

POLITECHNIKA WROCŁAWSKA  
WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

---

KIERUNEK: Automatyka i Robotyka (AIR)  
SPECJALNOŚĆ: Robotyka (ARR)

**PRACA DYPLOMOWA  
INŻYNIERSKA**

Wyznaczanie kierunku przylotu sygnału  
akustycznego z zastosowaniem systemu  
mikrofonów

Determination of the direction of acoustic signal  
arrival using a microphone system

**AUTOR:**  
Paweł Rachwalski

**PROWADZĄCY PRACĘ:**  
dr inż. Bogdan Kreczmer. PWr, I-6

**OCENA PRACY:**



*Pracę tę dedykuję rodzicom, w po-  
dziękowaniu za wsparcie i wiarę w  
moje możliwości*



# Spis treści

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>1</b> | <b>Wstęp</b>  | <b>3</b>  |
| <b>2</b> | <b>Analiza problemu</b>   | <b>5</b>  |
| 2.1      | TDOA . . . . .  | 5         |
| 2.2      | Beamforming — opóźnienie i sumowanie . . . . .                            | 6         |
| <b>3</b> | <b>Specyfikacja projektu</b>  | <b>9</b>  |
| 3.1      | Matryca mikrofonów . . . . .  | 9         |
| 3.2      | Generator obwiedni . . . . .  | 10        |
| 3.3      | Mikrokontroler . . . . .  | 11        |
| <b>4</b> | <b>Projekt i realizacja modułu kierunku przylotu sygnału akustycznego</b> | <b>13</b> |
| 4.1      | Założenia działania modułu . . . . .                                      | 13        |
| 4.2      | Schemat oraz płytki PCB . . . . .   | 14        |
| 4.2.1    | Sekcja zasilania . . . . .  | 14        |
| 4.2.2    | Sekcja mikrofonów . . . . .   | 14        |
| 4.2.3    | Sekcja detektora obwiedni . . . . .                                       | 14        |
| 4.2.4    | Sekcja mikrokontrolera . . . . .  | 15        |
| <b>5</b> | <b>Testy i eksperymenty</b>   | <b>17</b> |
| 5.1      | Testy mikrofonów i detektorów obwiedni . . . . .                          | 17        |
| 5.2      | Testy działania programu . . . . .  | 18        |
|          | <b>Bibliografia</b>   | <b>18</b> |



# Rozdział 1

## Wstęp

Wstępwstepepepepepepepepepepepepepepe





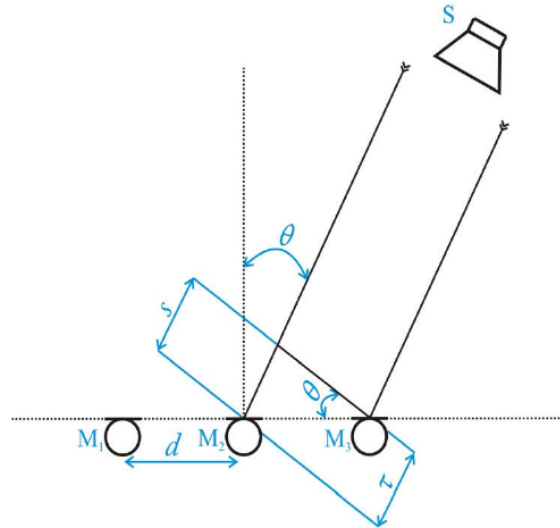
# Rozdział 2

## Analiza problemu

Źródłem dźwięku jest ciało wytrwarzające mechaniczną falę poprzeczną, fala ta może rozchodzić się tylko w ośrodkach sprężystych takich jak ciała stałe, ciecze i gazy. Mikrofon tak samo jak ludzkie ucho jest wrażliwy na ciśnienie akustyczne, czyli zmienne w czasie odchylenie wartości ciśnienia statycznego panującego w ośrodku wywołane rozchodzeniem w nim fali akustycznej". Źródła dźwięku można lokalizować i analizować za pomocą układów mikrofonowych oraz różnych metod. Poprawne rozwiązanie problemu zlokalizowania dźwięku polega na dobraniu odpowiedniego algorytmu lokalizacji oraz na poprawnym skonstruowaniu matrycy mikrofonów.

### 2.1 TDOA

Metoda Time Delay of Arrival(TDOA) jest często wykorzystywana w systemach lokalizacji źródła dźwięku ze względu na prostotę jej implementacji. Polega na zbieraniu próbek dźwięku i ich analizie, która odbywa się głównie w dwóch etapach. Pierwszym etapem jest identyfikacja opóźnienia czasowego próbek na różnych mikrofonach, opóźnienie to oznacza się symbolem  $\tau$ . Kolejny etap to obliczenie położenia źródła dźwięku na podstawie geometrii matrycy mikrofonów.



