

Spis treści

Spis treści	1
1 Przegląd istniejących rozwiązań	2
1.1 Stroiki elektroniczne	2
1.2 Przegląd stroików podłogowych	3
2 Podstawy teoretyczne	5
2.1 Zasady działania gitary elektrycznej	5
2.2 Pasmo pracy gitary elektrycznej	6
2.3 Metody wykrywania częstotliwości	8
2.4 Metoda autokorelacji celowanej	9
2.5 Próbkowanie sygnału	10
3 Realizacja	11
3.1 Przygotowanie środowiska testowego	11
3.1.1 Implementacja w MATLAB	11
3.1.2 Nagrania strun gitary	11
3.2 Wybór mikrokontrolera	11
3.2.1 Porządkane komponenty mikrokontrolera	12
3.2.2 Wybrane płytki ewaluacyjne	13
3.3 Wybór wyświetlacza	13
3.3.1 Wyświetlacz TFT LCD	14
3.3.2 Wyświetlacz OLED	15
3.3.3 Matryca LED ze sterownikiem MAX7219	15
3.4 Tor analogowy	15
3.4.1 Schemat elektryczny	16
3.4.2 Parametry układu	17
4 Testy	19
4.1 Testy w MATLAB	19
4.1.1 Sygnał sinusoidalny	19
4.1.2 Próbki gitary elektrycznej	19
4.1.3 Autokorelacja celowana	20
Spis rysunków	24

1. 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 słyszanej różnicy częstotliwości dźwięków dokonuje korekty stroju instrumentu. Jest to metoda, której dokładność zależy od umiejętności muzyka i jest obarczona potencjalnie dużym błędem, jeśli muzykowi brak doświadczenia.

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 razkreslne) w systemie równomiernie temperowanym.



Rysunek 1.1: Kamerton klasyczny

1.1. 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, na której skupiono się w tej pracy. Wyróżniamy następujące typy stroików elektronicznych:



(a) Stroik klasyczny



(b) Stroik na klips



(c) Stroik podłogowy

Rysunek 1.2: 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 organia przenoszone przez gitarę po uderzeniu 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 są 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. Niektóre stroiki podłogowe posiadają funkcję wyciszenia sygnału dzięki czemu sygnał ze strojonej gitary nie jest przekazywany na wzmacniacz elektroakustyczny w wyniku czego dźwięk strojonego instrumentu nie jest słyszany przez publiczność.

W poniższej pracy skupiono się na konstrukcji stroika podłogowego.

1.2. Przegląd stroików podłogowych

W ramach analizy istniejących rozwiązań dokonano przeglądu trzech dostępnych na rynku stroików podłogowych. Wybrane stroiki to:



Rysunek 1.3: Wybrane stroiki podłogowe

BOSS TU-3- ulepszona wersja stroika TU-2 powszechnie uważanego za najlepiej sprzedający się na świecie stroik podłogowy [1]. Posiada odporny na odblaski, 21 segmentowy ledowy wyświetlacz z dodatkowym trybem wysokiej jasności, dedykowanym do wykorzystania urządzenia na zewnątrz. Stroik ten posiada tryb pracy pozwalający również na strojenie siedmiostrunowych gitar elektrycznych oraz basowych gitar elektrycznych. Urządzenie to, w standardowej konfiguracji, po włączeniu 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 gdy jest ono wyłączone sygnał jest przekazywany bez zakłóceń i modyfikacji. Strojenie przy pomocy 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 [2].

KORG pitchblack PB-01 - stroik prosty w użytkowaniu oraz cechujący się wysoka dokładnością pomiaru [1]. 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 [3]. Strojenie tym stroikiem odbywa się z dokładnością 1 centa [4].

TC Electronic Polytune 2 Mini - małe rozmiary stroika pozwalają na zaoszczędzenie miejsca i umożliwiają wykorzystanie wolnej przestrzeni na inne efekty gitarowe 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 [5].

2. 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 metody. Przytoczono podstawowe twierdzenia dotyczące próbkowania sygnałów oraz uzasadniono dobór częstotliwości próbkowania wykorzystanej przy realizacji projektu.

2.1. 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 2.1: 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.



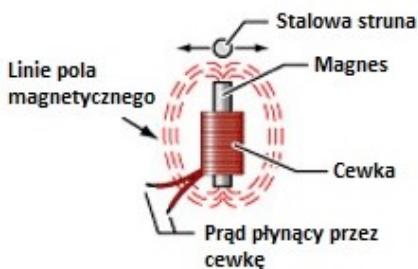
Rysunek 2.2: Gitara elektryczna

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 2.3: 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. Stalowe struny drgające w polu magnetycznym wytworzonym przez magnesy powodują indukowanie się prądu w obwodzie cewek. Częstotliwość zaindukowanego sygnału elektrycznego odpowiada częstotliwości z jaką drgają struny [6].



Rysunek 2.4: Schemat działania przetwornika w gitarze elektrycznej

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

2.2. Pasmo pracy 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 [7]. Do nastrojenia gitary wykorzystuje się jednak dużo mniejszy zakres częstotliwości. W stroju standardowym 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), e¹ (329,63 Hz) [8].

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 poniższej 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

Rysunek 2.5: Dźwięki muzyczne i odpowiadające im częstotliwości podzielone na oktawy[9]

Zdefiniowany powyżej zakres częstotliwości mogących wystąpić w procesie strojenia gitary elektrycznej oznacza, że w widmie badanego sygnału mogą wystąpić jedynie prążki odpowiadające częstotliwości co najmniej 63 Hz . Kolejne składowe harmoniczne, w muzyce zwane alikwotami, występujące w sygnale nie sąbrane pod uwagę podczas strojenia instrumentu gdyż nie mają one znaczenia przy określaniu wysokości dźwięku.

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[10].

$$\frac{f_x}{f_y} = \sqrt[1200]{2} \approx 1,0006 \quad (2.1)$$

W tej pracy zdecydowano, że dźwięki odległe maksymalnie o **dwa centy** od częstotliwości właściwej pożądanemu dźwiękowi będą uznawane za dźwięki właściwie nastrojone.

