
Stylofon z możliwością nagrywania utworów

Dokumentacja projektu

Cel projektu

Celem jest samodzielne zaprojektowanie i wykonanie własnej wersji stylofonu opartego na mikrokontrolerze, zainspirowanej klasycznym instrumentem elektronicznym z ubiegłego wieku, a jednocześnie wzbogaconej o możliwości, jakie daje współczesna technologia cyfrowa. Realizacja urządzenia ma na celu rozwinięcie umiejętności z zakresu elektroniki, programowania oraz syntezy dźwięku.

Opis głównych założeń projektu

- Stylofon to przenośny instrument muzyczny generujący elektroniczny dźwięk o stałej, syntetycznej barwie, przypominający brzmienie prostych syntezatorów.
- Dzięki wbudowanemu źródłu zasilania, urządzenie jest łatwe do przenoszenia i można je zabrać w dowolne miejsce.
- Instrument wyposażony jest w metalową klawiaturę, która reaguje na nacisk stylusu, zamykając obwód i generując dźwięk.
- Stylofon umożliwia regulację wysokości dźwięku, co daje użytkownikowi większą swobodę twórczą.
- Użytkownik ma możliwość nagrywania swoich utworów muzycznych oraz ich późniejszego odtwarzania.
- Mały wyświetlacz zwiększa intuicyjność obsługi urządzenia, ułatwiając korzystanie z jego funkcji.
- Urządzenie jest zasilane bateryjnie, co eliminuje konieczność stałego podłączenia do źródła prądu.

Spis treści

Wybór elementów elektronicznych.....	2
Mikrokontroler	2
Wyświetlacz	2
Przetwornica napięcia.....	2
Metalowa klawiatura	2
Specyfikacja wewnętrzna urządzenia	3
Generowanie dźwięku	3
Wstęp	3
Wersja z UJT	3
Wersja z timerem 555	4
Wersja PWM.....	4
Schemat blokowy	5
Opis poszczególnych bloków	5
Schemat ideowy	6
Projekt płytki drukowanej	6
Lista elementów	7
Oprogramowanie urządzenia	7
Algorytm działania oprogramowania	7
Opis zmiennych	8
Opis funkcji.....	8
Szczegółowy opis kluczowej procedury	8
Specyfikacja zewnętrzna urządzenia	9
Zdjęcie gotowego prototypu urządzenia	9
Elementy sterujące	9
Elementy wykonawcze	9
Reakcja oprogramowania	10
Instrukcja obsługi urządzenia	10
Uruchomienie urządzenia	10
Obsługa menu.....	10
Potencjalne usterki i sposoby naprawy	11
Programowanie układu	11
Testowanie	11
Odnośniki	11
Literatura	11

Wybór elementów elektronicznych

Mikrokontroler

Większość z wymienionych mikrokontrolerów byłaby odpowiednia do realizacji tego projektu, jednak należy zwrócić uwagę na kilka kluczowych aspektów. ESP32, choć oferuje największą moc obliczeniową, charakteryzuje się stosunkowo wysokim zużyciem energii, co ogranicza jego czas pracy na baterii. Układy Arduino są relatywnie drogie, Mega oferuje nieznacznie większe możliwości niż wersja Nano, głównie w zakresie liczby pinów GPIO, które nie są tak ważne w tym projekcie. Mój wybór padł na Raspberry Pi Pico 2 ze względu na sporą uniwersalność. Cechuje się dobrymi parametrami, obsługiwany interfejsami oraz 12-bit rozdzielczością ADC, który jest ważnym elementem projektu. Ponadto stosunek jakości do ceny jest zadowalający.

Wyświetlacz

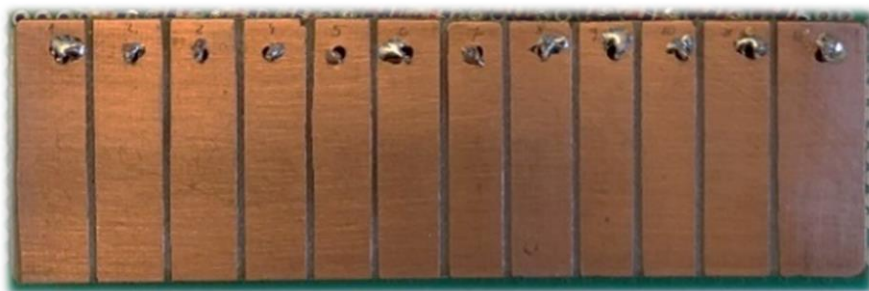
Postanowiłem użyć wyświetlacza typu OLED. Jego główną zaletą jest dobra rozdzielczość w stosunku do jego małych rozmiarów, przez co idealnie wpasuje się w urządzenie. Dodatkowo jest tani i wymaga tylko 2 pinów do komunikacji z mikrokontrolerem, a jego niski czas odświeżania przełoży się na lepszą responsywność urządzenia. Także w stosunku do innych wyświetlaczy posiada dobry kontrast, a co za tym idzie oferuje dobrą czytelność o każdej porze dnia.

