

Comparative analysis of microcontrollers from the Arduino family and other compatible ones

Analiza porównawcza mikrokontrolerów z rodziny Arduino oraz innych kompatybilnych

Przemysław Suszek*, Tomasz Szymczyk

Department of Computer Science, Lublin University of Technology, Nadbystrzycka 36B, 20-618 Lublin, Poland

Abstract

This work concerns the design, creation and testing of popular microcontrollers from the Arduino family, and other selected ones, compatible with the Arduino Software (IDE). The purpose of the tests was to conduct a comparative analysis of selected devices in terms of various aspects of their operation. The following features were thoroughly analyzed: the speed of calculations, heat generation by the device, quality of the received Wi-Fi signal (for those devices that have this module), and the general evaluation of the microcontroller, resulting from selected features of its specifications.

Keywords: microcontrollers; AVR; Arduino; ESP8266

Streszczenie

Niniejsza praca dotyczy zaprojektowania, stworzenia oraz przeprowadzenia testów popularnych mikrokontrolerów z rodziny Arduino, oraz innych wybranych, kompatybilnych ze zintegrowanym środowiskiem programistycznym Arduino Software. Zadaniem przeprowadzonych testów było przeprowadzenie analizy porównawczej wybranych urządzeń pod kątem zbadania różnych, wybranych aspektów ich działania. Dokładnie przeanalizowano takie cechy jak: szybkość wykonywania obliczeń, wydzielanie ciepła przez urządzenie, jakość odbieranego sygnału Wi-Fi (dla tych spośród badanych urządzeń, które ten moduł posiadają), oraz ogólną ocenę mikrokontrolera, wynikającą z wybranych cech jego specyfikacji.

Słowa kluczowe: mikrokontrolery; AVR; Arduino; ESP8266

*Corresponding author

Email address: przerek@wp.pl (P. Suszek)

©Published under Creative Common License (CC BY-SA v4.0)

1. Wstęp

Elektronika jako dziedzina rozwija się już od ponad kilkadziesiąt lat. Mimo tego, tylko nieliczne z technologii oraz wynalazków stanowią kamienie milowe do robku tej dziedziny. Wyparcie lamp elektronowych poprzez zastosowanie diod półprzewodnikowych oraz tranzystorów stało się początkiem wielkiego przeskoku technologicznego. Przeskok ten poskutkowało miniaturyzacją, oraz zwiększeniem możliwości układów elektronicznych, w konsekwencji doprowadzając do wprowadzenia układów scalonych, które początkowo były analogowe, potem natomiast przysłała pora na cyfrowe układy scalone [1, 2]. Z układów cyfrowych wyłoniły się w końcu mikrokontrolery, stanowiące obecnie podstawę zdecydowanej większości urządzeń spotykanych w codziennym życiu i pracy [3].

Arduino to płytka drukowana, mieszcząca się na dłoni, wyposażona w złącza typu goldpin. Sercem tej płytki jest właśnie mikrokontroler z rodziny AVR. Jednak Arduino to nie tylko płytka, lecz również odrębna dziedzina, jedynie bazująca na oryginalnych płytkach produkcji włoskiej, jak i niezliczonej ilości ich klonów. O bogactwie tej platformy świadczy między innymi rozległa oferta dedykowanych nakładek do Arduino, tzw. Arduino Shield, oraz prawidłowo opracowane środowisko programistyczne (Arduino IDE), pozwalają

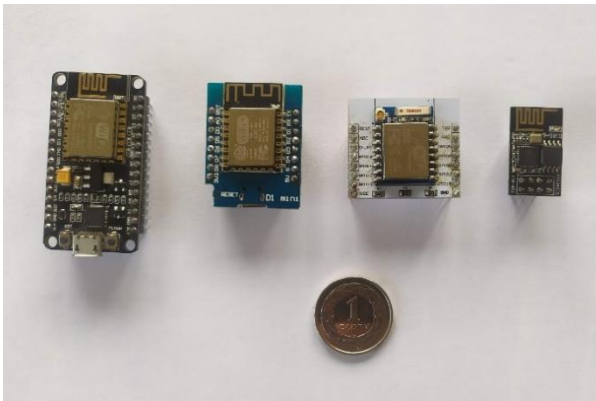
jące również po zaimportowaniu odpowiednich bibliotek, na programowanie płytek kompatybilnych z Arduino [4].

Szerokie rozpowszechnienie platformy Arduino w ostatnich latach doprowadziło w ostatnich latach do znacznego wzrostu zainteresowania programowanymi płytkami. Arduino, jak i jego liczne klony oraz inne mikrokontrolery pozwoliły wielu pasjonatom oraz entuzjastom takich dziedzin, jak informatyka, elektronika czy mechatronika na rozwinięcie swoich pasji oraz zainteresowań. W Internecie można znaleźć wiele kreatywnych projektów, które jako bazę wykorzystują właśnie mikrokontrolery, co jeszcze przydaje im popularności. Myślę, że uniwersalność oraz różnorodność zastosowań mikrokontrolerów sprawia, iż będą one jeszcze przez wiele lat uczyć i bawić kolejne pokolenia swoich entuzjastów [4, 5].

2. Badane urządzenia

Do przeprowadzenia badań zostały wytypowane wybrane rodzaje płytek z rodziny ESP8266, widoczne na poniższym rysunku (Rysunek 1).

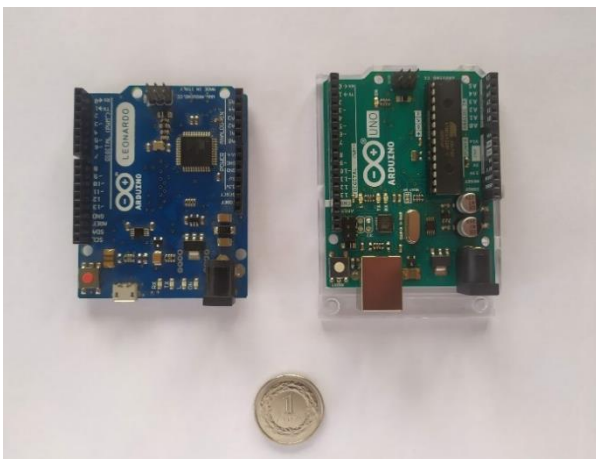
Każda z wymienionych płytek z rodziny ESP8266 wyposażona jest w mikrokontroler ATmega328.



