperatury może również sterować np. ciśnieniem, skalą pH w roztworze czy wilgotnością. Podobnie jak w przypadku regulatora firmy ENDA, posiada dwa wyświetlacze 7-segmentowe. Dodatkowo posiada 7 diod LED do wyświetlania pozycji przełącznika, trybu ręcznego, funkcji rampy i trybu timera. Pod ekranem znajdują się cztery przyciski służące do obsługi urządzenia. Regulator posiada funkcje opóźnienia włączenia do sieci i wyłącznika czasowego. Napięcie robocze urządzenia wynosi 110-240 V/AC. Sterownik obsługuje bardzo szeroki zakres czujników temperatury: L, J, U, T, K, E, N, S, R, B, C, D, Pt100, Pt1000 oraz KTY11-6. Producent deklaruje maksymalną odchyłkę na poziomie 0,25% [11]. Cena urządzenia wynosi blisko 1500 zł netto na dzień 09.12.2018 [12].



Rys. 9. Termostat PID Jumo cTRON04.

Źródło: <https://www.conrad.pl/p/termostat-pid-jumo-ctron04-l-j-u-t-k-e-n-s-r-b-c-d-pt100-pt1000-pty11-6-przekaznik-3-a-tranzystorowe-dx-197367>

Podsumowując, na wybór sterownika temperatury ma wpływ bardzo dużo parametrów. Z pozoru podobne urządzenia, potrafią różnić się ceną nawet kilkukrotnie. Własnościami, na które warto zwrócić uwagę podczas podejmowania decyzji to:

- rodzaj algorytmu sterowania
- zakres mierzonych temperatur
- czas potrzebny do osiągnięcia wartości zadanej
- programowalność regulatora
- środowisko pracy
- możliwe zakłócenia wpływające na proces regulacji



## Rozdział 3. Sterownik zespołu grzewczego

### 3.1 Wymagania techniczne

Przed rozpoczęciem realizacji sterownika zostały postawione następujące wymagania techniczne:

- Urządzenie powinno zapewnić impulsową kontrolę temperatury grzania miejsca gięcia z zachowaniem odchyłki od wartości zadanej nie wyższej niż  $5^{\circ}\text{C}$
- Urządzenie powinno odczytywać temperaturę grzałki i materiału w czasie rzeczywistym
- Urządzenie powinno odczytywać kąt wychylenia ramienia stołu w czasie rzeczywistym
- W każdej chwili użytkownik powinien mieć możliwość przerywania grzania
- Urządzenie powinno wyłączać grzanie w momencie kiedy nie jest używane przez określony czas
- Urządzenie powinno wyłączyć grzanie w momencie rozpoczęcia gięcia materiału
- Urządzenie powinno być wyposażone w graficzny interfejs użytkownika
- Urządzenie powinno mieć wbudowane kilka profili grzania zdefiniowanych dla różnych materiałów
- Urządzenie powinno zapamiętywać ostatnie ustawione wartości i po ponownym uruchomieniu traktować je jako domyślne
- Urządzenie powinno być bezpieczne w obsłudze
- Urządzenie powinno być kompaktowych rozmiarów

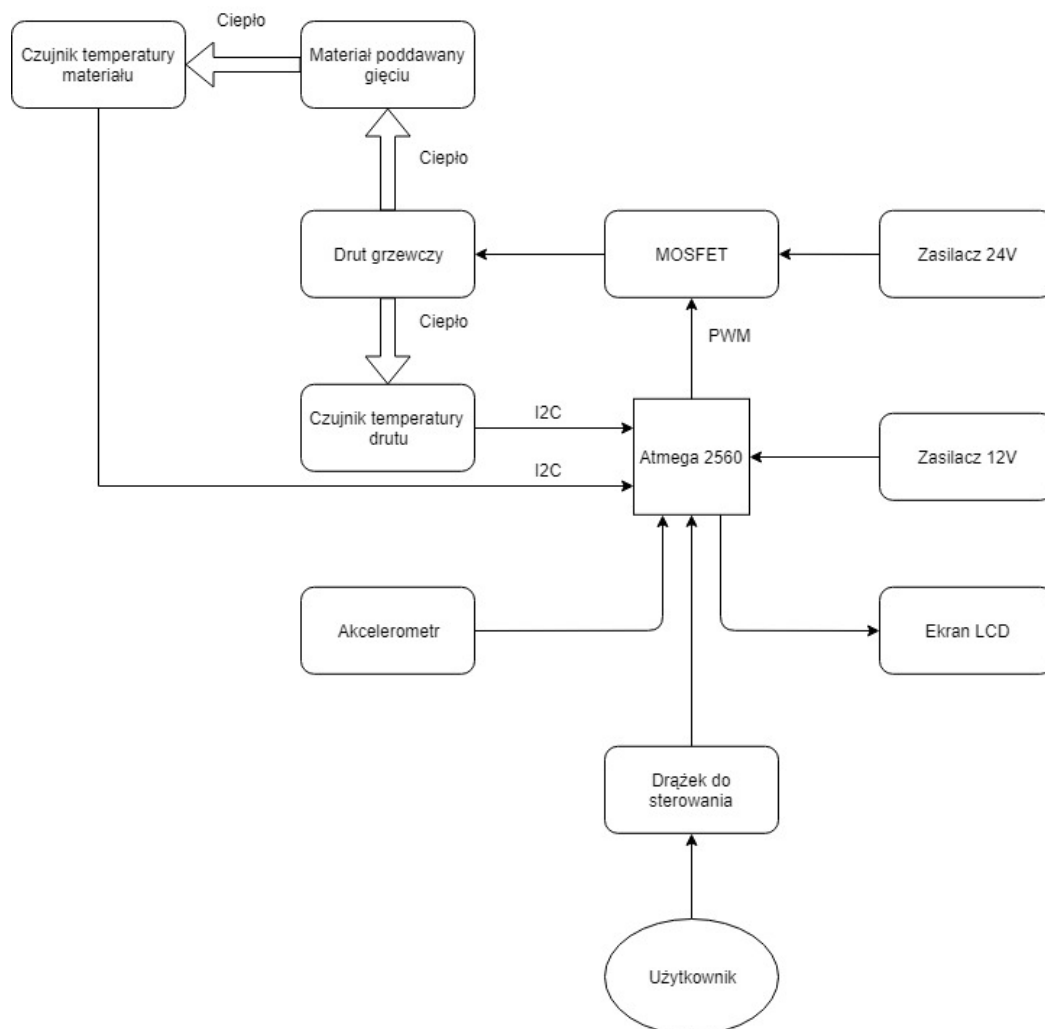
### 3.2 Dobór algorytmu regulacji

W mikrokontrolerze został zaimplementowany dyskretny (cyfrowy) algorytm regulacji PID. Jest to jeden z najpowszechniej stosowanych algorytmów regulacji. Ogromną popularność zawdzięcza swojej prostocie oraz mnogości dostępnych opracowań. Stosowany jest on tam, gdzie wymagana jest regulacja stałowartościowa. W literaturze można znaleźć również szereg opracowań dotyczących doboru nastaw regulatora. Wszystkie powyższe cechy, odporność na zakłócenia oraz stosunek poziomu skomplikowania implementacji algorytmu w mikrokontrolerze do jakości otrzymanej regulacji zadecydowały o wyborze tego rodzaju regulatora.

### 3.3 Zasada działania

Zgodnie z założeniami sterownik odpowiada za regulację temperatury oraz wyświetlanie interfejsu użytkownika. Mikrokontroler poprzez generowanie sygnału PWM (ang. *Pulse Width Modulation*) o odpowiednim wypełnieniu steruje przełącznikiem MOSFET zasilanym napięciem 24V. Stan wysoki na wejściu układu przełącznika powoduje przewodzenie tranzystora, a w efekcie przepływ prądu przez drut oporowy i jego nagrzewanie. Ciepło emitowane przez grzałkę podnosi temperaturę materiału. Zadaniem sterownika jest jej utrzymanie na ustalonym przez użytkownika poziomie. W celu zminimalizowania oscylacji wartości regulowanej, w urządzeniu został zaimplementowany algorytm regulacji PID. Układ Arduino zasilany jest napięciem 12V, natomiast grzałkę podłączono pod zasilanie 24V. Urządzenie zostało wyposażone w ekran LCD do wyświetlania interfejsu użytkownika. Umożliwia on zmianę wartości zadanych, podgląd aktualnych wartości parametrów procesu, kalibrację akcelerometru oraz zmianę nastaw regulatora PID. W momencie gdy temperatura drutu lub materiału osiągnie wartość zadaną, na ekranie LCD wyświetlone zostaną liczniki czasu dla każdego z pomiarów.

Wskazanie to pozwoli operatorowi obserwować jak długo nagrzewany jest materiał, co może być pomocne w przypadku błędnego odczytu temperatury materiału przez pirometr. Wyposażone w pamięć EEPROM Arduino Mega2560 zapamiętuje ostatnie zadane wartości oraz przechowuje ustawienia użytkownika. Diagram (rys. 10) przedstawia w sposób uproszczony, przepływ danych pomiędzy elementami układu oraz rodzaj komunikacji z mikrokontrolerem.



Rys. 10. Diagram przepływu danych układu sterownika.

### 3.4 Elementy składowe

Do budowy układu sterownika zostały wykorzystane następujące elementy:

- Arduino Mega2560
- Wyświetlacz LCD
- Czujnik temperatury
- Drajek do sterowania urządzeniem
- Akceleraometr
- Tranzystor MOSFET
- Termistor NTC 110

Poniżej zamieszczono opis poszczególnych komponentów.

### 3.4.1 Arduino Mega2560

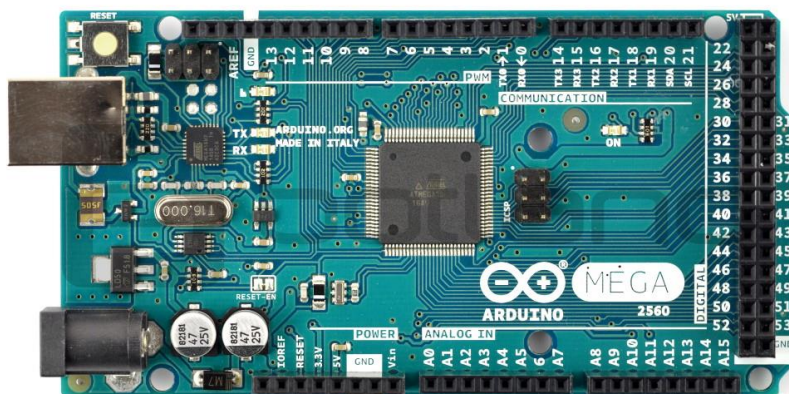
Głównym elementem układu jest Arduino Mega2560 (rys. 11). W przeciwieństwie do standardowych mikrokontrolerów, zestaw ten posiada zainstalowany bootloader. Dzięki temu do wgrania programu do urządzenia wystarczy przewód USB. Jednostką obliczeniową Arduino Mega jest mikrokontroler ATmega2560.

Podstawowe parametry ATmega2560 [13]:

- Taktowanie 16MHz
- 256kB pamięci Flash
- 8kB pamięci RAM
- Pamięć EEPROM: 4kB

Podstawowe parametry układu Arduino Mega2560 [14]:

- Port USB do zasilania oraz przesyłania programu
- 15 kanałów PWM
- Interfejsy szeregowe: 4xUART, SPI, I2C
- 54 złącza wejścia/wyjścia
- Zewnętrzne przerwania
- Napięcie zasilania 7-12 V



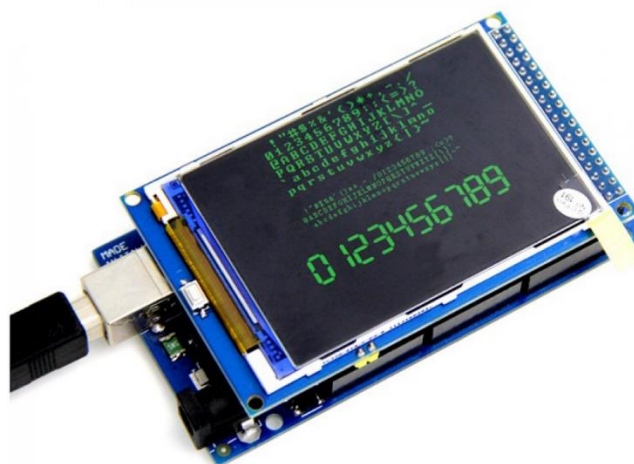
Rys. 11. Rozkład elementów na płytce Arduino Mega 2560.

