

Projektowanie układów elektronicznych

Prowadzący: *dr hab. inż. Cezary Worek*



Sprawozdanie

Bezprzewodowy czujnik sterowania oświetleniem – ultra low-power

Autor:
Łukasz Sajdak

Spis treści

1. Cel projektu.....	3
2. Założenia projektowe	3
3. Zasada działania.....	3
4. Schemat blokowy.....	4
4.1 Dobór Komponentów	4
4.2 Software	5
5. Schemat ideowy.....	5
6. Projekt PCB.....	6
8. Symulacje	7
9. Wycena.....	10
10. Podsumowanie	11
11. Bibliografia	11

1. Cel projektu

Celem projektu było stworzenie czujnika sterowania oświetleniem, którego działanie jest oparte na wykryciu kłaśnięcia użytkownika. System wykorzystuje mikrokontroler, mikrofon MEMS oraz technologię Bluetooth Low Energy (BLE), umożliwiając efektywne zarządzanie zużyciem energii i detekcję dźwięku w trybie ultra-low power.

2. Założenia projektowe

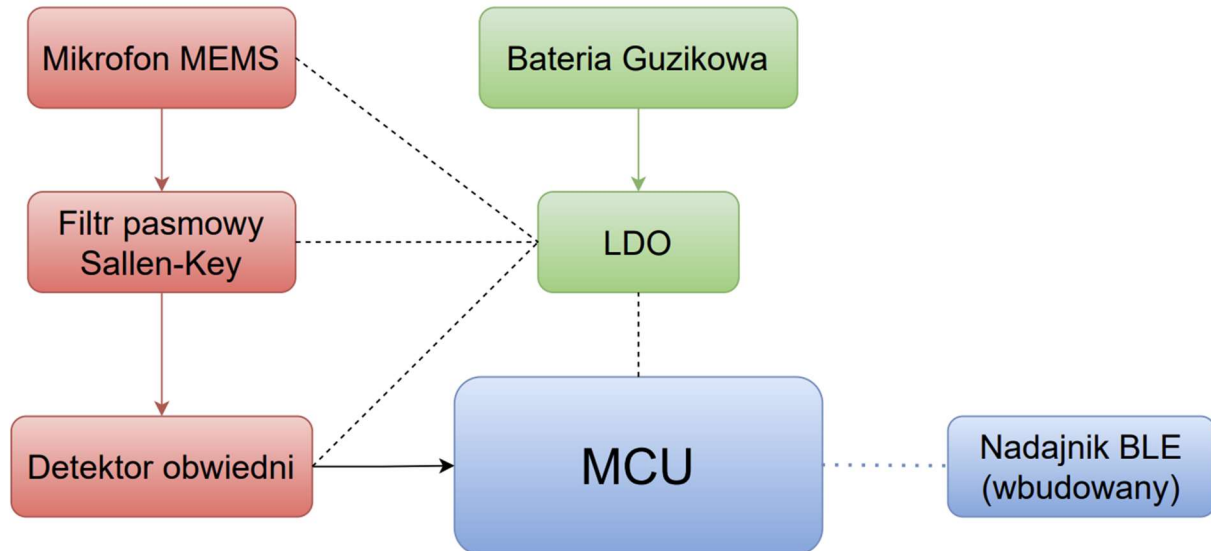
- **Analogowy tor wejściowy audio** - wstępna obróbka sygnału dźwiękowego.
- **Obróbka sygnału na mikrokontrolerze** - mikrokontroler powinien umożliwiać efektywną cyfrową analizę sygnału audio w celu wykrywania charakterystycznych wzorców dźwiękowych.
- **Interfejs: bezprzewodowy BLE** - System musi posiadać energooszczędny interfejs komunikacyjny BLE.
- **Zasilanie: Ultra Low Power** - Całość urządzenia powinna być zoptymalizowana pod kątem minimalnego zużycia energii, co pozwoli na długotrwałą pracę na baterii.
- **Projekt komercyjny** - Urządzenie musi być dostosowane do codziennego użytku w warunkach domowych.

3. Zasada działania

1. Urządzenie znajduje się w trybie głębokiego uśpienia (deep sleep), minimalizując zużycie energii.
2. Mikrofon MEMS z funkcją Wake-on-Sound nasłuchuje otoczenia i po wykryciu sygnału akustycznego aktywuje mikrokontroler, przechodząc jednocześnie w tryb normalnej pracy.
3. Sygnał zostaje wzmocniony, przefiltrowany w analogowym torze audio i przekazany przez detektor obwiedni do ADC.
4. Mikrokontroler pobiera dane z przetwornika ADC i analizuje sygnał w celu rozpoznania charakterystycznego wzorca kłaśnięcia.
5. Po pozytywnej detekcji wysyłana jest komenda sterująca przez interfejs Bluetooth Low Energy (BLE).
6. Po zakończeniu transmisji system automatycznie przechodzi z powrotem do trybu uśpienia, oczekując na kolejne zdarzenie dźwiękowe.