Rysunek 1: Widok badanych mikrokontrolerów, od lewej: NodeMCU, Wemos D1 mini V2, ESP8266-01, ESP8266-07. Dla zobrazowania ich rzeczywistej wielkości – moneta 1 PLN

Na powyższym rysunku (Rys.1.) można dostrzec również, iż trzy z czterech płytek mają wbudowaną antenę w postaci nadrukowanej ścieżki PCB, natomiast jedna z nich posiada antenę ceramiczną. Dodatkowo, każde urządzenie jest znamionowo zasilane napięciem 5V [3, 6-8].

Do badań użyto również płytki z rodziny Arduino (Rysunek 2).



Rysunek 2: Widok badanych mikrokontrolerów, od lewej: Arduino Leonardo, Arduino UNO. Dla zobrazowania ich rzeczywistej wielkości - moneta 1PLN

Każda z przedstawionych płytek z rodziny Arduino posiada mikrokontroler z rodziny Atmega. W przypadku Arduino Leonardo jest to ATmega32u4, natomiast dla Arduino UNO jest to ATmega328. Każda z nich posiada wbudowany programator, dzięki czemu możliwe jest zaprogramowanie każdej z nich bez używania zewnętrznego programatora.

Dodatkowo warto zauważyć, iż obie płytki posiadają złącze zasilające 5V, dające możliwość połączenia z komputerem, w celu wgrania programu na mikrokontroler czy połączenia z monitorem portu szeregowego, dostępnym w Arduino IDE [3, 6-8].

3. Analiza porównawcza

3.1. Porównanie szybkości wykonywania obliczeń

Nie wszystkie z badanych tu urządzeń charakteryzują się jednakową szybkością działania. Wynika to pośred-

nio z częstotliwości taktowania. Zademonstrowano je w tabeli Tab.1

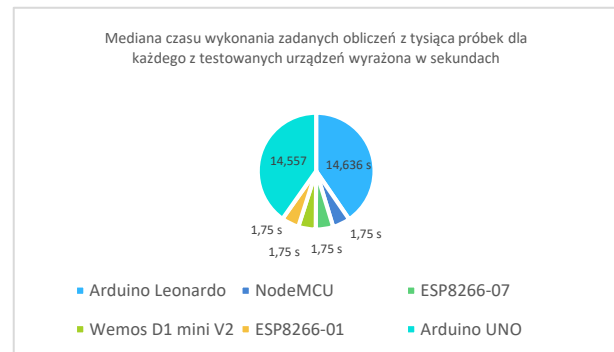
Tabela 1: Częstotliwości pracy poszczególnych procesorów zadeklarowane przez producenta urządzenia

	Ardu- no Leo- nardo	No- deMCU	ESP8266 -07	Wemos D1 mini V2	ESP8266 -01	Arduino UNO
Częstotli- wość pracy procesora [MHz]	16	16	80	80	80	80

Do badania szybkości wykonywania obliczeń przez dany mikrokontroler posłużył autorski, prosty program napisany w środowisku Arduino. Zadaniem tego programu jest wielokrotne wykonywanie miliona przebiegów pętli, która wykonuje operacje potęgowania, a następnie zmierzenie czasu, w jakim wykonane zostały opisane wyżej operacje.

Dla każdego z testowanych mikrokontrolerów wykonano po tysiąc wykonanych pętli, a co za tym idzie, zebrano po tysiącu wyników pomiarów czasu wykonania działań zawartych w wewnętrznej pętli programu, dla każdego testowanego urządzenia.

Pozyskane dane, będące wynikami badań Autora, zostały opracowane i przedstawione w formie wykresu kołowego (Rysunek 3) który prezentuje medianę czasu wykonywania obliczeń dla każdego z badanych urządzeń. Jako miarę zastosowano tu medianę, gdyż przeważająca większość otrzymanych wyników pomiaru dla danego urządzenia była jednakowa.



Rysunek 3: Mediana czasu wykonania danego zadania dla każdego

Dodatkowo, dane zaprezentowano również w tabeli (Tabela 2), w której zawarto dodatkowo informacje o wartości odchylenia standardowego jak i średniej arytmetycznej czasu wykonywania zadanych obliczeń przez dany mikrokontroler, na podstawie tysiąca prób przeprowadzonych na danym module.

Na podstawie Tabeli 2 można stwierdzić, iż najwolniejsze są mikrokontrolery Arduino Leonardo oraz Arduino UNO. Czasy te wynoszą kolejno 14,557 sekund oraz 14,636 sekund. Można zatem uznać, iż wzajemna klasa tych urządzeń pod względem szybkości wykonywania obliczeń jest bardzo zbliżona. Czas wykonywania danego podprogramu w przypadku Arduino Leonardo jest większy o zaledwie 0,54% w stosunku do czasu wykonywania tych samych działań na Arduino UNO.

Dodatkowo można zauważyć zależność między czasami osiągniętymi przez mikrokontrolery NodeMCU, ESP8266-07, Wemos D1 mini V2 oraz ESP8266-01. Mediana czasów osiąganych przez wyżej wymienione mikrokontrolery jest identyczna dla każdego z nich, i wynosi 1,75 sekundy.