Rysunek 2.1 Liniowa matryca mikrofonów

Posiadając dane takie jak opóźnienie sygnału oraz odległość między mikrofonami, można wyznaczyć kąt  $\theta$  za pomocą wzoru,

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\tau * V_a}{d}\right) \quad (2.1)$$

gdzie  $\tau$  to opóźnienie sygnału,  $V_a$  to prędkość sygnału w danym ośrodku,  $d$  to odległość między mikrofonami.

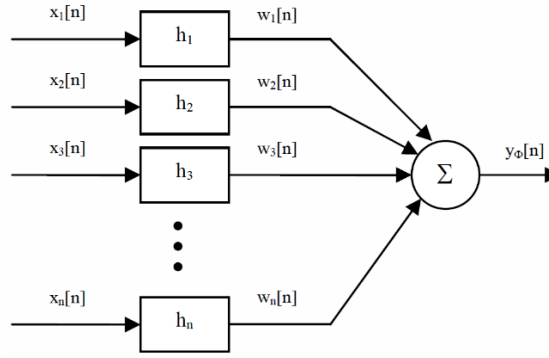
## 2.2 Beamforming — opóźnienie i sumowanie

Metoda *beamforming* pierwotnie została stworzona na potrzeby kształtowania wiązki sygnału emitowanej przez nadajniki. Zauważono że może być ona wykorzystywana w przypadku odbiorników do przetwarzania danych pozyskanych z matrycy czujników w celu wyznaczenia obrazu kierunkowego natężenia sygnału. Technika ta jest stosowana zarówno do ciągłego jak i dyskretnego rozkładu sygnału. Pozwala ona na budowę różnego typu matryc, w zależności od dostępnego sprzętu, pożądanej rozdzielczości przestrzennej oraz wrażliwości na wybrany kierunek. W porównaniu do metody TDOA *beamforming* wymaga wiele większej wydajności obliczeniowej. Konieczne też jest odpowiednie umieszczenie mikrofonów na matrycy, by uniknąć aliasingu przestrzennego.

Tego niekorzystnego zjawiska można uniknąć jeśli różnica faz między dwoma próbkowanymi sygnałami będzie mieściła się w przedziale wartości  $(-\pi, \pi)$ , warunek ten jest spełniony gdy odległość między czujnikami odpowiada nierówności:

$$d < \left(\frac{s}{f_{max}}\right) \quad (2.2)$$

Najprostsze podejście związane z formowaniem wiązki sygnału opiera się na algorytmie DAS (Delay and Sum). W podejściu tym sygnały otrzymane z każdego z mikrofonów jest podawany na wejście osobnego bloku, który wprowadza odpowiednie opóźnienie. Otrzymane w ten sposób sygnały z wyjść wspomnianych bloków są sumowane. Układ taki określany jest mianem *beamformer* (patrz rys. 2.2).



Rysunek 2.2 Schemat blokowy reprezentujący metodę DAS

Kierunek wyjścia wiązki  $y_{\Phi}[k]$  jest określony w dziedzinie czasu przez zestaw wag  $h_i$ :

$$y_{\Phi}[k] = \sum_{i=1}^n x_i[k - h_i(\phi)] \quad (2.3)$$

Gdzie  $x_i[n]$  jest sygnałem odebrany przez mikrofon a  $h_i(\Phi)$  jest opóźnieniem dla charakterystyki kierunkowej kąta. Wartość RMS dla charakterystyk kierunkowych kąta oblicza się ze wzoru:

$$V_{RMS}[\phi] = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_{\Phi}[i]^2} \quad (2.4)$$

Maksymalna wartość wyjścia RMS beamformera determinuje kąt pod którym znajdują się źródło dźwięku:

$$\alpha = \operatorname{argmax}(V_{RMS}[\phi]) \quad (2.5)$$

Upraszczając przebieg algorytmu wygląda w sposób następujący:

- Rejestracja sygnału.
- Sumowanie opóźnień odpowiadających zmianie położenia względem położenia referencyjnego.
- Sumowanie przebiegu dla każdego sygnału.
- Utworzenie funkcji korelacji oraz znalezienie jej maksimum które odpowiada szukanemu przez nas kątowi.



# Rozdział 3

## Specyfikacja projektu

System składa się z trzech bloków:

- Blok matrycy czterech mikrofonów.
- Blok odpowiedzialny za wygenerowanie i filtrację obwiedni sygnału.
- Blok mikrokontrolera.