4. Schemat blokowy

Poniżej przedstawiono ogólny schemat blokowy systemu, który ilustruje połączenia między wszystkimi kluczowymi komponentami projektu czujnika sterowania oświetleniem (Rys.1).



Rys. 1 Schemat blokowy projektu

4.1 Dobór Komponentów

Dobór komponentów:

- mikrokontroler Seeed Xiao BLE nRF52840 - mikrokontroler z wbudowanym BLE i bardzo niskim zużyciem energii.
- mikrofon MEMS VM1010 - niskoszumny mikrofon MEMS z funkcją Wake-on-Sound.
- stabilizator TPS78333 - LDO 3.3V o bardzo małym prądzie spoczynkowym.
- TLV9044 - czterokanałowy wzmacniacz operacyjny
- bateria Li-Ion 3,7V - zasilanie

Kluczowe elementy:

Mikrokontroler Seeed XIAO nRF52840 odpowiada za cyfrowe przetwarzanie sygnałów pochodzących z mikrofonu, w tym analizę próbek audio w celu wykrycia wzorca kłaśnięcia, a także za zarządzanie komunikacją bezprzewodową w standardzie Bluetooth Low Energy (BLE), umożliwiając przesłanie komend do innych urządzeń.

Mikrofon MEMS VM1010 pełni rolę czujnika akustycznego – jego funkcja Wake-on-Sound pozwala wykryć dźwięk i aktywować system z trybu uśpienia, co znacząco ogranicza zużycie energii.

Detektor obwiedni – został zrealizowany w oparciu o układ diodowy, który cechuje się niskim poborem mocy, co jest zgodne z założeniem minimalizacji zużycia energii. Choć tego typu detektor może wprowadzać pewne zniekształcenia sygnału, okazał się wystarczający do kłaśnięcia.

4.2 Software

Detekcja kłaśnięcia:

1. Tryb czuwania (Sleep + Wake-on-Sound)

Mikrokontroler przez większość czasu pozostaje w trybie głębokiego uśpienia (deep sleep). Wybudzany jest jedynie wtedy, gdy mikrofon MEMS wykryje impuls akustyczny o odpowiednim poziomie, uruchamiając funkcję Wake-on-Sound.

2. Pobieranie próbek z przetwornika ADC

Po wybudzeniu system rozpoczyna akwizycję sygnału za pomocą wbudowanego przetwornika analogowo-cyfrowego.

3. Analiza sygnału i detekcja wzorca kłaśnięcia

Pobrane dane są analizowane pod kątem amplitudy, kształtu i czasu trwania impulsu. Jeśli sygnał spełnia warunki charakterystyczne dla kłaśnięcia, zostaje rozpoznane zdarzenie.

4. Transmisja komendy przez BLE

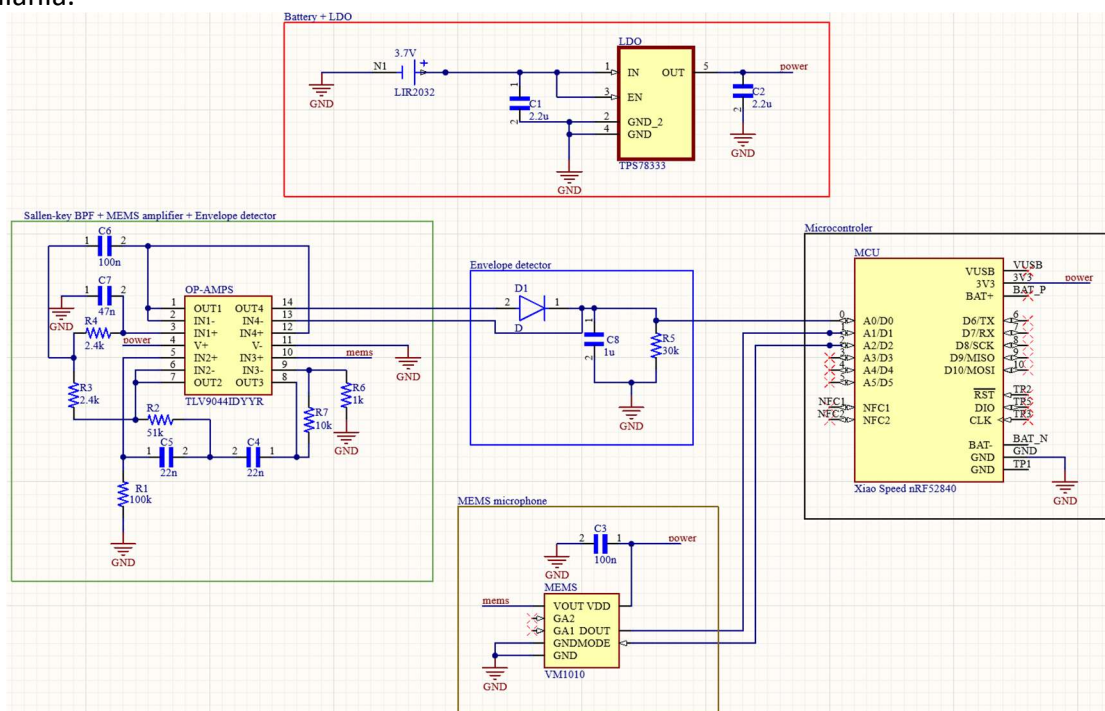
Po wykryciu kłaśnięcia mikrokontroler inicjuje transmisję danych przez interfejs Bluetooth Low Energy, wysyłając komendę sterującą (np. "toggle światło") do odbiornika.

