Centrum Nauczania Matematyki i Fizyki, Politechnika £ódzka

Analiza harmoniczna dźwięku.

Ćwiczenie M6

Spis treści

1 Cel ćwiczenia. 1

2 Wiadomości wstępne 2

2.1 Fale akustyczne. 2

2.2 Dźwięk. Widmo dźwięku. 2

2.3 Cechy dźwięku. 3

2.3.1 Głośność dźwięku 3

2.3.2 Wysokość dźwięku 4

2.3.3 Barwa dźwięku 4

3 Metoda pomiaru 4

4 Pomiary widma... 5

4.1 Widmo akustyczne... 5

4.2 Widmo akustyczne gitary... 6

4.3 Widmo akustyczne mowy 6

4.3.1 Widma liniowe 6

4.3.2 Widma czasowe 7

4.4 Widmo dźwięku... 7

4.5 Prędkość fali w strunie 8

5 DODATEK - GITARA ELEKTRYCZNA 9

5.1 Fale stojące 9

5.2 Przetworniki gitary elektrycznej 11

1 Cel ćwiczenia.

Celem ćwiczenia jest:

- badanie widma dźwięku wydawanego przez różne źródła
- badanie zmian widma zachodzących przy zmianie warunków wzbudzenia źródła dźwięku.

2 Wiadomości wstępne

2.1 Fale akustyczne.

Obiekt wykonujący drgania powoduje okresowe ruchy cząsteczek otaczającego go gazu (zwykle powietrza) będące z nim w bezpośrednim kontakcie. Cząsteczki te, działając siłami molekularnymi, pobudzają do drgań kolejne cząsteczki gazu. W gazie otaczającym drgający obiekt powstaje i rozchodzi się zaburzenie polegające na tworzeniu się okresowych zagęszczeń i rozrzedzeń gazu. Zaburzenie to zwane jest falą akustyczną. Częstotliwość rozchodzącej się w gazie fali akustycznej równa jest częstotliwości drgań źródła.

Fala akustyczna jest falą podłużną. Oznacza to, że kierunki drgań cząsteczek gazu i kierunek rozchodzenia się fali w gazie pokrywają się.

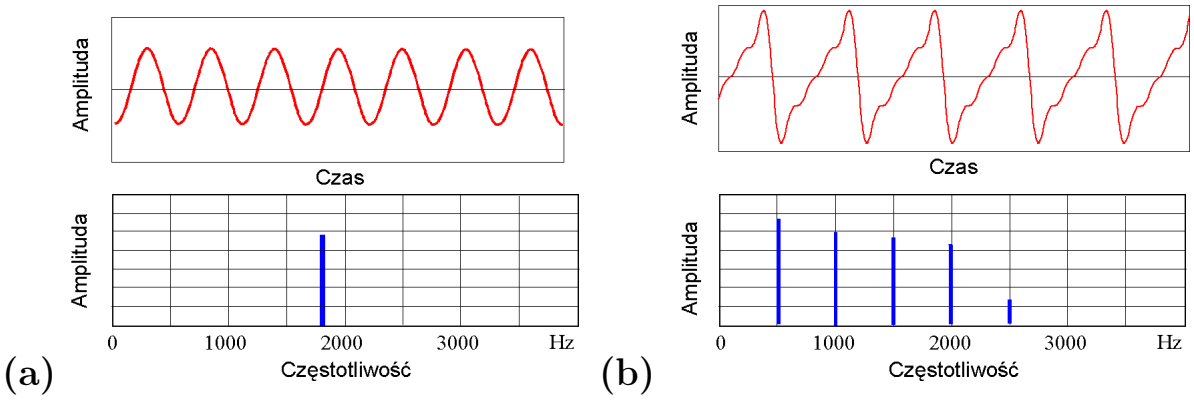
2.2 Dźwięk. Widmo dźwięku.

Źródłem fali akustycznej może stać się każde sprężyste ciało pobudzone do drgań przez uderzenie, szarpnięcie, potarcie itp. Najczęściej wzbudzone źródło wykonuje jednocześnie wiele niezależnych drgań o różnych amplitudach i częstotliwościach. Częstotliwości i amplitudy poszczególnych drgań źródła, zależą od cech źródła tzn. jego wielkości, kształtu, rodzaju materiału, z jakiego jest wykonane, sposobu zamocowania a także od sposobu pobudzenia go do drgań. Każdy rodzaj drgań źródła generuje związaną z nim falę akustyczną. Zatem każdy przedmiot wykonujący złożone drgania może być źródłem wielu jednocześnie rozchodzących się fal o różnych częstotliwościach i natężeniach. Fala akustyczna, rozchodząca się w ośrodku otaczającym źródło powstaje ze złożenia tych fal. Fala ta na ogół ma przebieg okresowy niesinusoidalny i zwana jest dźwiękiem.