Źródło: [https://botland.com.pl/19444-thickbox\\_default/arduino-mega-2560-rev3-a000067.jpg](https://botland.com.pl/19444-thickbox_default/arduino-mega-2560-rev3-a000067.jpg)

### 3.4.2 Wyświetlacz LCD

W przeprowadzonym projekcie wyświetlacz spełnia kilka kluczowych funkcji. Przede wszystkim za pomocą interfejsu operator steruje całym urządzeniem, ale również w trakcie gięcia posiada podgląd wszystkich kluczowych parametrów procesu, tj. temperatura i kąt wychylenia ramienia stołu. Z tego powodu standardowe wyświetlacze alfanumeryczne o rozdzielczości 16x2 byłyby nieczytelne i utrudniałyby pracę ze sterownikiem.

Biorąc pod uwagę stawiane wymagania, wybrany został wyświetlacz LCD TFT 480x320 oparty o sterownik ILI9341 [15] (rys. 12).



Rys. 12. Ekran LCD 3,2 cala.

Źródło: <https://www.makerfabs.com/3.2-inch-TFT-Display-480x320-for-Mega.html>

Parametry ekranu [16]:

- Rozdzielczość 480x320 pikseli
- Typ wyświetlacza: TFT IPS
- Typ podświetlenia: 6 diod LED białych
- Przekątna ekranu 3,2 cala
- Brak funkcji dotykowej
- Gniazdo na kartę SD-Card
- Interfejs sterujący: 36 pinów kompatybilnych z Arduino MEGA2560 Rev3
- Moduł w postaci nakładki na Arduino

### 3.4.3 Czujnik temperatury

W projekcie zastosowano moduł GY-906 [17] (rys. 13) pirometru (termometru IR) – wyposażony w czujnik MLX90614 [18]. Układ ten jest fabrycznie skalibrowany. Użycie termometru podczerwieni pozwala na bezdotkowy pomiar temperatury. Polega on na zmierzeniu promieniowania podczerwonego (ciepłego) emitowanego przez badany obiekt. Ważnym parametrem czujnika jest FOV (ang. Field Of View – pole widzenia). Dla wykorzystanego w niniejszej pracy czujnika FOV wynosi 90°. Parametr ten mówi o tym jak daleko może znajdować się mierzony obiekt, przy założeniu, że znany jest jego rozmiar. Wzór (2) przedstawia zależność między FOV, odległością od czujnika i rozmiarem badanego obiektu dla kątów powyżej 45° [19].

$$0,5 \cdot S = \tan\left(\frac{\delta}{2}\right) \cdot D \quad (2)$$

Gdzie:

- S – odległość czujnika od mierzonego obiektu
- $\delta$  – kąt FOV
- D – średnica okręgu tworzonego przez padające promieniowanie podczerwone

Dla  $FOV = 90^\circ$  stosunek średnicy okręgu tworzonego przez padające promieniowanie do odległości od czujnika wynosi 0,5. Należy zaznaczyć, że wraz ze spadkiem  $S$ , maleje również powierzchnia badanego obszaru, a pomiar staje się punktowy. Przykładowo dla odległości równej 2 cm, wysokość badanego obiektu powinna wynosić co najmniej 1 cm.

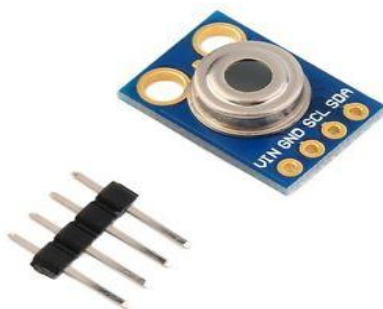
Drugim ważnym parametrem dla dokładności wyników jest współczynnik emisyjności. Domyślnie współczynnik jest równy 1. Możliwa jest jego zmiana, poprzez nadpisanie pamięci EEPROM modułu. Należy to uwzględnić podczas dokonywania pomiarów, ponieważ dla różnych materiałów wartości mogą się znacznie różnić.

Producent deklaruje różną dokładność pirometru, w zależności o zakresu temperatur mierzonego obiektu. Dla wartości mniejszych niż  $180^\circ\text{C}$  tolerancja wynosi  $\pm 2^\circ\text{C}$ . W zakresie  $180\text{--}240^\circ\text{C}$  wzrasta do  $\pm 3^\circ\text{C}$ . Dla wyższych temperatur dokładność pomiaru jest równa  $\pm 4^\circ\text{C}$ .

Z racji tego, że w projekcie zastosowano dwa identyczne czujniki komunikujące się za pomocą I2C, wartość adresu jednego z nich musiała zostać zmieniona. Domyślny adres to 0x5A. Do drugiego pirometru przypisano 0x5B. Należy o tym pamiętać przy ewentualnej wymianie czujnika.

Parametry GY-906:

- Czujnik temperatury MLX90614ESF-BAA
- Wbudowany stabilizator napięcia 3,3 V
- Komunikacja za pomocą magistrali I2C
- Maksymalna temperatura mierzona obiektu:  $380^\circ\text{C}$
- Maksymalna temperatura mierzona otoczenia:  $125^\circ\text{C}$
- Dwa otwory montażowe M3
- Wymiary 17 mm x 12 mm

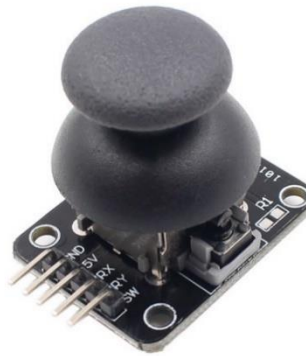


Rys. 13. Moduł pirometru GY-906.

Źródło: <https://www.botshop.co.za/product/gy-906-mlx90614esf-contactless-temperature-sensor/>

#### 3.4.4 Drążek do sterowania urządzeniem

Wszystkie parametry niezbędne do pracy urządzenia ustawiane są poprzez interfejs wyświetlany na ekranie LCD. Z racji braku obsługi dotykowej wyświetlacza, należało zastosować inną formę sterowania. Do tego celu posłużył moduł joysticka z przyciskiem (rys. 14).



Rys. 14. Joystick z przyciskiem.

Źródło: [https://www.makerfabs.com/index.php?route=product/product&product\\_id=76](https://www.makerfabs.com/index.php?route=product/product&product_id=76)

Moduł posiada 2 wyjścia analogowe i 1 cyfrowe, w sumie 5 wyprowadzeń. Są to piny odpowiedzialne za zasilanie, uziemienie, położenie dżoystika w osiach X i Y oraz stan wciśnięcia przycisku. Wychylenie drążka realizowane jest poprzez dwa potencjometry. W teorii wartość w pozycji środkowej powinna być równa połowie napięcia zasilania. W wyniku testów, użyty w projekcie układ charakteryzował się niewielkim błędem, mieszczącym się w granicach tolerancji podanych przez producenta. Zaletą joysticka jest fakt, że jest on bardzo podobny do tych wykorzystywanych w wielu popularnych kontrolerach, dzięki czemu jego obsługa jest bardzo intuicyjna. Moduł jest zasilany napięciem 5V.

### 3.4.5 Akcelerometr

Jednym z wymagań postawionych przed opisywanym sterownikiem jest pomiar kąta w czasie rzeczywistym. Do tego celu wykorzystany został układ MPU6050 [20] przedstawiony na rys. 15., wyposażony w 3-osiowy żyroskop i 3-osiowy akcelerometr. Moduł do komunikacji z mikrokontrolerem wykorzystuje magistralę I2C. Przed pierwszym użyciem moduł wymaga kalibracji.



Rys. 15. Moduł żyroskopu i akcelerometru MPU6050.

Źródło: <https://nettigo.pl/products/zyroskop-i-akcelerometr-mpu6050>

Parametry MPU6050:

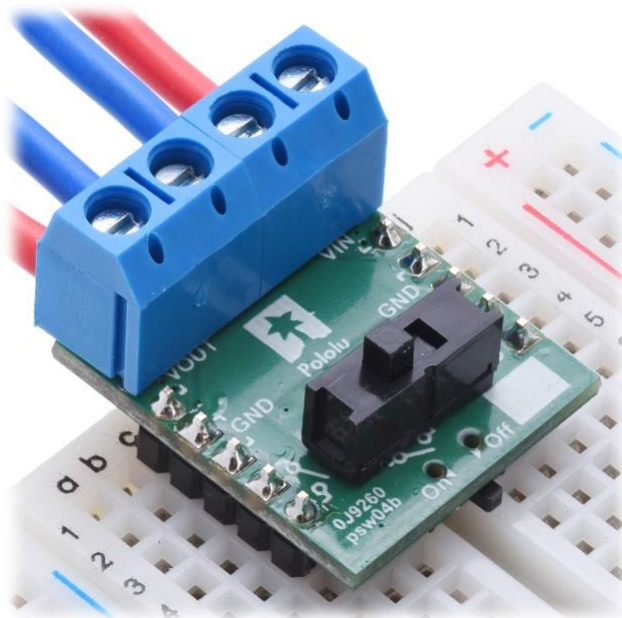
- Interfejs I2C: do 400 kHz
- Dokładność pomiaru  $\pm 0,5^\circ$
- Programowalny zakres pracy żyroskopu:  $\pm 250$ ,  $\pm 500$ ,  $\pm 1000$ ,  $\pm 2000^\circ/\text{sec}$
- Programowalny zakres pracy akcelerometru:  $\pm 2g$ ,  $\pm 4g$ ,  $\pm 8g$ ,  $\pm 16g$
- Napięcie zasilania modułu: 3-5 V
- Pobór prądu: 350  $\mu\text{A}$
- Temperatura pracy:  $-40^\circ\text{C}$  do  $+85^\circ\text{C}$

### 3.4.6 Tranzystor MOSFET

Płytkę Arduino pozwala na uzyskanie na każdym z pinów maksymalnie 40 mA. Z tego względu do sterowania urządzeniami wymagającymi wyższych wartości natężenia prądu stosowane są tranzystory. Do obsługi grzałki wykorzystany został przełącznik Slide MOSFET MP [21] (rys. 16). Za pomocą zmiany napięć na jednym z jego pinów, program może odpowiednio regulować temperaturę grzałki.

Parametry układu:

- Maksymalne napięcie: 40 V
- Rekomendowane napięcie pracy: od 4,5 do 32 V
- Maksymalny prąd: 40 A



Rys. 16. Duży przełącznik Slide MOSFET MP 4,5-40V / 8A

Źródło: [https://botland.com.pl/img/art/inne/05119\\_7.jpg](https://botland.com.pl/img/art/inne/05119_7.jpg)



### 3.4.7 Termistor NTC 110

W trakcie użytkowania stanowiska do gięcia materiałów rama giętarki z biegiem czasu ulega nagrzaniu. Z tego powodu postanowiono zastosować termistor (rys. 17) przymocowany do ramy urządzenia. Symbol NTC (ang. *negative temperature coefficient*) oznacza ujemny współczynnik temperaturowy, tzn. wzrost temperatury powoduje zmniejszenie się rezystancji. Przekroczenie odpowiedniej wartości rezystancji skutkuje zatrzymaniem grzania i wyświetleniem odpowiedniego komunikatu na ekranie LCD. Montaż termistora ułatwia złącze na śrubę M6. Element cechuje się rezystancją na poziomie 10k $\Omega$  przy temperaturze 25°C.



