

**Politechnika Wrocławskaw
Wydział Elektroniki, Fotoniki i Mikrosystemów**

KIERUNEK: Elektronika (EKA)

**PRACA DYPLOMOWA
INŻYNIERSKA**

TYTUŁ PRACY:
Przenośna konsola do gier wideo

AUTOR:
Mikołaj Struzik

PROMOTOR:
dr inż. Artur Chorążyczewski

Spis treści

| | |
|--|-----------|
| 1 Wstęp | 2 |
| 1.1 Cel pracy | 2 |
| 1.2 Zakres pracy | 3 |
| 2 Historia przenośnych konsol do gier, na przykładzie serii Nintendo Game-Boy | 4 |
| 3 Raspberry Pi Zero W | 6 |
| 3.1 Specyfikacja techniczna Raspberry Pi Zero | 6 |
| 3.2 System operacyjny Recalbox OS | 7 |
| 4 Technologie | 8 |
| 4.1 Zasilanie konsoli | 8 |
| 4.1.1 Ładowanie akumulatora - algorytm CC-CV [7] | 8 |
| 4.1.2 Obwód zabezpieczający akumulator | 10 |
| 4.1.3 Przetwornica impulsowa DC-DC[10] | 11 |
| 4.2 Wyświetlacz LCD TFT | 11 |
| 4.3 Audio | 12 |
| 4.3.1 Sygnał PWM | 12 |
| 4.3.2 Filtry RC [16] | 13 |
| 5 Projekt i wykonanie konsoli | 17 |
| 5.1 Układ zasilania konsoli | 17 |
| 5.1.1 Układ ładowania [14] | 18 |
| 5.1.2 Układ zabezpieczający akumulator [11] | 18 |
| 5.1.3 Układ przetwornicy DC/DC typu step up [1] | 19 |
| 5.1.4 Kompletny układ zasilania | 20 |
| 5.2 Podłączenie wyświetlacza LCD | 20 |
| 5.3 Układ sterowania konsolą | 22 |
| 5.4 Układ audio konsoli | 25 |
| 5.5 Instalacja systemu operacyjnego Recalbox OS | 27 |
| 5.5.1 Włączenie przesyłu obrazu przez piny kompozytowe | 29 |
| 5.5.2 Włączenie przesyłu audio | 30 |
| 5.5.3 Włączenie sterowania za pomocą portów GPIO | 30 |
| 5.6 Obudowa | 31 |
| 6 Pomiary | 35 |
| 6.1 Wyniki pomiarów | 36 |
| 6.2 Wnioski | 38 |

| | |
|--|-----------|
| 7 Podsumowanie | 39 |
| Dodatki | 40 |
| A Schemat połączenia układu zasilania z Raspberry Pi Zero | 41 |
| B Schemat płytki PCB układu zasilania | 42 |
| C Schemat ideowy układu konsoli | 43 |
| Literatura | 43 |
| Spis rysunków | 45 |

Rozdział 1

Wstęp

Gry wideo są dzisiaj jedną z najbardziej dochodowych gałęzi przemysłu rozrywkowego na świecie. Ilość platform, na których mogą one być obsługiwane jest obecnie wręcz przytłaczająca. W grę komputerową można dziś bowiem zagrać zarówno na komputerze, konsoli do gier jak i na smartphonie. Na podstawie statystyk pochodzących z portalu gamesindustry.biz¹, w 2020 roku największy udział w rynku gier miały gry przeznaczone na urządzenia mobilne. Wynikać to może z tego, iż większość gier mobilnych dostępna jest do pobrania za darmo z takich serwisów jak Google Play czy App Store, jak i również z szerokiej gamy oferowanych przez te platformy tytułów, które zarabiają na siebie dzięki wewnętrznym mikropłatnościom.

Zanim jednak na rynku urządzeń mobilnych zaczęły dominować smartfony, platformami przeznaczonymi do mobilnego grania były konsole przenośne. Były to nieduże i lekkie urządzenia, mające wbudowany wyświetlacz, zasilanie akumulatorowe, przyciski służące do obsługi konsoli oraz głośniki.

Konsole przenośne przeżywają w ciągu ostatnich 5 lat swój renesans. Duża dostępność mikrokomputerów i mikrokontrolerów, mających coraz to większą moc obliczeniową, wraz z rozwojem open source'owych systemów operacyjnych emulujących retro systemy do gier wideo, sprawiły, iż pasjonaci gier i elektroniki zaczęli realizować swoje własne projekty konsol przenośnych.

Dzięki postępowi technologicznemu m. in. w branży wyświetlaczy LCD, akumulatorów i procesorów - urządzenia tworzone w dzisiejszych czasach przez hobbystów znacznie przewyższają możliwościami swoich komercyjnych poprzedników. Z racji liczby obsługiwanych retro systemów jak i samej ilości dostępnych na nie gier, projekty te cieszą się dużym zainteresowaniem i powszechnym uznaniem wśród całych społeczności graczy.

1.1 Cel pracy

Celem pracy jest przedstawienie procesu budowy przenośnej konsoli do gier wideo, uwzględniając na samym wstępie główne założenia, problemy i technologie wynikające ze specyfiki budowanego urządzenia. Następnie omówiony zostaje proces projektowania i tworzenia samego urządzenia przy wykorzystaniu wcześniej omówionych technologii i rozwiązań. Na samym końcu wykonano pomiary pobieranego przez konsolę prądu w zależności od emulowanego systemu.

¹Statystyki dostępne pod adresem: <https://www.gamesindustry.biz/articles/2020-12-21-gamesindustry-biz-presents-the-year-in-numbers-2020>

1.2 Zakres pracy

Rozdział 1 - Opisanie tematu pracy dyplomowej.

Rozdział 2 - Krótkie omówienie historii konsol przenośnych z serii Nintendo Game-Boy i ich wpływ na rynek gier wideo.

Rozdział 3 - Opis mikrokomputera Raspberry Pi Zero oraz systemu operacyjnego Recalbox OS.

Rozdział 4 - Opis rozwiązań technologicznych zastosowanych w konsoli.

Rozdział 5 - W tym rozdziale szczegółowo opisano etapy budowy konsoli oraz zastosowane w niej w sposób praktyczny rozwiązania technologiczne.

Rozdział 6 - Raport z wykonanych pomiarów poboru prądu przez konsolę w zależności od rodzaju uruchomionego systemu do gier.

Rozdział 7 - Podsumowanie zrealizowanego projektu. Zwrócenie uwagi na jego zalety oraz wady i ich wpływ na użytkowanie urządzenia.

Rozdział 2

Historia przenośnych konsol do gier, na przykładzie serii Nintendo Game-Boy

Początek wzrostu zainteresowania grami wideo datuje się na lata siedemdziesiąte XX wieku kiedy to za sprawą amerykańskiej firmy Atari, na rynku pojawiła się gra komputerowa o nazwie Pong. W owym czasie najpopularniejszym rodzajem urządzenia obsługującym gry komputerowe były automaty do gier, w związku z czym Pong sprzedawany był w postaci kompletnych automatów, które były kupowane przez właścicieli salonów gier oraz barów.

Sukces komercyjny Ponga sprawił, iż na rynku pojawiło się więcej producentów gier produkujących gry na automaty typu arcade. W związku z tym lata siedemdziesiąte XX wieku zdominowane były właśnie przez te urządzenia. Wraz ze wzrostem zainteresowania ze strony graczy, producenci zaczęli tworzyć domowe systemy gier umożliwiające granie w gry komputerowe w domu. Przykładem tego może być wcześniej już wspominana firma Atari, która w 1975 roku zdecydowała się wypuścić na rynek domową wersję Ponga, która również odniosła duży sukces[8].

Wraz ze wzrostem zainteresowania grami komputerowymi w Japonii, ówcześnie mało znana firma Nintendo upatrzyła w rynku gier wideo potencjalny zarobek. Początkowo jej działania ograniczały się jedynie do dystrybucji amerykańskich konsol na rodzimym rynku. W 1977 roku Nintendo wydało swoją pierwszą autorską konsolę - Color-TV-Game, która miała już fabrycznie zainstalowane niewymienne gry. Owe urządzenie nie odniosło jednak większego sukcesu.

Przełom nastąpił na początku lat 80, kiedy to Nintendo rozpoczęło produkcję linii przenośnych konsol do gier o nazwie Game & Watch. Urządzenie to konstrukcyjnie przypominało kalkulator. Konsola wyposażona była w ciekłokrystaliczny ekran składający się z predefiniowanych obszarów elektrodowych, odpowiednio wypełniających się ciekłym kryształem. Game & Watch obsługiwał tylko jedną prostą grę [15]. Konsola okazała się być jednak dużym sukcesem firmy co poskutkowało wydaniem na rynku kilkudziesięciu różnych modeli, różniących się pomiędzy sobą zainstalowaną grą.

Kolejnym urządzeniem wydanym w 1983 roku przez Nintendo była domowa konsola do gier o nazwie Family Computer, która znana jest poza Japonią jako Nintendo Entertainment System (NES). NES okazał się być ogromnym sukcesem zarówno w Japonii jak i w Stanach Zjednoczonych, spychając przy tym amerykańskie Atari z pozycji lidera na rynku gier. Nowo powstała konsola podobnie jak system od Atari, korzystała z wymienionych kartridzy z grami, lecz oferowała dużo lepszą grafikę i dysponowała większą mocą obliczeniową co pozwoliło na obsługę dużo bardziej zaawansowanych gier.

Pomimo tego, iż konsole stacjonarne cieszyły się większą popularnością niż konsole

przenośne, Nintendo nie zrezygnowało z rozwoju produkcji urządzeń przenośnych. Na podstawie sukcesu NES'a firma uznała, że rozwiązania zastosowane w konsolach domowych powinny być również stosowane w urządzeniach przenośnych. Pomysł konsoli przenośnej obsługującej gry zapisane na wymiennych kartridżach udało się zrealizować w 1989 roku, za sprawą wprowadzenia na rynek konsoli przenośnej Nintendo Game-Boy.

Konsola ta znacznie przewyższała możliwościami swojego poprzednika - Nintendo Game & Watch. Game-Boy wyposażony był w 2,6 calowy ekran LCD, pozwalający wyświetlać obraz w czterech odcieniach szarości. Pomimo tego, iż nowo wydane urządzenie nie było na tle konkurencji najbardziej zaawansowane technologicznie, to i tak spośród dostępnych ówcześnie konsol przenośnych na rynku, Game-Boy odniósł największy sukces. Wynikało to z ceny urządzenia, która była nawet dwukrotnie niższa od konkurencyjnej konsoli przenośnej firmy Atari - Atari Lynx oraz ze sposobu zasilania konsoli, która do działania wymagała jedynie czterech baterii AA, które były w stanie zasilać urządzenie nawet przez 10 godzin.

Następcą GameBoy'a był wprowadzony w 1998 roku Game-Boy Color, którego największym atutem był kolorowy wyświetlacz. Zwieńczeniem serii Game-Boy było wydanie w 2001 roku konsoli o nazwie Game-Boy Advance. Jak sama nazwa wskazuje było to urządzenie dużo bardziej zaawansowane od swoich poprzedników. Na rynku pojawiło się jeszcze kilka jego odświeżonych wersji, po czym firma Nintendo zadecydowała o zakończeniu serii konsol przenośnych sygnowanych nazwą Game-Boy.

Rozdział 3

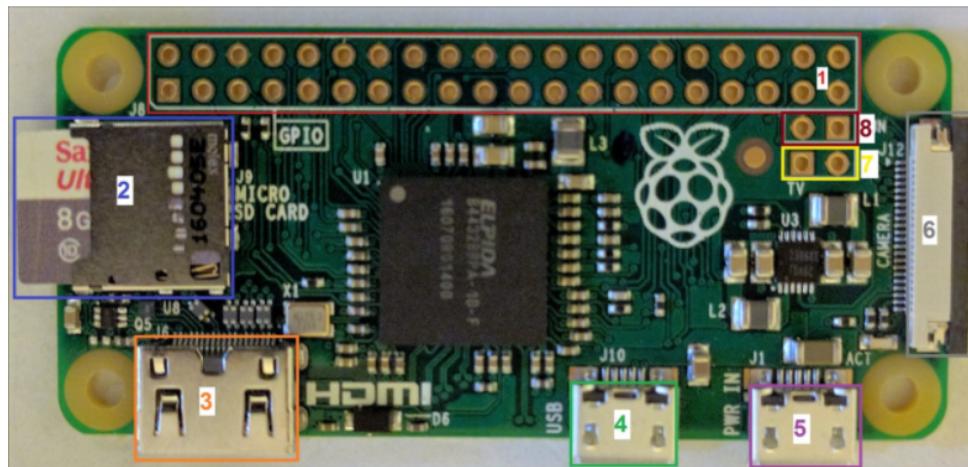
Raspberry Pi Zero W

Raspberry Pi Zero W jest jednoplątkowym komputerem (SBC). Jego niewielkie rozmiary: 65 x 30 x 5 mm, pozwalają na wykorzystanie go do realizacji niedużych projektów. Mikrokomputer posiada wszystkie interfejsy komunikacyjne występujące w komputerach klasy PC [6].

3.1 Specyfikacja techniczna Raspberry Pi Zero

Specyfikacja mikrokomputera jest następująca (w nawiasach okrągłych podano numer oznaczenia danego elementu na płytce - rysunek 3.1):

- jednordzeniowy procesor Broadcom BCM2835 ARM11 o częstotliwości taktowania 1GHz;
- pamięć RAM 512MB;
- 40 wyprowadzeń GPIO wyjścia/wejścia ogólnego przeznaczenia (1);
- gniazdo microSD (2) pozwalające na wykorzystywanie karty pamięci, która w mikrokomputerze Raspberry Pi odgrywa rolę dysku twardego. Na niej instalowany jest system operacyjny;
- port micro-HDMI w wersji 1.4 - pozwalający na przesyłanie obrazu i dźwięku (3);
- złącze micro USB OTG - umożliwiające podłączenie urządzeń peryferyjnych tj. klawiatura, mysz lub pad (4);
- gniazdo micro-USB przeznaczone do zasilania urządzenia przez zasilacz (5);
- złącze kamery CSI - pozwalające na podłączenie specjalne kamery (6);
- wyprowadzenia kompozytowe TV umożliwiające przesyłanie obrazu z pominięciem portu micro HDMI (7);
- wyprowadzenia przeznaczone do resetowania Raspberry Pi, na płytce oznaczone jako RUN (8).



Rysunek 3.1 Zdjęcie płytki Raspberry Pi Zero

źródło: Raspberry Pi Zero Cookbook, autor: Edward Snajder, dostęp 06.12.2021
<https://learning.oreilly.com/library/view/raspberry-pi-zero/9781786463852/ch01s02.html#ch01lvl2sec12>

3.2 System operacyjny Recalbox OS

Recalbox OS to darmowy, open source'owy system operacyjny przeznaczony dla rodziny mikrokomputerów Raspberry Pi. Umożliwia on emulację gier wideo na szerokiej gamie konsoli i systemów takich jak: seria Nintendo Game-Boy (modele Classic, Color, Advance), Nintendo Entertainment System (NES i SNES), ATARI 2600, PlayStation czy SEGA MegaDrive [19]. System operacyjny posiada już zainstalowane gry pochodzące od niezależnych developerów, jednakże pozwala również na instalację gier ze źródeł trzecich. Poza emulacją gier, system posiada zainstalowaną aplikację o nazwie Kodi, umożliwiającą odtwarzanie filmów, muzyki oraz zdjęć, co pozwala uczynić z mikrokomputera Raspberry Pi pełnoprawne urządzenie do odtwarzania multimedialnych.