2.3. 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[11][12].

Ton podstawowy - inaczej częstotliwość podstawowa, składowa główna lub składowa podstawowa. Jest to najniższy ton w szeregu harmonicznym. Oznacza to, że ma on najmniejszą częstotliwość z całego szeregu. Od jego częstotliwości zależy wysokość dźwięku.[13]

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 metody hybrydowe operują na sygnale w obu wymienionych powyżej dziedzinach. W tej pracy postanowiono rozważyć następujące trzy metody.

Metoda autokorelacji - jest to metoda czasowa, która polega na skorelowaniu badanego sygnału z samym sobą. Funkcję autokorelacji dla sygnału dyskretnego można opisać wzorem:

$$r[n] = \sum_m x(m)x(m+n) \quad (2.2)$$
$$m \in [0, N], n \in [-N, N]$$

gdzie:

x - badany sygnał

m - numer próbki

n - opóźnienie sygnału

N - ilość próbek w badanym sygnale

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

Metoda AMDF została opisana i zdefiniowana przez *R. L. Millera i E. S. Weibela*. Jest metodą czasową bazującą na różnicach sygnału opóźnionego oraz sygnału oryginalnego. Dla dyskretnego sygnału metoda AMDF dana jest następującym wzorem funkcji w postaci różnicowej.

$$AMDF(n) = \sum_{m=1}^M |x(m) - x(m+n)|^k, k = 1 \quad (2.3)$$

gdzie:

x - badany sygnał

n - opóźnienie sygnału

k - gęstości, dla metody AMDF przyjmuje wartość 1.

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

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

$$C_r = \sum_{n=1}^m \ln(X_n) \cdot \cos\left(\frac{r \cdot n\pi}{m}\right) \quad (2.4)$$

Ton podstawowy szacowany jest z położenia maksimum w dziedzinie cepstrum.

2.4. Metoda autokorelacji celowanej

Do zrealizowania algorytmu wykrywania tonu podstawowego zdecydowano się wykorzystać metodę autokorelacji. Ze względu na dużą ilość wykonywanych operacji a tym samy długi czas trwania algorytmu dokonano modyfikacji metody. By uniknąć pomyłki zmodyfikowana metoda będzie od teraz nazywana **metodą autokorelacji celowanej**.

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

Korzystając z właściwości autokorelacji, którą jest symetria sprzężona (ang. conjugate symmetry)[14] 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 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 odpowiadająca 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 niej różnego od zera, pozwala wyznaczyć długość okresu badanego sygnału w próbkach. Będzie miał on długość odpowiadającą odległość między glo-

balnym maksimum ($n = 0$) a wyznaczonym maksimum lokalnym. By oszacować okres próbkowanego sygnału analogowego należy skorzystać z następującego wzoru:

$$f = \frac{f_s}{T} \quad (2.5)$$

gdzie:

f - częstotliwość badanego sygnału analogowego

f_s - częstotliwość z jaką sygnał został spróbkowany

T - okres sygnału dyskretnego wyznaczony w ilości próbek

2.5. Próbkowanie sygnału

Twierdzenie o próbkowaniu, inaczej też twierdzenie Whittakera - Nyquista - Kotielnikowa - Shannon'a, 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[15].

Nadpróbkowanie (ang. oversampling) - polega na próbkowaniu sygnału z częstotliwością wyższą niż częstotliwość spełniająca twierdzenie o próbkowaniu. Nadpróbkowanie pozwala na zwiększenie rozdzielczości oraz redukuje ryzyko wystąpienia aliasingu. Przeciętne ucho ludzkie słyszy dźwięki w paśmie częstotliwości 20 Hz do 20 kHz. Z tego powodu do próbkowania sygnału analogowego zwykle stosowana jest, spełniająca twierdzenie o próbkowaniu częstotliwość 48 kHz. By zastosować nadpróbkowanie sygnału najczęściej wykorzystuje się wielokrotności tej częstotliwości 96 kHz lub 192 kHz [16].

(.....)

3. REALIZACJA

W tym rozdziale opisano fizyczną realizację projektu, implementację algorytmu autokorelacji celowanej oraz przygotowanie środowiska testowego.

3.1. Przygotowanie środowiska testowego

By w kolejnych etapach realizacji projektu możliwe było przeprowadzenie testów stworzono środowisko testowe.

3.1.1. Implementacja w MATLAB

W pierwszym kroku 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.

3.1.2. 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*.

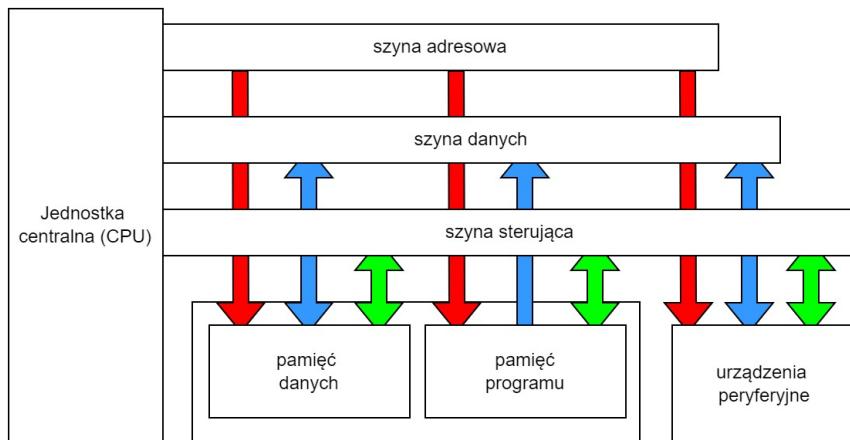


Rysunek 3.1: Interfejs audio Focusrite Scarlett 2i2 2gen.

3.2. Wybór mikrokontrolera

Informacje i rozważania w tym podrozdziale zostały oparte o publikację[17]. **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 sche-

macie zobrazowano uproszczoną budowę mikrokontrolera.



Rysunek 3.2: Uproszczona budowa mikrokontrolera.

Jako dwie najważniejsze cechy procesora zawartego w mikrokontrolerze określa się[17]:

- **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 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.