Przetwornica napięcia

Zastosowałem popularny układ LM2596. Cechuje się wysoką sprawnością, co wydłuży pracę na baterii. Dodatkowo posiada zabezpieczenia chroniące urządzenie oraz wystarczającą moc do zasilania urządzenia. Występuje także w wielu konfiguracjach, w szczególności wersje o małych rozmiarach.

Metalowa klawiatura

Wzorując się na oryginalnym stylofonie, stwierdziłem, że dobrym rozwiązaniem będzie wykorzystanie drabinki rezystorowej i odczytywanie różnicy spadku napięcia względem napięcia referencyjnego. Wadą tej metody jest niepowtarzalność otrzymywanych wartości napięć, co należy uwzględnić podczas programowania. Zaletą jest natomiast to, że wymaga ona użycia jedynie jednego portu analogowego. Wybrany mikrokontroler posiada 12-bit ADC, który bez problemu dokładnie zmierzy wartości odpowiadające każdemu klawiszowi. Same klawisze można stworzyć poprzez rozdzielenie powierzchni na płytce na poszczególne klawisze. Do tego posłużyła mi miedziana płytka do wytrawiania.



PROTOTYPOWA KLAWIATURA WYKONANA NA LAMINACIE 1,6MM

Specyfikacja wewnętrzna urządzenia

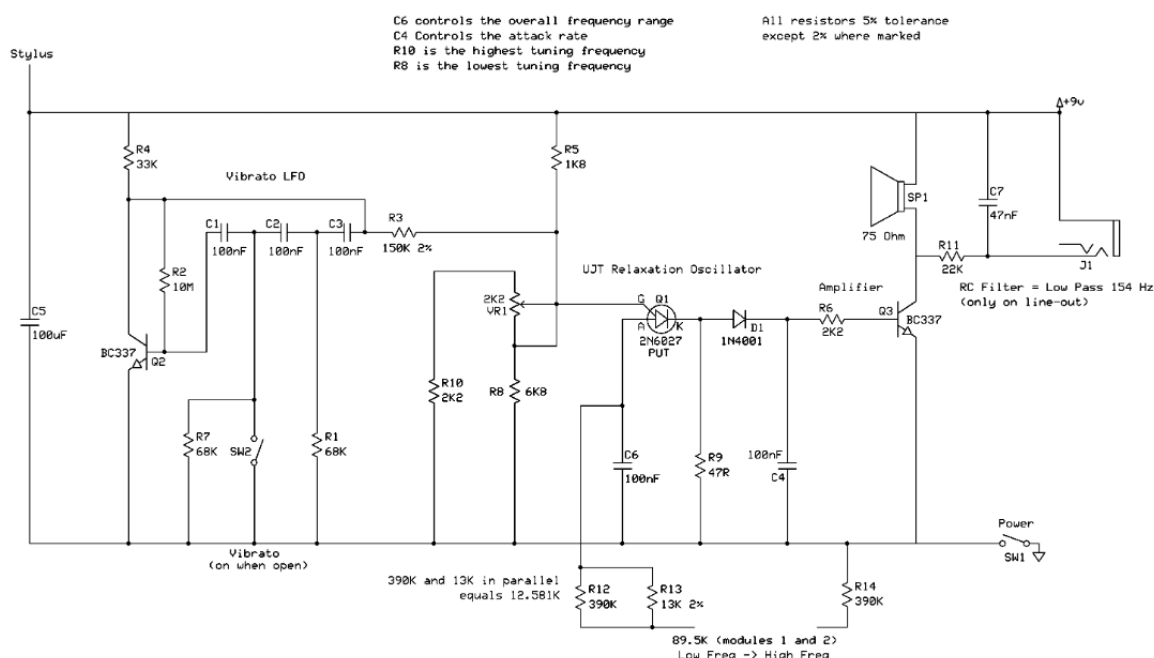
Generowanie dźwięku

Wstęp

Stylafon pierwotnie wyprodukowany w Wielkiej Brytanii w 1968 roku. Opierał się na programowalnym tranzystorze jednozłączowym UJT, który nadawał jego unikalne brzmienie. W latach 70-tych całkowicie zastąpiono oscylatory relaksacyjne prostszymi i tańszymi generatorami tonów prostokątnych opartymi na timerze 555.