Rozdział 4

Technologie

Poniżej omówiono rozwiązania technologiczne wykorzystane w realizacji projektu konsoli przenośnej do gier wideo. Opisane zagadnienia pokrywają takie aspekty konsoli jak: zasilanie, wyświetlanie obrazu oraz odtwarzanie dźwięku.

4.1 Zasilanie konsoli

Mikrokomputer Raspberry Pi Zero cechuje się niskim poborem energii elektrycznej. Zgodnie z dokumentacją techniczną wielkość napięcia zasilania nie powinna być większa niż 5V, natomiast natężenie prądu nie powinno przekraczać 1A [6]. Mikrokomputer domyślnie zasilany jest poprzez zasilacz sieciowy, podłączany do portu Micro-USB, który znajduje się na płytce mikrokomputera.

Niestety w urządzeniu takim jak konsola przenośna tego typu rozwiązanie przeczyłoby idei konstrukcji urządzenia, z którego można by było korzystać w dowolnym miejscu i czasie bez obaw o dostęp do sieci elektrycznej. Z tego względu podjęto decyzję o zastosowaniu zasilania baterijnego, poprzez wykorzystanie akumulatora litowo-polimerowego (li-po), którego nominalne napięcie wynosi ok. 3,7V¹.

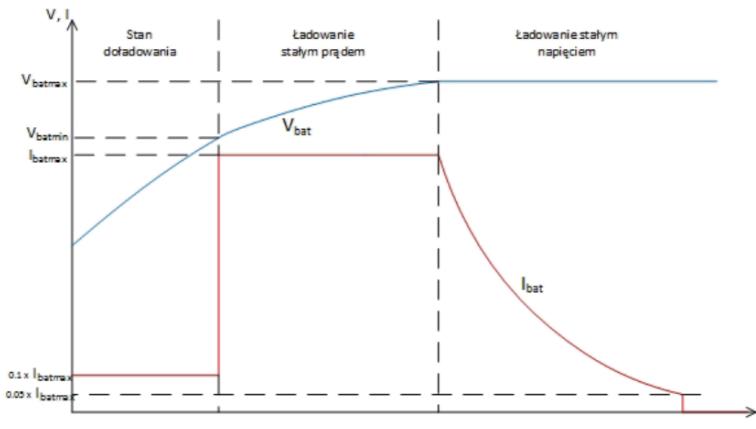
Zważywszy na specyfikę tego typu akumulatora niezbędne przy jego użyciu jest zastosowanie układu, który zabezpieczałby akumulator przed nadmiernym rozładowaniem. Dodatkowo w związku z tym, iż akumulator znajdowałby się na stałe w obudowie konsoli, urządzenie powinno posiadać układ umożliwiający jego ładowanie, a także układ zabezpieczający go przed przeładowaniem.

Przy projektowaniu układu zasilania konsoli należy również wspomnieć o zbyt niskim napięciu maksymalnym akumulatora, które wynosi jedynie 4,2V podczas, gdy mikrokomputer wymaga napięcia rzędu 5V. Z uwagi na to należy owe napięcie wyjściowe podnieść do pożąданej wartości.

4.1.1 Ładowanie akumulatora - algorytm CC-CV [7]

Z powodu typu wybranego akumulatora, układ realizujący jego ładowanie działa w oparciu o algorytm CC-CV (Constant Current - Constant Voltage z ang. stały prąd - stałe napięcie). Jest to metoda mająca zastosowanie zarówno dla ogniw litowo-jonowych (li-ion) jak i litowo-polimerowych (li-po).

¹Wartość 3,7V w przypadku akumulatorów litowo-polimerowych, jest napięciem umożliwiającym ich bezpieczne magazynowanie. Tak naprawdę, w pełni naładowany akumulator posiada maksymalne napięcie wynoszące około 4,2V.



Rysunek 4.1 Proces ładowania CC-CV

źródło: "Układ Ładowania Akumulatorów Litowo-Jonowych Zasilany z Paneli Fotowoltaicznych Przeznaczony Dla Pojazdów Elektrycznych", autor: Paweł Wiatr, Arkadiusz Kryński, na licencji CC, dostęp 08.12.2021

<https://iel.lukasiewicz.gov.pl/pliki/ogolne/prace%20IEL/273/13.pdf>

Algorytm CC-CV składa się z kolejno następujących po sobie etapów: Precharge (stan doładowania - etap opcjonalny wystepujący jedynie w przypadku rozładowania akumulatora poniżej napięcia progowego V_{min} , zapewniającego jego poprawne funkcjonowanie), Constant Current (etap ładowania prądem stałym) i Constant Voltage (etap ładowania stałym napięciem).

W celu wyjaśnienia algorytmu CC-CV posłużono się wykresem charakterystyki prądowo czasowej i napięciowo czasowej obrazującą zmiany napięcia i natężenia w poszczególnych etapach procesu ładowania 4.1.

W procesie ładowania CC-CV istotnym parametrem jest maksymalny prąd ładowania akumulatora (na rysunku 4.1 oznaczony jako I_{batmax}). Prąd ten określany jest w zależności od całkowitej pojemności ładowanego ogniw i typowo wynosi on około 1/2 jego pojemności. Przykładowo stosując akumulator o pojemności nominalnej równej 1000mAh natężenie z jakim powinno się ładować ogniwko wynosić powinno około 500mA². Pomiając etap doładowania akumulatora, który jest jedynie etapem opcjonalnym (zostanie on omówiony na końcu podrozdziału), proces ładowania ogniw rozpoczęta się od etapu ładowania prądem stałym.

Etap CC rozpoczyna się w momencie, w którym na akumulatorze znajduje się napięcie V_{batmin} , którego wartość mieści się w zależności od ogniw, w przedziale od 2,7V do 3V. Od tego momentu akumulator ładowany jest prądem stałym I_{batmax} podczas, gdy w międzyczasie narasta napięcie ładowania. Prąd utrzymuje stałą wartość natężenia do momentu, w którym napięcie ogniw osiągnie wartość wynoszącą około 4,2V, oznaczoną na rysunku 4.1 jako V_{batmax} .

Po osiągnięciu takiej wysokości napięcia, układ ładowania akumulatora przechodzi do etapu ładowania napięciem stałym. W trakcie trwania CV układ ładowania zachowuje się w sposób podobny do działania liniowego stabilizatora napięcia, utrzymując jego wartość na poziomie 4,2V. Podczas utrzymywania się napięcia stałego, natężenie prądu ładowania zaczyna spadać. W momencie, w którym natężenie osiągnie wartość wynoszącą około 5% maksymalnego prądu ładowania (I_{batmax}), ładowanie ogniw zostaje zakończone.

²Wartość prądu ładowania (jeżeli wskazuje na to dokumentacja) może być wyższa i być równa np. 1C, czyli całą pojemność akumulatora. Wartość podana w tekście jest wartością typową.

Etap doładowania akumulatora (Precharge) ma miejsce jedynie wtedy, gdy napięcie znajdujące się na akumulatorze jest niższe od napięcia zapewniającego jego poprawne działanie (ang. cutoff voltage - oznaczone na rysunku 4.1 jako V_{batmin}). Wartość tego napięcia można odczytać z dokumentacji technicznej ogniw, zwykle wynosi ono od 2,7V do 3V.

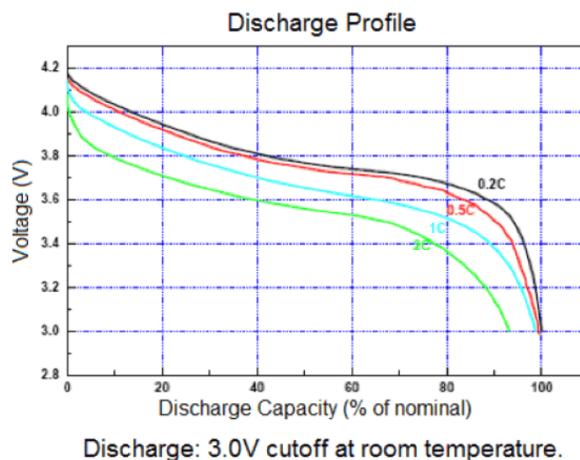
Akumulator, którego napięcie znajduje się poniżej napięcia V_{batmin} jest całkowicie rozładowany tzn. nie nadaje się on do dalszego użytku nawet jeżeli napięcie, które na nim panuje byłoby dostatecznie wysokie aby zasilić dany układ. W związku z tym ogniwie nie może być od razu ładowane przy pomocy maksymalnego prądu ładowania, ponieważ doprowadziły to do uszkodzenia akumulatora.

Z tego powodu ogniwu ładowane jest na tym etapie prądem o natężeniu wynoszącym od 10% do 20% maksymalnego prądu ładowania I_{batmax} . Tak jak wcześniej podano przykładowe maksymalne natężenie ładowania wynoszące 500mA, tak w etapie doładowania akumulatora natężenie powinno mieścić się w zakresie od 50mA do 100mA. Proces Precharge przechodzi do fazy CC dopiero, gdy napięcie na akumulatorze osiągnie wartość V_{batmin} .

4.1.2 Obwód zabezpieczający akumulator

Obwód zabezpieczający akumulator ma na celu chronić ogniwę przed jego uszkodzeniem oraz zmniejszaniem się jego żywotności. Zjawiskami mogącymi wpływać w negatywny sposób na akumulator są: nadmierne rozładowanie ogniw, przeładowanie czy też powstanie na jego wyjściu zwarcia [12].

Nadmierne rozładowanie to zjawisko, które występuje w momencie, gdy napięcie akumulatora w trakcie rozładowywania spada do wartości niższej niż napięcie V_{batmin} . Następuje wtedy nagły spadek pojemności ogniw, co skutkować może jego uszkodzeniem. Na wykresie 4.2 zobrazowano krzywe rozładowania akumulatora litowo-polimerowego w zależności od temperatury otoczenia. Z wykresu jednoznacznie wynika iż napięcie przy, którym należy wyłączyć ogniwę z obwodu wynosić powinno około 3V.



Rysunek 4.2 Krzywe rozładowywania akumulatora li-po w zależności od zmiany temperatury otoczenia

źródło: Stackexchange, autor nieznany, na licencji CC, dostęp 26 lipca 2022

<https://electronics.stackexchange.com/questions/32321/lipoly-battery-when-to-stop-draining>

Kolejnym zagrożeniem, na które należy zwrócić uwagę jest zjawisko przeładowania

akumulatora. Powołując się na algorytm ładowania CC-CV, maksymalna wartość napięcia ładowania nie powinna przekraczać wartości V_{batmax} podanej w dokumentacji akumulatora [3]. Napięcie ładowania wyższe od maksymalnej dopuszczalnej wartości, również mogłoby uszkodzić ogniw. W związku z tym układ ładowania powinien być wyposażony w obwód zapobiegający wystąpieniu takiej sytuacji.

4.1.3 Przetwornica impulsowa DC-DC[10]

Przetwornice to układy przeznaczone do konwersji napięcia stałego. Jedną z zalet przetwornic impulsowych jest podnoszenie napięcia wyjściowego. Układy te charakteryzuje wysoka sprawność w odróżnieniu od stabilizatorów liniowych. Zasada działania przetwornic impulsowych oparta jest na zjawisku samoindukcji.

Jednym z elementów znajdujących się w układzie przetwornicy jest induktor. W trakcie działania układu, przez induktor przepływa prąd, w wyniku czego powstaje wokół niego pole magnetyczne. Następnie induktor zostaje wyłączony z układu. W momencie przerwania obwodu prąd przestaje płynąć, co skutkuje powstaniem na zaciskach induktora napięcia określonego jako napięcie samoindukcji.

Napięcie samoindukcji stara się podtrzymać przepływ prądu przez induktor. Umiejscowienie induktora w taki sposób, że napięcie samoindukcji dodaje się do napięcia zasilającego przetwornicę, skutkuje powstaniem przetwornicy podwyższającej napięcie (przetwornicy typu step up). Natomiast jeżeli induktor będzie się znajdować w takim miejscu, że napięcie samoindukcji będzie się odejmowało od napięcia zasilania przetwornicy, to otrzymana zostanie przetwornica obniżająca napięcie (przetwornica step down).

Poprzez kontrolowanie czasu przerwania obwodu oraz natężenia prądu płynącego przez induktor, reguluje się wysokość napięcia samoindukcji. Po pewnym czasie energia wraz z napięciem samoindukcji zanika dlatego przerwania wykonywane są cyklicznie.

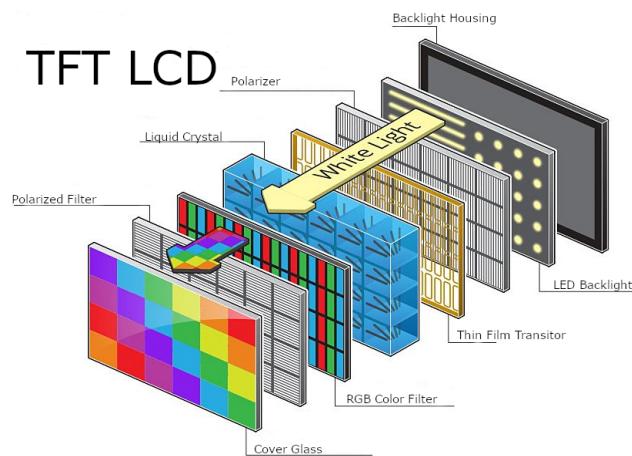
4.2 Wyświetlacz LCD TFT

Wyświetlacze ciekłokrystaliczne (wyświetlacze LCD) działają w oparciu o wykorzystanie ciekłych kryształów i polaryzatorów. Ciekły kryształ to substancja posiadająca cechy zarówno kryształu jak i cieczy. Jej struktura zbudowana jest z cząsteczek, które są częściowo uporządkowane oraz częściowo swobodne. Dzięki swojej strukturze ciekły kryształ posiada umiejętność porządkowania kierunku drgań fali światła, co oznacza, że potrafi on polaryzować światło [4].

Polaryzatory, które również wchodzą w skład wyświetlaczów ciekłokrystalicznych, są urządzeniami przepuszczającymi światło o określonej polaryzacji co oznacza, że przez polaryzator przechodzi fala elektromagnetyczna światła o odpowiedniej orientacji w przestrzeni. Matryce LCD ze względu na sposób wyświetlania obrazu, dzielą się na dwie główne kategorie: pasywne i aktywne.

Ekrany LCD TFT należą do grupy wyświetlaczów aktywnych. Zbudowane są one w oparciu o zastosowanie cienkowarstwowych tranzystorów unipolarnych [2]. W matrycach tego typu każdy piksel sterowany jest przy pomocy czterech tranzystorów. Jeden z nich kontroluje jasność wyświetlonego piksela, podczas gdy pozostałe trzy odpowiadają za emitowanie podstawowych barw [20].

Dzięki zastosowaniu takiego rozwiązania wyświetlacze LCD TFT są w stanie osiągać wysokie rozdzielczości, optymalną ostrość obrazu oraz krótki czas przełączania pikseli. Etapy działania oraz strukturę wyświetlacza LCD TFT zobrazowano na rysunku 4.3.



