



POLITECHNIKA  
GDAŃSKA



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,  
TELEKOMUNIKACJI  
I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Maurycy Mański  
Nr albumu: 165179  
Poziom kształcenia: Studia drugiego stopnia  
Forma studiów: stacjonarne  
Kierunek studiów: Elektronika i telekomunikacja  
Specjalność: Optoelektronika

## **PRACA DYPLOMOWA MAGISTERSKA**

Tytuł pracy w języku polskim: Bezprzewodowy optoelektroniczny interfejs przyciskowy dla dzieci niepełnosprawnych

Tytuł pracy w języku angielskim: Wireless optoelectronic push interface for disabled children

Opiekun pracy: dr hab. inż. Marcin Gnyba

Data ostatecznego zatwierdzenia raportu podobieństw w JSA:



## OŚWIADCZENIE dotyczące pracy dyplomowej zatytułowanej: Bezprzewodowy optoelektroniczny interfejs przyciskowy dla dzieci niepełnosprawnych

Imię i nazwisko studenta: Maurycy Mański

Data i miejsce urodzenia: 10.06.1997, Gdańsk

Nr albumu: 165179

Wydział: Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki

Kierunek: elektronika i telekomunikacja

Poziom kształcenia: drugi

Forma studiów: stacjonarne

Typ pracy: praca dyplomowa magisterska

Świadomy(a) odpowiedzialności karnej z tytułu naruszenia przepisów ustawy z dnia 4 lutego 1994 r. o prawie autorskim i prawach pokrewnych (t.j. Dz. U. z 2019 r. poz. 1231, z późn. zm.) i konsekwencji dyscyplinarnych określonych w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t.j. Dz. U. z 2020 r. poz. 85, z późn. zm.),<sup>1</sup> a także odpowiedzialności cywilnoprawnej oświadczam, że przedkładana praca dyplomowa została opracowana przeze mnie samodzielnie.

Niniejsza praca dyplomowa nie była wcześniej podstawą żadnej innej urzędowej procedury związanego z nadaniem tytułu zawodowego.

Wszystkie informacje umieszczone w ww. pracy dyplomowej, uzyskane ze źródeł pisanych i elektronicznych, zostały udokumentowane w wykazie literatury odpowiednimi odnośnikami zgodnie z art. 34 ustawy o prawie autorskim i prawach pokrewnych.

14.09.2021, Maurycy Mański

Data i podpis lub uwierzytelnienie w portalu uczelnianym Moja PG

\*) Dokument został sporządzony w systemie teleinformatycznym, na podstawie §15 ust. 3b Rozporządzenia MNiSW z dnia 12 maja 2020 r. zmieniającego rozporządzenie w sprawie studiów (Dz.U. z 2020 r. poz. 853). Nie wymaga podpisu ani stempla.



## **Streszczenie:**

Celem pracy jest wykonanie bezprzewodowego, optoelektronicznego systemu przyciskowego niosącego pomoc w rehabilitacji dzieciom niepełnosprawnym lub posiadającym dysfunkcję. Początkowo zbadano problematykę zagadnienia co pomogło w sprecyzowaniu potrzeb przyszłych użytkowników wobec tworzonych urządzeń. Do komunikacji stworzono dedykowany system optoelektroniczny wykorzystujący promieniowanie optyczne z zakresu bliskiej podczerwieni w wolnej przestrzeni propagacyjnej. Kluczowym elementem pracy było poznanie procesu tworzenia układów opartych na mikrokontrolerach. Symbole optyczne wysyłane będą przez bezprzewodowy przycisk a do ich odbioru stworzono dodatkowe urządzenie USB klasy HID. Krytyczne w przypadku systemów mikrokontrolerowych było opracowanie oprogramowania. Do obu urządzeń wykonano obudowy z użyciem druku 3D.

**Słowa kluczowe:** AAC, system optoelektroniczny, komunikacja optyczna, mikrokontroler, tranzystor, podczerwień, USB, Li-ion

**Dziedzina nauki i techniki, zgodnie z wymogami OECD:** Nauki inżynierijne i techniczne; Elektrotechnika, elektronika

## **Abstract:**

The aim of this project is to create a wireless, optoelectronic push-button system to assist in the rehabilitation of disabled or dysfunctional children. First, the issues of this work were examined, which helped in specifying the needs of future users to the devices being created. A dedicated optoelectronic system was created for communication, using optical radiation in the near-infrared range in free propagation space. The key element of the work was to learn about the process of creating systems based on microcontrollers. Optical symbols will be sent by a wireless button and an additional HID class USB device has been created to receive them. Software development was critical for microcontroller systems. For both devices, housings were made with the use of 3D printing.

**Keywords:** AAC, optoelectronic system, optical communication, microcontroller, transistor, infrared, USB, Li-ion

## **Spis treści:**

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów:	6
1. Wstęp i cel pracy .....	7
2. Analiza funkcjonalna .....	9
3. Konstrukcja systemu .....	12
3.1. Koncepcja .....	12
3.2. Nadajnik.....	16
3.2.1. Zasilanie.....	16
3.2.2. Mikrokontroler .....	24
3.2.3. Nadajnik IR i efekt wizualny(podświetlenie) .....	29
3.2.4. Obwód drukowany.....	37
3.3. Odbiornik.....	41
3.3.1. Zasilanie.....	41
3.3.2. Mikrokontroler .....	43
3.3.3. Odbiornik podczerwieni .....	47
3.3.4. Obwód drukowany.....	50
4. Oprogramowanie .....	53
4.1. Oprogramowanie nadajnika.....	53
4.2. Oprogramowanie odbiornika .....	65
5. Uruchomienie i testy .....	73
5.1. Uruchomienie i testy nadajnika .....	76
5.2. Uruchomienie i testy odbiornika.....	83
5.3. Testy komunikacji urządzeń .....	87
6. Konstrukcja mechaniczna.....	89
6.1. Konstrukcja nadajnika .....	90
6.2. Konstrukcja odbiornika .....	95
7. Podsumowanie.....	98
Bibliografia:.....	99

Wykaz rysunków:	100
Wykaz tabel:	102
Wykaz wzorów:	103
Dodatek A – Schematy elektryczne	104
Dodatek B – Programy Matlab	106
Dodatek C – Instrukcja obsługi	107

## **WYKAZ WAŻNIEJSZYCH OZNACZEŃ I SKRÓTÓW:**

R – rezystancja [ $\Omega$ ]	$\beta$ - wzmacnianie BJT w stanie aktywnym [A/A]
C – pojemność [F]	I – natężenie prądu [A]
RC – stała czasowa [s]	V – napięcie [V]
P – moc [W]	$\eta$ – sprawność [%]

AAC - Augmentative and Alternative Communication, Komunikacja Wspomagająca i Alternatywna

PC – Personal Computer, komputer osobisty ogólnego przeznaczenia

PCB – Printed Circuit Board, płytka drukowana

THT – Through-Hole Technology, montaż przewlekany

SMT – Surface Mount Technology, montaż powierzchniowy

ESD – Electrostatic Discharge, wyładowanie elektrostatyczne

LED – Light Emitting Diode, dioda elektroluminescencyjna

BJT – Bipolar Junction Transistor, tranzystor bipolarny

PWM – Pulse Width Modulation, modulacja szerokości impulsu

IR – Infrared, podczerwień

USB – Universal Serial Bus

HID – Human Interface Devices

ADC – Analog to Digital Converter, przetwornik analogowo-cyfrowy

GPIO – General-Purpose Input/Output

UART – Universal Asynchronous Receiver-Transmitter, uniwersalny asynchroniczny nadajnik-odbiornik

UASRT - Universal Synchronous and Asynchronous Receiver-Transmitter, uniwersalny synchroniczny i asynchroniczny nadajnik-odbiornik

GUI – Graphical User Interface, graficzny interfejs użytkownika

CV – Constant Volatage, stałe napięcie

CC – Constant Current, stały prąd

LDO – Low Dropout Volatage Regulator, stabilizator z niskim spadkiem napięcia

SWD – Serial Wire Debug

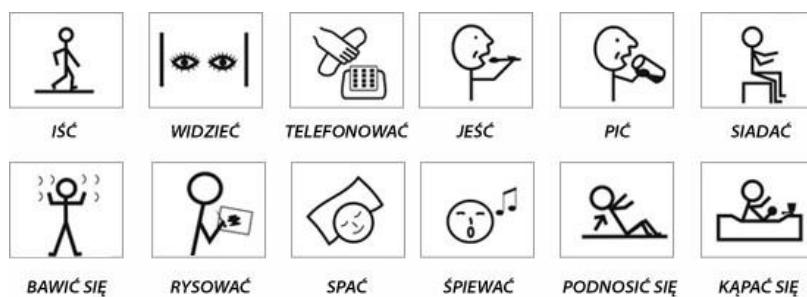
IDE - Integrated Development Environment, zintegrowane środowisko programistyczne

HSE – High Speed External

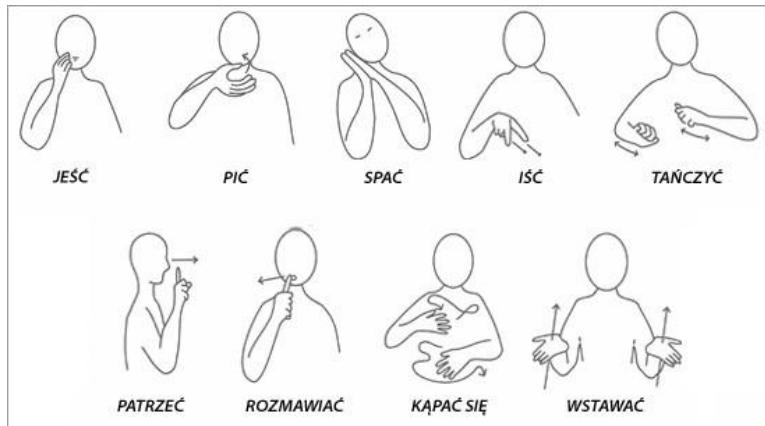
ESR – Equivalent series resistance, wartość rezystancji w modelu kondensatora lub cewki

# 1. WSTĘP I CEL PRACY

Potrzeba werbalnej komunikacji z innymi ludźmi jest rzeczą naturalną do której nie przykuwa się uwagi na co dzień. Daje ona możliwość wyrażenia uczuć, nawiązania nowych znajomości jak również przynależenia do grup w społeczeństwie. Niestety zdolność ta u niektórych osób może okazać się utrudniona lub wręcz niemożliwa. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest niepełnosprawność rozwojowa (np. autyzm, niepełnosprawność intelektualna, zespół Downa, mózgowe porażenie dziecięce) lub jest cechą nabytą (np. wylew, urazy rdzenia kręgowego, stwardnienie rozsiane, traumatyczne urazy mózgu) [1]. Dysfunkcja ta może okazać się frustrująca dla dorastającego dziecka, które chce przekazać innym ludziom co czuje i uczestniczyć z innymi w życiu społecznym. Zespół metod mających na celu pomaganie dzieciom z tym problemem nazywa się AAC (ang. Augmentative and Alternative Communication, komunikacja wspomagająca i alternatywna) [2]. Komunikacja wspomagająca odnosi się do wspomagania dziecka, u którego występuje jedynie zaburzenie mowy (np. przez dysfazję rozwojową). Do komunikacji wprowadza się gesty i symbole mające na celu rozwijać umiejętności komunikacji werbalnej. Elementy te wprowadzane są w trakcie komunikacji werbalnej (nie zastępują jej) aby komunikaty były bardziej zrozumiałe a u dziecka rozwijać umiejętności językowe. Komunikacja alternatywna natomiast przeznaczona jest dla osób które nie wykorzystują komunikacji werbalnej do porozumiewania się z ludźmi (np. afazja motoryczna) lub mają problemy z jej rozumieniem (np. autyzm) [3]. Forma AAC jest kwestią bardzo indywidualną. Zależy ona między innymi od: umiejętności poznawczych dziecka, czy dziecko słyszy, czy dziecko widzi, władzy nad kończynami, wieku [2]. Do komunikacji wykorzystuje się pictogramy, symbole, gesty, którym przypisuje się znaczenie a ich sekwencja jest odpowiednikiem zdań w komunikacji werbalnej [3].



Rys. 1.1. Przykład pictogramów w metodzie Makaton [4]



Rys. 1.2. Przykłady gestów w metodzie Makaton [4]

W dzisiejszych czasach obecność elektroniki w procesie rehabilitacji nie szokuje nikogo. Umożliwia ona zapewnienie większego bezpieczeństwa i czuwania nad podopiecznym, jak również zmniejszenie nakładu czasowego opiekuna na pojedynczego podopiecznego. Obcowanie pacjenta z komputerem może również być nowym bodźcem do rozwoju i udoskonalania technik alternatywnego porozumiewania się z ludźmi. Podczas pracy z komputerem użytkownik jest zmuszony do interakcji i podejmowania decyzji co jest elementem każdej formy porozumiewania się. Przykładem formy AAC może być wykorzystywanie programów okienkowych, których celem jest w przystępny sposób tworzenie skojarzeń piktogramów, gestów do czynności lub obiektów w życiu codziennym.

Celem niniejszej pracy jest stworzenie dedykowanego systemu niosącego pomoc niepełnosprawnym dzieciom w stymulowaniu ich rozwoju (nie ma być systemem przywołującym opiekuna).

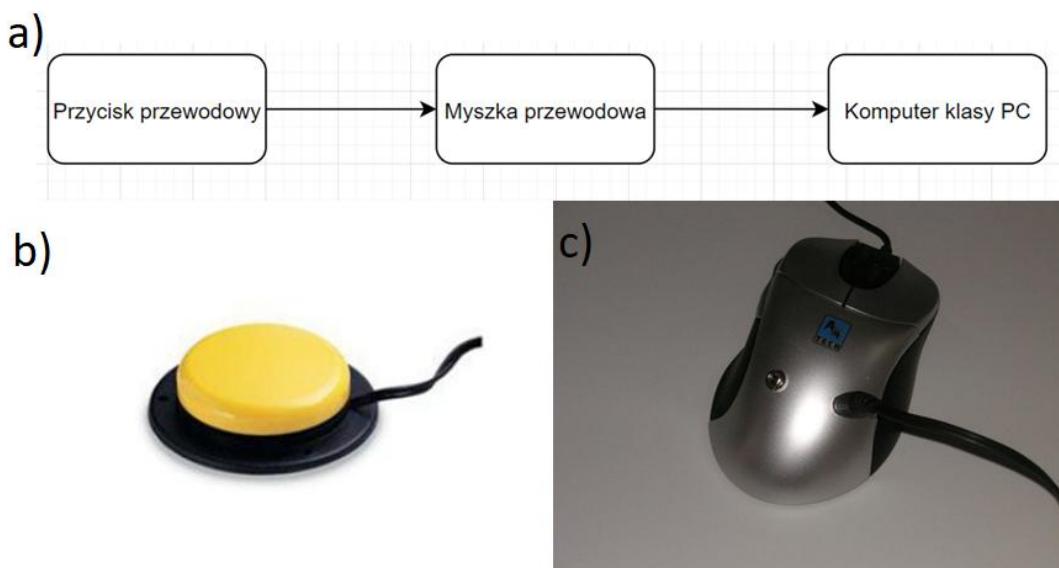
## 2. ANALIZA FUNKCJONALNA

Według Głównego Urzędu Statystycznego w 83,1% gospodarstw domowych w Polsce zamieszkiwanych przez co najmniej jedna osobą w wieku 16-74 lat, występował przynajmniej 1 komputer osobisty (2019 r.) [5]. Tak duża popularność komputerów klasy PC w komplecie z urządzeniami peryferyjnymi takimi jak monitor, klawiatura, myszka, sprawia, że tworzenie sprzętu dedykowanego pod konkretne rozwiązanie często jest nieopłacalne. W szczególności, jeżeli planuje się korzystać z tego rozwiązania sporadycznie. Komputery osobiste posiadają system operacyjny dzięki któremu wytwarzanie oprogramowania jest znacznie ułatwione, jak również umożliwia łatwą integrację urządzeń peryferyjnych z wykonywanymi programami. Nowoczesne komputery klasy PC posiadają na tyle dużą moc obliczeniową, że możliwe jest wykorzystywanie nowszych technologii (mniej optymalnych obliczeniowo) wytwarzania oprogramowania takich jak język Python, Java lub C#. Fakt ten sprawia, że tworzenie efektownych interfejsów graficznych użytkownika (programów okienkowych, GUI) w dzisiejszych czasach jest bardzo proste. Gdyby konieczne było stworzenie GUI bez wykorzystania komputera osobistego, należałoby dobrać do projektowanego systemu: wyświetlacz, sterownik wyświetlacza, mikrokontroler, który informowałby sterownik co narysować na wyświetlaczu w danym momencie, jak również element umożliwiający interakcję z użytkownikiem - przykładowo przycisk lub czujnik dotyku. Rozwiązanie takie stosuje się jedynie w przypadku kiedy powyżej wymieniony sprzęt elektroniczny wykorzystywany jest przez cały czas (przykładowo interaktywne tablice informacyjne), aby nie blokować w danym momencie dostępu do droższego, bardziej wszechstronnego w zastosowania - komputera klasy PC. Również projekt dedykowanego systemu może okazać się drogi a wręcz nieopłacalny przy produkcji małoseryjnej.

Przyrząd ten ma mieć formę pojedynczego przycisku a funkcjonalnie jego wcisnięcie ma powodować akcję lewego przycisku myszy lub przycisku na klawiaturze. Fakt występowania jednego przycisku w przyrządzie ma na celu wyeliminowanie problemu decyzji, który klawisz powinien zostać naciśnięty i ułatwić pracę dzieciom niewidomym. Urządzenie powinno łączyć się z komputerem osobistym bezprzewodowo optycznie, aby uniknąć przewodów które mogłyby rozpraszać podopiecznych w trakcie jego użytkowania. Aby zmotywować dziecko do lokalizacji i naciskania przycisku należy zadbać o takie elementy jak rozmiar, kolorystyka, podświetlenie i efekty świetlne. Trzeba pamiętać, że tworzone narzędzie ma być ergonomiczne dla dziecka więc wymiary jak i masa nie mogą być bardzo duże. Kontrastowa kolorystyka wraz z podświetleniem może pomóc

użytkownikowi w przykuciu jego uwagi i ustaleniu położenia przycisku. Istotne jest aby efekty świetlne nie miały zbyt dużej częstotliwości zmian intensywności światła, aby nie narazić użytkowników z epilepsją fotogenną na napad padaczkowy. Jasność podświetlenia i efektów świetlnych powinna być regulowalna za pomocą potencjometru jedynie przez opiekuna. System będzie przeznaczony do użytku w warunkach połowicznie kontrolowanych. Oznacza to, że opiekun będzie zobowiązany przygotować układ przed rozpoczęciem sesji rehabilitacyjnej jak również okresowo zbadać czy dziecko pracuje na nim prawidłowo. W celu zapewnienia bezpieczeństwa, założono zminimalizowanie efektu ostrych krawędzi na obudowie przycisku oraz naświetlania dziecka promieniowaniem podczerwonym do minimum. Przy założeniu komunikacji optycznej należało zadbać aby użytkownik omyłkowo nie zakłócił łączności z komputerem przez zasłonięcie toru optycznego, przykładowo ręką.

Mając sformułowane potrzeby jakie musi spełniać projektowany układ, zaobserwowano zbliżone rozwiązania rynkowe. Obiekty obserwacji były produkty ze strony <https://aac.netidea.pl/> z zakładki „właczni i interfejsy” (dostęp 15.05.2021r.). Tworzone rozwiązanie będzie ewolucją w stosunku do konkurencyjnych rozwiązań istniejących obecnie na rynku. Aktualne metody opierają się głównie na wykorzystaniu myszki przewodowej jako interfejsu pomiędzy komputerem klasy PC a przyciskiem. W tej konfiguracji przycisk jest połączony z myszką za pomocą przewodu a myszka jest specjalnie przerobiona pod tą funkcjonalność tj. posiada specjalne złącze na obudowie.



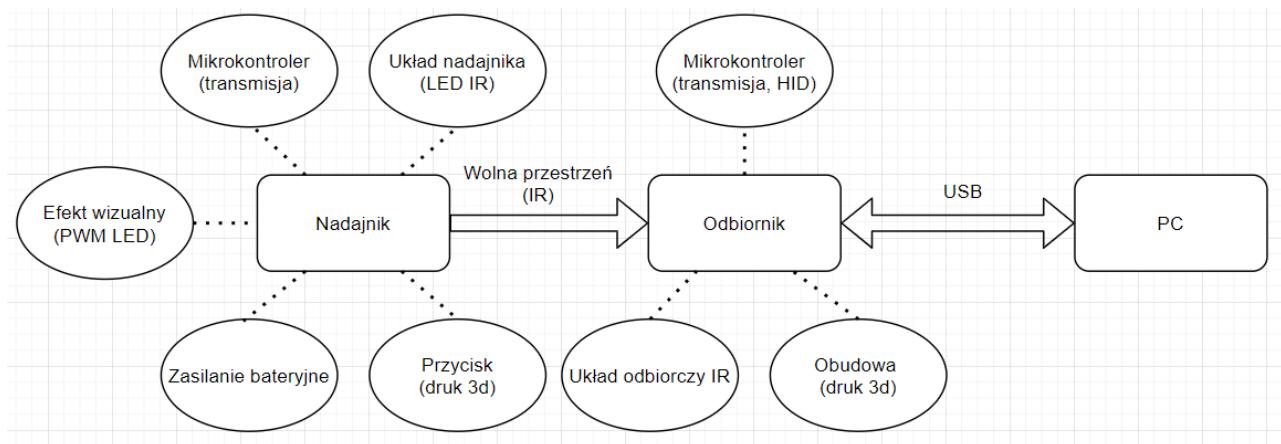
Rys. 2.1. a) schemat rozwiązania konkurencyjnego b) konkurencyjny przycisk „JELLY BEAN” c) zmodyfikowana myszka „MYSZ DO SWITCHY” [6]

Na stronie internetowej występują również przyrządy z 2 przyciskami. Widoczny przewód przy przycisku może przykuwać uwagę użytkowników w trakcie sesji rehabilitacji, tym samym przeszkadzając w jej prowadzeniu. Tworzone rozwiązanie będzie pozbawione tego problemu, jak również w większym stopniu ma pobudzać zainteresowanie u niepełnosprawnego dziecka do pracy z przyciskiem poprzez kontrastową kolorystykę i podświetlenie. Ponadto konkurencyjne rozwiązania należą do kosztownych - koszt przycisku zamieszczonego na rysunku to 349zł a koszt dedykowanej myszki 59zł.

### 3. KONSTRUKCJA SYSTEMU

#### 3.1. KONCEPCJA

Po zapoznaniu się z problematyką niniejszej pracy i przeglądzie rozwiązań rynkowych, ustalono najpierw wstępna koncepcję co zostanie opisane w niniejszym rozdziale. Podzielono cały system na elementy (urządzenia), przypisano im funkcje a następnie połączono je ze sobą. Sposób połączenia również został uwzględniony – kierunek transmisji, jak również jej metoda.



Rys. 3.1. Schemat ideowy projektowanego systemu

Na rysunku zaoblone prostokąty przedstawiają główne części systemu (elementy, urządzenia), elipsy – elementy funkcjonalne (elementy odpowiedzialne za daną funkcjonalność, cechy) wchodzące w skład poszczególnej części, przypisane do niej poprzez kropkowaną linię. Podwójna strzałka mówi o komunikacji obustronnej między pojedynczymi częściami systemu a pojedynczą jednostronnej. Cały interfejs podzielono na dwa urządzenia tj. na nadajnik i odbiornik. Oba elementy będą komunikować się między sobą jednokierunkowo (nadajnik będzie wysyłał symbole do odbiornika) poprzez promieniowanie optyczne z zakresu bliskiej podczerwieni w wolnej przestrzeni propagacyjnej. Symbole będą miały formę zmodulowanej wartości cyfrowej. Zostaną one dobrane w taki sposób aby zminimalizować szansę zaburzenia pracy systemu przez inne urządzenia wykorzystujące

łączność optyczną, jak również możliwe nie zakłócać pracy pozostałych urządzeń. Odebrane komunikaty przez odbiornik będą przetwarzane i wysyłane do komputera osobistego poprzez dwukierunkowe połączenie interfejsem USB. Dodatkowym założeniem łączności bezprzewodowej są warunki, w których będzie się ona odbywać tj. zakłada się użytk wyłącznie w pomieszczeniu na odległość do maksymalnie 1 metra i oba urządzenia powinny leżeć całą dolną powierzchnią na biurku. W tych okolicznościach poprawne działanie będzie gwarantowane. Planuje się, żeby urządzenie zostało automatycznie wykryte przez system operacyjny „Windows 10” i było gotowe do pracy bezpośrednio po podłączeniu włączonego odbiornika (będzie widoczne przez system operacyjny jako mysz lub klawiatura). Do realizacji obu urządzeń zostaną zaprojektowane i wyprodukowane obwody drukowane (PCB, Printed circuit board) do których zostaną przylutowane wszystkie komponenty elektroniczne. Obudowy obu elementów zostaną wydrukowane z użyciem drukarki 3D. Aby podłoże powierzchni zewnętrznej przedmiotów nie ślizgało się po biurku (ze względu na gładką powierzchnię wydrukowanych komponentów w technologii 3D), rozważane jest zastosowanie doklejonej do podstawy maty antypoślizgowej lub gumowych podkładek.

