



Politechnika Wrocławska

Katedra Metrologii Elektronicznej i Fotonicznej  
Laboratorium Optoelektroniki i Fotoniki

Nazwa kursu:

Metrologia optyczna 2 - laboratorium

Temat projektu:

Optyczny Pomiar Temperatury -  
Pirometr

Autorzy projektu:

Grupa nr 4

Piotr Rosiński, 262016

Patryk Niczke, 260832

Przemysław Lis, 276922

Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów

Kierunek: Elektronika

Miejsce i rok: Wrocław, 2024

# Spis treści

<b>1</b>	<b>Wstęp</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Wprowadzenie</b>	<b>3</b>
<b>3</b>	<b>Założenia</b>	<b>10</b>
3.1	Założenia funkcjonalne . . . . .	10
3.2	Założenia konstrukcyjne . . . . .	10
<b>4</b>	<b>Opis części sprzętowej</b>	<b>12</b>
4.1	Arduino Uno . . . . .	12
4.2	Czujnik MLX90614 . . . . .	14
4.3	Wyświetlacz LCD 16x2 . . . . .	15
4.4	4-przyciskowa klawiatura . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Opis części programowej</b>	<b>21</b>
<b>6</b>	<b>Uruchomienie, kalibracja</b>	<b>22</b>
<b>7</b>	<b>Pomiary testowe</b>	<b>23</b>
<b>8</b>	<b>Instrukcja obsługi dla użytkownika</b>	<b>25</b>
<b>9</b>	<b>Podsumowanie</b>	<b>27</b>

# 1. Wstęp

Metrologia optyczna stanowi obecnie jeden z najważniejszych narzędzi pomiarowych w nauce i przemyśle, stale zwiększając swoje znaczenie. Bezdotykowy pomiar temperatury rewolucjonizuje precyzję kontroli procesów technologicznych, badań naukowych i diagnostyki medycznej. Szczególną zaletą tych rozwiązań jest możliwość wykonywania pomiarów w warunkach, które dotychczas stanowiły wyzwanie – w przypadku obiektów szybko się poruszających, materiałów o ekstremalnych temperaturach lub gdy klasyczny kontakt pomiarowy mógłby zakłócić naturalne właściwości badanego obiektu i wprowadzić zaburzenie do pomiaru.

Zakres niniejszego projektu obejmuje kompleksowe opracowanie optycznego pomiaru temperatury, który łączy optymalne rozwiązania zarówno w obszarze sprzętowym, jak i programowym. Projekt podzielony jest na dwie główne części: część sprzętową i programową. Pod uwagę wzięte zostaną także różnorodne istotne czynniki, które wpływają na sposób wykorzystania zbudowanego urządzenia. Kluczowe dla projektu jest nie tylko samo działanie pirometru, lecz także wpływ środowiska, w którym jest użytkowane, i kwestia racjonalnej minimalizacji kosztów utworzenia w pełni funkcjonalnego systemu pomiarowego.

Po wstępie i założeniach projektowych następuje szczegółowy opis części sprzętowej oraz programowej systemu. Raport obejmuje proces uruchomienia i kalibracji urządzenia wraz z wynikami pomiarów testowych. Dla użytkowników przygotowano instrukcję obsługi. Całość uzupełniają podsumowanie, dodatki oraz bibliografia.

## 2. Wprowadzenie

**Temperatura** jest fundamentalnym parametrem fizycznym, który charakteryzuje stan energetyczny układu termodynamicznego. Stanowi ona miarę średniej energii kinetycznej cząsteczek materii, objawiającej się poprzez ich chaotyczny ruch i drgania. W praktyce inżynierskiej i życiu codziennym temperatura jest kluczowym parametrem determinującym kierunek przepływu energii cieplnej między ciałami oraz wpływającym na właściwości fizyczne materiałów.

W układzie SI przyjęto skalę Kelwina (K) jako podstawową jednostkę temperatury, definiując ją poprzez stałą Boltzmanna i energię kinetyczną cząsteczek. Historycznie wykształciły się również inne skale temperatur - skala Celsjusza ( $^{\circ}\text{C}$ ), powszechnie stosowana w Europie, oraz skala Fahrenheita (F), popularna głównie w Stanach Zjednoczonych. Każda z tych skal ma swoje charakterystyczne punkty odniesienia, co przedstawiono w tabeli 2.1.

Punkt charakterystyczny	Skala temperatur		
	Fahrenheit	Kelvin	Celsjusz
<i>Punkty podstawowe</i>			
Zero bezwzględne	-459,67	0	-273,15
Zero Fahrenheita	0	255,37	-17,78
<i>Punkty charakterystyczne wody</i>			
Zamarzanie	32	273,15	0
Wrzenie	212	373,15	100
<i>Temperatura biologiczna</i>			
Średnia temp. ciała człowieka	98,2	309,8	36,6

Tabela 2.1: Porównanie podstawowych skal temperatury

Szczególne znaczenie w fizyce ma pojęcie zera bezwzględnego (0 K), które stanowi

teoretyczną granicę najniższej możliwej temperatury. W tej temperaturze ustaje ruch termiczny cząsteczek, a układ osiąga minimum energii. Jest to stan nieosiągalny w praktyce, choć współczesne laboratoria potrafią zbliżyć się do niego na milionowe części Kelwina.

Temperatura odgrywa kluczową rolę w procesach wymiany ciepła. Zgodnie z drugą zasadą termodynamiki, energia cieplna przepływa samorzutnie tylko w jednym kierunku - od ciał o wyższej temperaturze do ciał o temperaturze niższej. Proces ten trwa do momentu osiągnięcia równowagi termodynamicznej, czyli wyrównania temperatur wszystkich ciał uczestniczących w wymianie ciepła. Ta fundamentalna zasada ma istotne znaczenie w projektowaniu systemów pomiarowych i kontroli procesów przemysłowych.

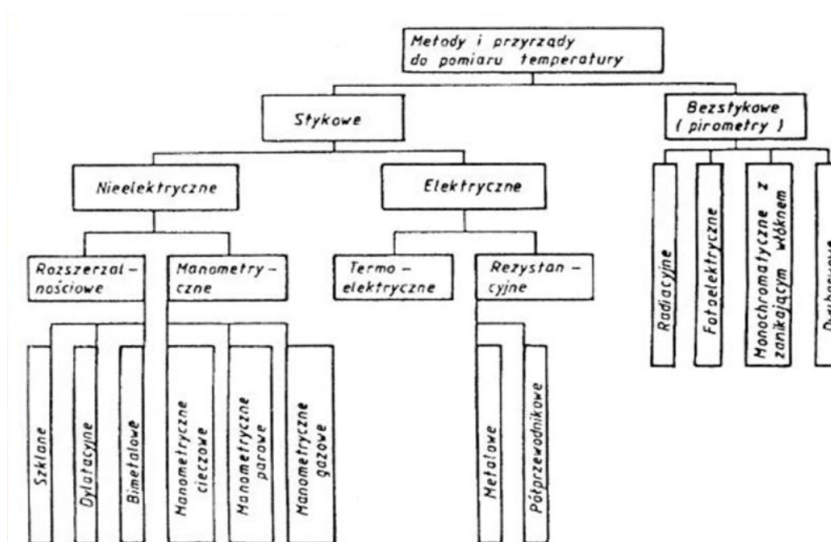
W metrologii optycznej pomiar temperatury opiera się na fundamentalnej własności materii - emisji promieniowania termicznego. Każde ciało o temperaturze wyższej od zera bezwzględnego emituje promieniowanie elektromagnetyczne, którego charakterystyka spektralna i intensywność są ściśle powiązane z jego temperaturą. Współczesne metody pomiaru wykorzystują to zjawisko na kilka sposobów.