3.2.1. Porządkowane komponenty mikrokontrolera

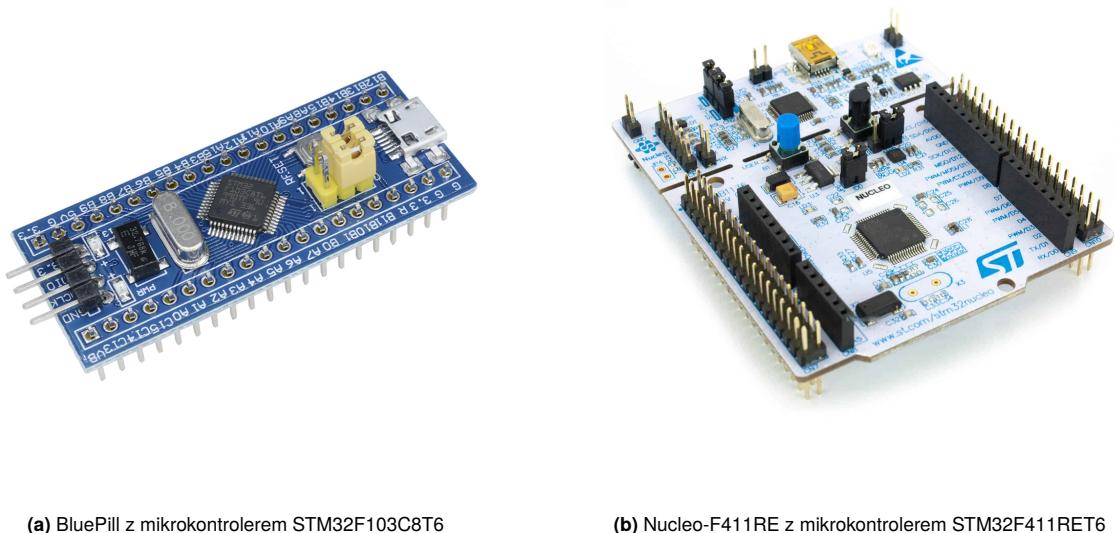
Wyznaczono kilka komponentów mikrokontrolerów, należących do wspomnianych powyżej grup, potrzebny do realizacji tego projektu.

- **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 realizacji transmisji szeregowej za pomocą szeregowego interfejsu urządzeń peryferyjnych.

3.2.2. Wybrane płytki ewaluacyjne

W ceku 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 3.3: Wybrane płytki ewaluacyjne

Istotne do realizacji projektu parametry zestawiono w tabeli poniżej. Do porównania wykorzystano dane z źródeł [18][19].

Pomimo braku koprocessora FPU, który został przewidziany jako uproszczenie implementacji algorytmu autokorelacji celowanej, płytka ewaluacyjna *BluePill* spełniała pierwotne założenia projektowe. Została jednak wyeliminowana w pierwszych etapach implementacji, ze względu na małą pamięć typu RAM. Również 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 znacząco usprawnił i uprościł proces implementacji algorytmu. Dodatkowa jednostka arytmetyczna pozwoliła na stworzenie pierwszych iteracji oprogramowania, bez potrzeby zbytniego przejmowania się opercjami na liczbach zmiennoprzecinkowych.

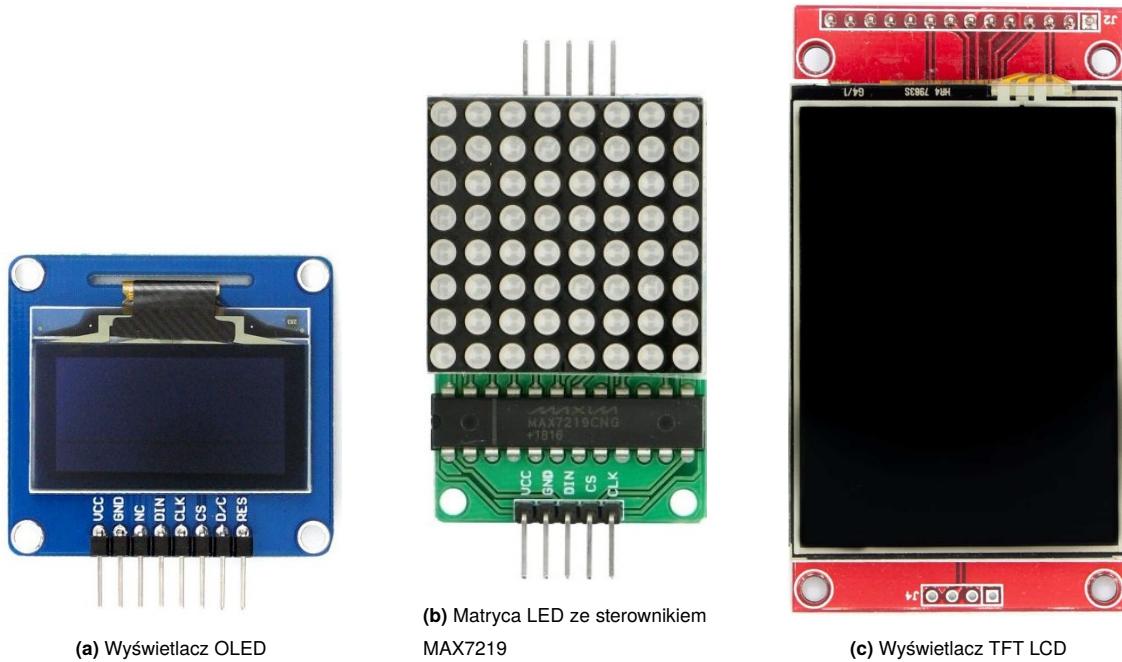
3.3. Wybór wyświetlacza

Projekt strojka podłogowego zakłada stworzenie interfejsu pozwalającego na komunikację urządzenia z użytkownikiem. Musi to być rozwiązanie pozwalające potencjalnemu muzykowi na weryfikację procesu

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

Rysunek 3.4: Porównanie parametrów płyt Bluepill i Nucleo-F411RE.

strojenia. W tym celu zdecydowano się wyposażyć projektowane urządzenie w wyświetlacz. Rozważano następujące typy.



