

Uniwersytet Wrocławski
Wydział Fizyki i Astronomii

Marcel Wilanowicz

Moduł sterujący kuwety drgań

Ripple tank control module

Praca inżynierska wykonana pod kierunkiem dr
inż. Mireli Kaczmarek w Instytucie Fizyki
Doświadczalnej UWr

Wrocław 2024

Streszczenie

Praca przedstawia zagadnienia związane z zaprojektowaniem oraz budową modułu sterującego wykorzystywanego w kuwecie drgań (przyrządzie do prezentacji zjawisk falowych na wodzie) do regulacji parametrów generowanych fal.

W pierwszej części pracy przedstawiono zagadnienia teoretyczne związane ze zjawiskami falowymi oraz eksperymenty pokazowe, prezentujące te zjawiska, realizowane z wykorzystaniem kuwety drgań.

W drugiej części pracy opisano szczegółowo projekt oraz budowę modułu sterującego wykorzystywanego do regulacji parametrów fal podczas doświadczeń. Przedstawiono założenia projektowe dotyczące funkcjonalności, jakie urządzenie ma spełniać, takich jak m. in. możliwość regulacji amplitudy i częstotliwości generowanych fal oraz wykorzystanie efektu stroboskopowego do ich prezentacji. Opisano projekt układu elektronicznego opartego o platformę Arduino oraz jego realizację. Zawarto opis napisanego do Arduino oprogramowania oraz testów działania urządzenia. Przedstawiono również projekt oraz realizację obudowy urządzenia umożliwiającej jego montaż na kuwecie drgań.

Efektem realizacji pracy jest w pełni działające urządzenie realizujące postawione cele.

Abstract

The thesis presents issues related to the design and construction of a control module used in a ripple tank (an instrument for the demonstration of wave phenomena on water) to regulate the parameters of the generated waves.

The first part of the thesis presents theoretical issues related to wave phenomena and demonstration experiments to show these phenomena, carried out using the ripple tank.

The second part of the thesis describes in detail the design and construction of the control module used to adjust the parameters of the waves during the experiments. Design objectives for the functionality to be provided by the device, such as the ability to adjust the amplitude and frequency of the generated waves and the use of a stroboscopic effect to present them, are presented. The design of the electronic circuit based on the Arduino platform and its implementation are described. A description of the software developed in Arduino and tests of the device's operation are included. The design and realization of a housing for mounting the device on a ripple tank is also presented.

The result of the thesis is a fully functioning device that meets the objectives.

Spis treści

1 Wprowadzenie	2
1.1 Motywacja i cel pracy	2
1.2 Założenia projektowe	2
1.3 Przegląd zawartości pracy	3
2 Podstawy teoretyczne	4
2.1 Fale	4
2.1.1 Klasyfikacja fal	5
2.1.2 Wielkości opisujące fale	6
2.2 Wybrane zjawiska falowe	7
2.2.1 Zasada Huygensa, zasada superpozycji	7
2.2.2 Zjawisko odbicia i załamania	8
2.2.3 Dyfrakcja i interferencja	9
2.2.4 Efekt Dopplera	10
3 Zjawiska falowe - eksperymenty pokazowe	11
3.1 Kuweta drgań	11
3.1.1 Budowa i zasada działania	12
3.1.2 Efekt stroboskopowy	14
3.2 Wykorzystanie kuwety drgań w eksperimentach	15
4 Moduł sterujący	18
4.1 Założenia projektowe	18
4.2 Dobór elementów elektronicznych	18
4.3 Schemat połączeń	24
4.3.1 Połączenia podstawowych komponentów	24
4.3.2 Połączenie generatora drgań	25
4.3.3 Połączenie diody LED	25
4.4 Oprogramowanie	26
4.4.1 Konfiguracja przerwań	26
4.4.2 Sterowanie generatorem	28
4.4.3 Sterowanie Diodą LED	30
4.4.4 Interfejs Użytkownika	31
4.5 Obudowa - projektowanie i druk 3D	35
4.6 Testy urządzenia	37
4.6.1 Integracja z kuwetą drgań	42

5 Podsumowanie	44
5.1 Zrealizowane zadania	44
5.2 Moduł sterujący - funkcjonalności	45
5.3 Dalsze możliwości rozwoju projektu	45
Bibilografia	45

Rozdział 1

Wprowadzenie

Eksperymenty są istotną częścią nauki zwłaszcza w przypadku przedmiotów doświadczalnych, takich jak fizyka. Do prezentacji zjawisk falowych, na przykładzie fal generowanych na wodzie, do eksperymentów pokazowych wykorzystywana jest kuweta drgań: urządzenie w którym generowane są fale o zadanych parametrach, a dzięki zastosowaniu odpowiedniego sposobu ich prezentacji (m. in. efektu stroboskopowego) możliwe jest wygodne oglądanie zjawisk falowych.

1.1 Motywacja i cel pracy

W Instytucie Fizyki Doświadczalnej Wydziału Fizyki i Astronomii UWr znajdują się dwie kuwety drgań, wykorzystywane do eksperymentów pokazowych z zakresu fizyki fal. Oryginalne moduły sterujące tych zestawów uległy uszkodzeniu (w jednym przypadku całkowitemu, w drugim moduł nie działa w pełni prawidłowo). Wymiana oraz naprawa modułów sterujących nie jest możliwa, a koszty zakupu całego zestawu doświadczalnego są duże.

Celem pracy było zaprojektowanie i budowa modułu sterującego w oparciu o dostępne elementy elektroniczne oraz jego integracja z zestawem doświadczalnym tak, aby powstał w pełni funkcjonalny, kompatybilny z kuwetą drgań zamiennik, rozszerzony o dodatkowe funkcjonalności.

1.2 Założenia projektowe

Zgodnie z celem pracy, aby urządzenie mogło w pełni spełniać swoje zadania, moduł sterujący powinien:

- generować sygnały, odbierane przez generator drgań oraz diodę LED,
- umożliwić sterowanie częstotliwością generowanego sygnału dla generatora drgań,
- umożliwić sterowanie amplitudą generowanego sygnału dla generatora drgań,
- umożliwić regulację częstotliwości świecenia diody LED (w celu uzyskania efektu stroboskopowego).

W celu zapewnienia większej możliwości sterowania sygnałami w stosunku do dostępnych oryginalnego modułu zaproponowano dodatkowe funkcjonalności. Modułu powinien:

- umożliwić sterowanie wypełnieniem generowanego sygnału dla generatora drgań,
- umożliwić sterowanie wypełnieniem generowanego sygnału dla diody LED,
- umożliwić sterowanie opóźnieniem generowanego sygnału dla diody LED,
- wyświetlać i umożliwiać nawigację po interfejsie użytkownika,
- umożliwić regulację parametrów z pomocą interfejsu.

Realizacja założeń projektowych obejmuje:

- dobór odpowiednich komponentów elektronicznych,
- zaprojektowanie układu elektronicznego,
- realizacja prototypu układu elektronicznego,
- zaprogramowanie urządzenia,
- zaprojektowanie i wydruk obudowy,
- integracja części elektronicznej z obudową,
- testy urządzenia oraz integracja z zestawem doświadczalnym.

1.3 Przegląd zawartości pracy

Praca składa się z dwóch głównych części: teoretycznej - dotyczącej zagadnień związanych z falami i zjawiskami falowymi oraz doświadczeń pokazowych z tego zakresu, oraz praktycznej - dotyczącej projektu oraz budowy modułu sterującego.

W pierwszym rozdziale opisano krótko motywację, cel oraz założenia projektowe, stanowiące podstawę realizacji modułu sterującego.

W drugim rozdziale zawarto informacje dotyczące klasyfikacji fal, opisujących je wielkości oraz wybranych zjawisk falowych, istotnych z punktu widzenia pracy.

W trzecim rozdziale omówiono szczegółowo budowę i zasadę działania kuwety drgań. Przedstawiono także eksperymenty pokazowe, ilustrujące opisane zjawiska falowe, możliwe do realizacji z wykorzystaniem kuwety drgań.

Rozdział czwarty poświęcony jest projektowaniu oraz budowie modułu sterującego. Zawarto w nim informacje dotyczące założeń projektowych, doboru elementów elektronicznych oraz projektowania układu elektronicznego, oprogramowania, obudowy urządzenia, a także testów oraz integracji urządzenia z zestawem doświadczalnym.

Piąty rozdział stanowi podsumowanie pracy wraz ze wskazaniem możliwości dalszego rozwoju urządzenia.

Rozdział 2

Podstawy teoretyczne

Ruch falowy jest zjawiskiem powszechnym w przyrodzie, a co za tym idzie, stanowi istotne zagadnienie z punktu widzenia fizyki. Przykładem fal spotykanych na co dzień są m. in. fale na powierzchni wody, fale dźwiękowe, fale radiowe, fale świetlne czy promieniowanie rentgenowskie. W rozdziale przedstawiono najważniejsze informacje dotyczące fal oraz zjawisk falowych.

2.1 Fale

Fala stanowi rozchodzące się w danym ośrodku lub w przestrzeni okresowe zaburzenie. Można wyróżnić trzy główne typy fal: fale mechaniczne, fale elektromagnetyczne oraz fale materii.

Fale mechaniczne powstają w ośrodkach sprężystych, a ich rozchodzeniu towarzyszy drganie częstek ośrodka. Źródłem fal mechanicznych jest wychylenie fragmentu ośrodka sprężystego z normalnego położenia (będącego położeniem równowagi), co skutkuje drganiem fragmentu wokół tego położenia. Sprężyste właściwości ośrodka pozwalają na przekazywanie drgań kolejno coraz dalszym częściom ośrodka. Sam ośrodek jednak, jako całość, nie przesuwa się razem z falą [1]. Fale mechaniczne przenoszą energię i pęd, nie przenosząc przy tym masy. Przykładem fal mechanicznych są wspomniane już fale na wodzie oraz fale dźwiękowe (rozchodzące się np. w powietrzu). Ośrodki sprężyste mogą się różnić właściwościami, co przekłada się na różnicę w rozchodzeniu się fal w różnych materiałach.

Kolejny rodzaj fal stanowią fale elektromagnetyczne, które w przeciwnieństwie do fal mechanicznych, nie wymagają obecności żadnego ośrodka do rozchodzenia się. Fale te stanowią rozchodzące się w przestrzeni zaburzenie pola elektromagnetycznego. Źródłem fali elektromagnetycznej może być drgający ładunek elektryczny lub zmienny prąd elektryczny [2]. Przykładem fal elektromagnetycznych są fale radiowe, światło widzialne, mikrofale czy promieniowanie rentgenowskie.

Ostatni wspomniany na początku typ fal to fale materii. W 1924 roku Louis de Broglie zaproponował hipotezę, w której założył, że elektrony i inne cząstki materii mogą zachowywać się jak fale. Jest to tzw. hipoteza de Broglie'a o falach materii. Hipoteza ta przyczyniła się do rozwoju mechaniki kwantowej opisującej zjawiska fizyczne w mikroswiecie atomów i cząstek elementarnych [3].

Z uwagi na temat pracy w dalszej części rozdziału skupiono się na falach mechanicznych. Należy jednak pamiętać, że zarówno prezentowane pojęcia, jak i zjawiska, można odnieść do pozostałych typów fal.

2.1.1 Klasyfikacja fal

Fale można sklasyfikować w oparciu o różne czynniki, takie jak liczba stopni swobody, kształt czoła fali czy zależność między kierunkiem drgań, a kierunkiem rozchodzenia się fali.

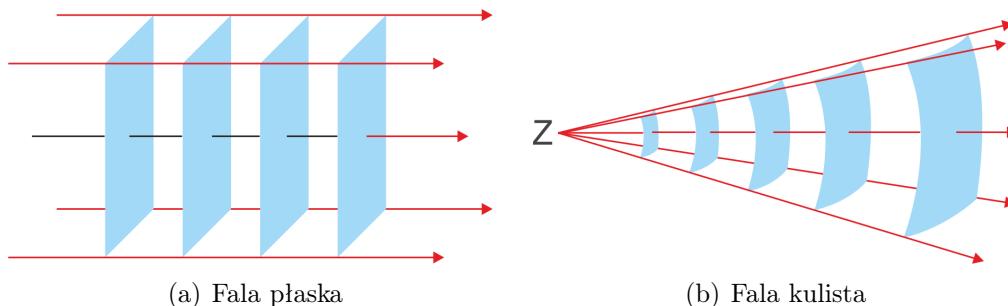
W przypadku liczby stopni swobody można wyróżnić fale:

- jednowymiarowe (liniowe) – rozchodzące się wzdłuż jednej prostej, np. zaburzenie rozchodzące się na sprężynie,
- dwuwymiarowe (powierzchniowe) – rozchodzą się na powierzchni, np. fale rozchodzące się na powierzchni wody,
- trójwymiarowe (objętościowe) – rozchodzą się w przestrzeni, np. fale dźwiękowe.

W oparciu o kształt czoła fali można natomiast wyróżnić takie fale, jak:

- fala płaska – zaburzenie rozchodzi się w jednym kierunku, a powierzchnie falowe są płaszczyznami prostopadłymi do kierunku ruchu fali;
- fala kolista – zaburzenie rozchodzi się w środowisku dwuwymiarowym, a powierzchnie falowe stanowią współśrodkowe okręgi;
- fala kulista – zaburzenie rozchodzi we wszystkich kierunkach, a powierzchnie falowe są sferami.

Przykład rozchodzenia się fali płaskiej przedstawiono na rysunku 2.1(a), a fali kulistej na rysunku 2.1(b). Kolorem niebieskim zaznaczono powierzchnie falowe.

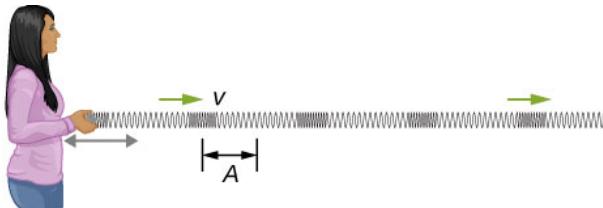


Rysunek 2.1: Przykłady rozchodzenia się fal [4].

Ze względu na zależność pomiędzy kierunkiem drgań a kierunkiem rozchodzenia się fali można wyróżnić dwa typy fal:

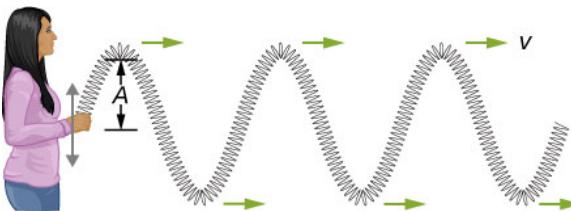
- fale podłużne – kierunek drgań częstek ośrodka jest równoległy do kierunku rozchodzenia się fali,
- poprzeczne – kierunek drgań częsteczek ośrodka jest prostopadły do kierunku rozchodzenia się fali.

Przykład fali podłużnej przedstawiono na rysunku 2.2. Zaburzenie w postaci zagęszczenia zwojów sprężyny rozchodzi się w kierunku równoległym do kierunku rozchodzenia się fali. Przykładem fal podłużnych są m. in. fale dźwiękowe rozchodzące się w powietrzu lub w wodzie [5].



Rysunek 2.2: Fala podłużna[6].

Na rysunku 2.3 przedstawiono przykład fali poprzecznej. Fala rozchodzi się w płaszczyźnie poziomej, natomiast zaburzenie ośrodka zachodzi w płaszczyźnie pionowej. Fala poprzeczna może się rozchodzić w dowolnym kierunku, jednak zaburzenie ośrodka zachodzi zawsze w kierunku prostopadłym do kierunku rozchodzenia się fali. Do fal podłużnych można zaliczyć np. fale powstające na strunach instrumentów muzycznych oraz fale na powierzchni wody [5].



Rysunek 2.3: Fala oprzeczną [6].

Istnieją również fale będące kombinacją obu typów fal: poprzecznych i podłużnych.

2.1.2 Wielkości opisujące fale

Do podstawowych wielkości opisujących fale, niezależnie od ich typu, należą amplituda, długość, okres oraz częstotliwość.

Amplituda A to maksymalne wychylenie ośrodka z punktu równowagi. Długość fali λ to odległość pomiędzy dwoma podobnymi punktami ośrodka o tej samej wysokości i wychyleniu. Natomiast okres fali T to czas, w którym fala przebywa drogę równą długości fali. Częstotliwość f stanowi natomiast odwrotność okresu.

Jak już wspomniano, fala mechaniczna stanowi zaburzenie ośrodka, które rozchodzi się w czasie i przestrzeni ze skońzoną prędkością. Cząsteczki ośrodka, w którym rozchodzi się fala, drgają wokół swoich położen równowagi. Dla uproszczenia dalszych rozważań można przyjąć, że cząsteczki ośrodka wykonują drgania harmoniczne. Wówczas falę również określa się mianem fali harmonicznej [3]. Aby opisać falę w ośrodku należy podać wychylenie y każdego punktu x ośrodka z położenia równowagi jako funkcję czasu: $y(x, t)$. Dla bieżącej fali harmonicznej wychylenie jest wówczas opisane wzorem:

$$y(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad (2.1)$$

gdzie A oznacza amplitudę, ω to częstotliwość drgań ośrodka, wyrażenie $(kx - \omega t)$ to faza, a k to tzw. liczba falowa, która wyraża się wzorem

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}. \quad (2.2)$$

W oparciu o częstotliwość drgań ω można wyrazić częstotliwości f drgań ośrodka, która wynosi

$$f = \frac{\omega}{2\pi},$$

zatem okres drgań można wyrazić jako

$$T = \frac{2\pi}{\omega}.$$

Predkość rozchodzenia się fali v wyraża się poprzez jej długość oraz okres w następujący sposób:

$$v = \frac{\lambda}{T},$$

lub wykorzystując liczbę falową daną równaniem 2.2 jako

$$v = \frac{\omega}{k}.$$

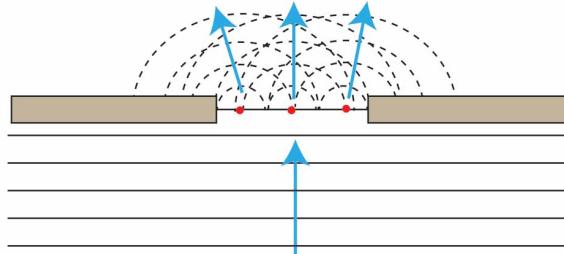
Powyżej przedstawiono najważniejsze wielkości opisujące fale, istotne w dalszej części pracy. Należy jednak pamiętać, że równanie 2.1 stanowi szczególny przypadek rozwiązania równania falowego (dla płaskiej fali harmonicznej). Bardziej szczegółowe rozważania dotyczące ruchu falowego oraz równania falowego i opisu fal zawarto m. in. w pozycjach [3], [7].

2.2 Wybrane zjawiska falowe

W przyrodzie można zaobserwować nie tylko same fale, takie jak np. fale na wodzie czy dźwięk docierający do uszu człowieka, ale również szereg zjawisk, którym fale podlegają. Do najważniejszych należą odbicie, dyfrakcja, załamanie oraz interferencja [3]. W celu omówienia tych zjawisk istotne jest zwrócenie uwagi na dwie zasady, którym podlegają fale: zasadę Huygensa oraz zasadę superpozycji

2.2.1 Zasada Huygensa, zasada superpozycji

Zgodnie z zasadą Huygensa każdy punkt czoła fali może być traktowany jako źródło fal wtórnych, które rozchodzą się we wszystkie strony z prędkością równą propagacji fali [8]. Zasadę tę ilustruje rysunek 2.4.



Rysunek 2.4: Ilustracja zasady Huygensa [9].

