



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI
I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Maciej Manuszewski

Nr albumu: 160809

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Automatyka i Robotyka

Profil: Systemy automatyki

PROJEKT DYPLOMOWY INŻYNIERSKI

Tytuł projektu w języku polskim: Projekt i budowa analizatora częstotliwości - stroik gitarowy

Tytuł projektu w języku angielskim: The design and construction of frequency analyzer guitar tuner

Opiekun pracy: dr inż. Krzysztof Cisowski

Data ostatecznego zatwierdzenia raportu podobieństw w JSA: 23.01.2022

STRESZCZENIE

Poniższa praca obejmuje projekt oraz konstrukcję analizatora częstotliwości podstawowej, który ma być wykorzystywany w roli stroika gitary elektrycznej.

W ramach tej pracy dokonano przeglądu już istniejących rozwiązań stroików elektronicznych. Przeanalizowano dostępne na rynku stroiki podłogowe. Bazując na tych rozważaniach obrano metodę realizacji zamierzonego celu.

Rozważono również szereg zagadnień teoretycznych. Przeanalizowano między innymi sposób działania gitary elektrycznej i ustaloną pasmo częstotliwości emitowanych przez nią dźwięków. Dokonano przeglądu metod służących do wyznaczania tonu podstawowego sygnału i w oparciu o przeprowadzoną analizę wybrano jedna z metod. Na drodze dalszych rozważań teoretycznych dokonano jej optymalizacji. Celem wprowadzonych modyfikacji było przyspieszenie algorytmu opracowanego na podstawie wybranej metody. Przeanalizowano również zagadnienia dotyczące próbkowania sygnałów. W oparciu o przeprowadzone rozważania udało się wyznaczyć minimalną częstotliwość próbkowania dla projektowanego rozwiązania oraz określić jej wpływ na rozdzielcość wykrywanego dźwięku.

W trakcie realizacji fizycznej i konstrukcji stroika wybrano docelowy mikrokontroler oraz wyświetlacz mający służyć jako interfejs użytkownika. Zaprojektowano i wykonano dodatkowy układ analogowy, którego celem jest poprawienie parametrów sygnału wytwarzanego przez przetworniki gitary elektrycznej tak, by możliwe było próbkowanie za pomocą przetwornika analogowo-cyfrowego wybranego mikrokontrolera. Zaimplementowano zmodyfikowaną metodę wykrywania tonu podstawowego nazwaną metodą autokorelacji celowanej (nazwa autorska). W ramach oprogramowania skonstruowanego stroika wykonano również interfejs użytkownika pozwalający na komunikację urządzenia z muzykiem.

Jako ostatni punkt tej pracy przeprowadzono szereg testów mających na celu zbadać dokładność wykonanego urządzenia.

Słowa kluczowe: gitara elektryczna, stroik podłogowy, częstotliwość podstawowa, częstotliwość próbkowania, metoda autokorelacji, przetwarzanie sygnałów, akwizycja sygnałów, analiza sygnałów, LED, mikrokontroler, wzmacniacz, przetwornik analogowo-cyfrowy

Dziedzina nauki i techniki zgodna z OECD: Nauki inżynierijne i techniczne, Elektrotechnika, elektronika, inżynieria informatyczna, Elektrotechnika i elektronika

ABSTRACT

The following thesis covers the design and construction of a fundamental frequency analyzer, meant to be used as a tuner for an electric guitar.

As part of this work, an overview of the already existing solutions of electronic tuners was made. The pedal tuners available on the market were analyzed. Based on these considerations, the method of achieving the intended goal was chosen.

Several theoretical issues were also considered. Among other things, the method of operation of the electric guitar was analyzed and the frequency range of the sounds it emits was determined. The methods for determining the fundamental tone of the signal were reviewed and one of the methods was selected based on the analysis. By further theoretical considerations, it was optimized. The purpose of the introduced modifications was to speed up the algorithm developed based on the selected method. The issues related to signal sampling were also analyzed. Based on the considerations, it was possible to determine the minimum sampling frequency for the designed solution and to determine its influence on the resolution of the detected sound.

During the physical implementation and construction of the tuner, the target microcontroller was selected as well as the display intended as the user interface. An additional analog circuit was designed and prepared to improve the parameters of the signal produced by the electric guitar pickups so that it could be sampled by an analog-to-digital converter of the selected microcontroller. A modified method of detecting the fundamental tone called the method of targeted autocorrelation (named by the author) has been implemented. As part of the software implementation, a user interface was also created, allowing the device to communicate with the musician.

As the last point of this work, several tests were carried out to check the accuracy of the manufactured device.

Keywords:electric guitar, pedal tuner, fundamental frequency, sampling rate, autocorrelation method, signal processing, signal acquisition, signal analysis, LED, microcontroller, amplifier, analog-to-digital converter

OECD consistent field of science and technology classification: Engineering and Technical Sciences, Electrical Engineering, Electronics and Information Engineering, Electrical and electronic engineering

Spis treści

Spis treści	6
1 Wstęp	10
2 Cel Pracy	11
3 Przegląd istniejących rozwiązań	12
3.1 Stroiki elektroniczne	12
3.2 Przegląd stroików podłogowych	13
4 Podstawy teoretyczne	15
4.1 Zasady działania gitary elektrycznej	15
4.2 Pasmo częstotliwości gitary elektrycznej	16
4.3 Metody wykrywania częstotliwości	18
4.3.1 Metoda autokorelacji	18
4.3.2 Metoda AMDF	18
4.3.3 Metoda cepstralna	19
4.4 Metoda autokorelacji celowej	19
4.5 Częstotliwość próbkowania	20
4.5.1 Minimalna częstotliwość próbkowania	20
4.5.2 Wpływ częstotliwości próbkowania na rozdzielczość wykrywanego dźwięku	21
5 Realizacja	23
5.1 Wybór mikrokontrolera	23
5.1.1 Pożądane komponenty mikrokontrolera	24
5.1.2 Wybrane płytki ewaluacyjne	24
5.2 Wybór wyświetlacza	25
5.2.1 Wyświetlacz TFT LCD	26
5.2.2 Wyświetlacz OLED	26
5.2.3 Matryca LED ze sterownikiem MAX7219	26
5.3 Tor analogowy	27
5.3.1 Schemat elektryczny	27
5.3.2 Parametry układu	28
5.3.3 Symulacja	31
5.4 Opis programu	33
5.4.1 Schemat blokowy przepływu programu	33
5.4.2 Architektura oprogramowania	34
5.4.3 Interfejs użytkownika	35
6 Testy	39
6.1 Przygotowanie środowiska testowego	39
6.1.1 Implementacja w środowisku MATLAB	39
6.1.2 Nagrania strun gitary	39

6.2 Testy w środowisku MATLAB	39
6.2.1 Sygnał sinusoidalny	39
6.2.2 Próbki gitary elektrycznej	40
6.2.3 Autokorelacja celowana	40
6.3 Testy na rzeczywistym układzie	44
6.3.1 Dokładność pomiaru	44
6.3.2 Czas trwania pomiary	44
7 Podsumowanie	45
Spis rysunków	47
Spis tabel	48
Wykaz literatury	49
Dodatek A zdjęcie wykonanego urządzenia	52

WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW

- MetodaAMDF* - Jedna z metod wykrywania częstotliwości podstawowej sygnału (ang. *Average Magnitude Difference Function*)
- CPU* - Procesor, jednostka centralna (ang. *Central Processing Unit*)
- RAM* - Pamięć o dostępie swobodnym (ang. *Random-Access Memory*)
- SRAM* - Statyczna pamięć o dostępie swobodnym (ang. *Static Random-Access Memory*)
- ADC* - Przetwornik analogowo cyfrowy (ang. *Analog to Digital Converter*)
- DMA* - Bezpośredni dostęp do pamięci (ang. *Direct Memory Access*)
- FPU* - Koprocesor arytmetyczny, jednostka zmienoprzecinkowa (ang. *Floating Point Unit*)
- SPI* - Szeregowy interfejs urządzeń peryferyjnych (ang. *Serial Peripheral Interface*)
- TFTLCD* - Wyświetlacz ciekłokrystaliczny w technologii cienkowarstwowych tranzystorów (ang. *Liquid-Crystal Display Thin Film Transistor*)
- SD* - Standard kart pamięci (ang. *Secure Digital*)
- OLED* - Organiczna dioda elektroluminescencyjna (ang. *Organic Light-Emitting Diode*)
- I2C* - Szeregową, dwukierunkowa magistrala przeznaczona do komunikacji wewnętrz urządzeń elektronicznych (ang. *Integrated Circuit to Integrated Circuit*)

1. WSTĘP

Historia strojenia instrumentów sięga aż do starożytności. Pierwszym odnotowanym instrumentem wymagającym strojenia jest jednostrunowy monochord. Jeśli wierzyć tradycji jego twórcą był Pitagoras. Eksperymenty uczzonego z tym starożytnym instrumentem miały doprowadzić do powstania pierwszego systemu muzycznego, zwanego od swojego twórcy, pitagorejskim [1]. Dawni muzycy zmuszeni byli do tego, by stroić instrumenty w oparciu o swoje własne rozeznanie częstotliwości słyszanych dźwięków. Współcześnie w tym celu można wykorzystać stroiki elektroniczne, pozwalające na nastrojenie instrumentu z dokładnością o jakaś kiedyś niektórzy artyści mogli tylko marzyć.

Poniższa praca zawiera projekt analizatora częstotliwości mogącego posłużyć jako stroik gitary elektrycznej. Niniejsze opracowanie obejmuje przegląd metod wyznaczania częstotliwości, projekt układu elektronicznego przetwarzającego badany sygnał oraz implementację algorytmu wykrywającego częstotliwość podstawową sygnału. W kolejnych rozdziałach przedstawiono zagadnienia teoretyczne dotyczące próbkoowania sygnałów oraz badania ich częstotliwości. Zaprezentowano również szczegóły dotyczące fizycznej realizacji projektu, implementację metody wybranej w ramach przeglądu oraz testy działania stroika.

2. CEL PRACY

Celem pracy jest zaprojektowanie i zbudowanie analizatora częstotliwości tak, by możliwe było wykorzystanie go do strojenia gitary elektrycznej. Na realizację tego celu składają się następujące zadania:

- Rozważenie idei zastosowania miernika częstotliwości akustycznej w urządzeniach do pomiaru dźwięków muzycznych.
- Dokonanie przeglądu urządzeń dostępnych na rynku.
- Dokonanie przeglądu najpopularniejszych metod pomiaru częstotliwości.
- Wykonanie układu elektronicznego toru przetwornika ADC.
- Budowa strojka.
- Implementacja algorytmu analizującego częstotliwość.
- Opracowanie interfejsu użytkownika.
- Przeprowadzenie testów strojka.
- Przygotowanie dokumentacji technicznej.

3. PRZEGŁĄD ISTNIEJĄCYCH ROZWIĄZAŃ

W tym rozdziale dokonano przeglądu metod strojenia gitar elektrycznych oraz przeanalizowano wybrane stroiki typu podłogowego.

Najbardziej podstawowym sposobem strojenia instrumentów muzycznych jest wykorzystanie przez muzyka wzorcowego źródła dźwięku. W procesie strojenia muzyk słuchając dźwięku referencyjnego porównuje go z dźwiękiem instrumentu i na podstawie słysanej różnicy częstotliwości dźwięków dokonuje korekty stroju. Jest to metoda, której dokładność zależy od umiejętności muzyka i jest obarczona potencjalnie dużym błędem, jeśli muzykowi brak doświadczenia w tym zakresie.

W charakterze referencyjnych źródeł dźwięku stosuje się najczęściej kamertony. Kamerton klasyczny jest źródłem dźwięku o częstotliwości 440 Hz , która to częstotliwość odpowiada dźwiękowi a^1 (a razkreslone) w systemie równomiernie temperowanym.



Rysunek 3.1: Kamerton klasyczny

3.1. Stroiki elektroniczne

Z powodu dużego błędu jakim obarczona jest powyższa metoda współcześnie stosuje się elektroniczne metody strojenia instrumentów. W szczególności dotyczy to instrumentów takich jak gitara elektryczna. Wyróżniamy następujące typy stroików elektronicznych:



(a) Stroik klasyczny



(b) Stroik na klips



(c) Stroik podłogowy

Rysunek 3.2: Przykłady stroików elektronicznych

Stroiki klasyczne, są wyposażone w mikrofon, który rejestruje zagrany na instrumencie dźwięk. Po zarejestrowaniu dźwięku analizowana jest jego częstotliwość i na tej podstawie określona zostaje jego wysokość. Stroiki tego typu są relatywnie uniwersalne, za ich pomocą możliwe jest strojenie, nie tylko gitar elektrycznych, ale również wielu instrumentów klasycznych. Urządzenia tego typu są jednak podatne na zakłócenia akustyczne. Strojenie instrumentu w pomieszczeniu, w którym prowadzona jest rozmowa lub panuje hałas jest utrudnione ze względu na występowanie innych źródeł dźwięków niż strojony instrument.

Stroiki na klips, mocowane są u góry gitary. Źródłem sygnału wejściowego są organa przenoszone przez gitarę po szarpnięciu struny przez muzyka. Dużą zaletą tego rodzaju stroików jest ich kompaktowość - są one małe i lekkie. Dzięki temu mogą pozostać na instrumencie cały czas bez wpływu na komfort jego użytkowania.

Stroiki podłogowe, są to stroiki dedykowane dla gitar elektrycznych. Wpinane między gitarę elektryczną a wzmacniacz elektroakustyczny. Analizują one sygnał elektryczny wytwarzany przez przetworniki, w które wyposażona jest każda gitara elektryczna. Taki sposób działania umożliwia umieszczenie stroika w szeregu efektów gitarskich używanych przez gitarzystę. Dzięki temu możliwe jest strojenie gitary nawet w trakcie trwania występu, bez potrzeby zmiany konfiguracji sprzętu. Niektóre stroiki podłogowe posiadają funkcję wyciszenia sygnału, dzięki czemu sygnał ze strojonej gitary nie jest w tym czasie przekazywany na wzmacniacz elektroakustyczny w wyniku czego dźwięk strojonego instrumentu nie jest słyszany przez publiczność.

W poniższej pracy skupiono się na konstrukcji stroika podłogowego.

3.2. Przegląd stroików podłogowych

W ramach analizy istniejących rozwiązań dokonano przeglądu trzech dostępnych na rynku stroików podłogowych. Wybrano następujące urządzenia.



(a) BOSS TU-3

(b) KORG pitchblack PB-01

(c) TC Electronic Polytune 2 Mini

Rysunek 3.3: Wybrane stroiki podłogowe

BOSS TU-3 - ulepszona wersja stroika TU-2 powszechnie uważanego za najlepiej sprzedający się na świecie stroik podłogowy [2]. Posiada odporny na odblaski, 21 segmentowy ledowy wyświetlacz z dodatkowym trybem wysokiej jasności, dedykowanym do wykorzystania urządzenia w plenerze. Stroik ten posiada tryb pracy pozwalający również na strojenie siedmiostrunowych oraz basowych gitar elektrycznych. Urządzenie to po włączeniu, w standardowej konfiguracji, tłumii sygnał z gitary w taki sposób, że nie jest on przekazywany dalej do wzmacniacza elektroakustycznego. Zarazem jest ono wyposażone w True Bypass (ang. prawdziwe obejście), który powoduje, że w momencie wyłączenia sygnał jest przekazywany bez zakłóceń i modyfikacji do wzmacniacza. Strojenie za pomocą tego stroika odbywa się z dokładnością do 1 centa, a zakres strojenia zamyka się w przedziale od dźwięku C_2 (C subkontra) o częstotliwości 16,35 Hz do dźwięku c^5 (c pięciokreślne) o częstotliwości 4186 Hz [3].