### 3.1 Matryca mikrofonów

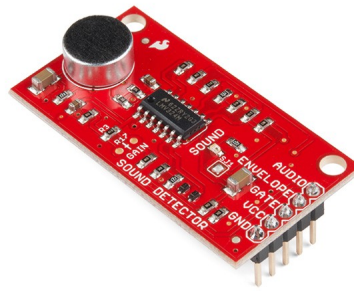
Projekt nie przewidywał budowy matrycy mikrofonów wraz z konstrukcją toru wzmocnienia, dlatego zdecydowano się na zakup gotowego rozwiązania. Na rynku dostępny jest duży wybór czujników mikrofonowych wraz z dedykowanymi układami wzmacniaczy, dwa z nich zdawały się być najbardziej odpowiednie.

Pierwszym z nich jest detektor dźwięku SEN-14262 produkowany przez firmę SparkFun[Rysunek 3.1], posiada on mikrofon elektretowy o zakresie częstotliwości od 100Hz do 10000Hz. Za wzmocnienie sygnału mikrofonowego odpowiada układ LMV324 z możliwością zmiany wzmocnienia od 20dB do 60 dB, podstawowo wartość ta jest usatwiona na 40 dB. Cały moduł posiada aż trzy niezależne wyjścia:

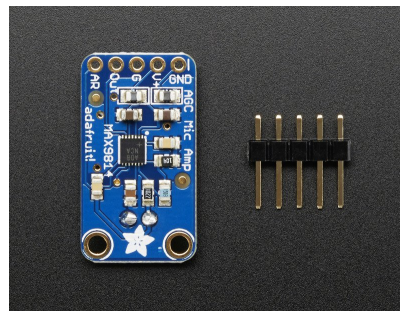
- Audio - analogowy sygnał audio.
- Envelope - analogowy sygnał umożliwiający pomiar amplitudy sygnału
- Gate - sygnał cyfrowy pozwalający na detekcję przekroczenia ustalonego poziomu amplitudy.

Drugie rozwiązanie to moduł czujnika dźwięku ze wzmacniaczem MAX9814 produkowany przez firmę Adafruit[Rysunek 3.2], w jego skład wchodzi mikrofon elektretowy umożliwiający pomiary w zakresie 20Hz-20000Hz. Tor wzmocnienia czujnika jest oparty o układ MAX9814, który oferuje takie możliwości jak:

- AGC(Auto Gain Control) czyli automatycznie zmienne wzmocnienie zależne od poziomu natężenia sygnału wejściowego.
- Zmienne maksymalne wzmocnienie sygnału 40dB-50dB-60dB.
- Ustawienie współczynnika Attack/Release
- sygnał wyjściowy na poziomie 2Vpp



Rysunek 3.1 SparkFun SEN-14262

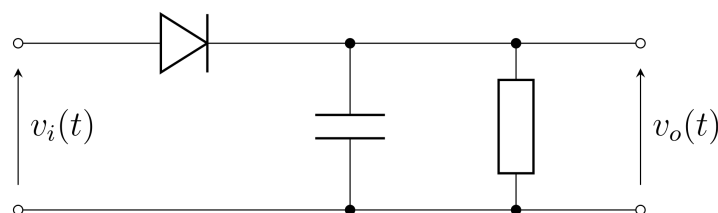


Rysunek 3.2 Adafruit MAX9814

Ostatecznie wybrano rozwiązanie zaproponowane przez firmę Adafruit, ze względu na automatyczną kontrolę wzmocnienia, możliwość regulowania współczynnika Attack/Release oraz o wiele korzystniejszą wartość współczynnika zawartości harmonicznych THD który w układzie MAX9814 dla częstotliwości 1kHz plasuje się na poziomie poniżej 0,1%, dodatkowo MAX9814 posiada o wiele niższą gęstość szumów.

## 3.2 Generator obwiedni

Czujnik firmy Adafruit nie posiada wyjścia umożliwiającego pomiar amplitudy dlatego konieczne jest skonstruowanie zewnętrznego układu odpowiadającego za generowanie obwiedni, rozwiązanie to podyktowane jest chęcią pominięcia złożonych obliczeń na mikrokontrolerze związanych z transformatą Hilberta. Zastosowano prosty detektor obwiedni.



Rysunek 3.3 Schemat detektora obwiedni

Dioda umożliwia przepływ prądu tylko jeśli zacisk wejściowy ma potencjał wyższy niż zacisk wyjściowy, kondensator gromadzi ładunek na zboczu narastającym następnie powoli uwalnia go przez rezystor gdy wzgórze opada co w efekcie pozwala uzyskać filtr górnoprzepustowy. Do zbudowania układu użyto diody 1N914 ze względu na jej dużą szybkość przełączania, wysoką przewodność oraz niezawodność.