Wersja z UJT

Układ oparty na tranzystorze jednozłączowym, ma zalety głównie w postaci otrzymywanego charakterystycznego i oryginalnego brzmienia, a sama konstrukcja nie jest stosunkowo skomplikowana.



SCHEMAT ORYGINALNEGO STYLOFONU Z 1968

Jednak rozwiązanie to ma też swoje wady.

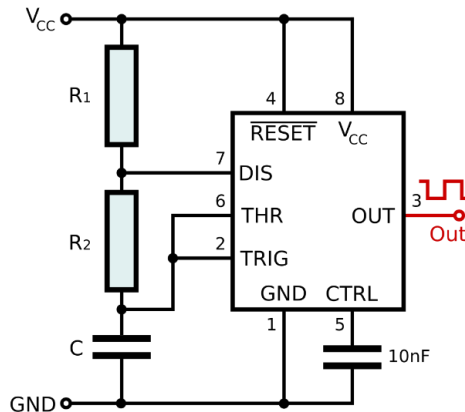
Oscylatory z tranzystorami jednozłączowymi są bardziej podatne na zmiany częstotliwości wynikające z wahań napięcia zasilania oraz tolerancji elementów pasywnych, co utrudnia precyzyjne dostrajanie generowanej częstotliwości bez specjalistycznego sprzętu, takiego jak oscyloskop.

UJT nie generuje sygnału o prostokątnym kształcie, co może wymagać zastosowania dodatkowych układów dopasowujących, aby przetwornik analogowo-cyfrowy mikrokontrolera mógł prawidłowo interpretować sygnał wejściowy.

Także rynek elektroniczny mocno się rozwinął, co za tym idzie dobranie odpowiedniego tranzystora jednozłączowego staje się trudniejsze, ponieważ wiele układów w nowszej technologii wyparto je z rynku.

Wersja z timerem 555

Nowsze rozwiązania są oparte na timerze 555, który jest jednym z najpopularniejszych i najbardziej wszechstronnych układów, które kiedykolwiek wyprodukowano. Częstotliwość oscylacji jest regulowana, a możliwe jest nawet dodanie różnych efektów, gdyż układ jest w stanie generować różne kształty fali.

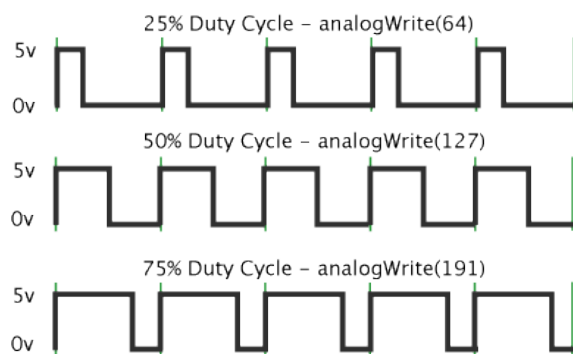


SCHEMAT UKŁADU ASTABILNEGO

Mimo tych zalet rozwiązanie to ma swoje ograniczenia. Nadal wymagana jest integracja z mikrokontrolerem, w celu odczytania generowanej częstotliwości. Timer 555 operuje na napięciu od 4.5 do 16 volt, co może okazać się zbyt wysokim napięciem dla przetworników ADC większości mikrokontrolerów, bez zastosowania układów redukujących napięcie. Również z poziomu mikrokontrolera nie możemy cyfrowo sterować jaką częstotliwość powinna być wygenerowana w 555, gdyż ta zależy od rezystancji pomiędzy jego pinami.