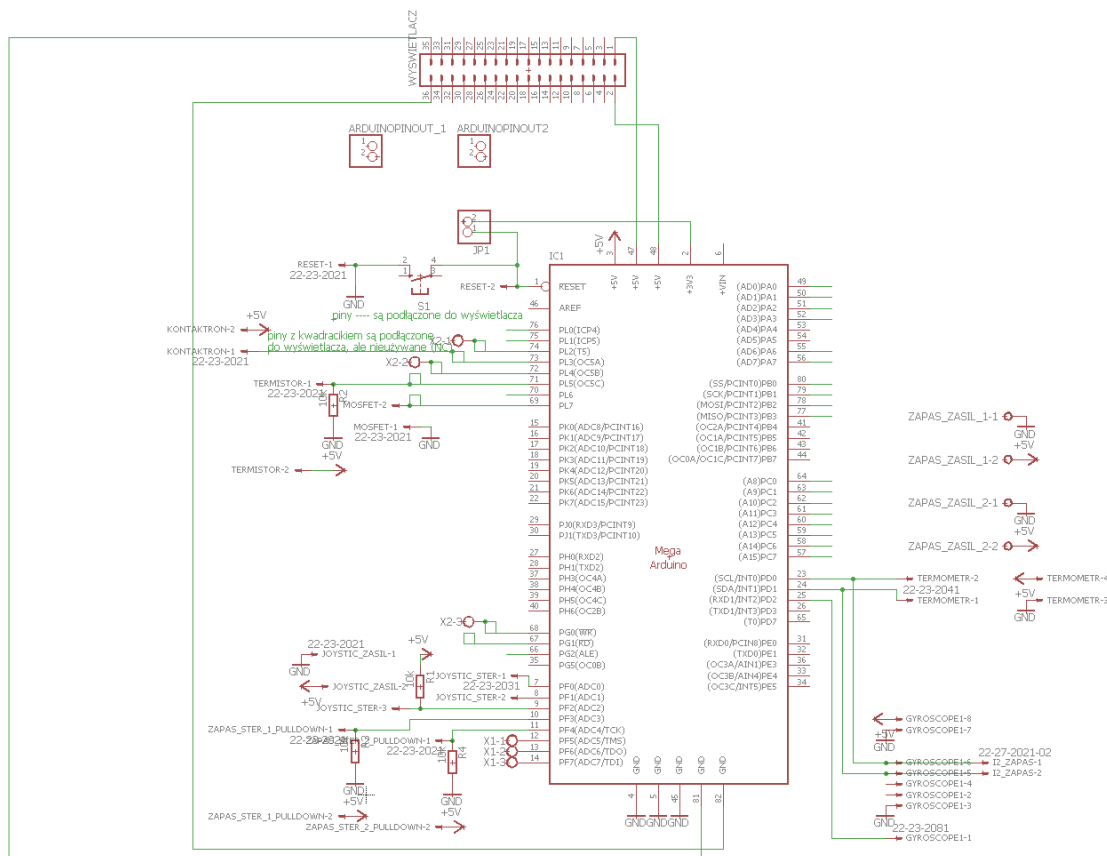
Rys. 17. Termistor NTC 100 10k $\Omega$ .

Źródło: <https://botland.com.pl/pl/czujniki-temperatury/3878-termistor-ntc-110-10k-ze-zlaczem-na-srube-m6.html>

### 3.5 Projekt obwodu drukowanego

Projekt płytki został zrealizowany w programie Eagle firmy CadSoft w wersji 8.4.1. Jest to popularne, funkcjonalne i łatwe w obsłudze narzędzie. Wykonane PCB (ang. *Printed Circuit Board* – płytki obwodu drukowanego) ma charakter nakładki (ang. *shield*) na płytkę Arduino Mega2560. Rozwiązanie to polega na wykonaniu obwodu zawierającego obraz płytki, na którą ma być nałożony. W celu wykonania schematu producent udostępnia gotowe biblioteki. Takie połączenie ma na celu zwiększenie możliwości i zakresu zastosowań pierwotnego systemu. Minimalizowana jest liczba niezbędnych przewodów służących do połączenia obu układów, a rozmiary urządzenia nie ulegają znacznej zmianie. Obwód został zaprojektowany tak, aby w jak największym stopniu ułatwić rozbudowę lub konserwację sterownika w przyszłości. Wszystkie komponenty posiadają na płytce dedykowane złącza. Dzięki temu oryginalne wyprowadzenia Arduino są łatwo dostępne, a wymiana podzespołów nie staje się pracochłonna. Dodatkowo umieszczono na płytce dwa zapasowe złącza zasilania oraz dwa zapasowe złącza sterowania.





Rys. 18. Schemat elektryczny sterownika.

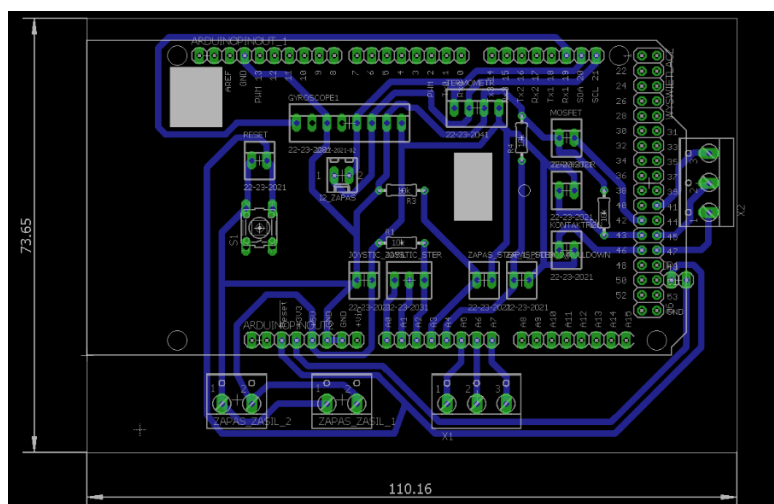
Po utworzeniu schematu sterownika (rys. 18) wygenerowano raport BOM (ang. *bill of materials*) zawierający w sobie zestawienie materiałów oraz komponentów umożliwiających wyprodukowanie ostatecznego wyrobu (rys. 19)

Nazwa części	Wartość	Symbol	Obudowa	Opis
ARDUINOPINOUT2		PINHD-1X2	1X02	Złącze szpilkowe 1-rzędowe raster 2.54mm
ARDUINOPINOUT_1		PINHD-1X2	1X02	Złącze szpilkowe 1-rzędowe raster 2.54mm
GYROSCOPE1	22-23-2081	22-23-2081	22-23-2081	Złącze raster 2,54mm 8 Pin
I2_ZAPAS	22-27-2021-02	22-27-2021-02	6410-02	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
IC1		MEGAARDUINO_1	MEGA_ARDUINO	Arduino Mega jest płytka opartą o mikrokontroler Atmega2560
JOYSTIC_STER	22-23-2031	22-23-2031	22-23-2031	Złącze raster 2,54mm 3 Pin
JOYSTIC_ZASIL	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
JP1		PINHD-1X2	1X02	Wtyk goldpin 2 Pin prosty raster 2,54mm
KONTAKTRON	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
MOSFET	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
R1	10k	R-EU_0204/7	0204/7	Rezystor pull-down dla sygnału wciśnięcia joysticka
R2	10k	R-EU_0204/7	0204/7	Rezystor pull-down dla sygnału termistora
R3	10k	R-EU_0204/7	0204/7	Rezystor pull-down dla ZAPAS_STER_1_PULLDOWN
R4	10k	R-EU_0204/7	0204/7	Rezystor pull-down dla ZAPAS_STER_2_PULLDOWN
RESET	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
S1		10-XX	B3F-10XX	Przycisk mały - Tact Switch 6x6mm
TERMISTOR	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
TERMOMETR	22-23-2041	22-23-2041	22-23-2041	Złącze raster 2,54mm 4 Pin
WYŚWIETLACZ		MA18-2	MA18-2	18-pinowe złącze męskie w rastrze 2,54 mm do podłączenia wyświetlacza
X1		W237-103	W237-103	Złącze ARK raster 3,5mm 3 pin (+)
X2		W237-103	W237-103	Złącze ARK raster 3,5mm 3 pin (+)
ZAPAS_STER_1_PULLDOWN	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
ZAPAS_STER_2_PULLDOWN	22-23-2021	22-23-2021	22-23-2021	Złącze raster 2,54mm 2 Pin
ZAPAS_ZASIL_1		W237-02P	W237-132	Złącze ARK raster 2,54mm 2 pin (+)
ZAPAS_ZASIL_2		W237-02P	W237-132	Złącze ARK raster 2,54mm 2 pin (+)

Rys. 19. BOM elementów układu.

Kolejnym krokiem było zaprojektowanie płytki drukowanej. Na tym etapie należało rozmieścić elementy. Wszystkie wyjścia i wejścia zasilania powinny znajdować się jak najbliżej krawędzi

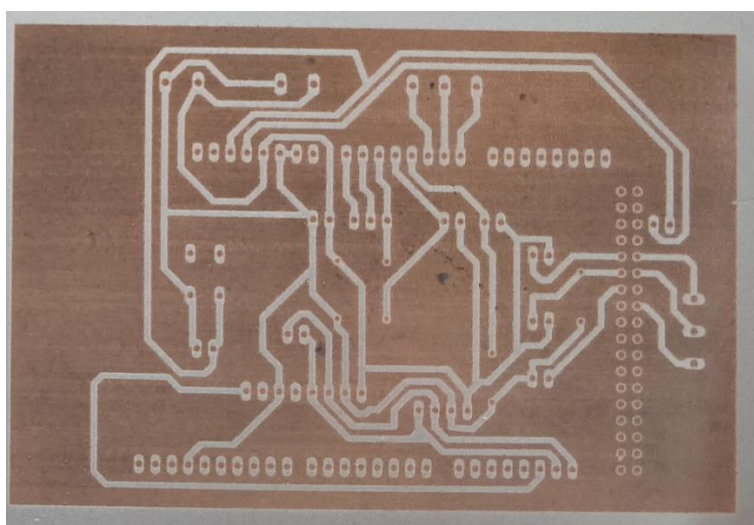
płytki, w celu łatwego dostępu do nich. W rogach płytki umiejscowione zostały otwory montażowe. Na schemacie płytki (rys. 20) widoczny jest obraz układu Arduino Mega2560. Wynika to z faktu sposobu połączenia projektowanego obwodu ze wspomnianym systemem, gdzie Arduino nakładane jest na męskie złącza goldpin raster 2,54 mm. Szarymi prostokątami zostały oznaczone wyprowadzenia ICSP (ang. *In-Circuit Serial Programming*) służące do wgrywania kodu za pomocą zewnętrznego programatora. Zaprojektowane PCB ma wymiary 110,16 mm x 73,65 mm.



Rys. 20. Widok projektu płytki obwodu drukowanego.

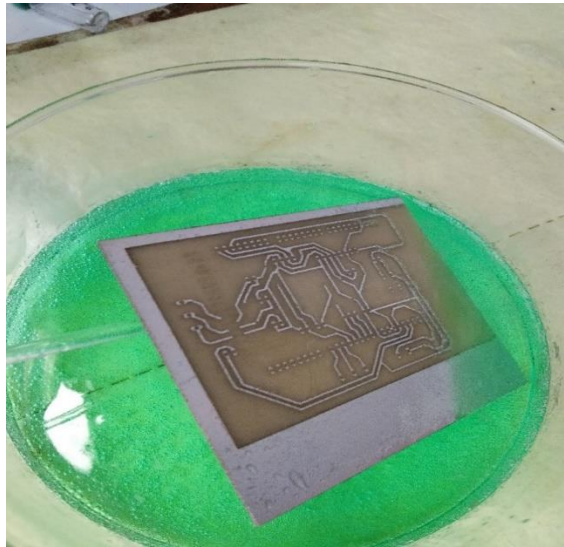
### 3.6 Wytworzenie obwodu drukowanego

Najczęściej używanym materiałem do płytek drukowanych jest laminat FR4. Jest on wykonany z włókna szklanego z żywicą epoksydową. Przed naniesieniem ścieżek na płytkę, należało przyciąć laminat do odpowiednich wymiarów oraz pokryć go warstwą srebrnego lakieru, spełniającego rolę maski w procesie trawienia. Tak przygotowana płytkę została poddana grawerowaniu laserem CO<sub>2</sub>. Po tym procesie jedynie ścieżki elektryczne pozostały przykryte maską. Wygrawerowaną płytkę przedstawia rys. 21.