5. Powrót do trybu uśpienia

Po zakończeniu transmisji system automatycznie przechodzi z powrotem w tryb głębokiego uśpienia, oczekując na kolejne wybudzenie przez mikrofon.

5. Schemat ideowy

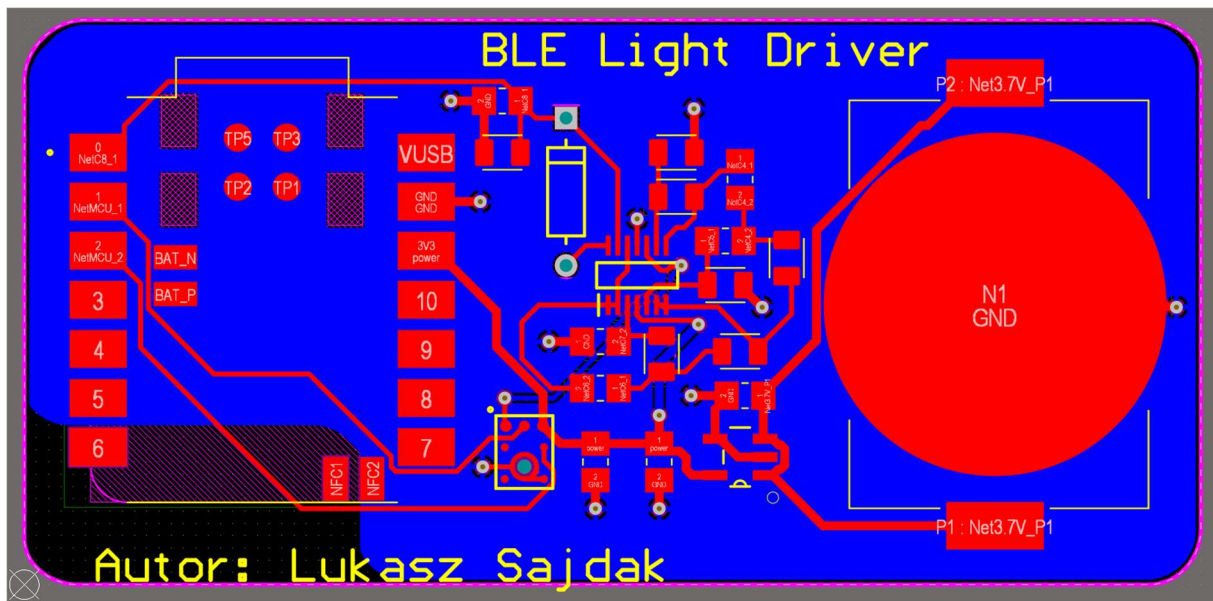
Poniżej przedstawiono szczegółowy schemat ideowy (Rys. 2), który prezentuje połączenia między mikrofonem, analogowym torem audio, mikrokontrolerem i układem zasilania.