### 3.3 Mikrokontroler

Kolejnym krokiem przetwarzania sygnału uzyskanego z matrycy mikrofonów jest jego spróbkowanie oraz konwersja do postaci cyfrowej, aby niepotrzebnie nie zwiększać ilości części w układzie elektronicznym zdecydowano się na zastosowanie przetwornika ADC który będzie jednym z peryferiów mikrokontrolera. Przy projektowaniu systemu brano pod uwagę głównie mikrokontrolery firmy STM32 ze względu na:

- Generator szkieletu projektu CubeMX który przyspiesza pracę związane z konfiguracją.
- Wiele darmowych narzędzi oraz przejrzyste IDE SW4.
- Biblioteki HAL ułatwiającą pracę z peryferiami.
- Prostotę debuggowania przy pomocy STM studio.

Poszukiwania zawężono do mikrokontrolerów z rodziny F4, ponieważ są one oparte na rdzeniu CortexM4 pozwalającym na szybką pracę z jednostkami zmiennoprzecinkowymi oraz szybkie obliczenia dzięki wysokiemu taktowaniu rdzenia. Finalnie wybór padł na jednostkę STM32F446RET6, jej zalety szczególnie przydatne przy danym projekcie to:

- Częstotliwość taktowania do 180Mhz.
- Trzy przetworniki ADC o rozdzielczości 12 bitów.
- 16 strumieniowy kontroler DMA.
- 6 interfejsów UART, które pozwolą na jednoczesne monitorowanie każdego z mikrofonów przy przeprowadzaniu testów.
- 128kB pamięci RAM.



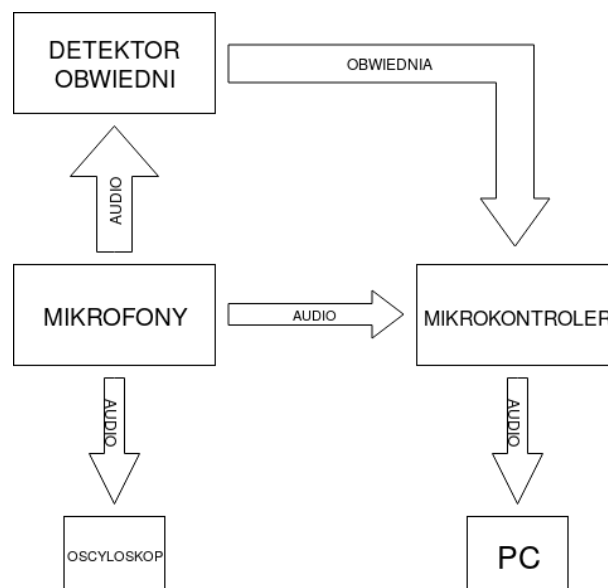


## Rozdział 4

# Projekt i realizacja modułu kierunku przylotu sygnału akustycznego

### 4.1 Założenia działania modułu

Moduł został zaprojektowany tak by mógł składać się z trzech oddzielnych członów opisanych we wcześniejszym rozdziale. Zasade ich wspólnego działania opisuje schemat blokowy (patrz rys. 4.1).



Rysunek 4.1 Schemat blokowy modułu

{fig-schem

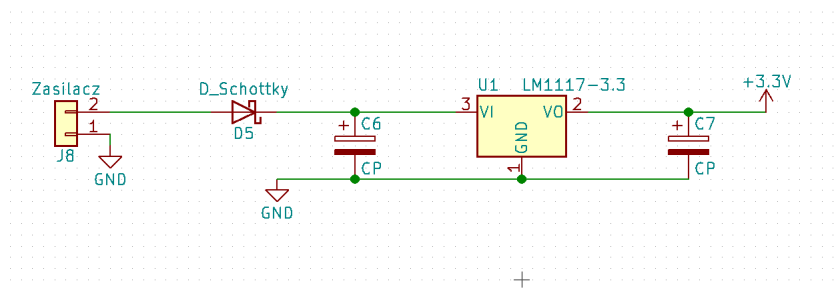
Wzmocniony sygnał audio pochodzący z mikrofonów zostaje podany na wejście mikrokontrolera i detektora obwiedni. Dodatkowo możliwe też jest bezpośrednie podłączenie do układu oscyloskopu, który przyda się podczas fazy testowej modułu. Wyjście detektora obwiedni podłączono do mikrokontrolera, który za pomocą złącza UART wysyła dane do komputera. Porównanie sygnałów audio otrzymanych przez mikrofony oraz mikrokontroler posłuży do sprawdzenia poprawności działania układu.

## 4.2 Schemat oraz płytki PCB

Do zaprojektowania schematu elektronicznego oraz płytki PCB zostało użyte oprogramowanie KiCad.