Rysunek 4.3 Struktura wyświetlacza TFT LCD

źródło: American Optronics Inc, dostęp 09.12.2021, autor: AOI Engineering
<https://aoi-display.com/AOI/tft-technology/>

Z tyłu wyświetlacza znajduje się źródło światła będące jego podświetleniem (ang. backlight). W pierwszej kolejności światło białe przechodzi przez polaryzator co skutkuje tym, że tylko jego część przechodzi dalej.

Pozostałe światło przechodzi przez szkalaną warstwę tranzystorów cienkowarstwowych (Thin Film Transistor) i trafia na ciekły kryształ. W zależności od ułożenia molekuł, ciekły kryształ polaryzuje światło (fala światła ulega skręceniu lub też nie).

O tym czy fala światła przejdzie czy nie przejdzie przez układ wyświetlacza, decyduje jak skręcone będą cząsteczki ciekłego kryształu, to natomiast uzależnione jest od napięcia pomiędzy elektrodami.

Wyświetlacz podzielony jest na małe pola zwane pikselami. To właśnie z pikseli powstaje obraz. Kolorowy obraz uzyskiwany jest poprzez dodanie barwnych filtrów RGB, które zmieniają kolor przechodzącego światła na kolory odpowiednio: czerwony, zielony i niebieski. Światło po przejściu przez filtry miesza się i powstają różne kolory dzięki czemu powstaje obraz.

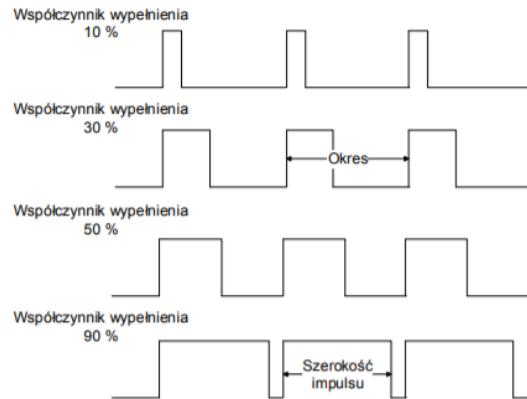
4.3 Audio

Raspberry Pi Zero W w odróżnieniu od reszty modeli mikrokomputerów z serii Raspberry Pi, nie posiada wyjścia 3,5mm Jack, odpowiadającego za przesył dźwięku z urządzenia. Z tego powodu sygnał audio w Raspberry Pi Zero można uzyskać tylko za pomocą portów GPIO13 i GPIO18, które uprzednio należy skonfigurować w taki sposób aby dźwięk emitowany był w postaci sygnału PWM.

Należy również wspomnieć o tym, że sygnał PWM pochodzący z mikrokomputera jest mocno przesterowany. W związku z tym w celu uzyskania akceptowalnej jakości dźwięku, należy go w odpowiedni sposób przefiltrować.

4.3.1 Sygnał PWM

Modulacja szerokością impulsu (z ang. Pulse Width Modulation, w skrócie PWM) to metoda sterowania polegająca na zmianie wartości wypełnienia impulsów o charakterystyce prostokątnej, przy stałej częstotliwości sygnału[13].



Rysunek 4.4 Zmiana współczynnika wypełnienia w sygnale PWM
źródło: [13], Dostęp: 09.12.2021

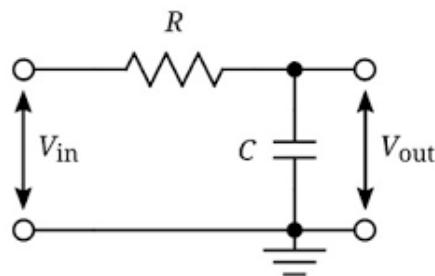
Inaczej mówiąc, jest to cykliczne przełączanie sygnału np. napięcia, ze stanu wysokiego do stanu niskiego, co skutkuje powstaniem sygnału prostokątnego. Przebiegi czasowe modulacji szerokościowej impulsu przedstawiono na rysunku 4.4. Stosunek czasu trwania stanu wysokiego do okresu sygnału określany jest mianem współczynnika wypełnienia sygnału.

4.3.2 Filtry RC [16]

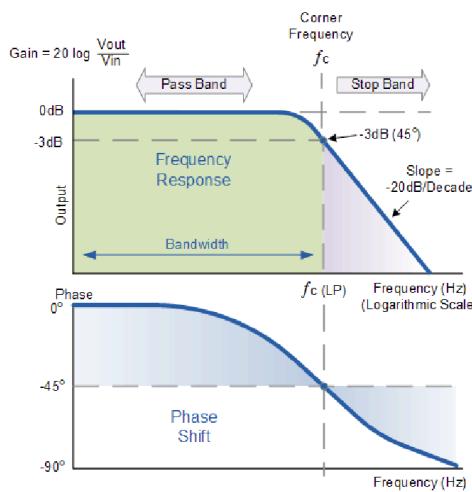
Filtr RC to układy elektroniczne zależne od częstotliwości, składające się z rezystorów i kondensatorów. Dzięki temu, iż impedancja kondensatora zależy od częstotliwości, układy filtrów RC posiadają umiejętność przepuszczania sygnałów o wskazanych częstotliwościach, a także umiejętność tłumienia sygnałów o częstotliwościach niepożądanych.

Filtr dolnoprzepustowy [21]

Filtr dolnoprzepustowy jest układem przenoszącym bez zmian niskie częstotliwości oraz tłumiącym częstotliwości wyższe, powodując przy tym opóźnienie ich faz. Poniżej znajduje się przykładowy schemat filtru dolnoprzepustowego - rysunek 4.5.



Rysunek 4.5 Przykładowy schemat filtru dolnoprzepustowego
źródło: ECStudio, autor nieznany, na licencji CC, dostęp 10.12.2021
<https://ecstudiosystems.com/discover/textbooks/basic-electronics/filters/passive-low-pass-filter/>



Rysunek 4.6 Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtru dolnoprzepustowego

źródło: electronics-tutorials.ws, autor nieznany, na licencji CC, dostęp 10.12.2021,
https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_2.html

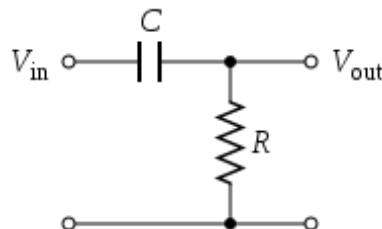
Filtr dolnoprzepustowy działa w następujący sposób - przez rezystor, który jest szeregowo włączony między wejściem a wyjściem filtra, może płynąć prąd, zarówno stały jak i zmienny. Z kolei przez kondensator, będący szeregowo podłączony do masy przechodzi jedynie prąd zmienny - dla prądu stałego stanowi on rozwarcie [9].

Częstotliwość, dla której filtr dolnoprzepustowy rozpoczyna swoje działanie określana jest mianem częstotliwości granicznej filtru. Obliczana jest ona na podstawie rezystancji użytego rezystora R i pojemności wykorzystanego kondensatora C . Częstotliwość graniczna opisana jest wzorem: $f_g = \frac{1}{2\pi R C}$. Na rysunku 4.6 zamieszczono charakterystykę amplitudową i fazową dla filtru dolnoprzepustowego.

Filtr górnoprzepustowy [21]

Filtr górnoprzepustowy jest układem, który przepuszcza bez zmian częstotliwości, będące wyższe od częstotliwości granicznej, natomiast tłumieniu i wyprzedzeniu fazy podlegają częstotliwości niższe od częstotliwości granicznej. Filtr górnoprzepustowy w budowie różni się umiejscowieniem kondensatora między wejściem a wyjściem filtra oraz rezystorem podłączonym szeregowo do masy.

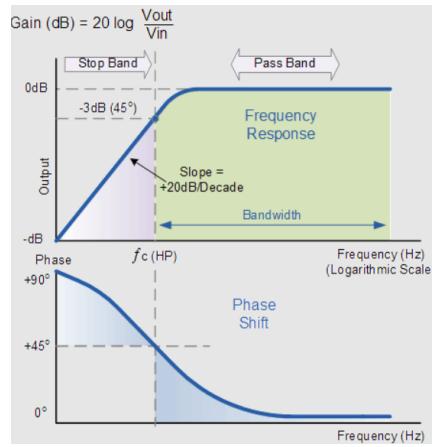
Schemat przykładowego filtru górnoprzepustowego pokazano na rysunku 4.7. Częstotliwość graniczna obliczana jest w dokładnie taki sam sposób jak w przypadku filtru dolnoprzepustowego.



Rysunek 4.7 Schemat przykładowego filtru górnoprzepustowego

źródło: Wikipedia, autor nieznany, na licencji CC, dostęp 10.12.2021
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/f/fe/High_pass_filter.svg/210px-High_pass_filter.svg.png

Poniżej na rysunku 4.8 zamieszczono charakterystyki amplitudowe i fazowe dla filtra górnoprzepustowego.



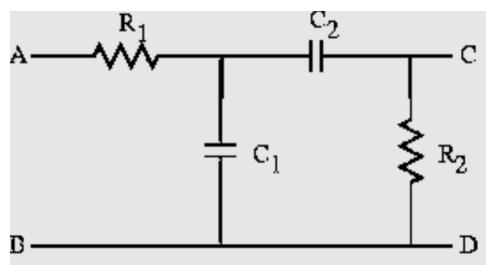
Rysunek 4.8 Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtra górnoprzepustowego

źródło: electronics-tutorials, autor nieznany, na licencji CC, dostęp 10.12.2021

https://www.electronics-tutorials.ws/filter/filter_3.html

Filtr pasmowoprzepustowy [21]

Filtr pasmowoprzepustowy powstaje poprzez kaskadowe połączenie ze sobą filtru dolnoprzepustowego z filtrem górnoprzepustowym. Tego rodzaju filtr tłumii częstotliwości niskie i wysokie, natomiast przepuszcza częstotliwości średnie znajdujące się pomiędzy częstotliwościami niskimi i wysokimi. Na rysunku 4.9 zaprezentowano przykładowy schemat filtru pasmowoprzepustowego.



Rysunek 4.9 Przykładowy schemat filtru pasmowoprzepustowego

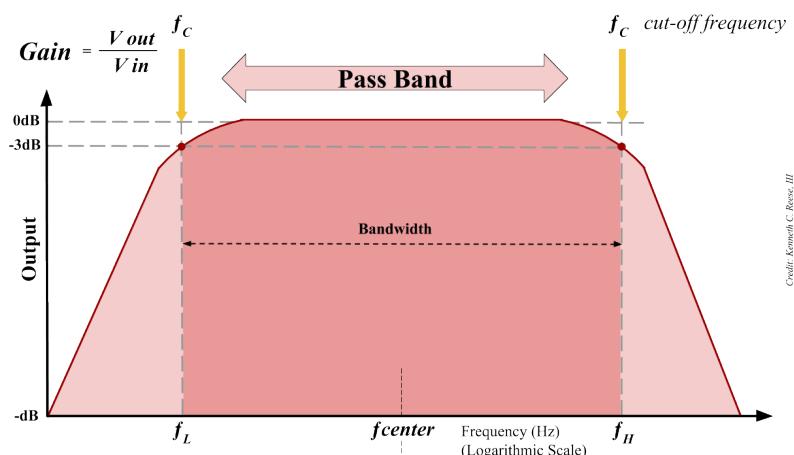
źródło: piclist.com, autor Doug Gingrich, na licencji CC, dostęp 10.12.2021

<http://www.piclist.com/images/ca/ualberta/phys/www/~gingrich/phys395/notes/node48.html>

Na rysunku 4.10 przedstawiono charakterystykę amplitudową i fazową filtru. Analizując wykres można zauważać, iż pasmo przenoszenia (ang. pass band) określone jest poprzez częstotliwość graniczną dolną (f_L) i częstotliwość graniczną górną (f_H).

Częstotliwości te występują w momencie spadku wzmacnienia filtru o 3dB. Wzór na owe częstotliwości jest taki sam jak na wcześniej omówione częstotliwości graniczne dla filtra górnoprzepustowego i dolnoprzepustowego. Zgodnie z oznaczeniami elementów na rysunku 4.9, wzory opisujące częstotliwości graniczne f_L i f_H są następujące: $f_L = \frac{1}{2\pi R_1 C_1}$, $f_H = \frac{1}{2\pi R_2 C_2}$.

Częstotliwość średnia (na rysunku 4.10 opisana jako f_{center}) obliczana jest zgodnie z zależnością: $f_{center} = \sqrt{f_L * f_H}$. Szerokość pasma przepustowego (BW) jest, natomiast równa różnicy pomiędzy częstotliwościami f_H i f_L : $BW = f_H - f_L$.



Rysunek 4.10 Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtru pasmowoprzepustowego

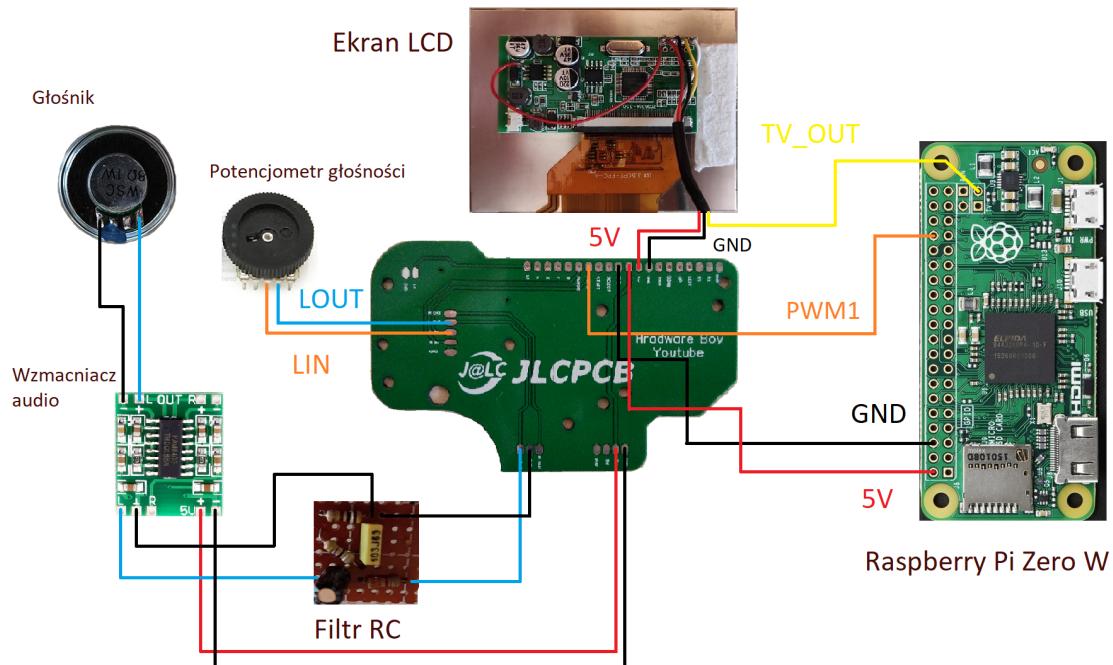
źródło: Analog IC Tips, autor Kenneth C. Reese, III, na licencji CC, dostęp 10.12.2021

<https://www.analogictips.com/basics-of-bandpass-filters/>

Rozdział 5

Projekt i wykonanie konsoli

Na podstawie omówionych wcześniej rozwiązań technologicznych, podjęto realizację projektu wykonania konsoli przenośnej do gier wideo. Poniższy tekst opisuje proces tworzenia konsoli krok po kroku, wyjaśniając poszczególne aspekty i zasady działania poszczególnych obwodów zastosowanych w urządzeniu. Schemat podłączenia poszczególnych komponentów konsoli z mikrokomputerem Raspberry Pi zamieszczono na rysunku 5.1, natomiast kompletny schemat ideowy konsoli zamieszczono w Dodatku C na rysunku C.1.