Tabela 2: Wyniki pomiarów czasu wykonania obliczeń oraz wartości odchylenia standardowego, dla każdego badanego urządzenia

	Ardu- no Leo- nardo	No- deM- CU	ESP8266- 07	Wemos D1 mini V2	ESP8266- 01	Arduino UNO
Mediana czasu wykonania obliczeń [s]	14,63	1,75	1,75	1,75	1,75	14,56
Srednia czasu wykonania obliczeń [s]	14,6360 28	1,7501 23123	1,75012687 3	1,75012987	1,7501441 44	14,55686
Odchylenie standardowe z tysiąca pomiarów	0,00019	0,0001 561	0,00024475	0,0002987	0,0002601 37	0,000596 992

Można zatem uznać, że szybkość działania mikrokontrolerów z rodziny ESP8266, analizowana na podstawie czasu wykonywania wcześniej przedstawionych działań, jest o 88,04% lepsza w porównaniu z Arduino Leonardo, oraz o 87,98% lepsza w porównaniu z Arduino UNO.

Dodatkowo, na podstawie informacji zawartych w tabeli (Tabela 1), można zauważyć, iż odchylenie standardowe dla każdego zestawu badanych próbek jest znikome – w żadnym z badanych przypadków nie przekracza ono tysięcznej części jedności.

3.2. Badanie mocy odbieranego sygnału

RSSI (ang. *Received Signal Strength Indicator*) jest wskaźnikiem, który określa moc odbieranego sygnału radiowego. Wartości wskazywane przez ten parametr informują o tym, w jakim stopniu urządzenie odbiorcze „słyszy” urządzenie nadawcze. Znajomość tego parametru pozwala określić, czy sygnał radiowy jest wystarczający do ustanowienia połączenia bezprzewodowego. Zależność siły sygnału i (autorskiej) klasyfikacji jakości tego sygnału przedstawia poniższa tabela [9, 10] (Tabela 3).

Tabela 3: Klasyfikacja poziomu sygnału do jego użyteczności dla transmisji danych

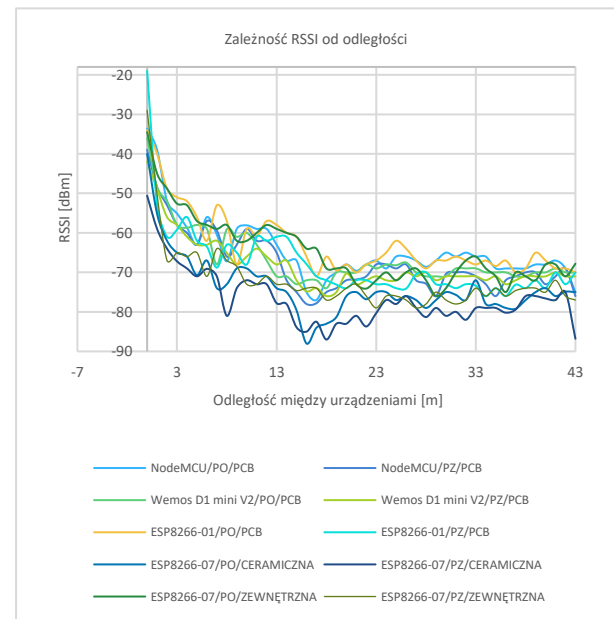
Sila sygnału [dBm]	Klasyfikacja
-30	Niesamowity
-67	Bardzo dobry
-70	Dobry
-80	Niedobry
-90	Nieużyteczny

Wartość siły odbieranego sygnału mierzalna jest w jednostce dBm. Jest to logarytmiczna jednostka mocy odniesiona do mocy 1mW [10].

Przeprowadzone badanie polegało na zmierzeniu parametru RSSI dla każdego z badanych mikrokontrolerów, które posiadają moduł Wi-Fi. Układ pomiarowy składał się z nadajnika sygnału radiowego w postaci telefonu typu smartphone, który miał uruchomioną funkcją hotspot, oraz odbiornika w postaci badanego mikrokontrolera. Pomiar przeprowadzono dla czterech

spośród badanych urządzeń. Warto nadmienić, iż przeprowadzone pomiary zostały wykonane w dwóch różnych warunkach otoczenia. Wykonano dwie serie pomiarów. Pierwsza z nich została przeprowadzona w przestrzeni całkowicie otwartej, gdzie pomiędzy źródłem sygnału a jego odbiornikiem nie było żadnych stałych przeszkód. Jest to pomiar referencyjny możliwości komunikacji tych urządzeń. Druga z serii pomiarowych przeprowadzona została natomiast w przestrzeni, gdzie przeszkodę pomiędzy urządzeniami transmitującymi sygnał radiowy stanowiła jednolita ściana wykonana z cegły o grubości 12 cm. Pomiary następowały w linii prostej między urządzeniami nadawczym i odbiorczym. Kolejne dane pomiarowe były pobierane z częstotliwością 10 odczytów pomiaru wartości parametru RSSI co jeden metr, na łącznej odległości czterdziestu trzech metrów. Pomiary te miały za zadanie pokazać właściwe możliwości użytkowe urządzeń.

Wyniki badanych parametrów zostały zaprezentowane na poniższym rysunku w formie graficznej, za pomocą wykresu (Rysunek 4). Na osi rzędnych wykresu zaznaczono wartości parametru RSSI wyrażone w dBm, natomiast na osi odciętych - odległość między urządzeniem odbiorczym oraz nadawczym.