Rys. 21. Laminat z ścieżkami pokrytymi warstwą lakieru.

Przygotowana w ten sposób płytka została poddana procesowi trawienia. Był on wykonywany w mieszaninie wody dejonizowanej, perhydrolu o stężeniu 30% i kwasu solnego o stężeniu 36% w stosunku 12:7:5. Rys. 22. przedstawia proces trawienia.



Rys. 22. Trawienie płytki.

Po wytrawieniu warstwy miedzi, płytka została umieszczona w acetonie w celu odkrycia ścieżek i pól lutowniczych. Następnie przycięto laminat i zeszlifowano krawędzie laminatu. Kolejnym etapem w procesie wytworzenia obwodu elektronicznego było wywiercenie otworów, w których umieszczone będą przylutowane elementy. Do tego celu użyto wiertarki stołowej stosując wiertła o średnicy 1 – 1,5 mm (rys. 23).



Rys. 23. Proces wiercenia płytki.

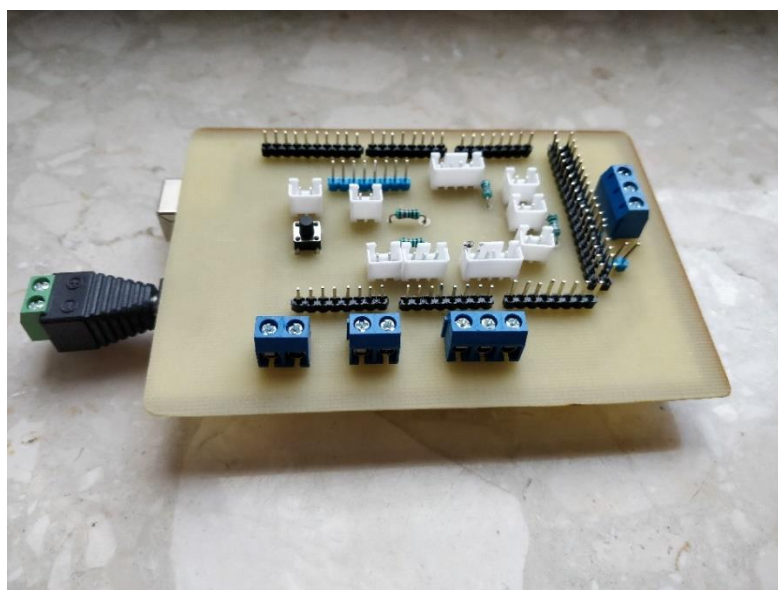
Mając gotowe otwory, przystąpiono do montażu elementów na płytce. Podczas lutowania zachowano szczególną dokładność, ponieważ źle przylutowane elementy mogą powodować nieprawidłową pracę układu. Przed pierwszym uruchomieniem dokonano

sprawdzenia czy wszystkie ścieżki przewodzą prąd elektryczny (rys. 24), przy pomocy multimetru UNI-T UT51.



*Rys. 24. Sprawdzenie ścieżek na płytce za pomocą multimetru.*

Po poprawnym przeprowadzeniu powyższych czynności, płytka była gotowa do użycia. Widok przygotowanej płytki ze strony komponentów został przedstawiony na rys. 25.



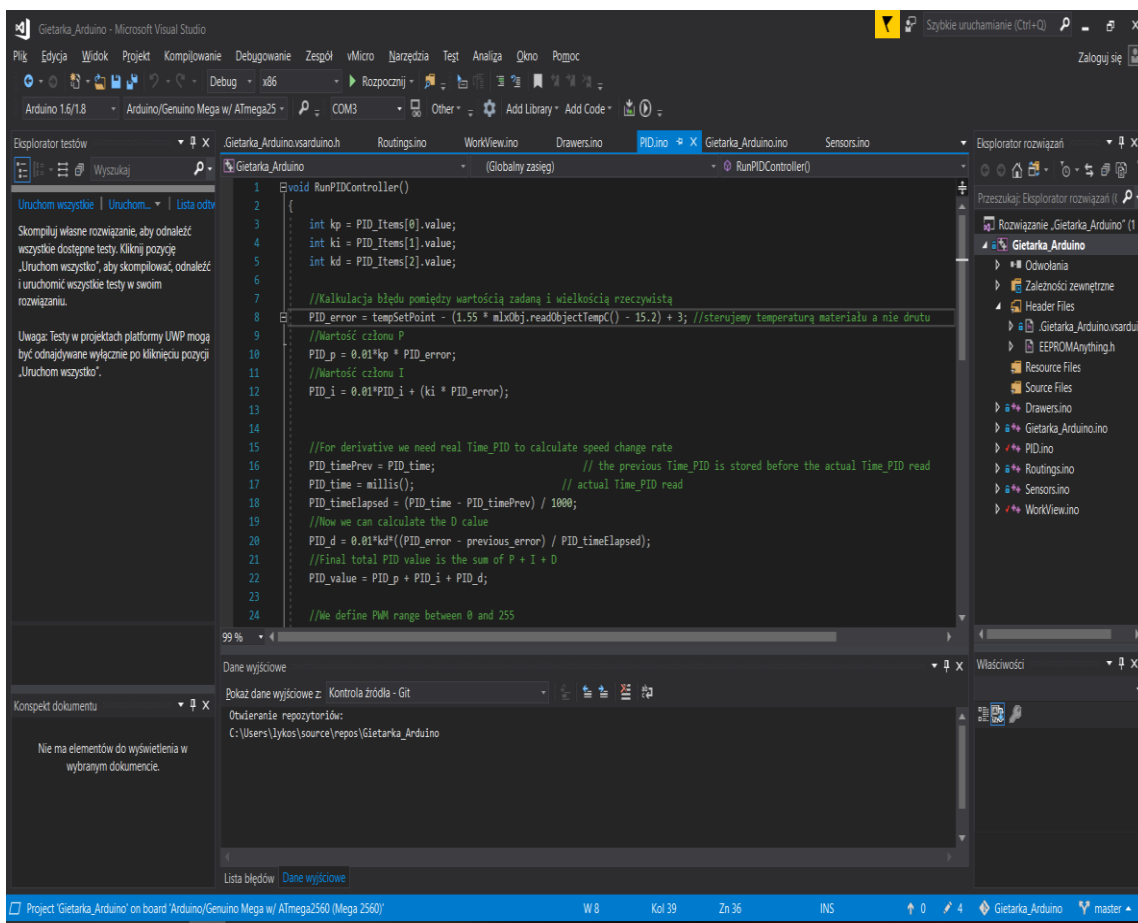
*Rys. 25. Widok gotowej płytki podłączonej do Arduino Mega2560.*



## Rozdział 4. Oprogramowanie

### 4.1 Środowisko programistyczne

Do wykonania programu użyto zintegrowanego środowiska programistycznego (IDE - ang. *Integrated Development Environment*) Microsoft Visual Studio Community 2017 w wersji 15.7.5 z zainstalowanym dodatkiem Visual Micro (rys. 26). Kod programu został napisany w języku C++. W porównaniu do zalecanego przez producenta Arduino IDE, Visual Studio posiada o wiele bardziej rozbudowany interfejs. Jedną z najważniejszych cech środowiska Microsoftu jest funkcja IntelliSense. Polega ona na automatycznym podpowiadaniu dalszej części kodu, co znacznie ułatwia i przyspiesza pracę. Posiada ono również wbudowany tryb Upload, umożliwiający wgranie napisanego kodu do mikrokontrolera za pomocą portu USB. Inną funkcjonalnością, poprawiającą czytelność kodu, jest kolorowanie składni języka C++. Arduino IDE for Visual Studio zawiera również rozbudowany debugger. Dzięki niemu, możliwe jest np. rysowanie wykresów na podstawie wartości konkretnych zmiennych programu w czasie rzeczywistym.



Rys. 26. Okno programu Visual Studio 2017.

### 4.2 Wykorzystane biblioteki

Z racji bardzo dużej popularności Arduino, istnieje wiele gotowych rozwiązań i bibliotek do obsługi sprzętu. W programie składającym się na cel niniejszej pracy wykorzystano trzy zewnętrzne biblioteki: TFT\_HX8357, Adafruit\_MLX90614 oraz MPU6050.

## TFT\_HX8357

Biblioteka służąca do obsługi wyświetlacza LCD wyposażonego w sterownik ILI9341. Metody użyte w programie pochodzące z powyższej biblioteki przedstawiono poniżej:

- *fillScreen(uint16\_t color)* – procedura wypełniająca ekran podanym kolorem,
- *setTextSize(uint8\_t size)* – procedura ustawiająca wielkość czcionki,
- *setCursor(uint16\_t x, uint16\_t y)* – procedura ustawiająca położenie kursora na ekranie według współrzędnych x,y,
- *setTextColor(uint16\_t color)* – procedura ustawiająca kolor tekstu,
- *println(String text)* – procedura rysująca linię tekstu na ekranie,
- *drawRoundRect(int16\_t x0, int16\_t y0, int16\_t w, int16\_t h, int16\_t radius, uint16\_t color)* – procedura rysująca prostokąt o zaokrąglonych rogach,
- *drawCircle(int16\_t x0, int16\_t y0, int16\_t r, uint16\_t color)* – procedura rysująca okrąg.

## Adafruit\_MLX90614

Biblioteka służąca do obsługi czujnika temperatury GY-906. Pozwala ona odczytywać za pomocą magistrali I2C zarówno temperaturę czujnika jak i jego otoczenia. Wyniki mogą zostać przedstawione w stopniach Celsjusza i Farenheita. Z powyższej biblioteki została wykorzystana funkcja pomiaru temperatury obiektu:

*double readObjectTempC(void)*

Zwracaną wartością jest liczba rzeczywista.

## MPU6050

Biblioteka służąca do obsługi modułu MPU6050 wyposażonego w akcelerometr i żyroskop. Zadaniem tego modułu był pomiar kąta. Procedurą do pobrania wartości napięć z akcelerometru była:

*void getAcceleration(int16\_t\* x, int16\_t\* y, int16\_t\* z)*

Procedura przypisuje do argumentów wartości akcelerometru w płaszczyznach X,Y,Z. Dane wyjściowe mają charakter surowy. Aby otrzymać kąt o jaki moduł został wychylony należy skorzystać z funkcji atan2 z wbudowanego modułu Math.

*double atan2(double a, double b)*

W przypadku opisywanym w niniejszej pracy, wyrażenie opisujące wartość kąta przedstawia wzór (3):

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{\sqrt{x^2 + z^2}}\right) \quad (3)$$

Otrzymany wynik wyrażony jest w radianach. W celu zamiany jednostki na stopnie, wynik należy podzielić przez 180. Aby rezultaty były jak najbardziej zbliżone do rzeczywistych, przed wyznaczeniem wychylenia, wykonywane jest 100 powtórzeń pobrania wartości z akcelerometru i dopiero uśrednione wyniki są przekazywane do dalszych obliczeń.