Rysunek 5.1 Sposób podłączenia płytki PCB z Raspberry Pi wraz z pozostałymi elementami wsparcia konsoli.

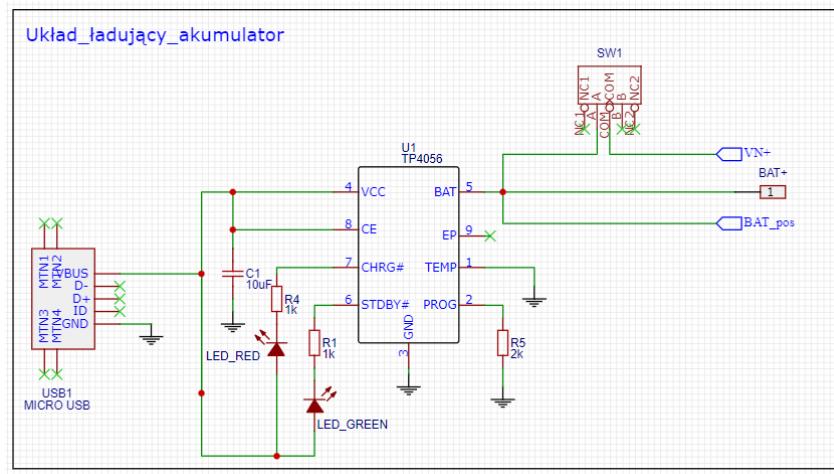
5.1 Układ zasilania konsoli

Na podstawie postawionych w rozdziale 4. problemów i technologii służących ich rozwiązaniu, podjęto decyzję o wykorzystaniu układu zasilania składającego się z: układu ładującego i zabezpieczającego akumulator oraz przetwornicy impulsowej DC-DC typu

step up podwyższającej napięcie wyjściowe ¹.

Akumulator li-po o pojemności nominalnej 1500mAh, został wybrany jako źródło zasilania konsoli.

5.1.1 Układ ładowania [14]



Rysunek 5.2 Schemat ideowy obwodu realizującego ładowanie akumulatora

Układ ładowania powstał w oparciu o zastosowanie układu scalonego TP4056, będącego układem ładowarki liniowej, pojedynczych ogniw typu li-ion i li-po. Schemat znajdujący się na rysunku 5.2 jest domyślną aplikacją układu TP4056, pochodząca z jego dokumentacji technicznej. O wyborze akurat tego układu zadecydowały takie parametry jak: maksymalne napięcie ładowania - wynoszące 4,2V oraz maksymalny prąd ładowania równy 1A. Dodatkową zaletą wykorzystanego układu jest możliwość podłączenia go do sieci przez wejście micro-USB.

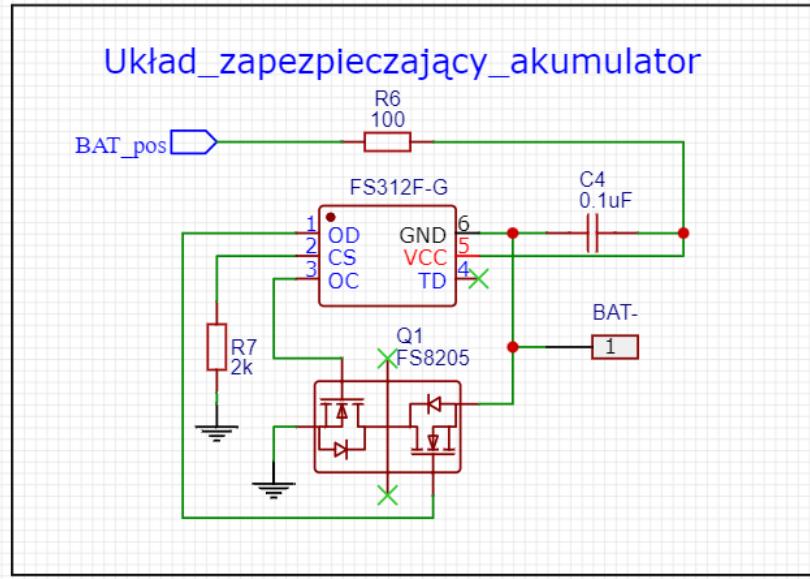
Dzięki zastosowaniu diod LED czerwonej i zielonej, użytkownik ładowarki informowany jest o stanie procesu ładowania. W momencie, gdy świeci się czerwona dioda LED, trwa proces ładowania akumulatora. O naładowaniu akumulatora informuje użytkownika zaświecenie się zielonej diody LED. Jedynym elementem jaki należało w tym układzie dobrać, był rezystor R_{prog} (na rysunku 5.2 oznaczony jako R5), którego wartość reguluje wielkość natężenia prądu ładowania.

Zgodnie z tabelą rezystancji Rprog, zawartą w dokumentacji układu, zdecydowano się na zastosowanie rezystora o rezystancji $2\text{k}\Omega$. Taka rezystancja pozwala na uzyskanie natężenia prądu ładowania równego 580mA. Wartość ta mogłaby być większa z uwagi na fakt, iż jest to mniej niż połowa nominalnej pojemności użytego w tym projekcie akumulatora, jednak w zupełności jest ona wystarczająca do jego poprawnego ładowania.

5.1.2 Układ zabezpieczający akumulator [11]

Układ zabezpieczający akumulator zbudowano w oparciu o układ scalony FS312F-G. Jak można przeczytać w dokumentacji, jest to układ scalony zabezpieczający jednocołowe

¹Projekt układu zasilania oraz płytę PCB zrealizowano na podstawie projektu autorstwa GreatScott. Projekt płytki PCB zaczerpnięty z linku udostępnionego przez autora: <https://www.instructables.com/DIY-LiPo-ChargeProtect5V-Boost-Circuit/>



Rysunek 5.3 Schemat ideowy obwodu zabezpieczającego akumulator

akumulatory li-ion i li-po przed uszkodzeniem i spadkiem ich żywotności, wynikającymi z takich zjawisk jak: nadmierne rozładowanie, przeładowanie oraz przetężenie lub zwarcie.

O wykorzystaniu akurat tego układu zadecydowały takie parametry jak: napięcie detekcji nadmiernego rozładowania - wynoszące $2,9V \pm 0,080V$ oraz napięcie detekcji przeładowania akumulatora, równe $4,250V \pm 0,025V$. Uzupełnieniem układu zabezpieczającego akumulator były dwa tranzystory polowe typu MOSFET, zaaplikowane w postaci układu scalonego FS8205. O wybraniu tego układu zadecydowało niskie napięcie progowe otwarcia bramki tranzystora, którego wartość minimalna wynosi $0,45V$.

5.1.3 Układ przetwornicy DC/DC typu step up [1]

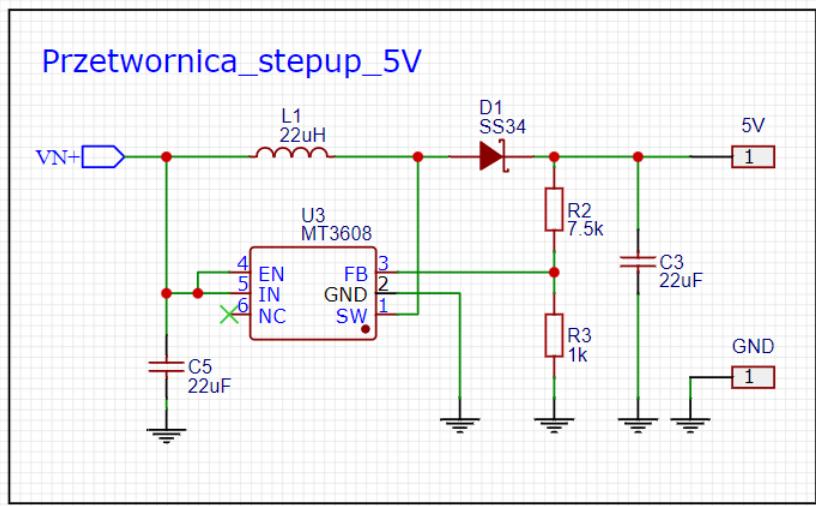
W celu podniesienia wartości napięcia wyjściowego do 5V, przy jednoczesnym zachowaniu stabilności napięcia zasilania, zbudowano układ przetwornicy impulsowej DC/DC step up w oparciu o układ scalony MT3608.

Podane w dokumentacji technicznej układu parametry w zupełności spełniają założenia projektowe zasilania budowanej konsoli. Do najistotniejszych z nich należy włączyć: zakres napięć wejściowych wynoszący od 2V do 24V, maksymalne napięcie wyjściowe równe około 28V, wysoka sprawność sięgająca nawet do 97% oraz niewielkie rozmiary kompletnego układu przetwornicy.

Dobór elementów układu przetwornicy, podyktowany został dokumentacją techniczną układu MT3608. Najistotniejszym z nich było zastosowanie dzielnika napięcia, podłączonego do wyprowadzenia FB z układu scalonego MT3608. Stosując wzór zaczerpnięty z dokumentacji i dostosowując go do oznaczeń na schemacie - rysunek 5.4, otrzymano następującą zależność: $V_{out} = V_{ref} \cdot (1 + \frac{R_2}{R_3})$.

Zakładając wielkość napięcia V_{out} wynoszącą ok. 5V, wartość rezystora $R_3 = 1k\Omega$ oraz napięcie referencyjne, które na podstawie dokumentacji jest równe: $V_{ref} = 0,6V$, obliczono wartość rezystora R2 wynoszącą w przybliżeniu $7,3k\Omega$.

Rezystor o wartości najbliższej $7,3k\Omega$, zamkniętym w obudowie 0603, okazał się być rezystorem o nominalnej wartości rezystancji wynoszącej $7,5k\Omega$. W związku z tym taki właśnie rezistor zastosowano. Takie działanie dało w wyniku powstanie napięcia wyjściowego



Rysunek 5.4 Schemat ideowy układu przetwornicy step up

z przetwornicy wynoszące ok. 5,1V.

Jest to wartość dopuszczalna do zasilania mikrokomputera Raspberry Pi Zero, biorąc pod uwagę fakt, iż dodatkowo na płytce mikrokomputera mieści się przetwornica typu step down (układ scalony PAM2306), która obniża napięcie zasilania do zalecanej wartości 5V.

Następnym elementem układu, który należało dobrać, była dioda Schottky'ego z uwagi na swój niski czas przełączania i wysoką stabilność przy pracy w dużych częstotliwościach. Pozostałe elementy - induktor oraz kondensatory, miały w dokumentacji dokładnie podane rekomendowane przez producenta układu wartości.

5.1.4 Kompletny układ zasilania

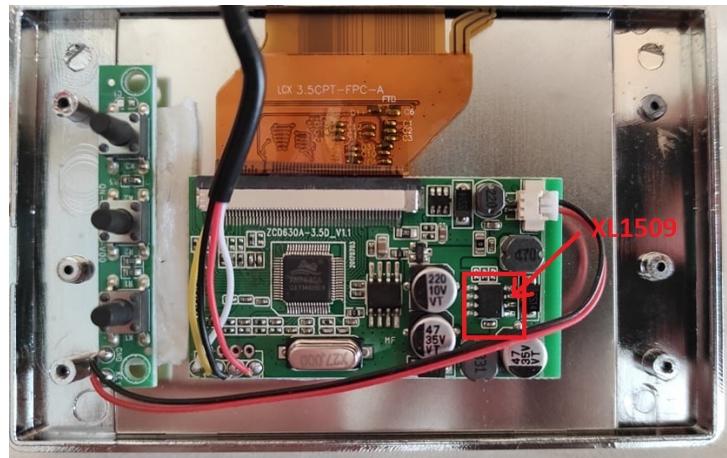
W oparciu o powyżej zaprezentowane schematy, wykorzystano gotowy schemat płytki PCB układu zasilania. Płytkę PCB wykonano a następnie przylutowano do niej odpowiednie elementy. Projekt płytki zaprezentowano w załączniku B, na rysunkach B.1 i B.2. Do wejścia układu podłączono akumulator, natomiast jego wyjście podłączono do pinów zasilania Raspberry Pi Zero - w załączniku Dodatek A, na rysunku A.1 zaprezentowano schemat połączenia.

5.2 Podłączenie wyświetlacza LCD

Do zbudowania konsoli wykorzystano ekran LCD TFT o przekątnej równej 3,5 cala. Wyświetlacz ten był pierwotnie przystosowany do odbierania obrazu z kamery cofania w samochodzie osobowym. Z tego powodu jego napięcie zasilania wynosiło 12V, ponieważ takie najczęściej znajduje się w zapalniczce samochodowej, do której zgodnie z zamysłem producenta, ekran miał być podłączony.

Mając do dyspozycji zasilanie wynoszące jedynie 5V, ekran nie był w stanie poprawnie funkcjonować w połączeniu z mikrokomputerem Raspberry Pi. Jednak po wyciągnięciu wyświetlacza z obudowy i bliższym przyjrzeniu się jego budowie, znaleziono układ scalony XL1509 (zaznaczony na rysunku 5.5, będący przetwornicą DC/DC typu step down).

Z tego powodu, że napięcie zasilania ekranu było niższe niż 12V, układ przetwornicy obniżało napięcie do tak niskiej wartości, że wyświetlacz nie mógł poprawnie funkcjonować.



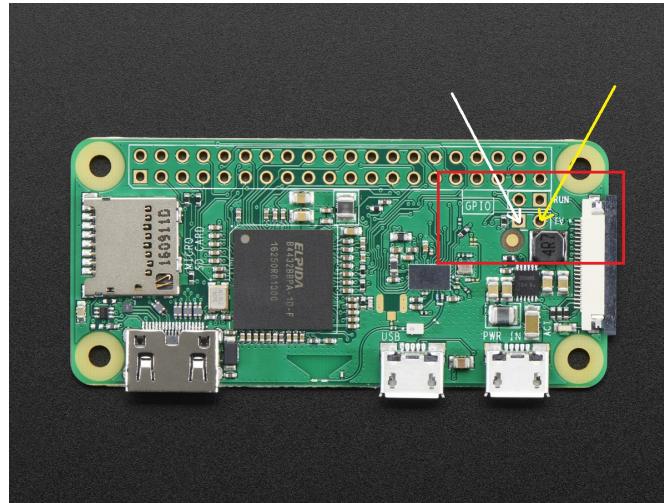
Rysunek 5.5 Kontroler wyświetlacza z zaznaczonym na czerwono układem XL1509



Rysunek 5.6 Zmodyfikowany wyświetlacz, czerwony przewód łączy ze sobą dodatni bieguna zasilania z wyjściem z przetwornicy

Rozwiązaniem powyższego problemu było ominięcie układu przetwornicy XL1509 poprzez bezpośrednie podłączenie dodatniego bieguna zasilania wyświetlacza z drugim pinem układu XL1509, który zgodnie z dokumentacją, jest wyjściem z układu [22]. Na poniższym zdjęciu (rysunek 5.6) przedstawiono zmodyfikowany już ekran, działający poprawnie przy napięciu zasilania równym ok. 5V.