Wersja PWM

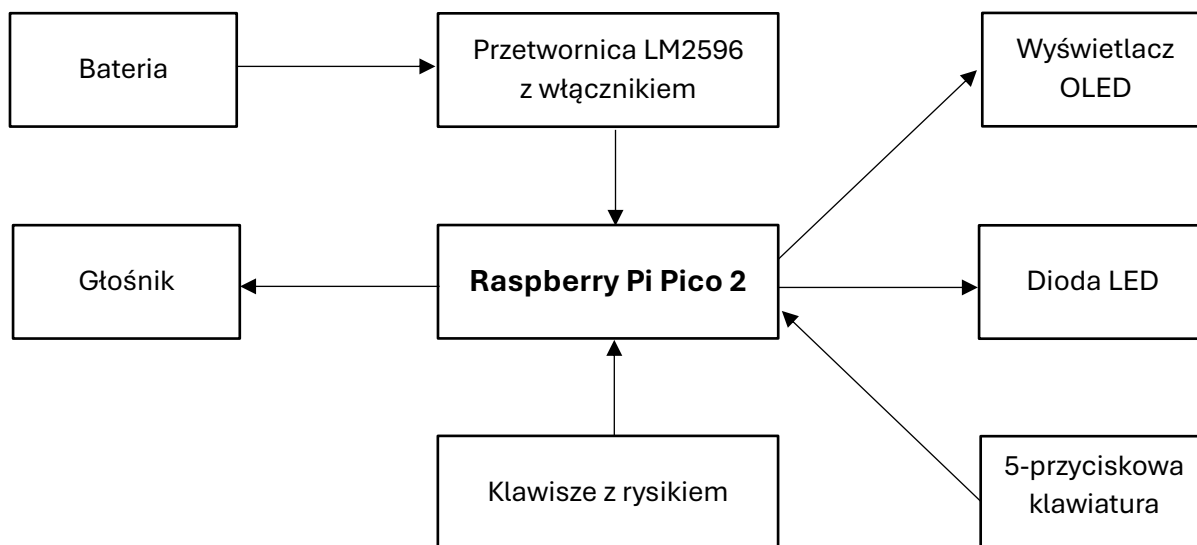
Zamiast korzystać z dedykowanych układów, większość mikrokontrolerów pozwala na generowanie fali prostokątnej za pomocą sygnału PWM. Wybrałem zatem takie rozwiązanie, bo znacząco upraszcza konstrukcję, a częstotliwość i wypełnienie sygnału można sterować programowo.



SYGNAŁ GENEROWANY PRZY UŻYCIU PWM

Wadą tego rozwiązania jest jednak jakość generowanych tonów, ponieważ funkcja PWM nie jest zoptymalizowana pod kątem sygnałów audio. Niemożliwe jest też wytworzenie innych kształtów fali niż prostokątna samym mikrokontrolerem. Natomiast jakość dźwięku nie będzie tutaj problemem.

Schemat blokowy



Opis poszczególnych bloków

Raspberry Pi Pico 2 – Serce urządzenia, odpowiedzialne za przetwarzanie danych wejściowych i wyjściowych, generowanie sygnału dźwiękowego oraz integrację wszystkich elementów urządzenia. Przechowuje dane, takie jak ustawienia, pamięć programu oraz zapisane utwory.

Wyświetlacz OLED – Jedno-calowy wyświetlacz odpowiedzialny za prezentowanie informacji z mikrokontrolera oraz komunikację z użytkownikiem. Zwiększa intuicyjność obsługi urządzenia i wyświetla menu z różnymi opcjami.

Dioda LED – Czerwona dioda, która zwiększa intuicyjność obsługi urządzenia. Migocze podczas nagrywania, a świeci na stałe podczas odtwarzania utworów, dopełniając wyświetlacz.

5-przyciskowa klawiatura – Umożliwia zbieranie danych od użytkownika i służy do nawigacji po elementach wyświetlanych na ekranie OLED.