Nadajnik będzie miał formę przenośnego, obudowanego przycisku z elementem wciskanym na górnej powierzchni a w środku będzie znajdować się zaprojektowana elektronika. Aby urządzenie było ergonomiczne dla dziecka, starano się nie przekroczyć wymiarów 9x6x4cm, co może być ograniczone przez objętość elektroniki umieszczonej w środku. Preferowanym kształtem bryły przedmiotu byłby prostopadłościian z zaoblonymi krawędziami. Aby układ był w stanie wysłać sekwencję bitów wchodzących w skład przesyłanego symbolu (ramki danych), planowane jest wykorzystanie mikrokontrolera (komputera jednoukładowego). Jest to tanie i relatywnie proste rozwiązanie, ze względu na łatwość wprowadzania ewentualnych zmian w systemie za pomocą oprogramowania. Układ nadajnika podczerwieni musi również się znaleźć w urządzeniu, ponieważ wyprowadzenia mikrokontrolera nie będą w stanie wytworzyć wystarczająco dużej mocy, a same piny mogłyby ulec uszkodzeniu. Element ten zostanie zaprojektowany z użyciem tranzystorów, których zadaniem będzie wzmacnienie sygnału diod elektroluminescentycznych podczerwieni. Aby uniknąć sytuacji, w których dziecko przysłania diodę podczerwieni, projektowany przyrząd będzie posiadał 3 diody emitujące promieniowanie optyczne na bocznych ścianach. Zrezygnowano z 4 ścianki aby minimalizować efekt promieniowania w kierunku użytkownika a przednia ściana będzie wyróżniona znakiem rozpoznawczym. Założono, że fakt występowania wielu źródeł sygnału nie wpłynie negatywnie na transmisję. Fakt występowania w nadajniku komputera jednoukładowego daje możliwość stworzenia efektu świetlnego poprzez wyjścia generujące sygnał PWM. Daje to sposobność zmiany intensywności generowanego promieniowania w czasie. Program (efekt) wykonywałby się przez cały czas i informowałby użytkownika o tym, że przyrząd jest włączony. W skład efektu

wystąpią tranzystory wzmacniające sygnał i diody elektroluminescencyjne dużej mocy w kolorze czerwonym, zielonym i niebieskim. Są to kolory podstawowe, z których w teorii możliwe jest uzyskanie dowolnej barwy poprzez mieszanie addytywne. Promieniowanie widzialne uwalniałoby się z przyrządu poprzez element przezroczysty obudowy lub szczelinę między jej składnikami. Wymagane jest aby nadajnik był elementem bezprzewodowym, żeby przewód nie rozpraszał dziecka. Przez to jakakolwiek forma zasilania sieciowego w tym przypadku będzie niewłaściwa i wprowadza to konieczność występowania w układzie zasilania baterijnego lub akumulatorowego. Wybór zasilania baterijnego wprowadzi potrzebę kupna i wymiany baterii przez użytkownika, jak również konieczny byłby łatwy dostęp do baterii aby ułatwić ich wymianę, co mogłoby skomplikować projekt obudowy. Dodatkowo przez wykorzystywane podświetlenie pobór prądu może okazać się znaczący w zależności od nastawy potencjometru i sięgać nawet 500mA. Przy zasilaniu akumulatorowym konieczny będzie dobór typu ogniska i pojemności, jak również zaznajomienie się z ich parametrami i charakterystykami. Możliwe jest również łączenie pojedynczych akumulatorów w pakiety, aby osiągnąć wyższe napięcie przy połączeniu szeregowym lub większą pojemność i wydajność prądową przy połączeniu równoległym. Sposób ładowania i rozładowywania w niektórych rodzajach akumulatorów powinien być nadzorowany przez elektronikę aby nie doprowadzić do jego uszkodzenia lub eksplozji. Wygodą wyboru zasilania akumulatorowego są ogólnie dostępne, tanie moduły ładowarek z popularnymi złączami Micro USB lub USB C. W celu naładowania ogniska należy podpiąć przewód i obserwować kolor świecącej diody. Posiadają one najczęściej ochronę przed: nadmiernym rozładowaniem i naładowaniem, dopuszczalną wartością prądu ładowania i rozładowywania. Aby możliwe było wyłączenie zasilania zostanie umieszczony przełącznik, który nie będzie nadmiernie wystawać poza obrys tworzonego przedmiotu. Będzie jednak możliwość szybkiego otwarcia obwodu zasilania przez opiekuna w przypadku zaobserwowania nieprawidłowości w działaniu urządzenia (przykładowo patologiczne nagrzewanie się lub wyczucie niepokojącego zapachu). Na obudowie będzie się również znajdował potencjometr schowany poza obrys urządzenia regulujący jasność podświetlenia i diody LED sygnalizujące status ładowania.

Forma wizualna odbiornika jest również istotną kwestią. W trakcie korzystania z systemu, element ten nie powinien przykuwać uwagi użytkownika, aby nie odwracać uwagi dziecka od pracy. Dlatego najlepiej, żeby element był niewielki a przewód łączący go z komputerem możliwie najbardziej ukryty. Obudowa odbiornika będzie wykonana w kolorze czarnym, aby go zakamuflować. Zewnętrzna warstwa będzie miała funkcję ochrony elektroniki przed wyładowaniem elektrostatycznym (ESD, Electrostatic Discharge), które nieodwracalnie uszkodziłoby zaprojektowany układ. Planowane jest aby był on umieszczony pod monitorem lub w przypadku korzystania z laptopa – obok niego, ewentualnie na jego

klawiaturze. Aby odbiornik miał możliwość odebrania komunikatów od nadajnika potrzebuje układu odbiornika podczerwieni. Jego zadaniem będzie przekształcenie sygnału optycznego z otoczenia w sygnał elektryczny (ewentualnie wyciągnięcie zabezpieczonej informacji przez demodulację) i przekazanie widomości do układu decyzyjnego. Rozważane jest zastosowanie scalonego układu odbiornika podczerwieni lub zaprojektowanie dedykowanego układu przetwornika prąd-napięcie. Układ decyzyjny musi ustalić czy otrzymana sekwencja bitów jest ustalonym symbolem, po którym ma zostać wysyłany przez USB do komputera klasy PC sygnał wycisnienia przycisku. Podobnie jak w przypadku nadajnika najbardziej opłaca się skorzystać z mikrokontrolera biorąc pod uwagę koszty i trudności implementacji. Preferowane byłyby modele mikrokontrolerów, które posiadają wbudowany układ peryferyjny USB w pojedynczym układzie scalonym. Jest również możliwość użycia zewnętrznego interfejsu USB w osobnym układzie scalonym, jednak zwiększyłoby to skomplikowanie układu a wymiary płytki PCB uległyby powiększeniu. Fakt wykorzystywania interfejsu USB rozwiązuje problem zasilania urządzenia, ponieważ w przewodzie USB znajduje się para linii odpowiedzialnych za zasilanie urządzeń peryferyjnych. Najbardziej popularnym złączem w komputerach osobistych jest USB 2.0, które jest w stanie dostarczyć nawet 0,5A przy 5V (nowsze standardy gwarantują jeszcze wyższe maksymalne natężenie prądu). Przewiduje się, że zaprojektowane urządzenie nie będzie konsumowało dużej ilości prądu, nie więcej niż 100mA. Odbiornik nie będzie potrzebował wyłącznika, ponieważ możliwe będzie odłączenie zasilania poprzez odpięcie przewodu USB. Natomiast przydatną cechą byłby wskaźniki informujące opiekuna podczas uruchamiania przyrządu o prawidłowym podłączeniu z komputerem osobistym, jak również tester łączności nadajnika z odbiornikiem. Informacje te mogłyby nieść diody LED umieszczone z tyłu obudowy, świecące z niewielką mocą optyczną.

## 3.2. NADAJNIK

W poprzednim podrozdziale została przedstawiona wstępna koncepcja na wykonanie nadajnika. W tej części pracy zostanie szczegółowo zaprezentowane, w jaki sposób zaprojektowano elektronikę do tego urządzenia. Bazując na koncepcji wykonano badania, które pomogły w wyborze komponentów elektronicznych. W programie komputerowym wspomagającym projektowanie „KiCad 5.1.4”, zastąpiono części symbolami i połączono je tworząc schemat elektryczny. Znając obudowy komponentów, przypisano symbolom pady lutownicze. Następnie opracowano projekt płytki drukowanej i wyprodukowano ją. Podczas wyboru fizycznych elementów, zwrócono uwagę aby były one wykonane w technologii SMT (Surface-Mount Technology, montaż powierzchniowy). Zwiększa to wybór elementów elektronicznych, jak również w przypadku dalszej pracy nad projektem – umożliwia automatyzację produkcji układów. Zastosowanie tego typu komponentów powoduje zmniejszenie powierzchni płytka co zmniejsza koszty jej wyprodukowania, ale też zmniejszenie ilości otworów w płytce. Duża liczba otworów na warstwie masy może pogorszyć właściwości elektryczne urządzenia, ponieważ sygnał musi pokonać dłuższą drogę co zwiększa rezystancję i indukcyjność połączeń. Aby ułatwić proces lutowania zostaną wykorzystane kondensatory i rezystory w relatywnie sporej obudowie 1206.

### 3.2.1. ZASILANIE

---

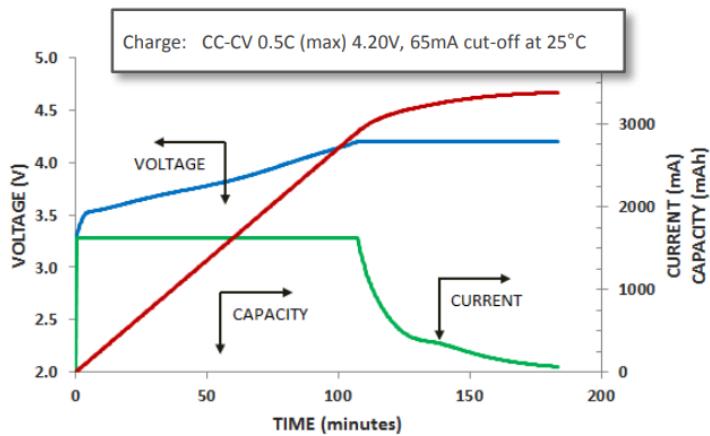
Finalnie zdecydowano się na wykorzystanie zasilania akumulatorowego, aby czynności obsługowe pochłaniały właścicielowi jak najmniej czasu. Zasilanie baterijne wymagałoby od opiekuna częstej wymiany i sprawdzania poziomu naładowania baterii. W przypadku akumulatora trzeba okresowo go ładować a wymiany przypadają znacznie rzadziej. Skorzystano z pojedynczego ogniw litowo-jonowego NCR18650B firmy Panasonic. Akumulator posiada bezpieczną wydajność prądową na poziomie 6,7A, co jest dużym zapasem w projektowanym urządzeniu. Pojedyncze ogniwko posiada pojemność 3250mAh przy napięciu nominalnym 3,6V (wartość napięcia mieści się w granicy od 2,5V do 4,2V - rysunek).



Rys. 3.2. Ogniwo NCR18650B firmy Panasonic

Ładowanie tego typu akumulatora powinno mieć formę CC-CV (Constant Current – Constant Voltage). Oznacza to, że najpierw należy ładować akumulator stałą wartością natężenia prądu do 0,5C (1625mA; 1C odpowiada wartości pojemności ogniwa w mAh a jednostkę zmienia się na mA, czyli 3250mA), aż zostanie osiągnięte napięcie 4,2V na zaciskach elementu. Następnie należy utrzymywać stałą wartość napięcia 4,2V aż wartość prądu spadnie do wartości progowej 65mA.

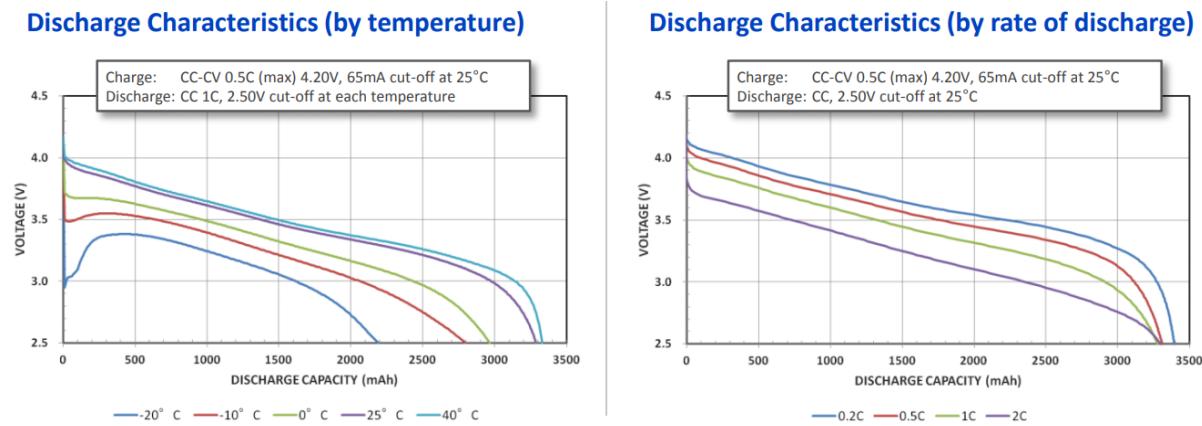
### Charge Characteristics



Rys. 3.3. Charakterystyka ładowania NCR18650B [7]

Na obrazku widać, że 2 faza ładowania (CV) nie znacząco zwiększa pojemność a trwa stosunkowo długo. Pojemność ogniwa spada w przybliżeniu liniowo wraz z liczbą cykli

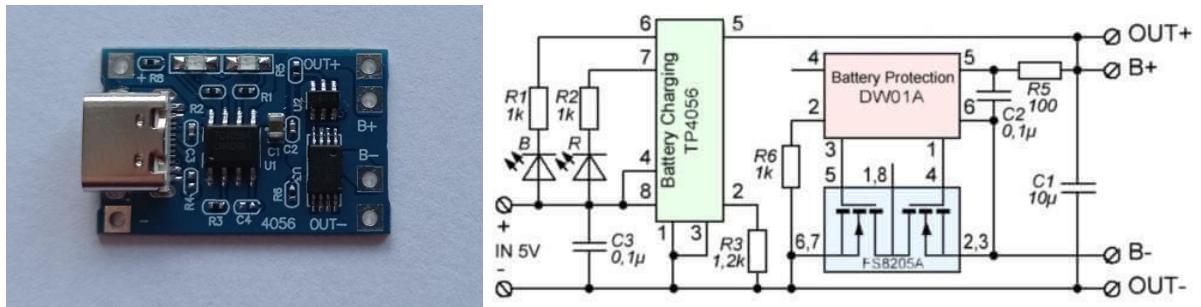
(pojedynczy cykl to maksymalne rozładowanie przy 2,5V i naładowanie maksymalnej pojemności przy 4,2V) i przy 500 cyklu pojemność zmniejsza się do wartości około 2300mAh – co daje średnią utratę pojemności na poziomie 1,9mAh przy pojedynczym cyklu. Proces ładowania NCR18650B trwa około 4 godziny przy maksymalnym prądzie ładowania 0,5C [7].



Rys. 3.4. Charakterystyki wyładowania NCR18650B [7]

Na wykresach można zauważać prawidłowość, że napięcie na baterii rośnie wraz z temperaturą otoczenia a zmniejsza się ze wzrostem poboru prądu. W przypadku nadajnika zakłada się, że natężenie prądu nie będzie przekraczać 0,2C (650mA) w temperaturze pokojowej. Analizując przebiegi „Discharge Characteristics (by rate of discharge)” przewidziano, że charakterystyka ogniva w docelowym urządzeniu znajduje się ponad 4 narysowanymi przykładami – będzie występował mniejszy spadek napięcia. Jego redukcja będzie zależna od nastawy potencjometru regulującego natężenie podświetlenia.

Niewłaściwie zaimplementowany akumulator litowo-jonowy może spowodować uszkodzenie a nawet eksplozję baterii. Aby do tego nie doprowadzić został zastosowany gotowy moduł ładowarki. Jest on oparty na 3 układach scalonych: ładowarce TC4056A, zabezpieczeniu DW01A i parze tranzystorów unipolarnych z kanałem wzbogacanym typu N FS8205A.



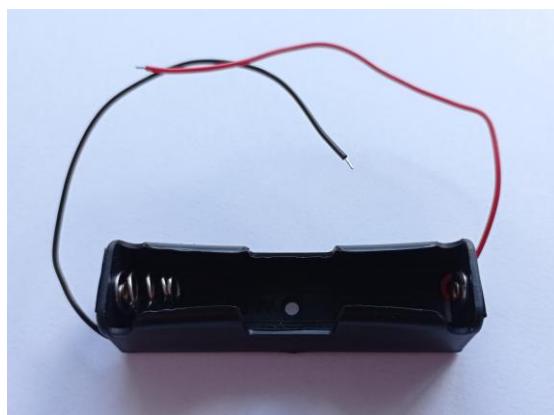
Rys. 3.5. Ładowarka ogniw litowo jonowego z jej schematem [8]

Ładowarka ma za zadanie utrzymać formę ładowania CC-CV. Dodatkową funkcją, którą posiada jest tryb wstępniego ładowania o zmniejszonej wartości natężenia prądu występujący przed trybem CC (ładowanie 1/10 prądu ładowania CC przez około 10min). Ma to na celu zwiększenie żywotności ogniw. Prąd ładowania można modyfikować poprzez rezystor R3 o wartości 1,2kΩ, który odpowiada prądowi ładowania 1A (podczas fazy CC) [9]. Natężenie prądu wyrażone w amperach można modyfikować zgodnie z wzorem:

$$I_{\text{lad}} = V_{\text{prog}} / R_3 * 1200 \text{ [A]} \quad (3.1)$$

Wartość  $V_{\text{prog}}$  w fazie wstępniego ładowania ma stałą wartość 0,1V a podczas CC 1V. Tryb CV zaczyna się w momencie osiągnięcia napięcia 4,2V z precyją 1,5% a kończy się w momencie spadku natężenia prądu do wartości 1/10 prądu ładowania z trybu CC. Kondensator C3 ma funkcję odprzegania zasilania, w celu zapewnienia stabilnej pracy układu. Diody R i B wraz z rezystorami ograniczającymi prąd R1 i R2 sygnalizują proces ładowania (czerwony zapalone – w trakcie ładowania, niebieski – naładowane). Poza poprawną formą ładowania akumulatora litowo-jonowego, ważną funkcje spełnia układ zabezpieczający. Wyprowadzenia B+ i OUT+ są zwarte, posiadają wspólny potencjał, co jest faktem odróżniającym od pary B- i OUT-. Ujemne terminale płytka ładowarki są separowane poprzez parę tranzystorów, które są załączane przez decyzje układu DW01A. W ten sposób ogniwu jest odłączane od ładowania lub obciążenia co zapobiega nadmiernemu naładowaniu (wartość progowa 4,3V jest dodatkowym zabezpieczeniem, gdyż sama ładowarka nie ładuje powyżej poziomu 4,2V), rozładowaniu (2,5V) i chroni przed zbyt dużym prądem rozładowującym lub ładującym [10]. Natężenie prądu jest mierzone poprzez spadek napięcia na parze tranzystorów, które jest wytwarzane przez płynący przez nie prąd. Rezystor R6 ma zadanie chronić układ przed wyładowaniami elektrostatycznymi. Para rezistor R5 i kondensator C2 tworzy filtr dolnoprzepustowy mający na celu wygładzenie przebiegu napięcia baterii w czasie, aby nie wzbudzać niepotrzebnie zbyt często zabezpieczeń. Kondensator C1 ma za zadanie wygładzić przebieg napięcia, który jest podłączony

bezpośrednio do obciążenia. Moduł ładowarki wybrano ze złączem ładującym USB C. Charakteryzuje się ono możliwością podłączenia przewodu ładującego na 2 sposoby co jest udogodnieniem podczas czynności obsługowych. Do procesu ładowania wymagany będzie przewód w standardzie USB C wraz z ładowarką sieciową o napięciu wyjściowym 5V i rekomendowanym maksymalnym prądem 2A. Diody w technologii SMT znajdujące się na PCB ładowarki zostały zastąpione odpowiednikami (jednakowe kolory) w technologii THT (Through-Hole Technology, montaż przewlekany) o średnicy 5mm. Moduł ładowarki wraz z diodami LED zostaną wklejone do obudowy. Akumulator litowo-jonowy nie powinien być intensywnie podgrzewany, co uniemożliwia połączenie ogniw z ładowarką za pomocą przylutowanych przewodów. Problem ten rozwiązano stosując koszyk dedykowany do baterii 18650. Tworzy on trwałe połączenie rozłączalne ogniw z wyprowadzonymi przewodami zewnętrznymi przy użyciu sprężyny.



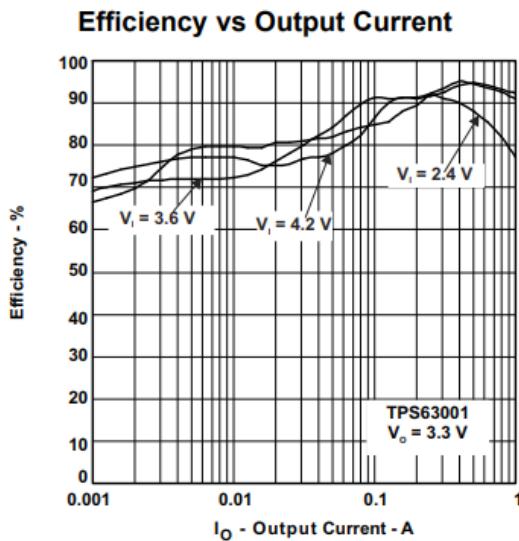
Rys. 3.6. Koszyk na ognisko 18650

Najpierw przylutowano przewody koszyka do płytka ładowarki zwracając szczególną uwagę na polaryzację (tj. wyprowadzenie B+ do czerwonego przewodu dodatniego a B- do czarnego przewodu ujemnego), po czym włożono we właściwym kierunku akumulator do koszyka. Polaryzacja przewodów i baterii została zilustrowana wewnątrz obudowy koszyka. Przewody przylutowano do wyprowadzeń OUT+ i OUT- a następnie połączono je złączem przykręcany z obciążającą akumulator płytka drukowaną nadajnika. Między połączeniem OUT+ a obwodem drukowanym nadajnika umieszczono przełącznik, którego funkcją jest włączanie i wyłączanie urządzenia. Przełącznik ten zostanie wklejony w obudowę przycisku.

Z rysunku charakterystyki rozładowywania akumulatora litowo-jonowego można zaobserwować, że napięcie na zaciskach ogniw nie jest stałe w czasie przy występowaniu obciążenia. W przypadku układów z diodami elektroluminescencyjnymi, sytuacja może

powodować zależność mocy promieniowania od stanu naładowania ogniska. Dla diod LED o wysokim progu napięciowym przy którym dochodzi do przewodzenia prądu (przykładowo diody emitujące kolor biały, niebieski lub zielony), zbyt niskie napięcie zasilania może spowodować zaprzestanie ich funkcjonowania. Przed wykorzystaniem mikrokontrolera należy zbadać czy zakres jego dopuszczalnego napięcia zasilania zawiera się w zakresie napięcia akumulatora.