KORG pitchblack PB-01 - stroik prosty w użytkowaniu oraz cechujący się wysoka dokładnością pomiaru [2]. Posiada małą, wytrzymałą aluminiową obudowę z dużym, czytelnym wyświetlaczem. Cztery tryby pracy ledowego wyświetlacza dają możliwość dopasowania go do indywidualnych preferencji użytkownika. Stroik posiada duży zakres strojenia: od dźwięku E_2 (E subkontra) o częstotliwości 20,60 Hz do dźwięku c^5 (c pięciokreślne) o częstotliwości 4186 Hz. Wyposażony jest również w kalibrację dźwięku wzorcowego w zakresie od 436 Hz do 445 Hz. Można dzięki niemu stroić zarówno gitary elektryczne, jak i elektryczne gitary basowe [4]. Strojenie tym stroikiem odbywa się z dokładnością 1 centa [5].

TC Electronic Polytune 2 Mini - małe rozmiary stroika pozwalają na zaoszczędzenie miejsca i umożliwiają wykorzystanie wolnej przestrzeni na inne efekty gitарowe używane przez gitarzystów. Dzięki strojeniu polifonicznemu można za jego pomocą szybko i dokładnie nastroić wszystkie struny gitary jednocześnie. Wyposażony jest również w czujnik natężenia światła, który pozwala na automatyczne dostosowywanie jasności ekranu stroika. Dokładność strojenia dla tego stroika to około 0,5 centa w trybie pracy chromatycznym oraz 1 cent w trybie polifonicznym [6].

4. PODSTAWY TEORETYCZNE

W tym rozdziale omówiono konstrukcję i zasadę działania gitary elektrycznej. Przeanalizowano kilka z metod pozwalających na wyznaczenie tonu podstawowego sygnału. Omówiono optymalizację wybranej do implementacji metody. Przytoczono podstawowe twierdzenia dotyczące próbkowania sygnałów oraz uzasadniono dobór częstotliwości próbkowania wykorzystanej przy realizacji projektu.

4.1. Zasady działania gitary elektrycznej

W gitarach klasycznych i akustycznych, źródłem słyszanego dźwięku są wprawione w drgania struny. Wibracje strun wytwarzają fale akustyczne odbierane przez człowieka. Pudło rezonansowe, które jest niezbędnym elementem każdej gitary klasycznej i akustycznej, służy jako wzmacniacz akustyczny sygnału wytworzonego przez wprawione w drgania struny.



Rysunek 4.1: Gitara akustyczna

W gitarze elektrycznej pierwotnym źródłem drgań są również struny instrumentu. Inaczej jednak niż w przypadku opisanych powyżej klasycznych i akustycznych odpowiedników, fala akustyczna wytworzona przez wprawione w drgania struny gitary, nie jest głównym źródłem sygnału odpowiedzialnego za wytwarzanie dźwięków utożsamianych z grą na gitarze elektrycznej.



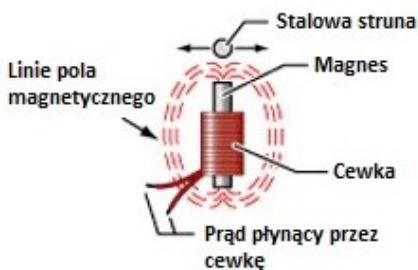
Rysunek 4.2: Gitara elektryczna

Tym źródłem są przetworniki, będące niezbędnym elementem każdej gitary elektrycznej. Wytwarzają one sygnał elektryczny, który jest następnie przetwarzany i zamieniany na dźwięk przez zewnętrzny wzmacniacz elektroakustyczny.



Rysunek 4.3: Przetwornik gitary elektrycznej

Osadzone w ciele gitary, zaraz pod strunami, przetworniki zamieniają wibrację strun na sygnał elektryczny. Typowy przetwornik zbudowany jest z sześciu magnesów osadzonych w plastikowej obudowie i drutu, który jest nawinięty na nie w taki sposób, aby tworzył cewkę (lub kilka niezależnych cewek). Stalowe struny drgające w polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy powodują indukowanie się prądu w obwodzie elektrycznym. Częstotliwość zaindukowanego sygnału elektrycznego odpowiada częstotliwości z jaką drgają struny [7].



Rysunek 4.4: Schemat działania przetwornika w gitarze elektrycznej

W dalszej części tej pracy skupiono się na analizie sygnału elektrycznego generowanego przez przetworniki gitary elektrycznej.

4.2. Pasmo częstotliwości gitary elektrycznej

Gitara elektryczna jako instrument muzyczny jest w stanie wyemitować dźwięki o tonie podstawowym tylko z pewnego określonego zakresu częstotliwości. Dla 24 progowej gitary (w stroju standardowym) zakres ten zamyka się w przedziale od 82,41 Hz do 1318,51 Hz [8]. Do nastrojenia gitary wykorzystuje się jednak dużo mniejszy zakres częstotliwości. W stroju standardowym, dla przyjętej częstotliwości odniesienia $a^1 = 440 \text{ Hz}$, 6 strun gitary elektrycznej stroi się odpowiednio do dźwięków E (82,41 Hz), A (110,00 Hz), d (146,83 Hz), g (196,00 Hz), b (246,94 Hz), e^1 (329,63 Hz) [9].

Mając na uwadze istnienie różnych strojów gitarowych oraz preferencje muzyków w dalszych rozważaniach przyjęto zakres częstotliwości, w których może być strojona gitara elektryczna jako 63 do 360 Hz. Dźwięki muzyczne o częstotliwościach należących do tego zakresu zobrazowano w poniżej tabeli.

Oktawa	Dźwięk	Częstotliwość [Hz]
Duża	C	65,406392
	Cis	69,295658
	D	73,416193
	Dis	77,781747
	E	82,40689
	F	87,307059
	Fis	92,498607
	G	97,99886
	Gis	103,826175
	A	110,000001
	Ais	116,540942
	H	123,470827
Mała	c	130,812784
	cis	138,591317
	d	146,832385
	dis	155,563493
	e	164,81378
	f	174,614118
	fis	184,997213
	g	195,99772
	gis	207,652351
	a	220,000002
	ais	233,081883
	h	246,941653
Razkreślna	c ¹	261,625568
	cis ¹	277,182634
	d ¹	293,664771
	dis ¹	311,126987
	e ¹	329,62756
	f ¹	349,228235

Tablica 4.1: Dźwięki muzyczne i odpowiadające im częstotliwości podzielone na oktawy [10]

Zdefiniowany powyżej zakres częstotliwości mogących wystąpić w procesie strojenia gitary elektrycznej oznacza, że widmo badanego musi mieć najniższy prążek o częstotliwości co najmniej 63 Hz.

Cent został wprowadzony w XIX w. przez Alexandra Johna Ellisa, jest jednostką, pozwalającą wyrazić odległość między dźwiękami. Cent jest miarą logarytmiczną, która wyraża odległość między dwoma dźwiękami równą jednej setnej półtonu równomiernie temperowanego lub 1/1200 części oktawy. Stosunek częstotliwości dźwięków x i y odległych o jeden cent można wyrazić wzorem [11].

$$\frac{f_x}{f_y} = \sqrt[1200]{2} \approx 1,0006 \quad (4.1)$$

W tej pracy zdecydowano, że dźwięki odległe maksymalnie o **dwa centy** od częstotliwości nominalnej pożądanego dźwięku będą uznawane za dźwięki poprawnie nastrojone.

4.3. Metody wykrywania częstotliwości

W tym podrozdziale rozważania przeprowadzono w oparciu o materiały do wykładu *Elektroniczne instrumenty muzyczne*, oraz materiały do wykładu *Akustyka Muzyczna*, umieszczone na stronie Katedry Systemów Multimedialnych, na wydziale Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej [12], [13].

Ton podstawowy - inaczej częstotliwość podstawowa, składowa główna lub składowa podstawowa. Jest to najniższy ton w szeregu harmonicznym. Oznacza to, że ma on najmniejszą częstotliwość pośród wszystkich prążków widma. Od jego częstotliwości zależy wysokość dźwięku [14].

Istnieją różne metody wykrywania tonu podstawowego. Można dokonać podziału tych metod na czasowe, częstotliwościowe oraz hybrydowe. Metody czasowe operują na sygnale w dziedzinie czasu. Metody częstotliwościowe w dziedzinie częstotliwości - oznacza to, że wymagane jest wcześniejsze przekształcenie sygnału do jego postaci widmowej. Natomiast algorytmy hybrydowe operują na sygnale w obu wymienionych powyżej dziedzinach. W tej pracy postanowiono rozważyć następujące trzy metody.

4.3.1. Metoda autokorelacji

Metoda autokorelacji - jest to algorytmem realizowanym w dziedzinie czasu, który polega na skorelowaniu badanego sygnału z samym sobą. Funkcję autokorelacji dla sygnału dyskretnego można opisać wzorem:

$$r[n] = \sum_m x(m)x(m+n) \quad (4.2)$$
$$m \in [0, N], n \in [-N, N]$$

gdzie:

x - badany sygnał

m - numer próbki

n - opóźnienie sygnału

N - ilość próbek w badanym sygnale

Ton podstawowy wyznaczany jest poprzez znalezienie lokalnego maksimum dla n różnego od zera.

4.3.2. Metoda AMDF

Metoda AMDF została opisana i zdefiniowana przez *R. L. Millera i E. S. Weibela*. Jest to algorytm realizowany w dziedzinie czasu bazujący na badaniu różnicy sygnału opóźnionego względem sygnału oryginalnego. Dla dyskretnego sygnału metoda AMDF dana jest następującym wzorem funkcji w postaci różnicowej:

$$AMDF(n) = \sum_{m=1}^M |x(m) - x(m+n)|^k, k = 1 \quad (4.3)$$

gdzie:

x - badany sygnał

n - opóźnienie sygnału

k - gęstości, dla metody AMDF przyjmuje wartość 1.

Częstotliwość podstawowa jest wyznaczana poprzez znalezienie lokalnego minimum wynikowej funkcji dla n różnego od zera.

4.3.3. Metoda cepstralna

Metoda cepstralna - w tej metodzie obliczana jest odwrotna transformata Fouriera dla logarytmu widma amplitudowego badanego sygnału. Metoda ta dana jest wzorem:

$$C_r = \sum_{n=1}^m \ln(X_n) \cdot \cos\left(\frac{r \cdot n\pi}{m}\right) \quad (4.4)$$

Ton podstawowy szacowany jest z położenia dominującego maksimum w dziedzinie cepstrum.

4.4. Metoda autokorelacji celowanej

Do zrealizowania algorytmu wykrywania tonu podstawowego zdecydowano się wykorzystać metodę autokorelacji. Ze względu na dużą liczbę wykonywanych operacji, a tym samy długi czas trwania algorytmu dokonano modyfikacji metody. By uniknąć pomyłki, w dalszej części pracy będzie używana autorska nazwa algorytmu - **metoda autokorelacji celowanej**.

W zwykłej postaci tego algorytmu, funkcja autokorelacji jest obliczana dla każdego *opóźnienia* sygnału. Oznacza to, że dla sygnału o długości N , liczba *opóźnień* $n \in [-N+1, N]$ dla których należy obliczyć funkcje autokorelacji wynosi $2N - 1$. Duża liczba *opóźnień* w metodzie autokorelacji skutkuje mnogością wykonywanych obliczeń. Celem optymalizacji tej metody jest zmniejszenie ich liczby.

Korzystając z właściwości autokorelacji, którą jest symetria sprzężona (ang. conjugate symmetry) [15] można przyjąć, że do wyznaczenia tonu podstawowego wystarczy obliczyć funkcje autokorelacji dla połowy *opóźnień* sygnału. Pozwoli to zredukować zakres zbioru *opóźnień* do $n \in [0, N]$.

W metodzie autokorelacji celowanej, funkcja autokorelacji liczona jest tylko dla niektórych *opóźnień* sygnału. Uznano, że przy odpowiednio wysokiej częstotliwości próbkowania, można obliczyć funkcję autokorelacji dla co któregoś *opóźnienia* sygnału (szczegóły poniżej) i w wyniku tych obliczeń otrzymać sygnał, który pozwoli na oszacowanie wstępnej pozycji lokalnego maksimum. Sygnał ten będzie w dalszych rozważaniach nazywany **sygnałem przybliżonym**, a sygnał będący wynikiem normalnej metody autokorelacji będzie nazywany **sygnałem normalnym**.

W trakcie obliczania *sygnału przybliżonego*, przy każdym obliczeniu funkcji autokorelacji zostanie każdorazowo pominięte k *opóźnień* sygnału. *Sygnał przybliżony* będzie miał więc N/k próbek, a zbiór *opóźnień* sygnału można opisać zbiorem $n \in \{0, k, 2k, \dots, N/k\}$.

Gdy znana jest pozycja lokalnego maksimum w *sygnale przybliżonym* znana również jest odpo-

wiadającą jej pozycja w *sygnale normalnym*. Znalezione w *sygnale przybliżonym* lokalne maksimum będzie znajdować się w okolicy lokalnego maksimum w *sygnale normalnym*. Obliczenie funkcji autokorelacji tylko dla pewnej określonej liczby *opóźnień* wokół pozycji odpowiadającej lokalnemu maksimum *sygnału przybliżonego* da w wyniku pewien fragment *sygnału normalnego*, który zawierał będzie lokalne maksimum odpowiadające właściwemu lokalnemu maksimum w pełnym *sygnale normalnym*.

Postanowiono, że liczba k zostanie wyznaczona doświadczalnie w trakcie implementacji metody autokorelacji celowanej.

Znajomość położenia lokalnego maksimum funkcji, dla n różnego od zera, pozwala wyznaczyć długość okresu badanego sygnału w próbkach. Będzie miał on długość odpowiadającą odległości między globalnym maksimum ($n = 0$) a wyznaczonym maksimum lokalnym. By oszacować okres próbkowanego sygnału analogowego należy skorzystać z następującego wzoru:

$$f = \frac{f_s}{T} \quad [\text{Hz}] \quad (4.5)$$

gdzie:

f - częstotliwość badanego sygnału analogowego

f_s - częstotliwość z jaką sygnał został spróbkowany

T - okres sygnału dyskretnego wyznaczony w liczbie próbek

4.5. Częstotliwość próbkowania

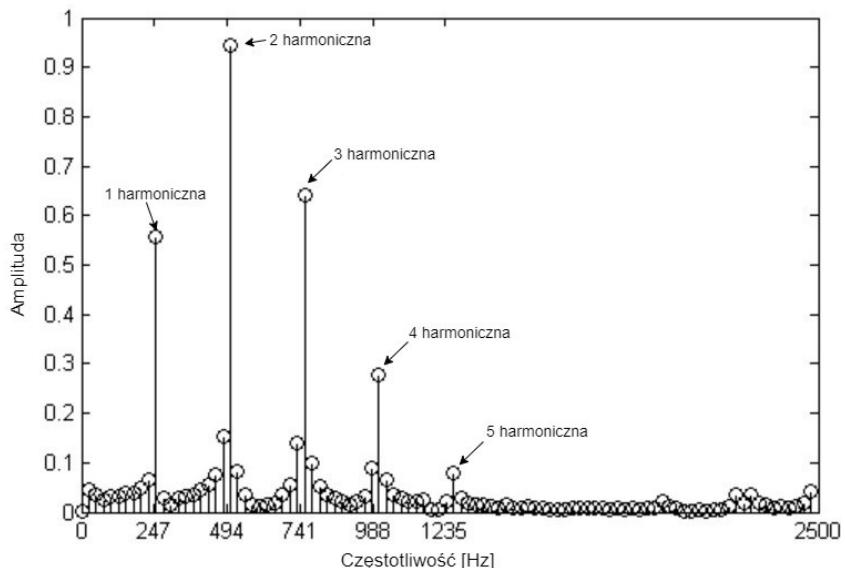
Twierdzenie o próbkowaniu, inaczej też twierdzenie Whittakera - Nyquista - Kotielnikowa - Shannona, stanowi o tym, że aby sygnał dyskretny, powstały w wyniku próbkowania sygnału analogowego, zawierał wszystkie informacje o tym sygnale musi on być próbkowany z częstotliwością wyższą niż dwukrotność częstotliwości sygnału analogowego [16].