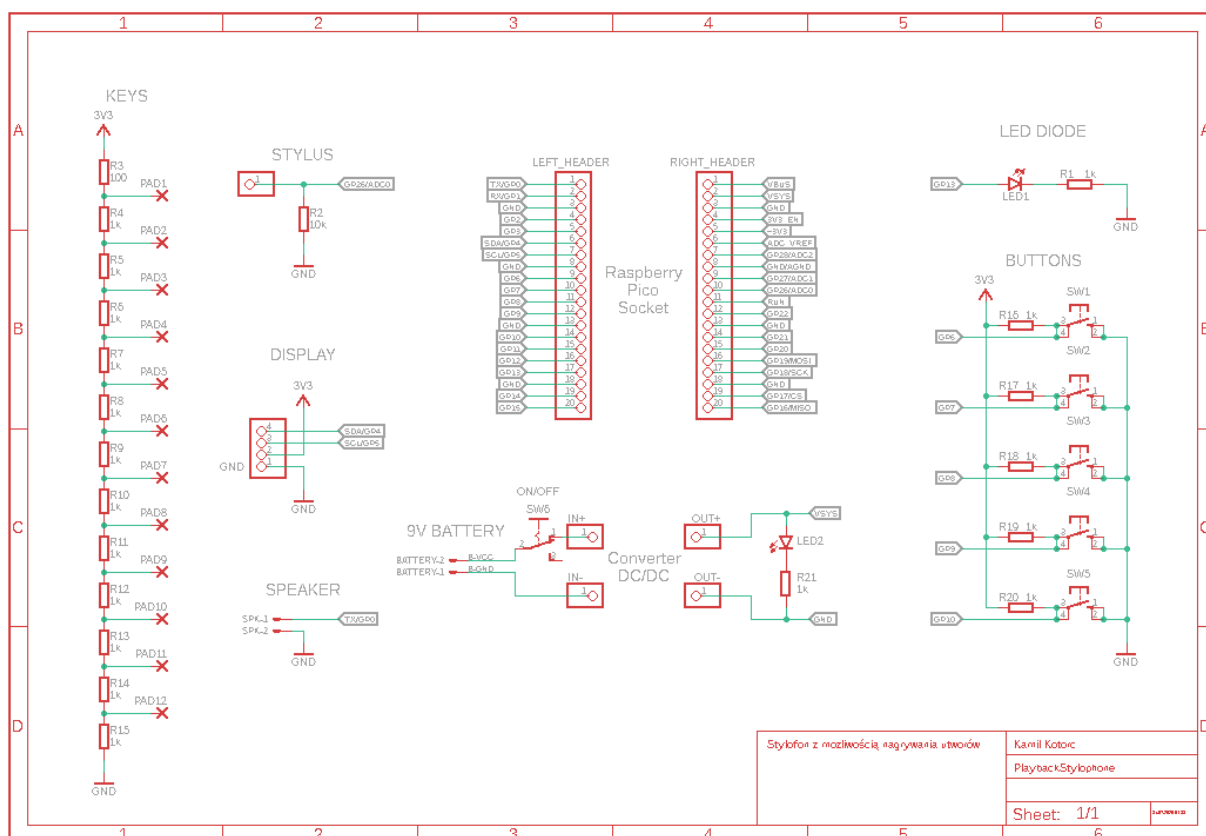
Klawisze z rysikiem – Po zetknięciu zamykają obwód, przesyłając do mikrokontrolera informację o naciśniętym klawiszu.

Głośnik – Mimo niewielkiej mocy (1W), generuje wyraźny dźwięk, przesyłany z mikrokontrolera.

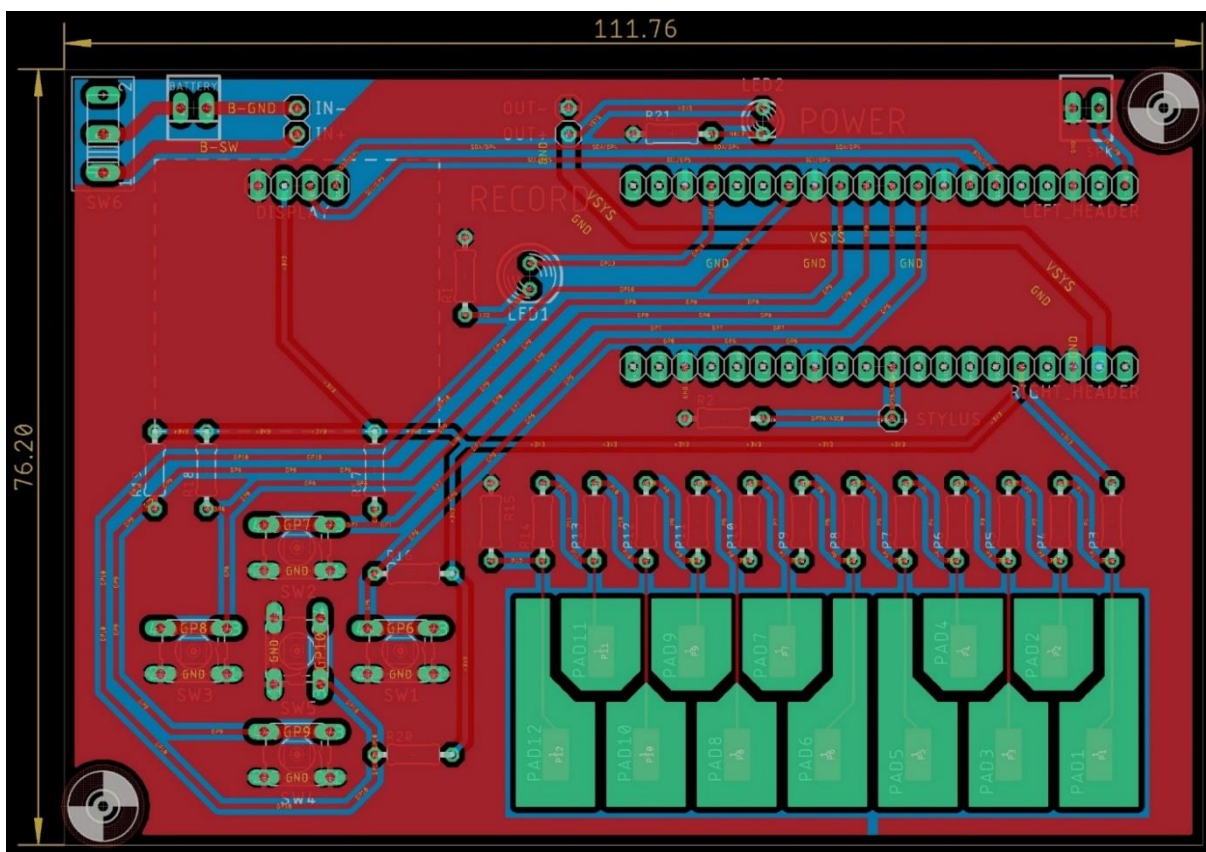
Bateria – Standardowa bateria 9V stanowi główne źródło zasilania urządzenia. Dzięki dwóm charakterystycznym wejściom jest łatwa do wymiany, a przy tym kompaktowa.