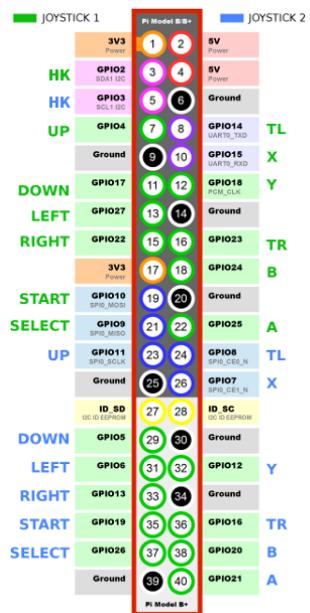
Ostatnim etapem było podłączenie ekranu do Raspberry Pi Zero. W tym celu posłużyono się pinami kompozytowymi TV, znajdującymi się na płytce mikrokomputera. Przewody oznaczone kolorami żółtym i białym, odpowiedzialne są za przesył obrazu do wyświetlacza. Na rysunku 5.7, kolorami zaznaczono podłączenie odpowiedniego przewodu do pinów TV na płytce Raspberry Pi Zero. Podłączenie do wyświetlacza zasilania pochodzącego z Raspberry Pi, omówiono w następnym podrozdziale.



Rysunek 5.7 Wyjścia kompozytowe z zaznaczonym sposobem podłączenia przewodów przesyłających obraz do wyświetlacza

5.3 Układ sterowania konsola

W celu umożliwienia sprawowania kontroli nad budowaną konsolą przenośną, urządzenie należało wyposażyć w przyciski bezpośrednio połączone z mikrokomputerem Raspberry Pi. W dokumentacji systemu operacyjnego Recalbox OS zawarty został schemat (rysunek 5.8) obrazujący połączenie poszczególnych przycisków konsoli z odpowiednimi wyprowadzeniami GPIO [18].



Rysunek 5.8 Piny wejścia/wyjścia GPIO. Przy każdym z pinów przypisana jest nazwa przycisku, którego działanie dany pin obsługuje

źródło: Recalbox Wiki, autor nieznany, na licencji CC, dostęp: 08.12.2021

<https://wiki.recalbox.com/en/tutorials/controllers/gpio/gpio-controllers>

Istotnym aspektem, umożliwiającym połączenie przycisków z mikrokomputerem jest gotowy projekt płytki PCB², która jednocześnie umożliwia wygodne podłączenie reszty komponentów składających się na konsole, do mikrokomputera Raspberry Pi. Poniżej na rysunku 5.9 przedstawiono wygląd płytki od frontu.

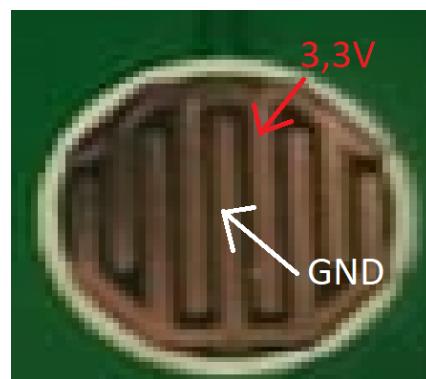


Rysunek 5.9 Wygląd wykorzystanej płytki PCB, umożliwiającej sterowanie konsolą przy pomocy fizycznych przycisków

Zasada działania przycisków sterujących konsolą polega na zwarciu górnej części pola lutowniczego przycisku, na którym występuje napięcie 3,3V (napięcie pochodzące z danego pinu GPIO), z dolną częścią pola lutowniczego, które stanowi masę. Na rysunku 5.10 pokazano w powiększeniu pole lutownicze przycisku, na którym widać dwie oddzielone od siebie "połówki" przycisku.

Zwarcie obydwu połówek jest realizowane poprzez przewodnik znajdujący się pod fizycznym przyciskiem (pokazano na rysunku 5.11). Takie działanie jest rejestrowane przez mikrokomputer jako wcisnięcie konkretnego klawisza.

Dodatkowo w celu poprawy czułości detekcji naciśniętego przycisku, pobielono cyną pola lutownicze przycisków, co znacznie poprawiło komfort użytkowania urządzenia.



Rysunek 5.10 Pole lutownicze w powiększeniu, realizujące przełączanie na skutek wcisnięcia fizycznego przycisku

²Projekt płytki wykonany przez: Hardware Boy YouTube. Projekt udostępniony przez twórcę pod adresem: <https://drive.google.com/file/d/11qRdWh0VMx-m0itIH18JsRw9KDFDLDeJ/view>



Rysunek 5.11 Gumka znajdująca się pod przyciskiem, zapewniająca jego skok. Strzałkami zaznaczono materiał przewodzący

Po połączeniu wyprowadzeń GPIO z odpowiednimi przyciskami na płytce, doprowadzono do płytki PCB napięcie zasilania 5V oraz masę, pochodzące z mikrokomputera Raspberry Pi. Ma to istotne znaczenie, ponieważ płytka jest tak zaprojektowana, iż umożliwia ona podłączenie do mikrokomputera reszty podzespołów i obwodów składających się na kompletną konsolę.

W poprzednim podrozdziale dotyczącym wyświetlacza LCD nie omówiono podłączenia go do zasilania. Aby to uczynić należy połączyć wskazane na rysunku 5.12 pola lutownicze z tyłu płytki, zaznaczone czerwonym kolorem jako LCD, odpowiednio z dodatnim i ujemnym biegunem zasilania wyświetlacza. Następnie w celu doprowadzenia zasilania z mikrokomputera należy połączyć wyprowadzenia GPIO, na których zgodnie z rysunkiem 5.8 występuje napięcie 5V i GND, z polami lutowniczymi wskazanymi na rysunku, oznaczonymi jako RASPBERRY PI. Takie podłączenie zasilania znacząco ułatwi podłączenie układu audio do konsoli, a także pomoże zachować porządek wśród przylutowanych przewodów.



Rysunek 5.12 Schemat podłączenia zasilania pochodzącego z mikrokomputera Raspberry Pi i doprowadzenie go do wyświetlacza LCD

Po podłączeniu płytki PCB z Raspberry Pi i wyświetlaczem, prototyp konsoli wyglądał w sposób przedstawiony na rysunku 5.13.



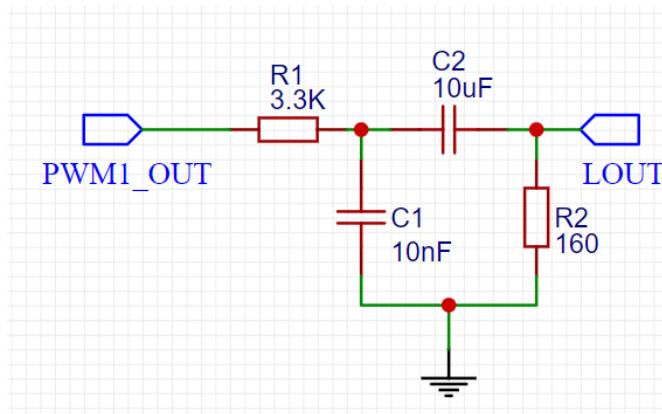
Rysunek 5.13 Raspberry Pi Zero z podłączonym wyświetlaczem i kontrolerem

5.4 Układ audio konsoli

Na podstawie dokumentacji systemu Recalbox OS, w celu uzyskania dźwięku z mikrokomputera Raspberry Pi Zero, należy wykorzystać odpowiednio skonfigurowane piny GPIO13 i GPIO18 (sposób konfiguracji omówiono w podrozdziale dotyczącym konfiguracji systemu Recalbox OS)[17].

Z pinów GPIO13 i GPIO18, uzyskać można odpowiednio: sygnały PWM1 i PWM0. Z racji tego, iż wyprowadzenie GPIO18 jest już przypisane do przycisku "Y" konsoli, do wykorzystania pozostaje jedynie pin GPIO13. Z tego powodu konsola pozwala na odtwarzanie dźwięku jedynie w standardzie mono, a nie stereo. Następnie sygnał uzyskany z wyprowadzenia GPIO13 musi zostać poddany filtracji, ponieważ jest on mocno przesteryowany i niezdatny do odsłuchu.

W związku z tym zaprojektowano i wykonano układ filtra pasmowo-przepustowego, o paśmie przepustowym mieszczącym się w zakresie częstotliwości od 100Hz do 5kHz. Poniżej zaprezentowano schemat ideowy zaprojektowanego filtra.



Rysunek 5.14 Schemat ideowy zaprojektowanego filtra pasmowo-przepustowego

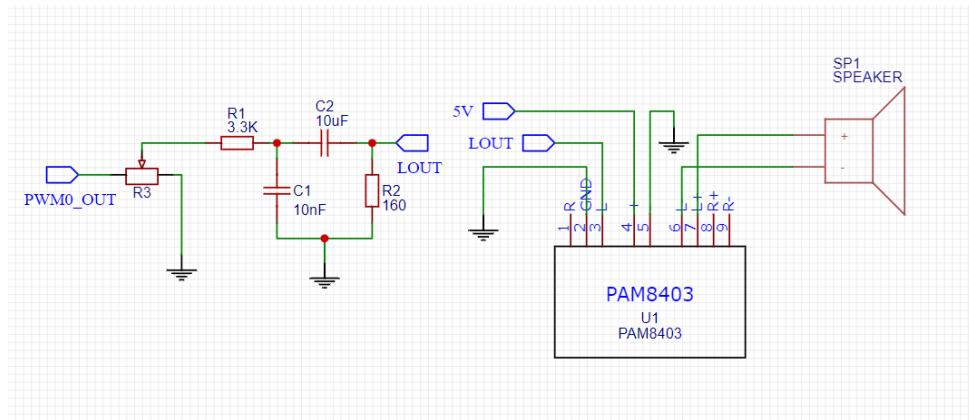
Z racji tego, iż na filtr pasmowo-przepustowy składają się filtr dolnoprzepustowy i górnoprzepustowy, przy pomocy wzoru na ich częstotliwości graniczne, obliczone zostały wartości elementów biernych. Założono, że częstotliwość graniczna dolna filtru dolnoprzepustowego (oznaczona jako f_L) równa jest 5kHz, natomiast częstotliwość graniczna górna

filtru górnoprzepustowego (oznaczona jako f_H), wynosi 100Hz.

Mając do dyspozycji stosunkowo niewielki wybór kondensatorów w porównaniu do ilości posiadanych rezystorów, założono wartości kondensatorów odpowiednio: dla filtra dolnoprzepustowego - $C1 = 10nF$, natomiast dla filtra górnoprzepustowego - $C2 = 10uF$. Przekształcając wzory: $f_L = \frac{1}{2\pi \cdot R1 \cdot C1}$ i $f_H = \frac{1}{2\pi \cdot R2 \cdot C2}$, wyprowadzono odpowiednio rezystancje R1 i R2. Wyniki były następujące: $R1 \approx 3,183k\Omega$ i $R2 \approx 160\Omega$.

W celu wykonania obwodu, dobrano rezystory o wartości zbliżonej do otrzymanych wyników (zgodne z szeregiem E24), przez co ostatecznie wartości użytych rezystancji są następujące: dla R1 wartość nominalna wynosi $3,3k\Omega$, natomiast w przypadku R2 w celu uzyskania wartości jak najbliższej 160Ω połączono ze sobą szeregowo rezystory o nominalnych wartościach 100Ω i 47Ω , dzięki czemu uzyskano wartość $R2 = 147\Omega$. Po zmierzeniu rezystancji przy pomocy multimetru, rezystancje wynoszą $R1_{zm} = 3,21k\Omega$ i $R2_{zm} = 145,6\Omega$.

Następnie w celu wzmacniania przefiltrowanego sygnału posłużono się gotowym modelem 3-watowego wzmacniacza audio PAM8403. O wyborze tego układu zadecydowały takie czynniki jak: niewielkie zapotrzebowanie na moc zasilania oraz niewielkie rozmiary układu. Warto również wspomnieć, iż jest to dość często stosowany moduł w niedużych, przenośnych urządzeniach [5]. Na koniec, do wyjścia wzmacniacza podłączono 1-watowy głośnik, pochodzący z konsoli Nintendo Game-Boy Color. Na rysunku 5.15 zaprezentowano kompletny układ audio konsoli. Natomiast w Dodatku C, na rysunku 5.1 schemat połączenia układu audio z mikrokomputerem Raspberry Pi.



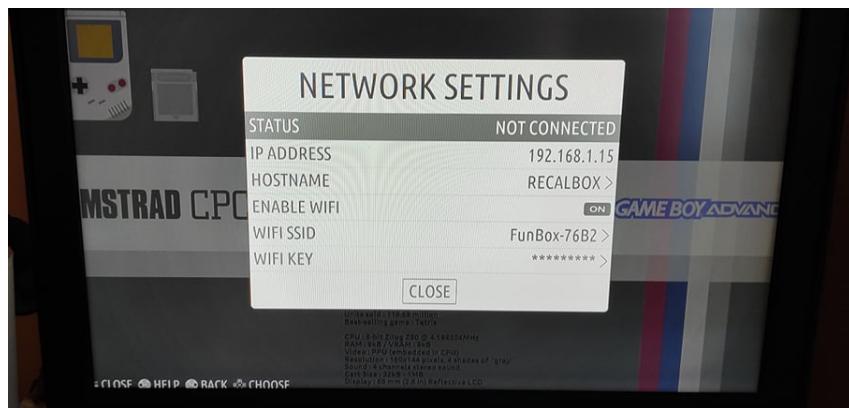
Rysunek 5.15 Kompletny układ audio konsoli. W celu regulacji głośności na wejściu do filtra RC dołączono potencjometr

5.5 Instalacja systemu operacyjnego Recalbox OS

W celu instalacji systemu operacyjnego Recalbox OS w wersji 4.1.0, pobrano obraz systemu ze strony producenta³. Następnie obraz systemu należało wypakować bezpośrednio na (uprzednio sformatowanej w standardzie FAT32), karcie pamięci microSD. Mając na uwadze, stosunkowo niewielką rozdzielncość wykorzystanego przy budowie konsoli ekranu, przy instalacji systemu posłużyono się drugim egzemplarzem mikrokomputera Raspberry Pi Zero podłączonym do telewizora.

W pierwszej kolejności umieszczono kartę pamięci z wypakowanym systemem operacyjnym, w gnieździe microSD, znajdującym się na płytce mikrokomputera. Mikrokomputer podłączono poprzez kabel HDMI do telewizora. Do gniazda micro USB podłączono zasilacz sieciowy, natomiast do złącza micro USB OTG dołączono pad od konsoli SONY PlayStation 3.

Po uruchomieniu mikrokomputera, pojawia się okno instalacji systemu. Instalacja przebiega bez udziału użytkownika, o jej zakończeniu zostaje on powiadomiony odpowiednim komunikatem. Po zakończeniu instalacji, należy połączyć mikrokomputer przy pomocy Wi-Fi z Internetem. W tym celu należy nacisnąć przycisk START na padzie i wybrać opcję "NETWORK SETTINGS". Na ekranie wyświetli się następujące okno 5.16.