### 4.3 Programowa regulacja temperatury

Głównym zadaniem urządzenia była regulacja temperatury zespołu grzewczego giętarki. Z tego powodu w programie sterownika zaimplementowany został algorytm regulacji PID. Kod podprogramu odpowiadającego za implementację algorytmu PID został przedstawiony na rys. 27.

```
void RunPIDController()  
{  
    int kp = PID_Items[0].value;  
    int ki = PID_Items[1].value;  
    int kd = PID_Items[2].value;  
  
    //Kalkulacja błędu pomiędzy wartością zadaną i wielkością rzeczywistą  
    PID_error = tempSetPoint - mlxObj.readObjectTempC() + 3;  
    //Wartość członu P  
    PID_p = 0.01*kp * PID_error;  
    //Wartość członu I  
    PID_i = 0.01*PID_i + (ki * PID_error);  
  
    PID_timePrev = PID_time;  
    PID_time = millis();  
    PID_timeElapsed = (PID_time - PID_timePrev) / 1000;  
    //Wartość członu D  
    PID_d = 0.01*kd*((PID_error - previous_error) / PID_timeElapsed);  
    //Wartość PID jest sumą członów P + I + D  
    PID_value = PID_p + PID_i + PID_d;  
    if (PID_value < 0)  
    {  
        PID_value = 0;  
    }  
    if (PID_value > 255)  
    {  
        PID_value = 255;  
    }  
  
    analogWrite(MOSFET_PIN,PID_value);  
    previous_error = PID_error;  
}
```

Rys. 27. Algorytm regulacji PID zastosowany w programie.

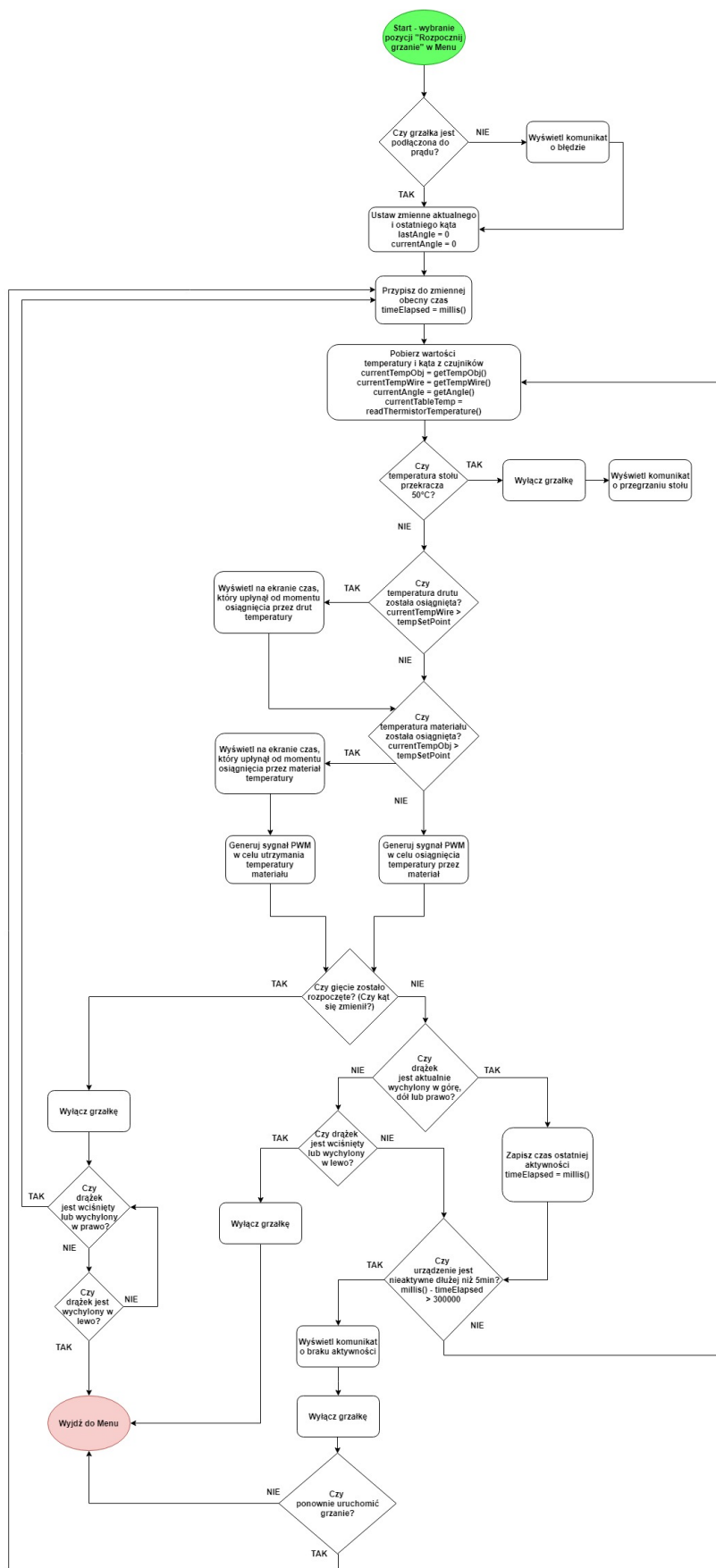
Do zmiennych *ki*, *kp* oraz *kd* zostają przypisane nastawy regulatora wczytane z konfiguracji użytkownika zapisanej w pamięci EEPROM. Następnie wyliczana jest odchyłka regulacji, czyli różnica pomiędzy wartością zadaną oraz aktualnie zmierzoną temperaturą materiału. Na jej podstawie wyznaczana jest wartość członu proporcjonalnego P. Kolejną czynnością jest obliczenie członu całkującego I. Zwany również elementem magazynującym, dodaje na bieżąco kolejne wartości sygnału sterującego w następnych chwilach czasu. Wartość członu różniczkującego wyznaczana jest na podstawie obecnej i poprzedniej wartości odchyłki dzielonej przez czas, który upłynął od ostatniego pomiaru. Jest on pobierany za pomocą funkcji

*millis()* zwracającej liczbę milisekund, które upłynęły od uruchomienia programu. Wynik należy podzielić przez 1000, aby otrzymana wartość wyrażona była w jednostkach SI. W kolejnym kroku człony regulatora zostają zsumowane. Za pomocą procedury *AnalogWrite* zostaje wygenerowany sygnał PWM na wyjściu wskazanego pinu, o wartości wypełnienia między 0, a 255, gdzie 0 oznacza zawsze wyłączony, a 255 zawsze włączony. Stąd jeśli wartość PID nie zawiera się w tym przedziale, zostaje ona nadpisana. Na koniec podprogramu zapamiętywany jest ostatni błąd wartości regulowanej.

Sterownik reguluje temperaturę materiału. Brak umieszczonego tworzywa na stole giętarek będzie skutkował pomiarem temperatury otoczenia. W związku z tym wartość zadana nie zostanie nigdy osiągnięta. Prowadzi to do nieustannej pracy grzałki z maksymalną mocą, pomimo tego, że materiał nie jest nagrzewany. Aby zapobiec zaistnieniu takiej sytuacji, zastosowano ograniczenie dopuszczalnej temperatury grzałki równe 250°C. Po jej przekroczeniu grzanie zostaje wyłączone.

Na rys. 28. zamieszczony został schemat blokowy algorytmu funkcji widoku roboczego. Start diagramu jest równoznaczny z wybraniem opcji *Rozpocznij grzanie* w głównym menu urządzenia. Przed rozpoczęciem pętli podprogramu sprawdzane jest działanie grzałki. W tym celu został zastosowany algorytm, który generuje sygnał PWM o całkowitym wypełnieniu. Po określonym odstępie czasu, badany jest przyrost temperatury drutu. Jeżeli różnica pomiędzy obiema wartościami przekracza zakres tolerancji pirometru, system uznaje działanie grzałki za prawidłowe. W innym przypadku użytkownik jest informowany o wykryciu nieprawidłowości, jednak program nie blokuje możliwości dalszej pracy. Takie rozwiązanie zastosowano, aby błędne wskazanie pirometru nie ograniczało działania całego układu. Kolejnym krokiem jest zainicjowanie początkowych wartości oraz pobranie aktualnego czasu. Jest on potrzebny do sprawdzenia czy stanowisko do gięcia jest aktualnie używane. Służy do tego algorytm wykrywania bezczynności. Jeżeli użytkownik przez określony z góry czas nie wykonana żadnej czynności, tj. wychylenia drążka lub wykonanie gięcia, grzanie zostanie zatrzymane, a na ekranie wyświetlony zostanie stosowny komunikat. Kolejnym krokiem w pętli jest pobranie z czujników wartości temperatur materiału i drutu. Jeżeli któraś z nich równa jest wartości zadanej, na ekranie wyświetlany jest czas, który upłynął od jej osiągnięcia. W momencie, gdy program wykryje zmianę kąta przekraczającą zakres tolerancji akcelerometru, system wyłączy grzanie. Aby ponownie wykonać gięcie, należy wybrać odpowiednią opcję na ekranie sterownika. W momencie, gdy grzanie jest wyłączone, algorytm bezczynności nie jest sprawdzany.





Rys. 28. Schemat blokowy funkcji widoku roboczego.

#### 4.4 Interfejs graficzny użytkownika

Aby ułatwić użytkownikowi pracę ze sterownikiem, zaprojektowany został graficzny interfejs użytkownika (ang. *GUI – Graphical User Interface*). Zasady poruszania się po interfejsie aplikacji przedstawiono poniżej:

- do sterowania użytkownik wykorzystuje dżadek
- aby zaznaczyć lub odznaczyć pozycję można zrealizować to poprzez wciśnięcie lub wychylenie joysticka odpowiednio w prawo lub lewo
- kolorem niebieskim oznaczono pozycję, którą można aktualnie wybrać
- kolorem pomarańczowym oznaczono pozycję aktualnie zaznaczoną
- wartości znajdujące się na pozycjach oznaczonych kolorem pomarańczowym można zwiększać lub zmniejszać poprzez odpowiednio wychylenie dżadka w górę lub w dół

Aplikacja składa się z czterech podstawowych widoków przedstawionych poniżej.

##### Menu (rys. 29)

Zawiera 5 pozycji:

- Kąt – wybór kąta w zakresie 1-150 stopni
- Temperatura – wybór temperatury w zakresie 30-250 stopni Celsjusza
- Wybierz profil – wybór jednego ze zdefiniowanych wcześniej profili kąta i temperatury dla konkretnych materiałów
- Rozpocznij grzanie – uruchomienie grzałki i przejście do widoku roboczego
- Ustawienia – przejście do ustawień aplikacji

Jest to pierwszy widok, który zobaczy użytkownik po włączeniu sterownika. Ostatnie zapisane wartości kąta oraz temperatury zostają ustawione jako domyślne. Aby wymusić na użytkowniku akceptację zadanych wartości, po uruchomieniu należy je zatwierdzić poprzez wybranie pierwszej i drugiej pozycji w menu. Dopóki nie zostaną one zaznaczone, pozycje te będą wyświetlać się w czerwonym kolorze, a u dołu ekranu umieszczony będzie stosowny komunikat. Niemożliwe również będzie wybranie opcji rozpoczęcia grzania. Temperaturę można wybrać również za pomocą wyboru profilu. Zakres możliwych do ustawienia wartości kąta oraz temperatury materiału są zdefiniowane jako stałe w kodzie aplikacji i mogą być w każdej chwili zmienione jeśli zajdzie taka potrzeba.



Rys. 29. Widok menu głównego aplikacji.

### Wybierz profil (rys. 30)

W domyślnej konfiguracji znajduje się pięć profili dla pięciu różnych materiałów. Dodatkowo u spodu ekranu znajduje się przycisk powrotu do menu głównego bez zmiany zadanej temperatury i kąta. W kodzie aplikacji została zaimplementowana specjalna struktura *Profiles*. Posiada ona pola *names*, *angleValue* oraz *tempValue*. Dodanie lub edycja któregoś z profili wymaga odpowiednio stworzenie lub edycja istniejącego obiektu typu *Profiles* i dodanie go do tablicy *ProfilesValues* zdefiniowanej w kodzie programu.



Rys. 30. Widok wyboru profilu.