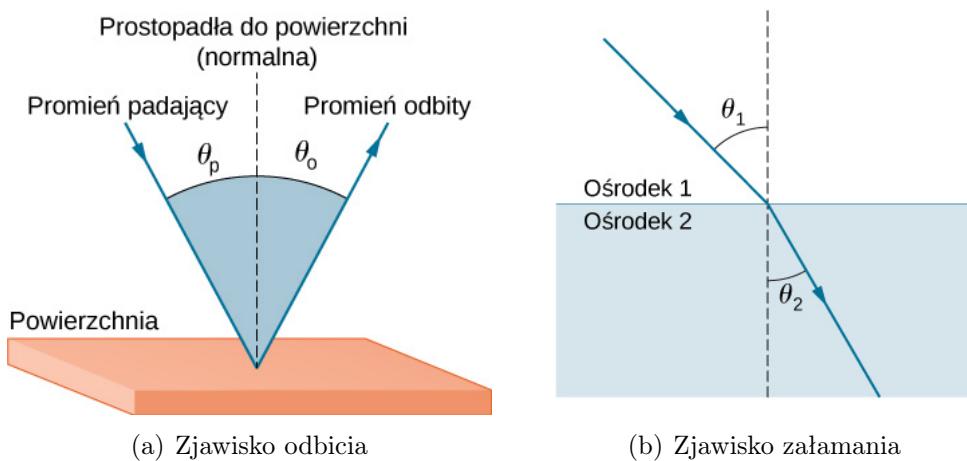
Zasada Huygensa pozwala na wyjaśnienie dwóch istotnych zjawisk: odbicia i załamania, co dokładnie przedstawiono w pozycji [8].

Zasada superpozycji fal dotyczy sytuacji, w której w jakimś punkcie przestrzeni pojawiają się dwie lub więcej fal. Przykład może stanowić koncert orkiestry. Wówczas do uszu docierają dźwięki z wielu różnych instrumentów. Na jeziorze fale na wodzie mogą

być jednocześnie wzbudzane przez wiele łodzi. Zgodnie z zasadą superpozycji, zdefiniowaną w pozycji [2], w przypadku pojawienia się kilku efektów, ich wypadkowy skutek jest sumą skutków poszczególnych efektów. Dla fal mechanicznych oznacza to, że jeżeli w tym samym obszarze niezależnie znajdują się dwie fale, to przemieszczenie dowolnej cząstki ośrodka jest sumą przemieszczeń wywołanych przez poszczególne fale [1]. Zasada superpozycji fal jest spełniona tylko w przypadku fal liniowych, w szczególności do takich fal należą fale sinusoidalne [3].

2.2.2 Zjawisko odbicia i załamania

Zjawiska odbicia i załamania, omawiane najczęściej na przykładzie światła, należącego do fal elektromagnetycznych, obowiązują także dla fal mechanicznych. Dotyczą sytuacji, gdy fala mechaniczna trafia na granicę dwóch różnych ośrodków (np. o różnych własnościach sprężystych). Zjawisko odbicia podlega prawu odbicia, to znaczy, że kąt padania θ_p , liczony względem normalnej do granicy ośrodków, jest równy kątowi odbicia θ_o . Zjawisko odbicia wraz z zaznaczonymi kątami przedstawiono na rysunku 2.5(a).



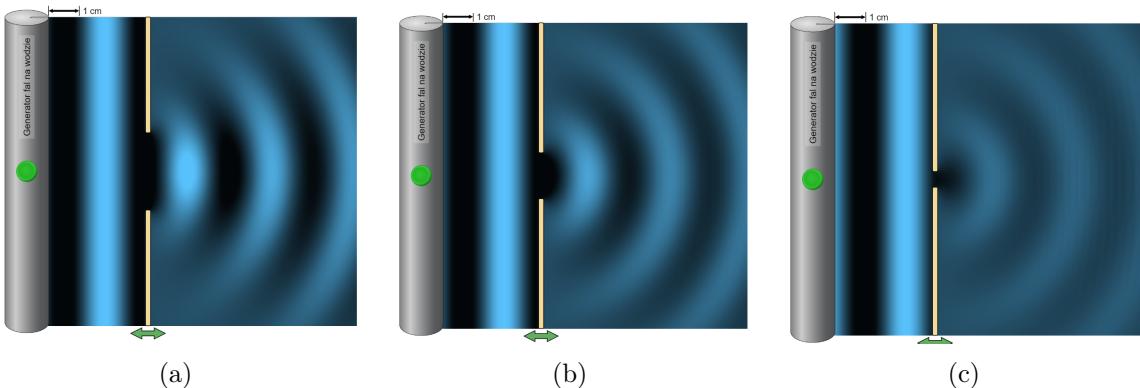
Rysunek 2.5: Ilustracja zjawiska odbicia i załamania [3].

Przykładem zjawiska odbicia w kontekście fal mechanicznych może być echo. Fala rozchodzi się w powietrzu, uderza o przeszkodę i wraca z powrotem jako echo, które możemy usłyszeć [10], [6]. Zjawisko odbicia fal dźwiękowych jest też wykorzystywane w sonarach ultradźwiękowych.

Zjawisko załamania, przedstawione schematycznie na rysunku 2.5(b), polega na zmianie kierunku rozchodzenia się fali w drugim ośrodku, w stosunku do kierunku padania fali z pierwszego ośrodka, jeśli prędkości rozchodzenia się fal w obu ośrodkach nie są równe. Wiąże się to m. in. z właściwościami sprężystymi ośrodka. Tak jak w przypadku światła, spełnione jest prawo załamania Snella, dotyczące kąta padania θ_1 oraz kąta załamania θ_2 liczonych względem normalnej [3]. Zgodnie z tym prawem stosunek sinusa kąta padania θ_1 do sinusa kąta załamania θ_2 jest stały dla danej pary ośrodków [11]. Przykładem załamania fali jest fala dźwiękowa podróżująca między cieplejszą i chłodniejszą warstwą atmosfery. Wzrost temperatury w danym obszarze powoduje, że cząsteczki powietrza są bardziej ruchliwe, co skutkuje wzrostem prędkości dźwięku. Gdy fala trafia do niższej temperatury jej prędkość jest niższa. Na granicy ośrodków nastąpi zmiana kierunku rozchodzenia się fali.

2.2.3 Dyfrakcja i interferencja

Kolejnym ważnym zjawiskiem jest dyfrakcja czyli ugięcie fali. Jest to zjawisko zmiany kierunku fali widoczne przy przejściu fali przez szczelinę lub przy napotkaniu przez falę przeszkody [3]. Na rysunku 2.6 przedstawiono wyniki symulacji przejścia fali wywołanej na wodzie przez szczeliny o różnej szerokości, uzyskane za pomocą programu dostępnego na stronie *Phet interactive simulations*, Uniwersytetu Colorado [12].



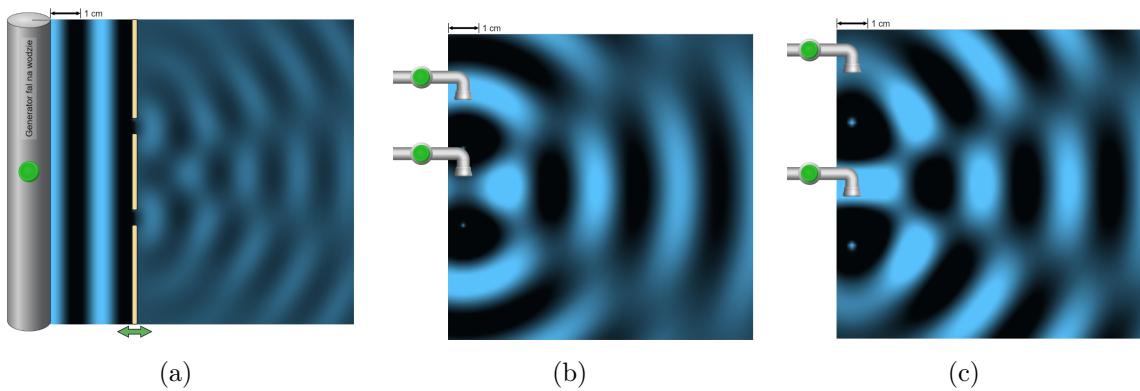
Rysunek 2.6: Ilustracja zjawiska dyfrakcji fali przy przejściu przez szczelinę [12].

Szczelina na rysunku 2.6(a) jest duża. Fale przechodzą przez nią prawie bez zmiany. Jedynie na brzegach szczeliny uginają się, zgodnie z tym, co wynika z zasady Huygensa. W miarę zwężania szczeliny (rysunek 2.6(b)) efekt ugięcia jest lepiej widoczny, a zachodzi wyraźnie dla otworu małego w porównaniu z długością fali (2.6(c)). Rozprzestrzenianie się fali na obszar po drugiej stronie przeszkody (poza szczeliną) jest możliwe właśnie dzięki jej ugięciu (dyfrakcji). Przykładem występowania zjawiska ugięcia fali dźwiękowej może być sytuacja, w której osoba za rogiem budynku słyszy dźwięk, wydawany po drugiej stronie. Fala dźwiękowa uginie się wokół rogu, stąd jest możliwe jej dotarcie do słuchacza, chociaż źródło dźwięku nie jest widoczne.

Ważnym zjawiskiem, zachodzącym dla fal, jest również interferencja. Interferencja jest to zjawisko, nakładania się dwóch lub więcej fal, przemieszczających się wzdłuż tego samego ośrodka i jest szczególnym przypadkiem zasady superpozycji fal. Interferencja zachodzi tylko, jeśli nakładające się fale są spójne tzn. mają tę samą częstotliwość a różnica ich faz jest stała w czasie [3]. Efektem nakładania się dwóch fal może być ich maksymalne wzmacnienie, całkowite wygaszenie lub efekt pośredni [2]. Przykład zjawiska interferencji dla fal na wodzie, uzyskany za pomocą symulacji [12], przedstawiono na rysunku 2.7.

W przypadku symulacji przedstawionej na rysunku 2.7, fala płaska przechodzi przez dwie szczeliny, które stają się źródłem nowych fal kulistych. Następnie fale te interferują ze sobą. Można zaobserwować całkowicie ciemne pola, które oznaczają wygaszenie fali oraz jasne - oznaczające całkowite wzmacnienie fali (maksymalna amplituda). Pomiędzy nimi następuje natomiast niecałkowite wzmacnienie lub niecałkowite wygaszenie. Na rysunkach 2.7(b) oraz 2.7(c) przedstawiono nakładanie się fal z dwóch źródeł ustawionych w różnych odległościach. Uzyskany obraz interferencyjny zależy od długości fal oraz odległości od źródła fal.

Przykładem występowania interferencji fal są np. fale dźwiękowe wychodzące z głośników umieszczonego obok siebie, w taki sposób że nakładają się na siebie w przestrzeni. W



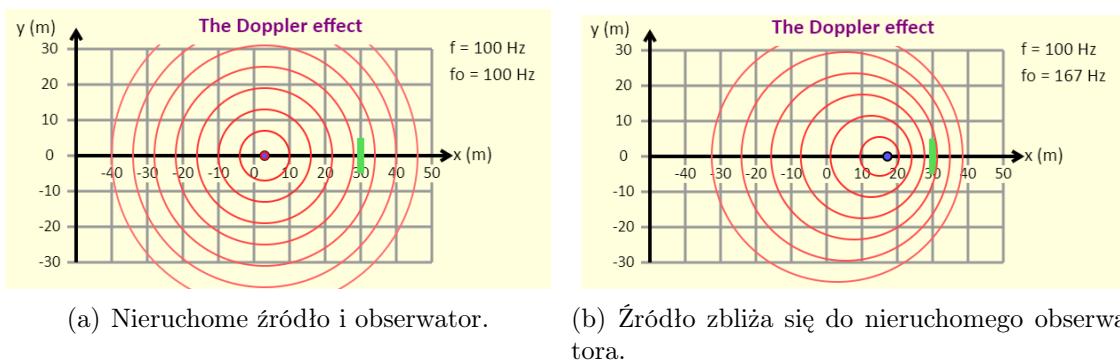
Rysunek 2.7: Ilustracja zjawiska interferencji fal [12].

zależności od położenia względem obu źródeł, można usłyszeć dźwięk o większej lub mniejszej głośności, a w szczególności w miejscu interferencji destruktywnej nie będzie słышać dźwięku. Obrazy interferencyjne można także obserwować na zbiornikach wodnych podczas deszczu. Zjawisko interferencji było także kluczowe dla udowodnienia falowej natury światła przez Thomasa Younga [8].

2.2.4 Efekt Dopplera

Ostatnim istotnym do omówienia w pracy zjawiskiem jest efekt Dopplera. Jest to zjawisko zmiany częstotliwości fali odbieranej przez obserwatora, wynikające z względnego ruchu źródła fal oraz obserwatora. Obserwowana pozorna zmiana częstotliwości dotyczy zarówno fal mechanicznych, jak i elektromagnetycznych.

Gdy źródło fali wysyła kolejne drgania z taką samą częstotliwością i porusza się, odległość między kolejnymi grzbietami jest zależna od kierunku rozchodzenia się fali. Na rysunku 2.8 przedstawiono symulację dotyczącą zjawiska Dopplera, uzyskaną z wykorzystaniem źródła [13]. W przypadku rysunku 2.8(a) źródło i obserwator nie poruszają się względem siebie. Wówczas odbierana częstotliwość jest równa nadawanej. Natomiast na rysunku 2.8(b) źródło zbliża się do obserwatora, co powoduje, że odległości między kolejnymi grzbietami fal docierającymi do obserwatora są mniejsze. Odbierana częstotliwość jest w tym wypadku większa niż nadawana przez źródło.



Rysunek 2.8: Ilustracja zjawiska Dopplera [13].

Rozdział 3

Zjawiska falowe - eksperymenty pokazowe

Fizyka jest nauką eksperymentalną, a co za tym idzie w jej nauczaniu doświadczenia mają kluczowe znaczenie. Do przeprowadzenia doświadczeń wykorzystuje się odpowiednio wyspecjalizowane przyrządy. Jednym z takich przyrządów jest kuweta drgań.

3.1 Kuweta drgań

Kuweta drgań jest to przezroczysty, płytka pojemnik z wodą, w którym generowane są fale wodne. Zazwyczaj jest on oświetlany od góry, aby światło przechodziło przez wodę, dzięki czemu fale na jej powierzchni rzucają wyraźne cienie na ekranie znajdującym się pod pojemnikiem. Dzięki temu rozwiązaniu można zademonstrować wszystkie podstawowe zjawiska falowe, takie jak odbicie, załamanie, interferencja czy dyfrakcja. Niektóre dostępne na rynku modele tego przyrządu przedstawiono na rysunku 3.1.



(a) Kuweta drgań [14]



(b) Duża kuweta drgań [15] (c) Kuweta drgań prosta [16]



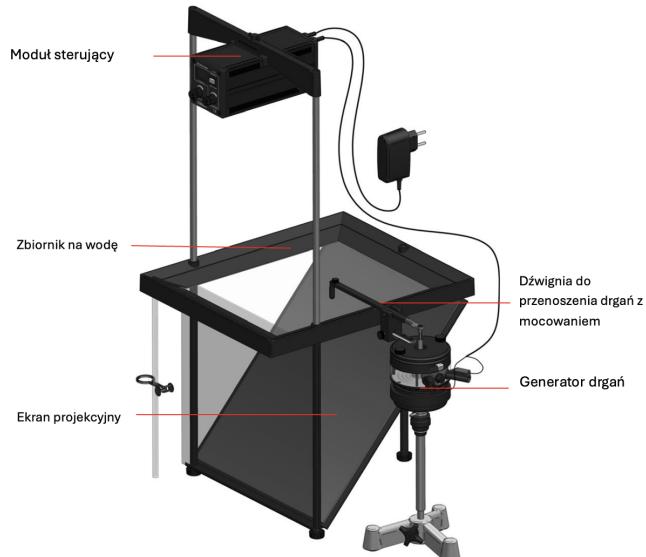
(d) Mini kuweta drgań [17]

Rysunek 3.1: Kuwety drgań różnych producentów.

Wszystkie przyrządy, pomimo różnic projektowych, opierają się na tej samej zasadzie działania. Na potrzeby pracy skupiono się na przedstawionej na rysunku 3.1(b) dużej kuwecie producenta Frederiksen. Model ten wykorzystywany jest przez instytut fizyki.

3.1.1 Budowa i zasada działania

Najlepszym ośrodkiem do obserwacji zjawisk falowych i ich rozchodzenia się jest środowisko wodne. Pozwala ono na ich bezpośrednią obserwację gołym okiem. Kuweta drgań to przyrząd umożliwiający przeprowadzenie doświadczeń pokazowych z zakresu fal mechanicznych i ich zjawisk, wykorzystując fale wodne. Są one odpowiednio generowane i regulowane, co pozwala na dokładne i wnikliwe ich obserwacje w zbiorniku. Przykład budowy kuwety przedstawiono na rysunku 4.17.



Rysunek 3.2: Przykład kuwety drgań [18].

Do najważniejszych elementów zastosowanych w przyrządzie zalicza się moduł sterujący, generator drgań, dźwignię do przenoszenia drgań z mocowaniem, ekran projekcyjny oraz zbiornik na wodę. Każdy z elementów jest ściśle ze sobą powiązany i pełni ważną rolę w przebiegu całego procesu prezentowanych zjawisk [18].

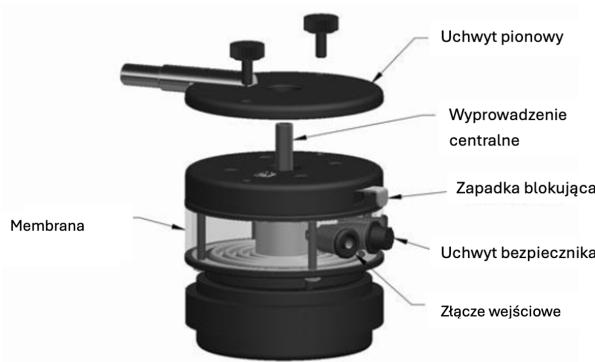
Pierwszym warty omówienia elementem kuwety jest moduł sterujący. Jest to urządzenie, które steruje sygnałem wysyłanym do generatora drgań. Dodatkowo, moduł sterujący posiada wbudowany stroboskop wykorzystujący lampa LED do oświetlenia fal w zbiorniku. Na rysunku 3.3 przedstawiono panel sterujący modułu.



Rysunek 3.3: Panel sterujący [18].

Panel składa się z cyfrowego wyświetlacza częstotliwości impulsów, regulatora częstotliwości i amplitudy drgań oraz przełącznika stroboskopu. Przełącznik pozwala wykonać dwa stany obrazowania fal na projektorze: synchroniczny lub zwolnione tempo [18].

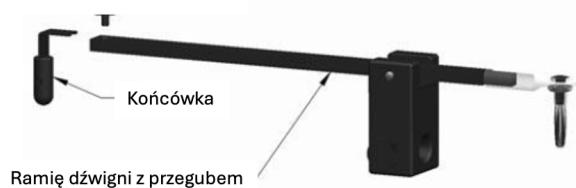
Kolejnym ważnym elementem zestawu jest przedstawiony na rysunku 3.4 generator drgań. Służy on do generowania drgań o określonej amplitudzie i częstotliwości (zadanych przez użytkownika za pomocą modułu sterującego). Elementem drgającym jest wewnętrzna membrana, poruszająca się regularnym ruchem w górę i w dół, z określoną częstotliwością [18].



Rysunek 3.4: Generator drgań [18].

Generator składa się z pionowego uchwytu na dźwignię, membrany, centralnego wyrowadzenia z membrany, zapadki blokującej, chwytu bezpiecznika i złącza wejściowego na moduł sterujący.