**Podstawowe metody pomiaru temperatury** można sklasyfikować na dwie główne kategorie: stykowe i bezstykowe jak pokazano na rysunku 2.1. Kluczowy jest sposób oddziaływania czujnika z obiektem. Metody stykowe wymagają fizycznego kontaktu czujnika z powierzchnią obiektu, co pozwala na przekazywanie ciepła poprzez przewodzenie. Z kolei metody bezstykowe opierają się na detekcji promieniowania cieplnego emitowanego przez obiekty, które mają temperaturę wyższą niż zero absolutne (0 K). Każdy obiekt emituje to promieniowanie, co umożliwia pomiar bez konieczności bezpośredniego dotyku.

Technologie bezstykowe, takie jak pirometry podczerwieni czy kamery termowizyjne, zrewolucjonizowały sposób monitorowania temperatury, oferując szybkie, precyzyjne i bezpieczne pomiary nawet na odległość. Są one nieocenione w zasto-

sowaniach przemysłowych, medycznych czy naukowych, gdzie bezpośredni kontakt z obiektem może być trudny, niebezpieczny lub wręcz niemożliwy. Warto jednak pamiętać, że w przypadku ciał stałych i cieczy promieniowanie ciepłe pochodzi głównie z warstwy przypowierzchniowej, dlatego kluczowe jest uwzględnienie współczynnika emisyjności materiału, aby uniknąć błędów w interpretacji wyników.

Co więcej, rozwój technologii bezstykowych wpływa również na minimalizację wpływu na badane obiekty. W przypadku delikatnych materiałów czy żywych organizmów, metody bezstykowe eliminują ryzyko uszkodzenia czy zniekształcenia wyników pomiarów.



Rysunek 2.1: Podstawowe metody pomiaru temperatury [1]

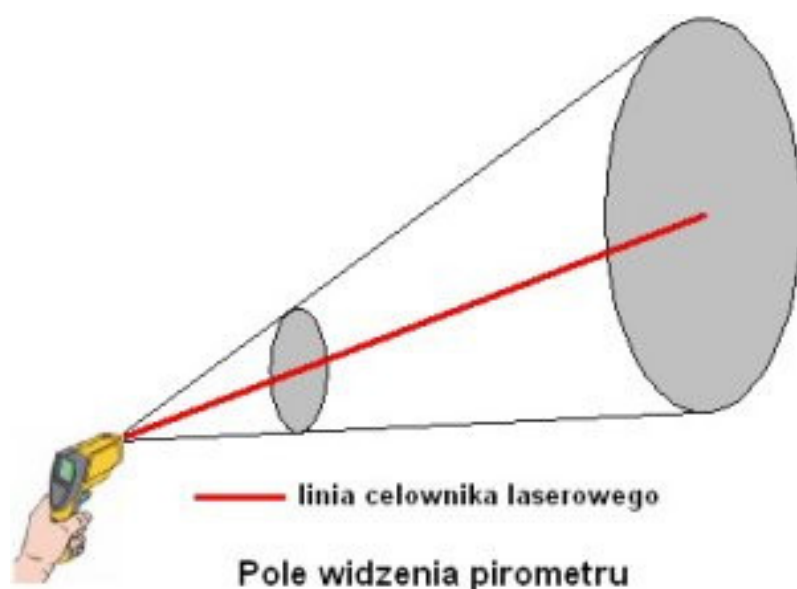
Współczesne rozwiązania pomiarowe idą jednak o krok dalej, integrując zaawansowane algorytmy przetwarzania obrazu termicznego oraz techniki sztucznej inteligencji. Dzięki temu możliwe jest nie tylko dokładniejsze monitorowanie temperatury, ale także automatyzacja procesów decyzyjnych. Przykładowo, systemy oparte na AI mogą analizować trendy temperaturowe w czasie rzeczywistym, przewidywać potencjalne awarie w maszynach czy optymalizować zużycie energii w inteligentnych budynkach. To otwiera nowe możliwości w zarządzaniu energią, diagnostyce medycznej czy nawet w badaniach klimatycznych.

## Zasada działania pirometru

Każdy przedmiot materialny emituje promieniowanie podczerwone (cieplne), niewidoczne dla oczu, ale wyczuwalne np. przy zbliżeniu ręki do gorącego żelazka. Natężenie tego promieniowania jest tym większe, im wyższa jest temperatura przedmiotu. Pirometr mierzy natężenie promieniowania podczerwonego dochodzącego od przedmiotu do jego obiektywu. Zmierzoną wielkość promieniowania przyrząd przelicza na odpowiadającą jej temperaturę przedmiotu i pokazuje wartość tej temperatury na wyświetlaczu.

## Pole widzenia pirometru

Standardowy przenośny pirometr umożliwia pomiar średniej temperatury powierzchni kołowej o średnicy kilku centymetrów z odległości 1 metra. Wraz ze zwiększaniem się odległości pirometru od mierzonego obiektu, rośnie również średnica obszaru, z którego urządzenie rejestruje promieniowanie podczerwone, co doskonale obrazuje rysunek 2.2.

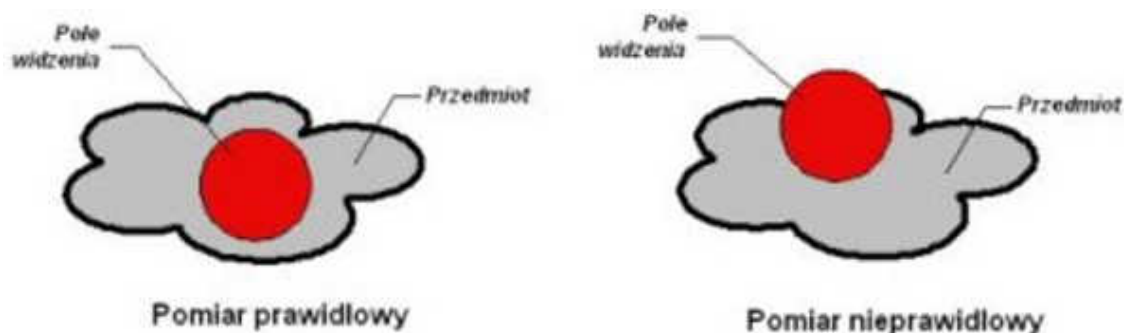


Rysunek 2.2: Zależność pola widzenia od odległości do mierzonego obiektu [2]

Aby ułatwić precyzyjne zlokalizowanie obszaru pomiarowego, pirometry są zazwyczaj wyposażone w celownik laserowy. Promień lasera widoczny jest jako czerwona plamka na powierzchni mierzonego obiektu. Jej położenie wyznacza środek koła, które określa pole widzenia pirometru.

## Pomiary przy użyciu pirometru

Aby wykonać prawidłowy pomiar, pole widzenia pirometru nie może wychodzić poza przedmiot, którego temperaturę mierzymy. W przeciwnym razie pirometr będzie zbierał promieniowanie podczerwone nie tylko z przedmiotu, ale także z otoczenia ( $t_a$ ), co spowoduje błędny wynik pomiaru. Na rysunku 2.4 przedstawiono prawidłowe oraz nieprawidłowe ustawienie pola widzenia pirometru względem powierzchni mierzonego obiektu.



Rysunek 2.3: Prawidłowy i nieprawidłowy pomiar z wykorzystaniem pirometru [2]

## Współczynnik emisyjności powierzchni a dokładność pomiaru

Materiały mają różną zdolność wysyłania promieniowania podczerwonego ze swojej powierzchni. Właściwość ta zależy od gładkości i barwy powierzchni. Materiały o powierzchniach matowych i ciemnych lepiej emitują promieniowanie podczerwone niż materiały o powierzchniach gładkich i jasnych.