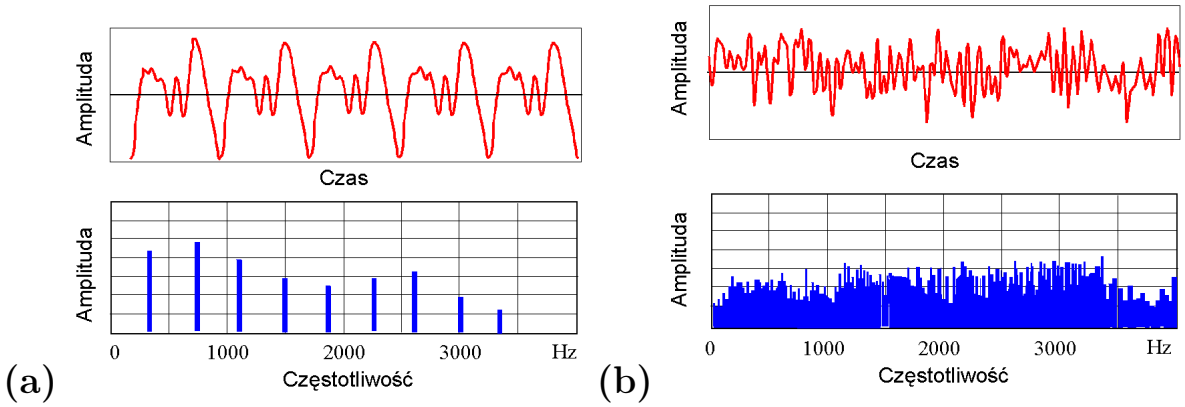
Jeżeli źródło wykonuje drgania harmoniczne o jednej częstotliwości to wydawany przez niego dźwięk określa się jako ton. Źródło wykonujące jednocześnie wiele drgań wydaje dźwięk złożony z wielu tonów. Jeżeli częstotliwości tonów spełniają warunek $f_1 : f_2 : f_3.... = 1 : 2 : 3....$ to dźwięk ten zwany jest wielotonem harmonicznym. Składowa o najniższej częstotliwości zwana jest tonem podstawowym lub pierwszą harmoniczną dźwięku a składowe o wyższych częstotliwościach odpowiednio drugą, trzecią itd. harmoniczną. Jeśli źródło wykonuje drgania, których częstotliwości nie są wielokrotnościami częstotliwości tonu podstawowego to wydawany wtedy dźwięk zwany jest wielotonem nieharmonicznym.

Analiza harmoniczna dźwięku polega na ustaleniu jakie są częstotliwości i amplitudy drgań harmonicznych składających się na dany dźwięk. Analizę taką można przeprowadzić mechanicznie używając do tego celu różnego typu rezonatorów akustycznych mających postać skrzynek lub rurek o wielu kształtach i rozmiarach. Rezonator "wychwytuje" z badanego dźwięku złożonego ton harmoniczny o określonej częstotliwości. Za pomocą zespołu wielu rezonatorów można rozłożyć dźwięk na tony proste. Analizę harmoniczną dźwięku można też przeprowadzić "od końca" metodą FFT (Fast Fourier Transform). Metoda ta (w uproszczeniu) polega na obliczeniu ilu i jakich tonów harmonicznych należało by użyć, aby po ich złożeniu otrzymać dźwięk jak najbardziej zbliżony do badanego dźwięku.

W wyniku analizy harmonicznej otrzymuje się tzw. widmo dźwięku. Widmo dźwięku zwykle przedstawia się w postaci wykresu prążkowego. Na osi poziomej wykresu znajdują się częstotliwości drgań harmonicznych występujących w badanym dźwięku, na osi pionowej amplitudy tych drgań. Widma kilku dźwięków przedstawiają rysunki 1 i 2.