Przedłużeniem generatora jest przedstawiona na rysunku 3.5 dźwignia z mocowaniem. Odpowiada ona za przenoszenie harmonicznych drgań na tafłę wody. Wytwarzanie określonych fal na wodzie jest możliwe dzięki różnym końcówkom dołączonym do dźwigni [18].



Rysunek 3.5: Dźwignia [18].

Wszystkie fale tworzone są za pomocą doczepionych do dźwigni specjalnych końcówek, z których każda tworzy inny rodzaj fali [18].

Końcówkę generującą falę punktową przedstawiono na rysunku 3.6(a), końcówkę generującą falę w dwóch punktach na rysunku 3.6(b), z kolei na rysunku 3.6(c) przedstawiono końcówkę generującą falę płaską.



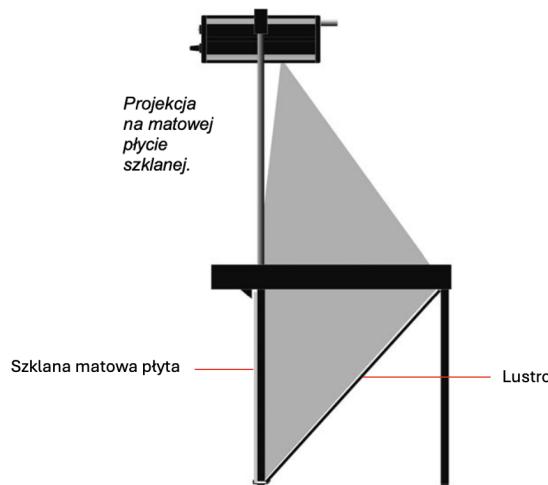
(a) Pojedyńcza końcówka

(b) Podwójna końcówka

(c) Końcówka płaska

Rysunek 3.6: Końcówki do generowania fal [18].

Istotnym elementem umożliwiającym zaobserwowanie oraz zmierzenie parametrów wygenerowanych fal wodnych jest przedstawiony na rysunku 3.7 projektor.



Rysunek 3.7: Projektor [18].

Układ projektora ma ustawione pod kątem lustro, które rzutuje widok fali na matową szklaną płytę. Umożliwia to obserwację oraz pomiary fal wodnych w sposób nieinwazyjny dla zbiornika. Fale generowane przez kuwetę mogą być rzutowane na inne powierzchnie, zwiększając tym samym obraz z projektora. Jeśli płyta z matowego szkła zostanie usunięta, projekcja może zostać przeniesiona np. na białą ścianę [18].

3.1.2 Efekt stroboskopowy

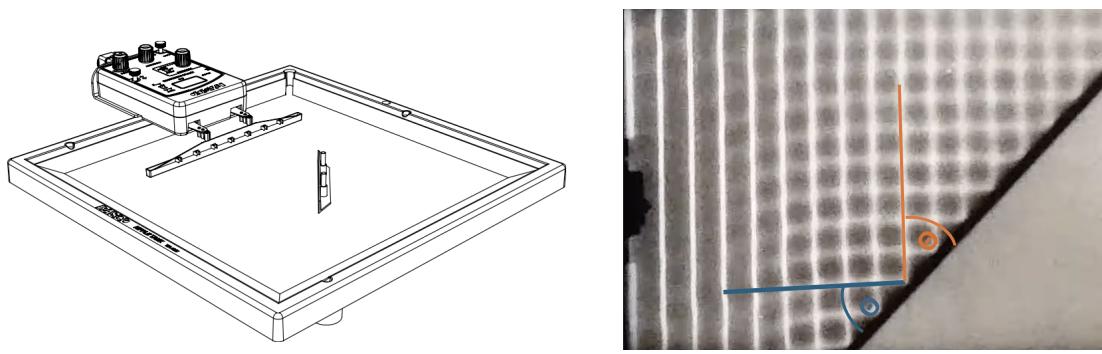
Efekt stroboskopowy jest zjawiskiem obserwacji ciał poruszających się szybkimi ruchami periodycznymi. Aby go uzyskać, używa się krótkotrwałych, regularnych błysków światła z lampy błyskowej, pełniącej rolę stroboskopu. Stroboskop jest narzędziem używanym do

sprawiaenia, że cyklicznie poruszający się obiekt wydaje się być wolno poruszający się lub nieruchomy. Ponieważ fale generowane przez kuwetę mają powtarzalny charakter, efekt stroboskopowy może prowadzić do pozornego wrażenia zwolnienia lub zatrzymania ruchu fali. Aby uzyskać pożądany efekt na projektorze, częstotliwość świecenia diody jest precyzyjnie synchronizowana z częstotliwością generatora. Mechanizm ten jest niezbędny podczas obserwacji zjawisk falowych, zwłaszcza gdy zachodzi potrzeba dokładnego monitorowania szybko rozprzestrzeniających się fal [19].

3.2 Wykorzystanie kuwety drgań w eksperymetach

Z pomocą kuwety drgań można zaprezentować wszystkie najważniejsze zjawiska falowe, wymienione w rozdziale 2.

Ważnym eksperymetem z wykorzystaniem kuwety jest prezentacja zjawiska odbicia fali. Eksperyment polega na wygenerowaniu fali przy pomocy końcówki do fali płaskiej. Fala ta następnie trafia na ustawioną pod określonym kątem przeszkodę. Na rysunku 3.8(a) przedstawiono układ elementów wykorzystywanych do prezentacji zjawiska odbicia, z kolei na rysunku 3.8(b) przedstawiono wynik eksperymetu.

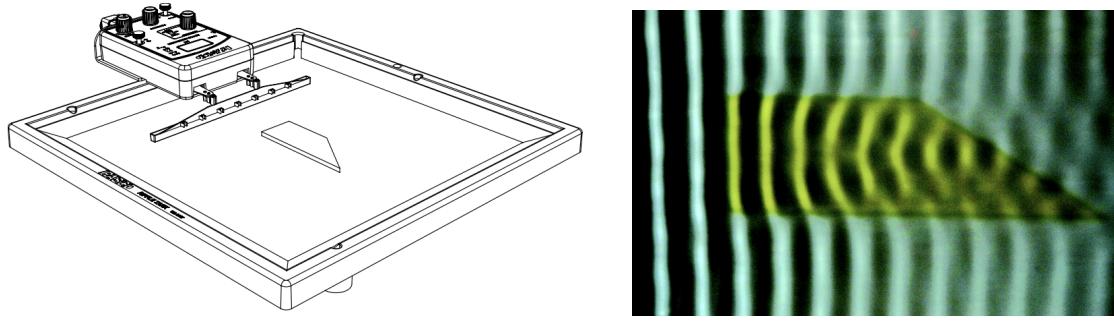


(a) Zestaw do eksperymetu z odbiciem fali. (b) Wynik eksperymetu z odbiciem.

Rysunek 3.8: Prezentacja zjawiska odbicia fali za pomocą kuwety [20].

Mierząc kąt padania i kąt odbicia fali od przeszkody, ustawionej pod dowolnym kątem, użytkownik zaobserwuje, że kąt padania czoła fali jest równy kątowi odbicia, co jest zgodne z omawianym wcześniej w rozdziale 2 prawem odbicia [20],[18].

Kolejnym doświadczeniem jest prezentacja zjawiska załamania fali. Do eksperymentu wykorzystuje się końcówkę generującą fale płaskie oraz przeźroczystą kształtkę, przez którą fale te przechodzą. Na rysunku 3.9(a) przedstawiono zestaw elementów, wykorzystywanych w doświadczeniu, z kolei na rysunku 3.9(b) przedstawiono wynik doświadczenia.

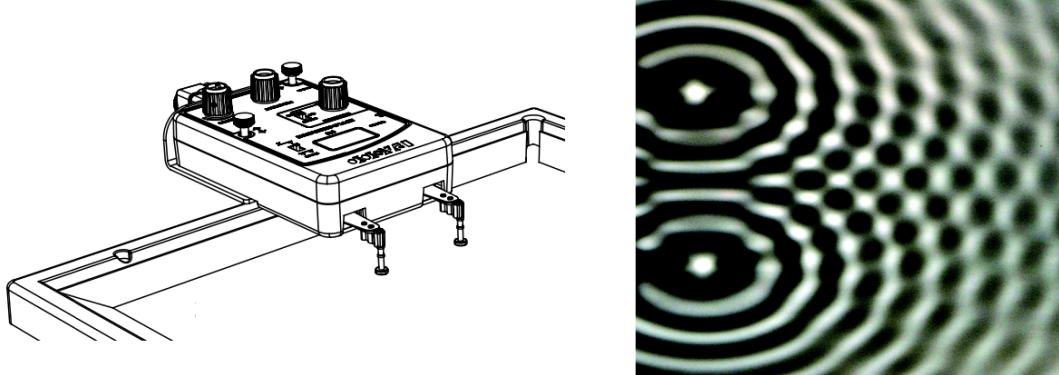


(a) Zestaw do eksperymentu z załamaniem fali. (b) Wynik eksperymentu z załamaniem fali.

Rysunek 3.9: Prezentacja zjawiska załamania za pomocą kuwety [20].

Gdy fale wodne są przenoszone z głębszej wody zbiornika przez płytą wodę nad kształtką, prędkość fali maleje, w efekcie czego czoło fali ulega załamaniu w obrębie kształtki [10], [20], [18].

Innym istotnym zjawiskiem, które można zaobserwować z wykorzystaniem kuwety jest interferencja fal. Eksperyment polega na punktowym generowaniu fal z dwóch źródeł jednocześnie. Wykorzystuje się do tego końcówkę podwójną. Na rysunku 3.10(a) przedstawiono zestaw do prezentacji interferencji dwóch fal, z kolei na rysunku 3.10(b) przedstawiono wynik eksperymentu.

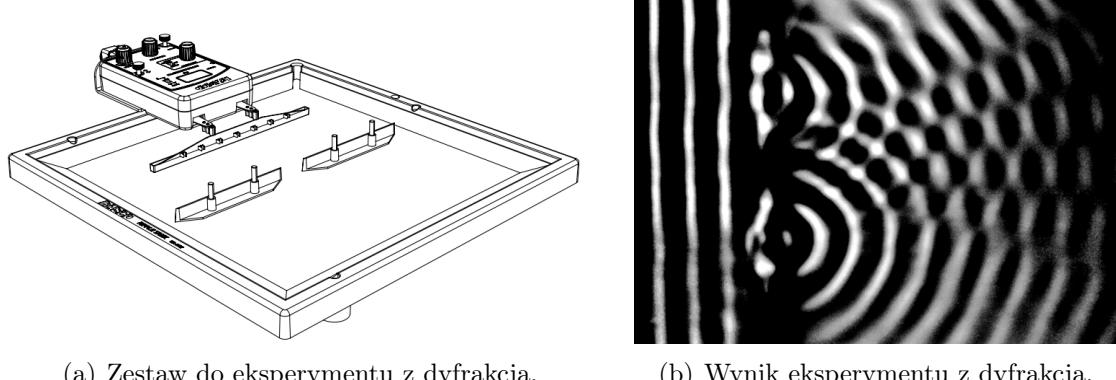


(a) Zestaw do eksperymentu z interferencją. (b) Wynik eksperymentu z interferencją.

Rysunek 3.10: Prezentacja zjawiska interferencji za pomocą kuwety [20].

Gdy obie fale się spotkają, można zaobserwować jak fale koliste w poszczególnych punktach wzmacniają się wzajemnie (jasne punkty) i wygaszają (szare punkty).

Kolejnym eksperymentem, możliwym do prezentowania jest dyfrakcja fali na szczelinie. Eksperyment polega na wygenerowaniu fali przy użyciu końcówki płaskiej oraz umieszczeniu równolegle do generatora dwóch przeszkód, w taki sposób aby utworzyły one szczelinę [20], [18].



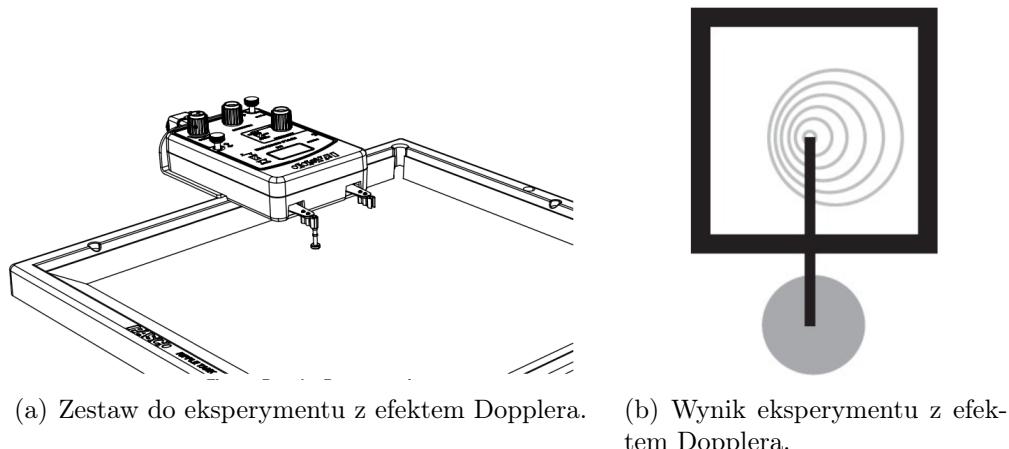
(a) Zestaw do eksperymentu z dyfrakcją.

(b) Wynik eksperymentu z dyfrakcją.

Rysunek 3.11: Prezentacja zjawiska dyfrakcji za pomocą kuwety [20].

Na rysunku 3.11(a) przedstawiono eksperyment z kuwetą prezentujący eksperyment dyfrakcji. Można zauważać jak płaska fala przechodzi przez szczelinę, zakrzywiając czoło fali [20], [18].

Ostatnim eksperymentem, jaki można przeprowadzić z pomocą kuwety jest efekt Dopplera. Do jego przeprowadzenia wykorzystuje się końówkę punktową. Na rysunku 3.12(a) przedstawiono zarys eksperymentu przedstawiający efekt Dopplera. Na rysunku 3.12(b) przedstawiono wynik tego eksperymentu.



(a) Zestaw do eksperymentu z efektem Dopplera.

(b) Wynik eksperymentu z efektem Dopplera.

Rysunek 3.12: Prezentacja zjawiska efektu Dopplera za pomocą kuwety [20].

Przesuwając generator ze stałą prędkością równolegle do krawędzi można zaobserwować jak czoła fali punkowej zbliżają się do siebie, w kierunku ruchu generatora, a oddalają się od siebie, w kierunku przeciwnym [20], [18].

Podsumowując, kuweta drgań stanowi wszechstronne narzędzie do eksperymentów z zakresu fizyki falowej. Pozwala ona na praktyczne doświadczenie i obserwację różnorodnych zjawisk, takich jak odbicie fali, załamanie, interferencja, dyfrakcja oraz efekt Dopplera. Dzięki możliwości prezentacji tych zjawisk w sposób wizualny i interaktywny, kuweta drgań umożliwia lepsze zrozumienie abstrakcyjnych koncepcji fizycznych.

Rozdział 4

Moduł sterujący

Zapewnienie pełnej funkcjonalności kuwety drgań wiąże się z generowaniem fal o zadanach parametrach. Aby było możliwe zadawanie oraz kontrola tych parametrów konieczny jest odpowiedni moduł sterujący. Celem praktycznej części pracy było zaprojektowanie oraz budowa modułu sterującego do kuwety znajdującej się w Sali Zbiorów WFiA oraz poszerzenie jego funkcjonalności względem dostępnych na rynku rozwiązań.

4.1 Założenia projektowe

Urządzenie powinno zapewnić następujące kluczowe funkcje:

- regulację częstotliwości generowanych fal,
- regulację amplitudy generowanych fal,
- synchronizację świecenia diody oraz drgań (w celu uzyskania efektu stroboskopowego).

Dodatkowo, aby rozszerzyć funkcjonalność względem dostępnego komercyjnie rozwiązania, zdecydowano się na dodatkowe opcje, takie jak:

- regulację czasu trwania impulsu generatora za pomocą PWM,
- regulację czasu włączania stroboskopu za pomocą PWM oraz opóźnienia fazowego,
- rozbudowane menu umożliwiające nawigację po poszczególnych ustawieniach i zmianę ich wartości.

Aby umożliwić realizacje podanych założeń należało zaprojektować i stworzyć:

- układ elektroniczny, oparty na dostępnych komponentach, który będzie odpowiadał za sterowanie elementami kuwety (generatorem i diodą LED),
- obudowę urządzenia, która pomieści wszystkie komponenty i będzie odpowiednio dopasowana do mocowania kuwety.
- oprogramowanie, obsługujące sygnały sterujące oraz menu z nawigacją.

W dalszej części pracy przedstawiono realizację modułu sterującego zgodnie z przestawionymi założeniami.

4.2 Dobór elementów elektronicznych

Do realizacji układu elektronicznego modułu potrzebny jest element sterujący w postaci mikrokontrolera, lub innej jednostki sterującej. Na rynku dostępnych jest wiele rozwiązań takich jak np. Arduino [21], Raspberry Pi [22], ESP8266 [23], STM32 [24], czy PIC [25]. Po porównaniu dostępnych rozwiązań zdecydowano się na wykorzystanie platformy Arduino. Dzięki wyjątkowej prostocie obsługi, szerokiemu wsparciu społeczności oraz bogatej

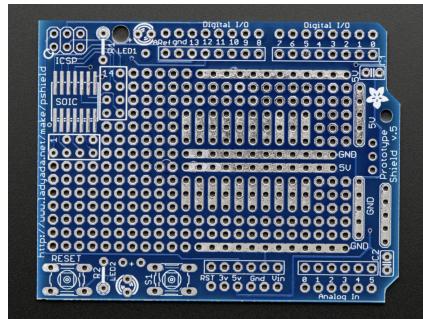
dokumentacji, Arduino umożliwia realizację wielu różnych zadań oraz prototypowania. Ponadto dostępność wielu modułów i akcesoriów wspieranych przez platformę umożliwia łatwą integrację z innymi podzespołami, co pozwala na prosty i wygodny rozwój projektu. Na rysunku 4.1 przedstawiono uniwersalną, powszechnie dostępną wersję Uno [26].



Rysunek 4.1: Płytki Arduino Uno z mikrokontrolerem ATMega328P [27].

Arduino UNO to platforma oparta na układzie procesora ATmega328P. Płytki posiada 14 pinów cyfrowych, służących zarówno jako piny wejściowe lub wyjściowe, z których 6 może być używanych jako wyjścia sygnału PWM. Posiada również 6 wejść analogowych, rezonator ceramiczny 16 MHz, złącze USB, gniazdo zasilania, zestaw pinów ICSP, pozwalających na bezpośrednie zaprogramowanie ATmegi oraz przycisk resetowania. Do rozpoczęcia pracy wystarczy podłączyć go do komputera za pomocą przewodu USB lub zasilić za pomocą zasilacza, bądź baterii. Dodatkowo procesor ma wbudowany 1kB pamięci EEPROM, która przechowuje dane nawet po odłączeniu zasilania [28][27].