Współczynnik emisyjności określa się w zakresie od 0 do 1. Przykładowo, współczynnik emisyjności powierzchni cegły wynosi 0.85, a powierzchni polakierowanej czarnym lakierem matowym 0.97. Aluminium ma współczynnik emisyjności 0.07. W celu otrzymania prawidłowego wyniku pomiaru pirometrem należy wartość współczynnika emisyjności danej powierzchni wprowadzić do pamięci wewnętrznej przyrządu.

## Prawa fizyczne i wzory

**Prawo Wiena** (2.1) określa zależność między temperaturą ciała doskonale czarnego a długością fali, przy której emituje ono najwięcej promieniowania. Formuła ta jest wykorzystywana do określania temperatury na podstawie emitowanego promieniowania.

$$\lambda_{MAX} = \frac{b}{T} \quad (2.1)$$

gdzie:

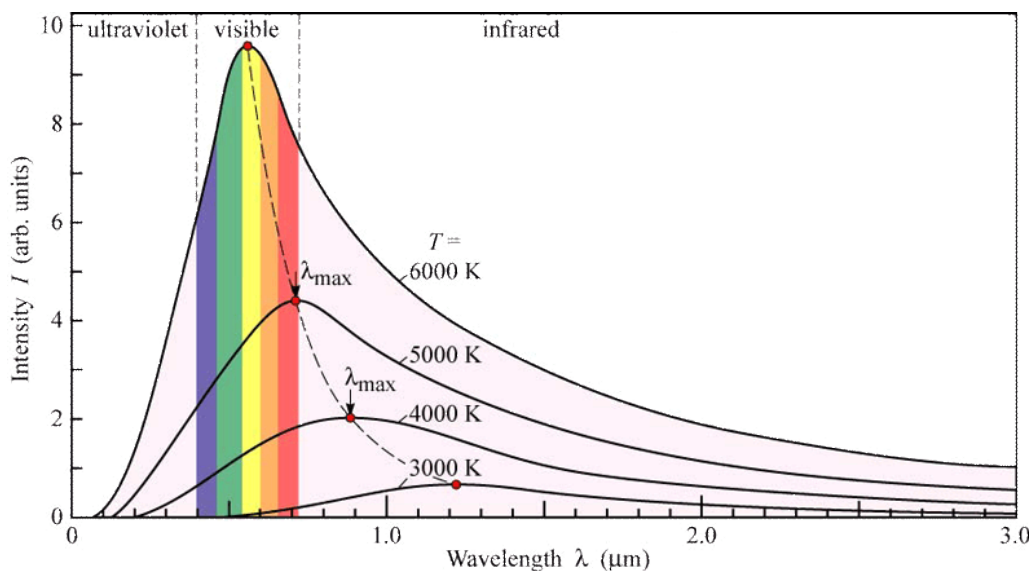
- $\lambda_{MAX}$  – długość fali o maksymalnej emisji,
- $T$  – temperatura,
- $b$  – stała Wiena.

**Prawo Stefana-Boltzmann** (2.2) mówi, że całkowita energia promieniowania ciała doskonale czarnego jest proporcjonalna do czwartej potęgi jego temperatury

$$E = \sigma T^4 \quad (2.2)$$

**Ciało doskonale czarne** to teoretyczny obiekt fizyczny, który całkowicie pochłania padające na niego promieniowanie elektromagnetyczne, niezależnie od długości fali. Nie odbija ani nie przepuszcza żadnego promieniowania. W praktyce ciało

doskonale czarne jest również idealnym emitentem promieniowania cieplnego, co oznacza, że emituje maksymalną możliwą ilość promieniowania dla danej temperatury. Jego emisyjność wynosi 1.



Rysunek 2.4: Rozkład energii w widmie promieniowania ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach

[3]

**Współczynnik emisyjności** ( $\varepsilon$ ) opisuje, jaką część energii promieniowania emitowanego przez ciało doskonale czarne emituje dane ciało w tej samej temperaturze. Wartość współczynnika emisyjności  $\varepsilon$  jest zazwyczaj dostarczana przez producenta.

Współczynnik emisyjności obliczony na podstawie zmierzonych temperatur:

$$\varepsilon = \frac{T_{O_1}^4 - T_{A_1}^4}{T_{O_2}^4 - T_{A_2}^4}$$

gdzie:

- $T_{O_1}$  – zmierzona temperatura obiektu (w kelwinach),
- $T_{A_1}$  – zmierzona temperatura otoczenia (w kelwinach),
- $T_{O_2}$  – rzeczywista temperatura obiektu (w kelwinach),
- $T_{A_2}$  – rzeczywista temperatura otoczenia (w kelwinach).

## 3. Założenia

### 3.1 Założenia funkcjonalne

Funkcjonalność urządzenia umożliwia szybki i intuicyjny bezdotykowy pomiar temperatury. W czasie rzeczywistym urządzenie mierzy temperaturę danej powierzchni za pomocą czujnika MLX90614, a wynik jest wyświetlany na ekranie LCD.

### 3.2 Założenia konstrukcyjne

Podstawowe komponenty urządzenia:

- **Czujnik temperatury MLX90614** – umożliwia precyzyjny pomiar temperatury obiektu w zakresie od  $-70^{\circ}\text{C}$  do  $380^{\circ}\text{C}$ . Pomiar jest podawany z dokładnością do  $0,5^{\circ}\text{C}$  w zakresie  $0-50^{\circ}\text{C}$  lub  $4^{\circ}\text{C}$  dla wartości skrajnych. Zakres temperatury czujnika wynosi od  $-40^{\circ}\text{C}$  do  $85^{\circ}\text{C}$  [4].
- **Mikrokontroler Arduino Uno** – steruje komponentami urządzenia i przetwarza dane z czujnika.
- **Wyświetlacz LCD HD44780** z konwerterem I2C – służy do prezentowania wyników pomiarów.
- **4-przyciskowa klawiatura** – umożliwia interakcję z urządzeniem.

## **Płyta ewaluacyjna**

Urządzenie zostało zbudowane na płycie ewaluacyjnej, co zapewnia stabilność pracy i minimalizuje ryzyko uszkodzeń. Konstrukcja umożliwia bezpieczny transport urządzenia.

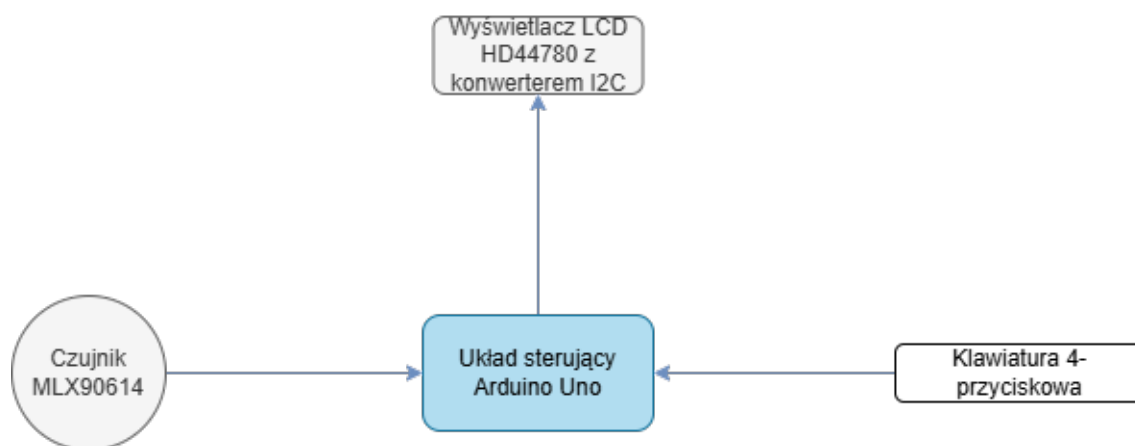
## **Środowisko pracy**

Urządzenie jest zdolne do pracy w szerokim zakresie temperatur od  $-20^{\circ}\text{C}$  do  $+70^{\circ}\text{C}$ , co pozwala na jego wykorzystanie w różnych warunkach otoczenia.