4.5.1. Minimalna częstotliwość próbkowania

W oparciu o publikacje [17] można założyć, że pasmo użytecznego sygnału z przetwornika gitary elektrycznej zawiera się w pierwszych pięciu harmonicznych, co widać na wykresie na Rysunku 4.5.

Odnosząc się do twierdzenia o próbkowaniu, należy próbkować sygnał z częstotliwością przynajmniej 2 razy większą niż częstotliwość najwyższej składowej harmonicznej występującej w paśmie użytecznego sygnału. Zapewnia to, że sygnał spróbkowany będzie wierną reprezentacją sygnału analogowego [17].

Zakładając, że najwyższa częstotliwość podstawowa będzie wynosić 360 Hz , jej piąta składowa harmoniczna będzie miała wartość 1800 Hz . Oznacza to, że minimalna częstotliwość próbkowania powinna wynosić 3600 Hz .



Rysunek 4.5: Widmo sygnału z gitary elektrycznej, dla struny h , o częstotliwości podstawowej 247 Hz

4.5.2. Wpływ częstotliwości próbkowania na rozdzielcość wykrywanego dźwięku

Częstotliwość próbkowania, a tym samym ilość próbek zebranych w danej jednostce czasu, ma bezpośredni wpływ na rozdzielcość wykrywanej częstotliwości podstawowej.

W celu wyznaczenia liczby próbek x przypadającej na jeden okres T sygnału spróbkowanego z częstotliwością f_s skorzystano z następującego wzoru

$$x = f_s \cdot T \quad (4.6)$$

Pozwala to określić rozdzielcość r . Jest ona najmniejszą obserwowalną zmianą wartości wykrywanej częstotliwość podstawowej f .

$$r = \frac{f}{x} = \frac{f}{f_s \cdot T} = \frac{f}{f_s \cdot \frac{1}{f}} = \frac{f^2}{f_s} \quad [\text{Hz}] \quad (4.7)$$

Postanowiono wyznaczyć rozdzielcość pomiaru częstotliwości podstawowej dla dwóch sygnałów. Sygnału o tonie podstawowym $f_1 = 63 \text{ Hz}$ i sygnału o tonie podstawowym $f_2 = 360 \text{ Hz}$. Rozdzielcość wyznaczono dla częstotliwości próbkowania $f_s = \{48 \text{ kHz}, 96 \text{ kHz}, 192 \text{ kHz}\}$. Wyniki obliczeń umieszczone w Tablicy 4.2.

Częstotliwość próbkowania	$f_s = 48 \text{ kHz}$	$f_s = 96 \text{ kHz}$	$f_s = 192 \text{ kHz}$
$f_1 = 63 \text{ Hz}$	$r = 0,0827$	$r = 0,0413$	$r = 0,0207$
$f_2 = 360 \text{ Hz}$	$r = 2,7$	$r = 1,35$	$r = 0,675$

Tablica 4.2: Rozdzielcość pomiaru częstotliwości próbkowania dla sygnałów o tonach podstawowych $f_1 = 63 \text{ Hz}$, $f_2 = 360 \text{ Hz}$

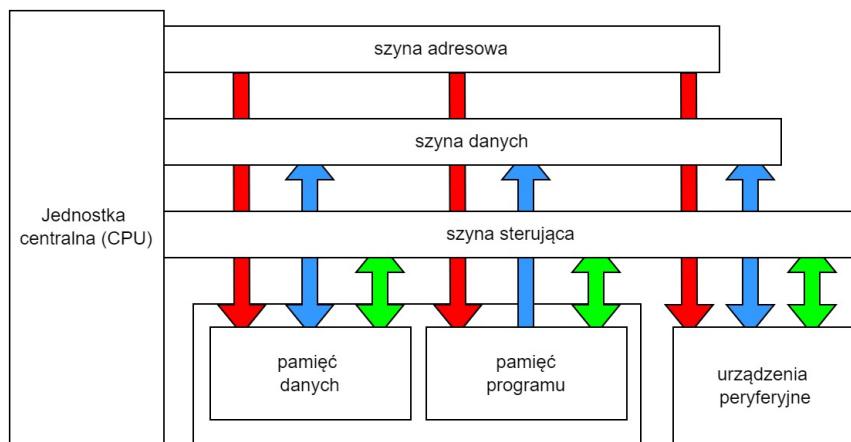
W oparciu o wyniki zawarte w powyższej tabeli stwierdzono, że pomiar częstotliwości podstawowej sygnału będzie najdokładniejszy dla częstotliwości próbkowania $f_s = 192 \text{ kHz}$.

5. REALIZACJA

W tym rozdziale opisano fizyczną realizację projektu oraz implementację algorytmu autokorelacji celowanej.

5.1. Wybór mikrokontrolera

Informacje i rozważania w tym podrozdziale zostały oparte o publikację [18]. **Mikrokontroler** jest to pojedynczy układ cyfrowy wyposażony w wyspecjalizowany mikroprocesor i niezbędne do jego autonomicznej pracy podzespoły w całości zamknięte w jednym układzie scalonym. Zawiera on również wszystkie podstawowe elementy komputera. Należą do nich jednostka centralna, nazywana też procesorem lub CPU (ang. central processing unit), pamięć programu, pamięć danych i układy peryferyjne. Na poniższym schemacie zobrazowano uproszczoną budowę mikrokontrolera.



Rysunek 5.1: Uproszczona budowa mikrokontrolera

Jako dwie najważniejsze cechy procesora zawartego w mikrokontrolerze określa się [18]:

- **Szerokość szyny danych**, definiuje architekturę wewnętrzną procesora. Typowe szerokości to 8-bitowa, 16-bitowa lub 32-bitowa
- **Częstotliwość sygnału zegarowego**, jest to częstotliwość z jaką taktowane są operacje wykonywane przez jednostkę centralną.

Sposób działania mikrokontrolera można opisać w następujący uproszczony sposób. Procesor (CPU) realizuje program zapisany w pamięci programu, jest to najczęściej pamięć nieulotna typu Flash. Zmienne wykorzystywane przez program zapisywane są w pamięci danych, która jest pamięcią typu RAM (pamięcią o dostępie swobodnym ang. random-access memory). Operacje wykonywane przez CPU taktowane są sygnałem zegarowym, którego źródłem może być zewnętrzny oscylator kwarcowy, a do wszelkiej komunikacji z światem zewnętrznym mikrokontroler wykorzystuje układy peryferyjne.

Mikrokontrolery różnią się między sobą nie tylko najistotniejszymi cechami wbudowanej w mikrokontroler jednostki centralnej i parametrami każdego w wymienionych powyżej elementów. Mogą być wyposażone w:

żone w różne wewnętrzne bloki funkcyjne pozwalające na realizację wyspecjalizowanych zadań, jak również w różne urządzenia peryferyjne, których celem jest odbieranie lub wysyłanie danych poza układ scalony.

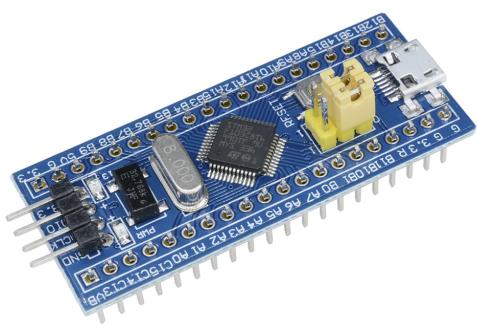
5.1.1. Pożądane komponenty mikrokontrolera

Wyznaczono kilka komponentów mikrokontrolerów, należących do wspomnianych powyżej grup, potrzebnych do realizacji tego projektu.

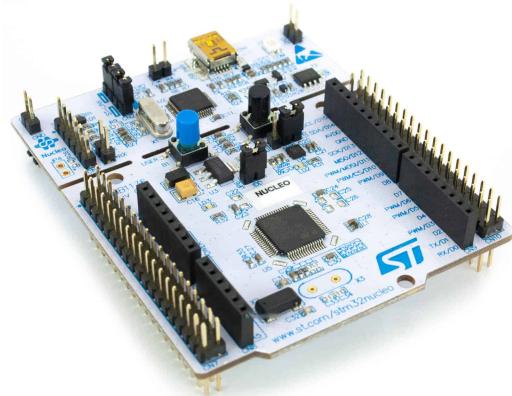
- **ADC** (przetwornik analogowo cyfrowy ang. analog to digital converter), jego zadaniem jest zamiana odbieranego sygnału analogowego na sygnał cyfrowy.
- **Kontroler DMA** (kontroler bezpośredniego dostępu do pamięci ang. direct memory access), dodatkowy układ pozwalający na bezpośredni dostęp do pamięci z pominięciem jednostki centralnej. Jego wykorzystanie pozwala na nieangażowanie procesora w operacje zapisu danych do pamięci.
- **Koprocesor arytmetyczny, FPU** (jednostka zmiennoprzecinkowa ang. Floating Point Unit), układ wspierający jednostkę centralną w obliczeniach. Jego wykorzystanie pozwala znacząco przyspieszyć wykonywanie się operacji na liczbach zmiennoprzecinkowych.
- **Kontroler transmisji szeregowej SPI** (szeregowy interfejs urządzeń peryferyjnych ang. Serial Peripheral Interface), wbudowany układ pozwalający na realizację transmisji szeregowej za pomocą szeregowego interfejsu urządzeń peryferyjnych.

5.1.2. Wybrane płytki ewaluacyjne

W celu wybrania właściwej do realizacji projektu płytki ewaluacyjnej, wyposażonej w wbudowany mikrokontroler, rozważono dwa następujące modele.



(a) BluePill z mikrokontrolerem STM32F103C8T6



(b) Nucleo-F411RE z mikrokontrolerem STM32F411RET6

Rysunek 5.2: Wybrane płytki ewaluacyjne

Istotne do realizacji projektu parametry zestawiono w tabeli poniżej. Do porównania wykorzystano dane z źródeł [19], [20].

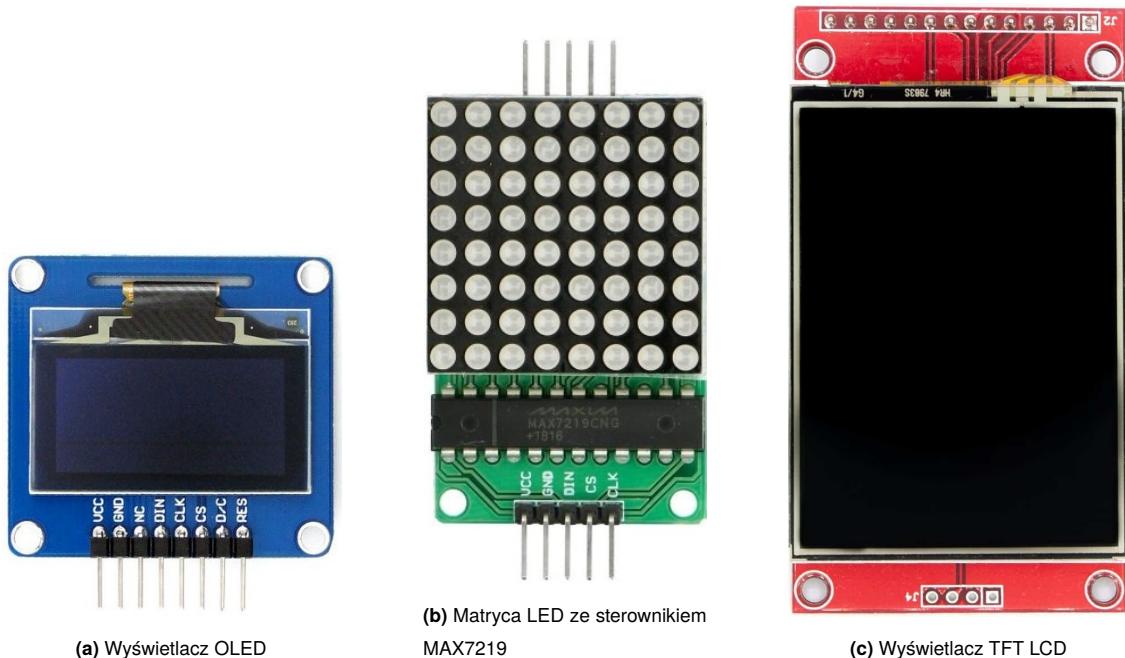
Mikrokontroler	BluePill	Nucleo-F411RE
Architektura	32-bitowa	32-bitowa
Wielkość pamięci Flash	64 kB	512 kB
Wielkość SRAM	20 kB	128 kB
Maksymalna częstotliwość taktowania CPU	72 MHz	100 MHz
Ilość kanałów ADC	2	1
Rozdzielcość ADC	12-bit	12-bit
Kontroler DMA	7 strumieni	16 strumieni
FPU	brak	posiada
Ilość kanałów SPI	2	5

Tablica 5.1: Porównanie parametrów płyt Bluepill i Nucleo-F411RE

Pomimo braku koprocessora FPU, który został przewidziany jako uproszczenie implementacji algorytmu autokorelacji celowanej, płytką ewaluacyjną *BluePill* spełniała pierwotne założenia projektowe. Została jednak wyeliminowana w pierwszych etapach implementacji, ze względu na małą pamięć typu RAM. Równie kłopotliwa okazała się potrzeba podłączenia zewnętrznego układu w celu debugowania kodu wgranego na mikrokontroler. Konstrukcja i podatny na wypięcie sposób podłączenia tego układu do płytki skutkuje częstym zrywaniem łącza z komputerem. Zdecydowano się więc na wykorzystanie płytki *Nucleo-F411RE*, jej 512 kB pamięci RAM okazało się w zupełności wystarczające. Wbudowany w nią podzespoł *ST-Link V2* umożliwiający debugowanie programu w stworzonym przez producenta środowisku znaczaco usprawnił i uprościł proces implementacji algorytmu. Dodatkowa jednostka arytmetyczna pozwoliła na opracowanie pierwszych iteracji oprogramowania, bez potrzeby zbytniego przejmowania się operacjami na liczbach zmienoprzecinkowych.

5.2. Wybór wyświetlacza

Projekt stroika podłogowego zakłada zaprojektowanie interfejsu pozwalającego na komunikację urządzenia z użytkownikiem. Musi to być rozwiązanie pozwalające potencjalnemu muzykowi na weryfikację procesu strojenia. W tym celu zdecydowano się wyposażyć projektowane urządzenie w wyświetlacz. Rozważano następujące typy.



Rysunek 5.3: Wybrane typy wyświetlaczy

5.2.1. Wyświetlacz TFT LCD

Wyświetlacz TFT LCD 2,4” ma rozdzielcość 240 x 320 px. Komunikacja z nim odbywa się przez interfejs SPI. Posiada slot na karty SD oraz możliwość sterowania dotykiem [21]. Wyświetlacz wykonane w technologii TFT LCD (wyświetlacz ciekłokrystaliczny w technologii cienkowarstwowych tranzystorów ang. liquid-crystal display thin film transistor) są tak zwanymi matrycami aktywnymi, w których każdy piksel jest indywidualnie kontrolowany przez cztery tranzystory. Trzy z nich odpowiedzialne są za emitowanie podstawowych barw, a jeden pozostały steruje jasnością piksela. Wyświetlacz ten został ostatecznie odrzucony ze względu na duży koszt [21] oraz potencjalnie skomplikowany sposób sterowania.

5.2.2. Wyświetlacz OLED

Wyświetlacz OLED 1,3” ma rozdzielcość 128 x 64 px. Możliwa jest komunikacja przez interfejsy SPI oraz I2C. Sterowanie odbywa się za pomocą sterownika *SH1106* [22]. Wyświetlaczki wykonane w technologii OLED (organiczna dioda elektroluminescencyjna ang. organic light-emitting diode) składają się z warstw przewodzącej i emisywnej, wykonanych z przewodzących organicznych polimerów, oraz katody i anody. OLED zaczyna świecić, gdy po przyłożeniu do niej napięcia przepływające elektryny wpadają w powstałe dziury elektronowe, w wyniku czego emitowana jest energia w postaci fotonów. Wyświetlaczki wykonane w tej technologii nie wymagają dodatkowego źródła światła, są bardzo cienkie, a ich kolor zależy od składu chemicznego warstw wyświetlacza. Ten konkretny wyświetlacz został odrzucony ze względu na mały rozmiar, który skutkuje trudnym do odczytania obrazem. Koszt wyświetlaczki OLED o większej przekątnej jest nieakceptowalny [23].