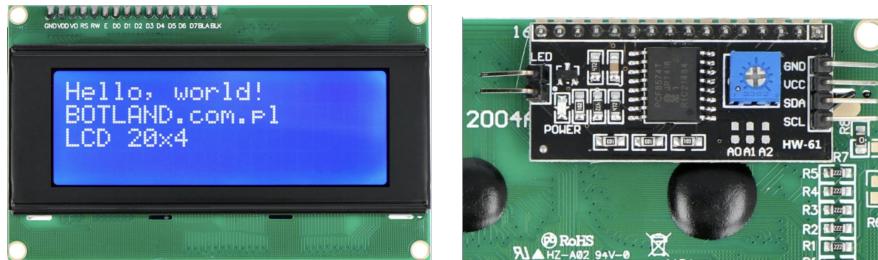
Dzięki dobrze przemyślonej architekturze pinów oraz powszechności tej wersji platformy, możliwe jest bezpośrednie podłączanie innych podzespołów, a nawet całych nakładek. W projekcie modułu sterującego zdecydowano się na nakładkę do Arduino w postaci płytki prototypowej, przedstawionej na rysunku 4.2.



Rysunek 4.2: Płytki prototypowa z poprowadzonymi ścieżkami i otworami przejściowymi, kompatybilna z Arduino Uno [29].

Płytki ma za zadanie służyć jako baza do prototypowania układu elektronicznego. Umożliwia ona wlutowanie odpowiednich komponentów elektronicznych, przy jednoczesnym zachowaniu kompaktowych wymiarów urządzenia. Ponadto gotowe wyprowadzenia są kompatybilne z wyprowadzeniami z oryginalnej platformy Arduino, co ułatwia planowanie połączeń oraz montaż komponentów.

Aby umożliwić wyświetlanie ustawień modułu sterującego oraz zmianę ich wartości, wybrano wyświetlacz LCD 4x20 z konwerterem I²C LCM1602, przedstawiony na rysunku 4.3.



(a) Ekran wyświetlacza o formacie 4x20 znaków.
 (b) Wlutowany z tyłu wyświetlacza konwerter magistrali I²C z potencjometrem regulującym jasność.

Rysunek 4.3: Wyświetlacz LCD 4x20 [30].

Wyświetlacz został dobrany w taki sposób, aby zapewnić możliwość wyświetlania funkcjonalnego menu. Dzięki formatowi znaków, liczba linii odpowiada liczbie ustawień, co umożliwia pełnygląd w działanie modułu sterującego. Wlutowany konwerter I²C, oparty na układzie PCF8574P [31], upraszcza system połączeń z platformą. Konwerter posiada cztery wyprowadzenia: GND (masa), VCC (zasilanie 5V), SDA (linia danych I²C) i SCL (linia zegarowa I²C). Ustawienia wyświetlacza można zmieniać poprzez magistralę z poziomu Arduino, sterując tekstem oraz podświetleniem ekranu [30].

Aby zapewnić możliwość nawigacji w menu oraz zmieniać ustawienia, zdecydowano się na sterowanie za pomocą przedstawionego na rysunku 4.4(a) enkodera z przyciskiem Waveshare 9533.



(a) Enkoder z przyciskiem Waveshare 9533 [32].
 (b) Potencjometr wieloobrotowy [33].

Rysunek 4.4: Elementy regulujące.

Enkoder posiada 5 wyprowadzeń: SIA (wyjście częstotliwościowe z enkodera kwadraturowego A), SIB (wyjście częstotliwościowe z enkodera kwadraturowego B), SW (sygnał wyjściowy przycisku), GND (masa) oraz VCC (napięcie zasilania od 3 V do 5,3 V). Działanie enkodera opiera się na mechanizmie inkrementalnym, który umożliwia precyzyjne śledzenie pozycji obrotu. Działa on poprzez generowanie dwóch sygnałów kwadraturowych SIA i SIB, które są przesunięte względem siebie o 90 stopni, co pozwala na określenie kierunku obrotu enkodera. Jeśli sygnał SIA wyprzedza SIB, enkoder obraca się w jednym kierunku i vice-versa [34]. Dodatkowo, centralnie umieszczony w enkoderze przycisk pełni dwie funkcje: pozwala na zapisywanie wartości ustawień oraz przełączanie pomiędzy różnymi ustawieniami [32].

Kolejną istotną funkcjonalnością w module sterującym jest regulacja częstotliwości generowanych drgań. Do regulacji częstotliwości wybrano przedstawiony na rysunku 4.4(b) potencjometr wieloobrotowy. W przeciwieństwie do enkoderów, potencjometry analogowe

mają ograniczony zakres, co jest pożądane, gdy chce się uzyskać określony zakres częstotliwości. Ponadto, analogowa struktura elementu zapewnia większe bezpieczeństwo przed niepożądanymi zachowaniami układu elektronicznego oraz daje ustaloną wartość, której nie trzeba zapamiętywać. Jest to korzystne rozwiązanie ze względu na jego precyzję przy dużym zakresie częstotliwości oraz możliwość zmiany ustawień w dowolnej chwili, niezależnie od działania pozostałych elementów układu.

Istotną kwestię stanowi integracja modułu sterującego z generatorem będącym elementem oryginalnego zestawu kuwety. Oryginalny moduł posiadał wyprowadzenie żeńskie dla generatora drgań, dlatego w nowym modelu zastosowano przedstawione na rysunku 4.5(a) 3-pinowe gniazdo stereo.

Kolejnym istotnym aspektem było zastosowanie świecącej diody pełniącej rolę stroboskopu. W ostatecznym projekcie zastosowano przedstawioną na rysunku 4.5(b) diodę świeczącą Rebel Star Opulent z mocowaniem, będącą częścią oryginalnego modułu sterującego.



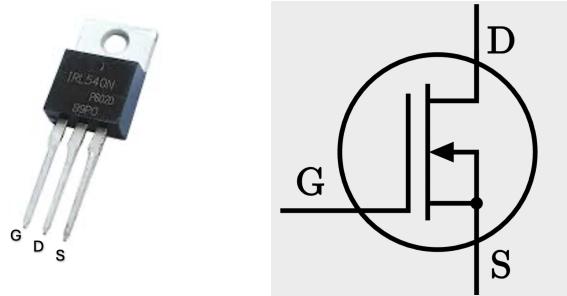
(a) Gniazdo stereo - mini jack, (b) Dioda świecąca - Rebel Star Opulent umożliwiające podłączenie generatora [35].

z metalowym mocowaniem, pełniąca rolę stroboskopu.

Rysunek 4.5: Komponenty odbierające sygnały z Arduino.

Dioda Rebel Star Opulent zapewnia wiązkę światła o dużej intensywności świecenia przy prądzie przewodzenia równym 350 mA i napięciu około 3.20 V. Konfiguracja ta daje intensywność świecenia nawet 120 lumenów [36], co znacznie przewyższa wymagania projektu.

Generator drgań oraz dioda LED pobierają znaczną ilość prądu, generując obciążenia dla pracy układu elektronicznego. Z tego względu do włączania tych podzespołów wykorzystano element włączający, zdolny pracować z dużym prądem i relatywnie dużą częstotliwością przełączania. Ze względu na częstotliwość pracy wykluczono możliwość użycia przekaźników i zdecydowano się użyć tranzystor zdolny dostarczyć ze źródła zasilania odpowiednio duży prąd, nie ingerując w działanie pozostałych elementów zasilanych przez Arduino. Odpowiednim wyborem okazał się tranzystor N-MOSFET IRL540.

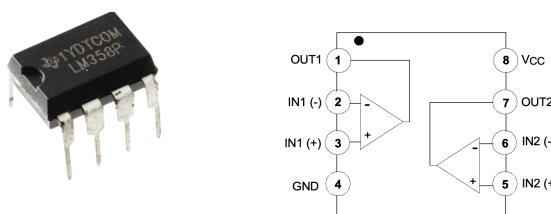


(a) Tranzystor IRL540 [37]. (b) Wyrowadzenia tranzystora IRL540 [38].

Rysunek 4.6: Tranzystor IRL540.

Przedstawiony na rysunku 4.6(a) tranzystor charakteryzuje się maksymalnym napięciem dren-źródło równym 100V, pozwalającym na bezpieczne działanie tranzystora w szerokim zakresie napięć. Maksymalny prąd drenu równy 28A, umożliwia obsługę dużych obciążeń prądowych [39], z kolei jego niska rezystancja w stanie włączenia, wynosząca $0,077 \Omega$ przy napięciu bramki 10V, sprawia, że tranzystor nie nagrzewa się nadmiernie i zapewnia efektywne przekazywanie energii do obciążzeń [39]. Dzięki tym parametrom tranzystor IRL540 jest w stanie dostarczyć duży prąd do wymagających komponentów, takich jak dioda LED i generator drgań, bez zakłócania działania pozostałych elementów zasilanych przez Arduino.

Tranzystory N-MOSFET również generują pobór relatywnie dużych prądów podczas ładowania bramki. Aby dodatkowo nie obciążać wyjścia Arduino, potrzebny jest bufor, który umożliwi sterowanie bramki, przy jednoczesnej izolacji źródła sygnału. Do tego zadania zastosowano przedstawiony na rysunku 4.7(a) wzmacniacz operacyjny LM358 w konfiguracji wtórnika napięcia. Wtórnik napięcia zapewnia niską impedancję wyjściową przy wysokiej impedancji wejściowej, dzięki czemu otrzymywany na wyjściu sygnał daje dużo większy prąd przy podobnym napięciu niż w przypadku zastosowania samego Arduino. Umożliwia to efektywne sterowanie tranzystorem MOSFET bez obciążania platformy [40].



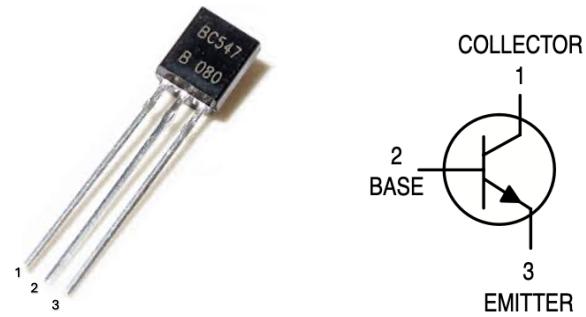
(a) Wzmacniacz LM358 [41]. (b) Schemat wzmacniacza LM358 [42].

Rysunek 4.7: Wzmacniacz LM358.

Przedstawiony na rysunku 4.7(b) układ scalony zawiera dwa wzmacniacze operacyjne. Jeden z nich obsługuje sygnał generatora, drugi LED. Układ LM358 jest podwójnym wzmacniaczem operacyjnym opartym na tranzystorach bipolarnych [40]. Spadek napięcia na wzmacniaczu wynosi około 1.5V do 2V [40], co oznacza, że maksymalne napięcie wyj-

ściowe może być niższe o 1.5V - 2V względem napięcia zasilania. Jego zdolność do pracy w szerokim zakresie napięć od 3V do 30V [40] oferuje duże wzmacnienie sygnału.

Generator drgań działa poprzez cykliczne odkształcanie i powracanie do pierwotnego kształtu wbudowanej membrany. Membrana ulega odkształceniowi, gdy płynie prąd, i wraca do pierwotnego kształtu, gdy prąd nie płynie. Ponieważ przełączanie musi następować bardzo szybko i precyzyjnie, wykorzystano przedstawiony na rysunku 4.8(a) tranzystor bipolarny NPN BC547B.



(a) Tranzystor BC547B [43]. (b) Wyprowadzenia tranzystora BC547B [44].

Rysunek 4.8: Tranzystor BC547B.

Podawany na bazę tranzystora sygnał umożliwia przepływ prądu z kolektora do emitera, co daje kontrolę nad przepływem sygnału z Arduino do generatora. Częstotliwość graniczna tranzystora równa 300 MHz, pozwala na jego stosowanie w układach o wysokiej częstotliwości sygnału [45].

Wzmacniacz operacyjny LM358 nie jest typu Rail-to-Rail, co oznacza, że jego maksymalne napięcie wyjściowe jest ograniczone do około 3,5V przy zasilaniu 5V. To napięcie jest niewystarczające do w pełni otwarcia tranzystora MOSFET IRL540, który potrzebuje większego napięcia na bramce. Dlatego zdecydowano się na zastosowanie przedstawionego na rysunku 4.9 zasilacza 9V.



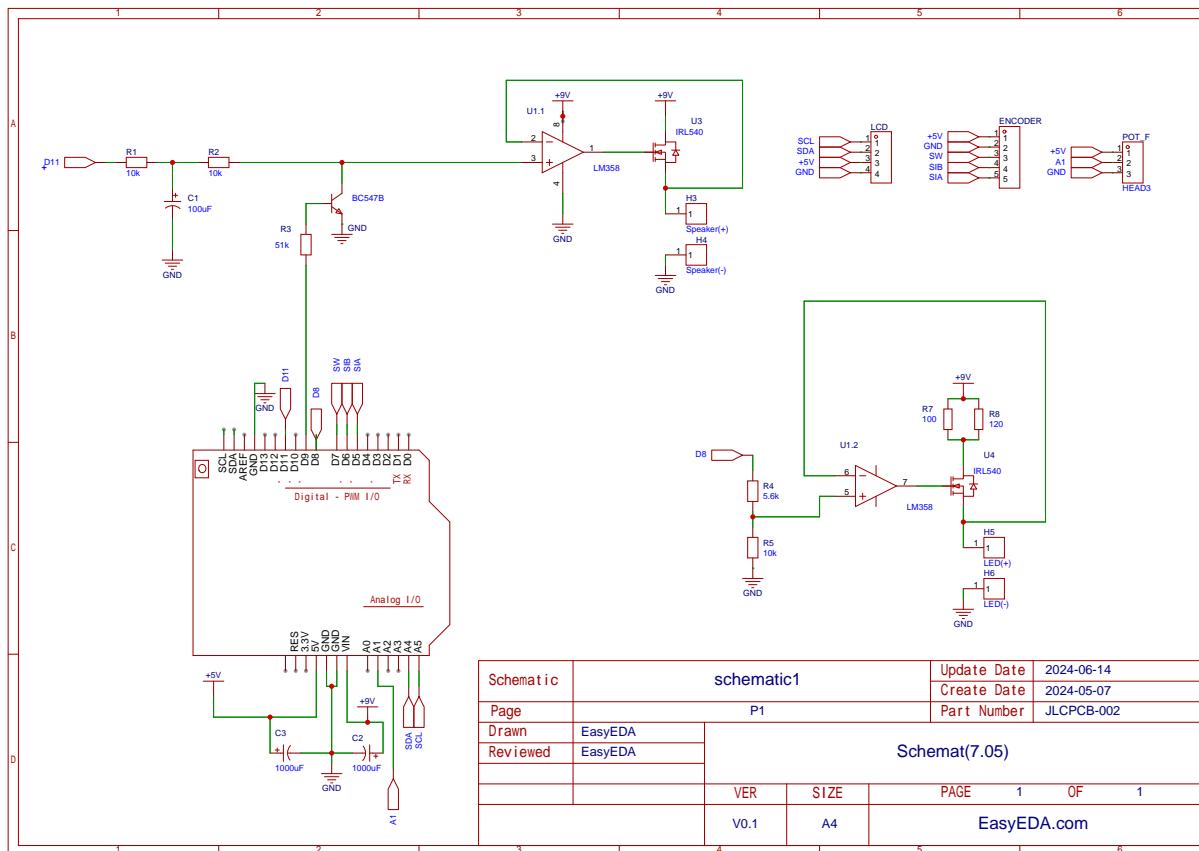
Rysunek 4.9: Zasilacz 9V 2A, wtyk DC 5,5 x 2,1mm, wtyczkowy [46].

Zasilacz ten sprawdza się dobrze jako osobne źródło zasilania w układzie, gdzie generowane są duże obciążenia prądowe. Poprzez zasilenie nim układu LM358P oraz tranzystorów IRL540, zasilacz może w bezpieczny sposób dostarczyć odpowiednio duży prąd do generatora oraz diody.

Wszystkie elementy elektroniczne zostały starannie dobrane, aby zapewnić optymalną funkcjonalność i wydajność układu. Każdy komponent spełnia swoją rolę w układzie, umożliwiając skuteczne sterowanie oraz minimalne straty energii.

4.3 Schemat połączeń

Do realizacji projektu niezbędne było dokładne rozplanowanie ścieżek i połączeń pomiędzy poszczególnymi komponentami, przedstawione w formie przejrzystej dokumentacji. W tym celu utworzono schemat połączeń, który ma umożliwić łatwe zrozumienie i potencjalne modyfikacje układu elektronicznego. Na poniższym schemacie 4.10 przedstawiono, jak poszczególne elementy elektroniczne są ze sobą połączone, aby zrealizować założenia projektowe modułu sterującego oraz jego funkcji sterowania sygnałem generatora dugań oraz diody LED.



Rysunek 4.10: Schemat połączeń komponentów.

Przedstawiony schemat został zaprojektowany wokół mikrokontrolera Arduino Uno, służącego jako główny element sterujący. Do platformy podłączone są pozostałe elementy za pomocą odpowiednich wyprowadzeń i komponentów pośrednich. Do podstawowych połączeń zaliczono: wyświetlacz, enkoder oraz potencjometr.

4.3.1 Połączenia podstawowych komponentów

Pierwszym elementem wymagającym podłączenia do platformy Arduino był wyświetlacz LCD. Dzięki konwerterowi I₂C, wymagał on połączenia tylko czterech wyprowadzeń. Vcc oraz GND zostały bezpośrednio połączone z zasilaniem 5 V oraz masą z Arduino. Wyprowadzenia SCL oraz SDA zostały podłączone do pinów A4 oraz A5 na płytce Arduino, ze względu na ich domyślne przypisanie do komunikacji I₂C, umożliwiając efektywne wykorzystanie sprzętowego wsparcia dla tego protokołu oraz kompatybilność z dostępnymi bibliotekami.

Kolejnym elementem podłączonym do platformy był enkoder z przyciskiem. Enkoder ograniczał się do pięciu wyprowadzeń. Zasilanie oraz masa zostały bezpośrednio połączone z zasilaniem 5 V oraz uziemieniem z platformy. Piny SW, SIB oraz SIA zostały kolejno połączone z wyprowadzeniami D7, D6 oraz D5 płytki.

Ostatnim elementem, który można było bezpośrednio skomunikować z mikrokontrolerem był potencjometr wieloobrotowy. Potencjometr został zasilony bezpośrednio przez 5V oraz masą z Arduino. Wyprowadzenie jego dzielnika zostało połączone z pinem A1 na płytce Arduino.

Wszystkie wymienione elementy można było bez przeszkód połączyć z platformą, umożliwiając natychmiastowe i bezpieczne ich użycie. Pozostałe elementy sterowane, takie jak generator drgań oraz dioda LED, wymagały dodatkowych układów sterujących, aby mogły być bezpośrednio podłączone do platformy.

4.3.2 Połączenie generatora drgań

Moduł sterujący do poprawnej obsługi generatora drgań musi umożliwić regulację amplitudy oraz zmianę częstotliwości przełączania. Ponieważ platforma Arduino Uno nie posiada przetwornika cyfrowo-analogowego, sygnał ten został wygenerowany z wykorzystaniem sygnału PWM (podawanego na pinu D11), który następnie jest przetwarzany na sygnał analogowy za pomocą filtru dolnoprzepustowego RC składającego się z rezystora R1 ($10\text{k}\Omega$) i kondensatora C1 ($100\mu\text{F}$). Dla sygnału PWM o wypełnieniu 50% sygnał zostanie uśredniony do około 2,5 V, a dla PWM o wypełnieniu 75% do około 3,75 V itd. W ten sposób zrealizowano regulację amplitudy sygnału sterującego, który następnie podawany jest przez rezistor R2 na wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego U1.1 pracującego w konfiguracji wtórnika napięcia.

Równolegle przez rezistor R3 ($51\text{k}\Omega$) na bazę tranzystora NPN BC547B podawany jest sygnał cyfrowy z pinu D9. Po podaniu stanu wysokiego na D9, tranzystor przechodzi on w stan przewodzenia, dzięki czemu wejście nieodwracające wzmacniacza operacyjnego U1.1 jest zwierane do masy, do momentu zmiany sygnału bazy na stan niski. W ten sposób zrealizowano zmianę częstotliwości przełączania.