## **Zasilanie**

Zasilanie urządzenia odbywa się poprzez napięcie 5V, z opcją wykorzystania portu USB co najmniej w wersji 2.0. Urządzenie nie zostało przystosowane do pracy w ekstremalnych warunkach środowiskowych.

## 4. Opis części sprzętowej



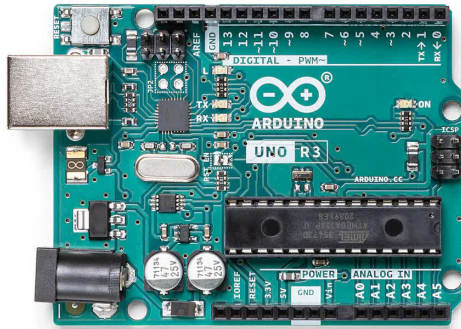
Rysunek 4.1: Schemat blokowy skonstruowanego urządzenia

### 4.1 Arduino Uno

Arduino Uno pokazany na rysunku 4.2, to popularny mikrokontroler wykorzystywany w projektach elektronicznych i robotyce. Jest to wszechstronna platforma programistyczna oparta na mikrokontrolerze ATmega328P. Mikrokontroler ten posiada 32KB pamięci Flash, 2KB pamięci RAM, 14 cyfrowych pinów wejścia/wyjścia, 6 pinów wejścia analogowego, zegar taktowany z częstotliwością 16MHz, interfejs USB, złącze zasilania 5V oraz złącze programowania ISP. Arduino Uno jest kompatybilny z wieloma dodatkowymi modułami, co pozwala na rozbudowę funkcjonalności. Mikrokontroler ten jest wykorzystywany w projekcie jako główny kontroler systemu [5].

Programowanie Arduino Uno odbywa się w dedykowanym środowisku Arduino

IDE, które wykorzystuje język bazujący na C++. Dzięki rozbudowanej bibliotece funkcji i dużej społeczności użytkowników, realizacja nawet zaawansowanych projektów jest stosunkowo prosta.



Rysunek 4.2: Mikrokontroler Arduino Uno [5]

**Zadanie:** Arduino Uno pełni funkcję jednostki centralnej systemu, integrując wszystkie kluczowe komponenty urządzenia. Jest odpowiedzialne za przetwarzanie danych pomiarowych z czujnika temperatury MLX90614, obsługę logiki systemu oraz sterowanie wyświetlaczem LCD. Dzięki temu użytkownik może w czasie rzeczywistym obserwować wyniki pomiarów i dokonywać ich konfiguracji za pomocą klawiatury. Arduino Uno zapewnia stabilne i niezawodne działanie, gwarantując synchronizację między komponentami. Ponadto, mikrokontroler umożliwia szybką reakcję na polecenia użytkownika, takie jak zmiana wartości emisyjności czy zmiana jednostek temperatury.

Dzięki swojej wszechstronności i otwartości Arduino Uno idealnie nadaje się do prototypowania urządzeń pomiarowych, takich jak projektowane w tym systemie rozwiązanie.

## 4.2 Czujnik MLX90614

Czujnik MLX90614 pokazany na rysunku 4.3, to zaawansowany, bezdotkowy termometr na podczerwień, który umożliwia pomiar temperatury obiektów w szerokim zakresie. Działa na napięciu zasilania od 3V do 3.6V i komunikuje się za pomocą interfejsu I2C, co czyni go łatwym w integracji z różnymi systemami, takimi jak Arduino czy inne mikrokontrolery. Dzięki swojej konstrukcji, MLX90614 znajduje zastosowanie w wielu dziedzinach, w tym w medycynie do pomiaru temperatury ciała, w systemach klimatyzacji oraz w automatyzacji przemysłowej [6].

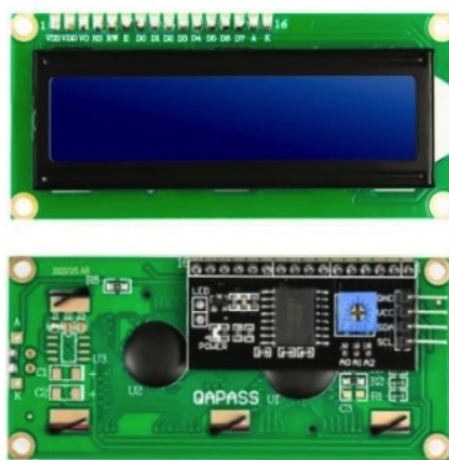


Rysunek 4.3: Czujnik MLX90614 [6]

**Zadanie:** Czujnik MLX90614 stanowi kluczowy element systemu, umożliwiający precyzyjny, bezkontaktowy pomiar temperatury. Wykorzystuje technologię detekcji promieniowania podczerwonego, pozwalając na dokładny odczyt temperatury powierzchni bez konieczności fizycznego kontaktu z badanym obiektem.

## 4.3 Wyświetlacz LCD 16x2

Wyświetlacz LCD z konwerterem I2C pokazany na rysunku 4.4, oparty jest na sterowniku HD44780 to popularne rozwiązanie do wyświetlania tekstu w projektach elektronicznych. Dzięki wbudowanemu konwerterowi I2C znacznie uproszczona jest komunikacja z mikrokontrolerem, ponieważ wymaga jedynie dwóch linii sygnałowych (SDA i SCL), zamiast standardowych 6-8 w przypadku klasycznego podłączenia. Wyświetlacz obsługuje różne konfiguracje, najczęściej spotykane to 16x2 (16 znaków na 2 liniach) lub 20x4 (20 znaków na 4 liniach) [7]. Sterownik HD44780 umożliwia łatwe sterowanie wyświetlanymi znakami oraz tworzenie niestandardowych symboli. Dzięki czytelnemu interfejsowi i szerokiemu wsparciu w bibliotekach do Arduino, Raspberry Pi i innych platform, wyświetlacz ten jest chętnie używany w projektach takich jak panele kontrolne, wskaźniki statusu czy urządzenia IoT.



Rysunek 4.4: Wyświetlacz LCD44780 z konwerterem I2C [7]

**Zadanie:** Wyświetlacz LCD 16x2 pełni funkcję interfejsu wizualnego, umożliwiając prezentację wyników pomiarów temperatury oraz dodatkowych informacji, takich jak ustawiona wartość emisyjności i wybrana jednostka temperatury (Celsjusz, Fahrenheit lub Kelvin).



## 4.4 4-przyciskowa klawiatura

Pokazana na zdjęciu 4.5 klawiatura to membranowa klawiatura numeryczna, składająca się z czterech przycisków oznaczonych cyframi od 1 do 4. Charakteryzuje się prostą budową, elastyczną taśmą zakończoną złączem z pinami, co umożliwia łatwe podłączenie do mikrokontrolera lub innych urządzeń elektronicznych. Tego typu klawiatury są często wykorzystywane w prostych projektach elektronicznych, takich jak panele sterujące, systemy wprowadzania kodów czy interfejsy użytkownika w urządzeniach DIY. Dzięki niskiej cenie i kompaktowym rozmiarom, są popularnym wyborem wśród hobbystów i studentów elektroniki.