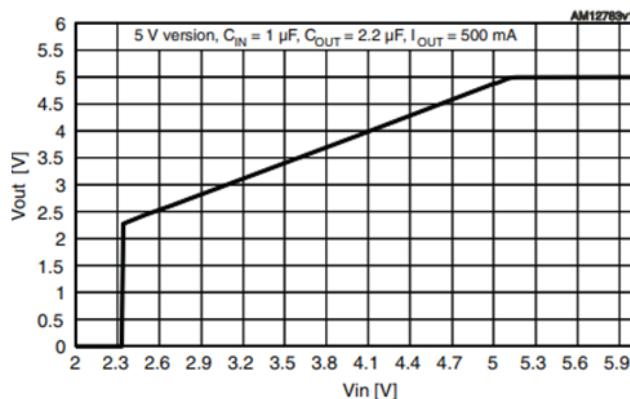
Przy pierwszej próbie rozwiązania tego problemu próbowało skorzystać z przetwornicy buck-boost zawartej w układzie scalonym TPS63001DRCR (można to zaobserwować na zdjęciu prototypu w podrozdziale poświęconym PCB). Układ ten miałby za zadanie utrzymać w sposób stały zadaną wartość napięcia wyjściowego 3,3V tj. w przypadku niższego napięcia wejściowego od zadanego, powodowałoby podwyższenie napięcia a w przypadku zbyt wysokiego jego obniżenie. Wybrany element do pracy potrzebuje zasilania w przedziale 1,8V-5,5V. Rozwiązań te wymaga wykorzystania większej ilości zewnętrznych komponentów co powodowałoby większe skomplikowanie przy projektowaniu obwodu drukowanego. Rozwiązań te również nie należy do najtańszych. Korzystając z wykresu umieszczonego w nocie katalogowej przy prądzie w granicach 50-500mA można założyć sprawność na poziomie około 80-90% [11].



Rys. 3.7. Charakterystyka sprawności układu TPS63001DRCR w zależności od poboru prądu [11]

Powodem przez który zrezygnowano ze skorzystania z przetwornicy impulsowej była zbyt mała obudowa VSON10. Wymiary wraz z wyprowadzeniami bez nóżek sprawiały trudności podczas procesu lutowania i uruchamiania układu.

Ostatecznie skorzystano ze stabilizatora z niskim spadkiem napięcia (LDO, Low Dropout Voltage Regulator) LDF33PT-TR. Jego zadaniem jest przetworzenie wejściowego napięcia na zadane napięcie wyjściowe o stałej wartości 3,3V. Gdy na wejściu występuje napięcie około 2,3-3,5V to maksymalna różnica potencjałów między wyjściem a wejściem stabilizatora to około 0,2V a jego dokładna wartość jest zależna od obciążenia stabilizatora. Poniżej tego zakresu sygnał wyjściowy spada do 0V a powyżej utrzymuje wartość 3,3V.



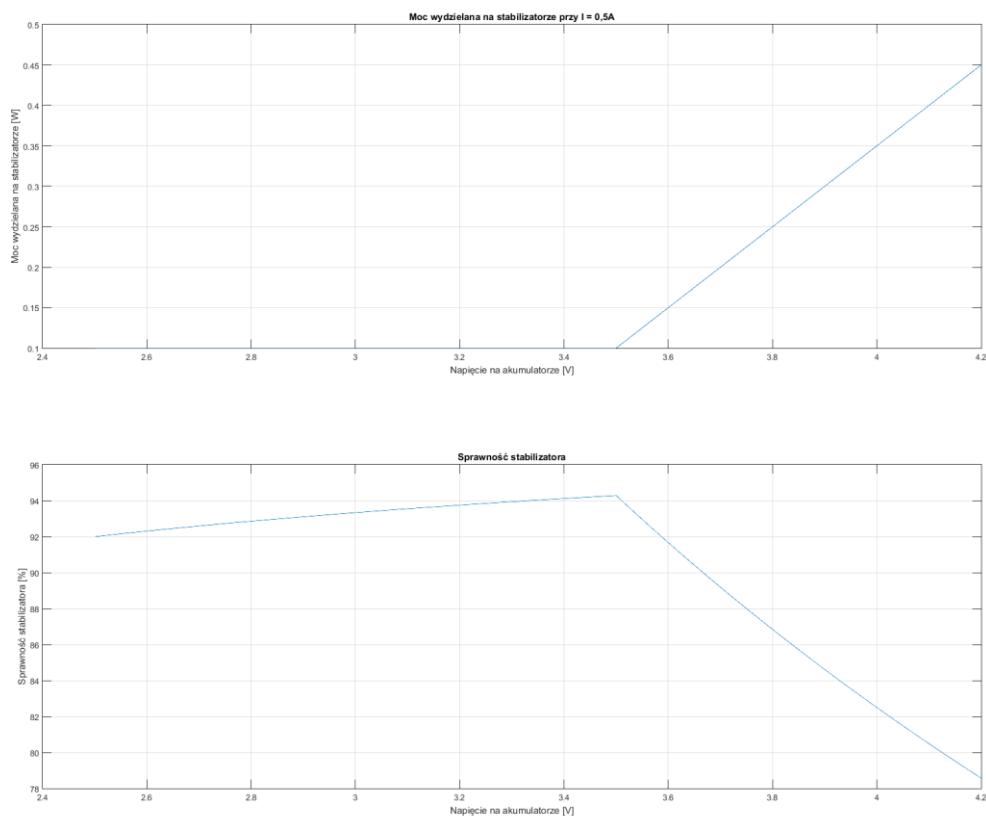
Rys. 3.8. Charakterystyka napięcia wyjściowego układu LDF33PT-TR w zależności od napięcia wejściowego [12]

$$P = U * I \text{ [W]} \quad (3.2)$$

$$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} [\%] \quad (3.3)$$

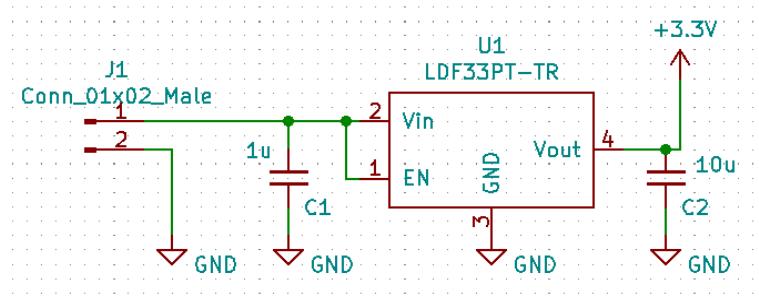
$$\eta = U_{\text{out}} / U_{\text{in}} [\%] \quad (3.4)$$

Komponent ma wydajność prądową 1A [12]. Jest to natężenie prądu dobrane z dużym zapasem, gdyż trudno było przewidzieć jaka moc umożliwi otrzymanie satysfakcyjnej intensywności promieniowania optycznego przy efekcie świetlnym. Moc wydzielana podczas przepływu prądu przez stabilizator na którym występuje spadek napięcia jest zamieniana w ciepło zgodnie ze wzorem (3.2). Iloczyn spadku napięcia na elemencie U w voltach i prądu przepływającym przez niego I w amperach daje wynik mocy wydzielanej na regulatorze P w watach. Sprawność można policzyć z użyciem wzoru (3.3). Przy jednakowym prądzie wzór na sprawność sprowadza się do (3.4). W najbardziej krytycznym przypadku tj. po pełnym naładowaniu do 4,2V wydzielana moc jest najwyższa (4,2-3,3)\*I, co daje przy prądzie 0,5A moc na poziomie 0,45W i sprawność 79%. Napięcie te szybko spada a nominalna (średnia) wartość 3,6V akumulatora wprowadza moc 0,15W i sprawność 92%. Najkorzystniejsza wartość napięcia to 3,5V będąca równoznaczna mocy 0,1W i sprawności 94%.



Rys. 3.9. Charakterystyki mocy wydzielanej i sprawności LDF33PT-TR od napięcia wejściowego

Układ został zamówiony w obudowach PPAK z 5 wyprowadzeniami. Pin Enable (EN) został na stałe podpięty pod zasilanie (VCC), aby uzyskać stan wysoki i urządzenie było zawsze uruchomione połączenie nadajnika. Wyprowadzenie Power Good nie zostało podłączone do innego węzła w obwodzie nadajnika. Jest to wyjście przeznaczone do układów zasilania w komputerach, informujące płytę główną o stanie zasilania, umożliwiając uruchomienie i operowanie PC. Zgodnie z zaleceniami w nocy katalogowej przyrządu wykorzystano 2 kondensatory ceramiczne – na wejściu w funkcji odprzegającej  $1\mu F$  a na wyjściu  $10\mu F$  zapewniający stabilność stabilizatora.



Rys. 3.10. Schemat zasilania nadajnika

### 3.2.2. MIKROKONTROLER

Aby możliwe było wysłanie komunikatu przez nadajnik do odbiornika w postaci sekwencji bitów, zdecydowano się na wykorzystanie mikrokontrolera. Za pomocą oprogramowania możliwe jest wystawianie stanów logicznych na wyprowadzeniach mikrokontrolera w zaplanowany sposób formując przesyłaną wiadomość. Dodatkowo przyrząd ten posiada wewnątrz pojedynczego układu scalonego dodatkowe układy peryferyjne ułatwiające prace projektantowi np. liczniki lub interfejsy komunikacyjne. Jest to rozwiązanie stosunkowo proste w implementacji i wygodne w trakcie prototypowania. Zaletami tego wyboru jest łatwość dodawania nowych funkcjonalności, usprawnień lub modyfikacja działania poprzez zmianę oprogramowania. Atrakcyjna cena jest również atutem. Tworzenie układów elektronicznych opartych na mikroprocesorach wymaga zachowania szczególnej uwagi podczas projektowania obwodu drukowanego. Fakt występowania mikrokomputera jednoukładowego w nadajniku umożliwiło dodatkowo stworzenie efektu świetlnego.

Przy wyborze modelu mikrokontrolera kierowano się, aby był on z serii STM32 firmy STMicroelectronics. Podyktowane jest to znajomością procesu projektowania układów z ich użyciem, programów komputerowych wspomagających proces wytwarzania oprogramowania i interfejsu do komunikacji z PC. Przez fakt występowania zasilania akumulatorowego stawiano na modele charakteryzujące się obniżonym zużyciem prądu. Zakres napięcia pracy mikrokontrolera musi obejmować wszystkie możliwe wartości napięcia dostarczane przez układ zasilania 2,3-3,3V. Do pracy efektu świetlnego wymagane są 3 wyprowadzenia z wyjściem generującym sygnał PWM. Mikrokontroler będzie miał możliwość regulowania współczynników wypełnienia sygnałów, co w przypadku sterowania diodami LED może powodować odczuwalną zmianę intensywności emitowanego promieniowania. Regulacja jasności podświetlenia będzie sterowana poprzez potencjometr podłączony do

wyprowadzenia wewnętrznego przetwornika analogowo-cyfrowego (ADC). ADC przetwarza napięcie na wyprowadzeniu z postaci analogowej (ciągły zakres wartości z czasem ciągłym) na postać cyfrową (dyskretny zbiór wartości z dyskretnym czasem). W nadajniku odczytana wartość cyfrowa będzie decydować o wypełnieniu sygnałów PWM. Funkcjonowanie przycisku wymaga 1 pinu z funkcją przerwania zewnętrznego. Dobierano układ scalony, aby posiadał wystarczającą ilość pamięci RAM i programu. Motywowane niskim zużyciem powierzchni na płytce drukowanej, starano się wybrać możliwie niewielką obudowę. Finalnie zwrócono uwagę na cenę produktu. Powstrzymano się do zakupu układu scalonego z dodatkowymi układami peryferyjnymi lub większą liczbą wyprowadzeń niż jest to potrzebne, gdyż generuje to dodatkowe koszty projektu.

Wybrano mikrokontroler STM32L011F4P6, ponieważ spełnia on wszystkie powyższe wymagania. Przyrząd posiada szeroki zakres napięcia zasilania 1,65-3,6V, przy którym jego prawidłowe funkcjonowanie jest gwarantowane. Zasilanie akumulatorowe przyczyniło się do wyboru energoszczęsnej serii L0. Mikrokontroler posiada licznik TIM2, który umożliwia wygenerowanie na 4 wyprowadzeniach sygnału PWM, nie kolidując przy tym z innymi wymaganymi od urządzenia funkcjami. Przyrząd posiada 12-bitowy przetwornik analogowo-cyfrowy z 9 kanałami zewnętrznymi. Oznacza to, że przy stałym napięciu zasilania 3,3V, urządzenie będzie w stanie badać napięcie na wyprowadzeniu z dokładnością do około 800uV. Wejścia z przerwaniem zewnętrznym występują na każdym terminalu układu poza pinami z zarezerwowanymi funkcjami - VDD, VDDA, VSS, BOOT0, NRST. Pojemność pamięci RAM na poziomie 2kB i programu 16kB [13] uznano za wystarczającą do napisania programu na mikrokontroler, który spełniałby wszystkie wymagania sterowania. Komunikacja z komputerem osobistym odbywać się będzie poprzez interfejs SWD (Serial Wire Debug). Opiera się on na 4 liniach: linii danych SWDIO, zegarowej SWCLK, resetu NRST i odniesienia (masy) GND. Linia resetu nie jest wymagana z faktu, że jest możliwość zresetowania układu poprzez zmianę wartości rejestru mikrokontrolera. Wybrano obudowę z 20 wyprowadzeniami TSSOP20. Dodatkowym wyróżnikiem tej gałęzi produktów jest niedrogi programator ST-LINK/V2, który jest zawarty w każdej płytce deweloperskiej NUCLEO64.

W rzeczywistych obwodach elektrycznych występują takie elementy pasożytnicze jak: rezystancja wewnętrzna źródła zasilania, rezystancja i indukcyjność ścieżek na płytce drukowanej (połączeń) oraz pojemności. Gdyby nie powyższe czynniki, w większości przypadków odprzęganie zasilania nie byłoby potrzebne (mogą również wystąpić zakłócenia zewnętrzne). Zmienna wartość natężenia prądu pobierana ze źródła decyduje o spadku napięcia na rezystancji, ale również na indukcyjnością pasożytniczą (wypadkową impedancję). Spadki napięcia mogą spowodować opuszczenie zakresu dopuszczalnego

napięcia zasilania, ale też wpływać na przebiegi wyjściowe urządzenia. Aby zapewnić stabilną pracę mikrokontrolera zadbane o prawidłowe odprzeżenie zasilania. Piny zasilania zostały połączone do masy poprzez kondensatory ceramiczne - VDD o wartości  $10\mu F$  i  $100nF$ , VDDA -  $1\mu F$  i  $100nF$ . W efekcie przebiegi napięcia na terminalach zasilania układu zostały wygładzone. Wprowadzenie BOOT0 zostało podłączone na stałe przez rezystor metalizowany o wysokiej rezystancji  $4,3k\Omega$  do masy (GND). W ten sposób po uruchomieniu układu a dokładniej w takt 4 zbocza narastającego zegara systemowego SYSCLK, zostaje podjęta decyzja o rozpoczęciu wykonywania programu z początku głównej pamięci FLASH. Fakt wybrania niewielkiej obudowy TSSOP20 uniemożliwił skorzystanie z zewnętrznego układu zegara opartego na krysztale kwarcu. Użyto wbudowany generator sygnału zegarowego RC, który charakteryzuje się mniejszą precyją przy odmierzaniu czasu. Układ resetu nie jest wymagany, jednak wprowadzenie kondensatora ceramicznego C4  $100nF$  podciągającego do masy ma za zadanie zmniejszyć szansę na pasożytnicze resety układu. Posiada on wewnętrzny rezystor podciągający pin do zasilania VDDA [14]. Wprowadzono dodatkowy rezystor metalizowany R1  $100\Omega$  do gałęzi z kondensatorem C4, aby przy wciśnięciu przycisku resetu ograniczyć maksymalny prąd przepływający przez kondensator i wydłużyć jego żywotność. Analogiczne rozwiązanie wykorzystano do układu przycisku, jedynie dodano zewnętrzny rezystor podciągający do zasilania VDD.

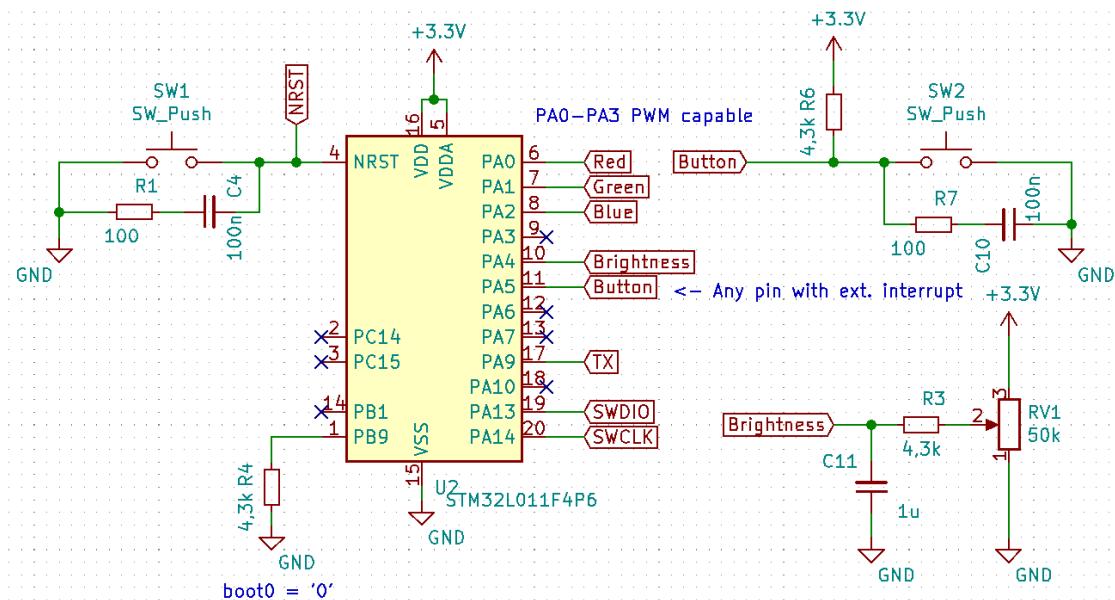
$$RC = R * C \text{ [s]} \quad (3.5)$$

RC –stała czasowa [s]

R – rezystancja [ $\Omega$ ]

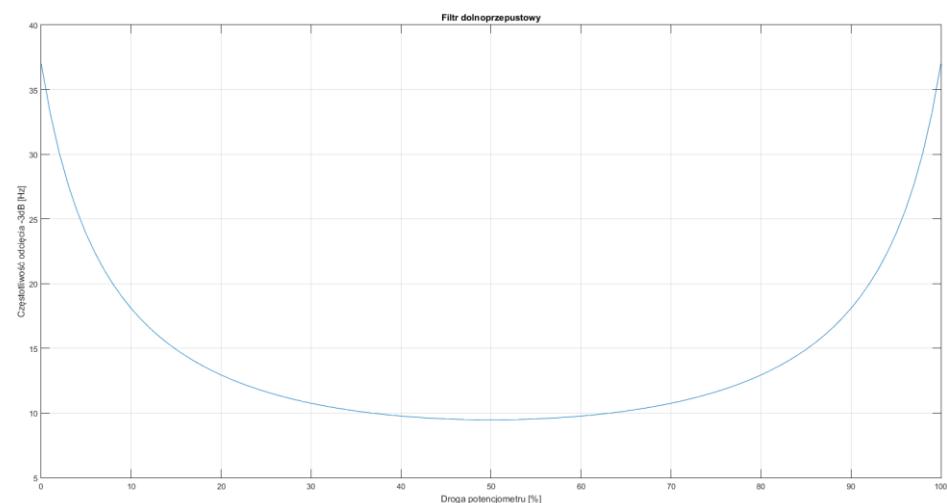
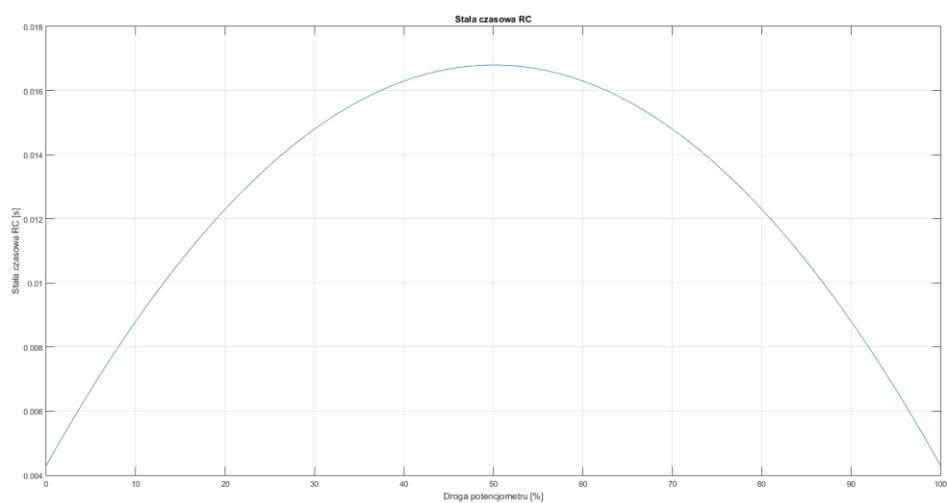
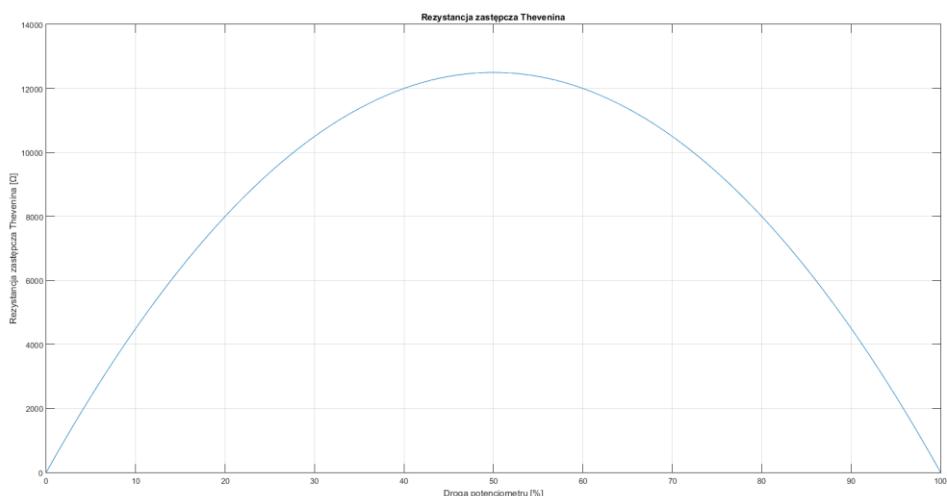
C – pojemność [ $F$ ]

Po włączeniu zasilania kondensator ceramiczny C10  $100nF$  ładuje się poprzez 2 rezystory metalizowane R6  $4,3k\Omega$  i R7  $100\Omega$ . Proces ładowania do 63% wartości docelowej 3,3V (co odpowiada zmianie stanu logicznego) jest równy (zgodnie ze wzorem (3.5) i połączeniu szeregowemu rezystorów) stałej czasowej RC równej  $440\mu s$ . Element pojemnościowy C10 wyładowuje się przez opornik R7  $100\Omega$  w momencie wciśnięcia przycisku i 63% wartości docelowej 0V jest osiągane w czasie równym stałej czasowej RC o wartości  $10\mu s$ . Kondensator C4 posiada identyczny czas rozładowania, jednak przez nieznaną wartość rezystora podciągającego do VDDA nie jesteśmy w stanie oszacować stałej czasowej przy procesie ładowania.