Rysunek 3.5: Wybrane typy wyświetlaczy

3.3.1. Wyświetlacz TFT LCD

Wyświetlacz TFT LCD 2,4" ma rozdzielcości 240 x 320 px. Komunikacja z nim odbywa się przez interfejs SPI. Posiada slot na karty SD oraz możliwość sterowania dotykiem[20]. Wyświetlacz wykonane w technologii TFT LCD (wyświetlacz ciekłokrystaliczny w technologii cienkowarstwowych tranzystorów ang.

liquid-crystal display thin film transistor) są tak zwany 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. Wyświetlać ten został ostatecznie odrzucony ze względu na duży koszt[20] oraz potencjalnie skomplikowany sposób sterowania.

3.3.2. Wyświetlacz OLED

Wyświetlacz OLED 1,3” ma rozdzielcość $128 \times 64 \text{ px}$. Możliwa jest komunikacja prze interfejsy SPI oraz I2C. Sterowanie odbywa się za pomocą sterownika **SH1106**[21]. Wyświetlacz wykonane w technologii OLED (organiczna dioda elektroluminescencyjna ang. organic light-emitting diode) składają się z warstw przewodzącej i emisjnej, wykonanych z przewodzących organicznych polimerów, oraz katody i anody. OLED zaczyna świecić gdy po przyłożeniu do niej napięcia przepływające elektrony 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 małe rozmiar który skutkuje trudnym do odczytania obrazem. Koszt wyświetlacz OLED o większej przekątnej jest nieakceptowalny[22].

3.3.3. Matryca LED ze sterownikiem MAX7219

Ostatecznie zdecydowano się wykorzystać **Matrycę LED 8x8** o rozmiarach $32 \times 32\text{mm}$. 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[23]. Rozwiążanie 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.

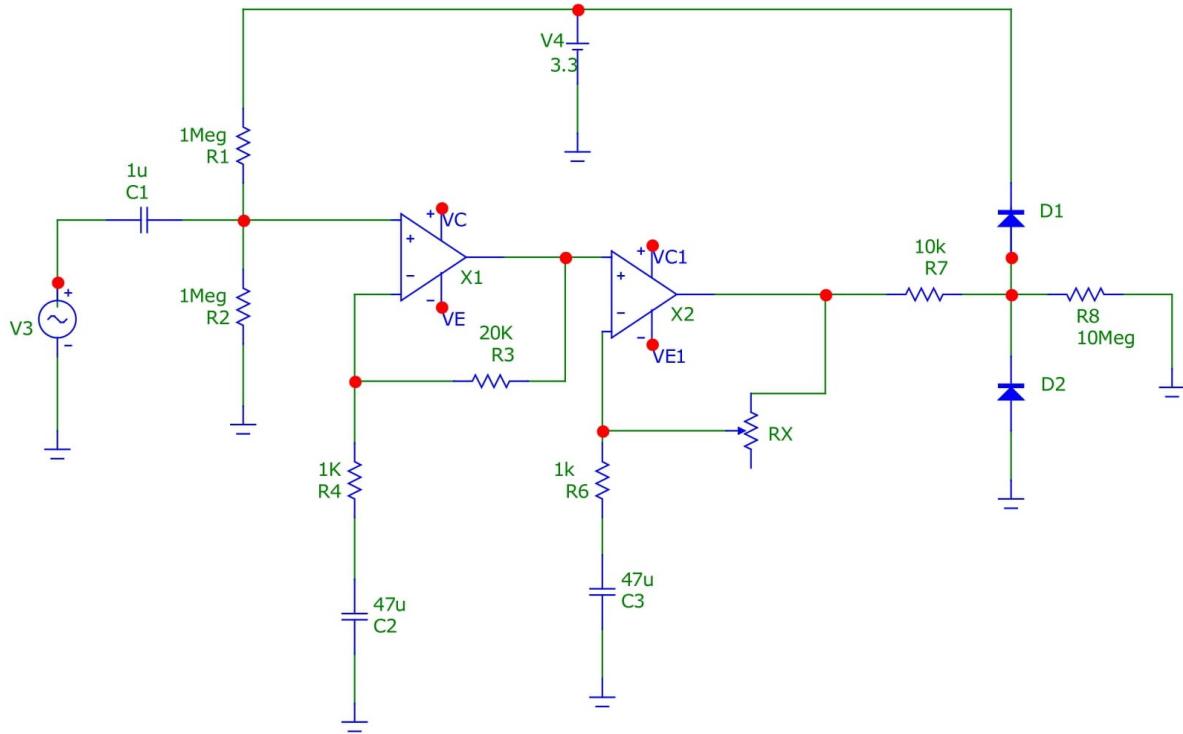
3.4. Tor analogowy

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

- Sygnału 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 stałą.
- Konieczne jest odpowiednie wzmacnienie 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[24].

3.4.1. Schemat elektryczny



Rysunek 3.6: Schemat elektryczny toru analogowego

Po szczególne elementy schematu z Rysunku 3.6 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 pożąданej 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 sprawiają, 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 mikrokontrolerze.

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

R_8 - rezistor symulujący impedancję wejścia ADC mikrokontrolera

3.4.2. 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 dzielnik napięcia powstały z rezystorów R_1 i R_2 . Wartość składowej stałej można obliczyć z wzoru.

$$\bar{V} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_4 \quad [\text{V}] \quad (3.1)$$

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 X1 jest dane wzorem.

$$A_{v1} = 1 + \frac{R_3}{R_4} \quad (3.2)$$

Następnie sygnał wzmacniany jest przez wzmacniacz X_2 . Jego wzmocnienie nie jest 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.

$$A_{v2} = 1 + \frac{R_x}{R_6} \quad (3.3)$$

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

$$A_{vc} = A_{v1} \cdot A_{v2} = 1 + \frac{R_3}{R_4} + \frac{R_x}{R_6} + \frac{R_3 \cdot R_x}{R_4 \cdot R_6} \quad (3.4)$$