5.2.3. Matryca LED ze sterownikiem MAX7219

Ostatecznie zdecydowano się wykorzystać **Matrycę LED** 8x8 o rozmiarach 32 x 32mm. Układ wyposażony jest w sterownik **MAX7219**, który pozwala na sterowanie 64 niebieskimi diodami LED znajdującymi się w matrycy. Komunikacja z sterownikiem odbywa się przez interfejs SPI [24]. Rozwiązanie to zostało wybrane

ze względu na jego czytelność. Jednoliterowe komunikaty utworzone z wzoru pojedynczych świecących diod LED są widoczne nawet z dużej odległości. Pod uwagę wzięto również walory estetyczne.

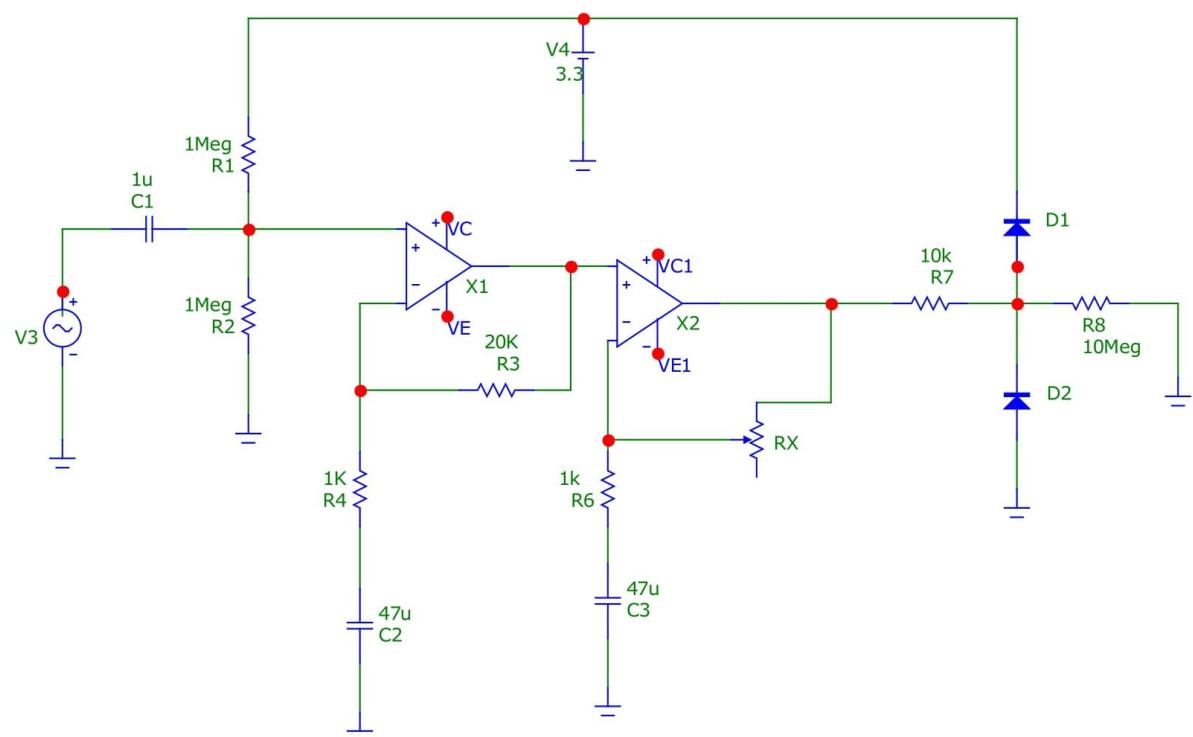
5.3. Tor analogowy

Realizacja projektu strojka podłogowego wymaga wprowadzenia dodatkowego układu analogowego. Opracowanie takiego systemu było konieczne z kilku powodów.

- Sygnał generowany przez przetworniki gitary elektrycznej jest sygnałem bipolarnym. W celu wykorzystania pełnego zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego należy przekształcić sygnał do postaci unipolarnej. Osiągnięto to przez wprowadzenie składowej stałej.
- Konieczne jest odpowiednie wzmacnianie sygnału tak, aby dostosować jego amplitudę do zakresu pomiarowego przetwornika analogowo-cyfrowego użytego mikrokontrolera.
- Należy wprowadzić ograniczenie amplitudy sygnału w celu ochrony przetwornika przed napięciem wychodzącym poza zakres jego pracy.

Projekt układu elektronicznego oparto o następującą publikację [17].

5.3.1. Schemat elektryczny



Rysunek 5.4: Schemat elektryczny toru analogowego

Poszczególne elementy schematu z Rysunku 5.4 zostały opisane poniżej.

V_3 - źródło symbolizujące gitarę elektryczną.

C_1 - kondensator, którego zadaniem jest blokowanie szumu o niskich częstotliwościach oraz blokowanie prądu stałego z gitary.

R_1 i R_2 - rezystory umieszczone w celu wprowadzenia pożąданiej składowej stałej do sygnału.

X_1 i X_2 - wzmacniacze operacyjne, wzmacniające sygnał.

R_3 i R_4 - rezystory ustalające wzmacnianie jakie wprowadzi wzmacniacz X_1 .

R_6 i R_x - rezistor oraz potencjometr pozwalające na sterowanie wzmacnieniem wprowadzonym przez wzmacniacz X_2 .

C_2 i C_3 - kondensatory sprawiające, że wprowadzana na początku składowa stała nie jest wzmacniana przez wzmacniacz X_1 i X_2 .

V_C i V_{C1} - oba wzmacniacze zasilane są napięciem 5V doprowadzonym z mikrokontrolera.

V_3 - napięcie 3,3V doprowadzone do układu z mikrokontrolera.

D_1 i D_2 - stanowią zabezpieczenie przed możliwością uszkodzenia ADC w mikokontrolerze.

R_7 - rezistor ograniczający prąd w wypadku zwarcia wyjścia do masy bądź napięcia zasilania.

R_8 - rezistor symulujący impedancję wejścia ADC mikrokontrolera

5.3.2. Parametry układu

Wyznaczono istotne dla układu parametry.

Składowa stała. Pierwotna składowa stała sygnału jest eliminowana przez kondensator C_1 . Pożądana składowa stała \bar{V} zostaje wprowadzona przez dzielik napięcia powstały z rezystorów R_1 i R_2 . Wartość składowej stałej można obliczyć z wzoru.

$$\bar{V} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_4 = 1,65 \quad [\text{V}] \quad (5.1)$$

Dzięki kondensatorom C_2 i C_3 , wprowadzona do sygnału składowa stała w dalszych etapach nie jest wzmacniana przez wzmacniacze X_1 i X_2 .

Wzmocnienie. Po wprowadzeniu nowej składowej stałej sygnał zostaje wzmacniony przez dwa wzmacniacze umieszczone kaskadowo. Oba wzmacniacze pracują w konfiguracji nieodwracającej. Wzmocnienie A_{v1} sygnału wprowadzane przez wzmacniacz X_1 jest dane wzorem.

$$A_{v1} = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (5.2)$$

Następnie sygnał wzmacniany jest przez wzmacniacz X_2 . Jego wzmacnianie nie jest stałe, gdyż zależy od ustawienia potencjometru X_3 . Potencjometr R_x przyjmuje w wartości z przedziału [0, 1, 100]. Wzmocnienie A_{v2} można więc wyznaczyć z następującego wzoru.

$$A_{v2} = 1 + \frac{R_x}{R_6} \quad (5.3)$$

Oznacza to, że żeby wyznaczyć całkowite wzmacnienie A_{vc} układu należy skorzystać z wzoru.

$$A_{vc} = A_{v1} \cdot A_{v2} = 1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{R_x}{R_6} + \frac{R_3 \cdot R_x}{R_4 \cdot R_6} \quad (5.4)$$

Po podstawieniu rzeczywistych wartości elementów wykorzystanych do konstrukcji tego układu otrzymano wzmacnienie wynoszące:

$$A_{vc} = 21 + R_x \cdot 0,021 \quad (5.5)$$

Za pomocą potencjometru R_x można więc sterować wzmacnieniem układu w przedziale:

$$A_{vc} \in [21, 1, 2121] \quad (5.6)$$

Dolna częstotliwość graniczna. Para rezistor R_3 i kondensator C_2 tworzą filtr górnoprzepustowy, którego $3dB$ częstotliwość graniczną f_{g1} można wyznaczyć z następującego wzoru:

$$f_{g1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_4 + C_2} \quad [\text{Hz}] \quad (5.7)$$

Po podstawieniu do wzoru wartości stałej czasowej R_4C_2 otrzymano $f_{g1} \approx 3,39 \text{ Hz}$.

Drugi tego typu filtr stanowi para rezistor R_6 oraz kondensator C_3 . Do wyznaczenia $3dB$ częstotliwości granicznej f_{g2} tego filtra skorzystano z wzoru analogicznego do wzoru 5.7.

$$f_{g2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_6 + C_3} \quad [\text{Hz}] \quad (5.8)$$

Podstawienie do wzoru 5.8 wartości stałej czasowej R_6C_3 daje identyczny wynik $f_{g2} \approx 3,39 \text{ Hz}$. Oznacza to, że graniczna $3dB$ częstotliwość dla całego układu będzie złożeniem dwóch częstotliwości granicznych f_{g1}, f_{g2} a co za tym idzie można oszacować jej wartość jako $f_g \approx 6 \text{ Hz}$. Nie stanowi to problemu, gdyż jak wyznaczono w rozdziale 4 w punkcie 4.2 tej pracy, najwyższa częstotliwość brana pod uwagę w tym projekcie to 63 Hz .

Górna częstotliwość graniczna. Dla idealnego wzmacniacza operacyjnego wartość jego wzmacnienia dążyły do nieskończoności. Jednak wykorzystany w tym projekcie wzmacniacz nie jest wzmacniaczem idealnym. Oznacza to, że jego wzmacnienie w otwartej i w zamkniętej pętli jest skończone. Wartość tego wzmacnienia jest zależna od częstotliwości wzmacnianego sygnału co ma bezpośredni wpływ na wartość górnej częstotliwości granicznej.

Poniższe obliczenia oparto o notę katalogową użytego wzmacniacza [25]. Zależność opisująca rzeczywiste wzmacnienie w pętli zamkniętej A_v , wzmacnienie w pętli otwartej A oraz współczynnik sprzężenia zwrotnego (ang. feedback factor) B jest dana wzorem [26].

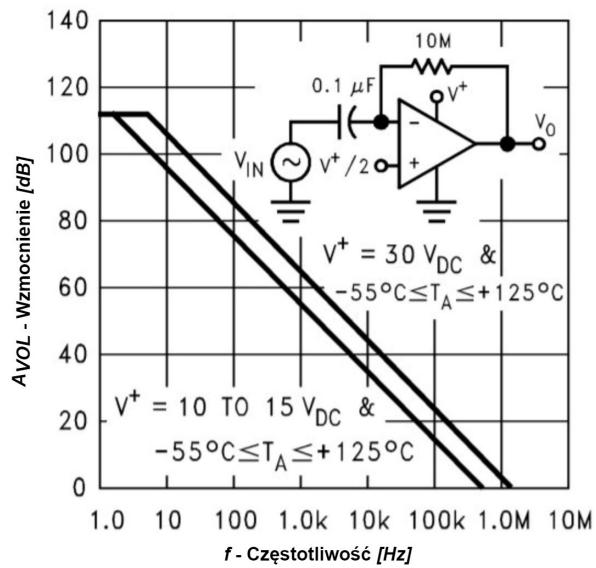
$$A_v = \frac{A}{1 + A \cdot B} \quad (5.9)$$

Współczynnik sprzężenia zwrotnego B jest dany wzorem.

$$B = \frac{1}{1 + \frac{R_y}{R_z}} \quad (5.10)$$

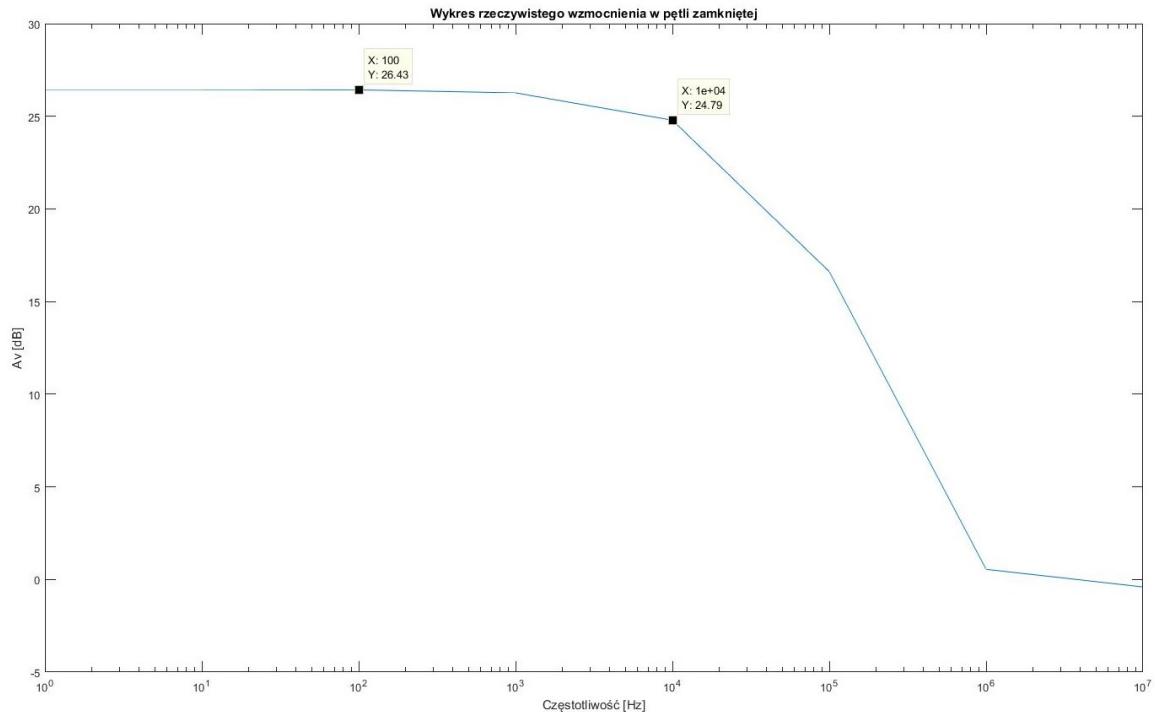
Dla pierwszego członu wzmacniającego $R_y = R_3, R_z = R_4$. Dla drugiego członu wzmacniającego $R_y = R_x, R_z = R_6$.

Wartość wzmacnienia w pętli otwartej A można odczytać z wykresu na Rysunku 5.5.