Przetwornica LM2596 – Obniża napięcie z 9V do 3,3V, akceptowalnego przez mikrokontroler, i zasila pozostałe elementy znajdujące się na płycie.

Schemat ideowy



Projekt płytki drukowanej



Lista elementów

NAZWA	ILOŚĆ
Raspberry Pi Pico 2	1
Dioda LED 5mm	2
Rezystor 1/4W 1kΩ	21
Rezystor 1/4W 10kΩ	1
Wyświetlacz OLED 0,96"	1
Przetwornica step-down LM2596	1
Tact Switch 6x6mm	5
Złącza damskie goldpin	5
Mikroprzełącznik bistabilny	1
Bateria 9V 4022 6LR61	1
Głośnik 1W 8Ohm	1

Oprogramowanie urządzenia

Algorytm działania oprogramowania

Oprogramowanie stylofonu działa w pętli głównej, zarządza dźwiękiem, wyświetlaczem oraz interakcją z użytkownikiem. Pozwala na zmianę parametrów, nagrywanie oraz odtwarzanie dźwięków.

Główne etapy działania to:

1. Inicjalizacja urządzeń peryferyjnych:
 - OLED
 - Przyciski
 - ADC
 - PWM
 - dioda LED
2. Wczytanie zapisanych ustawień z pliku *settings.json*.
3. Uruchomienie pętli menu głównego, pozwalającej użytkownikowi na wybór opcji.
4. Obsługa wybranych funkcji:
 - Regulacja głośności
 - Zmiana oktawy
 - Nagrywanie dźwięku
 - Odtwarzanie nagrania
5. Dynamiczne odtwarzanie dźwięków na podstawie wartości z czujnika ADC.
6. Zapis ustawień do pliku.

Opis zmiennych

volume – Poziom głośności (zakres 1-8).

tone – Wybór oktawy (1 – dolna, 2 – środkowa, 3 – górna).

recording – Lista przechowująca zapisane dźwięki w postaci par (częstotliwość, czas).

adc_thresholds – Progi wartości ADC dla przypisania konkretnej nuty.

lower_octave, middle_octave, higher_octave – Tablice częstotliwości dźwięków dla różnych oktaw.

Opis funkcji

save_single_setting(key, value) – Zapisuje pojedyncze ustawienie do pliku *settings.json*.

load_settings() – Wczytuje ustawienia zapisane w *settings.json*, jeśli plik istnieje.

get_note_index(adc_val) – Na podstawie wartości ADC zwraca indeks odpowiadający konkretnej nucie.

get_note_from_index(idx) – Zwraca częstotliwość dźwięku na podstawie indeksu i aktualnej oktawy.

update_live_audio() – Odczytuje wartość ADC i generuje odpowiadający jej dźwięk poprzez PWM.

display_menu(selected_item) – Wyświetla główne menu na ekranie OLED, podświetlając wybraną opcję.

volume_menu() – Obsługuje zmianę głośności i zapisuje ustawienie.

tone_menu() – Obsługuje zmianę oktawy i zapisuje ustawienie.

record_menu() – Nagrywa dźwięki grane na stylofonie, zapisując je w tablicy *recording*.

play_menu() – Odtwarza zapisane dźwięki poprzez generowanie odpowiednich częstotliwości PWM.

main() – Główna pętla obsługująca nawigację po menu oraz reakcję na wybór użytkownika.