### 4.2.1 Sekcja zasilania

Moduł został zasilony napięciem stałym 5V pochodzącym z zewnętrznego zasilacza sieciowego. Jednak z uwagi na to że mikrokontroler oraz systemy mikrofonowe powinny zostać zasilone napięciem 3,3V, do modułu zaimplementowano stabilizator liniowy LM1117(patrz rys. 4.2).



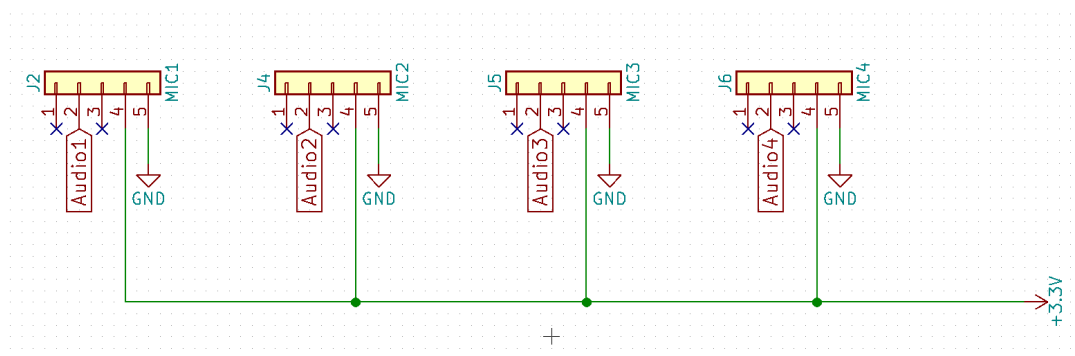
stabilizator}

Rysunek 4.2 Stabilizator liniowy

W projekcie pominięto zabezpieczenie przed odwrotną polaryzacją źródła zasilania, ponieważ użyta wtyczka zasilacza nie pozwala podłączyć zasilania odwrotnie.

### 4.2.2 Sekcja mikrofonów

Ze względu na fakt, że mikrofony znajdują się na gotowych komercyjnych PCB, zostaną one przylutowane do płytki głównej poprzez goldpin. Zasilane są one napięciem 3,3V (patrz rys. 4.3).



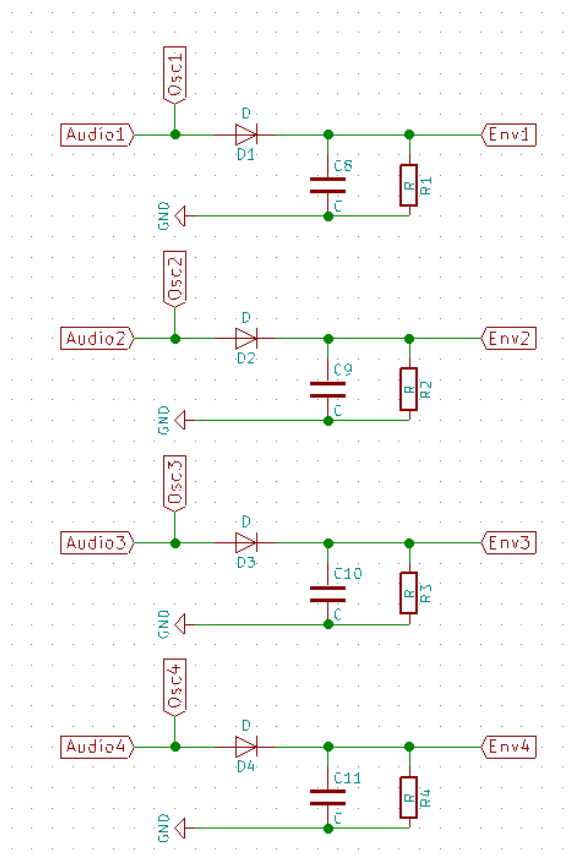
mikrofony}

Rysunek 4.3 Moduły mikrofonów

### 4.2.3 Sekcja detektora obwiedni

Detektor obwiedni został zaprojektowany na zasadzie diody oraz rezystora i kondensatora połączonych do niej równolegle (patrz rys. 4.4).

W tej sekcji zrealizowano również wyprowadzenie używane przy podłączeniu oscyloskopów (patrz rys. 4.5).