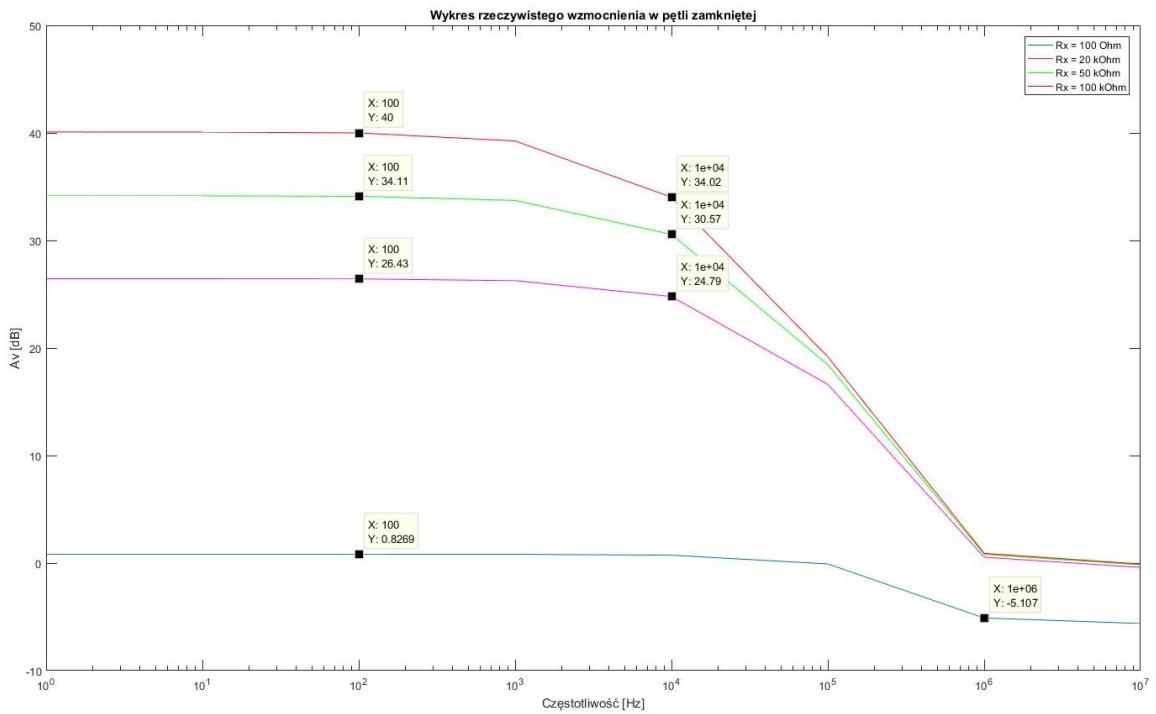


Rysunek 5.5: Pasmo w pętli otwartej, z noty katalogowej użytego wzmacniacza [25]

Korzystając z zależności 5.9 oraz Rysunku 5.5 wykreślono rzeczywiste wzmacnienie dla obu członów wzmacniających.



Rysunek 5.6: Wykresy rzeczywistego wzmacnienia w pętli zamkniętej dla pierwszego członu wzmacniającego



Rysunek 5.7: Wykres rzeczywistego wzmocnienia w pętli zamkniętej dla drugiego członu wzmacniającego w zależności od wartości rezystora R_x

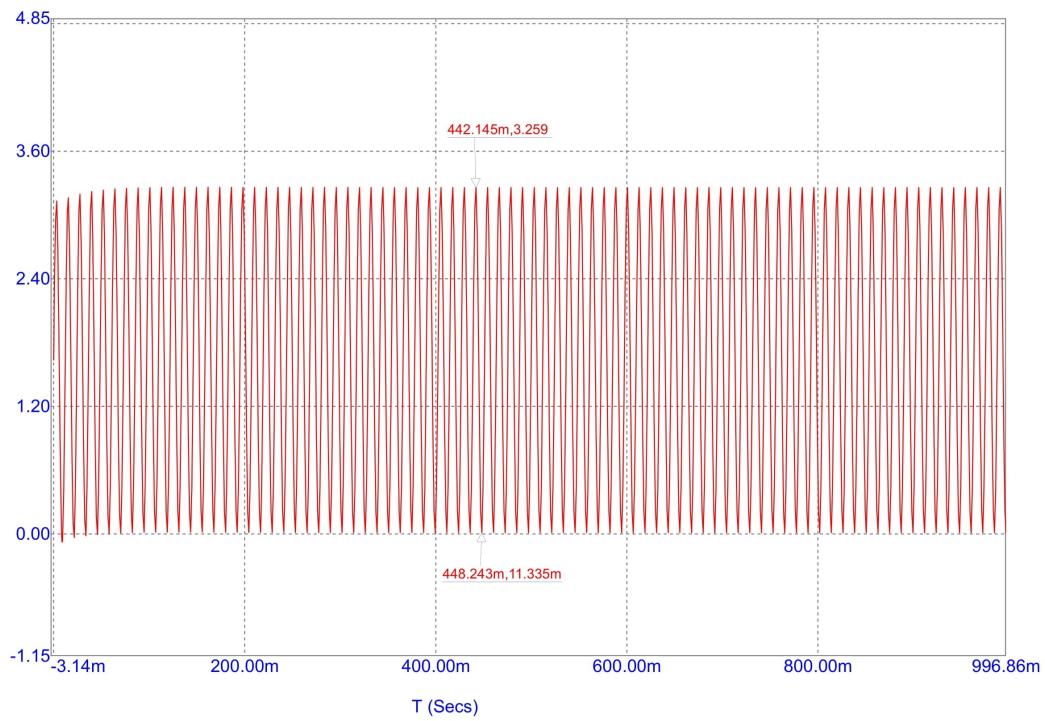
Po złożeniu wykresów rzeczywistego wzmocnienia w pętli zamkniętej dla obu członów można oszacować wartość górnej częstotliwości granicznej. Zakładając wartość rezystora R_x wynoszącą kilkudziesiąt $k\Omega$ wyniesie ona **kilkanaście kHz**.

5.3.3. Symulacja

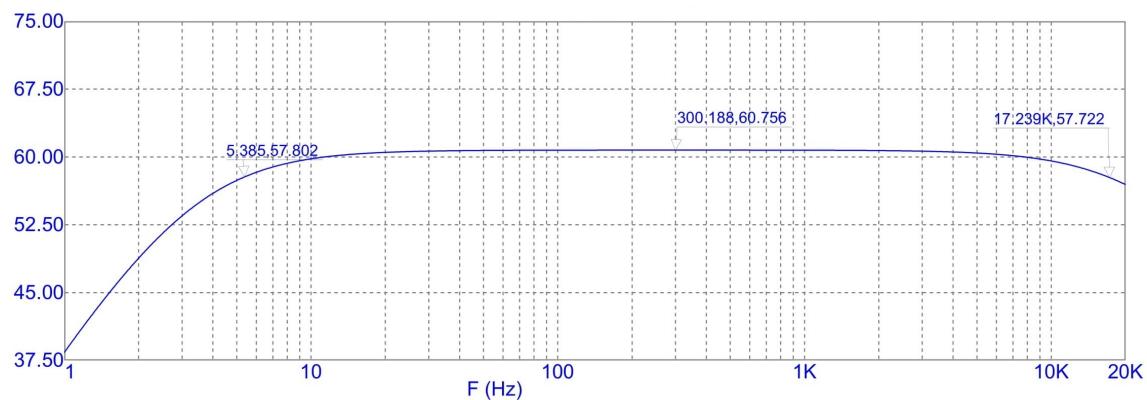
W celu weryfikacji wyznaczonych parametrów zaprojektowanego układu przeprowadzono symulacje w programie *Micro-Cap*. W wyniku symulacji otrzymano przebieg czasowy oraz charakterystykę częstotliwościową na wyjściu układu.

Symulacja została przeprowadzona dla suwaka potencjometru R_x ustawionego na 50% zakresu co odpowiada wartości $50 \text{ k}\Omega$.

Przebieg czasowy sygnału wyjściowego, przy założeniu amplitudy sygnału wejściowego wynoszącej $1,5 \text{ mV}$, został przedstawiony na Rysunku 5.8.



Rysunek 5.8: Przebieg czasowy sygnału wyjściowego.



Rysunek 5.9: Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa

Na podstawie symulacji wyznaczono parametry układu i porównano je z wartościami teoretycznymi.

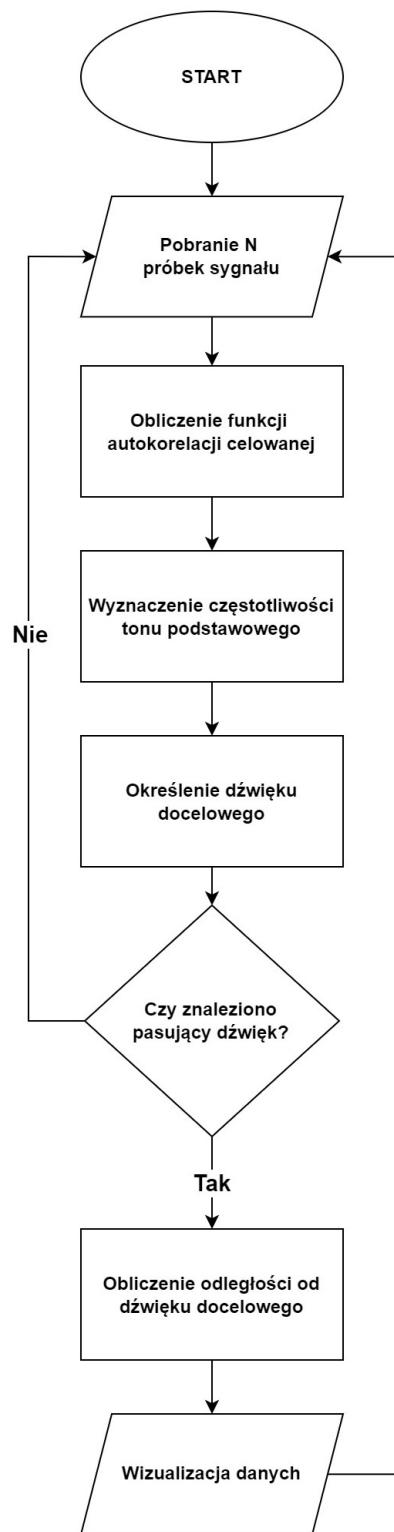
Parametry układu	Teoretyczna	Symulacja
Składowa stała	1,650 V	1,624 V
Wzmocnienie	1071	984
Dolina częstotliwość graniczna	6 Hz	5 Hz
Góra częstotliwość graniczna	kilkanaście kHz	17239 Hz

Tablica 5.2: Zestawienie parametrów układu

Wyznaczone teoretyczne parametry układu pokrywają się z parametrami wyznaczonymi na drodze symulacji.

5.4. Opis programu

5.4.1. Schemat blokowy programu



Rysunek 5.10: Schemat blokowy programu

Poniżej opisano przebieg programu przedstawionego na Rysunku 5.10.

Pobranie próbek sygnału

Zaraz po uruchomieniu, programu rozpoczyna cykliczny proces próbkowania sygnału na wejściu ADC. Spróbkowany przebieg jest następnie wykorzystywany do wyznaczenia tonu podstawowego sygnału.

Wyznaczenie tonu podstawowego sygnału

Na podstawie N próbek spróbkowanego obliczana jest funkcja autokorelacji celowanej. Następnie wyznaczone zostaje lokalne maksimum sygnału przybliżonego. Dla opóźnienia sygnału oddalonych o $-k$ i k od opóźnienia odpowiadającego lokalnemu maksimum funkcji autokorelacji celowanej obliczana jest funkcja autokorelacji. W tym zakresie sygnału normalnego wyznaczone zostaje lokalne maksimum. Na jego podstawie obliczana jest częstotliwość podstawowa sygnału.

Dźwięki nominalne

Jeśli wykryty ton podstawowy nie należy do zakresu wyznaczonego w podrozdziale 4.2 zostaje on odrzucony, a program wraca do zapamiętania kolejnego bloku próbek sygnału. Natomiast jeśli należy do wspomnianego zakresu, zostaje on porównany z dźwiękami w Tabeli 4.1. Przydzielany jest mu dźwięk najbliższy (dźwięk nominalny) oraz wyznaczana jest odległość od tego tonu.

Wizualizacja danych

5.4.2. Architektura oprogramowania

Akwizycja i przetwarzanie sygnału

Sygnał wejściowy jest próbkowany w sposób ciągły z wykorzystaniem kontrolera DMA, który zapisuje kolejne próbki bezpośrednio do pamięci. Tak pozyskane próbki przechowywane są w dwuczęściowym buforze, którego długość wynosi $2N$. Dzięki wykorzystaniu przerwań od stanu zapełnienia bufora, możliwe jest określenie momentu w którym w buforze znajduje się N bądź $2N$ próbek. Pozwala to operować na N próbkach sygnału w jednej części bufora przy jednoczesnym ciągłym zapisywaniu nowych próbek do drugiej części bufora. Po odebraniu przerwania o zapełnieniu bądź połowicznym zapełnieniu bufora następuje skopiowanie N próbek sygnału do oddzielnego blokowanego bufora w celu ich „zatrzaśnięcia”. Tak zapełniony bufor jest zablokowany do momentu zakończenia obliczeń. Gwarantuje to, że dane nie zmienią się w trakcie kalkulacji. Po zakończeniu obliczeń kolejne dane są ponownie kopowane do blokowanego bufora.

Przetwarzanie sygnału oparte jest o maszynę stanów. Możliwe stany to:

AKWIZYCJA - W buforze blokowanym znajdują się stare dane. Bufor wejściowy zapełniany jest danymi aż do wystąpienia przerwania od stanu zapełnienia bufora. Po wystąpieniu przerwania, dane są kopiowane do bufora blokowanego i stan zmienia się na DANE GOTOWE.

DANE GOTOWE - Dane są gotowe i oczekują na przetworzenie.

PRZETWARZANIE - Dane są przetwarzane. Gdy operacje na danych się zakończą następuje przejście do stanu AKWIZYCJA.

Próbkowanie danych jest niezależne od ich przetwarzania i realizowane są współbieżnie. Pozwala to zmniejszenie czasu oczekiwania na gotowość danych.

Obsługa wyświetlacza

Obsługa wyświetlacza oparta jest o cykliczny proces wykonujący się co 1 ms. W ramach tego procesu do sterownika wyświetlacza każdorazowo wysyłana jest ramka danych zawierająca wartości jednego rzędu pikseli. Kolejne wartości piksel i z kolejnych wierszy wysyłane są w następujących po sobie ramkach danych. Przesłanie informacji o wszystkich rzędach pikseli wymaga ośmiu cykli a co za tym idzie trwa 8 ms. Pozwala to wyznaczyć częstotliwość odświeżania wyświetlacza $f_w = 125 \text{ Hz}$.

Proces odświeżania wyświetlacza jest niezależny od procesu tworzenia bitmapy w której zapisane są wartości poszczególnych pikseli. Oznacza to, że podczas odświeżania wyświetlacza każdorazowo pobierane są dane bezpośrednio z bufora w pamięci przechowującego bitmapę.

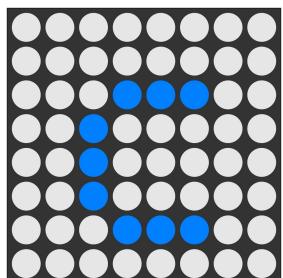
Komunikacja z sterownikiem wyświetlacza odbywa się za pomocą interfejsu SPI.

5.4.3. Interfejs użytkownika

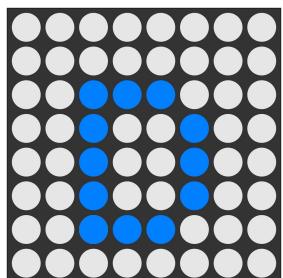
W ramach stworzenia interfejsu pozwalającego na komunikację urządzenia z użytkownikiem wykorzystano matrycę LED 8x8 niebieskiego koloru. W tych 64 diodach zakodowano proste do zrozumienia komunikaty.

Oznaczenia dźwięków

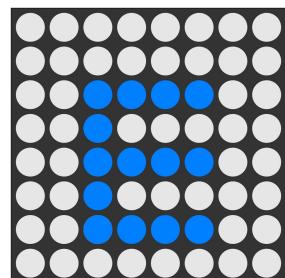
Użytkownik nie ma potrzeby znać dokładnej częstotliwości podstawowej strojonej struny. Z tego też powodu wyświetlana jest informacja z oznaczeniem dźwięku, którego częstotliwość jest najbliższa do wykrytego tonu podstawowego. Oznaczeniami tymi są powszechnie rozpoznawalne litery arabskie w nomenklaturze muzycznej przypisane danemu dźwiękowi. Poniżej zaprezentowano zakodowane oznaczenia.