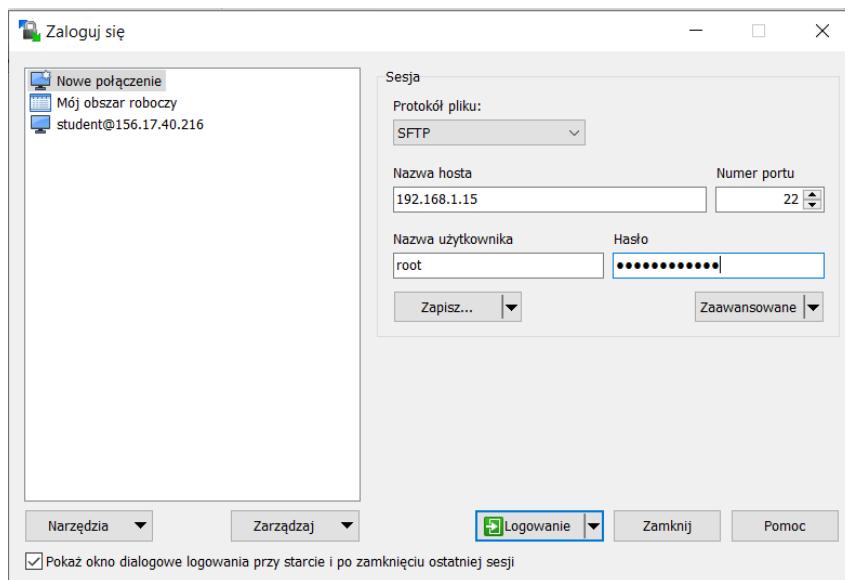
Rysunek 5.16 Okno NETWORK SETTINGS, służące do konfiguracji połączenia z Internetem przez Wi-Fi

W polu WIFI SSID należy wybrać odpowiednią sieć po czym, w polu WIFI KEY wpisać hasło do wybranej sieci. Po wpisaniu hasła należy zatwierdzić wprowadzone zmiany i zamknąć okno. Po kilku minutach mikrokomputer powinien połączyć się z siecią Wi-Fi - oznaką tego będzie widoczny adres IP w polu IP ADDRESS (status "NOT CONNECTED" należy w tym wypadku zignorować). Adres IP jest niezbędny do zdalnego połączenia się z mikrokomputerem w celu edycji plików systemowych i konfiguracyjnych.

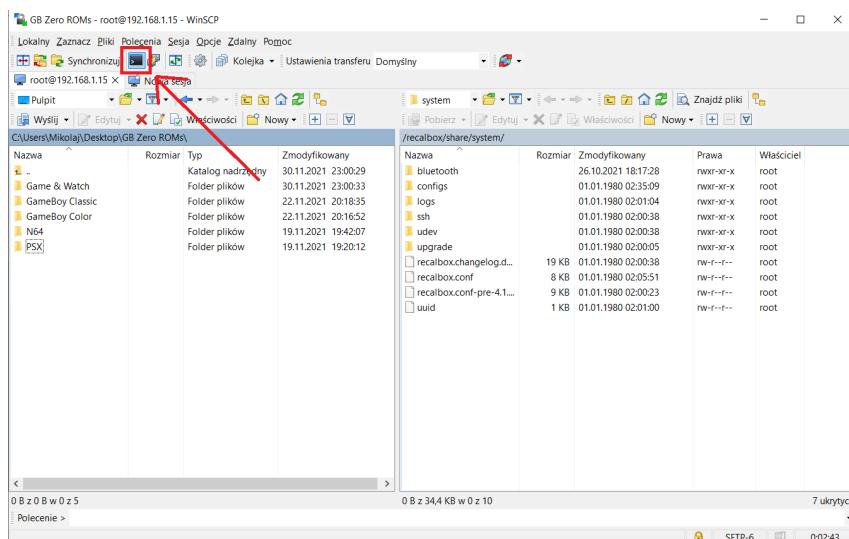
Dzięki zmodyfikowaniu plików config.txt oraz recalbox.conf, Raspberry Pi będzie w stanie: przesyłać obraz przez piny kompozytowe TV, być kontrolowane przez porty GPIO oraz wysyłać dźwięk w postaci sygnału PWM przez wyprowadzenie GPIO13.

Aby uzyskać dostęp do wyżej wspomnianych plików należy przy użyciu programu WinSCP połączyć się z Raspberry Pi poprzez adres IP i zalogować się następującymi danymi - loginem: "root" oraz hasłem: "recalboxroot" tak jak to zaprezentowano na rysunku 5.17.

³System operacyjny dostępny do pobrania pod adresem: <https://github.com/recalbox/recalbox-os/releases>

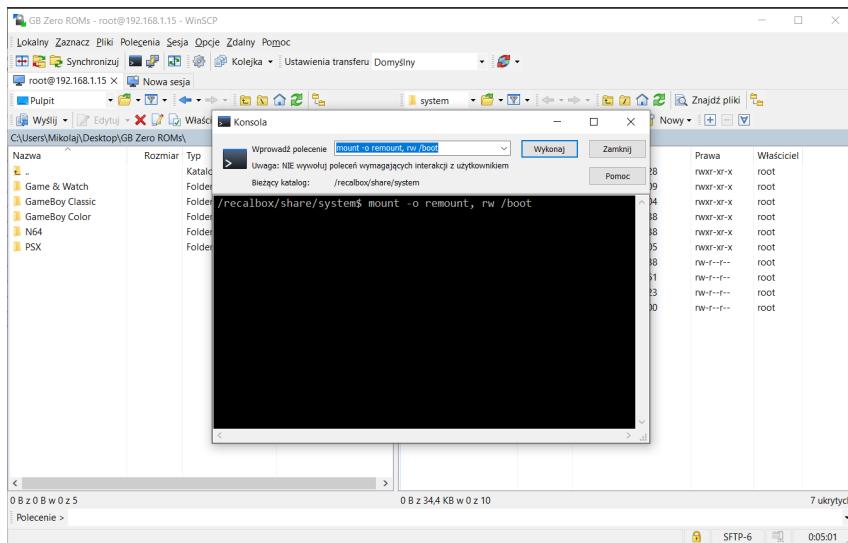


Rysunek 5.17 Okno logowania programu WinSCP



Rysunek 5.18 Ikona terminala w programie WinSCP

Następnie w celu uzyskania prawa dostępu do wglądu w pliki systemowe i konfiguracyjne, należy otworzyć terminal (ikona terminala - rysunek 5.18) i wpisać polecenie: `mount -o remount, rw /boot` tak jak na rysunku 5.19.



Rysunek 5.19 Po wpisaniu polecenia, klikając klawisz "Wykonaj" w oknie terminala wyświetli się wpisane polecenie co świadczy o tym, iż zostało ono wykonane.

W dalszej części pracy opisano modyfikację plików config.txt oraz recalbox.conf w celu uzyskania: obrazu, dźwięku oraz kontrolowania systemu za pomocą portów GPIO. Plik config.txt znajduje się pod ścieżką katalogów: `\<root>\boot`. Natomiast plik recalbox.conf, znajduje się pod ścieżką: `\<root>\recalbox\share\system`.

5.5.1 Włączenie przesyłu obrazu przez piny kompozytowe

W celu włączenia przesyłu obrazu z mikrokomputera Raspberry Pi , należy w zaprezentowany sposób zmodyfikować, zarówno plik config.txt jak i recalbox.conf.

Zaczynając od pliku config.txt, w pierwszej kolejności należy wykomentować linie:

```
# hdmi_force_hotplug=1
```

oraz

```
# config_hdmi_boost=0
```

Następnie należy przypisać wartość zero do zmiennej:

```
disable_overscan=0
```

Odkomentować linię `sdtv_mode=2` oraz dopisać pod nią linię: `sdtv_aspect=1`:

```
# uncomment for composite PAL
sdtv_mode=2
sdtv_aspect=1
```

W pliku recalbox.conf przypisać wartość `default`, następującej linii:

```
global.videomode=default
```

Po zmodyfikowaniu plików config.txt i recalbox.conf mikrokomputer powinien wyświetlać obraz na podłączonym ekranie.

5.5.2 Włączenie przesyłu audio

W celu uzyskania dźwięku pochodzącego z portów GPIO13 i GPIO18, należy skonfigurować je w taki sposób aby przesyłyły one dźwięk w postaci sygnału PWM.

W pliku config.txt, linię `hdmi_drive=2` należy zakomentować:

```
# comment to get jack audio
# hdmi_drive=2
```

Na końcu pliku należy dopisać następującą linię kodu:

```
dtoverlay=pwm-2chan,pin=18,func=2,pin2=13,func2=4
```

Następnie w pliku recalbox.conf należy podać źródło dźwięku jako wyjście `jack`:

```
# ----- C - Audio -----
## Set the audio device (auto, hdmi, jack)
audio.device=jack
```

5.5.3 Włączenie sterowania za pomocą portów GPIO

W celu konfiguracji sterowania mikrokomputerem za pomocą portów GPIO, należy zmodyfikować plik recalbox.conf w następujący sposób.

W celu uaktywnienia portów GPIO, linii `controllers.gpio.enabled` należy przypisać wartość 1, następnie w celu wybrania tzw. mapy przycisków - linii `controllers.gpio.args=map` należy także przypisać wartość 1:

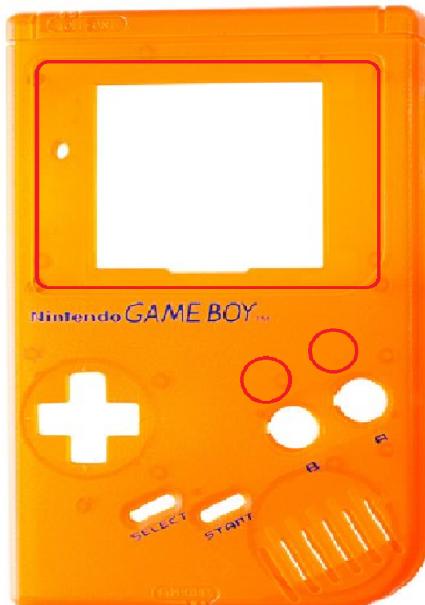
```
# ----- D3 - GPIO Controllers -----
## GPIO Controllers
## enable controllers on GPIO with mk_arcarde_joystick_rpi (0,1)
controllers.gpio.enabled=1
## mk_gpio arguments, map=1 for one controller, map=1,2 for 2 (map=1, map=1,2)
controllers.gpio.args=map=1
```

5.6 Obudowa

Końcowym etapem budowania konsoli było przystosowanie obudowy pochodzącej z konsoli Nintendo Game-Boy Classic i umieszczenie w niej całego układu budowanej konsoli. Modyfikacje obudowy zaznaczono na rysunku 5.20.

W pierwszej kolejności zwiększyły się otwór przeznaczony na ekran. Z racji tego, iż oryginalnie konsola Nintendo Game-Boy Classic posiadała ekran mający przekątną równą 2,6 cala, otwór musiał zostać poszerzony w taki sposób aby nie zasłaniał ON wykorzystanego ekranu LCD, którego rozdzielcość wynosi 3,5 cala. Po zmierzeniu wymiarów geometrycznych ekranu, otwór na ekran w odpowiedni sposób zwiększyły się przy pomocy wiertarko-szlifierki precyzyjnej.

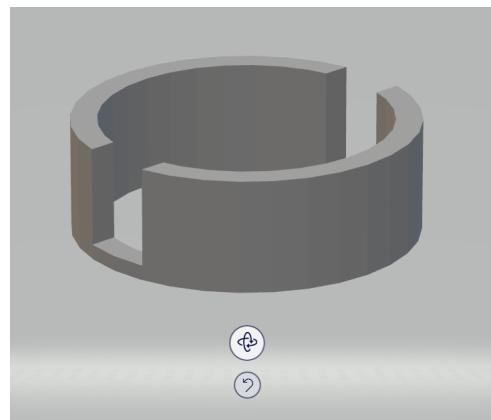
Kolejną modyfikacją było wywiercenie dodatkowych otworów na przyciski akcji X i Y. Do tego celu posłużyły się wkrętarką akumulatorową z zamontowanym stopniowym wiertłem stożkowym. Następnie w celu zapewnienia nowo powstałym przyciskom odpowiedniego skoku i stabilności, dodano wewnątrz obudowy wydrukowane w technologii druku 3D, specjalne "ścianki" dla przycisków⁴. Na rysunku 5.21 przedstawiono ich wygląd w formacie zdjęcia 3D.



Rysunek 5.20 Przedni panel obudowy konsoli. Czerwonym kolorem zaznaczono modyfikacje obudowy w postaci dwóch dodatkowych przycisków akcji X, Y oraz powiększonego otworu na ekran LCD

Wydrukowane elementy 3D oraz wyświetlacz zostały przytwierdzone do obudowy za pomocą kleju na gorąco. Wewnątrz ścianek dla przycisków, umieszczone zostały kompletne przyciski (rysunek 5.22 i 5.23).

⁴Ścianki do przycisków autorstwa: wermy, dostępne do kupienia pod adresem: <https://shop.sudomod.com/collections/game-boy-zero/products/3d-printed-gbz-parts>



Rysunek 5.21 Wygląd pojedynczej ścianki przycisku akcji



Rysunek 5.22 Przytwierdzone ścianki wraz z założonymi przyciskami



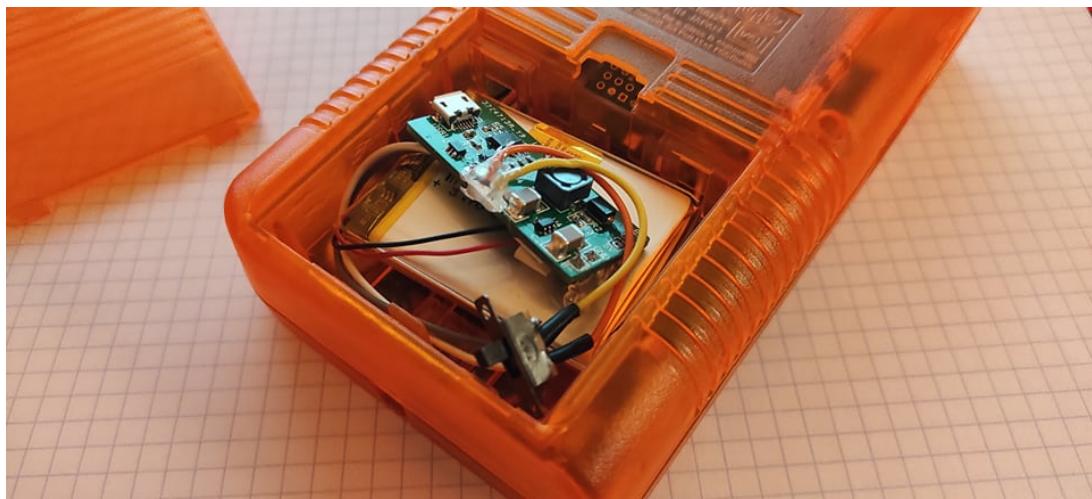
Rysunek 5.23 Kompletne przyciski z gumkami zapewniającymi skok i przełączanie dzięki znajdującemu się pod nimi przewodnikowi

W kolejnym etapie budowy konsoli wewnętrz obudowy przykręcono płytę PCB obsługującą przyciski, wraz z: przylutowanym mikrokomputerem Raspberry Pi Zero, wyświetlaczem LCD, potencjometrem głośności, filtrem RC, wzmacniaczem audio oraz głośnikiem. Łączenia lutownicze zabezpieczono przed rozłączeniem za pomocą kleju na gorąco.