### Widok roboczy (rys. 31)

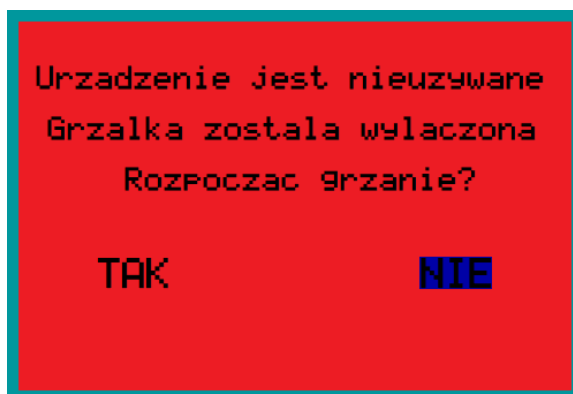
Okno aplikacji pojawiające się po wyborze rozpoczęcia grzania z menu głównego. Z tego miejsca istnieje możliwość kontroli najważniejszych parametrów dla tego procesu obróbki materiału tj. kąt wychylenia oraz temperatury grzałki i materiału. U góry ekranu znajdują się wartości docelowe, natomiast na środku wyświetlane są obecne wartości. Do momentu aż grzałka nie zostanie nagrzana, u spodu ekranu widnieje komunikat informujący o nieodpowiedniej temperaturze urządzenia grzewczego. Wartości mniejsze od zadanych przyjmują kolor czerwony. Jest to znaczne ułatwienie dla osoby dokonującej gięcia. W każdej chwili operator może zakończyć grzanie, wybierając opcję znajdującą się na dole ekranu.



Rys. 31. Widok roboczy aplikacji.

W momencie kiedy na ekranie wyświetlany jest widok roboczy aplikacji, program sprawdza czy urządzenie nie jest beczynne. W przypadku wykrycia braku aktywności ze strony

użytkownika przez określony czas, grzanie zostanie wyłączone i zostanie wyświetlony widok przedstawiony na rys. 32.

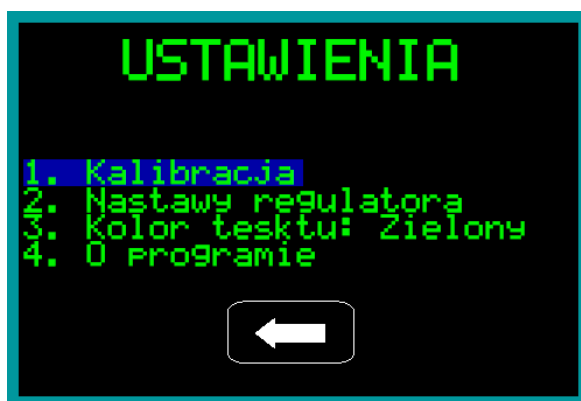


Rys. 32. Widok wyświetlany w przypadku wykrycia bezczynności.

W momencie wybrania opcji „NIE” użytkownik zostanie przeniesiony do menu aplikacji. W przeciwnym razie wyświetlony zostanie ponownie widok roboczy, a grzałka zostanie włączona.

### Ustawienia (rys. 33)

Sekcja ustawień urządzenia pozwala na zmianę konfiguracji urządzenia. Dodatkowo użytkownik może sprawdzić wersję programu oraz zmienić kolor wyświetlanego tekstu na ekranie. Podobnie jak w przypadku widoku wyboru profilu, na dole ekranu znajduje się przycisk powrotu do menu głównego.



Rys. 33. Widok ustawień aplikacji.

W przypadku błędnych wskazań akcelerometru istnieje możliwość jego kalibracji wybierając pierwszą pozycję w ustawieniach urządzenia. Następnie należy ustawić na maszynie kąt 90 stopni. Aby odświeżyć widok należy wychylić drążek w górę lub dół. W momencie ustawienia kąta, w ten sam sposób regulujemy offset dodając lub odejmując wartości, tak aby na ekranie uzyskać wartość 90 stopni. Aby wrócić do poprzedniego widoku należy wychylić drążek w lewą stronę. Widok kalibracji urządzenia został przedstawiony na rys. 33.



Rys. 34. Widok kalibracji urządzenia.

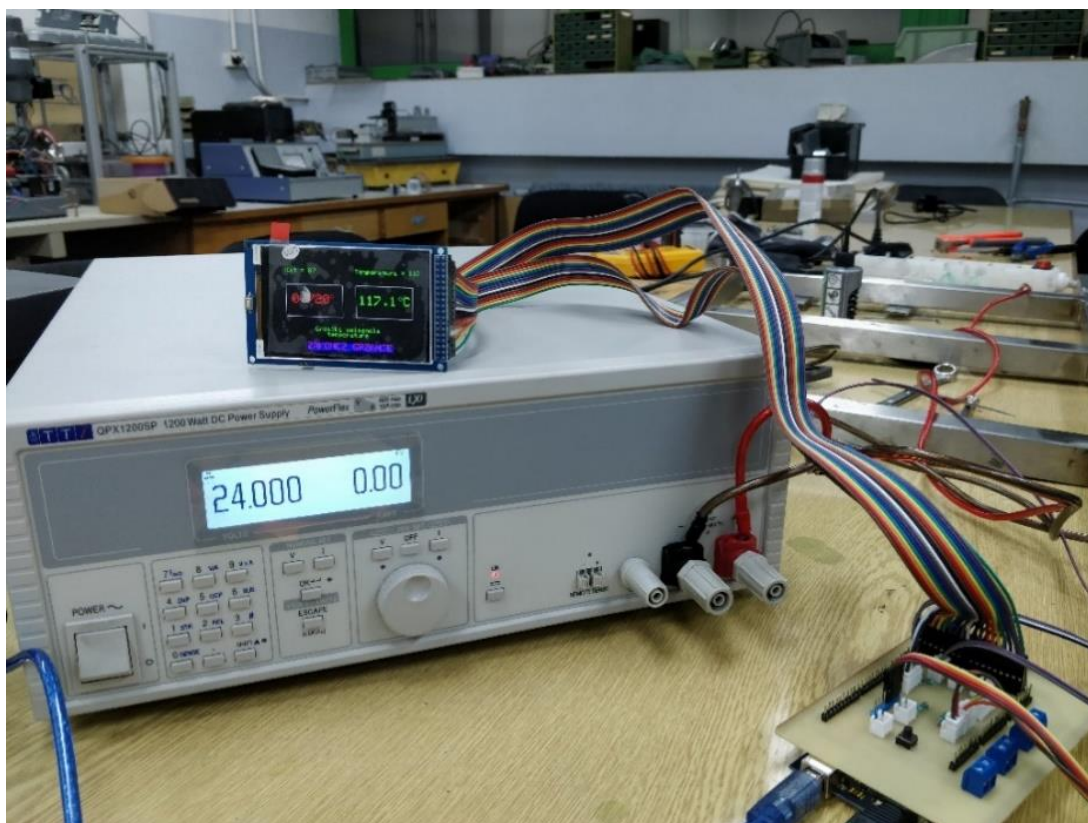
Z tego miejsca programu użytkownik może również zmienić nastawy regulatora PID. Do tego celu należy wybrać drugą pozycję w ustawieniach urządzenia. Każdy z parametrów jest regulowany osobno. Widok zmiany nastaw regulatora został przedstawiony na rys. 35.



Rys. 35. Widok zmiany nastaw regulatora PID.

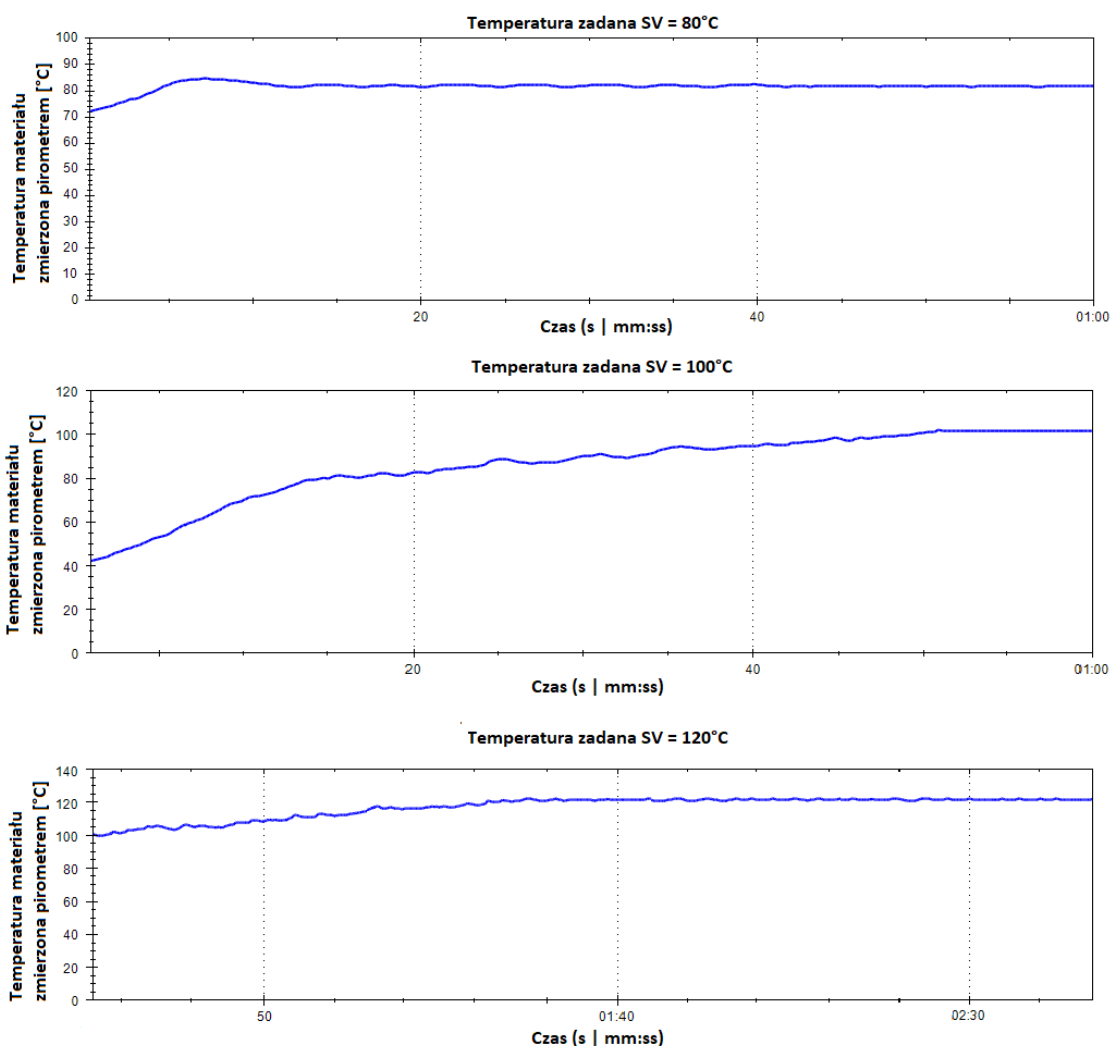
## Rozdział 5. Testy

W celu sprawdzenia poprawności działania zbudowanego sterownika, przeprowadzono serię testów i pomiarów urządzenia w docelowym układzie stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych (rys. 36). Jako źródło prądowe 15 A, o napięciu 24 V zastosowano zasilacz laboratoryjny AimTTi QPX1200S.



Rys. 36. Sterownik podłączony do zasilacza laboratoryjnego AimTTi QPX1200S.

Pierwszym zadaniem było odpowiednie umiejscowienie pirometrów, tak aby jak najlepiej wskazywały rzeczywistą temperaturę grzałki i materiału. Następnie przeprowadzono serię pomiarów. Materiałem, od którego rozpoczęto testy było przezroczyste PMMA o grubości 3 mm. Pomiar miał na celu sprawdzenie działania regulatora PID (nastawy:  $K_p = 63$ ,  $K_i = 84$ ,  $K_d = 80$ ). Wykresy zależności temperatury materiału od czasu przedstawiono na rys. 37.