Rysunek 4.5: 4-przyciskowa klawiatura [8]

Za pomocą dołączonej 4-przyciskowej klawiatury można:

- zwiększać wartość emisyjności,
- zmniejszać wartość emisyjności,
- przywrócić początkową wartość emisyjności wynoszącą 1,
- zmieniać jednostkę, w której wyświetlany jest wynik, wciskając kolejno przycisk (stopnie Celsjusza, Fahrenheita, Kelvina).

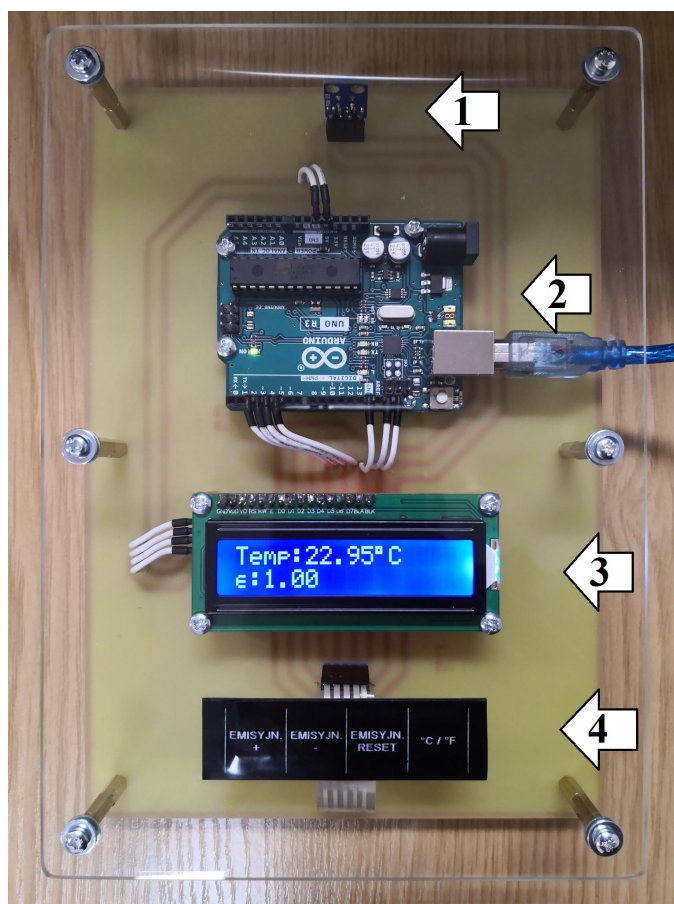
**Specyfikacja:** Prosty układ czterech przycisków, połączony z wejściami Arduino.

## Rzeczywisty układ

Na zdjęciu 4.6 przedstawiono rzeczywiste wykonanie urządzenia, którego schemat blokowy zaprezentowano na rysunku 4.1. Całość została zamontowana na płycie drukowanej i zabezpieczona przezroczystą osłoną, co zapewnia ochronę i wygodę obsługi.

Fotografia 4.6 przedstawia panel górny urządzenia. Najważniejsze jego elementy:

1. Czujnik MLX90614
2. Układ sterujący Arduino Uno
3. Wyświetlacz LCD HD44780 z konwerterem I2C
4. Klawiatura 4-przyciskowa

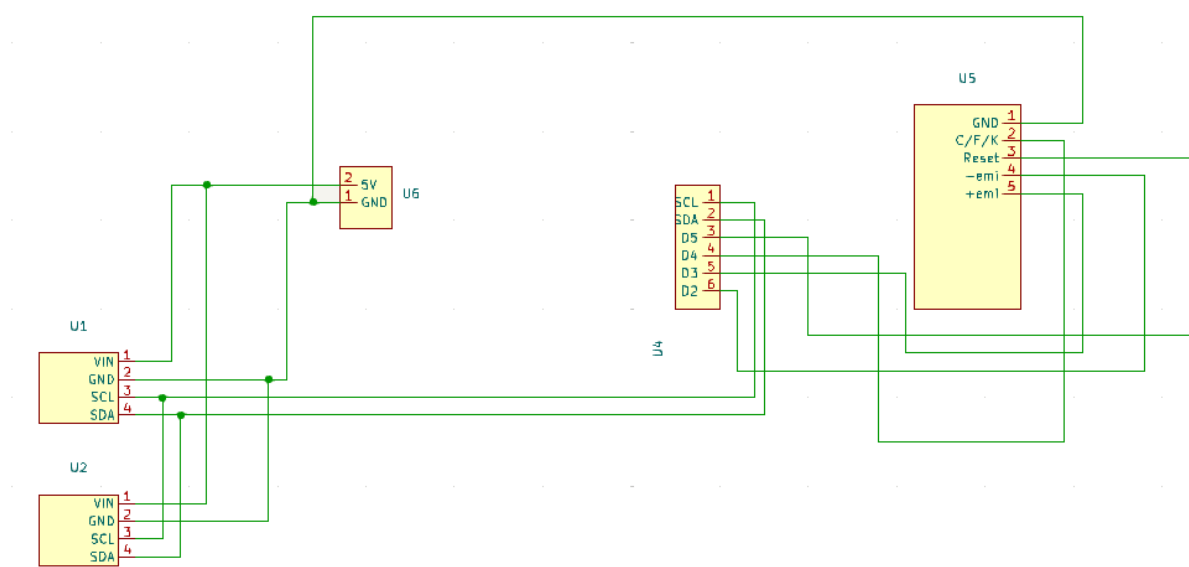


Rysunek 4.6: Panel górny urządzenia

## Część mechaniczna

W oparciu o schemat 4.1 zaprojektowano specjalnie dostosowaną płytkę PCB, której schemat ideowy widoczny jest na rysunku 4.7, natomiast układ ścieżek na płycie drukowanej można dostrzec na rysunku 4.8. Łączy ona wszystkie podzespoły w jednej strukturze, gwarantując stabilność połączeń i zmniejszając ryzyko uszkodzeń obwodu. Dodatkowo pozwala na optymalne i przejrzyste rozmieszczenie elementów. Schemat przedstawiony na rysunku 4.7 ilustruje sposób połączenia kluczowych komponentów urządzenia.

- **Arduino Uno** oznaczone jako U5
- **Czujnik MLX90614** oznaczony jako U1
- **Wyświetlacz LCD z interfejsem I2C** oznaczony jako U2
- **Konwerter I2C** dołączony do wyświetlacza oznaczony jako U4
- **Klawiatura 4-przyciskowa** oznaczona jako U3