Rysunek 4.4 Schemat detektorów obwiedni

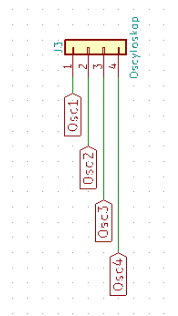
detektory}

#### 4.2.4 Sekcja mikrokontrolera

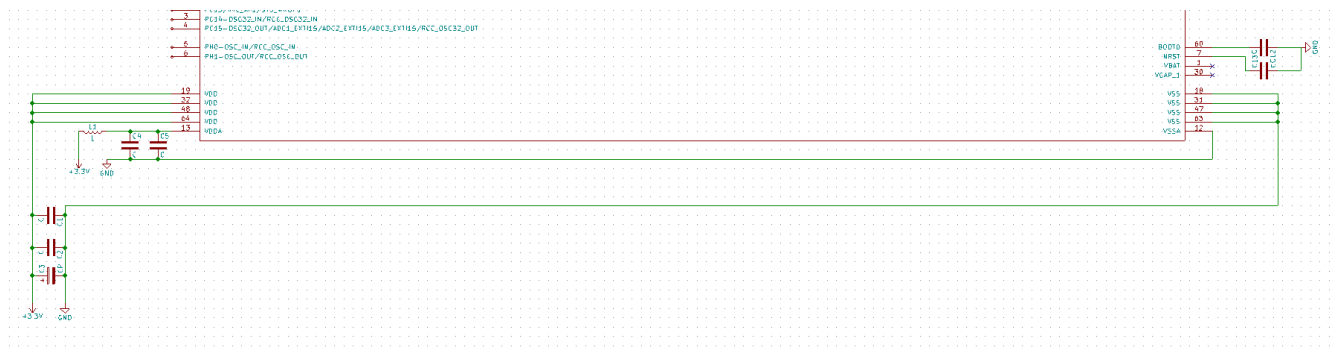
Mikrokontroler został zasilony napięciem 3.3V, dotakowo przy jego sekcji zasilania zastosowano filtry tak aby całkowicie wyeliminować wpływ ewentualnych tętnień na jego pracę (patrz rys. 4.6).

Kolejną częścią tej sekcji jest podłączenie do przetwornika ADC mikrokontrolera sygnałów otrzymanych z generatora obwiedni oraz mikrofonów (patrz rys. 4.7).

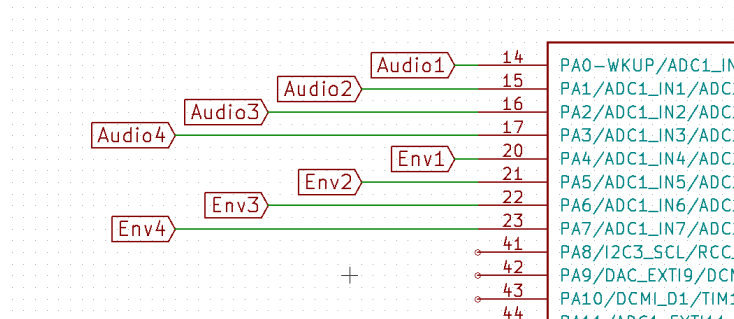
Wyprowadzono także złącze programatora i interfejsu USART, służą one do programowania mikrokontrolera, debugowania za pomocą STM Studio i wysyłania danych testowych do komputera (patrz rys. 4.8).