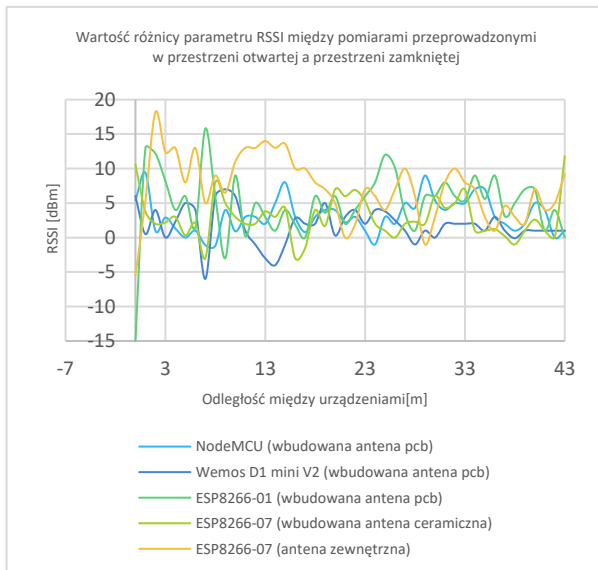
Rysunek 4: Zależność parametru RSSI od odległości między urządzeniami dla różnych konfiguracji płytek

Każde urządzenie oznaczono według schematu: nazwa urządzenia/przeszkoda/ typ anteny, gdzie nazwa urządzenia oznacza nazwę badanego mikrokontrolera, przeszkoda oznacza, czy badanie zostało przeprowadzone w przestrzeni otwartej (PO), czy w przestrzeni zamkniętej (PZ). Typ anteny oznacza typ anteny użytej do wykonania pomiaru: antena PCB nadrukowana na płytce, antena ceramiczna, czy antena zewnętrzna.

Dokonując analizy spadków mocy sygnału odbieranego dla konkretnych układów pomiarowych, można zauważyć zależność pomiędzy spadkiem mocy sygnału w dwóch różnych warunkach otoczenia, w których zostały przeprowadzone pomiary. W przypadku każde-

go z badanych urządzeń można zauważyć, iż siła sygnału odbieranego była większa w przypadku badań przeprowadzanych w przestrzeni otwartej, niżli tych, które zostały przeprowadzone w przestrzeni zamkniętej.

Na poniższym wykresie (Rysunek 5) zaprezentowano względną wartość wyrażoną w dBm [9], o jaką lepsze były sygnały badanych urządzeń w przypadku pomiarów przeprowadzanych w przestrzeni otwartej, niż tych, które zostały przeprowadzone w przestrzeni zamkniętej.



Rysunek 5: Różnica RSSI między pomiarami przeprowadzonymi w przestrzeni otwartej oraz przestrzeni zamkniętej

Utworzono również tabelę (Tabela 3) przedstawiającą zależność, pomiędzy średnią różnicą sygnału, którego wartość została zmierzona w przestrzeni otwartej, a tym, którego wartość zmierzona została w przestrzeni zamkniętej. Dodatkowo, w tabeli zawarto wiersz, którego poszczególne kolumny odpowiadają wartościom odchylenia standardowego dla wszystkich badanych próbek badanego urządzenia.

Dodatkowo, w tabeli przedstawiono również wartości współczynnika zmienności - parametru używanego w statystyce, który określa miarę zróżnicowania cechy. Pozwala on ocenić siłę zróżnicowania danej zbiorowości statystycznej, wykazując siłę zmiennej, a także ocenia średnią arytmetyczną. Duża wartość tego współczynnika ukazuje silne zróżnicowanie danej cechy [4].

Tabela 4: Porównanie zmian jakości sygnału w różnych warunkach dla różnych urządzeń

	No-deMCU	Wemos D1 mini V2	ESP8266-01	ESP8266-07 (antena wbudowana)	ESP8266-07 (antena zewnętrzna)
Średnia wartość wzrostu jakości sygnału [dBm]	3,17	1,75	4,93	2,93	7,23
Odchylenie standardowe	2,5	2,57	4,84	3,08	4,6
Współczynnik zmienności [%]	79	147	98	105	64

Na podstawie powyższej tabeli (Tabela 3) można stwierdzić, iż najlepszy przyrost jakości odbieranego sygnału Wi-Fi, będącego różnicą pomiędzy średnią różnicą sygnału, którego wartość została zmierzona w przestrzeni otwartej, a tym, którego wartość zmierzona została w przestrzeni zamkniętej, uzyskano w przypadku modułu ESP8266-07 oraz zastosowania anteny zewnętrznej do tego modułu. Wartość współczynnika zmienności dla wyżej wymienionego mikrokontrolera jest najmniejsza spośród prezentowanych wartości, i wynosi 64, co świadczy o najlepszym rozkładzie ba

danej cechy spośród badanych tu urządzeń. Dodatkowo warto wspomnieć, iż średnia wartość przyrostu jakości sygnału jest również najlepsza (największa) dla tego modułu. Podobnie sytuacja ma się również z odchyleniem standardowym.

Natomiast najmniej stabilnym przyrostem jakości sygnału charakteryzuje się natomiast NodeMCU, którego współczynnik zmienności wyniósł 79. Zauważono również, iż modułem, którego średnia wartość wzrostu jakości sygnału okazała się najmniejsza, było urządzenie Wemos D1 mini V2.

3.3. Pomiar temperatury

Każde urządzenie elektryczne wydziela ciepło. Dotyczy to także niewielkich, mikroprocesorowych płytek. Jest ono najczęściej niepożądanym efektem ubocznym w bardzo wielu przypadkach – zbyt duże nagromadzenie ciepła potrafi wpłynąć negatywnie na szybkość działania samego układu, lub w ekstremalnych sytuacjach trwale uszkodzić taki układ elektroniczny. Dlatego też zbadano to, jak mocno nagrzewają się poszczególne układy [1, 3, 6].

Badanie zostało przeprowadzone w celu poznania zmian temperatury zachodzących w okolicach badanych płytek. Z uwagi na fakt, iż badania były przeprowadzane przez wiele godzin w pomieszczeniu zamkniętym, to na temperaturę układu elektronicznego miała także wpływ temperatura otoczenia. W związku z tym, na wykresach przedstawionych w dalszej części pracy uwzględniono także zmiany temperatury otoczenia, wynikające z naturalnych zmian temperatury o różnych porach dnia. Znając temperaturę otoczenia (odniesienia), możliwe było określenie zmian temperatury zachodzących w bezpośrednim otoczeniu badanych urządzeń, gdyż zmiany te były określane względem temperatury odniesienia.