Po podstawieniu rzeczywistych wartości elementów wykorzystanych do konstrukcji tego układu otrzymano wzmocnienie wynoszące.

$$A_{vc} = 21 + R_x \cdot 0,021 \quad (3.5)$$

Dolina częstotliwości graniczna. Para rezistor R_3 i kondensator C_2 tworzą filtr górnoprzepustowe, którego $3dB$ częstotliwość graniczna f_{g1} można wyznaczyć z następującego wzoru.

$$f_{g1} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_4 + C_2} \quad [\text{Hz}] \quad (3.6)$$

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 3.6.

$$f_{g2} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_6 + C_3} \quad [\text{Hz}] \quad (3.7)$$

Podstawienie do wzoru 3.7 wartości stałej czasowej R_6C_2 daje identyczny wynik $f_{g2} \approx 3,39 \text{ Hz}$. Oznacza to, że graniczna $3dB$ częstotliwość dla całego układu wynosi $f_g = f_{g1} = f_{g2} \approx 3,39 \text{ Hz}$. Nie stanowi to problemu gdyż jak wyznaczono w rozdziale 1 w punkcie 2.2 tej pracy najwyższa częstotliwość brana pod uwagę w tym projekcie to 63 Hz .

Góra częstotliwość graniczna. Wartość górnej częstotliwości granicznej wynika z faktu, że wzmacniacz operacyjny nie pracuje w trybie małosygnalowym. Powoduje to ograniczenie przenoszonego pasma. Zakładając wartość wyjściowego napięcia międzyszczytowego z wzmacniacza operacyjnego równą zakresowi pomiarowemu ADC mikrokontrolera, można oszacować wartość górnej częstotliwości granicznej. W oparciu o dokumentacje wykorzystanego wzmacniacza[25] wyznaczono, że wyniesie ona około 20 kHz .

4. TESTY

4.1. Testy w MATLAB

W pierwszej fazie testów wykorzystano oprogramowanie *MATLAB*. Za 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*.

4.1.1. 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 spróbkiowane 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

Rysunek 4.1: Wyniki pomiarów dla dwóch sygnałów sinusoidalnych

4.1.2. 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 ($82,41\text{ Hz}$) oraz e^1 ($329,63\text{ Hz}$). 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

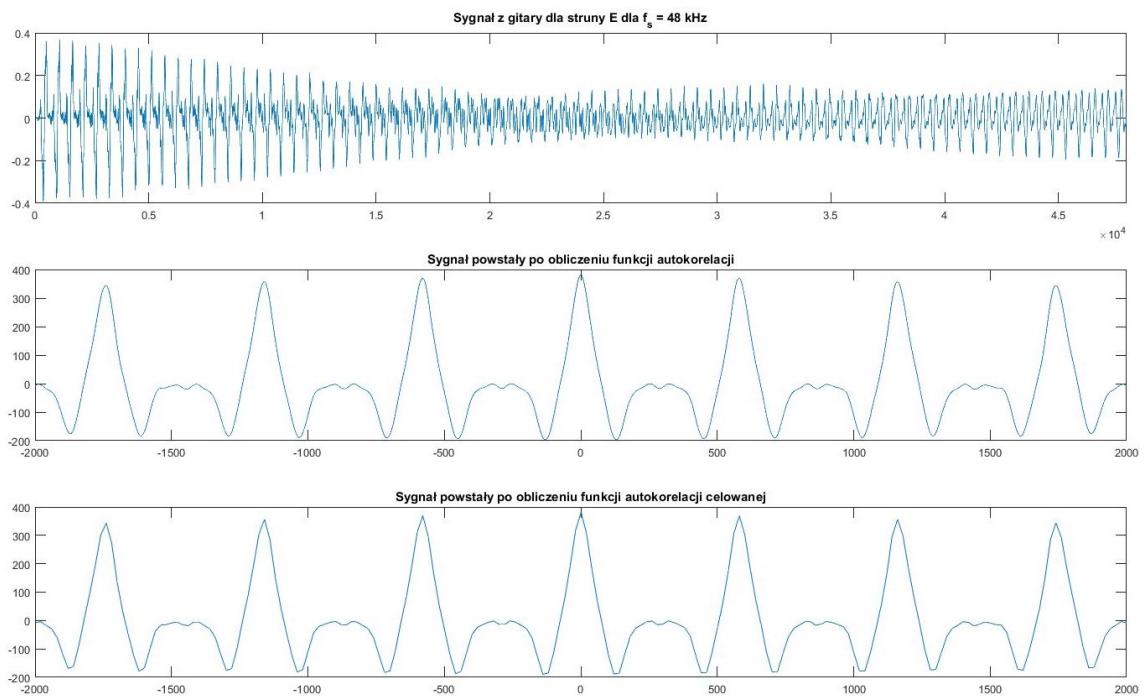
Rysunek 4.2: Wyniki pomiarów dla próbek gitary elektrycznej

W oparciu o pierwszego testu, którego wyniki znajdują się w tabeli na Rysunku 4.1, 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