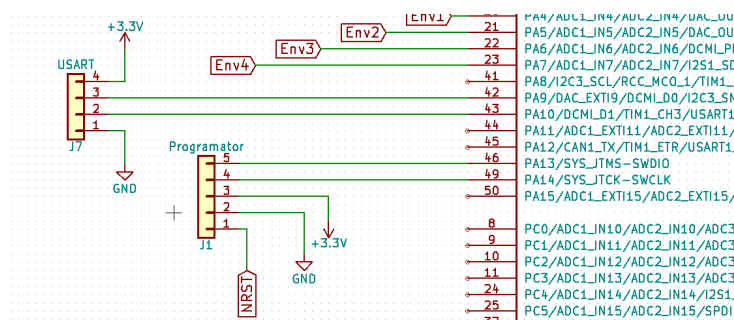
Rysunek 4.5 Złącza testowe oscyloskopu



Rysunek 4.6 Zasilanie mikrokontrolera



Rysunek 4.7 Wejścia ADC



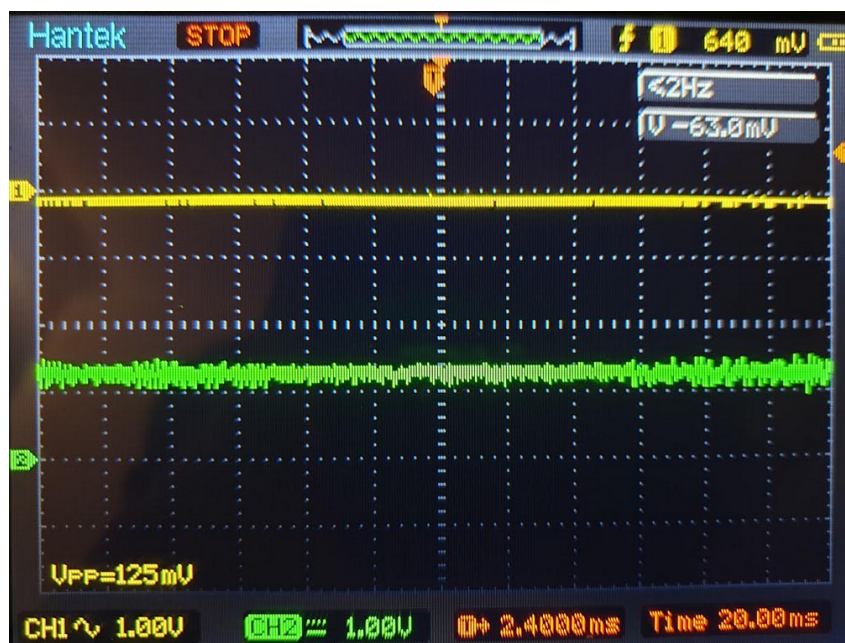
Rysunek 4.8 Złącze programatora

# Rozdział 5

## Testy i eksperymenty

### 5.1 Testy mikrofonów i detektorów obwiedni

W celu sprawdzenia poprawności działania układu, przeprowadzono testy działania mikrofonów oraz detektorów obwiedni. Do analizy sygnału użyto oscyloskopu. W pierwszej kolejności zbadano przebieg sygnału w ciszy, miało to na celu sprawdzenie w jakim stopniu szumy tła mogą wpłynąć na wyniki pomiarów.(patrz rys. 5.1). Sygnał oznaczony kolorem zielonym jest wyjściem mikrofonu, natomiast kolorem pomarańczowym oznaczono wyjście detektora obwiedni.



Rysunek 5.1 Szumy tła

{fig-tlo}

Kolejnym krokiem było sprawdzenie poprawności działania detektora obwiedni, aby każda próba była powtarzalna nagrano dźwięk pstryknięcia palcami i odtwarzano go w równych odstępach czasu. Pierwsza próba dowiodła poprawności działania diody prostowniczej w układzie, jednak analizując przebieg można było dojść do wniosku, że filtr dolnoprzepustowy został źle dobrany, dlatego z każdą kolejną próbą zwiększano pojemność kondensatora aż do osiągnięcia satysfakcjonującego wyniku(patrz rys. 5.2).



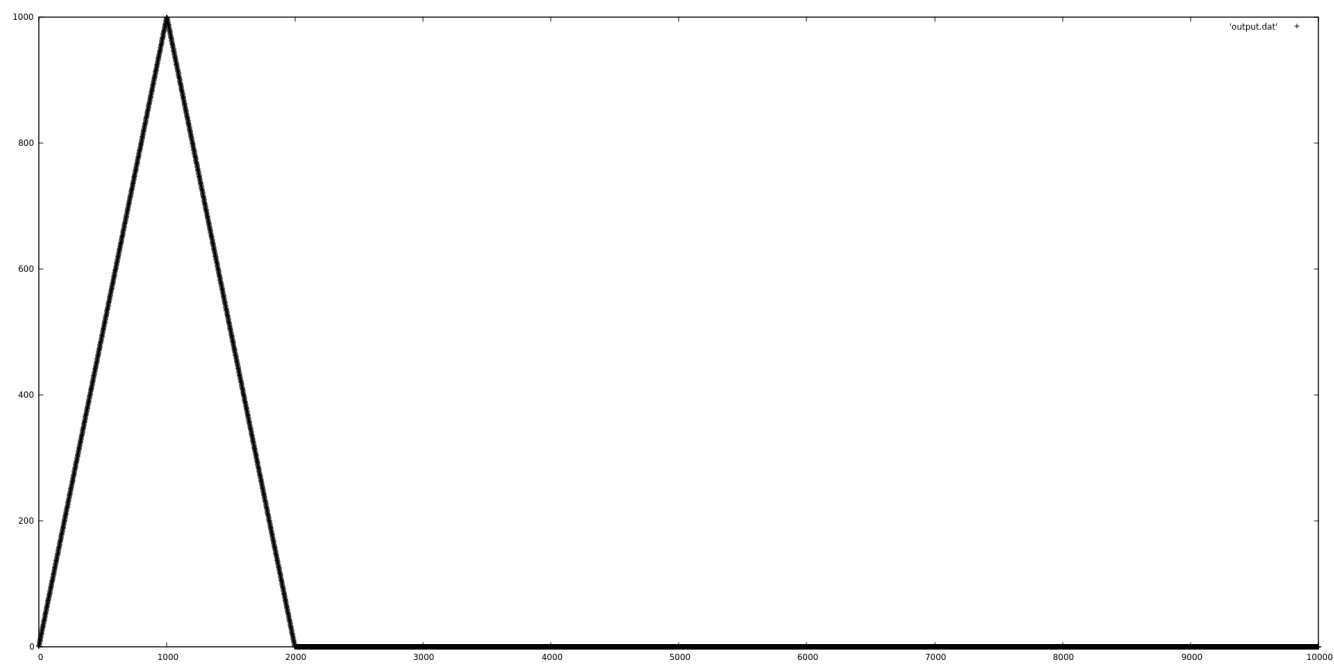
Rysunek 5.2 Pierwsza próba detektora obwiedni

{fig-przeb.