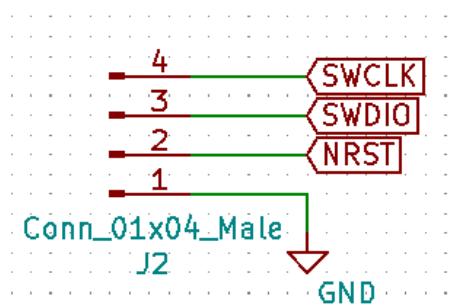
Rys. 3.11. Schemat mikrokontrolera nadajnika

W sytuacji kiedy potencjometr zostałby bezpośrednio podpięty do pinu przetwornika analogowo-cyfrowego, w odczytach mogłyby wystąpić niewielka fluktuacja wartości mierzonej. Jest ona związana z zaburzeniami występującymi na liniach zasilania. Zastosowane rozwiązanie opiera się na filtrze dolnoprzepustowym RC. Potencjometr montażowy RV1 50kΩ podpięty do linii zasilania można zastąpić zgodnie z twierdzeniem Thevenina na idealne źródło napięciowe i rezystancję zastępczą a ich wartości będą zależne od położenia pokrętła [15]. Rezystancja Thevenina jest zerowa na krańcowych nastawach przyrządu a maksimum osiąga na środkowej pozycji o wartości jednej czwartej oporności nominalnej komponentu tj. 12,5kΩ. Rezystor metalizowany R3 4,3kΩ ma za zadanie zabezpieczyć układ przed ESD. Rezystancja zastępcza łączy się szeregowo z rezystancją opornika R3 i w kombinacji z kondensatorem ceramicznym C11 1μF tworzy filtr dolnoprzepustowy. Ważnym aspektem przy projektowaniu było maksymalne wygładzenie zasilania potencjometru, aby zminimalizować zaburzenia sygnału sterującego jasnością podświetlenia. Jednak zbyt duża wartość stałej RC spowalnia reakcję układu na sterowanie potencjometrem, jak również maksymalna wartość rezystancji wejściowej jest ograniczona w nocy katalogowej mikrokontrolera do 50kΩ. Gdyby istniała potrzeba intensywniejszej filtracji jest możliwość zaimplementowania filtra cyfrowego wewnątrz mikrokontrolera, jednak dla projektowanego nadajnika byłoby to nadmiarowe.



Rys. 3.12. Charakterystyki układu regulacji jasności

Programowanie mikrokontrolera odbywać się będzie poprzez 4 linie interfejsu SWD: SWDIO, SWCLK, NRST, GND. Do tego celu zostaną stworzone krótkotrwale połączenia elektryczne programatora z metalizowanymi otworami przeznaczonymi do złącz kołowych. W momencie programowania przewody zostaną wsadzone pod kątem w otwory. Otwory są połączone elektrycznie z pinami mikrokontrolera odpowiedzialnymi za komunikację z programatorem. Napisany program na komputerze PC zostanie wgrany poprzez programator ST-LINK/V2 do pamięci FLASH układu.



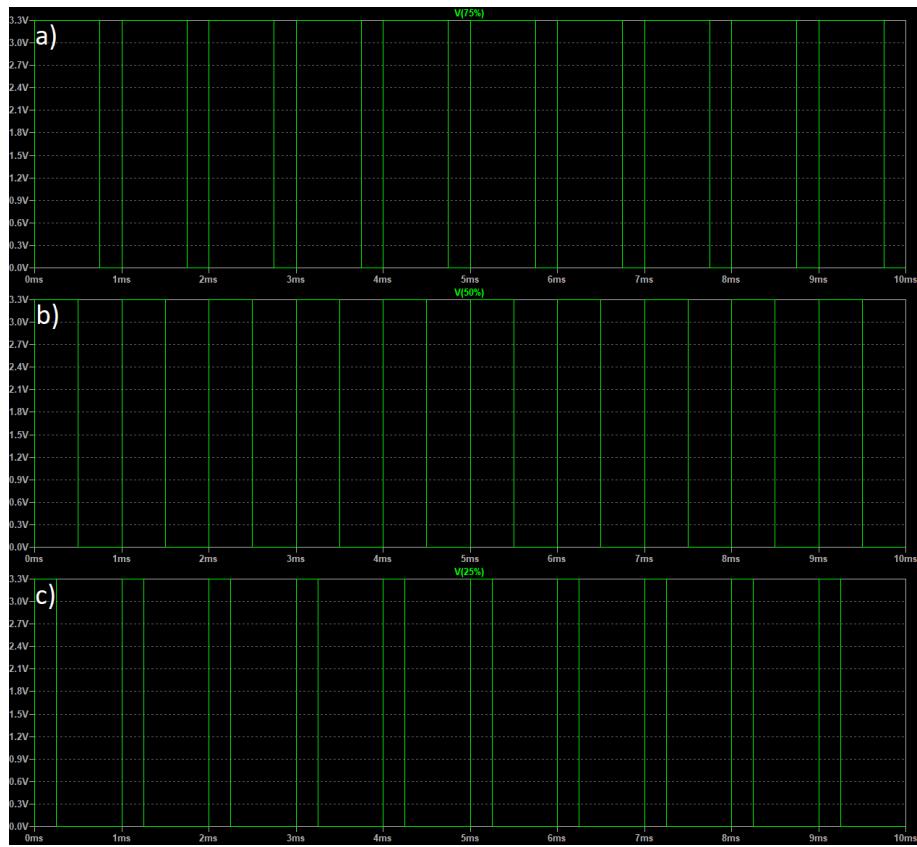
Rys. 3.13. Złącze programatora nadajnika

### 3.2.3. NADAJNIK IR I EFEKT WIZUALNY(PODŚWIETLENIE)

Nadajnik potrzebuje diod podczerwieni, aby móc przesyłać komunikaty o wciśnięciu przycisku do odbiornika. Komponenty te z przeznaczeniem do komunikacji optycznej posiadają najczęściej wysoki maksymalny prąd przewodzenia. Wysterowanie diod elektroluminescencyjnych dużej mocy nie jest możliwe bazując jedynie na wyprowadzeniach mikrokontrolera. Piny nie są w stanie dostarczyć natężenia prądu powyżej 5 mA [13] a przekroczenie tej wartości mogłoby spowodować błędy w działaniu lub uszkodzenie układu. Ograniczenie te jest również kluczowe przy efekcie świetlnym. Efekt ten będzie sterowany przez 3 wyprowadzenia generujące sygnał PWM w mikrokontrolerze. Wyprowadzenia te mają za zadanie wysterować diody dużej mocy emitujące kolory podstawowe: czerwony, zielony i niebieski. W pętli głównej programu mikrokomputera jednoukładowego zostaną umieszczone instrukcje sterujące współczynnikami wypełnienia sygnałów PWM, co w rezultacie uformuje efekt świetlny. Mieszanie addytywne 3 barw podstawowych powinno dać możliwość stworzenie dowolnej barwy. Zarówno w nadajniku

podczerwieni jak i efekcie wizualnym wymagana jest forma wzmacnienia sygnału (natężenia prądu) do czego zostaną wykorzystane tranzystory. Komunikaty przesyłane będą w zmodulowanej cyfrowej formie z nośną o częstotliwości 38kHz.

Modulacja szerokości impulsu (Pulse-Width Modulation, PWM) jest sposobem generowania sygnałów napięciowych lub prądowych, opartym na stałej amplitudzie A i częstotliwości f. Parametr, który może ulec zmianie w czasie to współczynnik wypełnienia D (duty cycle). Jest on zapisywany w procentach a jego wartość jest informacją jaką częścią pełnego okresu T ( $T = 1/f$ ) jest stan wysoki. Oznacza to, że przy wypełnieniu równym 100% mamy stały przebieg równy amplitudzie a przy wartości 0% stały stan niski (0V lub 0A). Z użyciem modulacji PWM można regulować średnią wartość mocy dostarczanej do obciążenia. Przy właściwie dobranej częstotliwości (długości trwania okresu) pod konkretną aplikację, PWM znajduje zastosowanie w zasilaczach impulsowych, wzmacniaczach audio (klasy D), sterowaniu silnikami elektrycznymi i serwami, w telekomunikacji lub regulacji intensywności oświetlenia. Sygnał ten można wyprowadzać bezpośrednio lub poprzez filtr dolnoprzepustowy uśredniający przebieg. Do generowania przebiegu PWM zostanie wykorzystany mikrokontroler, ale również możliwe jest zmodulowanie sygnału analogowego (przykładowo audio) poprzez ciągłe porównywanie wartości przebiegu z sygnałem piłokształtnym przy użyciu komparatora. W przypadku projektowanego nadajnika sygnał PWM zostanie wykorzystany do regulacji intensywności promieniowania optycznego w efekcie świetlnym. Sterowanie intensywnością promieniowania optycznego indywidualnie każdego z 3 kolorów podstawowych ma dodatkowo umożliwić wygenerowanie dowolnej barwy. Aby dla ludzkiego oka nie było wyczuwalne miganie diod, częstotliwość modulacji musi być dostatecznie wysoka tj. nie mniejsza niż 200Hz. 3 Sygnały PWM zostaną wygenerowane za pomocą licznika TIM2, który jest zawarty w mikrokontrolerze.



Rys. 3.14. Sygnały PWM ze współczynnikami wypełnienia a) D = 75% b) D = 50% c) D = 25%

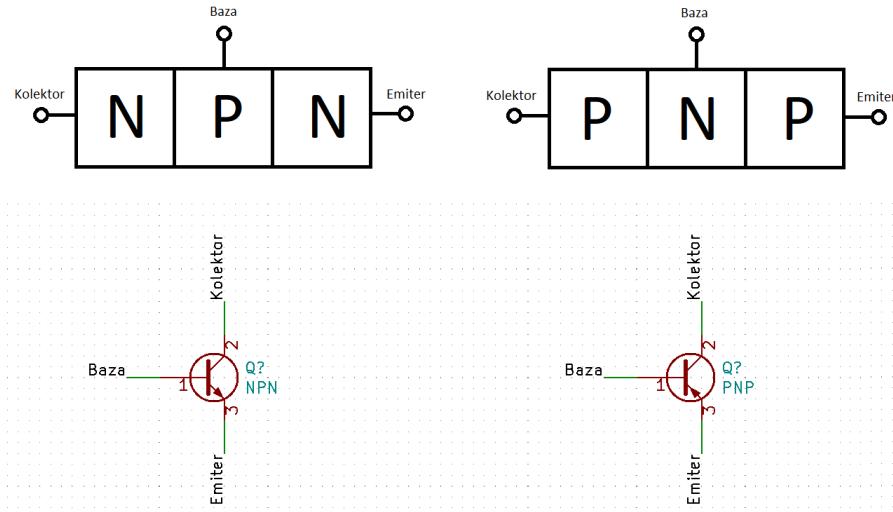
W nadajniku zostały wykorzystane 3 diody elektroluminescencyjne podczerwieni OS15LA56A1A firmy OPTOSUPPLY. Element ma za zadanie przetwarzać wzmacniony sygnał elektryczny wygenerowany przez mikrokontroler na promieniowanie optyczne w zakresie bliskiej podczerwieni 940nm. Maksymalny stały prąd przewodzenia przyrządu wynosi 100mA przy spadku napięcia w granicy 1,6-1,8V między wyprowadzeniami anody i katody a chwilowy maksymalny prąd może osiągnąć wartość w specyficznych warunkach do 1A. Komponent posiada szeroki kąt 100° (do 50° od normalnej wierzchołka diody), w którym emituje promieniowanie. Wykraczając poza ten kąt bryłowy moc spada poniżej połowy [16]. Przy zastosowaniu 3 diod na 3 ścianach obudowy dojdzie do interferencji ich promieniowania a ich połówkowe kąty bryłowe pokryją się w odległości 28cm od krawędzi urządzenia. Korzystając z faktu, że promieniowanie podczerwone (promieniowanie optyczne) porusza się z prędkością światła  $c = 3 \cdot 10^8$  m/s założono, że szybko wytlumi swoją moc odbijając się od otoczenia i występowanie 3 przetworników nie utrudni komunikacji optycznej. Przy prądzie przewodzenia 100mA iradiancja diody wynosi 40mW/Sr [16]. Jest to wartość średnia, ponieważ moc promieniowania optycznego jest zależna od jego kąta do normalnej diody. Wartość 40mW/Sr oznacza, że w odległości metr od źródła wystąpi natężenie promieniowania około  $40\text{mW/m}^2$  i wraz ze wzrostem odległości wartość ta będzie

malała. OSI5LA56A1A jest wykonana w technologii THT ze średnicą 4,8mm. Fakt występowania 3 diod ma za zadanie zniwelować szansę na przerwanie transmisji przez przysłonięcie toru optycznego pojedynczej diody lub zbyt mocne obrócenie nadajnika przez użytkownika. Finalnie zostaną one wklejone w obudowę nadajnika.

Do efektu świetlnego zostaną użyte diody elektroluminescencyjne dużej mocy emitujące kolor: czerwony OSR53535C1A-150MA, zielony OSG53535C1A-150MA i niebieski OSB53535C1A-150MA firmy OPTOSUPPLY. Wszystkie wymienione modele posiadają maksymalny stały prąd przewodzenia równy 150mA, chwilowy 200mA a promieniowanie zawiera się w  $120^\circ$  (do  $60^\circ$  od normalnej wierzchołka diody a poza tą granicą moc spada poniżej połowy) [17]. Różne kolory światła emitowane przez komponenty (ich środkowa długość fali) są podyktowane innymi pierwiastkami użytymi do złącza półprzewodnikowego. Przyrządy posiadają inną przerwę energetyczną, jak również charakterystyki elektryczne nieznacznie się różnią. Wybrana dioda czerwona osiąga prąd stały 150mA przy spadku napięcia między anodą i katodą o wartości 2,2V, generując przy tym strumień 20lm o środkowej długości widmowej 625nm. Dioda zielona i niebieska mają wspólny punkt pracy 3,2V przy prądzie 150mA. Dioda zielona tworzy strumień 25lm o długości 520nm a niebieska 10lm i 465nm [17]. Elementy zostały wykonane w technologii SMT i występują w obudowach 3535.

Opracowanie tranzystora bipolarnego (BJT; Bipolar Junction Transistor) przez William'a Shockley w 1948r. [18] było jedynym z największych odkryć 20 wieku. Jego funkcją jest głównie wzmacnianie sygnału lub przełączanie. Układy oparte na tranzystorach potrafią wykonywać obliczenia arytmetyczne lub być elementami przerzutników (układów pamiętających) lub innych układów logicznych. Odkrycie półprzewodnikowego elementu było konkurencją dla dominujących obecnie na rynku lamp elektronowych. Obecnie lampy można spotkać coraz rzadziej, głównie w urządzeniach audio. Z biegiem czasu udało się zminiaturyzować tranzystory, jak również wytworzyć oparte na nich złożone układy scalone. Tranzystor bipolarny jest przyrządem elektronicznym półprzewodnikowym (najczęściej krzemowym) posiadającym 3 wyprowadzenia: Baza, Kolektor, Emiter. Budulec tranzystora - krzem tworzy ze sobą wiązania kowalencyjne i bez domieszkowania posiada słabą przewodność elektryczną. Domieszkowanie polega na wprowadzeniu do jego wiązań pierwiastków o innej liczbie elektronów walencyjnych niż posiada krzem tj. różnych od 4. Domieszkowanie fosforem 5-wartościowym umożliwia tworzenie półprzewodnika typu N z elektronem w funkcji nośnika ładunku. Półprzewodnik typu P tworzony jest przez domieszkowanie borem 3-wartościowym z nośnikiem braku elektronu (dziury). Każde wyprowadzenie jest połączone wewnętrz z innym regionem, charakteryzującym się innym domieszkowaniem. W tranzystorze bipolarnym występują 2 złącza P-N, które są również

podstawą działania diody półprzewodnikowej PN. Istnieją 2 odmiany komponentu – PNP i NPN posiadające przeciwnie domieszkowanie.

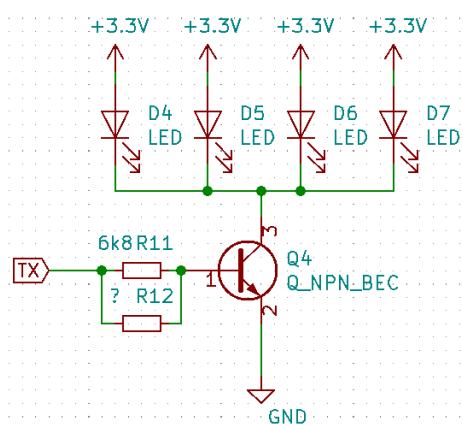


Rys. 3.15. Rysunki ideowe i symbole tranzystora bipolarnego NPN i PNP

Sposób polaryzacji złącz decyduje o trybie działania tranzystora bipolarnego i zostanie ono opisane na przykładzie typu NPN. Przy braku polaryzacji zewnętrznym napięciem występują 2 warstwy zubożone pomiędzy obszarami N i P. Są one spowodowane wzajemnym przyciąganiem dziur z bazy z wolnymi elektronami emitera i kolektora. W tym stanie oba złącza nie przewodzą prądu i tranzystor pracuje w trybie zatkania (odcięcia). W tej sytuacji przyrząd jest widoczny od strony kolektora i emitera jako bardzo duża rezystancja (przerwa w obwodzie). Przy przekroczeniu bariery napięcia baza-emiter około 0,6V, prąd zaczyna przepływać między 2 wyprowadzeniami i funkcjonalnie nie różni się od diody półprzewodnikowej PN. W ten sposób elektrony z emitera są dostarczane do bazy. Jeżeli dodatkowo zostanie podane napięcie na kolektorze takie, że złącze kolektor-baza będzie spolaryzowane zaporowo to elektrony z bazy zostaną przyciągane do kolektora tworząc przepływ prądu między kolektorem a emiterem. W tej konfiguracji tranzystor jest w trybie aktywnym i prąd kolektora  $I_C$  jest iloczynem prądu bazy  $I_B$  z współczynnikiem wzmacnienia tranzystora  $\beta$ . W tym trybie komponent ma funkcję wzmacniacza oraz jest widziany z zacisków kolektora i emitera jako rezystancja o wartości zależnej od prądu bazy. Przy zbyt dużym prądzie kolektora (bazy) lub zbyt niskim napięciu zasilania między kolektorem a emiterem, BJT wchodzi w tryb nasycenia, w którym przyrost prądu bazy nie zwiększa znacząco prądu kolektora. W tej sytuacji złącza baza-emiter i kolektor-baza są

spolaryzowane przewodząco. Tranzystor jest widoczny z zacisków kolektora i emitera jako niska rezystancja, której nie da się znaczco obniżyć poprzez zwiększenie prądu bazy. Tranzystor w tym stanie jest wykorzystywany jako klucz załączający obwód. Przy głębokim nasyceniu element posiada spadek napięcia między kolektorem a emiterem na poziomie około 0,2V. Istnieje również możliwość pracy w trybie aktywnym inwersyjnym, w którym złącze baza-emiter jest spolaryzowane zaporowo a kolektor-baza przewodząco. Tryb ten nie jest często wykorzystywany z powodu konstrukcji przyrządu a dokładniej przez domieszkowanie i wielkość obszarów bazy, kolektora i emitera. W tej konfiguracji wartość wzmacnienia jest bliska jedności.

Do wzmacniania sygnałów (prądu) w nadajniku wybrano tranzystory bipolarne BCW66KHE6327 firmy INFINEON TECHNOLOGIES. Wzmocnienia wymaga sygnał sterujący diodami podczerwieni, jak również 3 sygnały PWM efektu wizualnego (podświetlenia). Przyrząd posiada ograniczenia maksymalnych napięć na poziomie: kolektor-emiter 45V, kolektor-baza 75V, emiter-baza 5V. Przy maksymalnym napięciu zasilania nadajnika 3,3V, złamanie powyższych ograniczeń nie jest możliwa. Maksymalny bezpieczny prąd stały kolektora jest równy 800mA a chwilowy 1A. Natomiast maksymalny prąd bazy jest oceniony na 100mA dla prądu stałego i 200mA na prądu chwilowego. Maksymalna moc wydzielana na tranzystorze nie powinna przekroczyć 500mW. Wartość współczynnika wzmacnienia  $\beta$  ( $h_{fe}$ ) wybranego tranzystora wynosi najczęściej 250 [19]. Jednak w rzeczywistości wartość tego parametru może odbiegać od wartości katalogowej, dlatego przy procesie projektowania nie należy na niej w pełni polegać. Częstotliwość graniczna o wartości 170MHz, powinna umożliwić zachowanie stromych zboczy przy sygnale cyfrowym o częstotliwości dziesiątek kiloherców.



Rys. 3.16. Schemat nadajnika podczerwieni

Tranzystor BCW66KHE6327 wykorzystano do sterowania diodami podczerwieni i będzie pracował na zmianę w trybie aktywnym i zatkania. Charakterystyka prądowo-napięciowa diody LED ma charakter wykładniczy, dlatego zostało zastosowane sterowanie prądowe. Jest to konieczne, ponieważ niewielki wzrost napięcia powoduje znaczny przyrost prądu a w konsekwencji zwiększenie wydzielanej mocy. Wybór tranzystora bipolarnego w funkcji wzmacniacza, był zmotywowany przez kontrolowane sterowanie prądem kolektora za pomocą prądu bazy. Na schemacie występują 4 diody, ponieważ rozważano również opcję użycia po jednym przetworniku na każdą ścianę boczną obudowy nadajnika. Zostaną użyte 3 diody a pady przeznaczone do 4 elementu zostaną wykorzystane do pomiarów podczas uruchamiania. W projektowanym układzie nadajnika podczerwieni występują 2 niepewne parametry: napięcie na wyprowadzeniu pinu GPIO mikrokontrolera przy wysokim stanie logicznym  $V_{OH}$  oraz współczynnik wzmacnienia tranzystora  $\beta$ . Dlatego przy projektowaniu założono dla bezpieczeństwa zawyżone napięcie  $V_{OH}$  równe zasilaniu na poziomie 3,3V a za współczynnik wzmacnienia  $\beta$  przyjęto jego typową wartość równą 250. Celem wzmacniacza jest przepływ prądu w kolektorze na poziomie około 100mA przy wysokim stanie logicznym. Rezystor R11 6,8k $\Omega$  decyduje o wartości prądu bazy przy stanie wysokim co ma bezpośredni wpływ na prąd kolektora. Rezystor równoległy R12 został dorysowany na schemacie aby ułatwić ewentualne obniżenie rezystancji lub wprowadzenie wartości, która nie występuje w standardowym szeregu wartości.

$$I_B = (V_{OH} - 0,7) / R_B \text{ [A]} \quad (3.6)$$

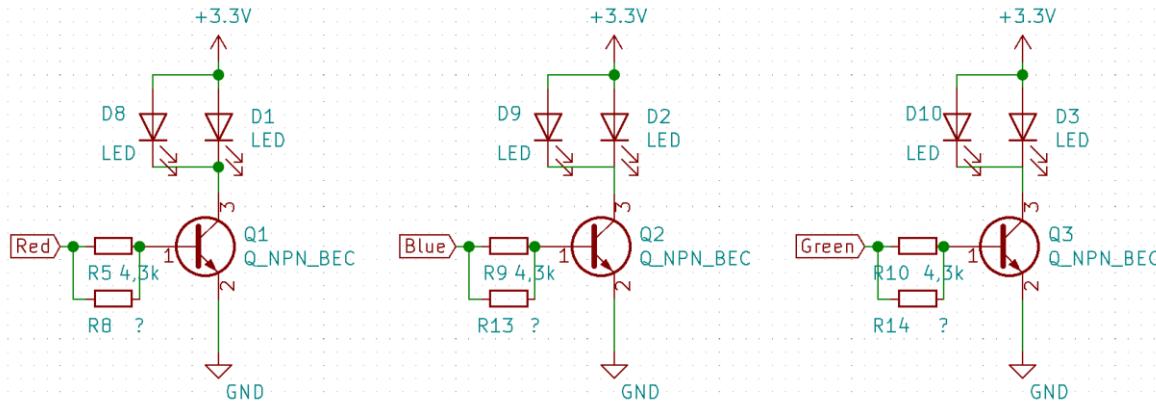
$$I_C = I_B * \beta \text{ [A]}, \text{ zakładając stan aktywny tranzystora bipolarnego} \quad (3.7)$$

$$I_C = (V_{OH} - 0,7) / R_B * \beta \text{ [A]}, \text{ zakładając stan aktywny tranzystora bipolarnego} \quad (3.8)$$

Przy rezystancji bazy  $R_B$  o wartości 6,8k $\Omega$  i maksymalnym napięciu zasilania 3,3V, obliczono prąd bazy  $I_B$  równy 382 $\mu$ A co w wyniku daje prąd kolektora  $I_C$  na poziomie 96mA. Dla najniższego napięcia zasilania 2,3V prąd bazy  $I_B$  jest równy 235 $\mu$ A co w wyniku daje prąd kolektora  $I_C$  na poziomie 59mA. W tych stanach diody będą przewodziły prąd i przyjęto spadek napięcia między anodą a katodą około 1,6V. Przy napięciu zasilania 3,3-2,3V, spadek napięcia kolektor-emiter  $V_{CE}$  będzie wynosił 1,7-0,7V, co jest dalekie od głębokiego nasycenia a tranzystor faktycznie pracuje w trybie aktywnym.

$$P_{strat} = V_{BE} * I_B + V_{CE} * I_C \text{ [W]} \quad (3.9)$$

Moc wydzielana na tranzystorze przy stanie wysokim jest równa w granicy 163-41mW. Przy stanie niskim tranzystor i diody nie przewodzą prądu przez co nie wydzielają mocy. Wymagania maksymalnej mocy rozpraszanej w tranzystorze, prądu bazy, prądu kolektora i prądu przewodzenia diody zostały spełnione. Mikrokontroler będzie generował wysokie stany logiczne sterujące nadajnikiem podczerwieni jedynie w momencie wcisnięcia przycisku, więc dioda będzie miała czas obniżyć swoją temperaturę przed kolejnym załączeniem układu. Jeżeli podczas uruchamiania urządzenia okaże się, że układ prawidłowo podaje napięcie na diody a odbiornik nie otrzymuje informacji, to zostanie zwiększoa moc poprzez zmniejszenie rezystancji bazy R11/R12. Czynność ta byłaby monitorowana pod kątem ewentualnego przekroczenia maksymalnego prądu przewodzenia diody 100mA.