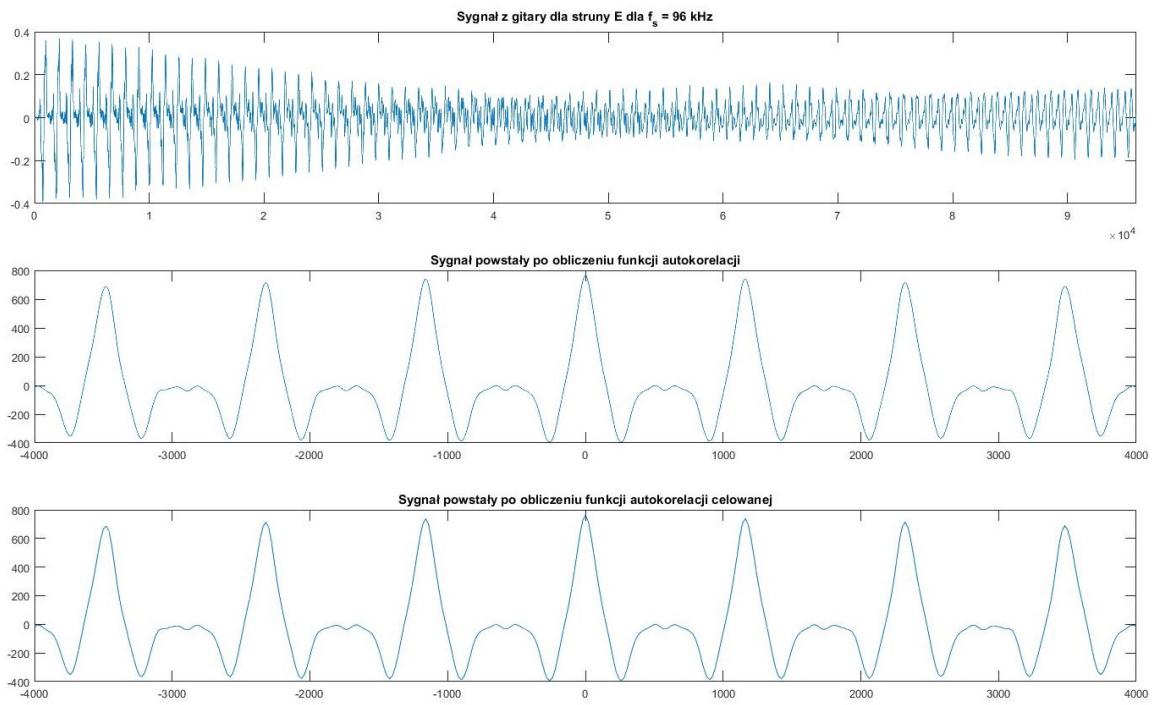
podobieństwo otrzymanych wyników nie pozwala jednoznacznie określić która częstotliwość próbkowania daje najdokładniejszy wynik. Pozwala jednak bezapelacyjnie stwierdzić, że metoda autokorelacji nadaje się do wykrywania tonu podstawowego sygnału wytwarzanego przez przetworniki gitary elektrycznej.

4.1.3. Autokorelacja celowana

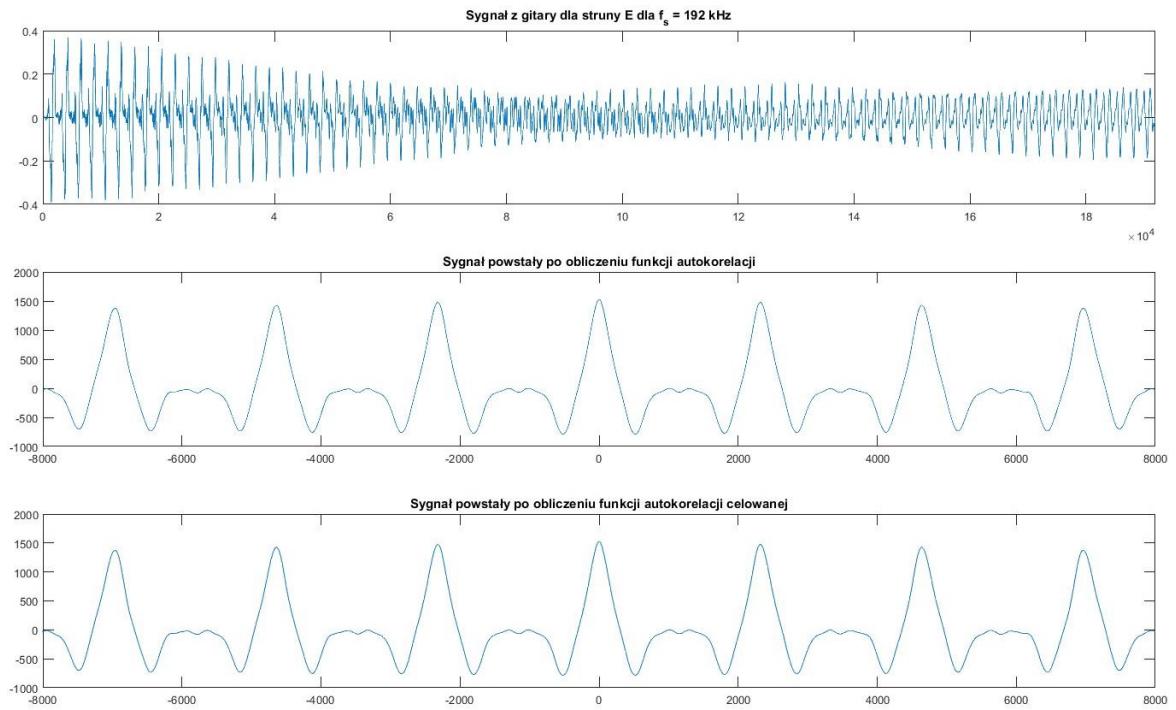
W kolejnym teście postanowiono sprawdzić dla której z testowanych powyżej częstotliwości próbkowania ($f_s = \{48 \text{ kHz}, 96 \text{ kHz}, 192 \text{ kHz}\}$) metoda autokorelacji celowanej może dać satysfakcyjujące wyniki. W tym celu wykorzystano nagrane próbki strun E i e^1 . Obliczono dla nich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



Rysunek 4.3: Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 48 \text{ kHz}$