## 5.2 Testy działania programu

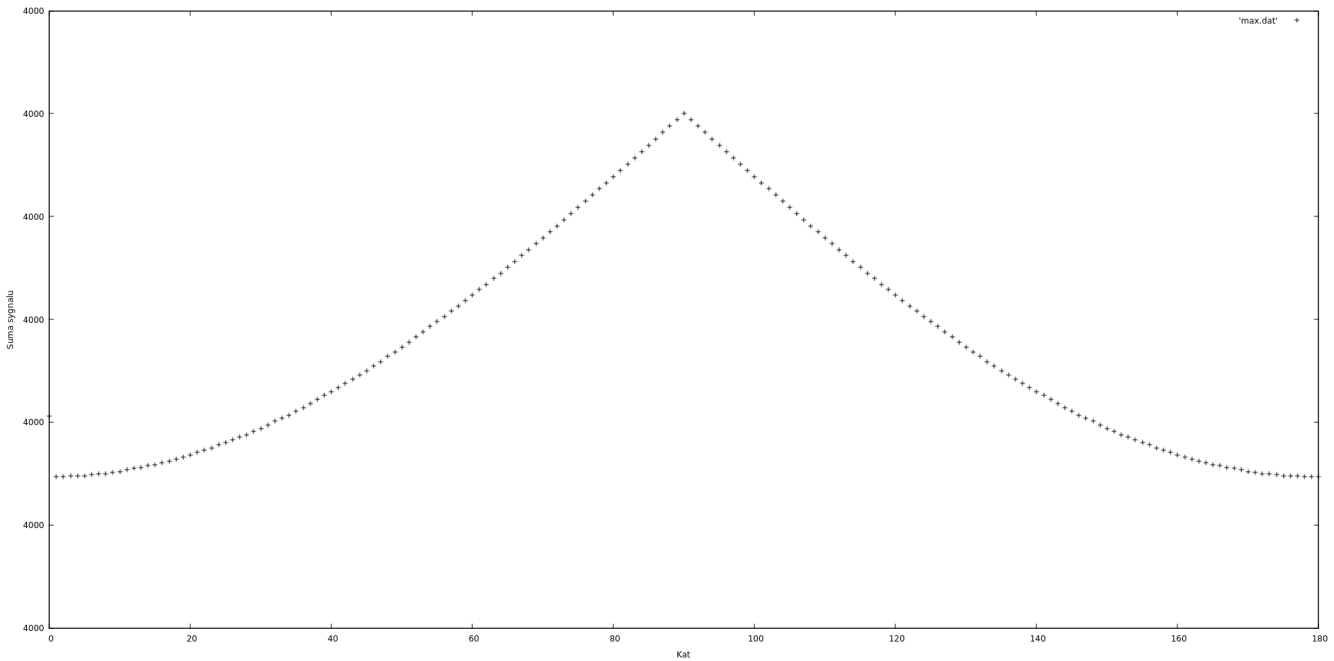
Pierwsze testy działania programu zostały przeprowadzone bez podłączania systemu mikrofonów, miało to na celu sprawdzenie działania algorytmu w hermetycznym środowisku, dzięki takiemu działaniu można było założyć że wszystkie błędy wynikały z niepoprawnej implementacji Sum and Delay Bemaforming. Na wejście algorytmu został podany sygnał o przebiegu trójkątnym (patrz rys.5.3).

Założono że każdy z mikrofonów otrzymał ten sam sygnał który nie jest opóźniony, dla takich danych poprawnie działający algorytm powinien zwrócić maksymalną wartość korelacji w punkcie odpowiadającym kątowi 90 stopni. Wyniki eksperymentu można zaobserwować na poniższym wykresie (patrz rys.5.4). Wykres dowodzi poprawności działania programu, ponieważ widać na nim jak w miarę zbliżania się wartości kąta do 90 stopni rośnie wartość współczynnika korelacji.



Rysunek 5.3 Sygnał podany na wejście algorytmu

{fig-sygna}



{fig-suma}

Rysunek 5.4 Wartości korelacji