Rysunek 1: Porównanie przebiegu czasowego i widma aksutycznego: dźwięku o jednej częstotliwości (a) oraz dźwięku złożonego (b)



Rysunek 2: Porównanie przebiegu czasowego i widma akustycznego dźwięku wydawanego przez fortepian (a) oraz szumu (b)

2.3 Cechy dźwięku.

Wrażenie, jakie wywołuje odbierana przez zmysł słuchu fala akustyczna zależy od amplitud i częstotliwości zawartych w niej fal składowych. Każdy słyszany dźwięk można scharakteryzować podając jego cechy: głośność, wysokość i barwę. Z uwagi na budowę i złożoną fizjologię zmysłu słuchu nie ma prostej i bezpośredniej relacji pomiędzy fizycznymi parametrami fali akustycznej i subiektywnym wrażeniem, jakie wywołuje odbiór takiej fali. Przybliżone zależności pomiędzy fizycznymi i subiektywnymi cechami dźwięku podaje tabela 1.

Parametr fali akustycznej	Cecha dźwięku
amplituda	głośność
częstotliwość podstawowa	wysokość
amplitudy i częstotliwości fal składowych	barwa

Tablica 1: Przybliżone zależności pomiędzy fizycznymi i subiektywnymi cechami dźwięku.

2.3.1 Głośność dźwięku

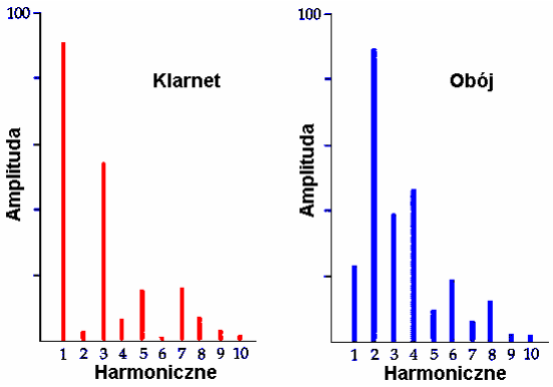
Odczuwana subiektywnie głośność dźwięku jest proporcjonalna (ale nie zawsze wprost proporcjonalna) do amplitudy odbieranej fali akustycznej.

2.3.2 Wysokość dźwięku

Ludzki zmysł słuchu rejestruje fale akustyczne, których częstotliwości mają wartość od 16 Hz do 20000 Hz. Podane wartości przyjmuje się umownie ponieważ czułość słuchu jest cechą osobniczą, zmienia się też z wiekiem człowieka. Fale akustyczne o częstotliwościach poniżej 16 Hz zwane są infradźwiękami, natomiast fale, których częstość przewyższa 20 000 Hz noszą nazwę ultradźwięków. Zwyczajowo dźwięki o małych częstotliwościach określane są jako niskie. Wzrost częstotliwości słyszanego dźwięku odczuwany jest jako wzrost wysokości dźwięku.

2.3.3 Barwa dźwięku

Barwa jest cechą dźwięku, która pozwala odróżniać od siebie dźwięki o tej samej głośności i wysokości wydawane przez różne źródła a nawet przez to samo źródło w różny sposób pobudzane do drgań. Barwa dźwięku zależy od składu harmonicznego dźwięku czyli ilości, częstotliwości i natężeń drgań składowych. Na barwę silny wpływ ma także sposób, w jaki zmienia się w czasie natężenie tonów harmonicznych dźwięku. Dzięki różnemu składowi harmonicznemu czyli barwie dźwięku można z łatwością odróżnić dźwięk fortepianu od dźwięku skrzypiec lub rozpoznać głosy różnych osób. Badanie barwy dźwięków i czynników mających na nią wpływ odgrywa wielką rolę w konstrukcji instrumentów muzycznych, aparatury nagłaśniającej, w kształtowaniu akustyki pomieszczeń.



Rysunek 3: Widma akustyczne dźwięku o tej samej wysokości (częstotliwości) granego na dwóch różnych instrumentach

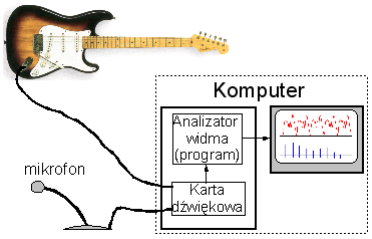
3 Metoda pomiaru

W ćwiczeniu analiza harmoniczna badanych dźwięków dokonywana będzie metodą FFT. Metoda FFT jest traktowana jako gotowe, standardowe narzędzie do badania dźwięku. Od studentów nie wymaga się znajomości zasad metody FFT.