Rysunek 5.24 Wnętrze konsoli

Na koniec, w schowku przeznaczonym pierwotnie na baterie typu AA, umieszczono akumulator li-po wraz z kompletnym układem zasilania konsoli. Do układu zasilania dodano włącznik urządzenia.



Rysunek 5.25 Umiejscowienie układu zasilania konsoli wraz z włącznikiem

Poniżej zaprezentowano zdjęcia finalnie złożonej i działającej przenośnej konsoli do gier wideo.



Rysunek 5.26 Przód konsoli



Rysunek 5.27 Tył konsoli

Rozdział 6

Pomiary

Mając już w pełni działającą konsolę, przeprowadzone zostały pomiary natężenia prądu zasilania w zależności od gry i systemu na jaki dana gra była przeznaczona. W zestawieniu wzięto pod uwagę następujące konsole: Nintendo Game-Boy i Game-Boy Color, Nintendo Entertainment System (NES), Super Nintendo Entertainment System (SNES) oraz SONY PlayStation. Dla każdego z wymienionych systemów wybrano po trzy gry. Natężenie prądu mierzone było w dwóch charakterystycznych momentach, występujących w każdej z wybranych gier. Te momenty to: menu główne oraz początek poziomu w każdej z gier.

Przed dokonaniem pomiarów zakładano, że największe natężenie prądu wystąpi podczas emulacji gier przeznaczonych na konsolę Playstation, ponieważ jest to jedyny w zestawieniu system, który obsługuje pełnoprawną grafikę 3D.

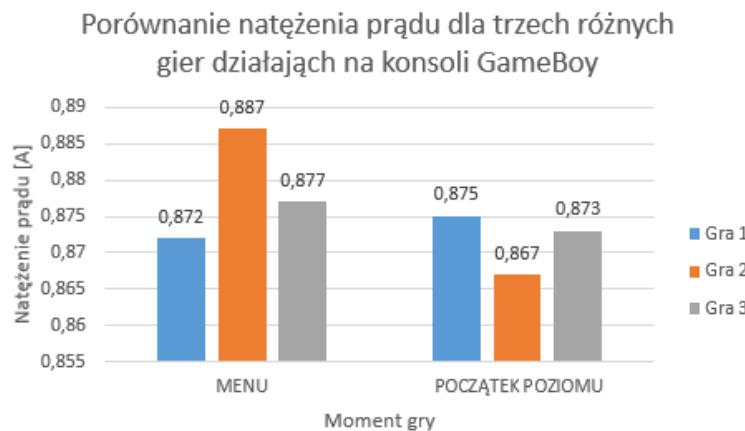
Pomiary przeprowadzone zostały na kampusie Politechniki Wrocławskiej w budynku C-3, w sali 318 wraz z promotorem. W celu wykonania pomiaru natężenia prądu posłużono się multymetrem cyfrowym UNI-T UT801. W celu podłączenia się amperomierzem do układu zasilania, wykorzystano pola lutownicze, do których przylutowany jest włącznik urządzenia. W celu wykonania pomiaru przykładało przewody multimetru w taki sposób aby prąd płynął przez amperomierz, a następnie przełączano włącznik tak aby całkowity prąd zasilania przechodził przez multymetr. Poniżej zaprezentowane zostało stanowisko pomiarowe - rysunek 6.1.



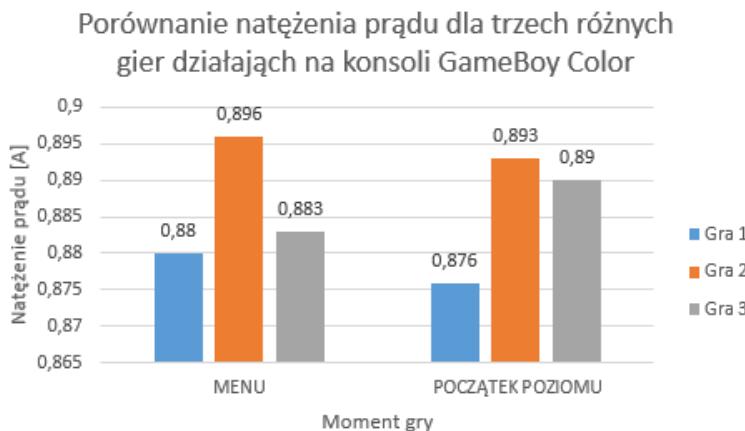
Rysunek 6.1 Stanowisko pomiarowe, przy którym dokonano pomiarów poboru prądu przez konsole

6.1 Wyniki pomiarów

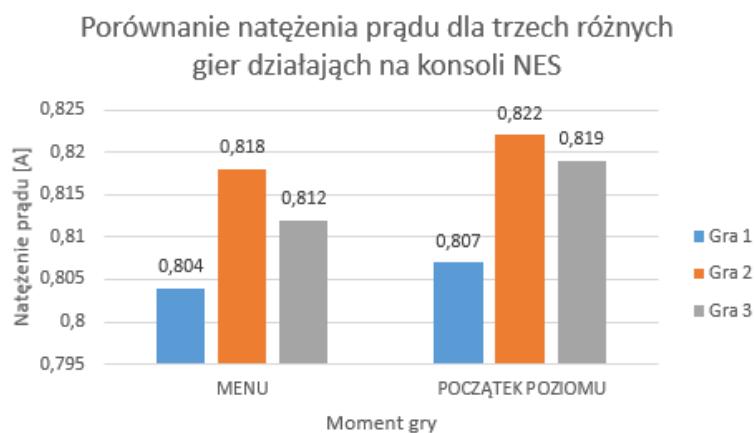
Otrzymane wyniki zaprezentowano poniżej na wykresach kolumnowych.



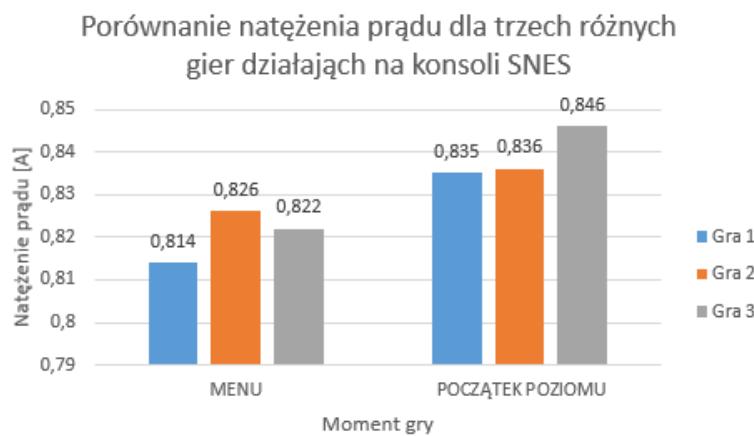
Rysunek 6.2 Pomiarystwo natężenia prądu dla konsoli Nintendo Game-Boy



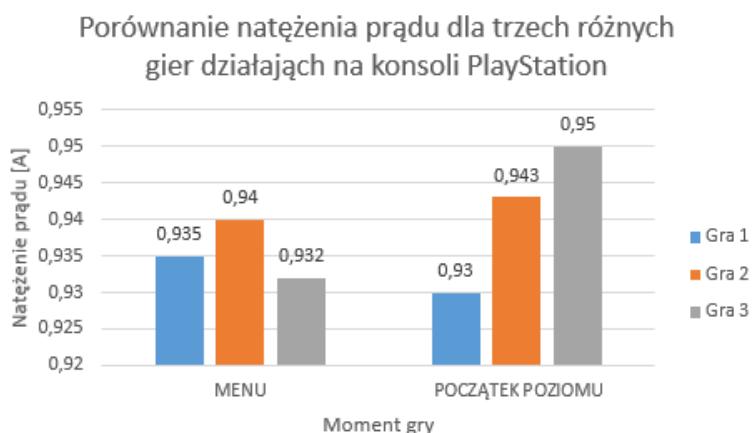
Rysunek 6.3 Pomiarystwo natężenia prądu dla konsoli Nintendo Game-Boy Color



Rysunek 6.4 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Nintendo Entertainment System



Rysunek 6.5 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Super Nintendo Entertainment System



Rysunek 6.6 Pomiary natężenia prądu dla konsoli SONY PlayStation

6.2 Wnioski

Zgodnie z założeniami początkowymi, systemem pobierającym najwięcej prądu okazał się być emulator konsoli PlayStation (rysunek 6.6). Wynikać to może zarówno z wcześniej już wspomnianej grafiki 3D, jak i poziomu zaawansowania urządzenia, które swoimi możliwościami znacznie przewyższa pozostałe konsole w przygotowanym zestawieniu.

Analizując z kolei wykresy przedstawiające natężenie prądu dla systemów Nintendo Game-Boy - rysunek 6.2 i Game-Boy Color - rysunek 6.3, zauważać można wyższe natężenie prądu niż w przypadku wydajniejszych konsol stacjonarnych NES i SNES (rysunek odpowiednio: 6.4 i 6.5). Należy również zwrócić uwagę na wyższe natężenie prądu występujące - w przypadku konsoli Game-Boy, w menu głównym a niżeli na początku poziomu gry.

Rozdział 7

Podsumowanie

Celem pracy było wykonanie przenośnej konsoli do gier wideo obsługującej gry przeznaczone na retro systemy do gier. Wykorzystany mikrokomputer - Raspberry Pi Zero ze względu na swoje niewielkie rozmiary pozwolił na zmieszczenie całego projektu konsoli w obudowie pochodzącej od przenośnej konsoli Nintendo Game-Boy.

Urządzenie, które udało się stworzyć w ramach realizacji tejże pracy inżynierskiej przewyższa możliwościami swój pierwotny, którym jest właśnie konsola Nintendo Game-Boy. Dzięki wystarczającej mocy obliczeniowej dostarczanej przez mikrokomputer Raspberry Pi oraz oprogramowaniu Recalbox OS, zbudowana konsola pozwala na komfortową grę na takich systemach jak Game-Boy Color, NES czy SNES.

Niestety możliwości konsoli nie wystarczają do płynnego odtwarzania gier przeznaczonych na konsole PlayStation. Zbudowana konsola jest w stanie je uruchomić, lecz gry te działają bardzo wolno. Z tego powodu lepszym wyborem byłoby wykorzystanie np. mikrokomputera Raspberry Pi CM3, który oferuje moc obliczeniową porównywalną z Raspberry Pi 3, mając przy tym wymiary podobne do modelu Pi Zero.

Kolejnym mankamentem zbudowanego urządzenia jest brak monitorowania stanu rozładowania akumulatora w trakcie gry. W związku z tym, iż system Recalbox OS nie posiada funkcji, która byłaby za to odpowiedzialna, w trakcie użytkowania konsoli często zdarzało się, że urządzenie niespodziewanie kończyło pracę nie dając przy tym czasu np. na zapisanie stanu gry.

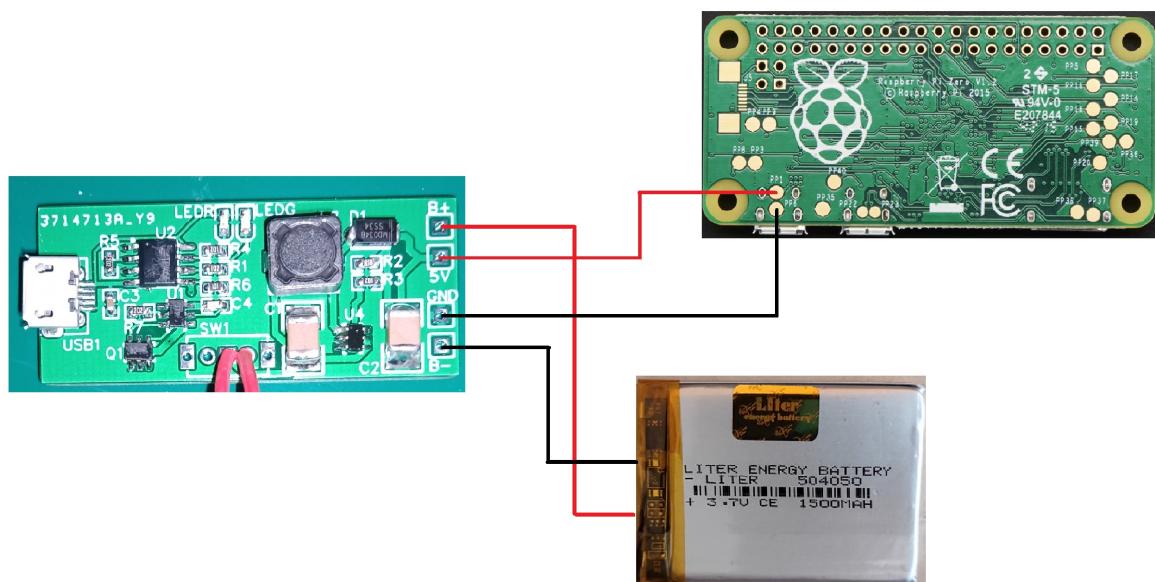
Pomimo braków i niedociągnięć zbudowana konsola, wciąż jest urządzeniem atrakcyjnym w użytkowaniu, ponieważ oprócz możliwości emulowania tysięcy gier jest ona również urządzeniem multimedialnym pozwalającym na słuchanie muzyki oraz oglądanie filmów i zdjęć.

Sama realizacja projektu była bezcennym doświadczeniem, ponieważ w czasie jego realizacji należało wykorzystać wiedzę teoretyczną przyswojoną w trakcie studiów, a następnie użyć ją w praktyczny sposób. Projekt przenośnej konsoli do gier to - dzięki światowemu postępowi techniki wciąż temat rozwojowy, który można by w przyszłości rozwijać i tworzyć bardziej zaawansowane, i wydajne urządzenia.

Dodatki

Dodatek A

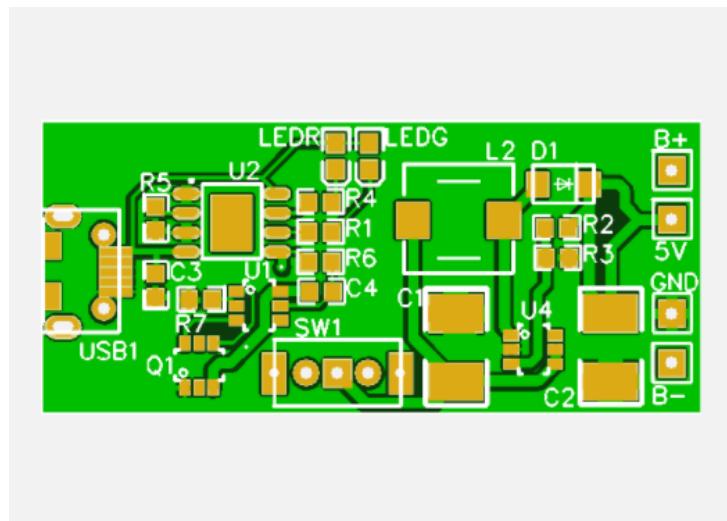
Schemat połączenia układu zasilania z Raspberry Pi Zero



Rysunek A.1 Kompletny układ zasilania wraz z podłączonym akumulatorem na wejściu i podłączonym mikrokomputerem Raspberry Pi Zero na wyjściu.