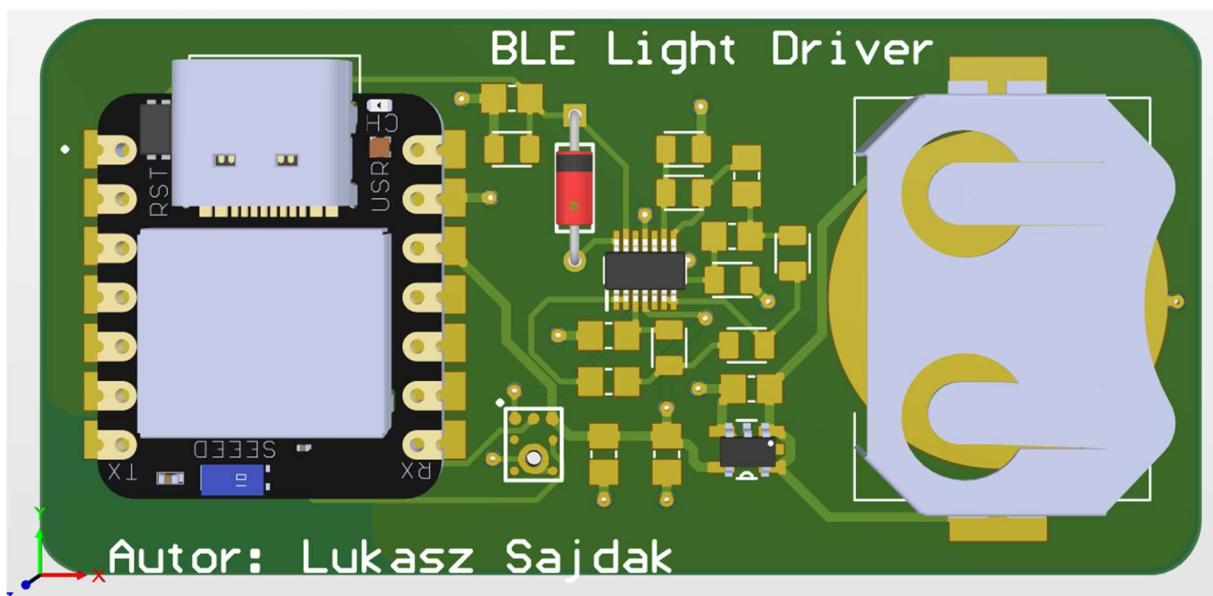
Rys. 2 Schemat Ideowy

6. Projekt PCB

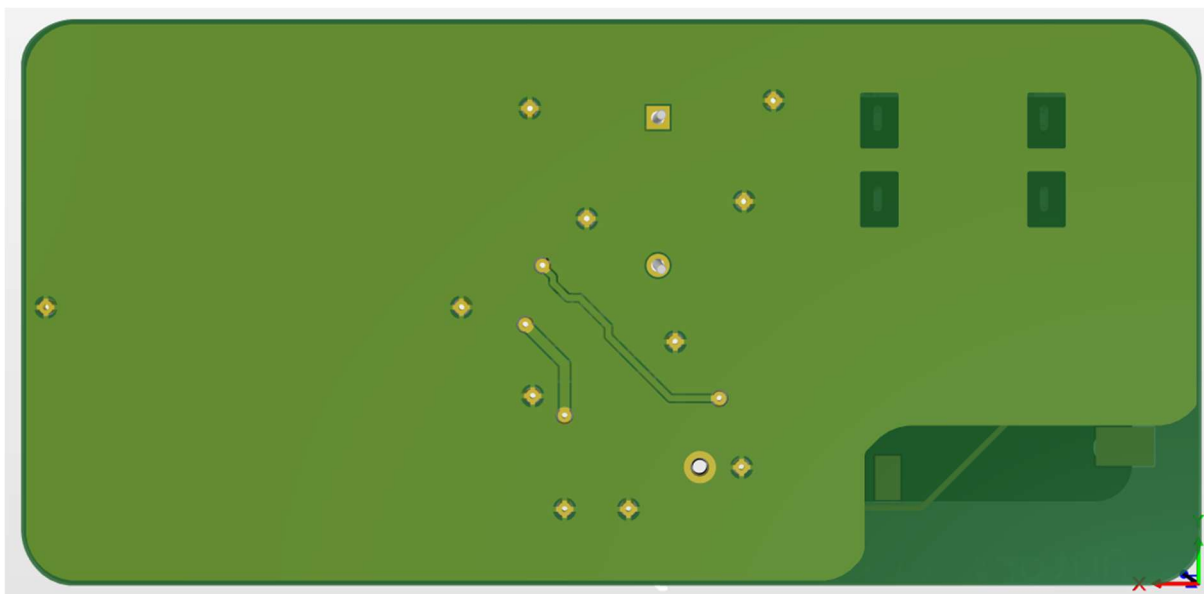
Projekt PCB uwzględnia szersze ścieżki zasilania o szerokości 0,5 mm w celu minimalizacji spadków napięcia i zapewnienia stabilności pracy układu. Pod anteną BLE celowo nie umieszczono pola masy, aby uniknąć zakłóceń i poprawić parametry transmisji bezprzewodowej. Wszystkie komponenty zostały rozmieszczone możliwie blisko siebie, co pozwoliło na zmniejszenie wymiarów płytki i ograniczenie długości ścieżek sygnałowych. Poniżej przedstawiono graficzne wizualizacje zaprojektowanej płytki PCB. (Rys. 3-5).