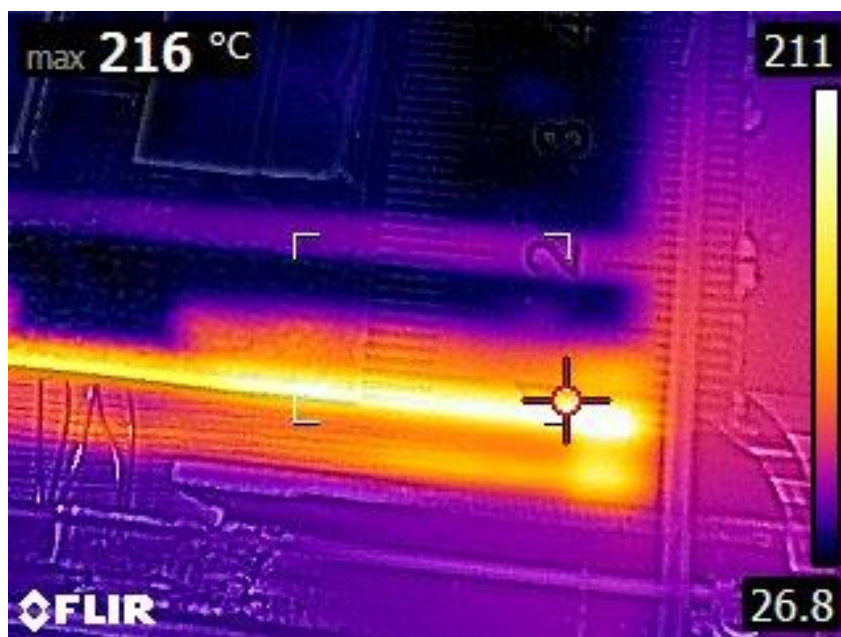


Rys. 37. Wykresy zależności temperatury materiału od czasu dla trzech wartości zadanych.

Jak można zaobserwować na powyższych wykresach, zastosowany w mikrokontrolerze algorytm regulacji poprawnie utrzymuje temperaturę na stałym poziomie. Dla wartości zadanych 80°C i 120°C temperatura początkowa była wysoka ze względu na uprzednie nagrzanie materiału podczas wcześniejszych prób. Warto również zaznaczyć, że dla SV = 120°C czas potrzebny do przyrostu temperatury o 20°C i jej ustabilizowania wyniósł ok. 100 s. Dla porównania dla SV = 100°C przyrost o 60°C trwał 50 s. Różnica ta potwierdza fakt, że czas potrzebny do nagrzania materiału nie rośnie liniowo wraz ze wzrostem zadanej temperatury. Błąd ustalony regulatora nie przekraczał  $\pm 1^\circ\text{C}$ .

Kolejnym elementem przeprowadzonych testów było zweryfikowanie wskazań pirometrów. Do tego celu zastosowano kamerę termowizyjną FLIR E5. Urządzenie zostało wyposażone w detektor o rozdzielczości 120x90 pikseli, pozwalający z dużą precyzją badać rozkład temperatur. Zakres mierzonych wartości wynosił od  $-20^\circ\text{C}$  do  $250^\circ\text{C}$ . Czułość temperaturowa wynosiła  $0,1^\circ\text{C}$  [22].

Pirometr badający temperaturę grzałki został umieszczony w odległości ok. 2 cm. Z racji niewielkiej grubości drutu, takie rozwiązanie może powodować powstawanie pewnych niedokładności. Temperatura drutu zmierzona kamerą termowizyjną w miejscu przyłożenia czujnika wynosiła 216°C (rys. 38), natomiast wskazanie na ekranie sterownika 160°C.



Rys. 38. Temperatura grzałki zbadana za pomocą kamery termowizyjnej.

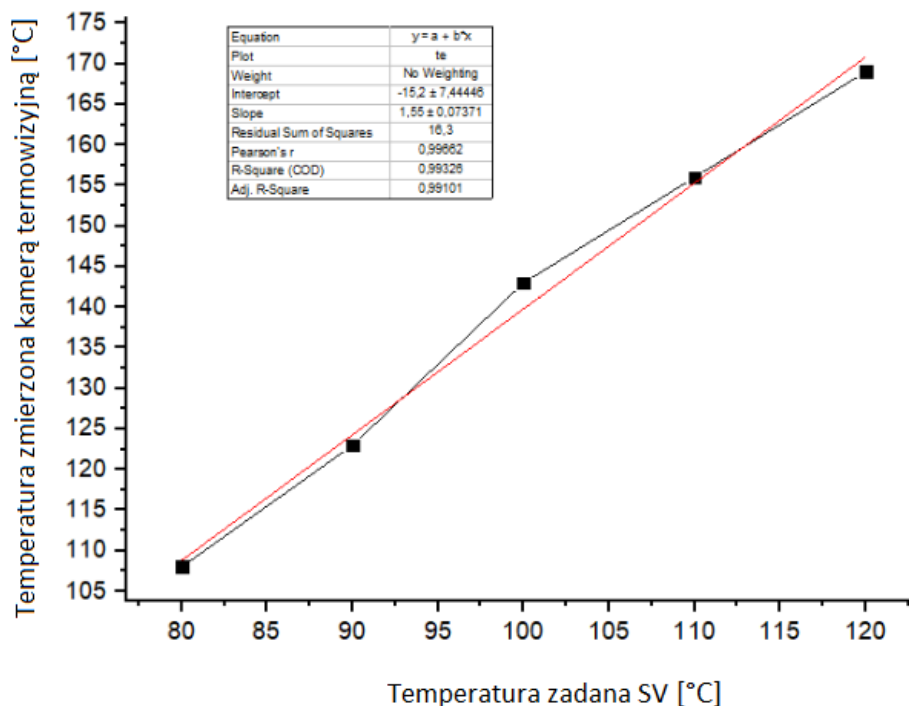
Na podstawie tej różnicy można wywnioskować, że pirometr nie mierzy temperatury grzałki, a rozgrzanego powietrza wokół. Potwierdza to również fakt, że w momencie odstawienia materiału, wskazanie pochodzące z czujnika maleje o ok. 10°C przy wyświetlanej temperaturze równej 160°C. Z tego powodu zdecydowano się na przeprowadzenie serii pomiarowej w celu wyznaczenia krzywej kalibracji. Wykonano 5 pomiarów temperatury przezroczystego PMMA o grubości 2 mm. Sprawdzono różnicę wskazań pirometru po ustabilizowaniu się temperatury materiału i wartości otrzymanej za pomocą kamery termowizyjnej. Uzyskane wyniki zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie wartości wskazań pochodzących z pirometru i kamery termowizyjnej

Wskazanie pirometru	80°C	90°C	100°C	110°C	120°C
Wskazanie kamery termowizyjnej	108°C	123°C	143°C	156°C	169°C

Na podstawie powyższej tabeli sporządzono wykres krzywej kalibracyjnej przedstawiony na rys. 39.





Rys. 39. Wykres zależności wskazań kamery termowizyjnej od wskazań pirometru

Uzyskane wyniki można przybliżyć równaniem funkcji liniowej  $y = ax + b$ , o współczynnikach równych  $a = 1,55$  i  $b = -15,2$ .

W ramach testów sprawdzono również zależność temperatury tego samego materiału po określonym czasie nagrzewania od jego koloru. Zgodnie z przewidywaniami teoretycznymi, barwa tworzywa nie ma wpływu na faktyczną temperaturę, co sprawdzono za pomocą kamery termowizyjnej. Natomiast w przypadku termometrów mierzących temperaturę za pomocą fal podczerwieni, którymi niewątpliwie są pirometry i kamery termowizyjne, rodzaj polimeru może powodować różnicę wskazań. Wynika to z ich zasady działania, polegającej na badaniu natężenia promieniowania ciepłego. Jest ono silnie powiązane ze zdolnością emisyjną ciał, na którą to z kolei mają wpływ takie właściwości jak chropowatość powierzchni czy znajdujące się na niej warstwy tlenków. Różne materiały mogą cechować się także innym współczynnikiem emisyjności. Kolejnym czynnikiem wpływającym na niedokładność pomiaru jest wysoka wartość FOV elementu. Jedną z możliwości poprawy i ujednolicenia pomiarów może być naklejenie w badanym miejscu czarnej taśmy izolacyjnej o znanej emisyjności (ok. 0,9) lub natrysk grafitowy na powierzchnie materiału poddaną badaniu piometrem. Nie jest to jednak możliwe w każdym zastosowaniu. W celu dokładniejszego pomiaru temperatury należy zastanowić się nad zmianą metody pomiarowej.

## Rozdział 6. Wnioski

Wykonane urządzenie spełnia wszystkie założenia konstrukcyjne. Utrzymuje zadaną temperaturę materiału na ustalonym poziomie. Układ sterownika został zaprojektowany i wykonany w taki sposób, aby w jak największym stopniu ułatwić pracę przy stanowisku do gięcia materiałów. Zapewnia on bezpieczeństwo, wygodę i stabilność w trakcie użytkowania. Żadne komercyjne rozwiązanie nie byłoby w stanie zapewnić powyższych cech na porównywalnym poziomie, ze względu na to, że są to urządzenia uniwersalne i nie są projektowane pod indywidualne potrzeby. Przeprowadzone testy wykazują dokładność sterownika na poziomie nieodbiegającym od komercyjnych regulatorów. Opracowane urządzenie cechuje możliwość zmiany, wpływających na jego działanie, ustawień. Dzięki takiemu rozwiązaniu, dostosowanie sterownika do charakterystyki danego procesu staje się mniej problematyczne. Przykładowo, poprzez zastosowanie odpowiednich nastaw regulatora, możliwe jest otrzymanie innych algorytmów regulacji. W trakcie testów zaobserwowano rozbieżność wskazań pirometrów z rzeczywistymi wartościami mierzonych obiektów. W celu zmniejszenia przekłamania pomiaru zastosowano programową kalibrację czujników na podstawie otrzymanej krzywej kalibracyjnej. Alternatywnym sposobem na rozwiązanie tego problemu może być zastosowanie innego czujnika temperatury - np. termopary, która cechuje się dużą dokładnością i szerokimi zakresami pracy. Taka metoda pomiaru również niesie ze sobą ryzyko błędu. Ze względu na niewielką pojemność cieplną grzałki, zetknięcie termopary z fragmentem drutu powodowałoby miejscowy, znaczny spadek temperatury.

W trakcie realizacji niniejszej pracy pojawiło się kilka problemów. Największe trudności wynikały z ciągłego dostosowywania do zmieniających się w czasie koncepcji rozwiązań projektowych. Pierwotna decyzja o zastosowaniu jednego pirometru, mierzącego temperaturę grzałki, okazała się problematyczna. Rozwiązanie to świetnie sprawdzałoby się do utrzymywania stałej wartości temperatury układu grzewczego, jednak operator nie miałby żadnej wiedzy na temat tego jaka jest temperatura materiału poddawanego gięciu. Jest to bardzo ważna informacja, ponieważ to właśnie od uplastycznienia tworzywa pod wpływem ciepła zależy proces gięcia. Z tego powodu zdecydowano się na zastosowanie drugiego czujnika mierzącego temperaturę materiału.

Kolejnym problemem, który pojawił się w trakcie testów był sposób sterowania urządzeniem. Pierwotnie wybór opcji na wyświetlaczu był realizowany poprzez wciśnięcie joysticka. Rozwiązanie to było poprawne i intuicyjne, jednak w momencie zamontowania urządzenia równoległe do podłoża, wciskanie drążka stawało się problematyczne i często prowadziło do wybrania nie tej pozycji, którą życzył sobie operator. Z tego powodu dodano kolejną możliwość wybierania i odznaczania pozycji na wyświetlaczu za pomocą wychylenia drążka odpowiednio w prawo lub lewo.