Na stanowisku pomiarowym znajdują się:

- Komputer z odpowiednim oprogramowaniem (opis użycia programu zamieszczono w oddzielnym zbiorze). Wyniki analizy prezentowane są w postaci wykresów na monitorze komputera.
- Mikrofon, którego zadaniem jest przetworzenie słyszalnego dźwięku na sygnał elektryczny. Sygnał ten poddawany jest następnie analizie komputerowej.

- Gitara elektryczna (jedna na dwa stanowiska)
- Kabel połączeniowy do gitary eketrycznej
- Inne źródła dźwięku (skład zestawu dodatkowych źródeł zależy od decyzji prowadzącego)



Rysunek 4: Stanowisko pomiarowe do analizy harmonicznej dźwięku.

4 Pomiary widma dźwięku wybranych źródeł.

- Poniżej przedstawiono kilka wariantów pomiarów możliwych do wykonania przy pomocy dostępnego układu pomiarowego. Przed przystąpieniem do pomiarów należy **KONIECZNIE** uzgodnić z nauczycielem opiekującym się zespołem rodzaj i zakres prowadzonych pomiarów.
- Aby zarejestrować wyniki pomiarów oprócz zeszytu laboratoryjnego (lub arkusza papieru) będziesz potrzebował zapisywalnej płyty CDR lub PenDrive'a (zwykła dyskietka może mieć zbyt małą pojemność)

4.1 Widmo akustyczne gitary w zależności od sposobu pobudzania drgań

1. Włącz program Spectrogram.
2. Włącz rejestrację dźwięku ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Line})
3. Potrąć strunę w wybranym przez siebie punkcie (musisz zapisać położenie tego punktu!)
4. Zamroź obraz
5. Znajdź położenia i wysokości wszystkich wyraźnych maksimów (zobacz odpowiedni opis programu)
6. Powtórz czynności dla innych punktów pobudzenia struny do drgań (koniecznie zrób pomiary przynajmniej dla 1/2, 1/3, 1/4, 1/5 długości struny)
7. Wykonaj podobne pomiary dla strun o różnej grubości (przynajmniej dla najgrubszej i najcieńszej)
8. Po zakończeniu pomiarów porównaj uzyskane widma. Koniecznie zrób rysunki każdego widma w jednakowej skali! Umieść rysunki bezpośrednio jeden nad drugim. W ten sposób będzie łatwiej zauważyć wszytkie różnice. Zwróć uwagę, które harmoniczne występują jako efekt pobudzenia struny w różnych miejscach. Porównaj ich natężenia w porównaniu do natężenia dźwięku podstawowego.

9. Możesz powtórzyć pomiary jak wyżej korzystając podczas rejestracji dźwięku z funkcji ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Scroll}). Na widmach czasowych wszelkie różnice w widmie akustycznym są łatwiej widoczne ale pomiary ilościowe trochę trudniejsze i mniej dokładne.

10. Opisz swoje spostrzeżenia i wnioski. Nie pisz, że wykresy są podobne bo nie są. Jeśli tak uważasz, wróć do punktu 10.

4.2 Widmo akustyczne gitary dla różnych przetworników.

1. Włącz program program Spectrogram.

2. Włącz rejestrację dźwięku ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Line})

3. Ustaw przełącznik w wybranej przez siebie pozycji (musisz zapisać położenie przełącznika!)

4. Potrąć strunę

5. Zamroź obraz

6. Znajdź położenia i wysokości wszystkich wyraźnych maksimów (zobacz odpowiedni opis programu)

7. Powtórz czynności dla innych ustawień przełącznika (w każdym przypadku potrącaj strunę w tym samym miejscu!)

8. Po zakończeniu pomiarów porównaj uzyskane widma. Koniecznie zrób rysunki każdego widma w jednakowej skali! Umieść rysunki bezpośrednio jeden nad drugim. W ten sposób będzie łatwiej zauważyć wszytkie różnice. Zwróć uwagę, które harmoniczne występują jako efekt pobudzenia struny w różnych miejscach. Porównaj ich natężenia w porównaniu do natężenia dźwięku podstawowego.