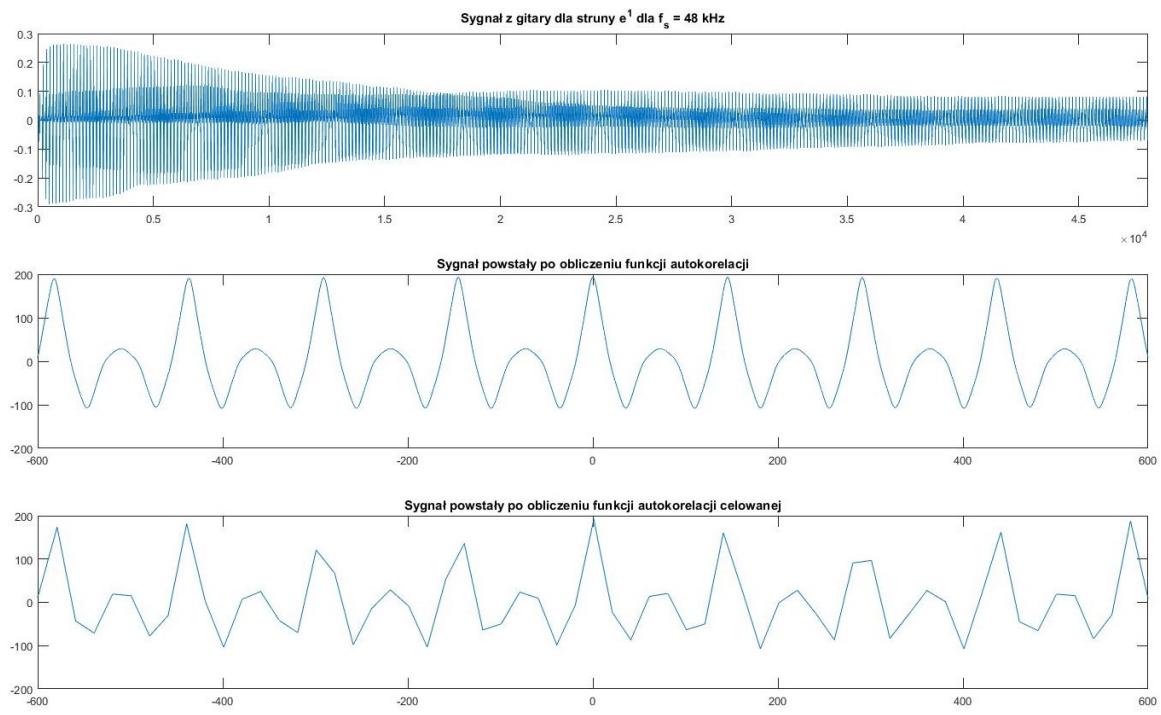


Rysunek 4.4: Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 96 \text{ kHz}$

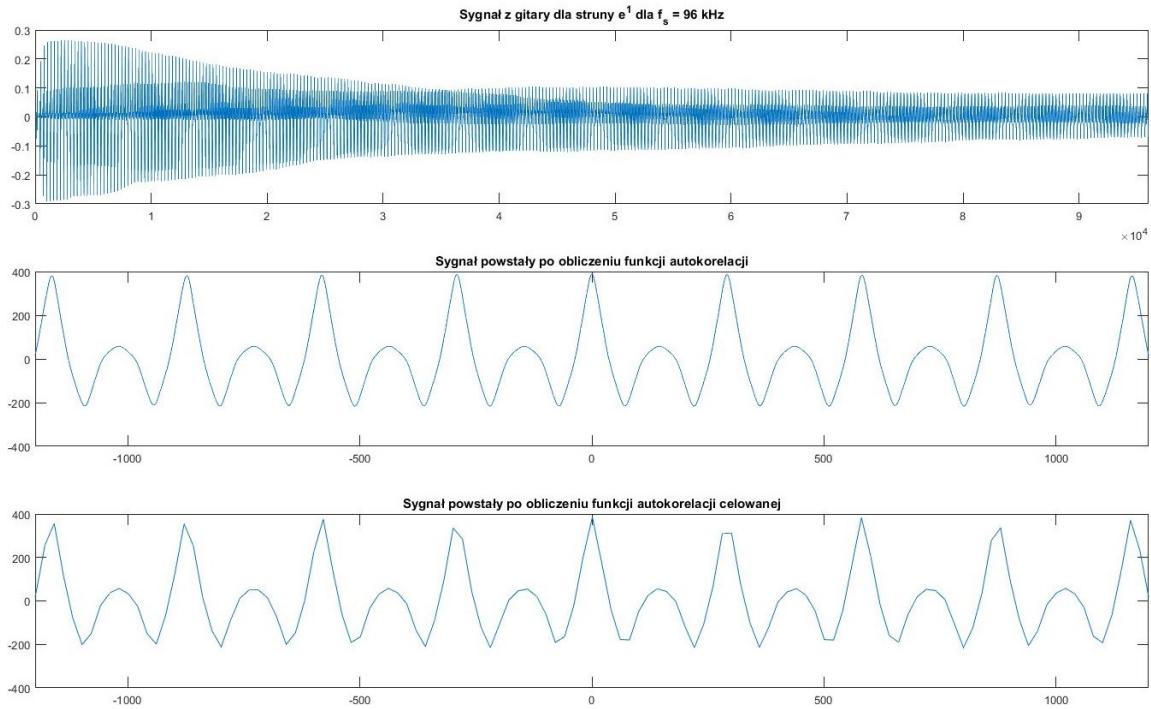


Rysunek 4.5: Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 192 \text{ kHz}$

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.