Rys. 3 Widok warstw PCB.



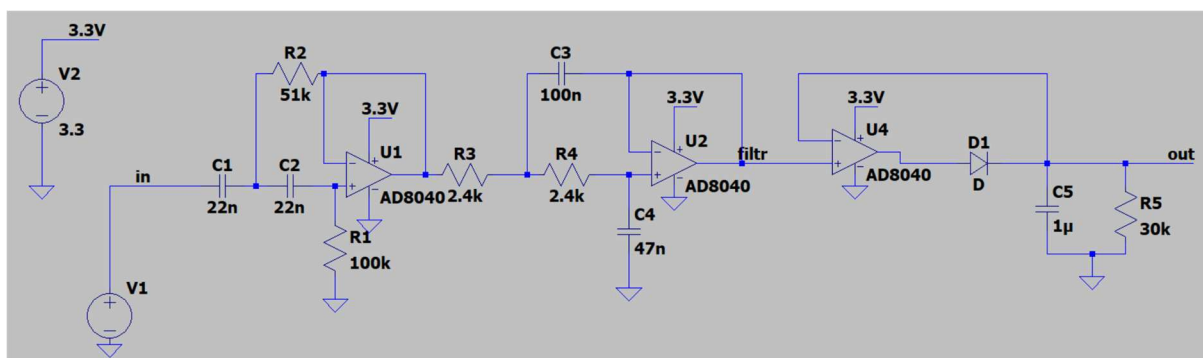
Rys. 4 Widok 3D PCB (przód).



Rys. 5 Widok 3D PCB (tył).

8. Symulacje

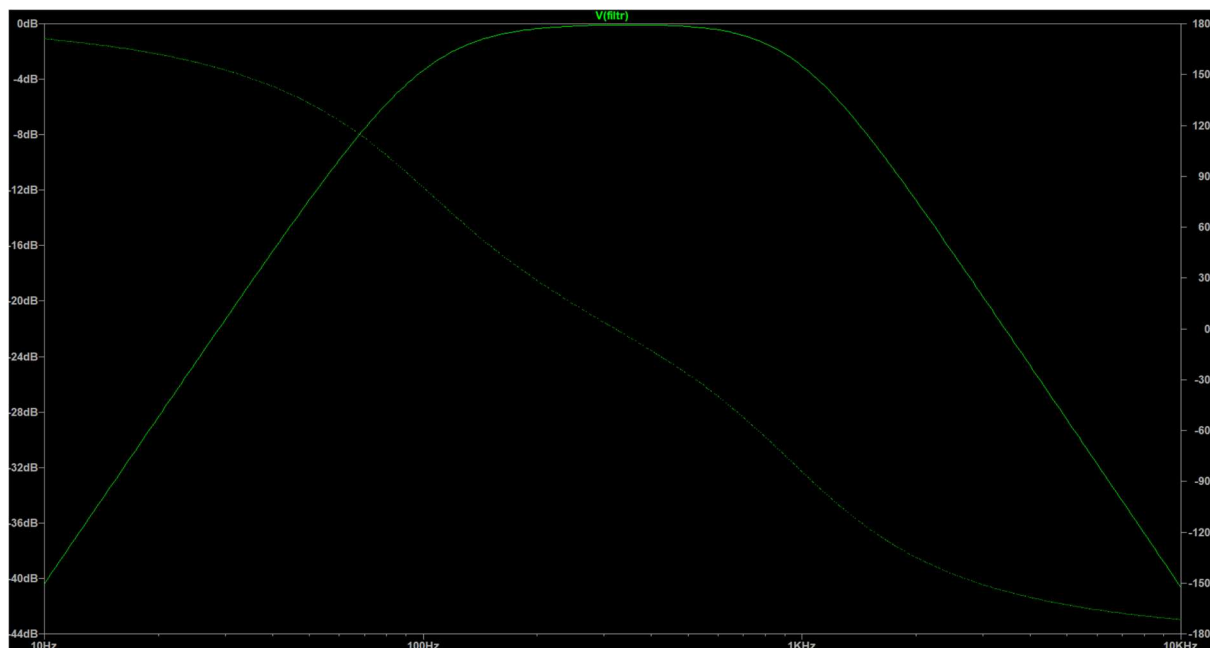
W celu weryfikacji poprawności działania analogowego toru wejściowego audio przeprowadzono symulacje w środowisku **LTspice**. Skupiono się na analizie pasmowo-przepustowego filtra analogowego typu Sallen-Key oraz detektora obwiedni, które odpowiadają za wstępne przetwarzanie sygnału akustycznego. Wyniki symulacji potwierdzają skuteczność filtracji i przygotowania sygnału do dalszej analizy na mikrokontrolerze.