Rezystor R2 ($10\text{k}\Omega$), znajdujący pomiędzy filtrem a wzmacniaczem, zapobiega pełnemu rozładowaniu kondensatora C1, co pozwala na szybkie wymuszenie oczekiwanej stanu na wejściu nieodwracającym wzmacniacza podczas zmiany sygnału D9. Dzięki temu rozwiązaniu nie ma opóźnień podczas zmiany stanów.

Wzmacniacz operacyjny LM358 służy jako bufor sterujący tranzystorem polowym o dużej obciążalności prądowej. Wyjście wzmacniacza jest połączone do bramki tranzystora polowego IRL540, zasilanego napięciem 9 V tak samo jak LM358. Pomiędzy drenem a masą podłączono generator, którego napięcie pracy kontrolowane jest poprzez sprzężenie zwrotne wzmacniacza operacyjnego.

Po otwarciu tranzystora przez sygnał wyjściowy wzmacniacza, prąd płynie z drenu przez źródło do generatora. Poprzez sprzężenie zwrotne ujemne, napięcie otrzymywane na generatorze jest przekazywane na wejściu nieodwracające. Dzięki temu wzmacniacz się nasyca i wszystkie napięcia się stabilizują.

4.3.3 Połączenie diody LED

Układ podłączenia diody został wykonany analogicznie do generatora w oparciu o wzmacniacz operacyjny (drugi z układu LM358) oraz tranzystor polowy IRL540. Aby moduł sterujący mógł efektywnie obsługiwać diodę, napięcie musi osiągnąć wartość przewodzenia, przy

której natężenie wyniesie około 100 mA, jak to było w oryginalnej konfiguracji. Ponieważ wzmacniacz operacyjny pracuje jako wtórnik napięcia, a sygnał sterujący jest sygnałem 5 V, to jest on podany na dzielik napięcia składający się z rezystorów R4 ($5.6\text{k}\Omega$) i R5 ($10\text{k}\Omega$), dając w rezultacie napięcie 3.2 V, przy którym uzyskuje się pożądaną wartość natężenia prądu.

Dren tranzystora podłączony jest do źródła napięcia 9V, oddzielony przez równolegle połączone rezystory R7 (100Ω) i R8 (120Ω), co daje rezystancję równoległą $R_{\text{total}} \approx 54.55\ \Omega$. Rezystory te ograniczają maksymalny prąd (do około 160 mA), jaki może płynąć przez diodę, dodatkowo rozpraszając część energii i zabezpieczając tym samym tranzystor.

Wzmacniacz operacyjny LM358 stabilizuje i wysterowuje napięcie na drenie tranzystora, a tranzystor IRL540 sterowany napięciem na bramce dostarcza odpowiedni prąd do diody LED. Dzięki temu układ zapewnia efektywne oraz bezpieczne świecenie diody.

Zarówno układ 5-woltowy, jak i 9-woltowy wymagały stabilizacji w przypadku dużych poborów prądu podczas zasilania wielu komponentów jednocześnie. Zdecydowano się zastosować dodatkowe kondensatory elektrolityczne o pojemności $1000\ \mu\text{F}$ pomiędzy zasilaniem 5 V, 9 V i masą układu. Kondensatory gromadzą ładunek elektryczny i uwalniają go w sytuacjach, gdy nagle zwiększa się pobór prądu przez układ.

Wszystkie połączenia zostały rozplanowane, aby zapewnić optymalne działanie układu, minimalizując zakłócenia oraz straty w wydajności przetwarzanego sygnału. Rozłożenie komponentów i ich wzajemne połączenia umożliwia stabilne i efektywne sterowanie generatorem drgań oraz diodą LED, przy jednoczesnym zachowaniu możliwości łatwej rozbudowy i modyfikacji systemu w przyszłości.

4.4 Oprogramowanie

Oprogramowanie modułu sterującego stanowi nierozerwalną część systemu, umożliwiającą użytkownikowi precyzyjne sterowanie parametrami pracy kuwety drgań. Opracowano kod źródłowy, który odpowiada za generowanie sygnału oraz sterowanie: częstotliwością generowanego sygnału, wypełnieniem generowanego sygnału, amplitudą generowanego sygnału, wypełnieniem sygnału diody LED oraz opóźnieniem w fazie sygnału diody LED. Ponadto kod ma zaimplementowane wyświetlanie oraz nawigowanie po interfejsie użytkownika. Arduino Uno jest wyposażone w zintegrowany interfejs USB, który umożliwia bezpośrednie programowanie mikrokontrolera poprzez port szeregowy z komputerem [28]. Do pisania oprogramowania wykorzystano dedykowane dla platformy środowisko Arduino IDE, wykorzystujące język programowania będący pochodną C/C++, wraz z odpowiednimi bibliotekami oraz dedykowanymi funkcjami wykorzystywanymi przez tę platformę [47].

4.4.1 Konfiguracja przerwań

Aby było możliwe precyzyjne regulowanie parametrów generowanego sygnału, potrzebny był mechanizm umożliwiający pełną kontrolę nad generowanym sygnałem, działający niezależnie od głównego programu mikrokontrolera. W tym celu wykorzystano Timer z technologią przerwań. Timer jest sprzętowym licznikiem, który odmierza czas na podstawie sygnałów zegarowych. Działa poprzez zliczanie impulsów zegara mikrokontrolera. W konfiguracji CTC (Clear Timer on Compare Match), po osiągnięciu określonej wartości w rejestrze OCR (np. OCR1A), wywołuje przerwanie pozwalające na wykonywanie określonych zadań bez angażowania głównego programu. W platformie Arduino Uno, Timer1

został wykorzystany do generowania precyzyjnego sygnału PWM, który kontroluje pozostałe parametry pracy sygnału, takie jak częstotliwość, szerokość wypełnienia i opóźnienie fazowe [48] [49].

Założeniem modułu sterującego było aby generowany sygnał działał w zakresie częstotliwości od 0 do 100 Hz. Timer1 przy maksymalnym ustawieniu preskalera daje minimalnie 256 Hz. Aby móc generować sygnał PWM z założoną częstotliwością należało spowolnić timer, co osiągnięto poprzez zmodyfikowanie funkcji ISR(), służącej do wywołania przerwań. W kodzie 4.1 przedstawiono modyfikacje tej funkcji.

```

1 ISR(TIMER1_COMPA_vect) { // interrupt service routine (ISR)
2   // Zwiększenie wartości zmiennej divider przy każdym wywołaniu
3   // przerwania
4   divider++;
5
6   // Sprawdzenie, czy divider przekroczył wartość 255
7   if(divider > 255) { // wartość o którą spowalnimy timer
8     digitalWrite(speakerPin, HIGH); // Ustawienie pinu speakerPin
9     na HIGH
10    divider = 0; // Resetowanie divider
11    previousMillis = millis(); // Aktualizacja czasu
12    poprzedniego przerwania
13  }
14  // Sprawdzenie, czy divider osiągnął wartość dutyCycle
15  else if(divider == dutyCycle) { // szerokość wypełnienia: dla
16    127 -> 50%
17    digitalWrite(speakerPin, LOW); // Ustawienie pinu speakerPin
18    na LOW
19  }
20}

```

Kod 4.1: Obsługa przerwania timera do generowania sygnału PWM

Powyższy fragment obsługuje funkcję przerwania timera (ISR) do generowania sygnału PWM na pinie speakerPin. ISR jest wywoływanie za każdym razem, gdy licznik timera osiągnie wartość OCR1A. Dla preskalera ustawionego na 1, największa możliwa częstotliwość wynosi 256 Hz. Aby osiągnąć zakres częstotliwości od 0 do 100 Hz, bez zmiany preskalera, należało spowolnić ISR 256 razy. Wykorzystano zmienną divider, która zlicza kolejne przerwania. Jeżeli zmienna divider osiągnie wartość większą niż 255, podczas przerwania ustawiany jest stan wysoki sygnału na speakerPin i zmienna divider resetuje się. Z kolei, gdy zmienna divider osiągnie wartość dutyCycle, ustawiany jest podczas przerwania stan niski sygnału na speakerPin. Dzięki temu sygnał PWM jest generowany w sposób kontrolowany, z odpowiednią szerokością wypełnienia i częstotliwością generowanych przerwań.

Przy pomocy kalkulatora dla timerów AVR wyliczono dla zakresu częstotliwości od 256 do 25600 Hz, odpowiadającą im wartość OCR1A, przy maksymalnym ustawieniu preskalera. Wartości te następnie zapisano w tablicy, z której rejestr ma dopasowane wartości, w zależności od wymaganej częstotliwości. Fragment tablicy przedstawiono w kodzie 4.2.

```

1 const FrequencySetting frequencyLookupTable[101] = {
2   {65535, 0b000}, // 0 Hz, timer zatrzymany
3   {62499, 0b001}, // 256 Hz
4   {31249, 0b001}, // 512 Hz

```

```

5  {20832, 0b001}, // ~768 Hz
6  {15624, 0b001}, // 1024 Hz
7  {12499, 0b001}, // 1280 Hz
8  {10415, 0b001}, // ~1536 Hz
9  {8927, 0b001}, // ~1792 Hz
10 {7811, 0b001}, // ~2048 Hz
11 {6943, 0b001}, // ~2304 Hz
12 {6249, 0b001}, // 2560 Hz
13 {5680, 0b001}, // ~2816 Hz
14 {5207, 0b001}, // ~3072 Hz
15 ...
16 {656, 0b001}, // ~24353 Hz
17 {650, 0b001}, // ~24577 Hz
18 {643, 0b001}, // ~24844 Hz
19 {636, 0b001}, // ~25117 Hz
20 {630, 0b001}, // ~25356 Hz
21 {624, 0b001}, // 25600 Hz
22 };

```

Kod 4.2: Fragment tablicy ustawień dla poszczególnych wartości częstotliwości

Powyzszy fragment definiuje tablicę 101 ustawień częstotliwości (łącznie z 0 Hz) dla różnych wartości OCR1A i odpowiednich ustawień preskalera, używanych do konfiguracji Timera1 w Arduino. Każda pozycja tablicy odpowiada całkowitej bądź zaokrąglonej konkretnej wartości częstotliwości. Aby zatrzymać timer, wartość preskalera jest ustawiona na 0, co skutkuje zatrzymaniem licznika timera. Przy wartościach innych niż 0 Hz, preskalera jest ustawiony na 1, aby umożliwić pełny zakres częstotliwości, który jest następnie spowalniany 256 razy.

Do konfiguracji timera oraz obliczeń związanych z częstotliwością i szerokością wypełnienia sygnału PWM wykorzystano narzędzie dostępne na stronie [50].

4.4.2 Sterowanie generatorem

Sterowanie generatorem jest istotnym elementem systemu, ponieważ umożliwia kontrolę nad częstotliwością, szerokością wypełnienia oraz amplitudą generowanych sygnałów. Dzięki precyzyjnemu sterowaniu tymi parametrami możliwe jest dostosowanie działania modułu sterującego do specyficznych wymagań kuwety drgań.

Dostosowanie częstotliwości sygnału generatora, zapewnia przedstawiony we fragmencie 4.3 kod.

```

1 void adjustFrequency() {
2     // Odczyt wartości z potencjometru podłączonego do freqPin
3     freqValue = analogRead(freqPin);
4
5     // Sprawdzenie, czy zmiana wartości przekracza próg 5
      (zabezpiecza przed niepożądanymi odczytami)
6     if (abs(freqValue - lastFreqValue) > 5) {
7         // Mapowanie wartości potencjometru na indeks częstotliwości
8         unsigned int frequencyIndex = map(freqValue, 0, 1023, 0, 100);
9
10    // Pobranie nowych wartości OCR1A i preskalera z tablicy
        ustawień częstotliwości

```

```

11     unsigned int newOCR1A =
12         frequencyLookupTable[frequencyIndex].ocr1a;
13     byte newPrescalerBits =
14         frequencyLookupTable[frequencyIndex].prescalerBits;
15
16     // Aktualizacja nowych wartości OCR1A i preskalera w
17     // rejestrach timera
18     OCR1A = newOCR1A;
19     TCCR1B = (TCCR1B & 0b11111000) | newPrescalerBits;
20
21     // Obliczanie rzeczywistej częstotliwości na podstawie OCR1A
22     unsigned long frequency = 16000000 / (OCR1A + 1);
23
24     // Mapowanie częstotliwości timera na właściwy zakres
25     // wyświetlania (1-100 Hz)
26     displayFrequency = map(frequency, 256, 25600, 1, 100);
27
28     // Obliczanie okresu sygnału w mikrosekundach
29     tMax = (1000000 / frequency);
30     // Mapowanie okresu sygnału na właściwy zakres (10-1000 ms)
31     calcTMax = map(tMax, 39, 3906, 10, 1000);
32
33     // Zapisywanie bieżącej wartości potencjometru
34     lastFreqValue = freqValue;
35 }
36 }
```

Kod 4.3: Funkcja sterująca częstotliwością drgań dla generatora

Powyzszy fragment definiuje funkcję sterującą częstotliwością generatora PWM na podstawie wartości odczytanej z potencjometru. Główne elementy to:

- Odczyt wartości potencjometru: `freqValue = analogRead(freqPin);`
- Sprawdzenie zmiany wartości: aktualizacja częstotliwości następuje tylko wtedy, gdy różnica między bieżącą a ostatnią wartością przekracza 5.
- Mapowanie wartości potencjometru: przekształcanie odczytanej wartości na indeks częstotliwości w tablicy `frequencyLookupTable`.
- Aktualizacja rejestrów timera: ustawianie nowej wartości OCR1A i preskalera zgodnie z wybranym indeksem częstotliwości.
- Obliczanie rzeczywistej częstotliwości: Obliczanie częstotliwości na podstawie ustawień OCR1A i preskalera, zgodnie ze wzorem:

$$\text{Częstotliwość wyjściowa} = \frac{\text{Częstotliwość zegara}}{(OCR1A + 1) \times \text{Preskaler}}$$

- Mapowanie częstotliwości: ponieważ rzeczywista częstotliwość jest spowolniania 256 razy, częstotliwość mapowana jest na właściwy zakres wyświetlania od 1 do 100 Hz za pomocą kodu:

```
displayFrequency = map(frequency, 256, 25600, 1, 100);
```

- Obliczanie okresu sygnału: przekształcanie częstotliwości na okres w mikrosekundach i mapowanie na zakres od 10 ms do 1000 ms.
- Zapisywanie bieżącej wartości potencjometru: `lastFreqValue = freqValue;`

Uzupełnieniem dla regulacji PWM sygnału oraz jego generowania są przedstawiony we fragmencie 4.4 funkcje.

```

1 void adjustPWM() {
2     // Przekształcenie przechowywanego procentowego ustawienia PWM
3     // (0-100%) na zakres szerokości wypełnienia (0-255)
4     dutyCycle = map(settingsValue[0], 0, 100, 0, 255);
5 }
6
7 void adjustAmplitude() {
8     // Mapowanie przechowywanej procentowej wartości amplitudy
9     // (0-100%) na zakres PWM (0-255)
10    int pwmAmplitude = map(settingsValue[3], 0, 100, 0, 255);
11    analogWrite(signalPin, pwmAmplitude); // Generowanie sygnału
12 }
```

Kod 4.4: Funkcje sterujące PWM-em oraz amplitudą generatora

W powyższym fragmencie funkcja `adjustAmplitude()` odpowiada za przekształcenie wartości procentowej zmiennej `pwmAmplitude` na wartość PWM z zakresu od 0 do 255. Następnie sygnał PWM jest podawany na wyjście `signalPin` za pomocą funkcji `analogWrite`, który po jego uśrednieniu przez filtr dolnoprzepustowy będzie sterował amplitudą drgań generatora. Funkcja `adjustPWM()` analogicznie odpowiada za przekształcenie wartości procentowej zmiennej `dutyCycle` na wartość z zakresu od 0 do 255, decydując o czasie zmiany stanu przy pomocy przerwania, podczas pełnego cyklu generatora.

4.4.3 Sterowanie Diodą LED

Sterowanie diodą LED, pełniącej rolę lampy stroboskopowej, wymaga precyzyjnego kontrolowania czasu jej włączania i wyłączania. Jest to konieczne ze względu na potrzebę synchronizacji częstotliwości rozchodzącej się w kuwecie fali z błyskami diody w celu uzyskania efektu stroboskopowego. W tej sekcji omówiono funkcje odpowiedzialne za regulację szerokości impulsu PWM oraz opóźnienia w fazie dla diody LED.

Aby móc dostosować PWM oraz opóźnienie w fazie diody LED, napisano przedstawiony we fragmencie 4.5 kod.

```

1 unsigned int pulseWidth = map(settingsValue[1], 0, 100, 0,
2     calcTMax);
3
4 unsigned int pulseDelay = map(settingsValue[2], 0, 100, 0,
5     (calcTMax - pulseWidth));
6
7 // Warunki dla diody LED:
8
9 if (currentMillis - previousMillis >= pulseDelay + pulseWidth) {
10    digitalWrite(ledPin, LOW);
11 } else if (currentMillis - previousMillis >= pulseDelay) {
12    digitalWrite(ledPin, HIGH);
13 }
```

Kod 4.5: Funkcja sterująca PWM-em diody LED

Powyższy fragment odpowiada za regulację szerokości impulsu PWM oraz opóźnienia w fazie diody LED względem okresu trwania sygnału generatora. Wartość `pulseWidth` jest obliczana przez mapowanie wartości procentowej przechowywanej w tablicy ustawień na

rzeczywistą szerokość impulsu w zakresie od 0 do calcTMax, będącą przybliżoną wartością okresu trwania cyklu generatora. Wartość pulseDelay jest obliczana podobnie, mapując procentową wartość opóźnienia na rzeczywisty czas opóźnienia, będący maksymalnym okresem cyklu, przesuniętym o cykl trwania sygnału LED. Warunki w kodzie, które sprawdzają wartości currentMillis i previousMillis, mają na celu zapewnienie, że okres świecenia diody LED będzie się zawsze mieścił w pełnym cyklu działania generatora, zapewniając spójne i kontrolowane działanie stroboskopu.

4.4.4 Interfejs Użytkownika

Interfejs użytkownika jest istotnym elementem urządzenia, który umożliwia łatwą nawigację po menu oraz zmianę ustawień generowanych sygnałów. Potrzebny był mechanizm przełączania pomiędzy poszczególnymi warstwami, ich ustawieniami oraz możliwość zmiany i zapisywania ich wartości. W tej sekcji omówiono wszystkie najważniejsze funkcje odpowiedzialne za wyświetlanie menu na ekranie LCD oraz obsługę enkodera obrotowego i przycisku do nawigacji i zmiany ustawień.