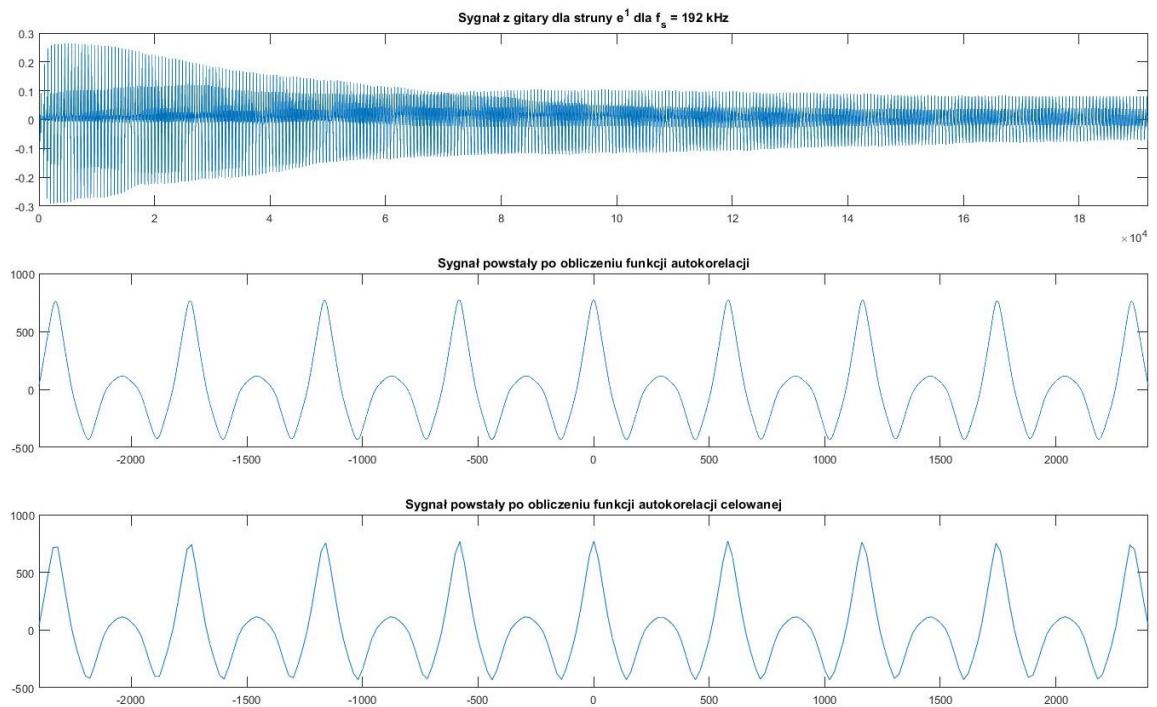


Rysunek 4.6: Wyniki pomiarów dla próbki struny e¹ przy $f_s = 48 \text{ kHz}$



Rysunek 4.7: Wyniki pomiarów dla próbki struny e¹ 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 iż nie można go wykorzystać w metodzie autokorelacji celowanej.



Rysunek 4.8: Wyniki pomiarów dla próbki struny e^1 przy $f_s = 192 \text{ kHz}$

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

Spis rysunków

1.1	Kamerton klasyczny	2
1.2	Przykłady stroików elektronicznych	2
1.3	Wybrane stroiki podłogowe	3
2.1	Gitarę akustyczną	5
2.2	Gitarę elektryczną	5
2.3	Przetwornik gitary elektrycznej	6
2.4	Schemat działania przetwornika w gitarze elektrycznej	6
2.5	Dźwięki muzyczne i odpowiadające im częstotliwości podzielone na oktawy[9]	7
3.1	Interfejs audio Focusrite Scarlett 2i2 2gen.	11
3.2	Uproszczona budowa mikrokontrolera.	12
3.3	Wybrane płytki ewaluacyjne	13
3.4	Porównanie parametrów płyt Bluepill i Nucleo-F411RE.	14
3.5	Wybrane typy wyświetlaczy	14
3.6	Schemat elektryczny toru analogowego	16
4.1	Wyniki pomiarów dla dwóch sygnałów sinusoidalnych	19
4.2	Wyniki pomiarów dla próbek gitary elektrycznej	19
4.3	Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 48 \text{ kHz}$	20
4.4	Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 96 \text{ kHz}$	21
4.5	Wyniki pomiarów dla próbki struny E przy $f_s = 192 \text{ kHz}$	21
4.6	Wyniki pomiarów dla próbki struny e^1 przy $f_s = 48 \text{ kHz}$	22
4.7	Wyniki pomiarów dla próbki struny e^1 przy $f_s = 96 \text{ kHz}$	22
4.8	Wyniki pomiarów dla próbki struny e^1 przy $f_s = 192 \text{ kHz}$	23

Bibliografia

- [1] Artykuł na portalu Music Critic, *10 Best Tuner Pedals in 2021*,
<https://musiccritic.com/equipment/pedals/best-tuner-pedals/>
[dostęp: 20.12.2021]
- [2] 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]
- [3] 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]
- [4] 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]
- [5] Opis produktu na stronie sklepu Muziker, *TC Electronic Polytune 2 Mini*,
<https://www.muziker.pl/tc-electronic-polytune-2-mini>
[dostęp: 21.12.2021]
- [6] 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]
- [7] Artykuł na portalu Gitara dla początkujących, *Zakres częstotliwości gitary*,
<https://www.gitaradlapoczatkujacych.pl/zakres-czestotliwosci.html>
[dostęp: 22.12.2021]
- [8] Artykuł na portalu The guitar lessons, *Zakres częstotliwości gitary*,
<http://www.theguitarlesson.com/online-guitar-tools/online-guitar-tuner/>
[dostęp: 22.12.2021]
- [9] 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]
- [10] PLICH M., TOPOROWSKI M., *Dawne temperacje. Podstawy akustyczne i praktyczne wykorzystanie*,
2014
- [11] 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]
- [12] 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]
- [13] BENWARD B., SAKER M., *Music in theory and Practise*, 2003
- [14] Artykuł na portalu Tutorials point, *Convolution and Correlation*,
https://www.tutorialspoint.com/signals_and_systems/convolution_and_correlation.htm
[dostęp: 02.01.2022]
- [15] 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]
- [16] Materiały dydaktyczne Katedry Systemów Multimedialnych, Wydziału Elektroniki Telekomunikacji i Informatyki, Politechniki Gdańskiej na temat, *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów w języku Python*,
<https://sound.eti.pg.gda.pl/~greg/dsp/05-Interpolacja.html>
[dostęp: 31.12.2021]
- [17] Czaja Z., Materiały do wykładu, *Mikroproceosry i Mikrokontrolery*, 2015
- [18] STMicroelectronics, Nota katalogowa mikrokontrolera, *STM32F103C8T6*, 2015
- [19] STMicroelectronics, Nota katalogowa mikrokontrolera, *STM32F411RET6*, 2017
- [20] 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-lcd-24-240x320px-spi-5904422341718.html>
[dostęp: 04.01.2022]
- [21] 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]
- [22] 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]
- [23] 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]

- [24] Berenson D., Reeves G., *Digital Guitar Tuner*, 2004

[https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2004/
db25/complete2.htm](https://people.ece.cornell.edu/land/courses/ece4760/FinalProjects/s2004/db25/complete2.htm)

[dostęp: 06.01.2022]

- [25] Texas Instruments, Nota katalogowa wzmacniacza , *LM358*, 2019