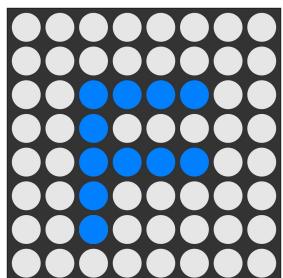
(a) Dźwięk C



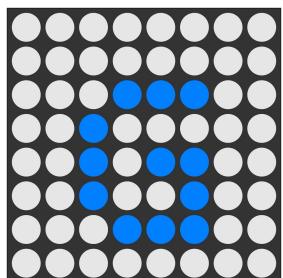
(b) Dźwięk D



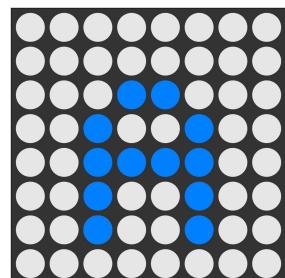
(c) Dźwięk E



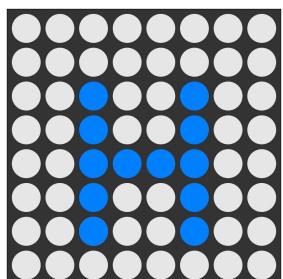
(d) Dźwięk F



(e) Dźwięk G



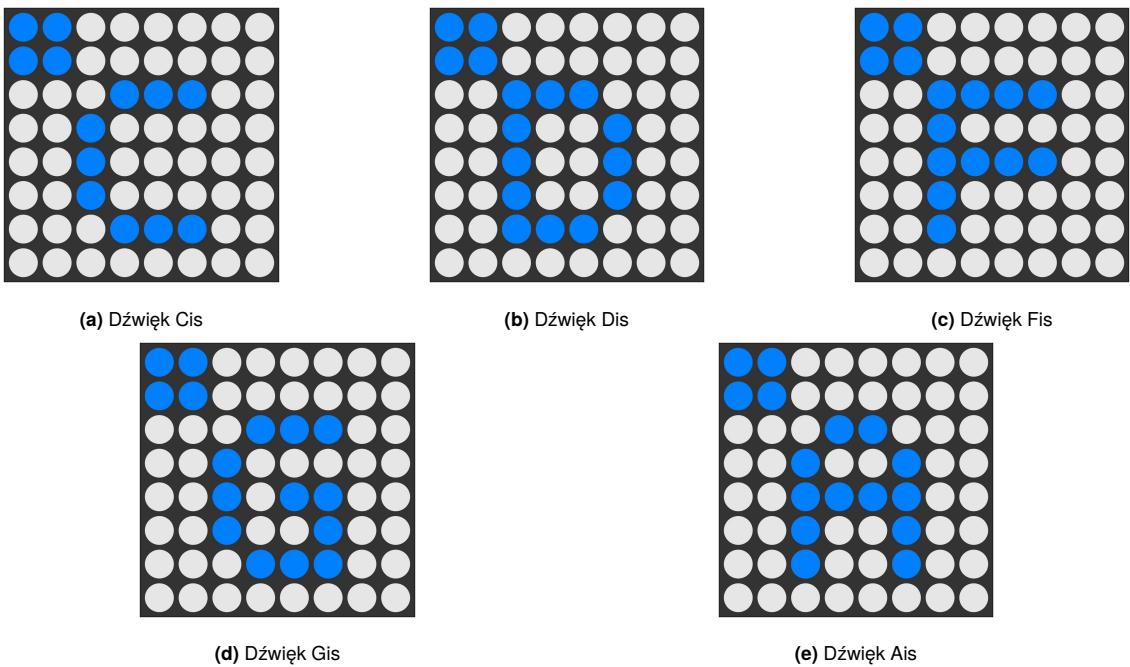
(f) Dźwięk A



(g) Dźwięk H

Rysunek 5.11: Zakodowane oznaczenia dźwięków

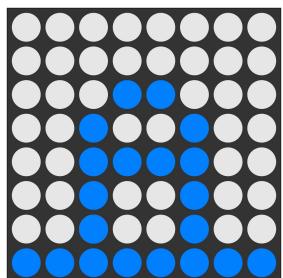
W trakcie strojenia gitary elektrycznej może również wystąpić dźwięk obniżony lub podwyższony o pół tonu. Do reprezentacji wszystkich dźwięków występujących w paśmie gitary wyznaczonym w punkcie 4.2 tej pracy wystarczą dźwięki podstawowe zaprezentowane na Rysunku 5.11 i dźwięki podwyższone o pół tonu. Zdecydowano się wprowadzić oznaczenie dla dźwięków podwyższonych.



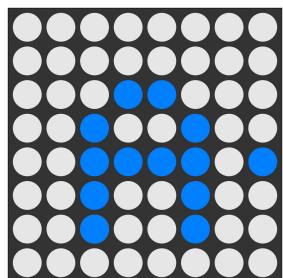
Rysunek 5.12: Zakodowane oznaczenia dźwięków podwyższonych o pół tonu

Oznaczenia stopnia dostrojenia dźwięku

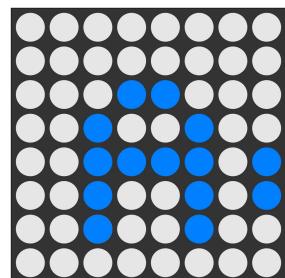
Proces strojenia struny do danego dźwięku wymaga wprowadzenia oznaczeń dotyczących stopnia dopasowania wykrytej częstotliwości podstawowej do pożdanego dźwięku. W tym celu wprowadzono następujące oznaczenia: idealnie dostrojony, niższy o 2-15 centów, niższy o 15-25 centów, niższy o 25-35 centów, niższy o 35-50 centów, wyższy o 2-15 centów, wyższy o 15-25 centów, wyższy o 25-35 centów, wyższy o 35-50 centów. Wprowadzone oznaczenia zaprezentowano na przykładzie dźwięku A.



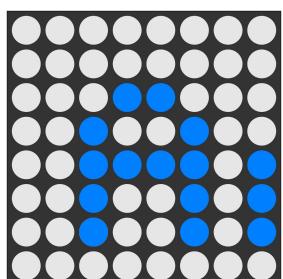
(a) idealnie dostrojony



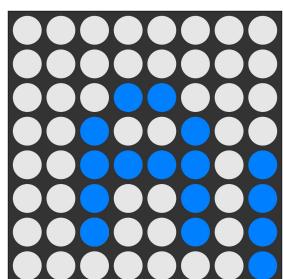
(b) niższy o 2-15 centów



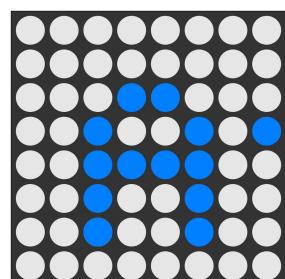
(c) niższy o 15-25 centów



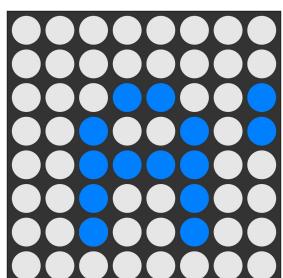
(d) niższy o 25-35 centów



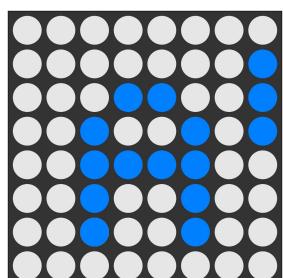
(e) niższy o 35-50 centów



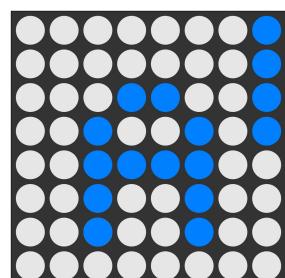
(f) wyższy o 2-15



(g) wyższy o 15-25 centów



(h) wyższy o 25-35 centów



(i) wyższy o 35-50 centów

Rysunek 5.13: Zakodowane oznaczenia stopnia dostrojenia

6. TESTY

6.1. Przygotowanie środowiska testowego

6.1.1. Implementacja w środowisku MATLAB

W pierwszym kroku przygotowania środowiska testowego za pomocą oprogramowania *MATLAB* zaimplementowano metody autokorelacji oraz autokorelacji celowanej. Metodę autokorelacji wdrożono w dwóch postaciach. W pierwszej uproszczonej wykorzystano funkcję *xcorr* wbudowaną w wykorzystywane oprogramowanie. W drugiej postaci program został napisany przy użyciu najprostszych operacji dostępnych w *MATLAB*. Stworzone implementacje posłużyły do przetestowania zasadności wykorzystania obu metod w celu wykrywania tonu podstawowego sygnału z gitary elektrycznej.

6.1.2. Nagrania strun gitary

By możliwy był test obu zaimplementowanych metod bez potrzeby wprowadzania dodatkowego układu analogowego, postanowiono nagrać próbki 6 strun gitary elektrycznej w stroju standardowym. W tym celu wykorzystano gitarę elektryczną *Fender Squier Classic Vibe 60s Stratocaster LRL CAR*. Gitara została nastrojona przy użyciu stroika klasycznego, którego dokładność mieści się w zakresie 2 centów. Do nagrania wykorzystano interfejs audio *Focusrite Scarlett 2i2 2gen* oraz oprogramowanie *Reaper*.



Rysunek 6.1: Interfejs audio Focusrite Scarlett 2i2 2gen

6.2. Testy w środowisku MATLAB

W pierwszej fazie testów wykorzystano oprogramowanie *MATLAB*. Z jego pomocą sprawdzono zasadność wykorzystania metody autokorelacji w celu wykrywania tonu podstawowego sygnału. Jak wspomniano w rozdziale dotyczącym realizacji, metodę autokorelacji zaimplementowano w dwóch postaciach. Obie implementacje zwracały identyczne wyniki. Z tego powodu w dalszych rozważaniach w tym podrozdziale wykorzystano tylko implementację opartą o wbudowaną w oprogramowanie *MATLAB* funkcję *xcorr*.

6.2.1. Sygnał sinusoidalny

Wykonano test na dwóch wygenerowanych sygnałach sinusoidalnych. Częstotliwości tych sygnałów wynosiły $f_1 = 63 \text{ Hz}$ oraz $f_2 = 360 \text{ Hz}$. Zostały one wygenerowane w taki sposób, by symulować sygnały analogowe spróbkowane z częstotliwościami $f_s = \{48 \text{ kHz}, 96 \text{ kHz}, 192 \text{ kHz}\}$. Test miał na celu sprawdzić czy metoda autokorelacji nadaje się do wykrywania tonu podstawowego sygnału oraz dla której z trzech częstotliwości próbkowania wynik będzie najdokładniejszy. Wyniki symulacji przedstawiono w poniżej tabeli.

Częstotliwość próbkowania	$f_s = 48 \text{ kHz}$	$f_s = 96 \text{ kHz}$	$f_s = 192 \text{ kHz}$
$f_1 = 63 \text{ Hz}$	63,0749 Hz	63,0749 Hz	63,0335 Hz
$f_2 = 360 \text{ Hz}$	360,9023 Hz	359,5506 Hz	360,2251 Hz

Tablica 6.1: Wyniki pomiarów dla dwóch sygnałów sinusoidalnych

6.2.2. Próbki gitary elektrycznej

W celu dalszej oceny dokładności metody autokorelacji dla różnych częstotliwości próbkowania przeprowadzono kolejną symulację. Wykorzystano w niej nagrane próbki gitary elektrycznej. Nagrano struny E (82,41 Hz) oraz e^1 (329,63 Hz). Gitara została wcześniej nastrojona za pomocą stroika klasycznego, którego dokładność to 2 centy.

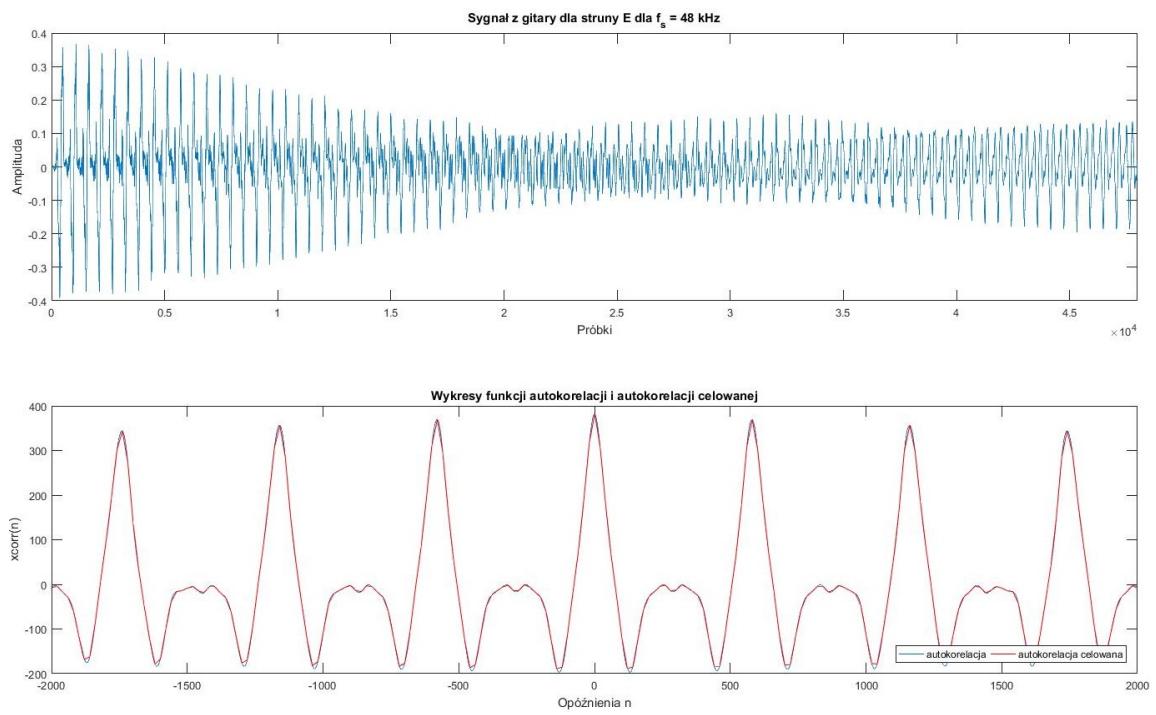
Częstotliwość próbkowania	$f_s = 48 \text{ kHz}$	$f_s = 96 \text{ kHz}$	$f_s = 192 \text{ kHz}$
$E \approx 82,41 \text{ Hz}$	82,7586 Hz	82,8300 Hz	82,7943 Hz
$e^1 \approx 329,63 \text{ Hz}$	328,767 Hz	329,8969 Hz	329,8969 Hz

Tablica 6.2: Wyniki pomiarów dla próbek gitary elektrycznej

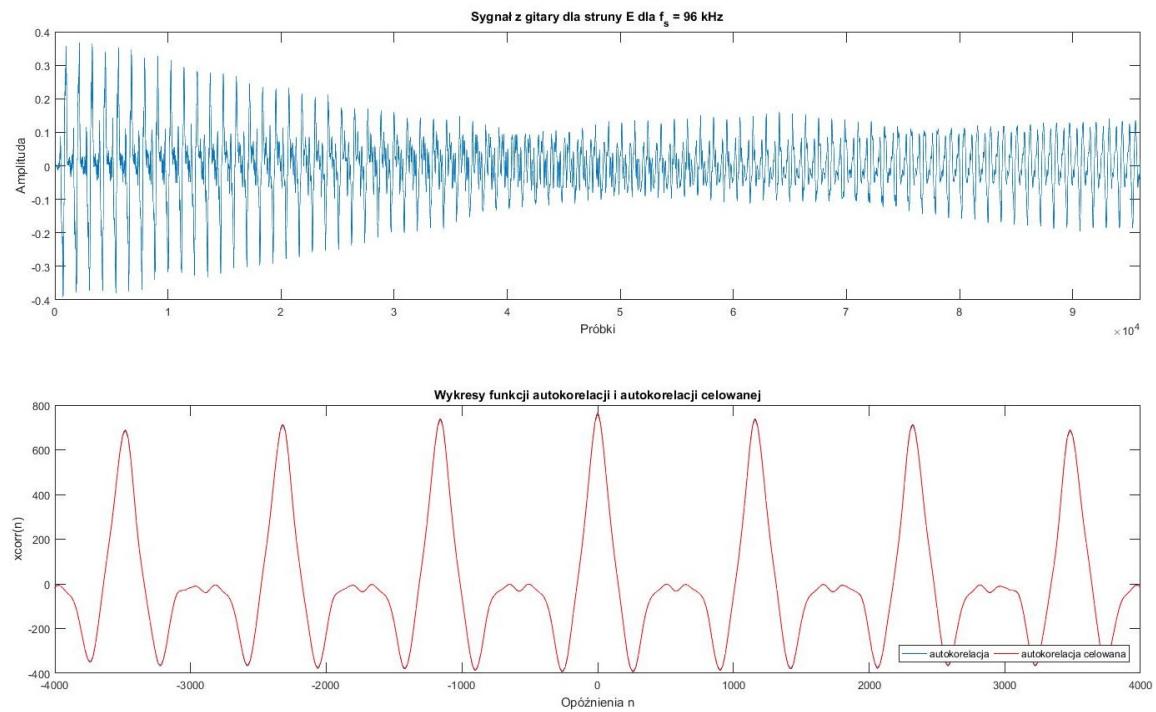
W oparciu o pierwszy test, którego wyniki znajdują się w Tablicy 6.1, stwierdzono, że częstotliwość próbkowania $f_s = 192 \text{ kHz}$ pozwala uzyskać największą dokładność pomiaru tonu podstawowego sygnału. Test drugi, ze względu na niedokładność wykorzystanego stroika klasycznego oraz podobieństwo otrzymywanych wyników, nie pozwala jednoznacznie określić, która częstotliwość próbkowania daje najdokładniejszy wynik. Pozwala jednak bezapelacyjnie stwierdzić, że metoda autokorelacji nadaje się do wykrywania tonu podstawowego sygnału wytwarzanego przez przetworniki gitary elektrycznej.