Rys. 3.17. Schemat efektu świetlnego

Schemat efektu świetlnego jest bardzo zbliżony do nadajnika podczerwieni. Sygnały PWM i diody LED są połączone z tranzystorami w analogiczny sposób. Układy różnią się rezystancją bazy i ilością umieszczonych równolegle diod. Połączenie równoległe diod zostało wprowadzone na schemacie na wypadek gdyby moc promieniowania emitowanego przez pojedynczą diodę okazałaby się zbyt mała mimo jej maksymalnego prądu. Wprowadzono rezystancję na bazach o wartości  $4,3\text{k}\Omega$  (zakładając  $\beta = 250$ ,  $V_{OH} = 3,3\text{V}$ ) co przy trybie aktywnym wysteruje prąd bazy na poziomie około  $605\mu\text{A}$  a prąd kolektora  $151\text{mA}$ . Przy tym prądzie przewodzenia na zielonej i niebieskiej diodzie LED wystąpiłby spadek napięcia  $3,2\text{V}$  a w przypadku czerwonego odpowiednika  $2,2\text{V}$ . Przy zasilaniu  $3,3-2,3\text{V}$  tranzystor z diodą czerwoną będzie pracował przez większość czasu w stanie aktywnym i dopiero przy najniższym napięciu tranzystor wejdzie w stan nasycenia. Przy maksymalnym napięciu zasilania  $3,3\text{V}$  i prądzie kolektora  $150\text{mA}$ , napięcie kolektor-emiter wyniosłoby  $1,1\text{V}$ .

a tranzystor wydzieliby moc 165mW. Tranzystory sterujące diodą zieloną i niebieską będą pracować cały czas w nasyceniu, stad ich planowany maksymalny prąd na poziomie 151mA w praktyce może okazać się mniejszy. Powodem jest występujący przy nasyceniu spadek 0,2V między kolektorem a emiterem. Zakładając, że uda się wysterować diodę zieloną i niebieską prądem o wartości 150mA na tranzystorze wydzieliby się moc 30mW. Obliczone moce są zawyżone a wraz ze spadkiem napięcia zasilania uległyby redukcji: prąd bazy, prąd kolektora (diody) i wydzielana moc tranzystora. Czas trwania stanu w którym napięcie zasilania będzie znajdowało się poniżej 3,3V jest relatywnie krótki, więc fakt zmniejszania się intensywności promieniowania diod może posłużyć jako informacja dla użytkownika o niższym poziomie baterii. Obliczenie prądu kolektora i mocy wydzielanej na tranzystorach efektu świetlnego przy najniższym napięciu zasilania jest utrudniona, ponieważ są w stanie nasycenia gdzie współczynnik wzmacnienia nie spełnia swojej funkcji. Jednak przy zmniejszającym się napięciu zasilania prąd kolektora jak i moc tranzystora będzie maleć. Przy najwyższym napięciu nasilania wymagania maksymalnych prądów i mocy zostały spełnione. Jeżeli strumień światła okaże się zbyt słaby do potrzeb efektu świetlnego, to możliwe będzie wprowadzenie równolegle dodatkowej diody i ewentualną zmianę rezystancji bazy.

### 3.2.4. OBWÓD DRUKOWANY

---

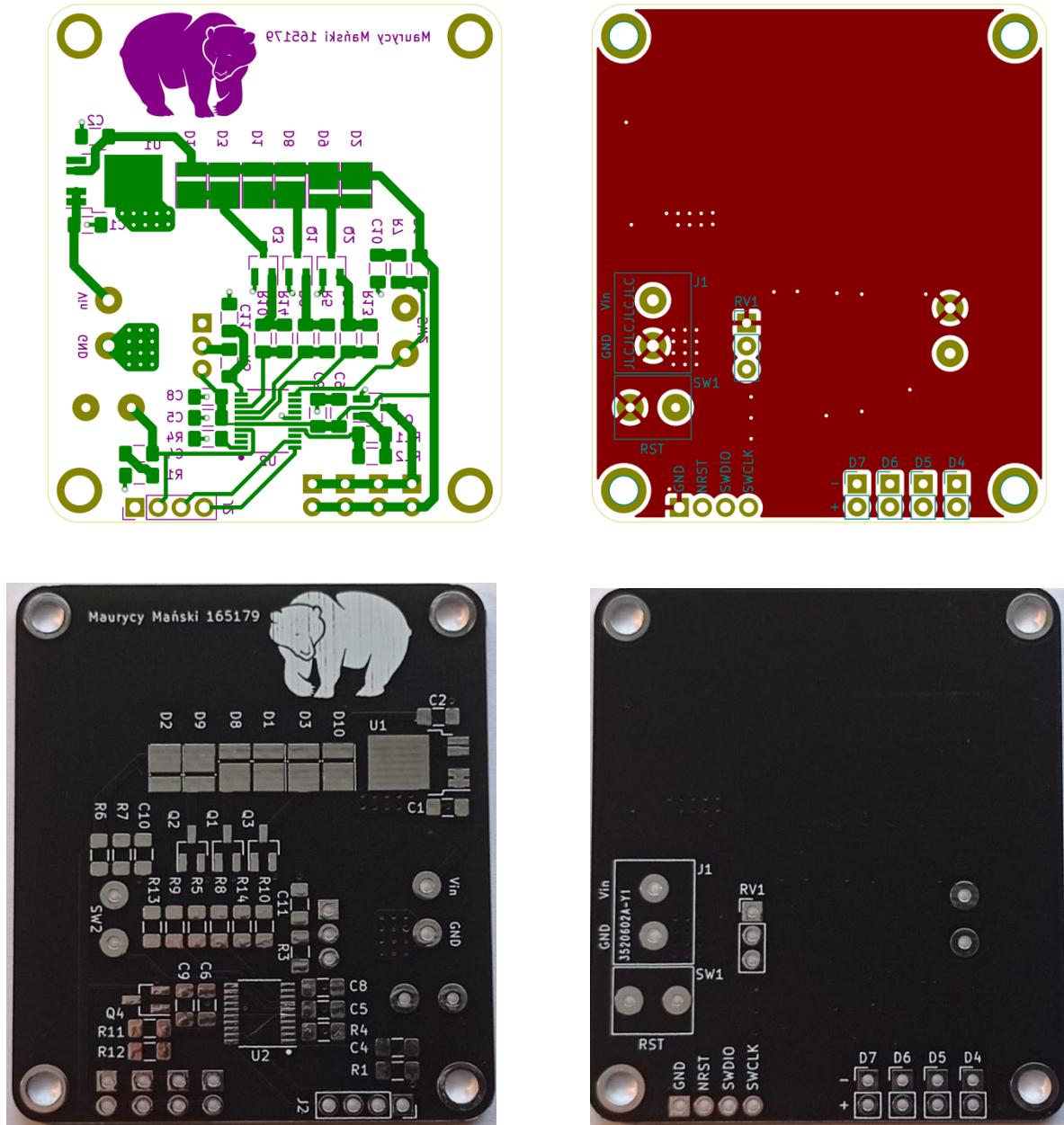
Obwód drukowany został zaprojektowany z użyciem programu komputerowego „KiCAD 5.1.4” Po wybraniu modeli komponentów elektronicznych, zastąpiono je symbolami i połączono, tworząc schemat elektryczny. Połączenie na schemacie odpowiada połączeniu elektrycznemu elementów. Następnie przypisano symbolom footprints z biblioteki programu na podstawie nazw obudów komponentów. Po pomyślnym przejściu testów poprawności narysowanego schematu, zaczęto prace nad projektem obwodu drukowanego. Zaplanowano, że płytka nadajnika będzie dwuwarstwowa o grubości 2mm, z metalizacją otworów, czarną soldermaską i warstwami opisowymi. Warstwą „Edge.Cuts” wprowadzono ograniczenia związane z planowanymi wymiarami 50x57mm, aby część pasowała do zaprojektowanej obudowy. Dodano 4 otwory montażowe po jednym na narożnik, oddalone od krawędzi bocznych o 3,5mm, średnicy wiercenia 3,3mm i średnicy metalizacji 5mm. Wszystkie ścieżki i większość komponentów umieszczono na dolnej warstwie miedzi „B.Cu”. Na górnej warstwie „F.Cu” umieszczono powierzchnię masy, ale też złącze zasilania i przycisk resetu. Początkowo wstępnie pogrupowano elementy i priorytetowo zadano

o właściwe odprężenie pinów zasilania układów scalonych, poprzez biskie umiejscowienie kondensatorów. Pady elementów przez które przepływa prąd o większym natężeniu tj. stabilizator, diody LED i tranzystory zostały umieszczone bliżej doprowadzenia zasilania do płytki. Zabieg ten został zastosowany, aby zmniejszyć spadki napięć i wartość wydzielanej mocy na doprowadzeniach.

$$P = I^2 * R [W] \quad (3.10)$$

Rezystancja zależy od długości i szerokości połączeń (ścieżek). Rezystancja pasożytnicza wraz z obciążeniem tworzy dzielik napięcia, przez co powstają spadki napięć. Czynnik ten również w niewielki sposób spowolnia układ, ponieważ w każdym punkcie na PCB występuje pewna pojemność do masy, która z rezystancją tworzy stałą czasową RC. Elementy mogące wydzielać więcej ciepła tj. stabilizator i diody LED umieszczone w lekkim dystansie od pozostałych części. Resztę elementów umieścił w niedużej odległości od siebie, jednak takiej aby nie utrudniało to późnej procesu lutowania urządzenia. Proces projektowania PCB odbywał się równocześnie z projektem obudowy przez co na bieżąco badano możliwość kolizji wystających elementów z elementami konstrukcyjnymi obudowy. W sytuacjach kiedyścieżki miałyby się przecinać, rozważano użycie alternatywnych pinów mikrokontrolera spełniających te same wymagania. Umieszczenie komponentów wklejanych do obudowy wpłynęło w mniejszym stopniu na lokalizację ich padów na płytce. Do większości połączeń wykorzystano steżki 1mm. Jedynie tam gdzie nie było takiej możliwości przez przykładowo raster wyrowadzeń mikrokontrolera lub ustalone reguły projektowania, zastosowano szerokość 0,45mm. Wszystkie pady w technologii THT zostały powiększone aby ułatwić proces lutowania urządzenia. Wszystkie połączenia do masy zostały wykonane przez przelotki o średnicy metalizacji 0,8mm i średnicy wiercenia 0,4mm. Każdy komponent SMT wymagający połączenia z potencjałem odniesienia został połączony możliwie najbliżej (spełniając reguły projektowania) z powierzchnią masy przez pojedynczą przelotkę. Zapewnia to krótszy dystans sygnału do masy i lepsze odsprzęganie wyrowadzeń zasilania. Przy stabilizatorze zastosowano 9 przelotek, które umożliwiają przekazanie wygenerowanego ciepła na powierzchnię masy, która działa jak radiator i wspomaga w utrzymaniu niższej temperatury układu. Wykorzystano 12 przelotek przy złączu zasilania. Ich liczba ma zmniejszyć rezystancję i indukcyjność połączenia sygnału odniesienia ze złączem na powierzchnię masy w warstwie „F.Cu”. Do warstw opisu dodano podpisy komponentów i padów programatora, ułatwiając w ten sposób proces montażu, programowania i uruchamiania urządzenia. Warstwę „B.SilkS” wykorzystano do podpisu autora nadajnika i wprowadzenia grafiki [20]. Na końcu wykonano test sprawdzający reguły projektowe PCB i wygenerowano pliki produkcyjne Gerber. Pliki zostały przesłane do firmy

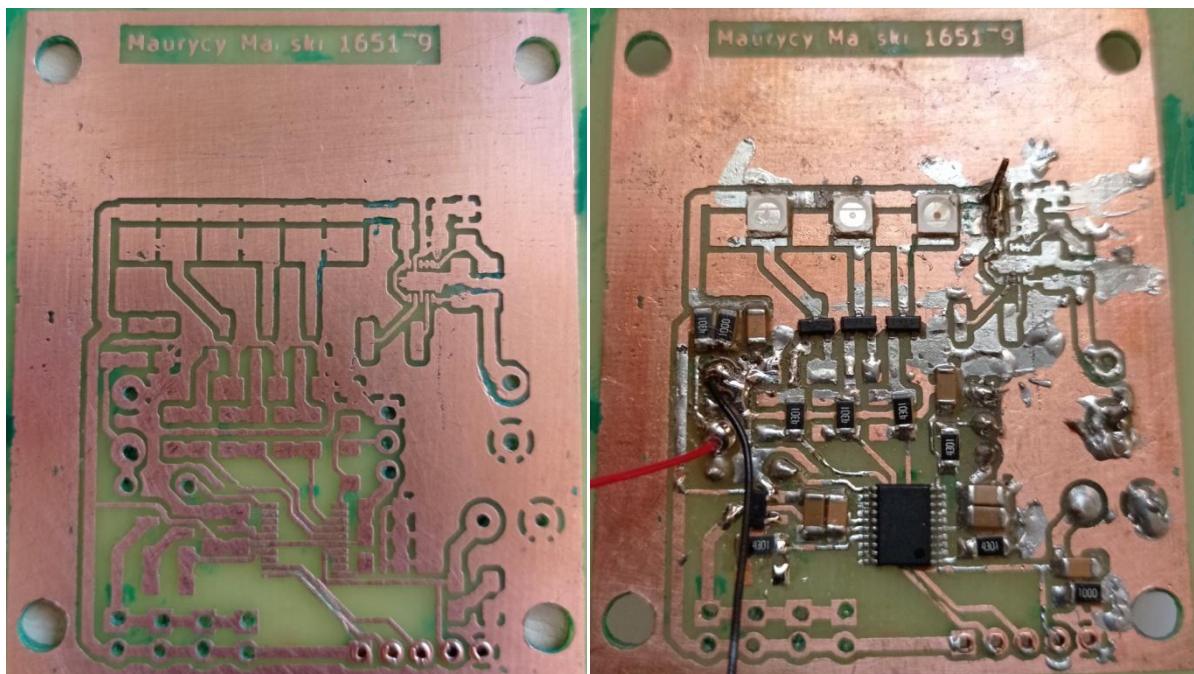
wyspecjalizowanej w produkcji obwodów drukowanych, po czym zostały odebrane fizyczne kopie płytki nadajnika.



Rys. 3.18. Obwód drukowany nadajnika

Przed przesłaniem plików do produkcji przerobiono projekt płytki z dwuwarstwowej na pojedynczą warstwę. Metodą termotransferu został wykonany wstępny prototyp w warunkach domowych. Sposób ten polega na wytrawieniu padów i ścieżek układu w laminacie z cienką warstwą miedzi przy użyciu maski. W funkcji wytrawiacza użyto czynnik B327 czyli nadsiarczan sodu a materiałem był laminat jednostronny. Maską był toner, który

został osadzony na laminacie przez zaprasowanie żelazkiem wcześniej wydrukowanego układu. Do druku użyto drukarki laserowej i papier kredowy. Stworzona płytka odbiega znacząco jakością od tej wykonanej profesjonalnie co można zaobserwować po kształcie i ubytkach ścieżek, braku soldermaski i braku powierzchni masy na 2 warstwie. Celem prototypu było zweryfikowanie poprawności działania układu. Dzięki temu udało się uniknąć takich błędów jak użycie zbyt małej obudowy VSON10 i odwrócić pady diod czerwonych.



Rys. 3.19. Prototyp obwodu drukowanego nadajnika

### 3.3. ODBIORNIK

W tej części pracy zostanie opisany proces projektowania elektroniki odbiornika. Cykl tworzenia odbiornika był bardzo zbliżony do nadajnika. Bazując na koncepcji urządzenia wykonano badania w poszukiwaniu rozwiązań co przyczyniło się do wyboru fizycznych komponentów. W programie komputerowym „KiCad 5.1.4” zamieniono elementy na symbole, połączono je tworząc schemat elektryczny, dobrano pady lutownicze do symboli a na końcu zaprojektowano obwód drukowany, którego fizyczną kopię wyprodukowano. Z tych samych powodów, które wymieniono w części nadajnika skorzystano z komponentów SMT, w większości z obudowami 1206. Jedynie w przypadku znaczającej różnicy cenowej dobrano mniejsze obudowy, które są z reguły tańsze. Zalecane jest w pierwszej kolejności przeczytanie podrozdziału 3.2., który opisuje proces projektowania nadajnika. Tematyka elementów funkcjonalnych takich jak zasilanie, mikrokontroler i obwód drukowany pokrywa się w obu urządzeniach i postanowiono uniknąć powtarzania tych samych treści.

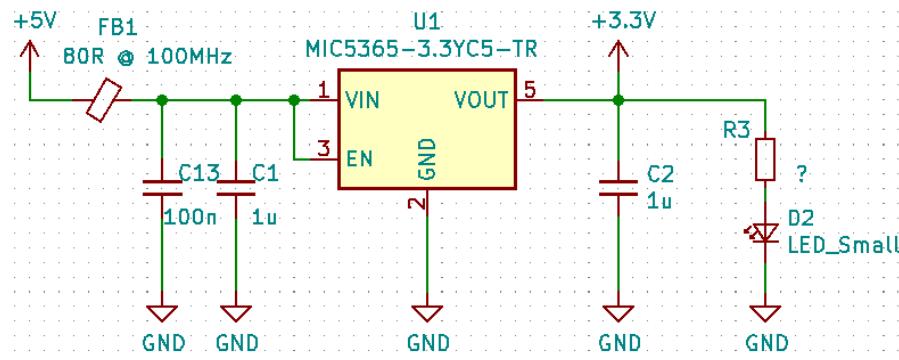
#### 3.3.1. ZASILANIE

---

Odbiornik będzie zasilany przez przewód USB podłączany do komputera PC, który będzie również służyć do przesyłania informacji między urządzeniami. Po podłączeniu przewodu, na liniach zasilania odbiornika powinno pojawić się stałe napięcie 5V. Ze względu na koszty zdecydowano się na użycie złącza micro USB w urządzeniu. Założono, że przewód będzie mógł pozostawać w gnieździe poza pracą odbiornika. Wyłączanie urządzenia będzie się odbywać poprzez odłączenie przewodu USB od portu USB komputera PC a włączenie analogicznie poprzez jego podłączenie. Przewidziano, że urządzenie nie przekroczy poboru prądu 100mA.

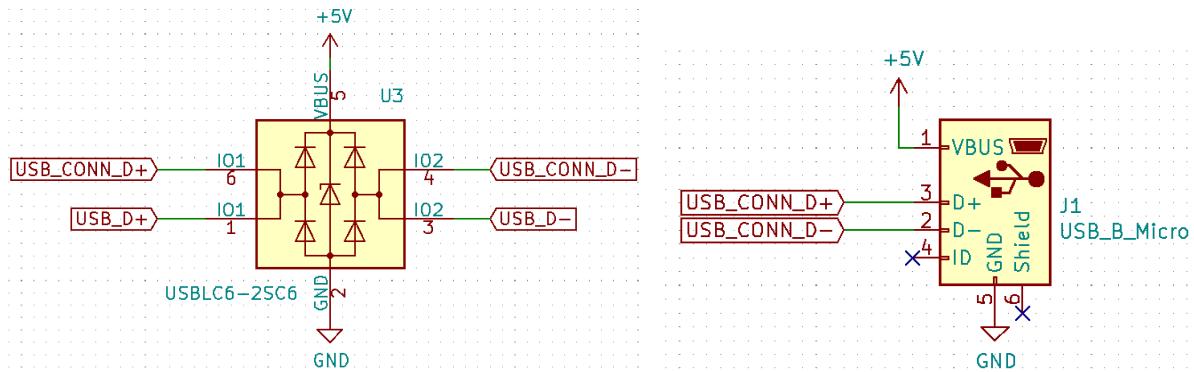
Do obniżenia napięcia zasilania wykorzystano stabilizator napięcia z niskim spadkiem napięcia MIC5365-3.3YC5-TR firmy MICROCHIP TECHNOLOGY. Komponent będzie powodował obniżenie napięcia wejściowego 5V na stabilizowane napięcie wyjściowe 3,3V. Element posiada gwarantowany prąd wyjściowy 150mA przy niskim spadku napięcia 155mV. Przyrząd jest przystosowany do napięcia wejściowego w zakresie 2,5V do 5,5V a maksymalnym napięciem wejściowym po którym może nastąpić jego uszkodzenie to 6V [21]. W typowych warunkach kiedy na złączu zasilania napięcie będzie równe 5V, na stabilizatorze wystąpi spadek napięcia 1,7V. Występuje duży zapis napięcia wejściowego

przy którym wystąpi stałe 3,3V na wyjściu stabilizatora tak, że napięcie na złączu mogłoby spaść nawet do 3,45V, mimo że sytuacja ta jest mało prawdopodobna. Zakładając maksymalny prąd 100mA i spadek 1,7V, wydzielana moc byłaby równa 170mW, jednak w praktyce prąd może okazać się znacznie niższy (moc również będzie proporcjonalnie niższa – wzór 3.2).



Rys. 3.20. Schemat zasilania odbiornika

Wyprowadzenie Enable (3) układu scalonego zostało połączone z wyprowadzeniem  $V_{IN}$  (1) wejściowego napięcia zasilania, aby układ był aktywny zawsze, kiedy pojawi się napięcie na liniach zasilania. Inspirując się schematem typowej aplikacji w nocy katalogowej układu [21], umieszczono po jednym kondensatorze ceramicznym o pojemności  $1\mu F$  na wejściu i wyjściu układu połączonych do masy. Są one wymagane do poprawnej pracy stabilizatora i zapewniają jego stabilność. Aby otrzymać lepszą filtrację zasilania pochodzącego z portu USB komputera PC, umieszczono dodatkowy kondensator ceramiczny o pojemności  $100nF$  między pinem  $V_{IN}$  a masą i dławik o impedancji  $80\Omega$  przy sygnale  $100MHz$ , połączony szeregowo między wyprowadzeniem złącza zasilania a pinem  $V_{IN}$  stabilizatora. Wraz ze wzrastającą częstotliwością sygnału impedancja kondensatora maleje (do częstotliwości rezonansowej komponentu związanej z indukcyjnością pasożytniczą) a impedancja dławika rośnie. W tej konfiguracji elementy formują filtr dolnoprzepustowy. Aby użytkownik posiadał informację czy urządzenie jest włączone wprowadzono na wyjściu stabilizatora diodę LED z rezystorem ograniczającym prąd. W celu ochrony urządzenia przed ESD zastosowano układ USBLC6-2SC6. Chroni on 2 linie danych interfejsu USB oraz linię zasilania z użyciem diod. Przyrząd posiada bardzo niski pobór prądu rzędu  $150nA$  oraz bardzo niską pojemność wyprowadzeń  $3,5pF$  (do masy) dzięki czemu jest kompatybilny z USB 2.0 (do  $480 Mb/s$ ) oraz niższymi wersjami - USB 1.1 low speed i USB 1.1 full speed [22].