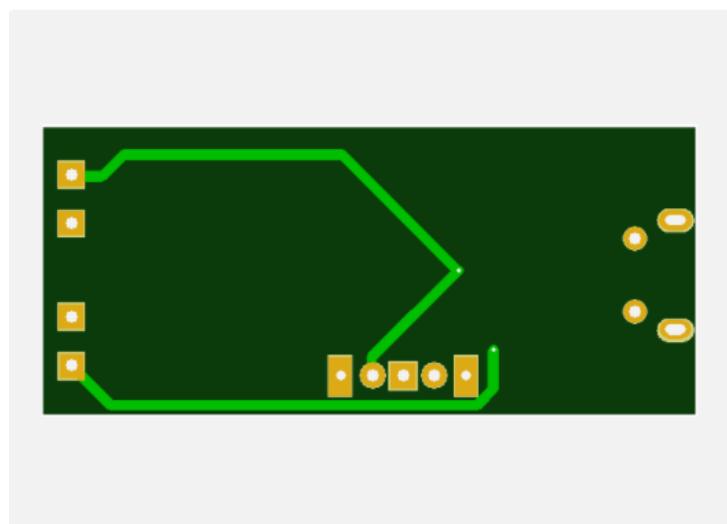
Dodatek B

Schemat płytki PCB układu zasilania



Rysunek B.1 Górná warstwa płytka PCB

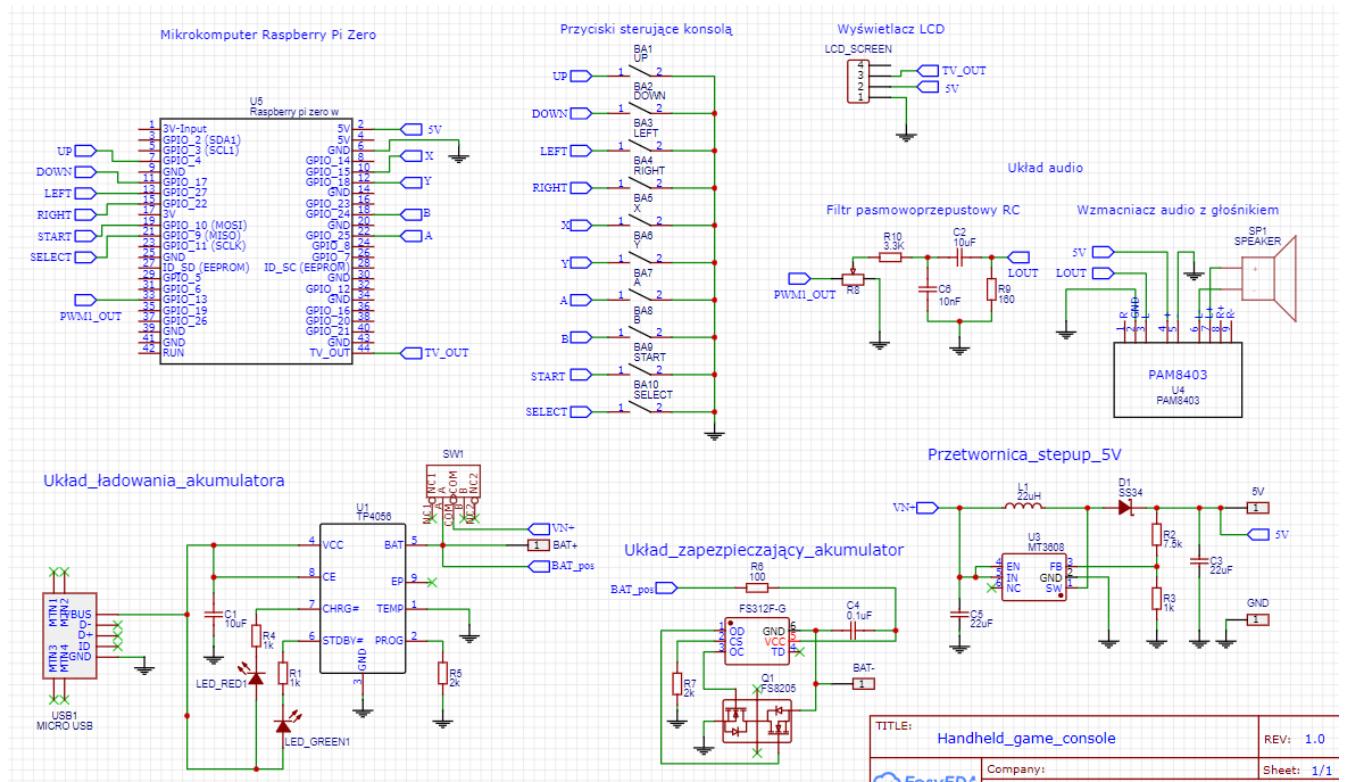
Autor: GreatScott YouTube, Projekt udostępniony przez twórcę pod adresem:
<https://www.instructables.com/DIY-LiPo-ChargeProtect5V-Boost-Circuit/>, Dostęp: 26 lipca 2022



Rysunek B.2 Dolna warstwa płytka PCB

Dodatek C

Schemat ideowy układu konsoli



Rysunek C.1 Kompletny schemat ideowy konsoli przenośnej, zbudowanej w oparciu o mikrokomputer Raspberry Pi Zero

Literatura

- [1] AEROSEMI, *MT3608*. Dostępne na: <https://www.olimex.com/Products/Breadboarding/BB-PWR-3608/resources/MT3608.pdf> [Online: 19.12.2021].
- [2] AOI ENGINEERING, *TFT Technology*. Dostępne na: <https://aoi-display.com/AOI/tft-technology/> [Online: 26 lipca 2022].
- [3] BOTLAND, *Akumulatory litowo-polimerowe (Li-Po) – Jak to działa?* Dostępne na: <https://botland.com.pl/blog/akumulatory-litowo-polimerowe-li-po-jak-to-dziala/> [Online: 28.12.2021].
- [4] —, *Wyświetlacze LCD, LED, OLED... Co to jest i jak działa.* Dostępne na: <https://botland.com.pl/blog/wyswietlacze-lcd-led-oled-co-to-jest-i-jak-dziala-czyli-maly-przewodnik> [Online: 26 lipca 2022].
- [5] DIODES INCORPORATED, *PAM8403 - Filterless 3W Class-D Stereo Audio Amplifier*. Dostępne na: <https://www.mouser.com/datasheet/2/115/PAM8403-247318.pdf> [Online: 13.12.2021].
- [6] E. SNAJDER, *Raspberry Pi Zero Cookbook*. Dostępne na: <https://learning.oreilly.com/library/view/raspberry-pi-zero/9781786463852/> [Online: 2021-11-25].
- [7] EEVBLOG, *Lithium Ion/Polymer Battery Charging Tutorial*. Dostępne na: https://youtu.be/A6mKd5_-abk [Online: 26 lipca 2022].
- [8] ENCYCLOPAEDIA BRITANNICA, *Pong electronic game*. Dostępne na: <https://www.britannica.com/topic/Pong> [Online: 19.12.2021].
- [9] FORBOT, *Czym jest filtr RC? Jak działa i co warto o nim wiedzieć?* Dostępne na: <https://forbot.pl/blog/czym-jest-filtr-rc-jak-dziala-i-co-warto-o-nim-wiedziec-id40448> [Online: 17.12.2021].
- [10] —, *Przetwornice impulsowe*. Dostępne na: <https://forbot.pl/blog/kurs-elektroniki-ii-przetwornice-impulsowe-id9923> [Online: 2021-12-04].
- [11] FORTUNE SEMICONDUCTOR CORPORATION, *FS312F-G-DS-12*. Dostępne na: https://www.ic-fortune.com/upload/Download/FS312F-G-DS-12_EN.pdf [Online: 26 lipca 2022].

- [12] LI, HUI-FANG, GAO, JUN-KUI, ZHANG, SHAO-LI, "Effect of Overdischarge on Swelling and Recharge Performance of Lithium Ion Cells", *Chinese Journal of Chemistry*, 2008, 26, 1585—1588. Dostępne na: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cjoc.200890286> [Online: 2021-11-25].
- [13] MARCIN TOMASIK, STANISŁAW LIS, MAROŠ KORENKO, "Modulacja Szerokości Impulsu PWM w Sterowaniu Automatycznym", *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 93 NR 12/2017. Dostępne na: https://www.researchgate.net/publication/321788921_Modulacja_szerokosci_impuisu_PWM_w_sterowaniu_automatycznym [Online: 2021-12-06].
- [14] NANJING TOP POWER ASIC CORPORATION, *TP4056 1A Standalone Linear Li-lon Battery Charger with Thermal Regulation in SOP-8*. Dostępne na: <https://dlnmh9ip6v2uc.cloudfront.net/datasheets/Prototyping/TP4056.pdf> [Online: 26 lipca 2022].
- [15] NINTENDO WIKI, *History of Nintendo*. Dostępne na: https://nintendo.fandom.com/wiki/History_of_Nintendo [Online: 19.12.2021].
- [16] P. HOROWITZ, W. HILL, *Sztuka Elektroniki tom I*, 1997. wydanie czwarte, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- [17] RECALBOX WIKI, *Analog audio output on Pi Zero*. Dostępne na: <https://wiki.calbox.com/en/tutorials/audio/analog-audio-output-on-pi-zero> [Online: 12.12.2021].
- [18] ——, *GPIO controllers*. Dostępne na: <https://wiki.calbox.com/en/tutorials/controllers/gpio/gpio-controllers> [Online: 26 lipca 2022].
- [19] ——, *Supported systems*. Dostępne na: <https://www.calbox.com/database> [Online: 31.12.2021].
- [20] TECH.REDPANDA.PL, *Czym są wyświetlacze TFT LCD?* Dostępne na: <https://tech.redpanda.pl/czym-sa-wyswietlacz-tft-lcd/> [Online: 15.12.2021].
- [21] U.TIETZE, C.SCHENK, *Układy półprzewodnikowe*, 1997. wydanie trzecie poprawione, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa.
- [22] XL SEMI, *2A 150kHz 40V Buck DC to DC Converter*. Dostępne na: <https://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/763153/ETC2/XL1509.html> [Online: 13.12.2021].

Spis rysunków

| | | |
|------|--|----|
| 3.1 | Zdjęcie płytki Raspberry Pi Zero | 7 |
| 4.1 | Proces ładowania CC-CV | 9 |
| 4.2 | Krzywe rozładowywania akumulatora li-po w zależności od zmiany temperatury otoczenia | 10 |
| 4.3 | Struktura wyświetlacza TFT LCD | 12 |
| 4.4 | Zmiana współczynnika wypełnienia w sygnale PWM | 13 |
| 4.5 | Przykładowy schemat filtra dolnoprzepustowego | 13 |
| 4.6 | Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtra dolnoprzepustowego | 14 |
| 4.7 | Schemat przykładowego filtra górnoprzepustowego | 14 |
| 4.8 | Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtra górnoprzepustowego | 15 |
| 4.9 | Przykładowy schemat filtra pasmowoprzepustowego | 15 |
| 4.10 | Charakterystyka amplitudowa i fazowa filtra pasmowoprzepustowego | 16 |
| 5.1 | Sposób podłączenia płytki PCB z Raspberry Pi wraz z pozostałymi elementami wsparcia konsoli | 17 |
| 5.2 | Schemat ideowy obwodu realizującego ładowanie akumulatora | 18 |
| 5.3 | Schemat ideowy obwodu zabezpieczającego akumulator | 19 |
| 5.4 | Schemat ideowy układu przetwornicy step up | 20 |
| 5.5 | Kontroler wyświetlacza z zaznaczonym na czerwono układem XL1509 | 21 |
| 5.6 | Zmodyfikowany wyświetlacz, czerwony przewód łączy ze sobą dodatni biegun zasilania z wyjściem z przetwornicy | 21 |
| 5.7 | Wyjścia kompozytowe z zaznaczonym sposobem podłączenia przewodów przesyłających obraz do wyświetlacza | 22 |
| 5.8 | Piny wejścia/wyjścia GPIO. Przy każdym z pinów przypisana jest nazwa przycisku, którego działanie dany pin obsługuje | 22 |
| 5.9 | Wygląd wykorzystanej płytki PCB, umożliwiającej sterowanie konsolą przy pomocy fizycznych przycisków | 23 |
| 5.10 | Pole lutownicze w powiększeniu, realizujące przełączanie na skutek wciśnięcia fizycznego przycisku | 23 |
| 5.11 | Gumka znajdująca się pod przyciskiem, zapewniająca jego skok. Strzałkami zaznaczono materiał przewodzący | 24 |
| 5.12 | Schemat podłączenia zasilania pochodzącego z mikrokomputera Raspberry Pi i doprowadzenie go do wyświetlacza LCD | 24 |
| 5.13 | Raspberry Pi Zero z podłączonym wyświetlaczem i kontrolerem | 25 |
| 5.14 | Schemat ideowy zaprojektowanego filtra pasmowo-przepustowego | 25 |
| 5.15 | Kompletny układ audio konsoli. W celu regulacji głośności na wejściu do filtra RC dołączono potencjometr | 26 |

| | |
|---|----|
| 5.16 Okno NETWORK SETTINGS, służące do konfiguracji połączenia z Internetem przez Wi-Fi | 27 |
| 5.17 Okno logowania programu WinSCP | 28 |
| 5.18 Ikona terminala w programie WinSCP | 28 |
| 5.19 Po wpisaniu polecenia, klikając klawisz "Wykonaj" w oknie terminala wyświetli się wpisane polecenie co świadczy o tym, iż zostało ono wykonane. | 29 |
| 5.20 Przedni panel obudowy konsoli. Czerwonym kolorem zaznaczono modyfikacje obudowy w postaci dwóch dodatkowych przycisków akcji X, Y oraz powiększonego otworu na ekran LCD | 31 |
| 5.21 Wygląd pojedynczej ścianki przycisku akcji | 32 |
| 5.22 Przytwierdzone ścianki wraz z założonymi przyciskami | 32 |
| 5.23 Kompletne przyciski z gumkami zapewniającymi skok i przełączanie dzięki znajdującemu się pod nimi przewodnikowi | 32 |
| 5.24 Wnętrze konsoli | 33 |
| 5.25 Umiejscowienie układu zasilania konsoli wraz z włącznikiem | 33 |
| 5.26 Przód konsoli | 34 |
| 5.27 Tył konsoli | 34 |
| | |
| 6.1 Stanowisko pomiarowe, przy którym dokonano pomiarów poboru prądu przez konsolę | 35 |
| 6.2 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Nintendo Game-Boy | 36 |
| 6.3 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Nintendo Game-Boy Color | 36 |
| 6.4 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Nintendo Entertainment System | 37 |
| 6.5 Pomiary natężenia prądu dla konsoli Super Nintendo Entertainment System | 37 |
| 6.6 Pomiary natężenia prądu dla konsoli SONY PlayStation | 37 |
| | |
| A.1 Kompletny układ zasilania wraz z podłączonym akumulatorem na wejściu i podłączonym mikrokomputerem Raspberry Pi Zero na wyjściu. | 41 |
| | |
| B.1 Górná warstwa płytki PCB | 42 |
| B.2 Dolna warstwa płytki PCB | 42 |
| | |
| C.1 Kompletny schemat ideowy konsoli przenośnej, zbudowanej w oparciu o mikrokomputer Raspberry Pi Zero | 43 |