Przy działaniu interfejsu istotne było aktualizowanie stanu wyświetlacza. W tym celu napisano przedstawiony we fragmencie 4.6 kod.

```
1 void updateDisplay() {
2     static int lastSetting = -1;
3     static int lastLayer = -1;
4     static int lastValue = 10; // Wykrywanie zmian wartości
5         bieżącego ustawienia
6     static unsigned long lastFrequency = 0; // Wykrywanie zmian
7         częstotliwości
8
9     // Sprawdzenie potrzeby aktualizacji wyświetlacza
10    if (currentLayer != lastLayer || currentSetting != lastSetting
11        || (currentLayer == 1 && settingsValue[currentSetting] != lastValue) || displayFrequency != lastFrequency) {
12        lcd.clear();
13
14        if (currentLayer == 0) {
15            // Menu główne:
16            lcd.setCursor(0, 0); lcd.print(" PWM");
17            lcd.setCursor(0, 1); lcd.print(" Strob Width");
18            lcd.setCursor(0, 2); lcd.print(" Strob Delay");
19            lcd.setCursor(0, 3); lcd.print(" Amplitude");
20
21            // Przesunięcie strzałki wskazującej na bieżącego
22            // ustawienia
23            lcd.setCursor(0, currentSetting); lcd.write(byte(0));
24
25            // Wyświetlanie częstotliwości po prawej stronie
26            lcd.setCursor(15, 0); // Ustawienie pozycji kurSORA
27                dla wyświetlania częstotliwości
28            lcd.print("Freq:");
29            lcd.setCursor(15, 1);
30            lcd.print(displayFrequency);
31            lcd.print("Hz");
32        } else if (currentLayer == 1) {
```

```

28     // Warstwa regulacji ustawień:
29     lcd.setCursor(0, 0); lcd.write(byte(1)); // strzałka
30     wstecz
31     lcd.setCursor(1, 0);
32     switch(currentSetting) {
33         case 0: lcd.print("PWM:"); break;
34         case 1: lcd.print("Strob Width:"); break;
35         case 2: lcd.print("Strob Delay:"); break;
36         case 3: lcd.print("Amplitude:"); break;
37     }
38     lcd.setCursor(1, 1);
39     lcd.print(settingsValue[currentSetting]); // Wyświetlanie bieżącej wartości ustawienia
40
41     lcd.print("%"); // Zakładając, że ustawienia są przedstawione jako procenty
42     // Wyświetlanie częstotliwości po prawej stronie
43     lcd.setCursor(15, 0); // Ustawienie pozycji kurSORA dla wyświetlania częstotliwości
44     lcd.print("Freq: ");
45     lcd.setCursor(15, 1);
46     lcd.print(displayFrequency);
47     lcd.print("Hz");
48
49     // Zapamiętywanie ostatniego stanu
50     lastLayer = currentLayer;
51     lastSetting = currentSetting;
52     lastValue = settingsValue[currentSetting];
53     lastFrequency = displayFrequency; // Zapamiętanie ostatniej częstotliwości (do wyświetlania)
54 }
```

Kod 4.6: Funkcja wyświetlająca menu

Powyzszy fragment aktualizuje wyświetlacz LCD, pokazując menu główne lub warstwę regulacji ustawień w zależności od bieżącego stanu. Główne funkcje to:

- Sprawdzenie potrzeby aktualizacji wyświetlacza: jeśli zmieniła się warstwa, bieżące ustawienie, wartość ustawienia bądź wyświetlana częstotliwość, wyświetlacz jest aktualizowany.
- Wyświetlanie głównego menu: w menu głównym po lewej stronie są wyświetlane opcje "PWM", "Strob Width", "Strob Delay" oraz "Amplitude". Strzałka wskazuje bieżące ustawienie. Z kolei częstotliwość wyświetlana jest osobno, po prawej stronie wyświetlacza.
- Wyświetlanie warstwy regulacji: w warstwie regulacji wyświetlana jest wartość bieżącego ustawienia, którą można regulować. Częstotliwość jest wyświetlana tak samo jak w poprzedniej warstwie.
- Zapamiętywanie ostatniego stanu: ostatni stan warstwy, wartości procentowej ustawień i częstotliwości są zapamiętywane, aby minimalizować zbędne aktualizacje wyświetlacza.

Żeby nawigacja po menu oraz zmiana wartości była możliwa, napisano przedstawiony we fragmencie 4.7 kod, obsługujący enkoder obrotowy oraz przycisk.

```
1 // Funkcja obsługująca aktualizację stanu enkodera oraz przycisku
2 // w nawigacji
3 void updateEncoder() {
4     currentStateClock = digitalRead(Clock); // Odczyt bieżącego
5     stanu zegara enkodera
6
7     if (currentStateClock != lastStateClock) { // Sprawdzenie, czy
8         stan zegara uległ zmianie
9         if (currentStateClock == HIGH) {
10             if (currentLayer == 0) {
11                 // Nawigacja w menu głównym
12                 if (digitalRead(Data) != currentStateClock) {
13                     currentSetting--; // Przejście do poprzedniego
14                     ustawienia
15                     if (currentSetting < 0) currentSetting = 3; // Przejście do ostatniego ustawienia
16                 } else {
17                     currentSetting++; // Przejście do następnego
18                     ustawienia
19                     if (currentSetting > 3) currentSetting = 0; // Przejście do pierwszego ustawienia
20                 }
21             } else if (currentLayer == 1) {
22                 // Regulacja wartości bieżącego ustawienia w
23                 warstwie regulacji
24                 if (digitalRead(Data) != currentStateClock) {
25                     settingsValue[currentSetting] =
26                         max(settingsValue[currentSetting] - 1, 0);
27                         // Zmniejszenie wartości ustawienia
28                 } else {
29                     settingsValue[currentSetting] =
30                         min(settingsValue[currentSetting] + 1,
31                             100); // Zwiększenie wartości ustawienia
32                 }
33             }
34         }
35         lastStateClock = currentStateClock; // Aktualizacja
36         ostatniego stanu zegara
37     }
38
39     // Obsługa przycisku
40     int btnState = digitalRead(Push); // Odczyt stanu przycisku
41     static unsigned long buttonDownTime = 0; // Czas naciśnięcia
42     przycisku
43     static bool buttonPressed = false; // Wskazuje, czy przycisk
44     jest obecnie naciśnięty
45
46     if (btnState == LOW) { // Sprawdzenie, czy przycisk jest
47         wciśnięty
48         if (!buttonPressed) {
49             buttonDownTime = millis(); // Zapisanie czasu
```

```

36         naciśnięcia przycisku
37     buttonPressed = true; // Ustawienie flagi naciśnięcia
38     przycisku
39   }
40 } else if (btnState == HIGH && buttonPressed) { // Sprawdzenie, czy przycisk został zwolniony
41   unsigned long pressDuration = millis() - buttonDownTime;
42   // Obliczenie czasu naciśnięcia przycisku
43   buttonPressed = false; // Resetowanie flagi naciśnięcia
44   przycisku
45
46   if (pressDuration >= LONG_PRESS_TIME) { // Długie
47     naciśnięcie
48     if (currentLayer == 1) {
49       saveSetting(currentSetting,
50                   settingsValue[currentSetting]); // Zapisanie
51                   bieżącego ustawienia do pamięci EEPROM
52
53     // Wyświetlenie komunikatu o zapisie na
54     // wyświetlaczu
55     lcd.setCursor(0, 3);
56     lcd.print("Saved to memory      ");
57   }
58 } else if (pressDuration >= SHORT_PRESS_TIME &&
59   pressDuration < LONG_PRESS_TIME) { // Krótkie
60   naciśnięcie
61   currentLayer = !currentLayer; // Przełączanie między
62   warstwami
63 }
64 }

```

Kod 4.7: Funkcja aktualizująca stan enkodera oraz przycisku w nawigacji

Powyższy fragment obsługuje enkoder obrotowy i przycisk, umożliwiając nawigację po menu oraz regulację ustawień. Główne funkcje to:

- Nawigacja w menu: Umożliwia przełączanie między różnymi ustawieniami menu, gdy enkoder jest obracany.
- Regulacja ustawień: Pozwala na zmianę wartości wybranego ustawienia, gdy enkoder jest obracany w trybie regulacji.
- Obsługa przycisku: Rozróżnia krótkie i długie naciśnięcie przycisku:
 - Krótkie naciśnięcie: Przełącza między warstwą głównego menu a warstwą regulacji ustawień.
 - Długie naciśnięcie: Zapisuje aktualne ustawienie do pamięci EEPROM i wyświetla komunikat "Saved to memory".

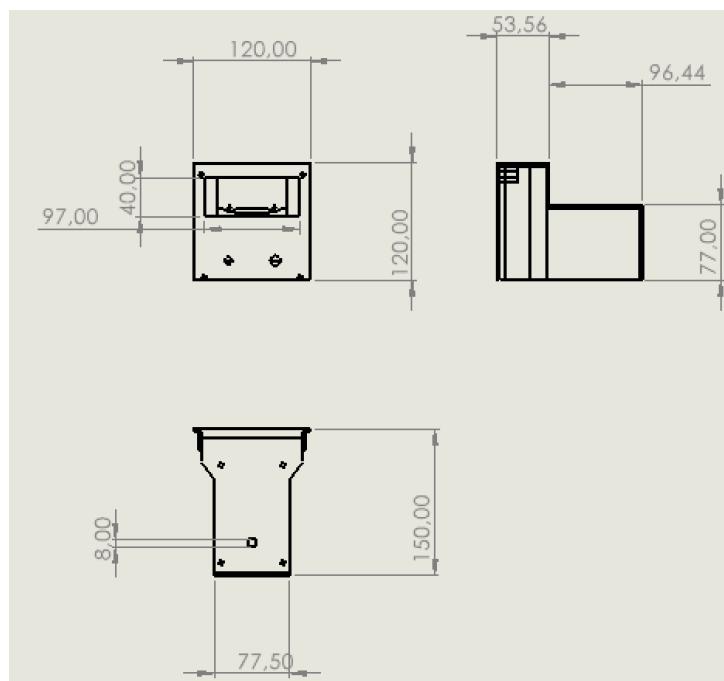
Do obsługi enkodera oraz całego interfejsu posłużono się przykładem ze strony [51], z kolei do obsługi przycisku posłużono się rozwiązaniem zaczerpniętym ze strony [52]

Pełny kod źródłowy, w tym konfiguracja timera oraz zapisywanie ustawień do pamięci, dostępny jest pod adresem: https://drive.google.com/file/d/1Y0-6I1JMqIJYG2JfCFXJTrTK9_1ca5tm/view?usp=drive_link

4.5 Obudowa - projektowanie i druk 3D

Aby umożliwić wykorzystanie modułu sterującego w rzeczywistych zastosowaniach, niezbędne było zaprojektowanie i wydrukowanie obudowy, która pomieściłaby wszystkie elementy modułu oraz umożliwiła zamontowanie całości na aparaturze kuwety drgań. Do zaprojektowania modelu 3D obudowy wykorzystano program SolidWorks, ze względu na dostępność licencji do tego oprogramowania na uczelni. Z kolei do wydruku 3D wykorzystano drukarkę znajdująca się na zapleczu pracowni, w sali 309 oraz dedykowany dla niej program PrusaSlicer.

Na rysunku 4.11 przedstawiono rysunek całości obudowy z najważniejszymi wymiarami, ukazany w różnych rzutach.

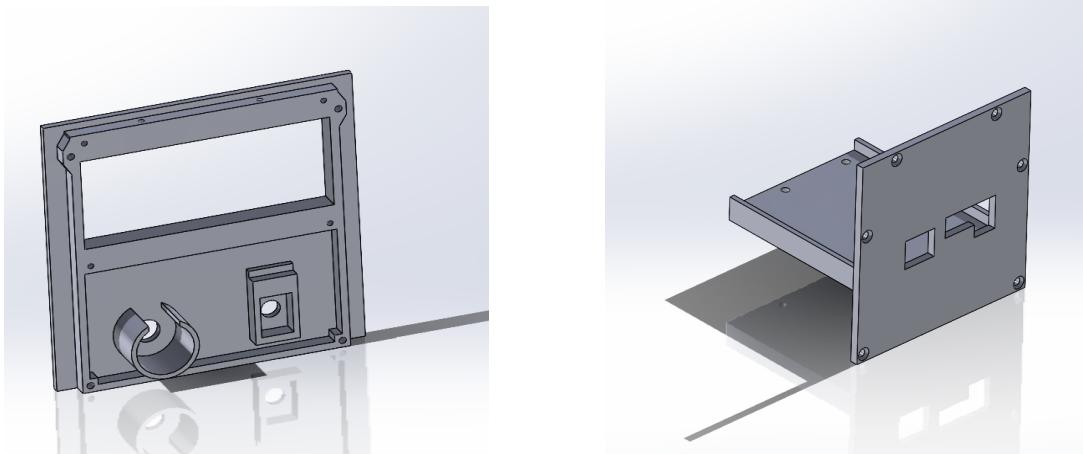


Rysunek 4.11: Rysunek poglądowy obudowy w różnych rzutach [mm].

Prostokątny otwór o wymiarach 97x40 mm na przednim rzucie, służy do pomieszczenia ekranu wyświetlacza LCD. Otwór kwadratowy o wymiarach 8x8 mm na spodnim rzucie obudowy umożliwia przedostanie się światła z diody na zewnątrz urządzenia. Szerokość 77,50 mm ukazana na rzucie dolnym oraz bocznym jest zachowanym oryginalnym wymiarem modułu sterującego, dopasowanym do mocowania kuwety drgań. Przód modułu został powiększony do 120x120 mm aby umożliwić pomieszczenie na panelu: wyświetlacza, potencjometru wielooobrotowego oraz enkodera. Ukazana na rzucie dolnym oraz bocznym długość całego modułu, wynosząca 150 mm, była optymalnym wymiarem, gdyż uwzględnia ona długość metalowego mocowania diody wynoszącą 120 mm oraz długość obudowy potencjometru wielooobrotowego wynoszącą 10 mm.

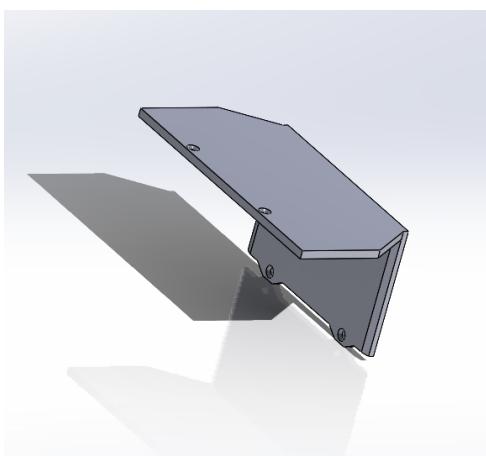
Przy projektowaniu trzeba było wziąć pod uwagę ograniczenia druku 3D. Z tego powodu zdecydowano się na zaprojektowanie poszczególnych części obudowy, które są następnie składane w jedną całość. Ważne przy tym było naniesienie w odpowiednich miejscach otworów, do montażu całości. Każdy wydrukowany element miał mieć co najmniej 4 otwory. Dzięki temu można potem przy pomocy odpowiednich wkrętów zamontować całość. W tym celu wykorzystano w obudowie 4 wkręty o średnicy 2 mm i długości 10 mm oraz 10 wkrętów o średnicy 2 mm i długości 6 mm. Drugą istotną kwestią było zamontowanie

diody LED z metalowym mocowaniem oraz platformy Arduino. Na ten cel przeznaczono 6 śrub z nakrętką o średnicy 3 mm i długością 10 mm. Ostatnią rzeczą był wyświetlacz LCD. Posiadał on w swojej konstrukcji 4 otwory o średnicy 3 mm, więc wykorzystano 4 wkręty o średnicy 3 mm i długości 6 mm. Otwory na śruby zaplanowano na spodniej części obudowy oraz na tylnej części, w specjalnej wypustce dedykowanej do mocowania platformy Arduino. Otwory na wyświetlacz LCD zostały rozmieszczone w części frontalnej obudowy. Dodatkowo, ze względu na dużą złożoność elementu, górną część obudowy podzielono na dwie części: frontalną i tylną, aby umożliwić wydruk a następnie montaż przy pomocy dodatkowych wkrętów. Na rysunku 4.11 przedstawiono poszczególne elementy złożenia projektu.

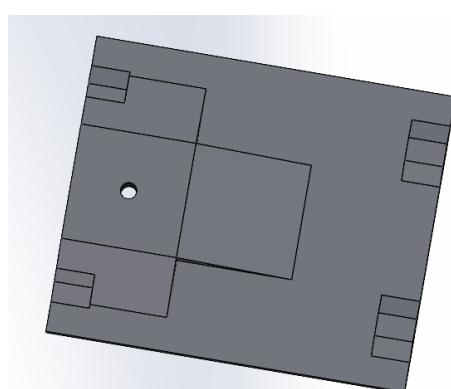


(a) Front obudowy - widok ze środka. W górnej części prostokątny otwór na wyświetlacz. Poniżej wyświetlacza, od strony lewej - mocowanie na potencjometr, od strony prawej - mocowanie na enkoder. Posiada 4 otwory na wkręty 3x6 mm do mocowania LCD oraz 4 otwory na wkręty 2x10 mm na łączenie styków.

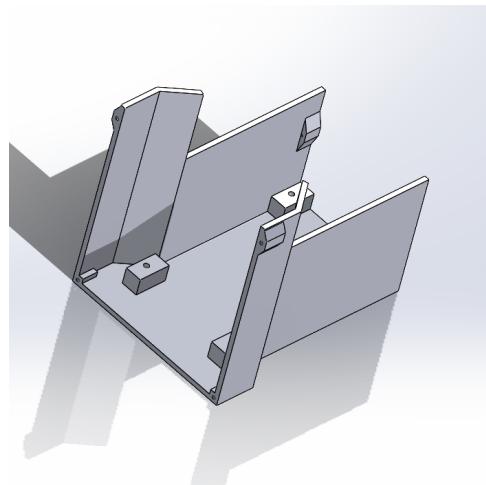
(b) Tył obudowy ze specjalną wypustką. Posiada z tyłu 3 pary otworów na wkręty 2x6 mm łączące styki oraz 1 parę otworów na śruby, wykorzystywane do mocowania platformy Arduino.



(c) Góra obudowy - część frontalna. Posiada na krawędziach po 2 pary otworów na wkręty 2x6 mm, łączące styki.



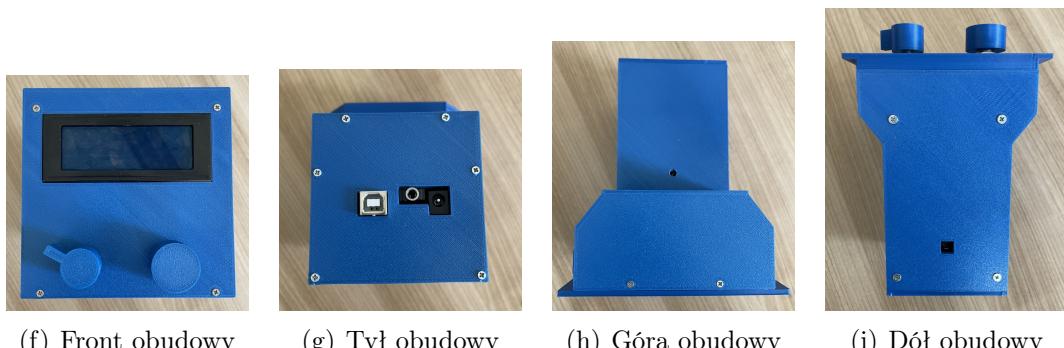
(d) Góra obudowy - część tylna - widok ze środka. Posiada po 2 pary otworów przy krawędziach na wkręty 2x6 mm, łączące styki. Wewnątrz wtopiona nakrętka kwadratowa 9x9x4 mm z otworem na śrubę, podtrzymująca całą konstrukcję na kuwecie drgań.



(e) Dół obudowy. Posiada po 2 czwórki otworów na krawędziach na wkręty 2x6 mm łączące styki oraz 4 otwory na spodzie na śruby 3x10 mm do metalowego mocowania z diodą LED

Rysunek 4.11: Poszczególne części złożenia obudowy.

Wydrukowany i zmontowany projekt przedstawiono na rysunku 4.12



(f) Front obudowy

(g) Tył obudowy

(h) Góra obudowy

(i) Dół obudowy

Rysunek 4.12: Projekt końcowy.