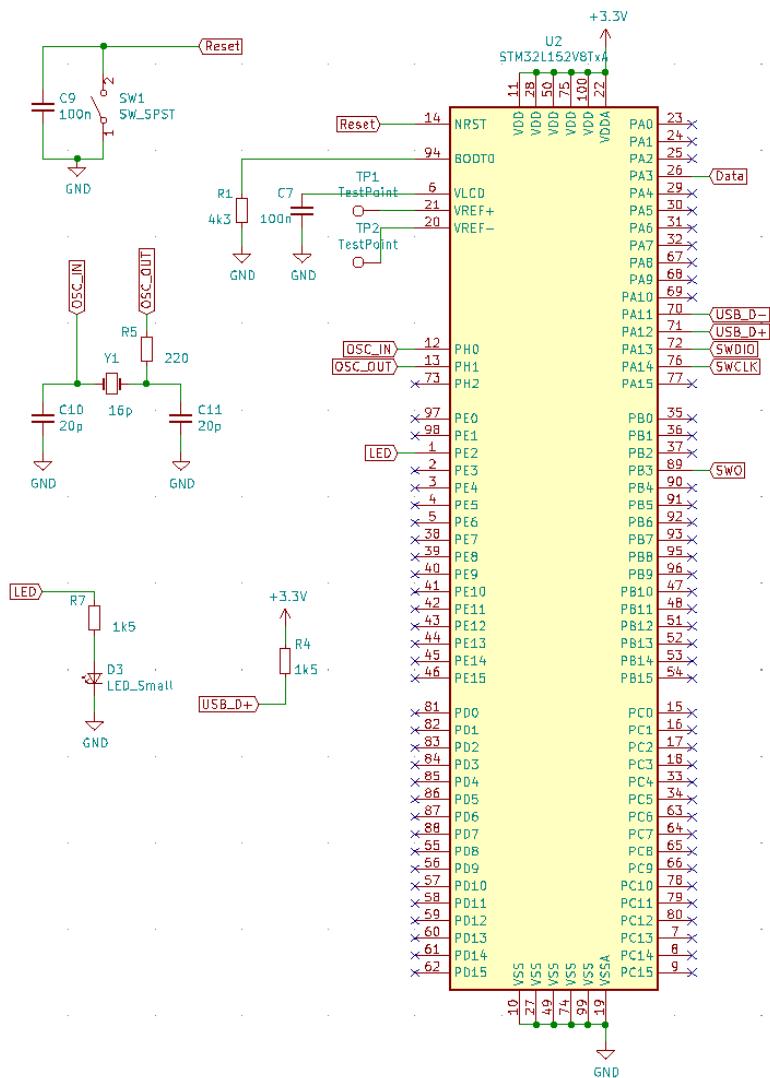


Rys. 3.21. Schemat układu ESD i złącza micro USB

### 3.3.2. MIKROKONTROLER

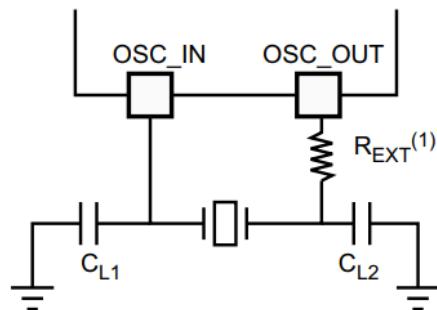
Układem przekształcającym sygnał wyjściowy odbiornika podczerwieni na informację zrozumiałą przez komputer PC będzie pełnić mikrokontroler. Odbiornik podczerwieni będzie generował na pojedynczym wyprowadzeniu przesyłane bity po kolej w formie transmisji szeregowej a po otrzymaniu konkretnego symbolu, komunikat będzie przesyłany do komputera przez interfejs USB. Postanowiono, że zostanie wykorzystany mikrokontroler firmy STMicroelectronics posiadający układ peryferyjny kontrolera interfejsu USB FS. Decyzja ta powoduje mniejsze skomplikowanie układu i zmniejszenie powierzchni płytka, ponieważ użyty zostanie jeden układ scalony zamiast dwóch. Do odbioru przebiegu generowanego przez odbiornik podczerwieni potrzebny będzie zawarty wewnątrz mikrokontrolera układ UART do obsługi komunikacji szeregowej. W momencie otrzymywania symbolu wysłanego przez nadajnik na wyjściu odbiornika podczerwieni pojawi się ramka danych symbolu a wyprowadzenie te będzie połączone z wejściem układu UART. Po otrzymaniu symbolu mikrokontroler wygeneruje przerwanie, którego obsługę można wykorzystać do sprawdzenia czy otrzymana informacja jest tożsama z wysłaną ramką. Innym rozwiązaniem po otrzymaniu sekwencji bitów jest zmiana wartości flagi (wydarzenie) a obsługa zostanie napisana w pętli głównej programu. W celu ułatwienia zweryfikowania poprawności działania programu, postanowiono wykorzystać jedno wyprowadzenie GPIO do zapalania diody LED. Przy wyborze modelu mikrokontrolera zwrócono uwagę również na możliwie niską liczbę wyprowadzeń aby ułatwić proces lutowania, wystarczającą ilość pamięci RAM i programu do spełnienia jego wymagań funkcjonalnych oraz finalnie na niską cenę produktu.

Do układu odbiornika wybrano mikrokontroler STM32L152V8T6A firmy STMICROELECTRONICS. Posiada on wbudowany układ USB FS o prędkości 12Mb/s z wbudowanym fizycznym interfejsem niewymagającym dodatkowych układów scalonych. Z użyciem oprogramowania możliwe będzie ustalenie klasy urządzenia jako HID (Human Interface Device), dzięki której po podłączeniu odbiornika do komputera będzie on widoczny jako mysz lub klawiatura. Akcja wciśnięcia przycisku klawiatury lub myszki będzie mogła być powodowana przez wysłanie raportu odbiornika do komputera. Przyrząd posiada 3 wbudowane układy USART mogące pracować w trybie asynchronicznym UART. Układ posiada 100 wyprowadzeń i znajduje się wewnątrz obudowy LQFP100 [23]. Mikrokontroler posiada 83 wyprowadzeń GPIO, więc nie będzie problemu z wykorzystaniem jednego pinu na wyjście sterujące diodą LED a większość pinów zostanie niezagospodarowanych. Pojemność pamięci programu i RAM na poziomie odpowiednio 64kB i 32kB uznano za wystarczającą do pomieszczenia programu spełniającego wymagania odbiornika.



Rys. 3.22. Schemat mikrokontrolera odbiornika

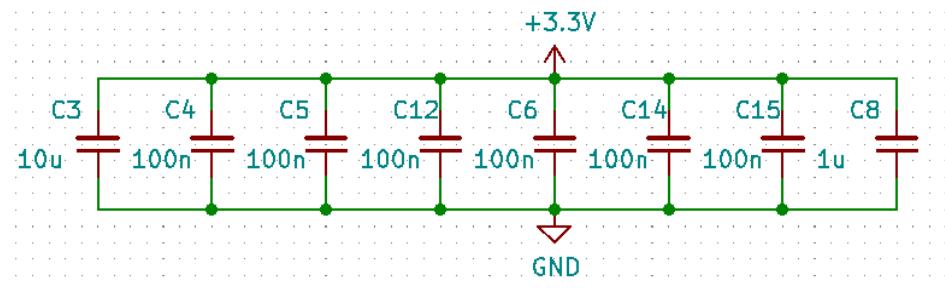
Podobnie jak w przypadku nadajnika, mikrokontroler odbiornika nie wymaga zewnętrznego układu resetu. Wewnątrz mikrokontrolera znajduje się rezystor podciągający pin resetu do zasilania. Opcjonalnie wprowadzono kondensator ceramiczny podciągający wyprowadzenie resetu do masy o pojemności 100nF chroniący przed pasożytniczymi resetami układu a równolegle do niego umieszczono przycisk umożliwiający celowe podawanie chwilowego niskiego stanu logicznego co dla tego pinu jest równoznaczne z zewnętrznym resetem. Aby mikrokontroler rozpoczynał pracę korzystając z pamięci FLASH programu, wprowadzono rezystor metalizowany o rezystancji 4,3kΩ podciągający pin BOOT0 (94) do masy [24]. Do wyprowadzenia GPIO podpięto diodę LED D3 emitującą kolor zielony połączoną szeregowo z rezystorem metalizowanym R7 4,3kΩ ograniczającym prąd. Profilaktycznie wprowadzono na schemacie rezystor R4 1,5kΩ podciągający linię USB D+ do zasilania, mimo że seria STM32L1 powinna funkcjonować poprawnie bez jego obecności [25]. Raster obudowy mikrokontrolera jest na tyle gęsty, że w przypadku błędu projektu przylutowanie przewodu do pinu mogłoby być trudne do wykonania. Dlatego aby uniknąć tego problemu, wprowadzono dodatkowe pady lutownicze w przypadku wyprowadzenia  $V_{LCD}$  i testpointów w przypadku  $V_{REF+}$  i  $V_{REF-}$ . Jeżeli układ będzie pracował poprawnie bez kondensatora na pinie  $V_{LCD}$  i podawania napięć na testpointy  $V_{REF+}$  i  $V_{REF-}$  to pady nie zostaną wykorzystane w projekcie. Do pracy interfejsu USB wymagany jest sygnał 48MHz, generowany wewnętrznej pętli synchronizacji fazy z użyciem zewnętrznego oscylatora kwarcowego [23]. Użyto rezonator kwarcowy o generowanej częstotliwości 16MHz, pojemności  $C_L$  równej 16pF i szeregowej rezystancji ESR o wartości 40Ω.



Rys. 3.23. Schemat oscylatora kwarcowego [24]

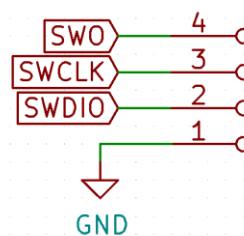
$$C_L = C_{L1} * C_{L2} / (C_{L1} + C_{L2}) + C_{stray} \quad [24] \quad (3.11)$$

Przy pojemnościach  $C_{L1}$  i  $C_{L2}$  równych  $20\text{pF}$  (kondensatory ceramiczne C10 i C11) i pojemności kryształu kwarcu  $C_L$  o wartości  $16\text{pF}$ , zgodnie z równaniem pojemność  $C_{\text{stray}}$  powinna być równa  $6\text{pF}$ . Jest ona związana z pojemnością pinów mikrokontrolera, płytka lub ścieżek. Zwykle mieści się ona w granicy  $2\text{-}7\text{pF}$  i jest ona zależna od projektu płytki PCB. Rezystancja  $R_{\text{EXT}}$  zależy od charakterystyki kryształu, jednak zwykle powinna mieć wartość pięciu do sześciu wartości ESR kryształu [24]. Przedział ten odpowiada rezystancji  $200\text{-}240\Omega$  a do tego celu wybrano rezistor metalizowany R5 o wartości  $220\Omega$ .



Rys. 3.24. Kondensatory odsprzęgające zasilanie mikrokontrolera odbiornika

Analogicznie jak w układzie nadajnika, do poprawnej pracy układu mikrokontrolera odbiornika wymagane są kondensatory odprzędające. Na każde wyprowadzenie  $V_{\text{DD}}$  przypada pojedynczy kondensator ceramiczny  $100\text{nF}$  połączony do masy a na jedno wybrane - dodatkowy kondensator ceramiczny  $10\mu\text{F}$ . Między pinem  $V_{\text{DDA}}$  a masą połączono kondensator ceramiczny  $100\text{nF}$  i  $1\mu\text{F}$ .



Rys. 3.25. Złącze do programowania mikrokontrolera odbiornika

Tak jak w przypadku nadajnika do wgrywania programu do pamięci FLASH zostanie wykorzystany interfejs SWD. Różnicą jest brak użycia linii NRST, która nie jest wymagana do wymiany danych między odbiornikiem a programatorem, gdyż układ może zostać zresetowany poprzez zmianę wartości rejestru. Dodano również linię SWO mającą na celu ułatwienie debugowania urządzenia.

### 3.3.3. ODBIORNIK PODCZERWIENI

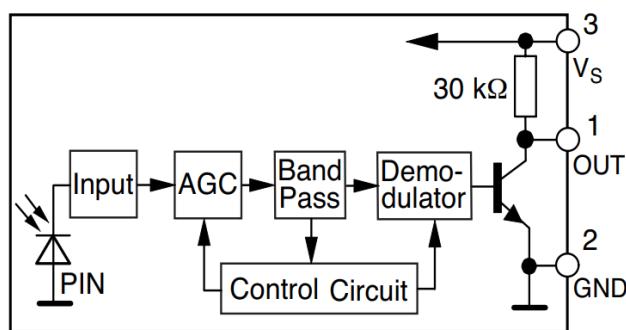
---

W projekcie urządzenia odbiorczego potrzebny jest komponent, którego zadaniem będzie odbiór komunikatów przesyłanych przez część nadawczą. Odbiornik podczerwieni będzie przetwornikiem generującym sygnał elektryczny odzwierciedlający intensywność promieniowania optycznego z zakresu bliskiej podczerwieni. Forma w jakiej przesyłane są informacje w budowanym systemie powinna zminimalizować szansę zaburzeń działania odbiornika przez inne źródła promieniowania optycznego tj. piloty zdalnego sterowania lub promieniowanie słoneczne. Po odebraniu symbolu przez odbiornik mikrokontroler będzie decydował czy pochodzi on od nadajnika przez sprawdzenie czy jest on tożsamy z przesyłanymi danymi.

Początkowo rozważano wykorzystanie zaprojektowanego, dedykowanego przetwornika prąd-napięcie z fotodiodą LL-503PDD2E firmy LUCKYLIGHT. Rozpatrywano przesyłanie danych w formie transmisji szeregowej. Fotodioda posiada czas załączenia i wyłączenia 45ns, reaguje na długości fali 700-1200nm a najwyższa czułość występuje przy 940nm. Wybrano wzmacniacz operacyjny MCP6V81UT-E/OT firmy MICROCHIP TECHNOLOGY zwracając uwagę na wysoką wartość wzmacnienia i prędkość narastania napięcia. Anoda fotodiody i wejście nieodwracające wzmacniacza zostały uziemione a katodę połączono do wejścia odwracającego układu. Dodano ujemne sprzężenie zwrotne rezystorem metalizowanym z wysoką rezystancją  $1M\Omega$ , od której wartości zależała wartość wzmacnienia transimpedancyjnego. Uruchomienie układu zweryfikowało koncepcję przetwornika prąd-napięcie, który nie spełniał oczekiwanych stawianych przed odbiornikiem podczerwieni. Działanie układu było mocno uzależnione od mocy światła słonecznego w pomieszczeniu, przez które w słoneczny dzień potrafił występować niezmienny wysoki stan logiczny na wyjściu przetwornika. W warunkach redukujących wpływ światła słonecznego, dalej występowały problemy w komunikacji na odległość 10cm.

Finalnie wybrano scalony odbiornik podczerwieni TSOP4838 firmy VISHAY. Wyjście układu generuje zdemodulowany sygnał wejściowy, dlatego może być bezpośrednio podłączone do wyprowadzenia mikrokontrolera. Wewnątrz obudowy znajduje się dioda PIN, przedwzmacniacz i filtr optyczny. Filtr optyczny jest wykonany z żywicy epoksydowej, przez co układ jest niewrażliwy na długości fali poniżej 750nm. Odbiornik jest czuły na długości fali od 750nm do 1150nm a maksimum występuje na długości 950nm. Przesyłane informacje powinny mieć zmodulowaną postać z nośną o częstotliwości 38kHz. Producent zapewnia dużą odporność na zakłócenia zewnętrzne a wyróżnikiem sygnału od zakłóceń jest częstotliwość nośnej i współczynnik wypełnienia sygnału. W przypadku wystąpienia zakłóceń odbiór danych od nadajnika dalej będzie możliwy, jednak czułość przyrządu zostanie

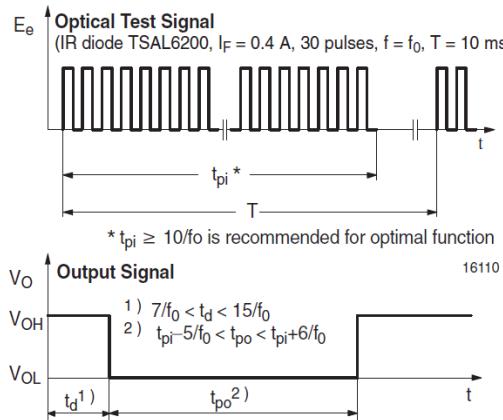
ograniczona do takiego stopnia, że nie wystąpią nieplanowane impulsy na wyjściu odbiornika. Źródłem zakłóceń może się okazać: światło słoneczne, światło od żarówek wolframowych (tradycyjnych), sygnały optyczne o podobnej częstotliwości do nośnej, sygnały z lamp fluorescencyjnych z modulacją niską lub wysoką. Na wyjściu odebrane dane będą miały zanegowaną wartość, dlatego stanem aktywnym jest niski stan logiczny a domyślnym stanem przy braku transmisji jest wysoki stan logiczny. Negacja wynika z budowy układu a dokładniej ze stopnia wzmacniającego na wyjściu (widocznego na rysunku) [26].



Rys. 3.26. Schemat blokowy odbiornika podczerwieni [26]

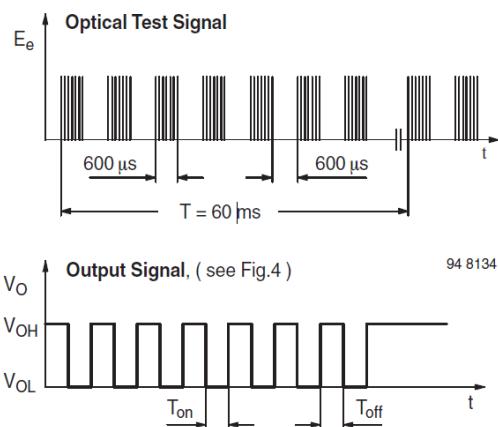
Odebrana informacja przez diodę PIN przechodzi przez blok automatycznej regulacji wzmocnienia (AGC), filtr pasmowy, demodulator i finalnie przez stopień wzmacniający. Napięcie zasilania nie powinno przekroczyć 6V a pobór prądu nie będzie wyższy niż 5mA. Według producenta maksymalny dystans urządzenia w specyficznych warunkach wynosi około 35m. Minimalna irydancja tego modelu układu umożliwiająca odbiór danych to  $0,2\text{mW/m}^2$  a maksymalna irydancja nie powinna przekroczyć  $30\text{W/m}^2$ . Czułość przetwornika jest zależna od poziomu zakłóceń optycznych i tych występujących na liniach zasilania. Powyżej kąta  $45^\circ$  od normalnej wierzchołka czoła odbiornika czułość odbiornika spada o połowę [26].

Przesyłany sygnał optyczny będzie musiał mieć formę zmodulowanej wartości cyfrowej z nośną o częstotliwości 38kHz. Najpierw konieczne będzie ustalenie prędkości transmisji, która będzie determinować ilość okresów nośnej odpowiadających pojedynczemu bitowi '0' (niski stan logiczny) lub ten sam odcinek czasu bez nośnej odpowiadający bitowi '1' (wysokiemu stanowi logicznemu) na wyjściu. Występuje negacja – kiedy pojawia się sygnał optyczny to jest niski stan logiczny a jak go nie ma to panuje wysoki stan logiczny, co jest spowodowane końcowym stopniem wzmacniającym układu.



Rys. 3.27. Przykład działania odbiornika [26]

Opóźnienie sygnału elektrycznego na wyjściu oscyluje w granicy od 7 do 15 okresów nośnej a czas trwania stanu niskiego może okazać się krótszy o 5 lub dłuższy o 6 okresów nośnej. Dlatego zalecane jest wykorzystywanie przynajmniej 10 do nawet 70 okresów na pojedynczy przesyłany bit [26]. Większa liczba okresów przypadających na pojedynczy bit zmniejsza prędkość transmisji.

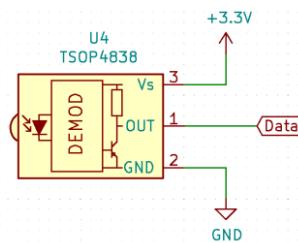


Rys. 3.28. Przykładowa ramka danych odebrana przez odbiornik [26]

Przykład przedstawiony na obrazku, gdzie przesłanie pojedynczego bitu trwa  $600\mu s$  odpowiada czasu około 23 okresów nośnej i przepływności transmisji szeregowej 1667b/s.

Producent zaleca zastosowanie kondensatora elektrolitycznego o pojemności  $4,7\mu F$  i rezystora  $100\Omega$ , które formują filtr dolnoprzepustowy chroniący układ przed zakłóceniami zasilania [26]. Zrezygnowano z tego rozwiązania ze względu na umieszczenie układu na płytce PCB w niewielkiej odległości od kondensatorów odprzegających mikrokontroler. Wyjście odbiornika OUT (1) podłączono z wejściem układu USART2 mikrokontrolera na

wyprowadzeniu PA3(26). Masę układu GND (2) połączono z masą urządzenia a zasilanie  $V_S$  (3) z potencjałem 3,3V.

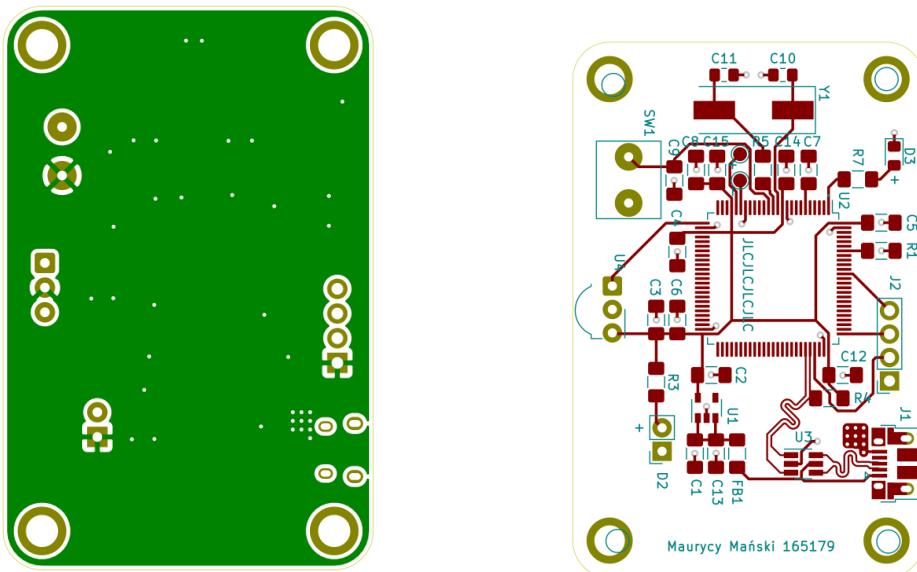


Rys. 3.29. Schemat odbiornika podczerwieni

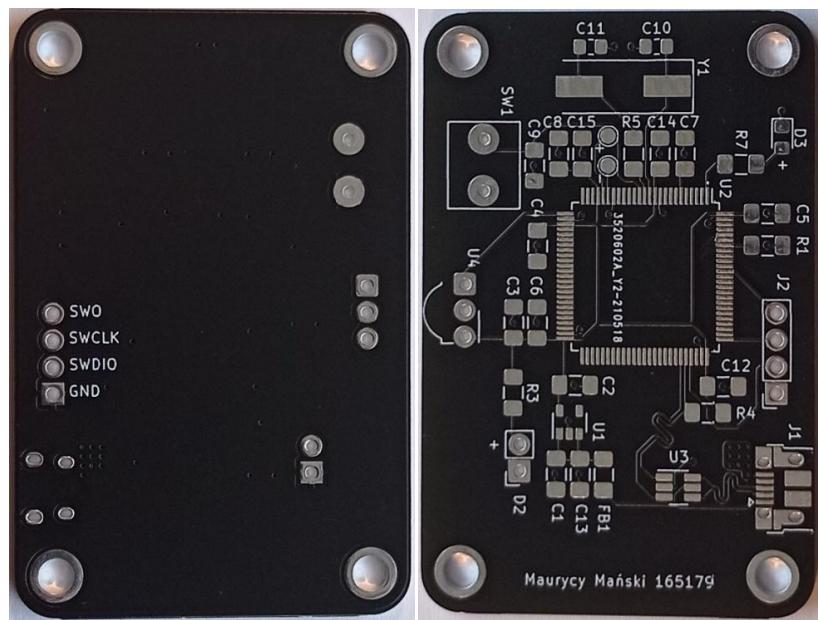
### 3.3.4. OBWÓD DRUKOWANY

Proces tworzenia obwodu drukowanego odbiornika był bardzo zbliżony do nadajnika. Po stworzeniu schematu elektrycznego w programie „KiCad 5.1.4” wykonano testy weryfikujące poprawność narysowanego schematu i rozpoczęto prace nad projektem PCB. Założono, że płytka odbiornika również będzie 2 warstwowa, z warstwami opisowymi, czarną soldermaską, metalizacją otworów i grubością 2mm. Na dolnej warstwie PCB umieszczono płaszczyznę masy a wszystkie komponenty umieszczone na górnej warstwie zostawiając niemalże płaską powierzchnię spodnią (do idealnie płaskiej powierzchni nie mogłyby występować elementy THT). Wymiary płytki nie były odgórnio ograniczone, jednak stawiano na możliwie najmniejszy rozmiar i zaokrąglone narożniki. W pierwszej kolejności pogrupowano elementy w podgrupy. Priorytetowo zadbane aby kondensatory odprzęgające znalazły się blisko wyprowadzeń zasilania układów scalonych. Na każdy pin  $V_{DD}$  przypada pojedynczy kondensator 100nF a na jeden z nich dodatkowy 10 $\mu$ F. Pin przy którym wystąpił kondensator 10 $\mu$ F wybrano tak, żeby znajdował się blisko układu TSOP4838, aby zapewnić odbiornikowi podczerwieni lepsze odprzężenie zasilania. W kolejnym kroku zadbane o niedużą odległość między mikrokontrolerem a układem oscylatora kwarcowego i układem resetu. Dystans elementów sąsiadujących z mikrokontrolerem nie mógł być jednak zbyt mały, żeby nie utrudnić procesu lutowania. Zadbano również aby wyjście stabilizatora znalazło się blisko urządzeń pobierających prąd – mikrokontrolera i odbiornika podczerwieni. Układ chroniący przed ESD umieszczono w bliskiej odległości od złącza micro USB. Wykorzystano narzędzie programu do poprowadzenia pary różnicowej w taki sposób, aby linie danych interfejsu USB miały równą długość. Następnie przemieszczono tak rezistor podciągający linię D+ do zasilania 3,3V, że linia interfejsu przechodzi przez pad rezystora.