9. Możesz powtórzyć pomiary jak wyżej korzystając podczas rejestracji dźwięku z funkcji ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Scroll}). Na widmach czasowych wszelkie różnice w widmie akustycznym są łatwiej widoczne ale pomiary ilościowe trochę trudniejsze i mniej dokładne.

10. Opisz swoje spostrzeżenia i wnioski. Nie pisz, że wykresy są podobne bo nie są. Jeśli tak uważasz, wróć do punktu 10

4.3 Widmo akustyczne mowy

4.3.1 Widma liniowe

1. Uruchom program Spectrogram.

2. Włącz rejestrację dźwięku ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Line})

3. Zarejestruj widmo dźwięku wydawanego przy:

4. wymawianiu głoski “a”

5. wymawianiu głoski “e”

6. wymawianiu głoski “i”
7. wymawianiu głoski “u”
8. wymawianiu innych głosek (np. “f”, “r”)
9. Znajdź położenia i wysokości wszystkich wyraźnych maksimów (zobacz odpowiedni opis programu)
10. Każdy z powyższych pomiarów może wykonać jedna wybrana z zespołu osoba lub wszyscy członkowie zespołu
11. Po zakończeniu pomiarów porównaj uzyskane widma. Koniecznie zrób rysunki każdego widma w jednakowej skali! Umieść rysunki bezpośrednio jeden nad drugim. W ten sposób będzie łatwiej zauważyć wszytkie różnice. Zwróć uwagę, które harmoniczne występują w poszczególnych samogłoskoach. Porównaj ich natężenia w porównaniu do natężenia dźwięku podstawowego.
12. Opisz swoje spostrzeżenia i wnioski. Nie pisz, że wykresy są podobne bo nie są. Jeśli tak uważasz, wróć do punktu 12

4.3.2 Widma czasowe

1. Włącz rejestrację dźwięku. Wybierz widmo czasowe ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Scroll})
2. Wymawiaj kolejno głoski “a-e-i-o-u-y”. Nie rób przerw pomiędzy poszczególnymi głoskami, staraj się też utrzymywać jednakową “wysokość głosu”. Wymawianie każdej zgłoski powinno trwać ok. 3-4 sekundy, tak aby całe widno zmieściło się na ekranie. Obserwuj, jak zmienia się skład harmoniczny Twojego głosu. Zapisz otrzymane wyniki.
3. Każdy z powyższych pomiarów może wykonać jedna wybrana z zespołu osoba lub wszyscy członkowie zespołu
4. Po zakończeniu pomiarów porównaj uzyskane widma czasowe dla różnych samogłosek. Zwróć uwagę, które harmoniczne występują w poszczególnych samogłoskoach. Porównaj ich natężenia w porównaniu do natężenia dźwięku podstawowego.
5. Opisz swoje spostrzeżenia i wnioski. Nie pisz, że widma są podobne bo nie są. Jeśli tak uważasz, wróć do punktu 5

4.4 Widmo dźwięku wybranego przez siebie żródła

Zaproponuj zbadanie widma dźwięku wybranego przez siebie żródła. Do badania użyj programu Spektrogram.
Sprawozdanie powinno zawierać:

- wykresy ukazujące przebiegi czasowe badanych dźwięków,
- widma (wykresy prążkowe) badanych dźwięków
- obok każdego wykresu należy umieścić dokładny opis warunków, w jakich dany dźwięk został otrzymany;

- analizę otrzymanych widm (częstotliwości i amplitudy drgań harmonicznych składających się na badany dźwięk)
- analizę zmian widma w zależności od sposobu pobudzenia źródła dźwięku do drgań.
- wnioski dotyczące czynników wpływających na kształt widma i jego zmiany

Dokładne wymagania dotyczące wykonania sprawozdania należy uzgodnić z nauczycielem opiekującym się zespołem.

4.5 Pomiar prędkości rozchodzenia się fali w strunie gitary

Znając długość fali stojącej λ_N i częstotliwość dźwięku towarzyszącego jej drganiom f_N możemy (patrz Dodatek) wyliczyć prędkość fali wzbudzonej w strunie v

$$v = \frac{\lambda_N}{T_N} = \lambda_N f_n$$

Ponieważ z zależności (5.6) wiemy, że

$$\lambda_N = \frac{2L}{N}$$

gdzie L jest całkowitą długością struny a N rzędem drgania harmonicznego, więc prędkość rozchodzenia się fali w strunie można wyliczyć z zależności

$$v = \lambda_N f_n = \frac{2L}{N} f_N \tag{4.1}$$

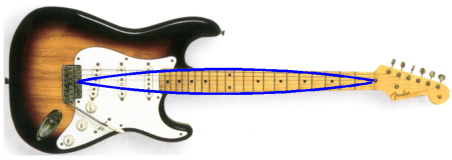
Przebieg pomiaru powinien wyglądać następująco:

1. Włącz program Spectrogram.
2. Włącz rejestrację dźwięku ([F3 - Scan Input], Display Characteristics {Line})
3. Potrąć strunę
4. Zamroź obraz
5. Znajdź (i zapisz) położenia wszystkich wyraźnych maksimów (zobacz odpowiedni opis programu)
6. Powtórz kilka razy czynności opisane w punktach 2-5
7. Znajdź średnie wartości częstotliwości odpowiadające odpowiednim harmonicznym
8. Dla każdej harmonicznej wyznacz prędkość fali w strunie korzystając z wzoru (4.1). Sprawdź czy istnieje zależność pomiędzy częstotliwością fali a jej prędkością!
9. Znajdź średnią wartość prędkości fali w strunie $\bar{v}$
10. Znajdź błąd wartości średniej (zapytaj nauczyciela w jaki sposób masz to zrobić).
11. Powtórz czynności 2 - 10 dla innych strun
12. Porównaj otrzymane wyniki dla różnych strun.
13. Opisz swoje spostrzeżenia i wnioski.

5 DODATEK - GITARA ELEKTRYCZNA

5.1 Fale stojące

Kiedy pobudzimy strunę gitary do drgań, powstanie w niej przede wszystkim fala stojąca, posiadająca dwa węzły w punktach zamocowania.



Rysunek 5: Pierwsza harmoniczna. Długość fali stojącej $\lambda = 2L$

Długość tej fali stojącej λ_1 będzie więc wynosiła

$$\lambda_1 = 2L \tag{5.1}$$

gdzie L jest długością struny.
Częstotliwość drgań struny w takim przypadku wyniesie

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{\lambda} \tag{5.2}$$

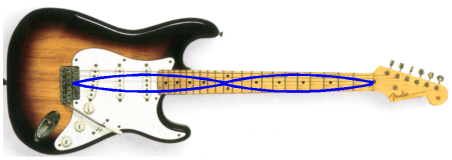
gdzie v jest prędkością fali rozchodzącej się w strunie.
Prędkość ta zależy od gęstości liniowej struny μ (masa struny na jednostkę długości) oraz siły naprężającej strunę F .

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \tag{5.3}$$

Podstawiając do równania (5.2) odpowiednie wartości wyliczone z równań (5.1) i (5.3) otrzymamy, że częstotliwość podstawowa drgań struny, odpowiadająca podstawowej fali stojącej, przedstawionej na rysunku powyżej, wynosi

$$f_1 = \frac{1}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \tag{5.4}$$

Niezależnie od podstawowej fali stojącej, w strunie powstanie także fala o długości dwukrotnie mniejszej



Rysunek 6: Druga harmoniczna. Długość fali stojącej $\lambda = L$

i częstotliwości dwukrotnie większej

Rysunek 8: Widmo akustyczne drgającej struny

$$f_2 = \frac{2}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \tag{5.5}$$

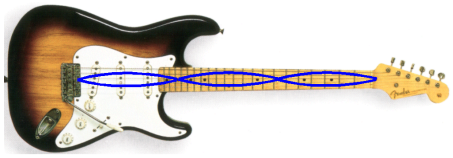
Powstaną także fale o jeszcze mniejszych długościach spełniających warunek

$$\lambda = \frac{\lambda_1}{N} = \frac{2L}{N} \tag{5.6}$$

Ostatecznie otrzymujemy więc, że podczas potrącenia struny o długości L generujemy dźwięki o częstotliwościach spełniających warunek

$$f_N = \frac{N}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}} = Nf_1 \tag{5.7}$$

gdzie N jest liczbą naturalną.
Na rysunku poniżej przedstawiono falę stojącą odpowiadającą częstotliwości $f_3 = 3f_1$



Rysunek 7: Trzecia harmoniczna. Długość fali stojącej $\lambda = L/2$

Zauważ, że fale stojące powstające w strunie mają zawsze na końcach węzły (punkty, które nie drgają). Wynika to ze sposobu zamocowania struny.