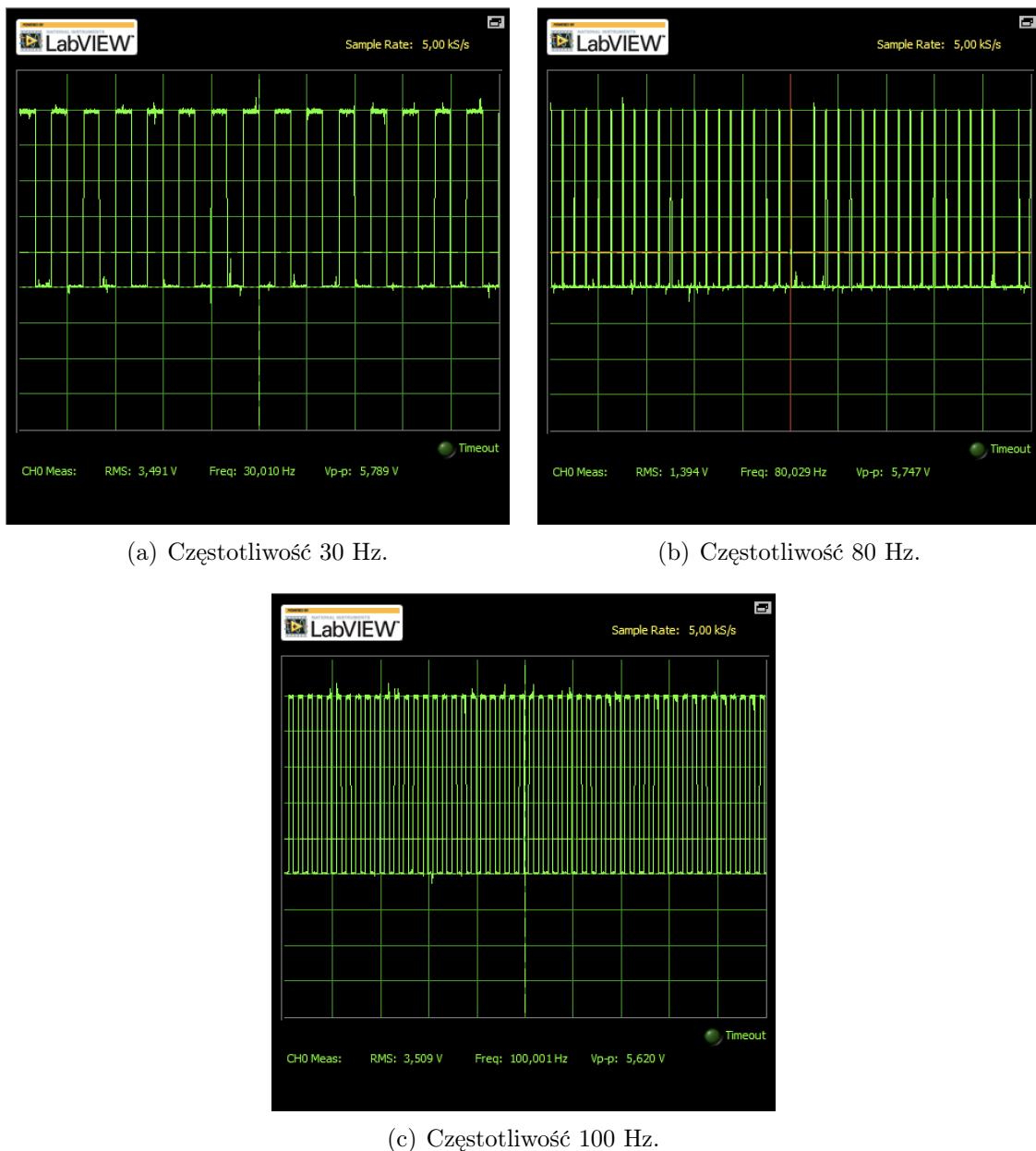
Każdy z elementów ulegał drobnym modyfikacjom, bądź poprawką, w konsekwencji był drukowany nawet 4 razy. W efekcie końcowym powstała konstrukcja umożliwiająca łatwy montaż oraz demontaż elementów, zapewniająca stabilność oraz funkcjonalność całego urządzenia, dając możliwość dokonania pomiarów, bądź wymiany znajdujących się w środku komponentów. Wszystkie pliki znajdują się na dysku autora: https://drive.google.com/drive/folders/12nDq-NvPPpbJVsM7CPCt_pBnzWoUgh?usp=sharing.

4.6 Testy urządzenia

Testowanie modułu sterującego było niezbędnym etapem weryfikacji poprawności jego działania oraz kompatybilności z całością systemu kuwety drgań. Wykorzystując oscyloskop z platformy NI ELVIS [53] przeprowadzono pomiary mające na celu ocenę parametrów pracy modułu: PWM sygnału generatora drgań, amplitudę sygnału generatora

drgań, opóźnienie w fazie sygnału diody LED względem generatora oraz szerokość wypełnienia sygnału diody LED względem generatora.

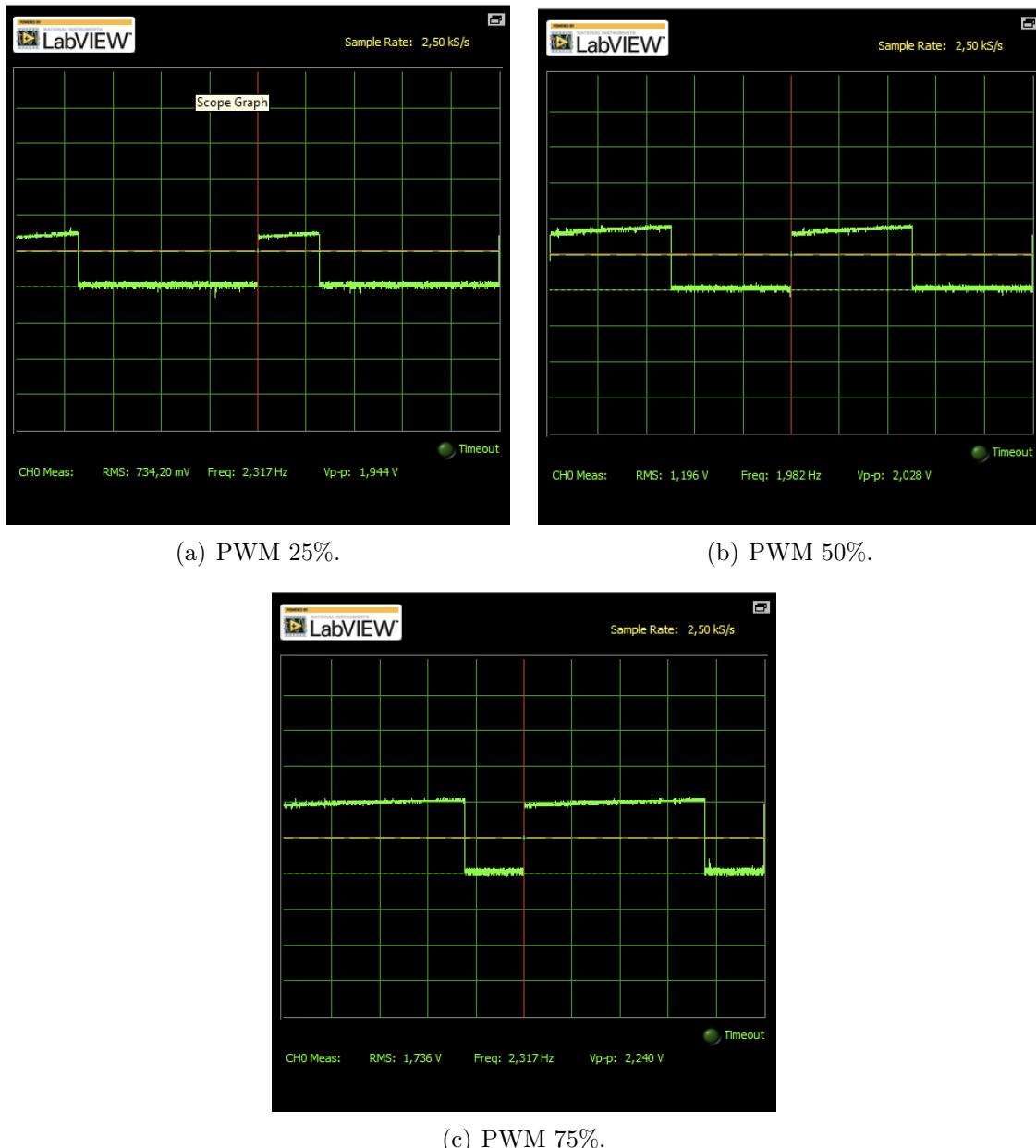
Podstawową funkcjonalnością modułu sterującego jest regulacja częstotliwości sygnału. Na rysunku 4.13 przedstawiono pomiary częstotliwości dla poszczególnych ustawień.



Rysunek 4.13: Pomiar regulacji częstotliwości generatora drgań.

Na powyższych wykresach można zaobserwować że uśredniona wartość częstotliwości **Freq** sygnału pokrywa się z zadana przez urządzenie częstotliwością. Z tego wynika, że regulacja częstotliwości działa bez problemu.

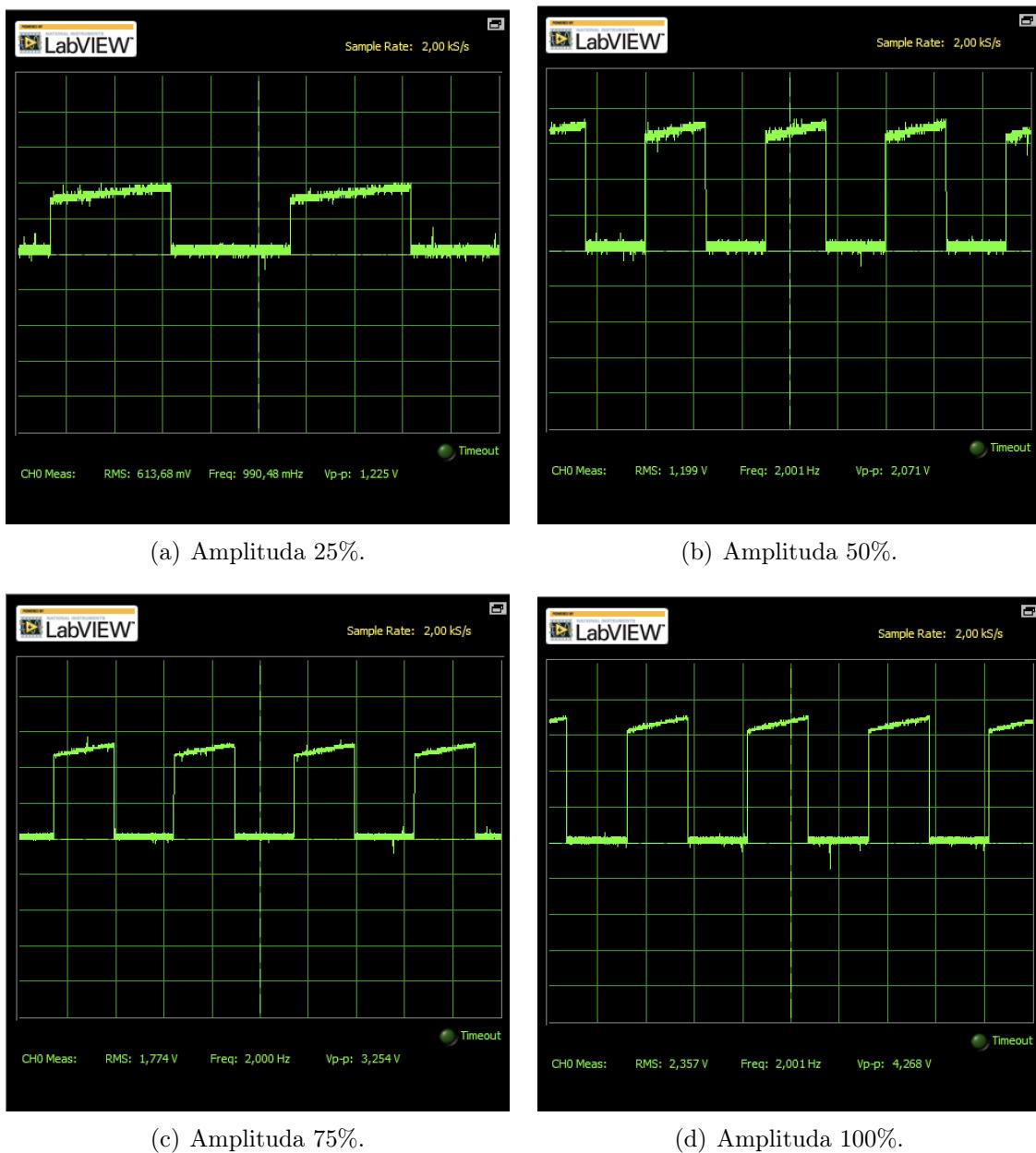
W kontekście działania generatora drgań PWM decyduje o tym, jaki będzie czas trwania stanu wysokiego względem niskiego w 1 pełnym cyklu trwania sygnału. Na rysunku 4.14 przedstawiono pomiary regulacji PWM sygnału generatora dla poszczególnych zadanego wypełnień.



Rysunek 4.14: Testy regulacji sygnału PWM generatora drgań.

Na powyższych wykresach można zaobserwować, że stosunek stanu wysokiego do niskiego odpowiada zadawanym przez moduł sterujący wartościom. Można zatem wywnioskować, że regulacja PWM działa bez zarzutu.

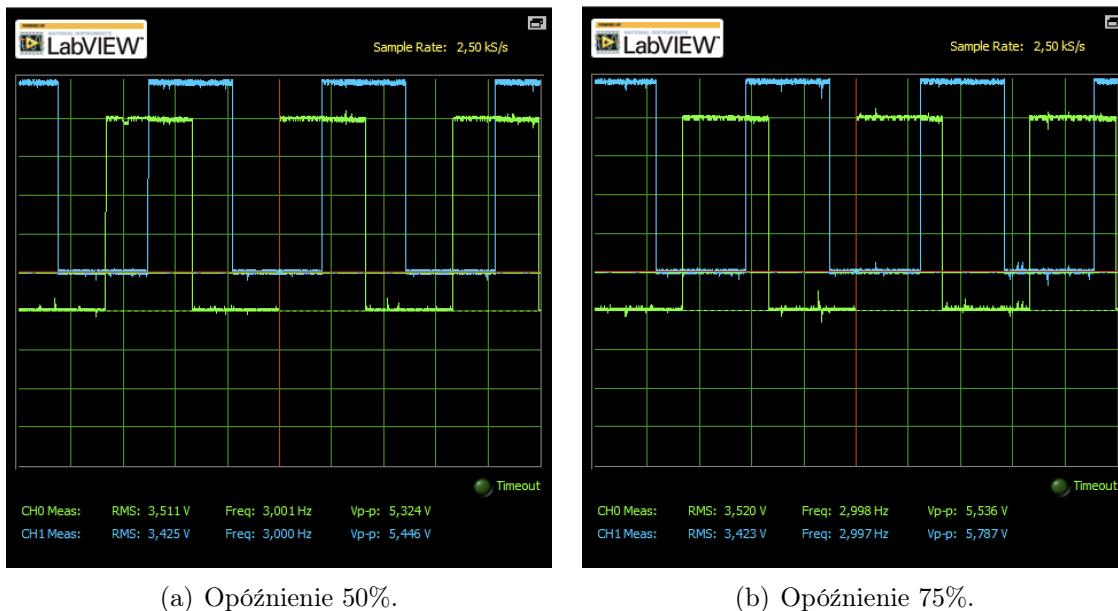
Jak było opisane w podsekcji 4.3.2, sygnał generatora drgań jest regulowany podawanym na pin D11 sygnałem PWM. Sygnał ten uśredniany jest przez filtr dolnoprzepustowy, pełniący rolę konwertera cyfrowo-analogowego, do napięcia z zakresu od 0 do 5 V. W zależności od wartości wypełnienia tego sygnału, na stan wysoki generatora podawana jest odpowiednia wartość napięcia. Na rysunku 4.15 przedstawiono pomiary regulacji amplitudy sygnału generatora dla poszczególnych ustawień.



Rysunek 4.15: Testy regulacji amplitudy sygnału generatora drgań.

Na powyższych wykresach można zaobserwować zmiany wartości napięcia peak-to-peak dla różnych wartości wypełnienia sygnału. Stosunek wartości wypełnienia PWM pokrywa się z napięciem peak-to-peak, jednak widoczne są pewne spadki napięcia, szczególnie przy 50% i 100%. Ponadto, podczas stanu wysokiego sygnał jest lekko nachylony, co sugeruje że kondensator w stanie niskim zbyt szybko się rozładowuje względem jego ładowania. Zastosowanie większego rezystora R2 (50-100 k Ω) powinno spowolnić rozładowywanie kondensatora, stabilizując sygnał.

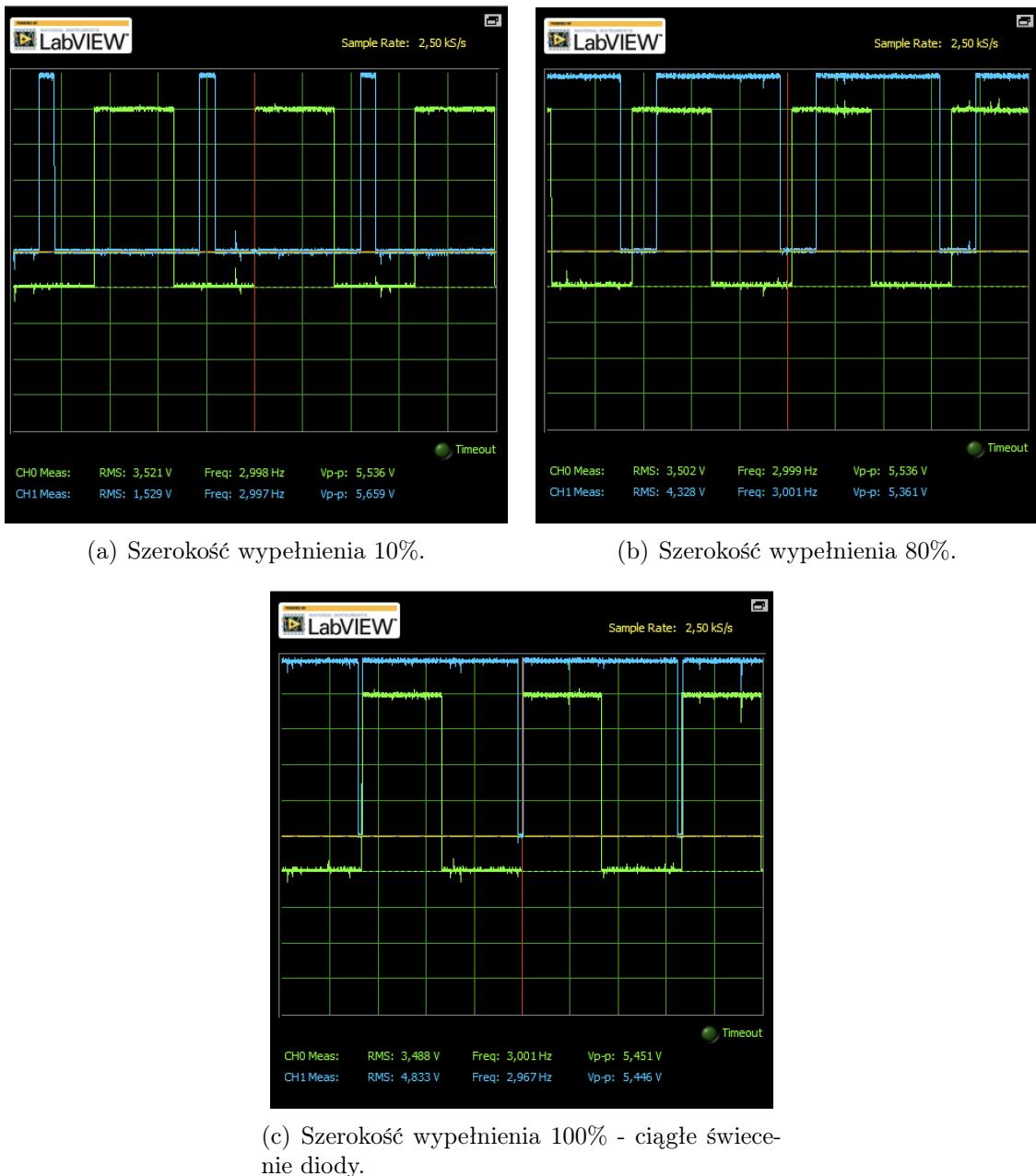
Dzięki opóźnieniu w fazie można dokładnie kontrolować moment, w którym dioda LED zaczyna świecić w cyklu drgań generatora. Pozwala to na precyzyjne dostosowanie czasu, w którym obiekt jest oświetlany, co jest niezbędne do uzyskania pożądanego efektu stroboskopowego. Na rysunku 4.16 przedstawiono pomiary regulacji opóźnienia w fazie sygnału diody LED, dla poszczególnych ustawień. Wykres zielony pokazuje przebieg sygnału generatora, a wykres niebieski zachowanie diody LED względem niego.