Innym problemem, który wymagał rozwiązania, był pomiar kąta wychylenia ramienia stołu. Początkowo do tego celu wykorzystano enkoder o sygnale kwadraturowym. Przy powolnej zmianie kąta urządzenie działało poprawnie. Komplikacje pojawiły się w momencie bardziej dynamicznego wychylenia. Szybkość zliczania impulsów za pomocą przetwornika okazała się niewystarczająca, czego skutkiem były błędne wartości mierzone. Z tego powodu należało zaaplikować inne rozwiązanie. Do pomiaru kąta zastosowano więc układ scalony wyposażony w akcelerometr i żyroskop. Akcelerometr znakomicie sprawdza się w sytuacjach, gdzie

wymagany jest pomiar przyspieszenia siły ciężkości. Dodatkowo cechuje się dużo większą dokładnością i to niezależnie od szybkości zmiany kąta. Zakupiony układ cechował się jednak dość znacznym błędem pomiaru, zmieniającym się wraz ze zmianą kąta. Takie zachowanie wskazywało na nieodpowiednią kalibrację fabryczną komponentu. Po ponownym skalibrowaniu akcelerometru pomiar kąta działał poprawnie z dokładnością do  $0,1^\circ$ .

W trakcie testów zaobserwowano znaczne nagrzewanie ramy giętarki. Może to prowadzić do poparzenia osób korzystających z urządzenia. W celu rozwiązania zaistniałego problemu zastosowano algorytm sprawdzający temperaturę stołu za pomocą termistora. Poprzez badanie spadku napięcia na elemencie, wyznaczana jest chwilowa rezystancja elementu, która maleje wraz ze wzrostem temperatury. W momencie przekroczenia określonej wartości, grzanie zostanie wyłączone do momentu spadku temperatury stołu.

## Rozdział 7. Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie, zbudowanie i oprogramowanie sterownika układu grzewczego stanowiska do gięcia materiałów termoplastycznych. Wszystkie powyższe zadania zostały zrealizowane. Dodatkowo wykonany został interfejs graficzny użytkownika wyświetlany na ekranie LCD. Przeprowadzony został całkowity proces stworzenia płytki PCB, zaczynając od doboru elementów, przez projektowanie, aż do wykonania obwodu i na montażu w docelowym układzie kończąc. Postawione w rozdziale 3.1 założenia projektowe zostały spełnione, a wymagane funkcjonalności urządzenia zaimplementowane. Sterownik utrzymuje zadaną temperaturę w miejscu linii gięcia za pomocą algorytmu regulacji PID. Do obsługi wykorzystywany jest joystick, za pomocą którego sterujemy graficznym interfejsem. Za bezpieczeństwo odpowiada mikrokontroler, który wyłącza grzałkę w momencie wykrycia zmiany kąta lub po określonym czasie bezczynności. Kod programu został napisany w taki sposób, aby w jak największym stopniu uprościć modyfikację parametrów urządzenia w przyszłości. Wykonane zostały odpowiednie testy, po których urządzenie zostało odpowiednio skalibrowane, aby jak najlepiej spełniać swoje zadanie.

Istnieją kierunki dalszego rozwoju sterownika. Zostało ono zaprojektowane w sposób tak przemyślany, by dodanie lub wymiana jednego z podzespołów nie wymagający ingerencji w budowę układu. W zależności od potrzeb, możliwa jest zmiana pirometru na czujnik temperatury o większym zakresie pomiarowym. Niedużym nakładem pracy możliwe jest przystosowanie sterownika do pracy w innym układzie o podobnej charakterystyce regulacji. Ciekawym rozwiązaniem byłaby możliwość zdalnego sterowania urządzeniem, np. włączenie i nagrzanie grzałki zanim użytkownik dotrze do miejsca pracy, np. za pomocą dedykowanej aplikacji na smartfonie z systemem Android. Układ można by również rozszerzyć o pamięć zewnętrzną (np. kartę SD) i zapisywać na niej dane dotyczące przebiegu procesu gięcia. Innym rozwiązaniem, które mogłoby zostać zaimplementowane w przyszłości jest wybór algorytmu regulacji, tak jak ma to miejsce w komercyjnych sterownikach.

## Rozdział 8. Bibliografia

- [1] International Standard IEC 61131-1.[online] International Electrotechnical Commission [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
[http://d1.amobbs.com/bbs\\_upload782111/files\\_31/ourdev\\_569647.pdf](http://d1.amobbs.com/bbs_upload782111/files_31/ourdev_569647.pdf)
- [2] Skoczowski S. *Technika regulacji temperatury*. Lublin : Redakcja Czasopisma Pomiarów Automatyka Kontrola; przy współpr. Lubuskich Zakładów Aparatów Elektrycznych LUMEL, 2000. ISBN 83-87982-60-1
- [3] Michalski L., Kuźmiński K., Sadowski J. *Regulacja temperatury urządzeń elektrotermicznych*. Warszawa: Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1981. ISBN 83-204-0190-9
- [4] Regulatory temperatury. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
<https://acse.pl/regulatory-temperatury/>
- [5] Brzózka J. *Problemy doboru dynamiki modelu w układzie regulacji MFC*. Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Szczecinie. 2006, 10, s. 107-116.
- [6] Frącz W. *Wpływ wielokrotnego przetwórstwa polimerów na parametry stanu tworzywa w formie wtryskowej*. Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Mechanika. 2012, 3, s. 15-29
- [7] *PID Enda ETC4420-230 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197560-da-01-en-ETC4420\\_230\\_PID\\_REGLER.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197560-da-01-en-ETC4420_230_PID_REGLER.pdf)
- [8] *Termostat PID Enda ETC4420-230* [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
<https://www.conrad.pl/p/termostat-pid-enda-etc4420-230-pt100-j-k-t-s-r-przekaznik-2-a-ssr-dxsxw-94-x-48-x-48-mm-197560>
- [9] *Sisel ET2011-T-SM Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
[https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury\\_ET2011-T-SM\\_SISEL?file=files/pl/katalog/12/enda/ET2011\\_ver.PL.pdf](https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury_ET2011-T-SM_SISEL?file=files/pl/katalog/12/enda/ET2011_ver.PL.pdf)
- [10] *Sterownik temperatury Sisel ET2011-T-SM* [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: [https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury\\_ET2011-T-SM\\_SISEL](https://www.dacpol.eu/pl/regulator-z-poj-wyswietlaczem/product/regulator-temperatury_ET2011-T-SM_SISEL)
- [11] *PID Jumo cTRON04 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
[http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197367-an-01-de-CTRON04\\_STETIGER\\_REGLER\\_110\\_240V\\_AC.pdf](http://www.produktinfo.conrad.com/datenblaetter/175000-199999/197367-an-01-de-CTRON04_STETIGER_REGLER_110_240V_AC.pdf)
- [12] *Termostat PID Jumo cTRON04*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
<https://www.conrad.pl/p/termostat-pid-jumo-ctron04-l-j-u-t-k-e-n-s-r-b-c-d-pt100-pt1000-kty11-6-przekaznik-3-a-tranzystorowe-dx-197367>
- [13] *ATmega2560 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie:  
[http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/atmel-2549-8-bit-avr-microcontroller-atmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf)

- [14] *Arduino Mega2560 Rev3 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://store.arduino.cc/arduino-mega-2560-rev3>
- [15] *ILI9341 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://www.buydisplay.com/download/ic/ILI9341.pdf>
- [16] *Wyświetlacz LCD TFT 3.2" 320x480 ILI9341 Specyfikacja*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://www.gotronik.pl/wyswietlacz-lcd-tft-przekatna-32-320x480-ili9341-kartapdf-4137.html>
- [17] *GY-906 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://www.hotmcu.com/infrared-thermometer-mlx90614-breakout-board-p-223.html>
- [18] *MLX90614 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: [https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/MLX90614\\_rev001.pdf](https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Temperature/MLX90614_rev001.pdf)
- [19] Pirometr z czujnikiem MLX 90614. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <http://www.jarzebski.pl/arduino/czujniki-i-sensory/pirometr-z-czujnikiem-mlx90614.html>
- [20] *MPU6050 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: [https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050\\_DataSheet\\_V3%204.pdf](https://store.invensense.com/datasheets/invensense/MPU-6050_DataSheet_V3%204.pdf)
- [21] *Slide MOSFET MP Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://www.pololu.com/product/2814>
- [22] *FLIR E5 Datasheet*. [online] [dostęp: 09.12.2018]. Dostępny w Internecie: <https://www.flir.com/globalassets/imported-assets/document/ex-series-no-wifi-datasheet.pdf>

## Rozdział 9. Spis rysunków

Rys. 1. Schemat ideowy standardowego układu regulacji. ....	3
Rys. 2. Schemat działania regulatora dwustawnego. ....	4
Rys. 3. Schemat blokowy idealnego regulatora PID. ....	5
Rys. 4. Funkcje przynależności do zbiorów zimno, ciepło, gorąco. ....	6
Rys. 5. Schemat struktury Model Following Control. ....	7
Rys. 6. Kieszeń na ulotki wykonana z PMMA. ....	8
Rys. 7. Termostat PID Enda ETC4420-230. ....	9
Rys. 8. Sterownik temperatury Sisel ET2011-T-SM. ....	10
Rys. 9. Termostat PID Jumo cTRON04. ....	10
Rys. 10. Diagram przepływu danych układu sterownika. ....	13
Rys. 11. Rozkład elementów na płytce Arduino Mega 2560. ....	14
Rys. 12. Ekran LCD 3,2 cala. ....	15
Rys. 13. Moduł pirometru GY-906. ....	16
Rys. 14. Joystick z przyciskiem. ....	17
Rys. 15. Moduł żyroskopu i akcelerometru MPU6050. ....	17
Rys. 16. Duży przełącznik Slide MOSFET MP 4,5-40V / 8A ....	18
Rys. 17. Termistor NTC 100 10kΩ. ....	19
Rys. 18. Schemat elektryczny sterownika. ....	20
Rys. 19. BOM elementów układu. ....	20
Rys. 20. Widok projektu płytki obwodu drukowanego. ....	21
Rys. 21. Laminat z ścieżkami pokrytymi warstwą lakieru. ....	21
Rys. 22. Trawienie płytki. ....	22
Rys. 23. Proces wiercenia płytki. ....	22
Rys. 24. Sprawdzenie ścieżek na płytce za pomocą multimetru. ....	23
Rys. 25. Widok gotowej płytki podłączonej do Arduino Mega2560. ....	23
Rys. 26. Okno programu Visual Studio 2017. ....	24
Rys. 27. Algorytm regulacji PID zastosowany w programie. ....	26
Rys. 28. Schemat blokowy funkcji widoku roboczego. ....	28
Rys. 29. Widok menu głównego aplikacji. ....	29
Rys. 30. Widok wyboru profilu. ....	30
Rys. 31. Widok roboczy aplikacji. ....	30
Rys. 32. Widok wyświetlany w przypadku wykrycia bezczynności. ....	31
Rys. 33. Widok ustawień aplikacji. ....	31
Rys. 34. Widok kalibracji urządzenia. ....	32
Rys. 35. Widok zmiany nastaw regulatora PID. ....	32
Rys. 36. Sterownik podłączony do zasilacza laboratoryjnego AimTTi QPX1200S. ....	33
Rys. 37. Wykresy zależności temperatury materiału od czasu dla trzech wartości zadanych. ...	34
Rys. 38. Temperatura grzałki zbadana za pomocą kamery termowizyjnej. ....	35
Rys. 39. Wykres zależności wskazań kamery termowizyjnej od wskazań pirometru. ....	36



## **Rozdział 10. Spis tabel**

Tabela 1. Porównanie wartości wskazań pochodzących z pirometru i kamery termowizyjnej.. 35

## **Rozdział 11. Załączniki**

Załącznik 1. Kod programu sterownika.....dostępny na załączonej płycie CD