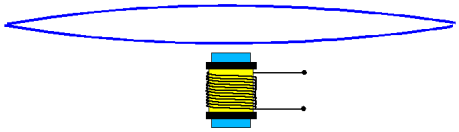
Ostatecznie można więc stwierdzić, że w strunie gitary powstanie jednocześnie wiele drgań o częstotliwościach f_1, $2f_1$, $3f_1$, $4f_1$, $5f_1$...itd. Częstotliwości te nazywamy odpowiednio: pierwszą, drugą, trzecią, czwartą, piątą częstotliwością harmoniczną. Widmo drgającej struny będzie więc miało postać jak na rysunku poniżej.

Kiedy potrącamy strunę wzbudzają się w niej wszystkie drgania harmoniczne. W zależności jednak od miejsca, w którym potrącimy strunę, amplitudy poszczególnych drgań harmonicznych mogą się różnić. Gdy potrącamy strunę w połowie jej długości, wzbudzamy przede wszystkim drganie podstawowe o częstotliwości f_1 . Gdy potrącimy strunę w 1/4 długości zwiększymy amplitudę fali stojącej o długości $\lambda = L$ i częstotliwości $2f_1$ (zobacz rysunek 6).

W takim razie w zależności od miejsca pobudzenia struny do drgań, widmo drgającej struny powinno się zmieniać i tym samym powinna się zmieniać barwa dźwięku emitowanego przez strunę.

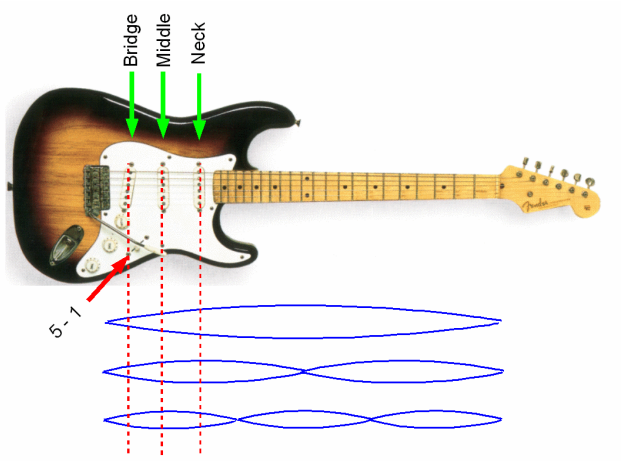
5.2 Przetworniki gitary elektrycznej

W gitarze elektrycznej drgania struny powodują powstanie sygnału elektrycznego w przetworniku, który podłączony jest do wzmacniacza akustycznego. Nie wnikając w zasadę działania przetwornika, można stwierdzić, że zamienia on drganie mechaniczne metalowej struny znajdującej się bezpośrednio nad tym przetwornikiem na sygnał elektryczny o identycznej częstotliwości.



Rysunek 9: Zasada działania przetwornika gitary elektrycznej.

Gitara używana w laboratorium fizyki to replika gitary Fender Stratocaster, jednej z najbardziej sławnych konstrukcji. Gitara ta posiada trzy przetworniki umieszczone w różnych miejscach. Przetworniki te noszą nazwy: Neck, Middle i Bridge (zobacz rysunek poniżej)

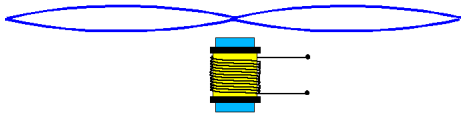


Rysunek 10: Najbardziej typowy układ przetworników gitary elektrycznej

Przy pomocy pięciopozycyjnego przełącznika można wybrać, który przetwornik będzie "odczytywał" drganie struny. Zależnie od położenia przełącznika włączamy następujące przetworniki:

- Neck
- Neck + Middle
- Middle
- Middle + Bridge
- Bridge

Podczas wykonywania ćwiczenia zbadaj jaki wpływ na widmo dźwięku gitary ma wybór przetwornika. Zastanów się jakie harmoniczne będzie preferował każdy przetwornik. Jako wskazówkę potraktuj rysunek poniżej.



Rysunek 11: W tym przypadku sygnał z przetwornika będzie bardzo słaby.Struna przedstawiona na rysunku drga w taki sposób, że nad przetwornikiem znajduję się węzeł fali stojącej. W związku z tym sygnał z przetwornika, w tym przypadku, będzie prawie równy zero.