Umiejscowiono złącze micro USB i programatora w lekkiej odległości od pozostałych komponentów. Ograniczono płytę warstwą „Edge.Cuts” otrzymując wymiary 58x40mm, dzieląc krawędź boczną z footprintem złącza USB. Zaokrąglenie krawędzi wykonano z łukiem o promieniu 4mm. W odległości 4mm od sąsiadujących krawędzi płytka dodano otwory montażowe o średnicy wiercenia 3,3mm i średnicy metalizacji 5mm. Wszystkie ścieżki PCB mają szerokość 0,3mm poza parą różnicową, której szerokość została zmodyfikowana przez narzędzie do trasowania par różnicowych do 0,2mm. Każda przelotka na płytce posiada średnicę 0,8mm i średnicę wiercenia 0,4mm. Aby zmniejszyć rezystancję i indukcyjność połączenia złącza USB z powierzchnią masy wprowadzono 10 przelotek. Do pozostałych połączeń z masą użyto po jednej przelotce. Dodano LED z rezystorem do pinu mikrokontrolera, który był łatwo dostępny na PCB tj. PE2 (1). Projekt obwodu drukowanego był wykonywany równocześnie z konstrukcją urządzenia, przez co wybierano takie wyprowadzenia, które były wolne i nie powodowały krzyżowania się ścieżek. Powiększono pady elementów THT w celu ułatwienia późniejszego procesu lutowania. Aby ułatwić montaż zadano o czytelne warstwy opisowe informujące o przynależności danego padu do komponentu, podpisano linie złącza do programowania i wykonano podpis autora projektu. Mając gotowy projekt PCB wykonano testy poprawności projektowania, które finalnie nie wykazały błędów. Wygenerowano pliki produkcyjne Gerber i zlecono produkcję płytki wyspecjalizowanej firmie, po czym otrzymano fizyczne kopie obwodu drukowanego.

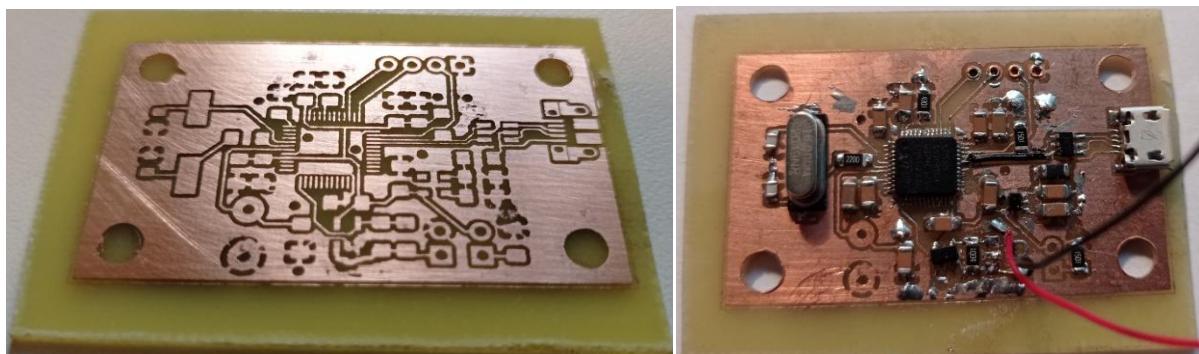


Rys. 3.30. Obwód drukowany odbiornika (1/2)



Rys. 3.31. Obwód drukowany odbiornika (2/2)

Przed wysłaniem plików produkcyjnych odbiornika do wyprodukowania, wykonano kopię projektu z użyciem wyłącznie jednej warstwy. Metodą termotransferu wykonano prototyp odbiornika z pojedynczą warstwą a proces jego wykonywania przebiegał analogicznie do prototypu nadajnika. Uruchomienie urządzenia było utrudnione z powodu słabej jakości wykonania – linia pary różnicowej odpadła więc próbowało przylutować cienki przewód wzdułż ubytku. Umieszczenie zwor pod mikrokontrolerem, również znacząco utrudniło proces montażu. Dzięki wykonaniu prototypu zrezygnowano z użycia przetwornika prąd-napięcie i wykorzystano scalony odbiornik podczerwieni oraz zastosowano LED z rezystorem ograniczającym podłączonym do mikrokontrolera w celu łatwiejszej weryfikacji poprawnego działania programu.



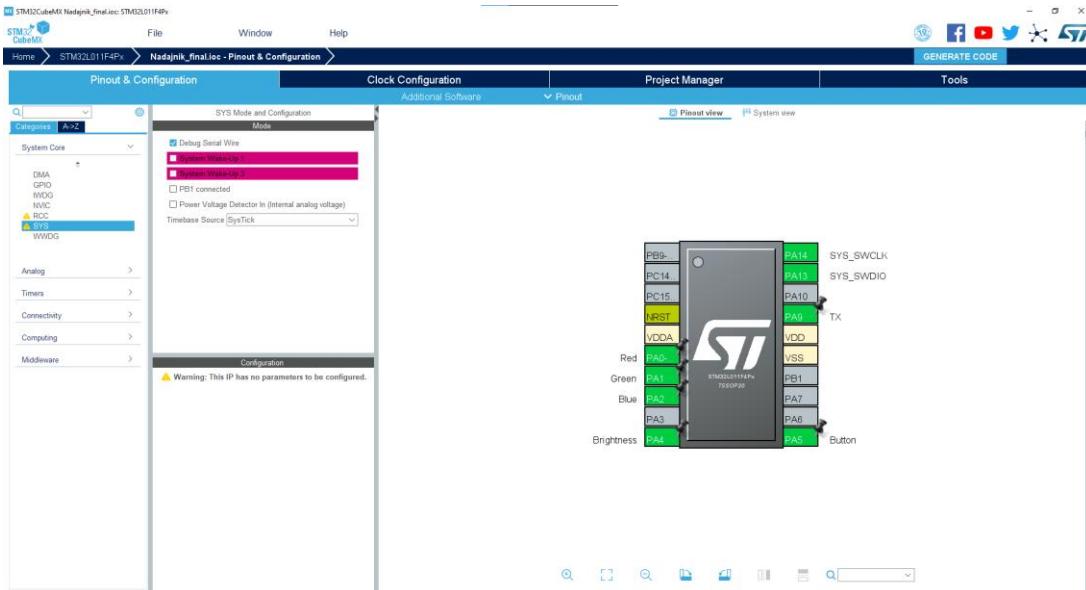
Rys. 3.32. Prototyp obwodu drukowanego odbiornika

## 4. OPROGRAMOWANIE

Oprogramowanie nadajnika i odbiornika było rozwijane z użyciem środowiska do programowania mikrokontrolerów STM32 „STM32CubeMX” oraz „TrueStudio for STM32 9.3.0”. Program „STM32CubeMX” posłużył do generowania kodu posiadającego wstępную konfigurację sprzętu. Konfiguracja została ustawiona w interfejsie graficznym poprzez aktywowanie funkcji mikrokontrolera (układów peryferyjnych) oraz przypisanie wartości parametrom pracy (rejestrom). Wstępna konfiguracja urządzenia nie wystarczyła do zamierzonej pracy nadajnika i odbiornika. Do modyfikacji wygenerowanego kodu i budowania projektu (generowania plików .hex) wykorzystano program „TrueStudio for STM32 9.3.0”. W programie tym wprowadzano zmiany w wygenerowanym kodzie jedynie w miejscach do tego przeznaczonych tj. pomiędzy znacznikami `/* USER CODE BEGIN */` a `/* USER CODE END */`. Kod wprowadzony w innym obszarze mógłby ulec skasowaniu przy nanoszeniu zmian w programie „STM32CubeMX” i ponownym wygenerowaniu kodu (obszar poza znacznikami jest przeznaczony jedynie do wstępnej konfiguracji).

### 4.1. OPROGRAMOWANIE NADAJNIKA

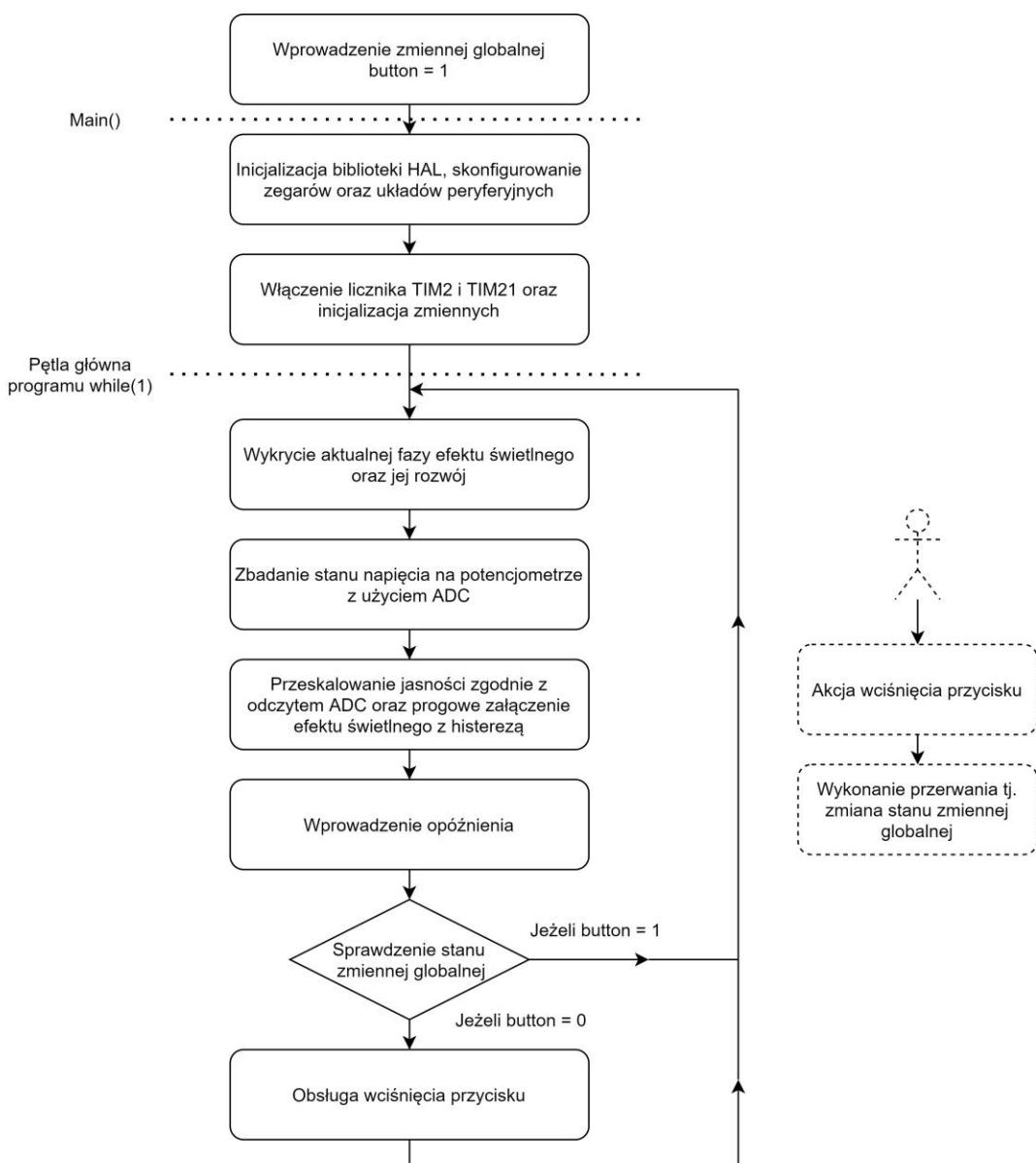
Program mikrokontrolera w nadajniku musi spełniać 3 funkcje: efektu wizualnego na diodach LED, obsługę przycisku i wysłanie ramki danych. Najpierw wygenerowano w programie „STM32CubeMX” kod wstępnie skonfigurowanego mikrokontrolera STM32L011F4P6.



Rys. 4.1. Konfiguracja nadajnika w programie CubeMX

Załączono tryb debugowania z użyciem interfejsu SWD aktywując linię SWCLK na linii PA14 (20) i SWDIO na linii PA13 (19). Zegar systemowy mikrokontrolera SYSCLK wraz z wszystkimi układami peryferyjnymi będzie taktowany wewnętrznym oscylatorem RC o częstotliwości 32MHz. Na wyprowadzeniu PA5 aktywowano pin GPIO z funkcją zewnętrznego przerwania ze zboczem opadającym oraz włączono przerwanie w kontrolerze sprzętowym przerwań NVIC. Pin będzie wykrywał zbocza opadające na przycisku w momencie jego wcisnięcia, ponieważ w tej sytuacji naładowany kondensator będzie łączony przez rezystor do masy układu. Na linii PA4 aktywowano funkcję kanału 4 przetwornika analogowo-cyfrowego, który będzie odpowiedzialny za odczyt wartości napięcia na potencjometrze. Wartość ta będzie miała bezpośredni wpływ na intensywność promieniowania podświetlenia. Piny PA0, PA1 i PA2 odpowiadają 3 sygnałom PWM sterującym diodami w kolorach odpowiednio: czerwonym, zielonym i niebieskim. Wyprowadzenia te aktywowano jako kanały 1,2,3 licznika TIM2. W konfiguracji licznika wybrano źródło taktowania jako zegar wewnętrzny mikrokontrolera, kanały ustawiono w tryb „PWM Generation”. Aby otrzymać częstotliwość sygnału PWM o wartości 1kHz podzielono wewnętrzny zegar za pomocą preskalera (dzielnika częstotliwości) na 32 i ustalono zliczanie do wartości 1000. Na tym etapie można było ustawić wartość progową na każdym kanale licznika przy której stan logiczny zmienia się z wysokiego na niski. Po doliczeniu do końcowej wartości (1000), licznik wraca do wartości początkowej i zmienia stan logiczny z niskiego z powrotem na wysoki. W ten sposób powstaje sygnał PWM o modyfikowalnym współczynniku wypełnienia. W interfejsie graficznym pozostawiono domyślne wartości, gdyż zostanie to zmienione w kodzie po jego wygenerowaniu. Na pinie PA9 (17) aktywowano

funkcję GPIO z wyjściem Push-Pull, który będzie generował zmodulowany sygnał elektryczny sterujący nadajnikiem podczerwieni. Aktywowano licznik TIM21, którego działanie będzie zapewniać planowane opóźnienia rzędu mikrosekund, potrzebnych do przesłania zmodulowanej sekwencji bitów. W ustawieniach wybrano wewnętrzny zegar jako źródło taktowania licznika oraz ustalono maksymalną wartość do której może zliczać licznik 16-bitowy – 65535. Większa maksymalna wartość do której licznik zlicza, da możliwość otrzymania dłuższego czasu opóźnienia. Wyprowadzenia zostały podpisane etykietami przedstawionymi na rysunku. W opcjach generowania wybrano IDE „TrueSTUDIO” oraz umieszczenie oddziennie kodu inicjalizacji układów peryferyjnych w parach plików .c i .h.



Rys. 4.2. Schemat blokowy programu nadajnika

Przed wystąpieniem głównej funkcji main() wprowadzono jedną zmienną globalną „button” typu uint8\_t o wartości 1. W programie zmienna będzie mogła mieć tylko 2 stany – wartość 0 lub 1. Służy ona do komunikacji ze światem zewnętrznym.

```
volatile uint8_t button = 1;
```

Zmienia ona wartość na 0 w momencie wcisnięcia przycisku, przy wykonaniu przerwania. Przerwanie wprowadza pewną zmianę stanu zmiennej, co jest zaletą nad cyklicznym sprawdzaniem stanu wejścia GPIO. Aby omyłkowo kompilator nie zmienił zmiennej na stałą (ponieważ poza obsługą przerwania zmienna nie może zmienić stanu poza wartością 1), dopisano dopisek „volatile” przed typem zmiennej. Obsługa przerwania została dodana pod funkcją main().

```
void HAL_GPIO_EXTI_Callback(uint16_t GPIO_Pin){  
    if(GPIO_Pin == Button_Pin){  
        button = 0;  
    }  
}
```

Funkcja main() zaczyna się od wykonania procedur: inicjalizacji biblioteki HAL, skonfigurowania zegarów oraz układów peryferyjnych. Jedynie procedura konfiguruująca zegary mikrokontrolera „SystemClock\_Config” jest zawarta w pliku main.c a reszta została zawarta w oddzielnych plikach .c i .h dla poszczególnych układów peryferyjnych. Procedury zostały wygenerowane w wyniku etapu konfiguracji w programie „STM32CubeMX”. W tej części zostały skonfigurowane układy peryferyjne: GPIO, przetwornik analogowo-cyfrowy (ADC), licznik TIM2 i licznik TIM21.

```
int main(void)  
{  
    /* USER CODE BEGIN 1 */  
  
    /* USER CODE END 1 */  
  
    /* MCU Configuration-----  
    ---*/  
  
    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the  
    SysTick. */  
    HAL_Init();  
  
    /* USER CODE BEGIN Init */  
  
    /* USER CODE END Init */  
  
    /* Configure the system clock */  
    SystemClock_Config();  
  
    /* USER CODE BEGIN SysInit */
```

```

/* USER CODE END SysInit */

/* Initialize all configured peripherals */
MX_GPIO_Init();
MX_ADC_Init();
MX_TIM2_Init();
MX_TIM21_Init();

```

Skonfigurowanie liczników nie było wystarczające do ich pracy i wymagane było również zapoczątkowanie ich pracy. Licznik TIM21 wystarczyło wystartować a w przypadku licznika TIM2, do rozpoczęcia generacji sygnałów PWM konieczne było aktywowanie każdego kanału z osobna. Stopień wypełnienia sygnałów na ten moment programu pozostał z niezmienioną wartością domyślną 0%, zatem diody efektu świetlnego jeszcze nie emitują promieniowania. Dodano zmienne z zainicjalizowanymi wartościami. Zmienne „Red”, „Green”, „Blue” odpowiadają w programie za przebieg efektu świetlnego i przypisano im wartości odpowiednio 999, 500, 0. Użyto zmiennych uint16\_t, ponieważ wartości będą oscylować od 0 do 999, co wymaga przynajmniej 10-bitowej zmiennej bez znaku. W zmiennej „power” przechowywana będzie wartość odczytana z 12-bitowego przetwornika analogowo-cyfrowego. Wartości będą w granicy od 0 do 4095, gdzie wyższa wartość zmiennej odpowiadać będzie wyższemu napięciu na pinie ADC oraz większej intensywności promieniowania diod LED. Do przechowania 12-bitowej informacji zwrotnej przetwornika wykorzystano zmienną uint16\_t i zainicjowano ją z wartością 0. Dla większej czytelności kodu stworzono dodatkowe zmienne „Red\_Scaled”, „Green\_Scaled”, „Blue\_Scaled”, przechowujące przeskalowaną wartość chwilowego natężenia poszczególnej diody, uwzględniając wartość odczytaną przez ADC. Przypisano im typy 32bitowe bez znaku uint32\_t, ze względu na obliczenia, które będą musiały zostać wykonane aby otrzymać wartość przeskalowaną i przypisano im wartość 0. Do zapisu aktualnej fazy efektu świetlnego wykorzystano zmienną „state” typu uint8\_t i zainicjalizowano ją wartością 0.

```

/* USER CODE BEGIN 2 */

HAL_TIM_Base_Start(&htim21);

HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_1); // red
HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_2); // green
HAL_TIM_PWM_Start(&htim2, TIM_CHANNEL_3); // blue

uint16_t Red = 999;
uint16_t Green = 500;
uint16_t Blue = 0;

uint32_t Red_Scaled = 0;
uint32_t Green_Scaled = 0;
uint32_t Blue_Scaled = 0;

uint8_t state = 0;

```

```

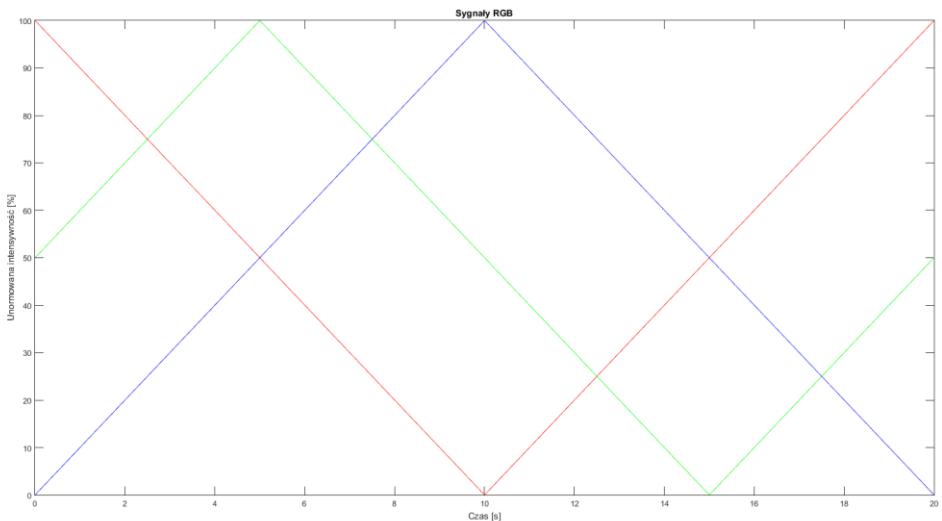
uint16_t power = 0;

/* USER CODE END 2 */

/* Infinite loop */
/* USER CODE BEGIN WHILE */

```

Wartości zmiennych „Red”, „Green”, „Blue” zostały tak dobrane, aby w trakcie pracy programu sygnały RGB miały formę przesuniętych w fazie sygnałów trójkątnych. Ustanawiając sygnał koloru zielonego jako odniesienie, sygnał barwy czerwonej będzie go wyprzedzać o  $\pi/2$  a sygnał koloru niebieskiego będzie opóźniony o  $\pi/2$  w fazie. Zastosowanie 3 diod RGB sterowanych sygnałami przesuniętymi w fazie umożliwia uzyskanie wielu efektownych barw podczas każdego cyklu. Sekwencja uzyskanych kolorów będzie się powtarzać w każdym cyklu.