Do wykonania serii pomiarów temperatury każdego z badanych mikrokontrolerów wykorzystano czujniki temperatury DS18B20. Są to czujniki przede wszystkim dobrze skalibrowane, tanie, oraz cieszące się ogromną popularnością [8].

W celu zaobserwowania zmian temperatury zachodzących w bezpośrednich okolicach badanych mikrokontrolerów, w odniesieniu do temperatury otoczenia, został utworzony układ pomiarowy o wymiarach 105 mm x 70 mm x 30 mm Układ składa się z ze szczelnego pojemnika, do którego dołączone są czujniki temperatury. Czujniki są rozmieszczone w strategicznych miejscach pojemnika w następujących ilościach: pięć czuj-

ników wewnątrz komory pomiarowej przyrządu pomiarowego, oraz pięć czujników temperatury na zewnątrz przyrządu pomiarowego. Czujniki wewnątrz przyrządu pomiarowego odpowiadają za odczyt temperatury bezpośrednio w okolicy badanej płytki. Czujniki na zewnątrz przyrządu pomiarowego odpowiadają za odczyt temperatury otoczenia, po to, aby możliwe było między innymi zbadanie zależności zachodzących pomiędzy tymi dwiema wymienionymi temperaturami, a w konsekwencji wyznaczenie względnej temperatury generowanej przez mikrokontroler.

Program użyty do odczytu kolejnych pomiarów bazuje na programie służącym do pomiaru szybkości działania procesorów. Kluczową modyfikacją w stosunku do tamtego programu, jest zapis temperatury z czujników temperatury, który wykonywany jest po wykonaniu zawartości pętli obciążającej. Dodatkowo warto wspomnieć, iż pomiary temperatury dla każdego z badanych urządzeń były prowadzone przez okres sześciu godzin. Ze względu na skończoną dokładność czujników temperatury, wynoszącą $\pm 0.5 \text{ }^\circ\text{C}$, wprowadzono pojęcie wartości poprawnej. Jeżeli jako wartość prawdziwą mierzonej wartości wprowadzi się pojęcie wartości poprawnej, czyli tej wyznaczonej lub obliczonej w najdokładniejszy możliwy sposób, wówczas można założyć, iż wyznaczenie wartości średniej jest takim sposobem na uzyskanie wartości poprawnej [5].

Dla każdego z badanych mikrokontrolerów wyznaczono wartość poprawną temperatury panującej wewnątrz urządzenia pomiarowego (na podstawie pięciu czujników temperatury wewnątrz urządzenia pomiarowego), jak i wartość poprawną temperatury panującej na zewnątrz urządzenia pomiarowego (na podstawie pięciu czujników temperatury na zewnątrz urządzenia pomiarowego). Wyznaczono również wartości odchylenia standardowego dla wartości poprawnej temperatury wewnętrznej, jak również zewnętrznej (temperatura odniesienia).

Wyznaczono wreszcie względną temperaturę generowaną przez badany mikrokontroler, za którą przyjęto różnicę między wartością poprawną temperatury wewnętrznej, a wartością prawdziwą temperatury zewnętrznej (Wzór 1).

$$T_w = T_1 - T_0 \quad (1)$$

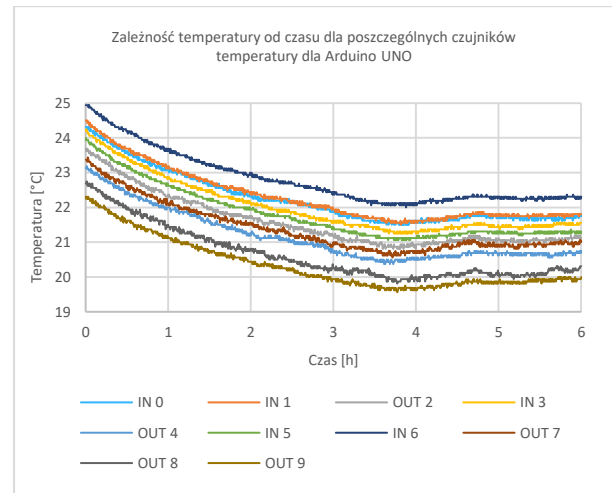
gdzie:

T_w - temperatura względna

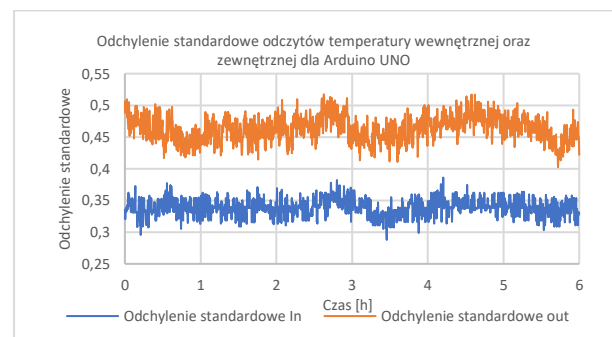
T_1 - temperatura poprawna zmierzona w pobliżu urządzenia

T_0 - temperatura poprawna otoczenia

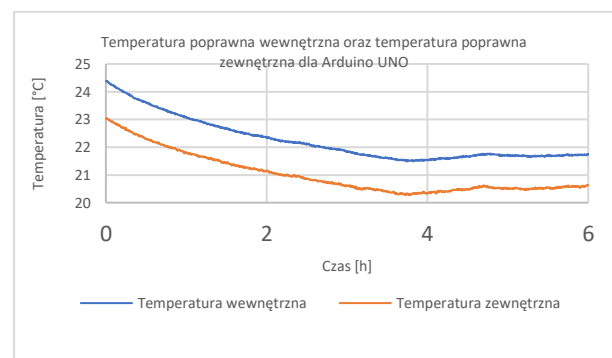
Przykładowe wyniki pomiarów, dla mikrokontrolera Arduino UNO, zostały przedstawione na poniższych rysunkach (Rysunki 6-9).