6.2.3. Autokorelacja celowana

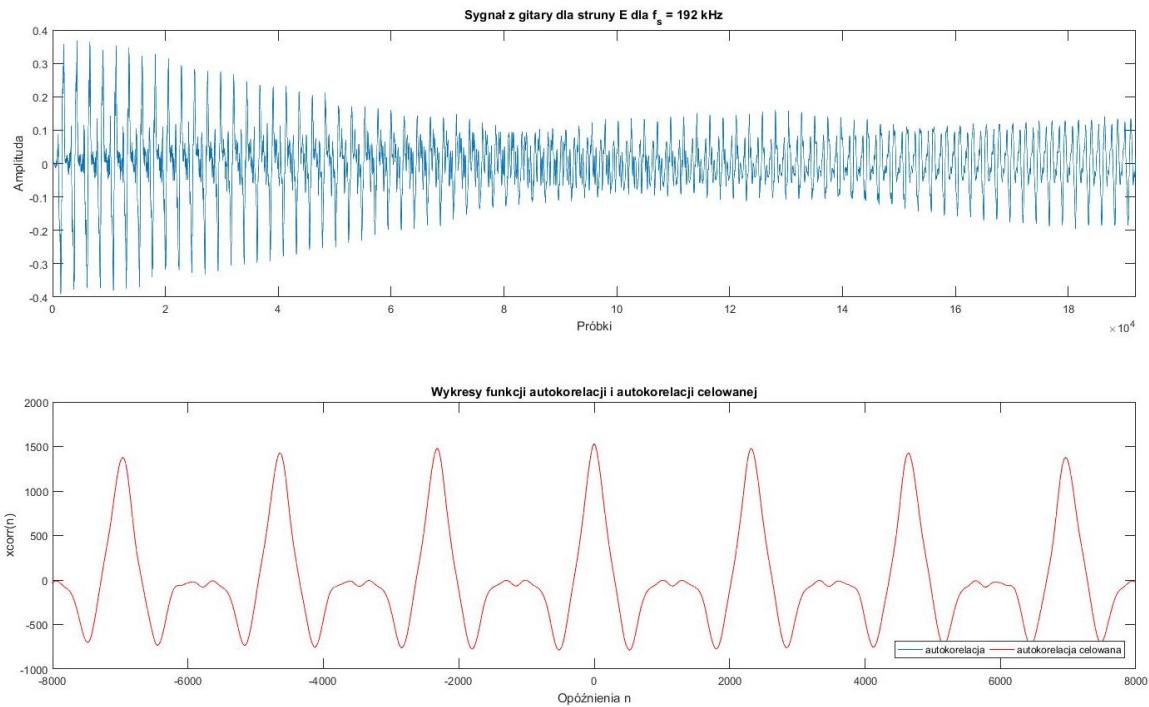
W kolejnym teście postanowiono sprawdzić dla której z testowanych powyżej częstotliwości próbkowania ($f_s = \{48 \text{ kHz}, 96 \text{ kHz}, 192 \text{ kHz}\}$) metoda autokorelacji celowanej może dać satysfakcyjne wyniki. W tym celu wykorzystano nagrane próbki strun E i e^1 . Obliczono dla nich funkcję autokorelacji oraz funkcję autokorelacji celowanej dla $k = 20$ (co dwudzieste opóźnienie). Następnie przedstawiono ich fragmenty na wykresach.



Rysunek 6.2: Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 48 \text{ kHz}$

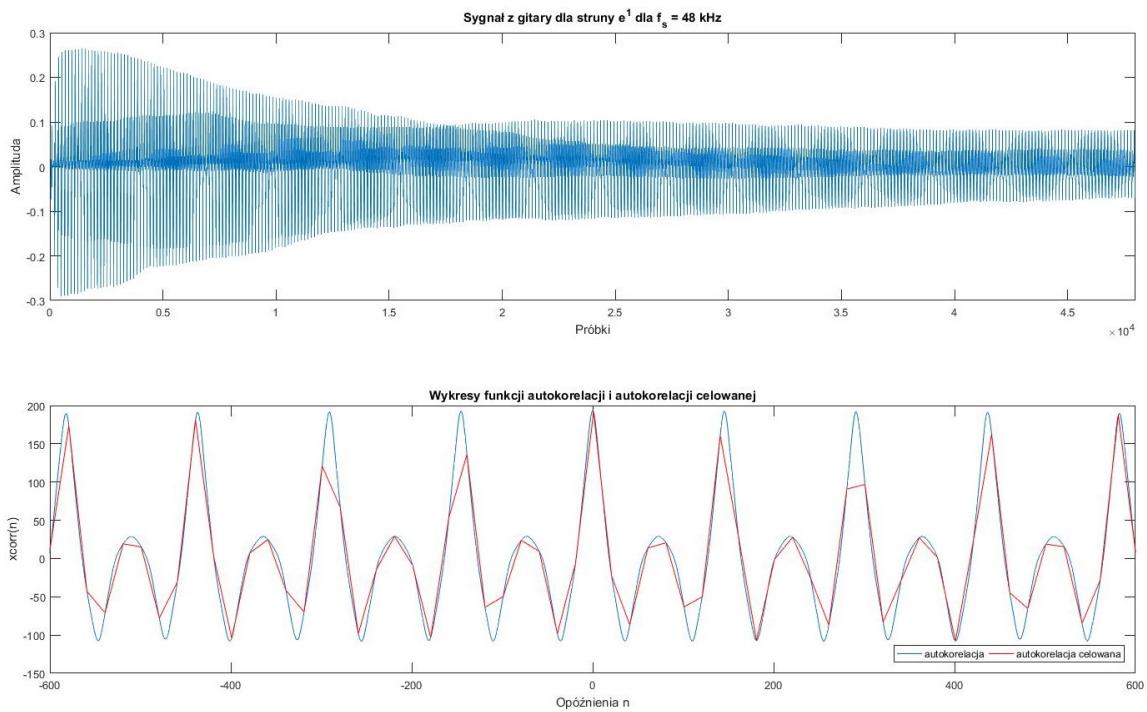


Rysunek 6.3: Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 96 \text{ kHz}$

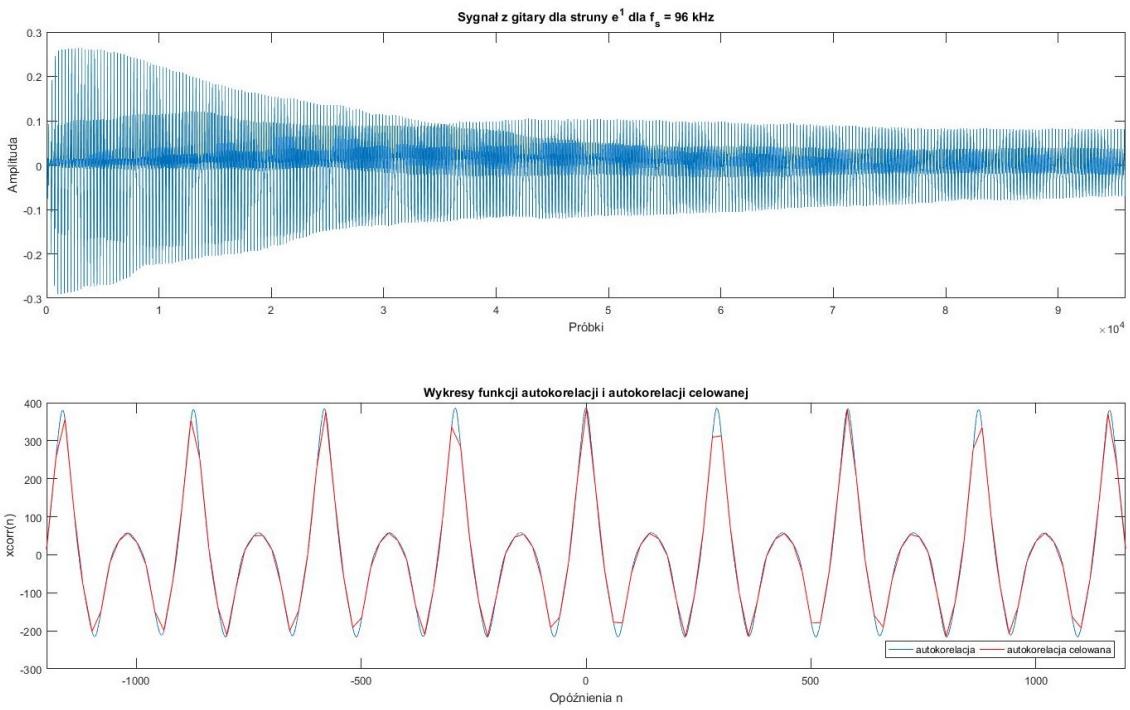


Rysunek 6.4: Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 192 \text{ kHz}$

Zaobserwowano, że jeśli badany sygnał ma małą częstotliwość podstawową, to dla wszystkich trzech badanych częstotliwości próbkowania możliwe jest wykrycie lokalnego maksimum w sygnale wynikowym funkcji autokorelacji celowanej odpowiadającego lokalnemu maksimum w funkcji autokorelacji. Można więc go wykorzystać w metodzie autokorelacji celowanej.

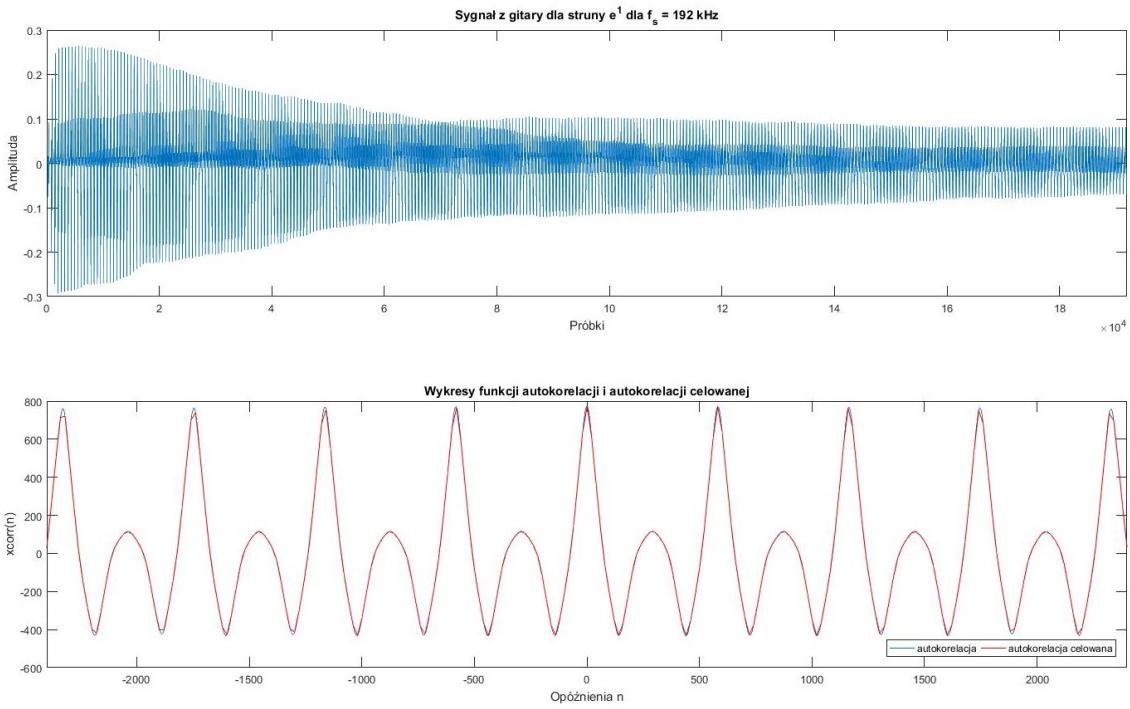


Rysunek 6.5: Wyniki pomiarów dla struny e^1 przy $f_s = 48 \text{ kHz}$



Rysunek 6.6: Wyniki pomiarów dla struny e^1 przy $f_s = 96 \text{ kHz}$

Dla sygnału o wyższej częstotliwości podstawowej zauważono, że sygnał będący wynikiem funkcji autokorelacji celowanej dla $f_s = \{48 \text{ kHz}, 96 \text{ kHz}\}$ jest tak mocno zniekształcony, że może nie zostać wykryte poprawne lokalne maksimum, przez co sygnał ten nie może zostać wykorzystany w metodzie autokorelacji celowanej.



Rysunek 6.7: Wyniki pomiarów próbki struny e^1 przy $f_s = 192 \text{ kHz}$

Po przeprowadzeniu trzech powyższych testów, do dalszej realizacji projektu zdecydowano się wykorzystać częstotliwość próbkowania $f_s = 192 \text{ kHz}$.

6.3. Testy na rzeczywistym układzie

W następnej fazie przetestowano skonstruowany w ramach tego projektu stroik podłogowy.

6.3.1. Dokładność pomiaru

W celu zbadania dokładności pomiaru przeprowadzono następujący test. Nastrojono wszystkie sześć strun gitary elektrycznej. Następnie dokonano pomiarów tonu podstawowego każdej z sześciu strun. Do wykonania pomiarów wykorzystano klasyczny stroik podający wartość częstotliwości podstawowej z dokładnością do jednego miejsca po przecinku oraz skonstruowanego w ramach tego projektu urządzenia. Wyniki pomiarów zestawiono w Tabeli 6.3.

Badana struna	Stroik klasyczny	Skonstruowane urządzenie	Błąd w Hz	Błąd w centach
E	329,8 Hz	329,8 Hz	0,0 Hz	0
A	247,2 Hz	247,2 Hz	0,0 Hz	0
d	196,0 Hz	196,1 Hz	0,1 Hz	0,9
g	146,8 Hz	146,7 Hz	0,1 Hz	1,2
b	110,1 Hz	110,2 Hz	0,1 Hz	1,5
e ¹	82,2 Hz	82,2 Hz	0,0 Hz	0

Tablica 6.3: Wyniku testu dokładności pomiaru

Na podstawie wykonanego testu stwierdzono, że stroik wykonuje pomiary z dokładnością 1,5 centa.