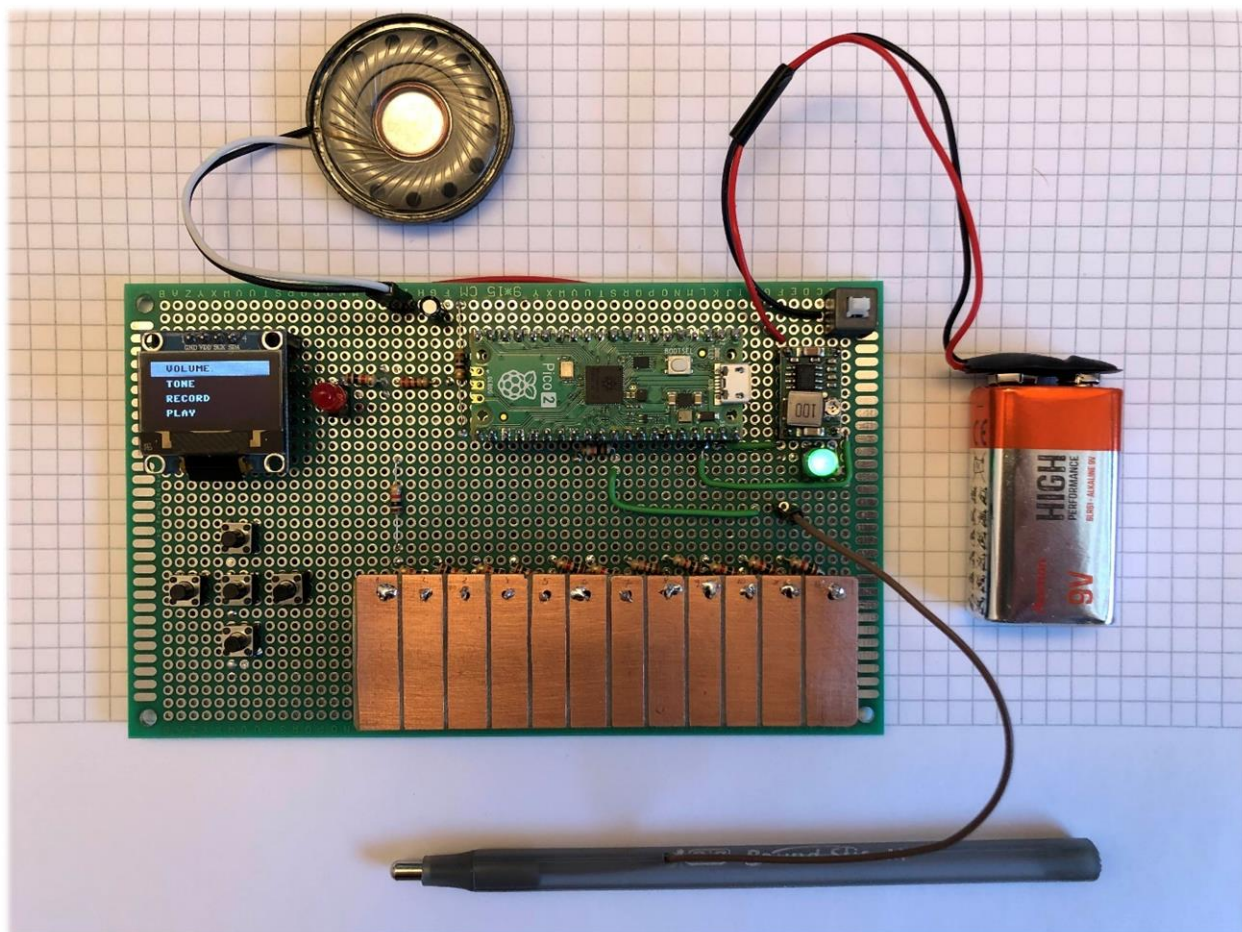
Szczegółowy opis kluczowej procedury

update_live_audio()

1. Odczytuje wartość ADC.
2. Sprawdza, czy wartość ADC odpowiada progowi nuty.
3. Jeśli tak, odczytuje częstotliwość z aktualnie wybranej oktawy.
4. Ustawia częstotliwość PWM na wyliczoną wartość.
5. Jeśli nie, wyłącza sygnał PWM.