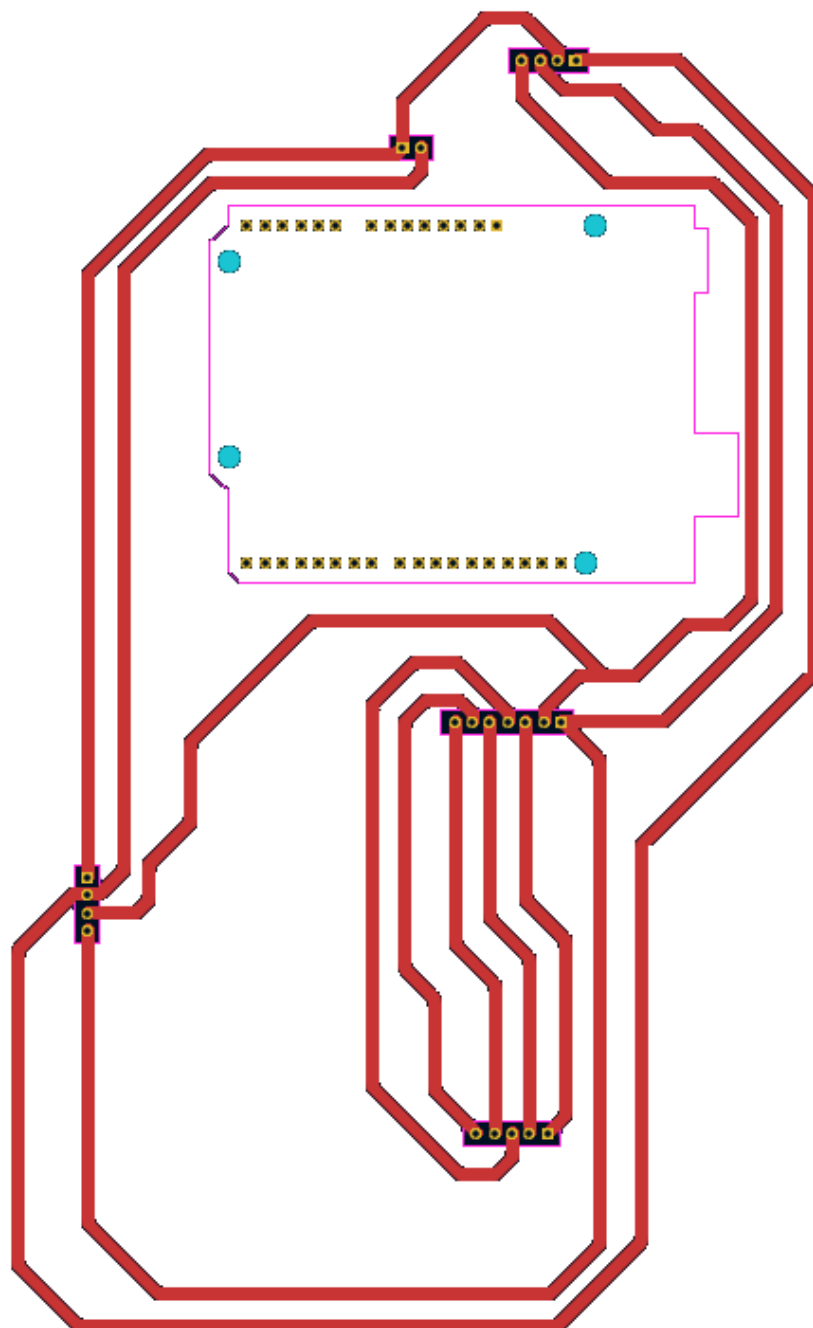


Rysunek 4.7: Schemat połączeń między komponentami

Połączenia między elementami opierają się głównie na magistrali I2C oraz standardowych liniach sygnałowych, co minimalizuje liczbę przewodów i upraszcza konstrukcję układu. Czujnik temperatury MLX90614 został podłączony do mikrokontrolera Arduino za pomocą interfejsu I2C. Wyświetlacz LCD HD44780 podłączono z wykorzystaniem konwertera pracującego na interfejsie I2C.

## Płytki PCB

Po przetestowaniu komponentów na płytce prototypowej, zaprojektowano docelową płytę ewaluacyjną z wykorzystaniem oprogramowania KiCad 8.0. Wykonano układ ścieżek na płytce drukowanej oraz rozmieszczono złącza w odpowiednich miejscach. Płyta ewaluacyjna definiuje rozmiar urządzenia, wynoszący 208 mm x 146 mm, po dodaniu obudowy z płyty poliwęglanowej wysokość urządzenia ma wartość 46 mm. Płytę ewaluacyjną wykonano z użyciem tradycyjnej technologii termotransferowej, a wytrawianie laminatu przebiegło z użyciem chlorku sodu. Po wykonaniu odpowiednich otworów w płycie, umieszczono złącza i przewody metodą lutowania THT. Wszystkie elementy urządzenia połączone zostały śrubami oraz tulejami mosiężnymi z gwintami w rozmiarze M3. Całość została obudowana dwiema płytami poliwęglanowymi o grubości 3 mm.



Rysunek 4.8: Rozkład ścieżek na płycie drukowanej

## 5. Opis części programowej

## 6. Uruchomienie, kalibracja

## 7. Pomiar testowe

W celu weryfikacji poprawności działania pirometru, przeprowadzono test porównawczy z wykorzystaniem wzorcowanego pirometru przemysłowego Sonel DIT-200 wraz z opcją pomiaru temperatury metodą stykową. Test przeprowadzono w kontrolowanych warunkach laboratoryjnych w przedziale temperatury 25 - 30°C. Zakres temperatury mierzonego obiektu wynosi od 35°C do 160°C. Obiektem pomiarowym jest płyta grzejna o mocy 800W, pomalowanego na kolor czarny matowy.

Procedura testowa:

1. Przygotowanie stanowiska składającego się z urządzenia testowanego, pirometru przemysłowego wyposażonego w pomiar metodą optyczną oraz stykową oraz obiektu odwzorowującego wymagane nastawy temperatury.
2. Wykonanie pomiarów temperatury w zakresie od 35°C do 160°C w odstępach co 5°C oraz zarejestrowanie ich w arkuszu kalkulacyjnym.
3. Dwukrotne powtórzenie pomiarów. Każdy pomiar był wykonywany trzykrotnie, a wyniki uśredniano w celu zwiększenia dokładności pomiarów.



Temperatura z Arduino [°C]	Termometr stykowy [°C]	Pirometr przemysłowy [°C]
160	160	164.7
155	156.1	159.3
150	151.8	156.6
145	146.9	152.9
140	142.5	147.2
135	137.2	142.1
130	132.5	139.2
125	127.8	131.3
120	122.3	126.3
115	117.4	120.5
110	112.7	115.6
105	106.9	110.7
100	101	105
95	94.8	100
90	89.7	96.2
85	83.8	92.4
80	79.3	88.5
75	73.3	84.1
70	68.7	80.1
65	63.8	75.7
60	58.7	70.7
55	54.1	66
50	51	60.4
45	45.4	54.2
40	41.1	42.1
35	37	36.1

Tabela 7.1: Porównanie pomiarów temperatury dla różnych urządzeń.



Rysunek 7.1: Przebieg procedury testowej

## 8. Instrukcja obsługi dla użytkownika

### Krótki opis pirometru i jego przeznaczenia

Poniższy pirometr jest projektem naukowo-badawczym, służącym do bezkontaktowego pomiaru temperatury oraz wyświetlania jej w czasie rzeczywistym na wbudowanym wyświetlaczu LCD. Urządzenie oferuje możliwość wyboru wyświetlania temperatury według skali Celsjusza, Fahrenheita oraz Kelwina. Ponadto, miernik umożliwia dostosowanie emisyjności w zakresie od 0.00 do 1.00.

Urządzenie składa się z następujących elementów:

- dwóch paneli poliwęglanowych o grubości 3 mm stanowiących obudowę,
- płyty ewaluacyjnej,
- modułu Arduino Uno pełniącego rolę serca urządzenia,
- czujnika pirometrycznego,
- klawiatury,
- wyświetlacza LCD.

### Dane techniczne

- **Prędkość próbkowania:** 1/sekundę,
- **Zasilanie:** USB-B 5V,

- **Pobór prądu:** >50 mA,
- **Klasa odporności:** IP10,
- **Zakres pomiaru temperatury:** od -30 do 150 °C,
- **Dopuszczalna wilgotność względna bez kondensacji:** 5–95%,
- **Temperatura pracy oraz przechowywania:** od -10 do 50 °C,
- **Wymiary:** 160 x 200 mm,
- **Waga:** 350 g.