6.3.2. Czas trwania pomiaru

Sprawdzono czas trwania pomiaru. W tym celu wykorzystano stoper. Przy jego pomocy zmierzono czas jaki upływa między szarpięciem struny gitary a wyświetleniem się informacji o stopniu jej nastrojenia. Dokonano dziesięciu takich pomiarów, obliczono średnią i na jej podstawie wyznaczono czas trwania pomiaru $t = 1,204 \text{ s}$.

7. PODSUMOWANIE

Główym celem tej pracy było skonstruowanie stroika gitarowego. Udało się to osiągnąć. W ramach tego projektu powstał analizator częstotliwości podstawowej mogący służyć jako podłogowy stroik gitary elektrycznej. Dokładność skonstruowanego urządzenia spełnia wszystkie założenia projektowe, a czas potrzebny na przeprowadzenie jednego pomiaru jest satysfakcjonujący i pozwala na komfortowe strojenie instrumentu.

Największym problemem w trakcie realizacji tego projektu okazała się implementacja wybranej metody oraz oprogramowanie wykonanego stroika. Zupełnie nowe środowisko programistyczne przysporzyło wielu problemów zwłaszcza przy jego pierwszych konfiguracjach. Ubogość dostępnych materiałów w języku polskim oraz duża ilość przestarzałych i zdezaktualizowanych materiałów w języku angielskim spowodowała, że szacowany pierwotnie czas pisania oprogramowania okazał się prawie trzykrotnie dłuższy niż zakładano. Projekt ten pozwolił jednak na uzyskanie pewnej wprawy w tworzeniu oprogramowania na mikrokontrolery firmy ST. Jako, że jest to jedna z przodujących w tym momencie na rynku firm uznano, że zainwestowany w naukę czas nie był czasem straconym i pozwolił na nabycie praktycznej wiedzy programistycznej.

W ramach dalszego rozwoju projektu przewidziano konstrukcję wytrzymałą i estetycznej obudowy dla zbudowanego stroika. W obecnej konfiguracji jest podatny na uszkodzenia mechaniczne. Rozważona zostanie również potencjalna możliwość miniaturyzacji projektu. Rozmiar obecnie wykorzystywanej płytka ewaluacyjnej jest na tyle duży, że całe urządzenie zajmuje więcej miejsca niż niektóre obecnie dostępne na rynku rozwiązania.

Spis rysunków

3.1 Kamerton klasyczny https://midi.pl/	12
3.2 Przykłady stroików elektronicznych https://www.muziker.pl/ , https://www.musik-produktiv.com/gb/ , https://www.fan.com.pl/	12
3.3 Wybrane stroiki podłogowe https://supersound.pl/ , https://www.musik-produktiv.com/gb/ , https://www.fan.com.pl/	13
4.1 Gitara akustyczna https://muzyczny.pl/	15
4.2 Gitara elektryczna https://www.musik-produktiv.com/gb/	15
4.3 Przetwornik gitary elektrycznej https://shoppartsland.com/	16
4.4 Schemat działania przetwornika w gitarze elektrycznej https://www.yamaha.com/en/?header	16
4.5 Widmo sygnału z gitary elektrycznej, dla struny h , o częstotliwości podstawowej 247 Hz	21
5.1 Uproszczona budowa mikrokontrolera	23
5.2 Wybrane płytki ewaluacyjne https://free-electronic.com/ , https://sklep.msalamon.pl/	24
5.3 https://sklep.msalamon.pl/ , https://botland.com.pl/	26
5.4 Schemat elektryczny toru analogowego	27
5.5 Pasmo w pętli otwartej, z noty katalogowej użytego wzmacniacza [25]	30
5.6 Wykres rzeczywistego wzmacniania w pętli zamkniętej dla pierwszego członu wzmacniającego	30
5.7 Wykres rzeczywistego wzmacniania w pętli zamkniętej dla drugiego członu wzmacniającego w zależności od wartości rezystora R_x	31
5.8 Przebieg czasowy sygnału wyjściowego.	32
5.9 Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa	32
5.10 Schemat blokowy programu	33
5.11 Zakodowane oznaczenia dźwięków	36
5.12 Zakodowane oznaczenia dźwięków podwyższonych o pół tonu	37
5.13 Zakodowane oznaczenia stopnia dostrojenia	38
6.1 Interfejs audio Focusrite Scarlett 2i2 2gen https://muzyczny.pl/	39
6.2 Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 48\text{ kHz}$	41
6.3 Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 96\text{ kHz}$	41
6.4 Wyniki pomiarów dla struny E przy $f_s = 192\text{ kHz}$	42
6.5 Wyniki pomiarów dla struny e^1 przy $f_s = 48\text{ kHz}$	42

6.6 Wyniki pomiarów dla struny e^1 przy $f_s = 96 \text{ kHz}$	43
6.7 Wyniki pomiarów próbki struny e^1 przy $f_s = 192 \text{ kHz}$	43
A.1 Konstrukcja stroika	52

Spis tabelic

4.1 Dźwięki muzyczne i odpowiadające im częstotliwości podzielone na oktawy [10]	17
4.2 Rozdzielcość pomiaru częstotliwości próbkowania dla sygnałów o tonach podstawowych $f_1 = 63\ Hz, f_2 = 360\ Hz$	22
5.1 Porównanie parametrów płyt Bluepill i Nucleo-F411RE	25
5.2 Zestawienie parametrów układu	32
6.1 Wyniki pomiarów dla dwóch sygnałów sinusoidalnych	40
6.2 Wyniki pomiarów dla próbek gitary elektrycznej	40
6.3 Wyniku testu dokładności pomiaru	44

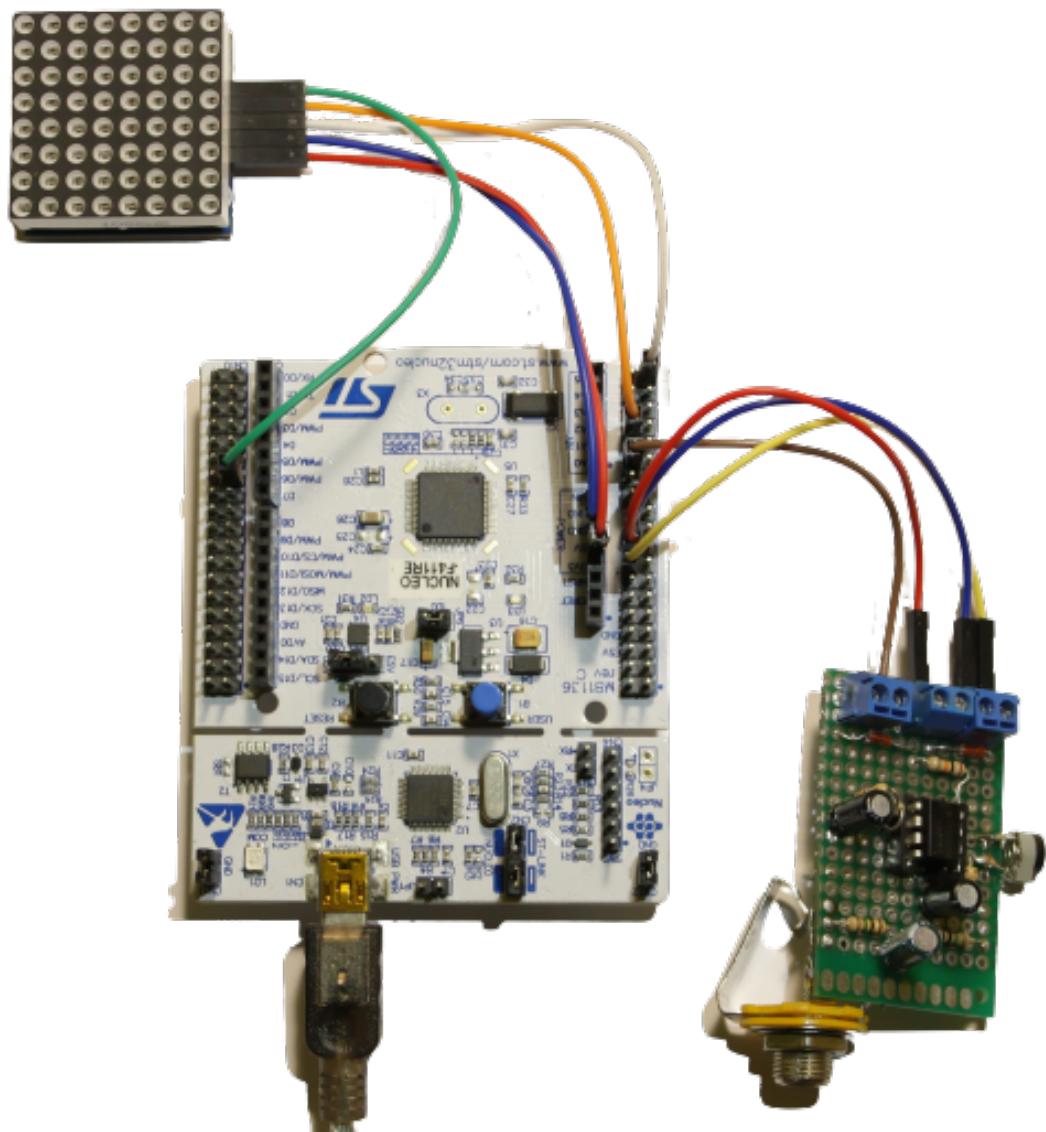
WYKAZ LITERATURY

- [1] Artykuł na portalu Dźwięczne Bzdury, *432 Hz – prawdziwa historia*,
<https://dzwiecznebzdury.wordpress.com/2018/08/13/432-hz-prawdziwa-historia/>
[dostęp: 12.01.2021]
- [2] Artykuł na portalu Music Critic, *10 Best Tuner Pedals in 2021*,
<https://musiccritic.com/equipment/pedals/best-tuner-pedals/>
[dostęp: 20.12.2021]
- [3] Opis produktu na stronie sklepu musiccenter, *Boss TU-3 - tuner podłogowy*,
<https://www.musiccenter.com.pl/product/2245/boss-tu-3-tuner-podlogowy.html>
[dostęp: 21.12.2021]
- [4] Opis produktu na stronie sklepu supersound, *KORG PITCHBLACK PB-01 - GITAROWO/BASOWY TUNER CHROMATYCZNY*,
<https://supersound.pl/59956-korg-pitchblack-pb-01-gitarowo-basowy-tuner-chromatyczny>
[dostęp: 21.12.2021]
- [5] Opis produktu na stronie sklepu musiccenter, *Korg Pitchblack PB-01 - tuner podłogowy*,
<https://www.musiccenter.com.pl/product/13879/korg-pitchblack-pb-01-tuner-podlogowy.html>
[dostęp: 21.12.2021]
- [6] Opis produktu na stronie sklepu Muziker, *TC Electronic Polytune 2 Mini*,
<https://www.muziker.pl/tc-electronic-polytune-2-mini>
[dostęp: 21.12.2021]
- [7] Artykuł na portalu Yamaha, *The Structure of the Electric Guitar. What are pickups?*,
https://www.yamaha.com/en/musical_instrument_guide/electric_guitar/mechanism/mechanism002.htm
[dostęp: 22.12.2021]
- [8] Artykuł na portalu Gitara dla początkujących, *Zakres częstotliwości gitary*,
<https://www.gitaradlapocztujacych.pl/zakres-czestotliwosci.html>
[dostęp: 22.12.2021]
- [9] Artykuł na portalu The guitar lessons, *Online guitar tuner*,
<http://www.theguitarlesson.com/online-guitar-tools/online-guitar-tuner/>
[dostęp: 22.12.2021]
- [10] Artykuł na portalu Michał Kaszczyszyn Guitar lessons, *Muzyczne dźwięki i odpowiadające im częstotliwości*,
<http://www.michalkaszczyszyn.com/pl/lessons/notes.html>
[dostęp: 23.12.2021]
- [11] PLICH M., TOPOROWSKI M., *Dawne temperacje. Podstawy akustyczne i praktyczne wykorzystanie*,
2014

- [12] Materiały dydaktyczne Katedry Systemów Multimedialnych, Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej do wykładu, *Elektroniczne instrumenty muzyczne*,
<https://sound.eti.pg.gda.pl/student/eim/synteza/leszczyna/>
[dostęp: 31.12.2021]
- [13] Materiały dydaktyczne Katedry Systemów Multimedialnych, Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej do wykładu, *Akustyka Muzyczna*,
<https://sound.eti.pg.gda.pl/student/akmuz/03-f0.pdf>
[dostęp: 31.12.2021]
- [14] BENWARD B., SAKER M., *Music in theory and Practise*, 2003
- [15] Artykuł na portalu Tutorials point, *Convolution and Correlation*,
https://www.tutorialspoint.com/signals_and_systems/convolution_and_correlation.htm
[dostęp: 02.01.2022]
- [16] Materiały dydaktyczne Katedry Automatyzacji Procesów, Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Akademii Górnictwo - Hutniczej w Krakowie na temat, *Podstawy próbkowania sygnałów*,
https://home.agh.edu.pl/~koniejar/LVlinki/Wyk1_probkowanie.pdf
[dostęp: 31.12.2021]
- [17] Berenson D., Reeves G., *Digital Guitar Tuner*, 2004
<https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2004/dbb25/complete2.htm>
[dostęp: 06.01.2022]
- [18] Czaja Z., Materiały do wykładu, *Mikroproceosry i Mikrokontrolery*, 2015
- [19] STMicroelectronics, Nota katalogowa mikrokontrolera, *STM32F103C8T6*, 2015
- [20] STMicroelectronics, Nota katalogowa mikrokontrolera, *STM32F411RET6*, 2017
- [21] Opis produktu na stronie sklepu botland, *Wyświetlacz dotykowy TFT LCD 2,4" 240x320px - SPI*,
<https://botland.com.pl/wyswietlacze-lcd-tft-i-ips/13439-wyswietlacz-dotykowy-tft-lcd-24-240x320px-spi-5904422341718.html>
[dostęp: 04.01.2022]
- [22] Opis produktu na stronie sklepu botland, *Wyświetlacz OLED niebieski graficzny 1,3" (A) 128x64px SPI/I2C- kątowe złącza - Waveshare 10444*,
<https://botland.com.pl/wyswietlacze-oled/4439-wyswietlaczoled-niebieski-graficzny-13-a-128x64px-spii2c-katowe-zlaczawa-waveshare-10444-5904422371951.html>
[dostęp: 04.01.2022]
- [23] Opis produktu na stronie sklepu botland, *Wyświetlacz OLED biały graficzny 1,5" 128x128px SPI/I2C - Waveshare 13992*,
<https://botland.com.pl/wyswietlacze-oled/11926-wyswietlaczoled-bialy-graficzny-15-128x128px-spii2c-waveshare-13992-5904422318246.html>
[dostęp: 07.01.2022]

- [24] Opis produktu na stronie sklepu botland, *Matryca LED 8x8 + sterownik MAX7219 - mała 32x32mm*,
<https://botland.com.pl/lancuchy-i-matryce-led/1887-matryca-led-8x8-sterownik-max7219-mala-32x32mm-5904422359058.html>
[dostęp: 04.01.2022]
- [25] Texas Instruments, Nota katalogowa wzmacniacza , *LM358*, 2019
- [26] Artykuł na portalu eCircuit Center, *How Open-Loop Gain Effects DC Accuracy*,
http://www.ecircuitcenter.com/Circuits/op_aol/op_aol_DC1.htm?fbclid=IwAR3ozVDNmmitrYEpPfNJU7k-ZspIlmuIxP46b9SQ5SzGENaGuFk7p20rC8
[dostęp: 12.01.2021]

A. ZDJĘCIA WYKONANEGO URZĄDZENIA



Rysunek A.1: Konstrukcja stroika