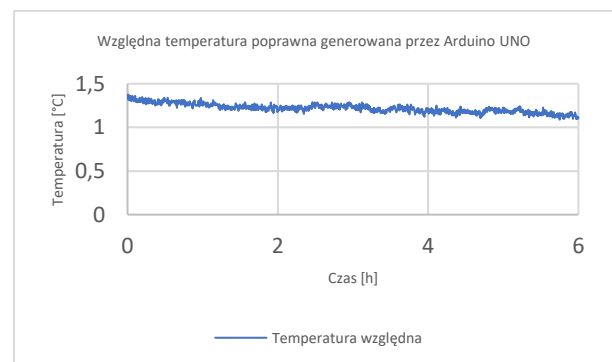
Rysunek 6: Temperatura zmierzona w okolicach badanego mikrokontrolera



Rysunek 7: Wartości odchylenia standardowego dla badanych temperatur

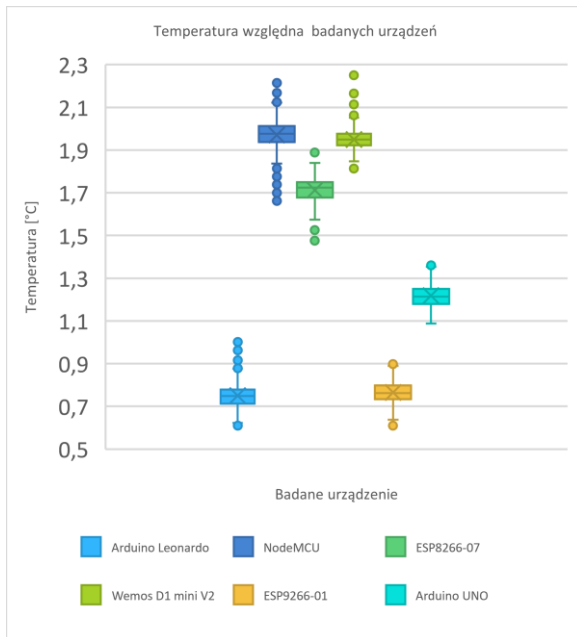


Rysunek 8: Zależność pomiędzy temperaturą wewnętrzną a zewnętrzną badanego mikrokontrolera



Rysunek 9: Względna temperatura generowana przez dany mikrokontroler

Na kolejnym rysunku (Rysunek 10) również zbiorcze zestawienie temperatury względnej, generowanych przez każde z testowanych urządzeń.



Rysunek 10: Porównanie zbiorcze temperatury generowanej przez badane urządzenia

Na powyższym rysunku można zauważyć trzy zasadnicze grupy generowanych temperatur. Grupę, która generowała największą temperaturę tworzą urządzenia NodeMCU, ESP8266-07, oraz Wemos D1 mini V2. Generowały one średnio kolejne temperatury: 1.97 °C, 1.71 °C, 1.95 °C. Kolejny, jednoelementowy podzbiór stanowi Arduino UNO, które generowało subiektywnie średnią temperaturę, której średnia wyniosła 1.22 °C. Zbiór, który stanowią urządzenia, które zostały zaliczone do urządzeń o najmniejszej wydzielonej temperaturze, stanowią urządzenia Arduino Leonardo oraz ESP8266-01. Wydzielają one kolejno średnie temperatury o wartości 0.75 °C oraz 0.76 °C.

Na podstawie otrzymanych wyników można zauważyć, iż żadna z temperatur generowanych przez badane urządzenia nie jest znaczna, gdyż największa z nich nie przekracza 2 °C. Bazując na dokumentacji [11-15] dołączonej do każdego z badanych mikrokontrolerów, która wskazuje górny zakres temperatury na 85 °C dla płytek z rodziny Arduino, oraz 125 °C dla płytek z rodziny ESP8266, oraz na otrzymanych wynikach zmian temperatury, można wysnuć wniosek, iż po stosunkowo długim czasie użytkowania badanych mikrokontrolerów, temperatura ich pracy nie zbliżyła się w znacznym stopniu do maksymalnej temperatury pracy podanej w dokumentacji. Dzięki temu, badane mikrokontrolery mogą być z łatwością i bez żadnych obaw stosowane w miejscach, gdzie temperatura odgrywa kluczową rolę, bez obaw, iż ich zastosowanie w znacznym stopniu podniesie temperaturę sąsiadujących z nimi elementów. Dodatkowo, można przypuszczać, iż urządzenia takie, z uwagi na niewielkie generowanie ciepła, mogą działać

nieprzerwanie w szczelnie zamkniętej obudowie przez długi czas.

3.4. Analiza badanych urządzeń pod względem budowy, funkcji i potencjalnych zastosowań

Wszystkie informacje na temat parametrów mikrokontrolerów w tym podrozdziale, zostały zaczerpnięte z dokumentacji danych mikrokontrolerów oraz z zasobów Internetu [11-15]. Na podstawie określonych wartości danych parametrów, każdemu z badanych mikrokontrolerowi została przyznana pewna liczba punktów, w zakresie od zera do stu. Liczba punktów informuje o tym, jak dobrze radzi sobie dany mikrokontroler w badanym zakresie możliwości – im większa liczba punktów, tym lepszymi cechami odznacza się mikrokontroler. Warto nadmienić, iż w przypadku wartości liczbowych, gdzie ich wzrost jest proporcjonalny do poprawy parametrów urządzenia, punkty zostały przyznane w taki sposób, aby 100% możliwych do uzyskania punktów stanowiło najlepsze wskazanie wartości danego mikrokontrolera analizowanego w danej dziedzinie, przy czym kolejne (gorsze) badane urządzenia w danej dziedzinie otrzymują punkty względem przytoczonych stu punktów, które dostał najlepszy z nich (wzór 2).

$$\text{liczba punktów} = \frac{f(i)}{\max(i=1 \dots n)} * 100 \quad (2)$$

gdzie:

i – kolejne urządzenie

$f(i)$ – wartość liczbową cechy danego urządzenia

$\max(i=1 \dots n)$ – największa wartość liczbową spośród wszystkich urządzeń dla danej cechy

Dodatkowo, do każdej badanej cechy przypisana została waga, która została dobrana przez Autora tak, aby jak najlepiej odzwierciedla to, jak istotna jest badana cecha w ujęciu całościowym.