Rys. 6 Układ, który został poddany symulacji

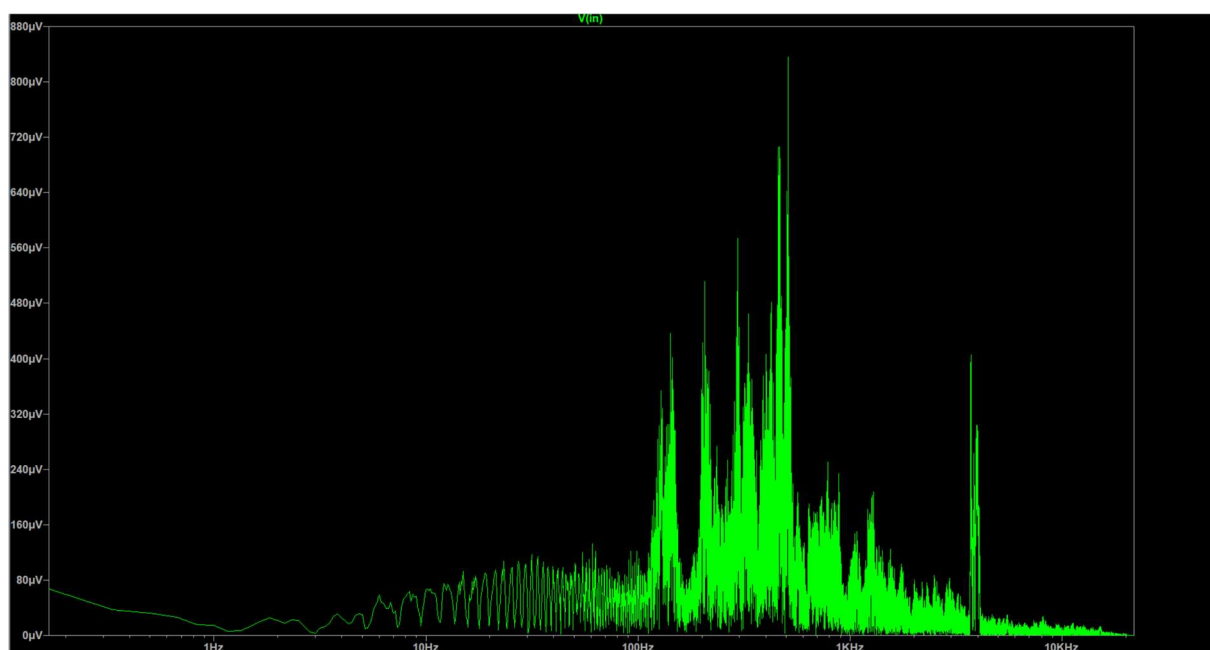
8.1 Filtr Pasmowy

Filtr Sallen-Key BPF zaprojektowano zgodnie z instrukcją: Texas Instruments - Filter Design in Thirty Seconds^[6] strona 7. Następnie przesymulowano go w programie LTspice i otrzymano następujące wyniki:

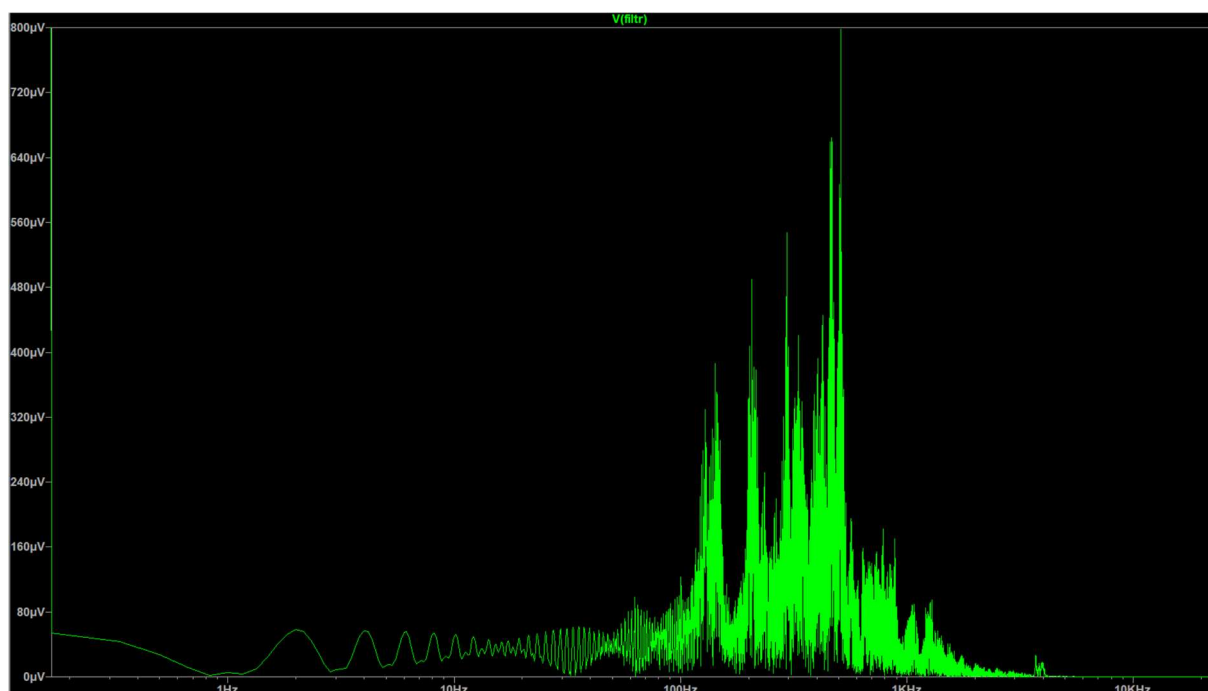


Rys. 7 Analiza AC filtru

Udało się uzyskać filtr pasmowo przepustowy od $\pm 100\text{Hz}$ do $\pm 1\text{kHz}$. Przez filtr następnie przepuszczono testowy sygnał składający się z mowy oraz trzech kłaśnień. Dodatkowo na sygnał nałożono pisk o częstotliwości około 5kHz. Analiza widma sygnału potwierdziła poprawność działania filtru. (Rys. 8 i Rys. 9)