## Obsługa urządzenia

Po podłączeniu urządzenia do zasilania za pomocą kabla USB-B, jest ono natychmiast gotowe do pracy i wykonuje pomiary. Należy skierować przednią część urządzenia (w której znajduje się element pomiarowy) na badany obiekt. Wyniki pomiarów są wyświetlane na ekranie LCD w czasie rzeczywistym.

Ustawienie emisyjności w zakresie od 0.00 do 1.00 odbywa się za pomocą klawiszy EMISYJN. + oraz EMISYJN. -. Tabela emisyjności typowych materiałów znajduje się na rysunku 4. Prawidłowe ustawienie emisyjności ma istotny wpływ na dokładność pomiarów i powinno być dostosowywane przy każdej zmianie badanej powierzchni. W celu przywrócenia wartości domyślnej emisyjności (1.00), należy użyć przycisku EMISYJN. RESET.

Zmianę skali temperatury pomiędzy stopniami Celsjusza, Fahrenheita oraz Kelwina wykonuje się przyciskiem °C / °F. Po zakończeniu pomiarów należy odłączyć przewód zasilający od urządzenia. Pirometr powinien być przechowywany w suchym miejscu.

## 9. Podsumowanie

Wyniki testów zostały przedstawione w tabeli 7.1. Obserwacje wskazują, że:

- Wyniki pirometru przemysłowego są zbliżone do wyników pirometru testowego, z odchyleniem nieprzekraczającym  $4^{\circ}\text{C}$  w najwyższych temperaturach.
- Pirometr przemysłowy, jako urządzenie profesjonalne, rejestruje wyższe wartości temperatur w całym zakresie. Rozbieżności te mogą być związane z niedoskonałością kalibracji pirometru Arduino, lub ograniczoną rozdzielczością czujnika MLX90614.
- Termometr stykowy wykazuje wyższe różnice w niższych temperaturach, co może wynikać z bezwładności termicznej sondy stykowej lub nierównomierności.
- Wraz ze wzrostem temperatury, różnice między wynikami z pirometru Arduino a pirometru przemysłowego stają się bardziej widoczne. Pirometr Arduino odnotowuje wartości niższe niż pirometr przemysłowy w wyższych zakresach temperatur (powyżej  $120^{\circ}\text{C}$ ), co sugeruje możliwość systematycznych błędów wynikających z niedoskonałości kalibracji.
- Wraz ze wzrostem temperatury, różnice między wynikami z pirometru Arduino a pirometru przemysłowego stają się bardziej widoczne. Pirometr Arduino odnotowuje wartości niższe niż pirometr przemysłowy w wyższych zakresach temperatur (powyżej  $120^{\circ}\text{C}$ ), co sugeruje możliwość systematycznych błędów wynikających z niedoskonałości kalibracji.

- Wraz ze wzrostem temperatury, różnice między wynikami z pirometru Arduino a pirometru przemysłowego stają się bardziej widoczne. Pirometr Arduino odnotowuje wartości niższe niż pirometr przemysłowy w wyższych zakresach temperatur (powyżej 120°C), co sugeruje możliwość systematycznych błędów wynikających z niedoskonałości kalibracji.

Podsumowując, pirometr spełnia założenia projektowe i może być stosowany do bezkontaktowego pomiaru temperatury w zakresie od 35°C do 160°C.

- **Emisyjność:** Ustawienia emisyjności mają kluczowy wpływ na wyniki pomiarów. Niedokładne dobranie tej wartości dla badanych materiałów może prowadzić do błędów w pomiarach.
- **Kalibracja:** Pirometr Arduino, jako urządzenie prototypowe, nie posiada profesjonalnej kalibracji fabrycznej, co wpływa na dokładność pomiarów.
- **Czujnik MLX90614:** Czujnik zastosowany w urządzeniu charakteryzuje się ograniczoną dokładnością w wyższych zakresach temperatur, co mogło wpłynąć na odchylenia w pomiarach.
- **Wpływ środowiska:** Czynniki takie jak wilgotność, temperatura otoczenia czy odbicia promieniowania podczerwonego mogą wprowadzać dodatkowe błędy.

# Bibliografia

- [1] „Metody i urządzenia do pomiaru temperatury i ciśnienia” - Dr inż. Andrzej Kłabut  
<https://slideplayer.pl/slide/5307334/17/images/4/Metody+pomiaru+temperatury.jpg>
- [2] „Pirometr - poradnik użytkownika” - MERA-SP.PL  
<https://mera-sp.pl/blog/rozwiązania/pirometry-poradnik-uzytkowania>
- [3] „Rozkład energii w widmie promieniowania ciała doskonale czarnego w różnych temperaturach”  
[https://weblab.deusto.es/olarex/cd/kaernten/BBR\\_PLnew\\_27.09.2013/rozkad\\_energii\\_w\\_widmie\\_promieniowania\\_ciaa\\_doskonale\\_czarnego\\_w\\_rnych\\_temperaturach.html](https://weblab.deusto.es/olarex/cd/kaernten/BBR_PLnew_27.09.2013/rozkad_energii_w_widmie_promieniowania_ciaa_doskonale_czarnego_w_rnych_temperaturach.html)
- [4] Korneliusz Jarzębski - „Pirometr z czujnikiem MLX90614ESF-BAA”  
<https://www.jarzebski.pl/arduino/czujniki-i-sensory/pirometr-z-czujnikiem-mlx90614.html>
- [5] Arduino - „Arduino Uno Rev3”  
<https://store.arduino.cc/products/arduino-uno-rev3/>
- [6] ElektroWeb - „Pirometr termometr bezdotykowy MLX90614 GY-906”  
<https://www.elektroweb.pl/pl/czujniki-temperatury/273-pirometr-termometr-bezdotykowy-mlx90614-gy-906.html>
- [7] Productos y Tecnología - „LCD 16X2 Fondo Azul/Verde + I2C”  
<https://marboltec.com/producto/lcd-16x2-fondo-azul-alta-calidad/>
- [8] AVT Sklep - „Klawiatura membranowa - 4 klawisze 1x4 - numeryczna - samo-przylepna do Arduino”  
<https://sklep.avt.pl/pl/products/klawiatura-membranowa-4-klawisze-1x4-numeryczna-samoprzylepna-do-arduino-185330.html>