- *Rozmiar mikrokontrolera*

Rozmiary badanych mikrokontrolerów (wartości zostały przybliżone do pełnych milimetrów) zostały przedstawione w poniższej tabeli (Tabela 4). Wszystkie wymiary zostały zapisane w milimetrach. Warto nadmienić, iż ostatni wiersz tabeli zawiera dodatkową informację, w postaci sumy długości wszystkich boków danego mikrokontrolera, będącej jednocześnie obiektywnym wyznacznikiem służącym do porównania względnego rozmiaru badanych mikrokontrolerów.

Tabela 5: Rozmiary mikrokontrolerów

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Wymiary [mm]	65x53x10	65x53x10	14x25x3	16x21x3	35x25x12	47x25x12
Suma długości wymiarów [mm]	128	128	42	40	72	84
Punkty	31,25	31,25	98,44	100	75	65,63

- *Liczba wyprowadzonych pinów GPIO*

Liczba wyprowadzeń pinów GPIO (ang. *general-purpose input/output*) w każdym z badanych mikrokontrolerów test różna. Im większą liczbą pinów GPIO dysponuje mikrokontroler, tym większa jest liczba potencjalnych jego zastosowań dla układów wymagających wielu wyjść mikrokontrolera [3, 6]. Dokładną liczbę przedstawia poniższa tabela (Tabela 5).

Tabela 6: Liczba wyprowadzonych pinów GPIO

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Liczba wyprowadzonych pinów GPIO	20	20	2	11	11	13
Punkty	100	100	10	55	55	65

- *Częstotliwość taktowania mikroprocesora*

Częstotliwość taktowania każdego z badanych urządzeń, wraz z liczbą przyznanych punktów przedstawia poniższa tabela (Tabela 6). Różnica między najmniejszą a największą wartością nie jest stosunkowo duża, gdyż wynosi 64 MHz.

Tabela 7: Częstotliwość taktowania mikroprocesora

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Częstotliwość taktowania mikrokontrolera [MHz]	16	16	80	80	80	80
Punkty	20	20	100	100	100	100

- *Pamięć flash*

Przeanalizowano również rozmiar pamięci flash, której rozmiar dla poszczególnych mikrokontrolerów, wraz z liczbą przyznanych im z tego względu punktów przedstawia poniższa tabela (Tabela 7)

Tabela 8: Rozmiar pamięci flash

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Pamięć flash [kB]	32	32	128	128	4096	4096
Punkty	0,78	0,78	3,13	3,13	100	100

- *Pamięć RAM*

Rozmiar pamięci o swobodnym dostępie dla każdego z badanych mikrokontrolerów, wraz z przyznanymi im punktami, zaprezentowano na poniższej tabeli (Tabela 8).

Tabela 9: Rozmiar pamięci RAM

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Pamięć RAM [kB]	2,5	2	36	36	64	64
Punkty	3,91	3,13	56,25	56,25	100	100

- *Komunikacja bezprzewodowa Wi-Fi*

Istotną cechą wpływającą na znaczne zwiększenie liczby zastosowań danego mikrokontrolera, jest obecność modułu Wi-Fi. Obecność (lub jej brak), dla każdego z badanych urządzeń przedstawiono na poniższej tabeli (Tabela 9). Przedstawiono również liczbę przyznanych punktów.

Tabela 10: Obecność modułu Wi-Fi

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Obecność modułu Wi-Fi	Nie	Nie	Tak	Tak	Tak	Tak
Punkty	0	0	100	100	100	100

- *Wbudowany programator oraz micro USB*

Istotną cechą przy wyborze mikrokontrolera jest prostota jego użytkowania. Aby zaprogramować taki mikrokontroler, należy użyć dedykowanego programatora. Na szczęście niektóre z mikrokontrolerów mają już taki programator wbudowany. Obecność (lub jej brak), dla każdego z testowanych urządzeń przedstawiono na poniższej tabeli (Tabela 10). Przedstawiono również liczbę przyznanych punktów.

Tabela 11: Obecność złącza micro USB oraz wbudowanego programatora

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU
Obecność wbudowanego programatora oraz złącza micro usb	Tak	Tak	Nie	Nie	Tak	Tak
Punkty	100	100	0	0	100	100

Jak zostało opisane w podrozdziale 4.4.1, każdemu badanemu mikrokontrolerowi przyznano pewną liczbę punktów, które odzwierciedlają sprawność mikrokontrolera w danej dziedzinie. W tym rozdziale przedstawiono zbiorcze porównanie badanych mikrokontrolerów, wraz z sumą punktów, jakie uzyskał badany mikrokontroler. Warto nadmienić, iż dla każdej z badanych kategorii została przypisana odpowiednia waga, z zakresu 1-5, odzwierciedlająca „ważność” badanej cechy na tle wszystkich badanych cech w tym rozdziale, dla danego urządzenia. Wyniki analizy w postaci punktów cząstkowych, jak i ostatecznej sumy punktów, jaką zdobył w rankingu dany mikrokontroler, wynikają z sumy iloczynów punktów cząstkowych i wagi, dla konkretnego mikrokontrolera przedstawia poniższa tabela (Tabela 10).