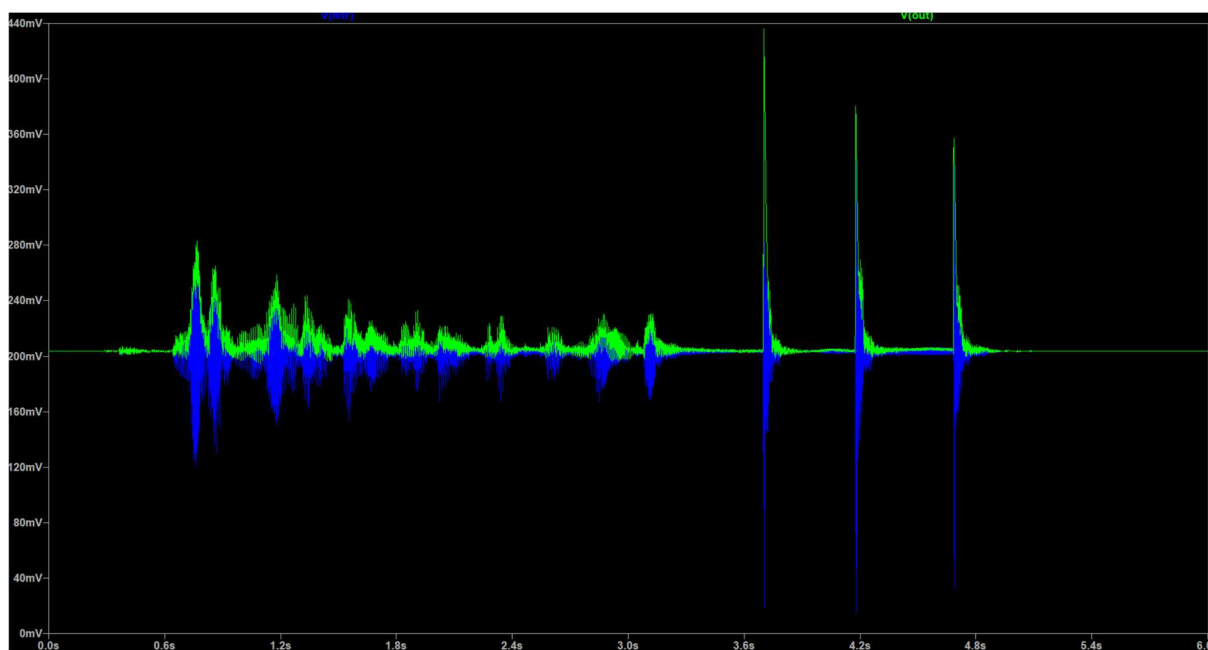
Rys. 8 Widmo sygnału wejściowego



Rys. 9 Widmo sygnału na wyjściu filtru

8.2 Detektor obwiedni

Następnie przefiltrowany sygnał przechodzi przez detektor obwiedni, który również przesymulowano i przedstawiono poniżej. (Rys. 10)



Rys. 10 Detektor obwiedni

9. Wycena

Designator	Value/Type	Symbol	Ilość	Cena/szt	Cena	Dostawca	Link
3.7V	LIR2032	BAT-HLD-001-TR	1	2,29 zł	2,29 zł	DigiKey	Link
C1, C2	2.2u	CL21B222JBANNNC	2	0,08 zł	0,17 zł	DigiKey	Link
C3, C6	100n	CL21B104KCFNNNE	2	0,04 zł	0,07 zł	DigiKey	Link
C4, C5	22n	CL21B223KBANFNC	2	0,07 zł	0,14 zł	DigiKey	Link
C7	47n	CL21B473KBCNNNC	1	0,07 zł	0,07 zł	DigiKey	Link
C8	1u	CL21B105KBFNNNE	1	0,06 zł	0,06 zł	DigiKey	Link
D1	BAT46	BAT46	1	0,31 zł	0,31 zł	DigiKey	Link
LDO	TPS783x	TPS78333	1	0,55 zł	0,55 zł	DigiKey	Link
MCU	nRF52840	Xiao Speed nRF52840	1	28,74 zł	28,74 zł	SpeedStudio	Link
MEMS	VM1010	Vesper VM1010	1	6,07 zł	6,07 zł	xonelec	Link
OP-AMPS	TLV9044	TLV9044IDYYR	1	2,24 zł	2,24 zł	DigiKey	Link
R1	100k	RG2012P-104-B-T5	1	0,21 zł	0,21 zł	DigiKey	Link
R2	51k	RC0805JR-0751KL	1	0,03 zł	0,03 zł	DigiKey	Link
R3, R4	2.4k	RMCF0805JT2K40	2	0,04 zł	0,08 zł	DigiKey	Link
R5	30k	RMCF0805FT30K0	1	0,04 zł	0,04 zł	DigiKey	Link
R6	1k	RG2012P-102-B-T5	1	0,21 zł	0,21 zł	DigiKey	Link
R7	10k	RR1220P-103-D	1	0,10 zł	0,10 zł	DigiKey	Link

Założony nakład: 100 szt

Koszt jednej sztuki: 41,37zł

Koszt całkowity: 4136,57zł

10. Podsumowanie

Projekt czujnika kłaśnięcia został zrealizowany jako koncepcyjny prototyp, spełniający założenia energooszczędności, kompaktowości oraz możliwości bezprzewodowej integracji. Udało się skutecznie połączyć analogowy tor przetwarzania sygnału audio z cyfrową analizą w mikrokontrolerze i transmisją BLE, przy zachowaniu bardzo niskiego poboru mocy. System wykrywa pojedyncze kłaśnięcia i może być wykorzystywany do sterowania oświetleniem lub innymi elementami systemów smart home.

W przyszłości możliwa jest rozbudowa projektu o:

- detekcję sekwencji kłaśnięć
- integrację z aplikacją mobilną
- możliwość sterowania wieloma urządzeniami na podstawie ustalonych wzorców dźwiękowych.

11. Bibliografia

- [1] Dokumentacja mikrofonu VM1010
- [2] Dokumentacja Seeed Xiao BLE nRF52840
- [3] Dokumentacja nRF52840
- [4] Dokumentacja TPS78333
- [5] Dokumentacja TLV9044
- [5] Texas Instruments – Analysis of the Sallen-Key Architecture
[<https://www.ti.com/lit/an/sloa024b/sloa024b.pdf>]
- [6] Texas Instruments - Filter Design in Thirty Seconds
[<https://www.vyssotski.ch/BasicsOfInstrumentation/FilterDesignIn30Seconds.pdf>]
- [7] Detektor obwiedni [<http://old.zseii.edu.pl/archive/dydaktyka/elektronika/ue/06.html>]