Specyfikacja zewnętrzna urządzenia

Zdjęcie gotowego prototypu urządzenia



Elementy sterujące

- 5-przyciskowa klawiatura w lewym dolnym rogu urządzenia
- Metalowe klawisze z stylusem w dolnej części urządzenia
- Włącznik urządzenia w prawym górnym rogu

Elementy wykonawcze

- Wyświetlacz OLED po lewej stronie
- Czerwona dioda po prawej od wyświetlacza
- Zielona dioda w prawej części urządzenia
- Głośnik 1W znajdujący się w górnej części urządzenia

Reakcja oprogramowania

Tabela przedstawiająca zachowanie urządzenia w odpowiedzi na działania użytkownika

Działanie użytkownika	Reakcja urządzenia
Włączenie urządzenia przełącznikiem	Zapala się zielona dioda LED
Dotknięcie metalowego klawisza stylusem	Wygenerowanie odpowiedniego tonu dźwiękowego
Naciśnięcie przycisku funkcyjnego	W zależności od przycisku: <ul style="list-style-type: none">- Nawigacja po menu- Wybór opcji z menu- Cofnięcie do menu głównego- Ustawienie poziomu tonu lub głośności- Rozpoczęcie nagrywania lub odtwarzania
Rozpoczęcie nagrywania utworu	Czerwona dioda miga
Rozpoczęcie odtwarzania nagranych utworów	Czerwona dioda świeci ciągłym światłem do końca odtwarzania

Instrukcja obsługi urządzenia

Uruchomienie urządzenia

1. Podłącz baterię 9V typu 6LR61 do gniazda zasilania.
2. Włącz urządzenie za pomocą przełącznika zlokalizowanego w prawym górnym rogu obudowy.
3. Po włączeniu:
 - Zapali się zielona dioda LED.
 - Aktywuje się ekran wyświetlacza.
4. Urządzenie jest gotowe do pracy.
5. Aby wygenerować dźwięk, dotknij metalowego klawisza przy pomocy stylusa, zostanie odtworzony odpowiedni ton muzyczny.

Obsługa menu

Przycisk	Funkcja
Góra / Dół	Przejdź do kolejnej/poprzedniej pozycji menu; cofnięcie do menu głównego.
Lewo / Prawo	Zmiana wartości parametru (głośność / tonacja).
Środkowy (OK)	Zatwierdzenie wyboru; uruchomienie funkcji (nagrywanie / odtwarzanie).

Potencjalne usterki i sposoby naprawy

Objaw	Możliwa przyczyna	Sugerowane rozwiązanie
Ekran działa, zielona dioda nie świeci	Przepalona zielona dioda LED	Wymień diodę na nową
Zielona dioda świeci, ekran nie działa	Uszkodzony moduł wyświetlacza	Sprawdź połączenia, w razie potrzeby wymień wyświetlacz
Ekran i zielona dioda nie działają	Rozładowana bateria 9V	Wymień baterię na nową
Dioda i ekran działają, ale urządzenie nie wydaje dźwięku	Uszkodzony głośnik lub jego połączenie	Sprawdź przewody głośnika lub wymień głośnik

Programowanie układu

Programowanie układu następuje poprzez wpięcie kabla micro-USB do mikrokontrolera oraz podłączenie do komputera przy jednoczesnym trzymaniu przycisku BOOTSEL na mikrokontrolerze.

Testowanie

Przed wykonaniem finalnej wersji urządzenia, stylofon został przetestowany na płycie prototypowej. Proces testowania obejmował następujące etapy:

1. **Testowanie połączeń elektrycznych** – Sprawdzono poprawność podłączenia wszystkich elementów. Wykorzystano multimetr do weryfikacji ciągłości obwodów i poprawnego doprowadzenia napięcia do poszczególnych komponentów.
2. **Weryfikacja działania klawiatury i rysika** – Testowano reakcję mikrokontrolera na naciśnięcie przycisków oraz dotknięcie rysikiem klawiszy. Sprawdzano, czy każda akcja skutkuje generowaniem odpowiedniego dźwięku.
3. **Testowanie wyświetlacza OLED** – Zweryfikowano poprawność komunikacji z mikrokontrolerem, wyświetlanie informacji oraz responsywność zmian w menu.
4. **Sprawdzenie działania głośnika** – Podawano różne częstotliwości dźwięku, aby upewnić się, że głośnik poprawnie generuje wymagane dźwięki.
5. **Analiza pracy diody LED** – Testowano miganie oraz ciągłe świecenie diody w zależności od aktywnego trybu pracy urządzenia.
6. **Zasilanie i stabilność układu** – Monitorowano pobór prądu oraz stabilność działania układu przy różnych obciążeniach. Testowano także wydajność przetwornicy LM2596, oraz wyregulowano ją do obniżenia napięcia do 3.32V.

Odnosiniki

- [Strona projektu na GitHub](#)

Literatura

Raspberry Pi Pico 2 Datasheet: An RP2350-based microcontroller board.
- © 2023-2024 Raspberry Pi Ltd