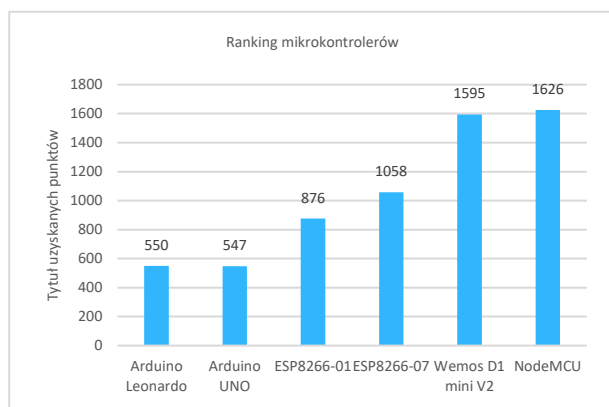
Na podstawie rysunku 11, prezentującego zależność użyteczności badanych mikrokontrolerów pod względem badanych w tym rozdziale cech, można zauważyć trzy wyróżniające się grupy, które odpowiadają sumarycznej ocenie badanych cech przedstawionych w tym podrozdziale. W pierwszej (najlepszej) grupie, na pierwszym miejscu, z najwyższą liczbą punktów znalazł się mikrokontroler NodeMCU, który zebrał blisko 1625 punktów. Bardzo bliski wynik, dający mu drugie miej-

sce, uzyskała płytka Wemos D1 mini V2, której liczba punktów to 1595.

Tabela 12: Analiza sumy punktów uzyskanych przez dany mikrokontroler

	Arduino Leonardo	Arduino UNO	ESP8266-01	ESP8266-07	Wemos D1 mini V2	NodeMCU	Waga
Suma długości wymiarów	31,25	31,25	98,44	100	75	65,63	1
Liczba wyprowadzonych pinów GPIO	100	100	10	55	55	65	4
Częstotliwość taktowania mikrokontrolera	20	20	100	100	100	100	5
Pamięć flash	0,78	0,78	3,13	3,13	100	100	4
Pamięć RAM	3,91	3,125	56,25	56,25	100	100	4
Suma uzyskanych punktów	550,1	547,88	876	1057,52	1595	1625,63	

Informacje o ostatecznej sumie punktów, które zdobyły poszczególne mikrokontrolery, przedstawiono również w formie graficznej, na poniższym wykresie.



Rysunek 11: Graficzne porównanie mikrokontrolerów

W kolejnej wyróżniającej się grupie można zaobserwować dwa wyróżniające się mikrokontrolery. Są to ESP8266-01 oraz ESP8266-07. Uzyskały one kolejno 876 oraz 1058 punktów.

Ostatnią, najslabiej ocenianą grupą stanowią pozostałe dwa mikrokontrolery- Arduino Leonardo oraz Arduino UNO. Zebrały one kolejno 550 oraz 547 punktów.

4. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza porównawcza pozwoliła na wzajemne porównanie badanych mikrokontrolerów pod wieloma względami, takimi jak temperatura generowana przez dany mikrokontroler, czas, w jakim wykonują się zadane obliczenia, wartości parametru RSSI w zależności od wzajemnej odległości urządzenia nadawczego oraz urządzenia odbiorczego, czy wreszcie pod względami ogólnymi badanych mikrokontrolerów, również parametrów hardware'u.

Można stwierdzić, iż testowane mikrokontrolery nie wykazywały żadnych niestabilności w swoim działaniu, nawet podczas stosunkowo długim czasie działania, przy badaniu temperatur generowanych przez mikrokontrolery, którego czas trwania oscylował w okolicach sześciu godzin.

Literatura

- [1] T. Francuz, AVR: praktyczne projekty, Helion, 2013.
- [2] B. Danowski-Żdziebło, Wi-Fi: domowe sieci bezprzewodowe, Helion, 2010.
- [3] W. Golde, Układy elektroniczne. T.1. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1970.
- [4] P. Horowitz, H. Winfield, Sztuka elektroniki, cz.1 i 2, WKŁ, 1995.
- [5] G. Holden, Sieci domowe i bezprzewodowe, NAKOM, 2010.
- [6] J. Bielecki, Od C do C++: programowanie obiektowe w języku C, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, 1990.
- [7] D. Mendrala, M. Szeliga, Praktyczny kurs SQL, Wydanie III Helion, 2015.
- [8] J. Doliński, Mikrokontrolery AVR w praktyce, BTC, 2003.
- [9] R. Baranowski, Mikrokontrolery AVR AT-mega w praktyce, BTC, 2005.
- [10] T. Francuz, AVR: układy peryferyjne, Helion, 2014.
- [11] Dokumentacja mikrokontrolera Wemos D1 mini V2, https://docs.wemos.cc/en/latest/d1/d1_mini.html, [04.2020].
- [12] Dokumentacja mikrokontrolera ESP8266-01, <http://www.microchip.ua/wireless/esp01.pdf>, [03.2020].
- [13] Dokumentacja mikrokontrolera ESP8266-07, https://www.mikrocontroller.net/attachment/338570/Ai-thinker_ESP-07_WIFI_Module-EN.pdf, [02.2020].
- [14] Dokumentacja mikrokontrolera Arduino Leonardo, <https://store.arduino.cc/arduino-leonardo-with-headers>, [03.2020].
- [15] Dokumentacja mikrokontrolera Arduino UNO, https://botland.com.pl/pl/arduino-moduly-glowne/1060-arduino-uno-rev3-a000066-8058333490090.html?fbclid=IwAR1IL1vK-1QqX9wde4o-ER4dOfbqbIoccgkKMTicCS8XaCAh-CXXcnotdBo&gclid=Cj0KCCQjw3Nv3BRC8ARIsAPh8hgJ1nwUhQmXotmqvJ53--dXPB8ceqn5ygNmOzgnGO6ZPYM4x64BStjcaAqV-EALw_wcB%20, [04.2020].