# Dodatki

## Pełny listing kodu źródłowego

```
1      #include <Arduino.h>
2
3      #include <Adafruit_MLX90614.h>
4
5      #include <LiquidCrystal_I2C.h>
6
7      #include <math.h>
8
9
10     // Define buttons
11
12     #define BTN1 2
13
14     #define BTN2 3
15
16     #define BTN3 4
17
18     #define BTN4 5
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65
66
67
68
69
70
71
72
73
74
75
76
77
78
79
80
81
82
83
84
85
86
87
88
89
90
91
92
93
94
95
96
97
98
99
100
101
102
103
104
105
106
107
108
109
110
111
112
113
114
115
116
117
118
119
120
121
122
123
124
125
126
127
128
129
130
131
132
133
134
135
136
137
138
139
140
141
142
143
144
145
146
147
148
149
150
151
152
153
154
155
156
157
158
159
160
161
162
163
164
165
166
167
168
169
170
171
172
173
174
175
176
177
178
179
180
181
182
183
184
185
186
187
188
189
190
191
192
193
194
195
196
197
198
199
200
201
202
203
204
205
206
207
208
209
210
211
212
213
214
215
216
217
218
219
220
221
222
223
224
225
226
227
228
229
230
231
232
233
234
235
236
237
238
239
240
241
242
243
244
245
246
247
248
249
250
251
252
253
254
255
256
257
258
259
260
261
262
263
264
265
266
267
268
269
270
271
272
273
274
275
276
277
278
279
280
281
282
283
284
285
286
287
288
289
290
291
292
293
294
295
296
297
298
299
300
301
302
303
304
305
306
307
308
309
310
311
312
313
314
315
316
317
318
319
320
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
333
334
335
336
337
338
339
340
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
356
357
358
359
360
361
362
363
364
365
366
367
368
369
370
371
372
373
374
375
376
377
378
379
380
381
382
383
384
385
386
387
388
389
390
391
392
393
394
395
396
397
398
399
400
401
402
403
404
405
406
407
408
409
410
411
412
413
414
415
416
417
418
419
420
421
422
423
424
425
426
427
428
429
430
431
432
433
434
435
436
437
438
439
440
441
442
443
444
445
446
447
448
449
450
451
452
453
454
455
456
457
458
459
460
461
462
463
464
465
466
467
468
469
470
471
472
473
474
475
476
477
478
479
480
481
482
483
484
485
486
487
488
489
490
491
492
493
494
495
496
497
498
499
500
501
502
503
504
505
506
507
508
509
510
511
512
513
514
515
516
517
518
519
520
521
522
523
524
525
526
527
528
529
530
531
532
533
534
535
536
537
538
539
540
541
542
543
544
545
546
547
548
549
550
551
552
553
554
555
556
557
558
559
560
561
562
563
564
565
566
567
568
569
570
571
572
573
574
575
576
577
578
579
580
581
582
583
584
585
586
587
588
589
590
591
592
593
594
595
596
597
598
599
600
601
602
603
604
605
606
607
608
609
610
611
612
613
614
615
616
617
618
619
620
621
622
623
624
625
626
627
628
629
630
631
632
633
634
635
636
637
638
639
640
641
642
643
644
645
646
647
648
649
650
651
652
653
654
655
656
657
658
659
660
661
662
663
664
665
666
667
668
669
670
671
672
673
674
675
676
677
678
679
680
681
682
683
684
685
686
687
688
689
690
691
692
693
694
695
696
697
698
699
700
701
702
703
704
705
706
707
708
709
710
711
712
713
714
715
716
717
718
719
720
721
722
723
724
725
726
727
728
729
730
731
732
733
734
735
736
737
738
739
740
741
742
743
744
745
746
747
748
749
750
751
752
753
754
755
756
757
758
759
760
761
762
763
764
765
766
767
768
769
770
771
772
773
774
775
776
777
778
779
780
781
782
783
784
785
786
787
788
789
790
791
792
793
794
795
796
797
798
799
800
801
802
803
804
805
806
807
808
809
810
811
812
813
814
815
816
817
818
819
820
821
822
823
824
825
826
827
828
829
830
831
832
833
834
835
836
837
838
839
840
841
842
843
844
845
846
847
848
849
850
851
852
853
854
855
856
857
858
859
860
861
862
863
864
865
866
867
868
869
870
871
872
873
874
875
876
877
878
879
880
881
882
883
884
885
886
887
888
889
890
891
892
893
894
895
896
897
898
899
900
901
902
903
904
905
906
907
908
909
910
911
912
913
914
915
916
917
918
919
920
921
922
923
924
925
926
927
928
929
930
931
932
933
934
935
936
937
938
939
940
941
942
943
944
945
946
947
948
949
950
951
952
953
954
955
956
957
958
959
960
961
962
963
964
965
966
967
968
969
970
971
972
973
974
975
976
977
978
979
980
981
982
983
984
985
986
987
988
989
990
991
992
993
994
995
996
997
998
999
```

```

18 // Initialize MLX90614 sensor
19 Adafruit_MLX90614 mlx = Adafruit_MLX90614();
20 float ems = 1.0;
21 // Default emissivity
22 int tempScale = 0; // 0 - Celsius, 1 - Fahrenheit, 2
    - Kelvin
23
24 float correctTemperature(float measuredTemp, float
    ambientTemp, float emissivity) {
25     float measuredTempK = measuredTemp + 273.15;
26     float ambientTempK = ambientTemp + 273.15;
27     float trueTempK = pow((pow(measuredTempK, 4) - (1
        - emissivity) * pow(ambientTempK, 4)) /
        emissivity, 0.25);
28     return trueTempK - 273.15;
29 }
30
31 void setup() {
32     delay(200);
33     pinMode(BTN1, INPUT_PULLUP);
34     pinMode(BTN2, INPUT_PULLUP);
35     pinMode(BTN3, INPUT_PULLUP);
36     pinMode(BTN4, INPUT_PULLUP);
37     Serial.begin(9600);
38     lcd.init();
39     lcd.clear();
40     lcd.backlight();
41     lcd.setCursor(0, 0);
42     lcd.createChar(0, epsilon);

```



```

43     if (isnan(ems)) {
44         ems = 1.0;
45     }
46     if (!mlx.begin()) {
47         lcd.setCursor(0, 1);
48         lcd.print("MLX error!");
49         Serial.print("MLX error!\n");
50         while (1);
51     }
52 }
53
54 void loop() {
55     int BTN1V = digitalRead(BTN1);
56     int BTN2V = digitalRead(BTN2);
57     int BTN3V = digitalRead(BTN3);
58     int BTN4V = digitalRead(BTN4);
59
60     if (!BTN1V && ems < 1.0) {
61         Serial.println("Increased emissivity");
62         ems += 0.01;
63         if (ems > 1.0) ems = 1.0;
64     }
65
66     if (!BTN2V && ems > 0.0) {
67         Serial.println("Decreased emissivity");
68         ems -= 0.01;
69         if (ems < 0.0) ems = 0.0;
70     }
71

```

```

72     if (!BTN3V) {
73         Serial.println("Emissivity reset");
74         ems = 1.0;
75     }
76
77     if (!BTN4V) {
78         tempScale = (tempScale + 1) % 3;
79         Serial.println(tempScale == 0 ? "Switched to
           Celsius" : (tempScale == 1 ? "Switched to
           Fahrenheit" : "Switched to Kelvin"));
80         delay(300);
81     }
82
83     float ObjTemp = mlx.readObjectTempC();
84     float AmbientTemp = mlx.readAmbientTempC();
85     float correctedTemp = correctTemperature(ObjTemp,
           AmbientTemp, ems);
86
87     if (isnan(correctedTemp)) {
88         Serial.println("Read error: Temperature NaN")
           ;
89         correctedTemp = 0.0;
90     }
91
92     float displayTemp = correctedTemp;
93     char scaleLabel = 'C';
94     bool showDegreeSymbol = true;
95
96     if (tempScale == 1) {

```

```

97         displayTemp = correctedTemp * 9.0 / 5.0 +
           32.0;
98         scaleLabel = 'F';
99     } else if (tempScale == 2) {
100         displayTemp = correctedTemp + 273.15;
101         scaleLabel = 'K';
102         showDegreeSymbol = false;
103     }
104
105     Serial.print("Temperature: ");
106     Serial.print(displayTemp);
107     Serial.print(" ");
108     Serial.print(scaleLabel);
109     Serial.print("\nEnvironment Temperature: ");
110     Serial.print(AmbientTemp);
111     Serial.print("\nEmissivity: ");
112     Serial.println(ems);
113
114     lcd.setCursor(0, 0);
115     lcd.print("Temp:");
116     lcd.print(displayTemp);
117     if (showDegreeSymbol) {
118         lcd.print((char)223);
119     }
120     lcd.print(scaleLabel);
121
122     lcd.setCursor(0, 1);
123     lcd.write(byte(0));
124     lcd.print(":");

```

```
125         lcd.print(ems);  
126         delay(500);
```

# Program ćwiczenia dla studentów