Rysunek 4.16: Testy regulacji opóźnienia w fazie sygnału LED wzgledem generatora.

Na powyższych wykresach można zaobserwować, że dla wartości opóźnienia 50% dioda ma stan wysoki między połową stanu wysokiego generatora a połową jego stanu niskiego, z kolei dla wartości opóźnienia 75% stan wysoki diody zaczyna się niemal pod koniec stanu wysokiego generatora. To pokazuje, że regulacja opóźnienia w fazie działa poprawnie, co jest kluczowe dla osiągnięcia efektu stroboskopowego.

Kontrolowanie szerokości wypełnienia wpływa na czas świecenia diody w każdym cyklu generatora, co pozwala na precyzyjne dostosowanie długości impulsu świetlnego do drgań generatora. Dzięki temu możliwe jest uzyskanie efektu stroboskopowego, w którym dioda LED synchronizuje się z ruchem generatora, tworząc wrażenie zamrożenia ruchu lub jego spowolnienia. Na rysunku 4.17 przedstawiono pomiary regulacji szerokości wypełnienia sygnału diody LED dla poszczególnych ustawień. Tak jak poprzednio, wykres zielony pokazuje przebieg sygnału generatora, a wykres niebieski zachowanie diody LED względem niego.



Rysunek 4.17: Pomiar regulacji szerokości wypełnienia sygnału LED względem generatora.

Na powyższych wykresach można zaobserwować, że przy szerokości wypełnienia 10%, dioda LED świeci przez 10% cyklu, a jest wyłączona przez pozostałe 90%. Przy szerokości wypełnienia 80%, dioda świeci przez 80% cyklu, a przez pozostałe 20% jest wyłączona. Dla ustawienia szerokości wypełnienia 100%, dioda świeci się ciągle, co oznacza niemalże brak przerw w jej świeceniu. Można zatem wywnioskować, że regulacja szerokości wypełnienia sygnału diody LED działa zgodnie z założeniami.

4.6.1 Integracja z kuwetą drgań

Gotowy i przetestowany moduł zamocowano na kuwecie drgań za pomocą oryginalnego mocowania, jak przedstawiono na rysunku 4.17. Obudowa umożliwia podpięcie zasilacza 9 V oraz generatora drgań. Generator drgań i dioda LED działają prawidłowo dla wszystkich ustawień parametrów.



Rysunek 4.17: Moduł sterujący z kuwetą drgań.

Rozdział 5

Podsumowanie

Celem pracy było zaprojektowanie i budowa modułu sterującego umożliwiającego prawidłowe działanie kuwety drgań wykorzystywanej do prezentacji zjawisk falowych za pomocą fal generowanych na wodzie. Zaprojektowany moduł stanowi rozszerzony o nowe funkcjonalności zamiennik oryginalnego rozwiązania. W związku z tematem pracy w części teoretycznej przedstawiono wybrane zagadnienia z fizyki fal oraz zjawisk falowych w kontekście ich prezentacji za pomocą kuwety drgań. Ponadto zamieszczono szczegółowy opis działania i budowy kuwety drgań wraz z prezentacją eksperymentów możliwych do wykonania z jej wykorzystaniem.

5.1 Zrealizowane zadania

Aby zrealizować praktyczny cel pracy, zgodnie z postawionymi założeniami projektowymi:

- dobrano odpowiednie komponenty elektroniczne,
- zaprojektowano schemat połączeń układu elektronicznego,
- zrealizowano prototyp układu elektronicznego,
- zaprogramowano urządzenie,
- zaprojektowano i wydrukowano obudowę urządzenia,
- złożono część elektroniczną oraz obudowę w kompaktową całość,
- przeprowadzono testy i integrację urządzenia z kuwetą drgań.

Komponenty elektroniczne dla modułu sterującego zostały dobrane pod kątem wymagań stawianych urządzeniu, w celu realizacji jego funkcjonalności. W szczególności dobrano odpowiednią jednostkę sterującą w postaci Arduino UNO, a także pozostałe elementy takie jak m. in. enkoder do regulacji parametrów sygnałów oraz wyświetlacz LCD do wyświetlania interfejsu użytkownika. Ponadto w projekcie elektroniki w celu zapewnienia odpowiednich parametrów pracy modułu sterującego wykorzystano szereg innych elementów takich jak wzmacniacze operacyjne czy tranzystory.

Zaprojektowano układ elektroniczny oraz zoptymalizowano połączenia. Zrealizowano prototyp układu na kompatybilnej z Arduino UNO płytce prototypowej.

Prototyp został zaprogramowany w taki sposób, aby umożliwić generowanie i regulację sygnałów oraz wyświetlać interfejs użytkownika z możliwością nawigacji i zmiany parametrów sygnałów. Wykorzystano technologię timera aby z dużą precyzją zadawać określone częstotliwości i wypełnienia sygnału oraz związane z nimi pozostałe parametry.

Obudowa została zaprojektowana oraz wydrukowana w technologii druku 3D. Podczas montażu zastosowano cienkie wkręty oraz śruby, tworząc kompaktowe urządzenie, umożliwiające precyzyjne zamocowanie na kuwecie drgań oraz podłączeni zasilania, generatora

drgań oraz komputera.

Gotowe urządzenie poddano testom, podczas których obserwowano sygnały za pomocą oscyloskopu, aby zweryfikować czy spełnia ono oczekiwane kryteria dotyczące generowanych sygnałów. W pełni działający moduł zintegrowano z dostępną w Instytucie Fizyki Doświadczalnej kuwetą drgań.

5.2 Moduł sterujący - funkcjonalności

Zaprojektowane i zbudowane urządzenie spełnia wszystkie założone funkcjonalności. W szczególności moduł sterujący, zintegrowany z kuwetą drgań pozwala na:

- regulację częstotliwości generowanych fal,
- regulację amplitudy generowanych fal,
- synchronizację świecenia diody oraz drgań (w celu uzyskania efektu stroboskopowego).

Ponadto uruchomiono także dodatkowe, względem dostępnych komercyjnie rozwiązań, funkcjonalności poszerzające możliwości sterowania sygnałami, takie jak:

- regulacja czasu trwania impulsu generatora za pomocą PWM,
- regulacja czasu włączania stroboskopu za pomocą PWM oraz opóźnienia fazowego,
- rozbudowane menu umożliwiające nawigację po poszczególnych ustawieniach i zmianę ich wartości.

Cel pracy został w pełni zrealizowany.

5.3 Dalsze możliwości rozwoju projektu

Podczas realizacji pracy powstał w pełni działający, zintegrowany z kuwetą drgań moduł sterujący. Powstałe urządzenie stanowi wersję prototypową. Dalsze działania mogłyby obejmować stworzenie dedykowanej płytki PCB na podstawie zaprojektowanego schematu połączeń oraz optymalizację kosztów realizacji urządzenia, aby zapewnić możliwość łatwego reprodukowania urządzenia na potrzeby Instytutu Fizyki Doświadczalnej. Dodatkowym udogodnieniem byłoby zastosowanie przycisku, umożliwiającego szybkie przełączanie pomiędzy efektem spowolnienia i zatrzymania fal na ekranie projekcyjnym, zamiast ręcznego ustawiania parametrów.

Powstałe urządzenie wraz z oprogramowaniem, po zaprojektowaniu pozostałych elementów mechanicznych, może stanowić podstawę do realizacji całej kuwety drgań w wersji ograniczającej koszty produkcji urządzenia lub dostosowanej do realizacji projektów studenckich.

Literatura

- [1] D. Halliday and R. Resnick. *Fizyka 1*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1998.
- [2] D. Halliday, R. Resnick, and J. Walker. *Podstawy fizyki 4*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 2005.
- [3] S. J. Ling, J. Sanny, and W. Moeb. *Fizyka dla szkół wyższych, Tom III*. OpenStax, 2018.
- [4] Z. Kąkol and J. Żukrowski. e-Fizyka. Podstawy Fizyki, 2002–2023.
[Online; dostęp: 15-paź-2023, dostępne na: <https://home.agh.edu.pl/~kakol/efizyka/w13/main13a.html>].
- [5] D. Halliday and R. Resnick. *Fizyka dla studentów nauk przyrodniczych i technicznych Tom I*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1965.
- [6] W. Moebs, S. J. Ling, and J. Sanny. *University Physics Volume 1*. OpenStax, 2016.
- [7] J. Ginter. *Fizyka fal: Fale w ośrodkach jednorodnych. Fale w ośrodkach niejednorodnych*. Wydawnictwo Naukowe PWN, 1993.
- [8] P. G. Hewitt. *Fizyka wokół nas*. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2015.
- [9] medianauka.pl. Dyfrakcja.
[Online; dostęp: 21-paź-2023, dostępne na: <https://www.medianauka.pl/dyfrakcja>].
- [10] The Physics Classroom, 1996–2023.
[Online; dostęp: 29-paź-2023, dostępne na: <https://www.physicsclassroom.com/class/waves/Lesson-3/Reflection,-Refraction,-and-Diffraction>].
- [11] D. Halliday and R. Resnick. *Fizyka Tom II*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1984.
- [12] Phet interactive simulations university of colorado.
[Online; dostęp: 5-lis-2023, dostępne na: <https://phet.colorado.edu>].
- [13] Doppler Effect Simulation.
[Online; dostęp: 14-lis-2023, dostępne na: <https://physics.bu.edu/~duffy/HTML5/doppler.html>].
- [14] Zdjęcie Kuwety Drgań na FPN Nysa.
[Online; dostęp: 17-gru-2023, dostępne na: <https://www.sklep.fpnnyssa.com.pl/p1/p/Kuweta-Drgan/2651>].

- [15] Zdjęcie Kuwety Drgań, Zestaw 2211.00 na FPN Nysa.
[Online; dostęp: 17-gru-2023, dostępne na: <https://www.sklep.fpnnyssa.com.pl/p1/p/Kuweta-drgan%2C-zestaw-2211.00/1190>].
- [16] Zdjęcie Kuwety Drgań Prostej na FPN Nysa.
[Online; dostęp: 17-gru-2023, dostępne na: <https://www.sklep.fpnnyssa.com.pl/kuweta-drgan-prosta>].
- [17] Zdjęcie Mini Kuwety Drgań na FPN Nysa.
[Online; dostęp: 17-gru-2023, dostępne na: <https://www.sklep.fpnnyssa.com.pl/mini-kuweta-drgan>].
- [18] Eurofysica. *Dokumentacja techniczna: Handleiding voor Golfbak compleet (221100)*. Frederiksen Scientific.
[Online; dostęp: 8-sty-2024, dostępne na: <https://www.eurofysica.nl/webshop/golfbak-compleet>].
- [19] W. Barholmeyczyk, G. Becker, G. v. Droste, H. Ebert, H. Franz, W. Fritz, Th. Gast, E. Goens, P. Grassmann, M. Grutzmacher, K. J. Hanssen, O. Harel, H. Herrmann, W. Hetzel, W. Hofmann, R. Jaeger, E. Kornatz, H. Korte, E. Krautz, A. Kussmann, G. Lautz, W. Leo, J. Malschmann, K. Rosenhauer, A. Schelbe, H.J. Schrader, R. Segeletz, U. Stille, R. Suhrmann, R. Taubert, R. Vieweg, S. Wagner, and G. Zicker. *Fizyka Laboratoryjna Tom II*. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1961.
- [20] D. Griffith A. Hanks, J. Hanks. *Dokumentacja techniczna: WA-9896 Ripple Generator and Light Source WA-9899 Ripple Tank System*. PASCO, 10101 Foothills Blvd, Roseville, CA 95747-7100.
[Online; dostęp: 10-sty-2024, dostępne na: https://cdn.pasco.com/product_document/012-09956A.pdf].
- [21] Oficjalna strona Arduino.
[Online; dostęp: 2-lut-2024, dostępne na: <https://www.arduino.cc/>].
- [22] Oficjalna strona Raspberry Pi.
[Online; dostęp: 2-lut-2024, dostępne na: <https://www.raspberrypi.com/>].
- [23] Oficjalna strona ESP8266.
[Online; dostęp: 2-lut-2024, dostępne na: <https://www.espressif.com/en/products/socs/esp8266>].
- [24] Oficjalna strona STM32.
[Online; dostęp: 2-lut-2024, dostępne na: <https://www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32-32-bit-arm-cortex-mcus.html>].
- [25] Oficjalna strona PIC.
[Online; dostęp: 2-lut-2024, dostępne na: <https://www.microchip.com/en-us/products/microcontrollers-and-microprocessors/8-bit-mcus/pic-mcus>].
- [26] Wprowadzenie do Arduino.
[Online; dostęp: 22-lut-2024, dostępne na: <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction>].

- [27] *Dokumentacja techniczna: Arduino Uno.*
[Online; dostęp: 25-lut-2024, dostępne na: <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000066-datasheet.pdf>].
- [28] Arduino Uno Rev3 Documentation.
[Online; dostęp: 25-lut-2024, dostępne na: <https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>].
- [29] Zdjęcie płytki prototypowej na Adafruit.
[Online; dostęp: 7-mar-2024, dostępne na: <https://www.adafruit.com/product/55>].
- [30] Zdjęcie Wyświetlacza LCD 4x20 na Botland. [Online; dostęp: 9-mar-2024, dostępne na: <https://botland.com.pl/wyswietlacz-alfanumeryczne-i-graficzne/2640-wyswietlacz-lcd-4x20-znakow-niebieski-konwerter-i2c-lcm1602-5904422331061.html>].
- [31] *Dokumentacja techniczna: PCF8574P.*
[Online; dostęp: 13-mar-2024, dostępne na: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/18213/PHILIPS/PCF8574P.html>].
- [32] Zdjęcie Enkodera Waveshare na oficjalnej stronie.
[Online; dostęp: 13-mar-2024, dostępne na: <https://www.waveshare.com/rotation-sensor.htm>].
- [33] Zdjęcie potencjometru na Aliexpress.
[Online; dostęp: 13-mar-2024, dostępne na: <https://pl.aliexpress.com/i/32681583904.html>].
- [34] Encoder Channels A and B Phase Shift.
[Online; dostęp: 23-mar-2024, dostępne na: <https://support.maxongroup.com/hc/en-us/articles/360005962273-Encoder-channels-A-and-B-phase-shift-and-direction-of-rotation>].
- [35] Zdjęcie Mini Jack Stereo na Allegro.
[Online; dostęp: 30-mar-2024, dostępne na: <https://allegro.pl/oferta/gniazdo-mini-jack-stereo-3-5mm-do-druku-obudowy-11727646372>].
- [36] Zdjęcie Rebel Star LED na Newark.
[Online; dostęp: 30-mar-2024, dostępne na: <https://www.newark.com/opulent/rebel-star-nw100/led-luxeon-rebel-star-nw100/dp/45W6393>].
- [37] Zdjęcie IRL540 na Aliexpress.
[Online; dostęp: 4-kwi-2024, dostępne na: <https://pl.aliexpress.com/item/1005003548440596.html>].
- [38] Wyprowadzenia IRL540.
[Online; dostęp: 4-kwi-2024, dostępne na: <https://enginemaniakortig.z19.web.core.windows.net/n-channel-mosfet-schematic-symbol.html>].
- [39] *Dokumentacja techniczna: IRL540.*
[Online; dostęp: 4-kwi-2024, dostępne na: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/251859/VISHAY/IRL540.html>].

- [40] Informacje o LM358 na Botland.
[Online; dostęp: 10-kwi-2024, dostępne na: <https://botland.com.pl/blog/wzmacnianie-operacyjny-lm358-smd-szczegoly-na-temat-produktu-i-przyklady-zastosowan/>].
- [41] Zdjęcie LM358 na Microscale.
[Online; dostęp: 10-kwi-2024, dostępne na: <https://www.microscale.net/products/lm358-operational-amplifier>].
- [42] Wyprowadzenia LM358.
[Online; dostęp: 10-kwi-2024, dostępne na: <https://www.electronicclinic.com/lm358-ic-pin-configuration-working-lm358-circuit-examples/>].
- [43] Zdjęcie BC547B na Amazon.
[Online; dostęp: 10-kwi-2024, dostępne na: <https://www.amazon.pl/U%C5%BCytecze-BC547B-BC547-Tranzystory-dwubiegowe/dp/B09BQ6N8N5>].
- [44] Wyprowadzenia BC547.
[Online; dostęp: 15-kwi-2024, dostępne na: <https://www.componentsinfo.com/bc547-pinout-equivalent/>].
- [45] *Dokumentacja techniczna: BC547B.*
[Online; dostęp: 10-kwi-2024, dostępne na: <https://pdf1.alldatasheet.pl/datasheet-pdf/download/11556/ONSEMI/BC547B.html>].
- [46] Zdjęcie zasilacza 9V 2A na Allegro. [Online; dostęp: 14-kwi-2024, dostępne na: <https://allegro.pl/oferta/zasilacz-9v-2a-wtyk-dc-5-5-x-2-1mm-wtyczkowy-8137446988>].
- [47] Arduino Reference.
[Online; dostęp: 13-kwi-2024, dostępna na: <https://www.arduino.cc/reference/en/>].
- [48] Arduino Timer Interrupts Guide.
[Online; dostęp: 19-kwi-2024, dostępne na: <https://deepbluembedded.com/arduino-timer-interrupts/>].
- [49] Arduino Timer Tutorial on Circuit Digest.
[Online; dostęp: 20-kwi-2024, dostępne na: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-timer-tutorial>].
- [50] Timer Calculator for Arduino.
[Online; dostęp: 19-kwi-2024, dostępne na: <https://www.arduinosllovakia.eu/application/timer-calculator>].
- [51] Arduino Tutorial on Electronoobs.
[Online; dostęp: 26-kwi-2024, dostępne na: https://electronoobs.com/eng_arduino_tut125.php].
- [52] Arduino Button: Long Press and Short Press.
[Online; dostęp: 6-maj-2024, dostępne na: <https://arduinogetstarted.com/tutorials/arduino-button-long-press-short-press>].

[53] Oficjalna strona NI ELVIS.

[Online; dostęp: 15-maj-2024, dostępne na: <https://www.ni.com/en/shop/engineering-education/engineering-lab-stations/ni-elvis-engineering-lab-workstation/what-is-ni-elvis.html>].