Rys. 4.3. Sygnały RGB efektu świetlnego

Pętla główna programu rozpoczyna się od wykrycia aktualnej fazy efektu świetlnego. Faza efektu czyli utrzymanie stałej monotoniczności 3 sygnałów równocześnie. Faza się kończy kiedy pojedynczy sygnał lub sygnały osiągają wartość graniczną 0 lub 999. Wyróżniono 4 fazy efektu świetlnego:

- 1 faza wykonuje się od momentu osiągnięcia wartości 999 przez sygnał czerwony do osiągnięcia wartości 999 przez kolor zielony,

- 2 faza jest określona od momentu osiągnięcia wartości 999 przez sygnał zielony do zmiany wartości sygnału niebieskiego na 999 lub równoznacznie wartość 0 sygnału czerwonego,
- 3 faza trwa od otrzymania wartości 999 przez sygnał niebieski lub 0 przez sygnał czerwony do momentu zmiany wartości sygnału zielonego na 0,
- 4 faza odbywa się między uzyskaniem wartości 0 przez sygnał zielony do zmiany sygnału czerwonego na 999 lub sygnału niebieskiego na 0.

Faza 1 wykonuje się w pierwszej kolejności po uruchomieniu nadajnika, po zakończeniu poszczególnej fazy rozpoczyna się faza z numerem o jeden większym a po fazie 4 wykonuje się ponownie faza 1. Wzrost sygnału jest wykonywany przez dodanie wartości 1 do zmiennej przechowującej aktualną wartość sygnału RGB a obniżenie analogicznie poprzez odjęcie wartości 1.

```

while (1)
{
    while(button) {
        if(Red == 999) state = 1;
        else if(Green == 999) state = 2;
        else if(Blue == 999) state = 3;
        else if(Green == 0) state = 4;

        if(state == 1){
            Red = Red - 1;
            Green = Green + 1;
            Blue = Blue + 1;
        }
        else if(state == 2){
            Red = Red - 1;
            Green = Green - 1;
            Blue = Blue + 1;
        }
        else if(state == 3){
            Red = Red + 1;
            Green = Green - 1;
            Blue = Blue - 1;
        }
        else if(state == 4){
            Red = Red + 1;
            Green = Green + 1;
            Blue = Blue - 1;
        }
    }
}

```

W kolejnym kroku badane jest napięcie na wyprowadzeniu przetwornika analogowo cyfrowego. Wymagane jest każdorazowo wystartowanie przetwornika funkcją „HAL\_ADC\_Start”, wysłanie polecenia zbadania napięcia „HAL\_ADC\_PollForConversion” (próbkowanie sygnału) podając w argumencie ograniczenie czasowe na operacje 1s. Wykorzystując tę funkcję mikrokontroler czeka aż przetwornik skończy badać sygnał i nie

może wykonywać kolejnych operacji. Proces ten jednak nie trwa na tyle długo, żeby utrudniało realizację aplikacji. Otrzymana wartość od przetwornika jest umieszczana w zmiennej „power”. Zauważono, że kiedy potencjometr jest w położeniu podającym skrajnie niskie napięcie na wyprowadzenie ADC, efekt świetlny zaczął skokowo zmieniać intensywność promieniowania optycznego o niskim natężeniu. Jest to spowodowane ograniczonym zakresem wartości (stopniem wypełnienia) sygnałów PWM przez ich przeskalowanie w oparciu o odczyt przetwornika analogowo-cyfrowego. Zadecydowano poświecić 4,88% drogi potencjometru na funkcję wyłączenia podświetlenia, przy zachowaniu funkcjonalności nadajnika. Odczyt ADC poniżej 180 wyzerowuje wypełnienie sygnałów PWM. Aby włączyć podświetlenie konieczne jest przekroczenie wartości 200, co wprowadza zakres wartości 180-200 na histerezę. Mimo filtru dolnoprzepustowego możliwa jest minimalna fluktuacja sygnału mierzonego bez interwencji zewnętrznej, co mogłoby powodować załączanie i odłączanie podświetlenia przy pozycji potencjometru ustawionej na najmniej intensywne podświetlenie. Filtr dolnoprzepustowy posiada najwyższe częstotliwości odcienia w krańcowych położeniach. W przypadku gdyby przy pierwszym odczycie przetwornika analogowo-cyfrowego (po włączeniu nadajnika) wystąpiła wartość między 180 a 200, żadna z dwóch instrukcji nie zostanie wykonana. Domyślnie jednak sygnały PWM mają wypełnienie 0% i konieczne jest przekroczenie wartości 200 aby włączyć efekt świetlny. Przy odczytach ADC powyżej 200 wartości zmiennych „Red”, „Green”, „Blue” będą skalowane poprzez pomnożenie ich przez odczytaną wartość „power” i podzielenie przez zakres przetwornika (4095) a wyniki obliczeń zostaną umieszczone w zmiennych „Red\_Scaled”, „Green\_Scaled”, „Blue\_Scaled”. Wypełnienie sygnałów PWM zostało zaktualizowane z użyciem funkcji „\_\_HAL\_TIM\_SET\_COMPARE” podając w argumencie zmienne z przeskalowanymi wartościami sygnałów RGB.

```

HAL_ADC_Start(&hadc);
HAL_ADC_PollForConversion(&hadc, 1000);
power = HAL_ADC_GetValue(&hadc);

if(power < 180){

    Red_Scaled = 0;
    Green_Scaled = 0;
    Blue_Scaled = 0;

}

else if(power > 200){

    Red_Scaled = ( Red * power ) / 4095;
    Green_Scaled = ( Green * power ) / 4095;
    Blue_Scaled = ( Blue * power ) / 4095;
}

__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_1, Red_Scaled);
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_2, Green_Scaled);

```

```
__HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_3, Blue_Scaled);
```

Opóźnienie 20ms w każdej iteracji pętli uznano za wystarczające do uzyskania wolnozmennego efektu świetlnego. Szybkość zmian uzyskiwanych kolorów jest zależna od ustalonej wartości opóźnienia. Wykonanie pełnego cyklu efektu świetlnego powinno zająć około 20s. Poprzednia część kodu umieszczona w pętli głównej również zajmuje dodatkowy czas, więc faktyczny odstęp między aktualizacją współczynników wypełnienia sygnałów PWM może okazać się minimalnie większy. Aby układ reagował jak najszybciej na wciśnięcie przycisku użyto pętli wykonującej się 20 razy, sprawdzającej stan zmiennej globalnej i dodającej opóźnienie 1ms. Gdy zmienna „button” będzie mieć wartość 0 (przycisk zostanie wciśnięty) mikrokontroler wyjdzie z pętli i zaniecha w ten sposób dodatkowego opóźnienia, które w tej sytuacji byłoby niepożądane – będzie czekać maksymalnie 1ms. Przy braku akcji wciśnięcia przycisku pętla for wykona się 20 razy opóźniając przy każdej iteracji pracę o 1ms co w efekcie opóźni układ o 20ms.

```
for(int i=0 ;i<20 ;i++) {
    if(!button) break;
    HAL_Delay(1);
}

/* USER CODE END WHILE */

/* USER CODE BEGIN 3 */
```

Cały kod opisany od początku pętli głównej programu do tego momentu jest umieszczony w dodatkowej pętli while(button). W momencie zmiany wartości zmiennej globalnej przez obsługę przerwania, opóźnienie jest przerywane, ale również opuszczana jest pętla while(button) i wykonywana jest obsługa przycisku. Po jej zakończeniu główna pętla programu zaczyna wykonywać się od początku, wchodząc od razu w pętlę while(button). Obsługa przycisku zaczyna się od wyzerowania sygnału zielonego i niebieskiego oraz nadaniu współczynnika wypełnienia 10% sygnałowi PWM sterującemu kolorem czerwonym. Kolor czerwony jest dobrze widoczny nawet przy najniższym napięciu zasilania graniczącym z rozładowaniem akumulatora. Następnie wykonywana jest dedykowana funkcja send\_symbol wysyłająca sekwencję bitów do odbiornika poprzez diodę podczerwieni. Po jej wykonaniu mikrokontroler czeka przez 150ms i dopiero po tym czasie przypisywana jest wartość 1 zmiennej globalnej button. Wprowadzony czas oczekiwania ma za zadanie zminimalizować wpływ drgania styków, które mogłyby powodować wielokrotne wciśnięcie przycisku. Następnie program wykonuje pętlę for wykonującą się 450 razy i w każdej iteracji wykonywane jest opóźnienie 1ms. W każdej iteracji sprawdzany jest stan

zmiennej globalnej w instrukcji warunkowej if i jeżeli w czasie 450ms wykonywania pętli zostanie wciśnięty przycisk ponownie, to licznik iteracji jest zerowany, wysyłana jest ponownie ramka danych, wykonywane jest opóźnienie 150ms i zmieniana jest wartość zmiennej globalnej na 1. Niski czas wykonywania pojedynczej iteracji, zapewnia szybką odpowiedź systemu na ponowne wciśnięcie przycisku a wprowadzone opóźnienie między rozpoznawalnymi wciśnięciami przycisku gwarantuje wysłanie pojedynczego symbolu przy każdorazowym jego wciśnięciu. Na końcu obsługi przycisku przywracane są współczynniki wypełnienia sygnałów PWM z momentu przed jej rozpoczęcia. Fragment kodu odpowiedzialny za obsługę przycisku był tak pisany, aby nie występowały częste, nagłe zmiany podświetlenia. Jeżeli przycisk będzie częściej wciskany niż 600ms to czerwony kolor podświetlenia będzie się utrzymywać od chwili pierwszego wciśnięcia do upływu 600ms od ostatniego wciśnięcia przycisku.

```

}

    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_1, 100);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_2, 0);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_3, 0);
    send_symbol(10, 23);
    HAL_Delay(150);
    button = 1;

    for(int i=0 ;i<450 ;i++) {
        if(!button) {
            i = 0;
            send_symbol(10, 23);
            HAL_Delay(150);
            button = 1;
        }
        HAL_Delay(1);
    }

    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_1, Red_Scaled);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_2, Green_Scaled);
    __HAL_TIM_SET_COMPARE(&htim2, TIM_CHANNEL_3, Blue_Scaled);

}

/* USER CODE END 3 */
}

```

Funkcja send\_symbol działa w oparciu o 2 inne funkcje delay\_us oraz burst. Funkcja delay\_us wyzerowuje licznik TIM21 i oczekuje w pętli while do momentu, gdy licznik osiągnie wartość przesyłaną w argumencie (liczbę mikrosekund). Licznik jest taktowany zegarem głównym 32MHz z preskalerem dzielącym częstotliwość zegara na 32, czyli wartość licznika

będzie zwiększana o 1 co jedną mikrosekundę (1MHz). Użycie funkcji delay\_us powoduje wprowadzenie opóźnienia w danym miejscu programu o liczbę mikrosekund przesyłanych w argumencie. Funkcja burst generuje sygnał nośnej 38kHz przez liczbę okresów zdefiniowanych w argumencie funkcji. Każdy poszczególny okres jest iteracją pętli for. Okres nośnej jest formowany poprzez wystawienie wysokiego stanu logicznego na pinie sterującym diodą poczerwieni, odczekanie 13μs, ustawienie niskiego stanu logicznego i ponownie odczekanie 13μs. Założono, że zmiana stanu logicznego trwa pomijalnie krótko a sygnał o okresie 26μs odpowiada częstotliwości 38,46kHz co mieści się w zakresie tolerancji odbiornika. Funkcja send\_symbol wykonuje tyle iteracji pętli for ile równy jest przesyłany argument określający liczbę bitów w transmisji. W zależności od parzystości iteracji sprawdzanej operatorem modulo, wysyłana jest za zmianę seria impulsów (sygnał nośnej) lub jej brak wykonywany przez funkcję opóźniającą. Liczba okresów nośnej na bit jest przesyłana w argumencie funkcji a w przypadku funkcji opóźniającej czas opóźnienia jest równy iloczynowi liczby okresów nośnej i czasu jego trwania (26μs). Funkcja przesyła symbol złożony z naprzemiennej wysokiego i niskiego stanu logicznego. Należy pamiętać o negacji stanów logicznych po stronie odbiorczej, gdzie będzie występować domyślny wysoki stan logiczny. Pierwszy bit będzie bitem startu a w przypadku generowania nieparzystej liczby bitów, będzie dodawany jeden dodatkowy samoczynnie (bit stopu). Zaplanowano transmisję o przepływności 1667b/s, co odpowiada czasu 600μs na pojedynczy bit. Przesyłane będzie 10 bitów w tym jeden startu, jeden stopu, bez bitu parzystości. Zakładając, że transmisja zaczyna się od najmniej znaczącego bitu (jak zostało to zobrazowane na rysunku) i aktywnym stanem będzie stan wysoki to przesyłana wartość jest równa 85. Jeżeli odbiornik będzie zakładał, że bity są przesyłane od najbardziej znaczącego do najmniej znaczącego to sytuacja jest równoznaczna (w przypadku użytej funkcji) z negacją wartości 85 tj. 170. W przypadku gdy stanem aktywnym okaże się niski stan logiczny również dojdzie do negacji zamierzonej wartości. Przestudiowano wykres producenta odpowiedzi odbiornika poczerwieni na sygnał pobudzający, który ma bardzo zbliżoną formę do napisanej funkcji send\_symbol (600μs na bit). Zauważono, że czas trwania na wyjściu odbiornika niskiego stanu logicznego będzie równa około 700μs a wysokiego 500μs dla planowanego zakresu irradiancji 1-1000mW/m<sup>2</sup> [26]. Z tego powodu w funkcji send\_symbol przeskaliowano czas trwania stanów logicznych – pomnożono przez 6/5 czas niskiego stanu logicznego a wysokiego stanu logicznego (czas trwania nośnej) przez 6/7. Funkcje zostały napisane przed funkcją główną main().

```
void delay_us (uint16_t us)
{
    __HAL_TIM_SET_COUNTER(&htim21, 0);
}
```

```

    while (__HAL_TIM_GET_COUNTER(&htim21) < us);

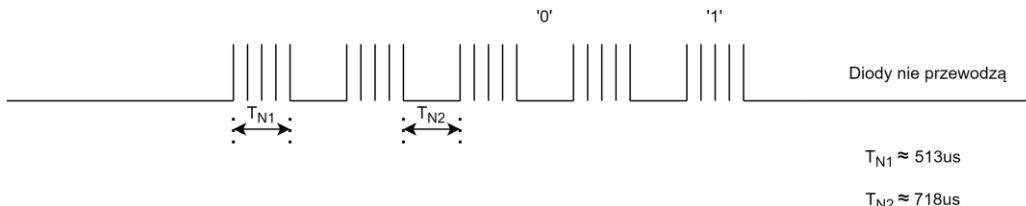
}

void burst(uint8_t cycle_count)
{
    for(int i = 0; i < cycle_count ; i++ ){
        HAL_GPIO_WritePin(TX_GPIO_Port, TX_Pin, GPIO_PIN_SET);
        delay_us(13);
        HAL_GPIO_WritePin(TX_GPIO_Port, TX_Pin, GPIO_PIN_RESET);
        delay_us(13);
    }
}

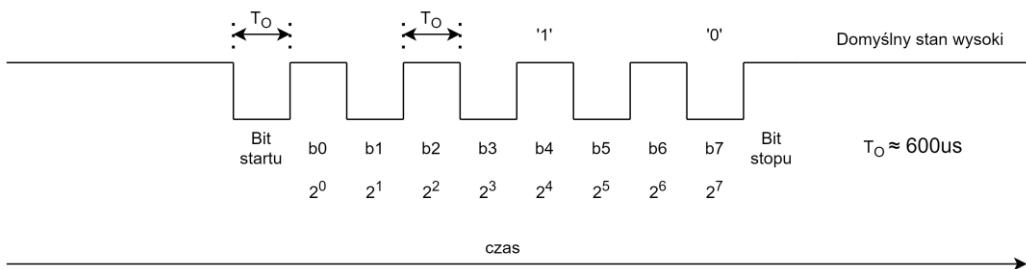
void send_symbol(uint8_t bit_count, uint8_t cycle_count){
    for(int i = 0; i < bit_count; i++){
        if(i%2) delay_us((26 * 6 * cycle_count) / 5);
        else burst((6 * cycle_count) / 7);
    }
}

```

Sygnal na diodach podczerwieni



Sygnal na wyjściu odbiornika podczerwieni



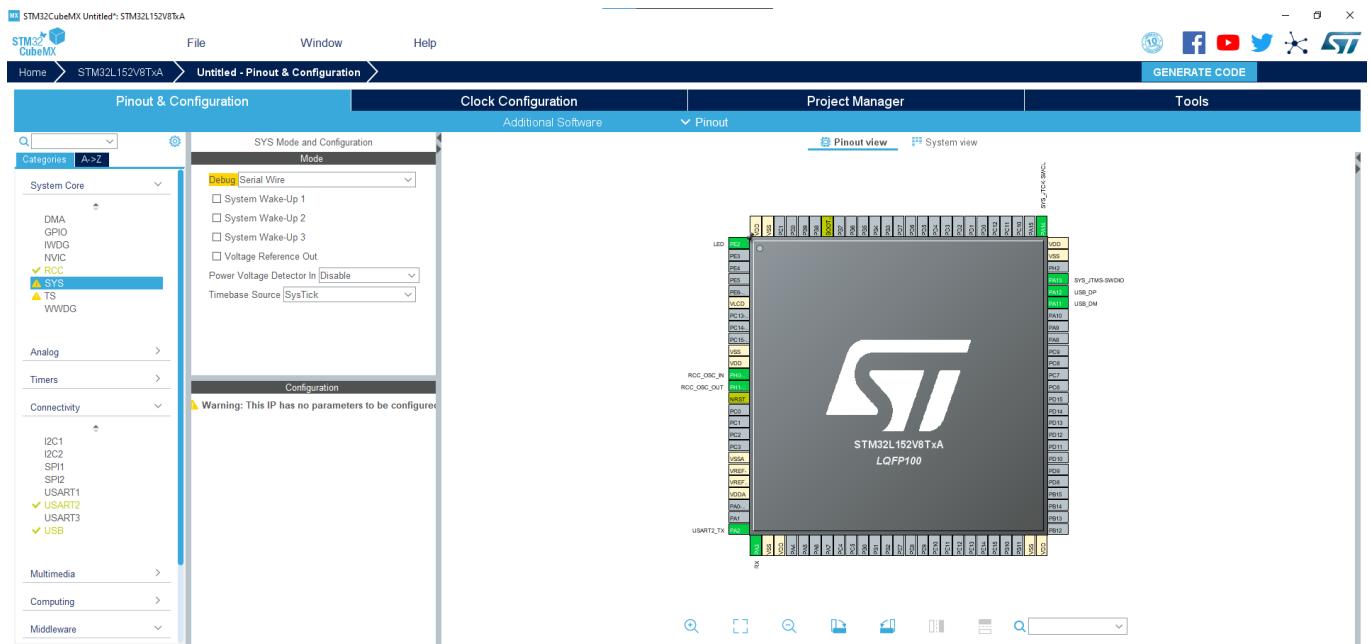
Rys. 4.4. Schemat przesyłanej ramki danych

Memory Regions		Memory Details				
Region	Start address	End address	Size	Free	Used	Usage (%)
RAM	0x20000000	0x20000800	2 KB	252 B	1,75 KB	87,70%
FLASH	0x08000000	0x08004000	16 KB	8,69 KB	7,31 KB	45,70%

Rys. 4.5. Objętość programu nadajnika

## 4.2. OPROGRAMOWANIE ODBIORNIKA

Program mikrokontrolera odbiornika musi wykonywać 2 funkcje: odbiór sekwencji bitów od odbiornika podczerwieni oraz wysyłanie komunikatu do komputera PC powodujący akcję lewego przycisku myszy lub przycisku na klawiaturze. Zadania te będą wspomagane przez wbudowane układy peryferyjne: USART do komunikacji szeregowej z odbiornikiem podczerwieni oraz układ USB do komunikacji z komputerem ogólnego przeznaczenia. Prace rozpoczęto od wygenerowania kodu wstępnie konfigurującego mikrokontroler STM32L152V8T6A w programie „STM32CubeMX”.



Rys. 4.6. Konfiguracja odbiornika w programie CubeMX

Aktywowano interfejs SWD, linia danych SWDIO została przypisana do wyprowadzenia PA13 (72) a linia zegarowa SWCLK do pinu PA14 (76). Włączono funkcję zewnętrznego oscylatora zapewniającego wysokie taktowanie HSE (high speed external), pin PH0 (12) został wejściem układu zegara a PH1 (13) wyjściem. Kryształ kwarcu zapewnia taktowanie 16MHz i jest konieczny do poprawnego działania układu USB. Wybrano zewnętrzny oscylator kwarcowy HSE jako źródło taktowania mikrokontrolera i ustawiono zegar systemu SYSCLK na 32MHz. Wszystkie układy peryferyjne będą taktowane zegarem 32MHz z wyjątkiem układu USB, który będzie taktowany sygnałem zegarowym 48MHz. Po

wybraniu częstotliwości sygnałów zegarowych, program automatycznie ustałił pętle synchronizacji fazy PLL i dzielniki częstotliwości. Wykorzystano pin PE2 (1) jako wyjście GPIO służące do sterowania diodą LED. Dioda ma ułatwiać weryfikowanie poprawności działania programu. Włączono układ USART2 mikrokontrolera i przypisano wyprowadzeniu PA3 (26) funkcję odbierania informacji. Skonfigurowano parametry układu odpowiedzialne za transmisję szeregową: przepływność 1667b/s, długość przesyłanego wyrazu 8 bitów, brak sprawdzania parzystości, pojedynczy bit stopu, aktywowano jedynie odbieranie przez układ. Pożądane jest aby układ powodował przerwanie w momencie odbioru danych, dlatego włączono jego możliwość w sprzętowym kontrolerze przerwań. Następnie aktywowano układ USB w trybie FS (full speed) z przepływnością 12Mb/s, przypisując wyprowadzenie PA11 (70) do linii DM i PA12 (71) do DP. Wybrano klasę urządzenia USB jako HID (Human Interface Device), umożliwiającą wykonywanie akcji klawiatury lub myszki. W ustawieniach klasy HID wprowadzono nazwę urządzenia „Maurycy Manski 165179” i nazwę firmy „Politechnika Gdanska”.

Interfejs USB (Universal serial Bus) jest architekturą komunikacyjną, zapewniającą możliwość połączenia różnych typów urządzeń do komputera osobistego z użyciem (pierwotnie) wyłączenie 4 linii w tym jednej pary różnicowej. Wraz z rozwojem interfejsu i powstawaniem nowszych standardów, liczba linii zwiększała się. Głównymi zaletami USB jest możliwość zapewnienia zasilania urządzeniom połączonym z PC oraz możliwość pracy komputera z urządzeniami peryferyjnymi zaraz po ich podłączeniu bez ingerencji użytkownika w jego konfigurację (Plug and Play). Interfejs USB osiągnął na tyle dużą popularność, że często złącza USB są wykorzystywane wyłączenie do celu ładowania lub zasilania urządzenia bez komunikacji między nimi (przykładowo ładowanie rządzeń mobilnych). Urządzenia USB zostały podzielone na klasy takie jak: Display, Communication, Audio, Mass storage, Human interface. Każda z nich określa wspólne zachowania i protokół dla urządzeń posiadających podobną funkcjonalność i wymagania względem transmisji danych. Przykładowymi urządzeniami w wymienionych klasach może być odpowiednio: monitor, modem, głośniki, dysk twardy, klawiatura. Zdarza się, że urządzenie jest kombinacją klas przykładowo telefon jest połączeniem klasy HID, Audio, Telephony. W tej pracy zostanie wykorzystana klasa HID (Human Interface Device) umożliwiająca tworzenie urządzeń wskazujących - klawiatura, myszka, dżojstik, TrackBall; elementów sterujących w panelach przednich – pokrętła, przełączniki, przyciski, suwaki; elementów sterujących w telefonach, pilotach do magnetowidu, grach lub urządzeniach symulacyjnych – rękawice do wirtualnej rzeczywistości (VR), pedały, kierownice. Urządzenia, które nie wymagają klasy HID ale zapewniają dane w zbliżonym formacie są czytniki kodów kreskowych, termometry albo woltomierze [27].

Informacje na temat urządzenia USB są zapisane wewnątrz jego pamięci ROM (tylko do odczytu) i są nazywane deskryptorami. Po podłączeniu urządzenia do hosta, urządzenie się przedstawia (przesyła swoje deskryptory), przez co komputer poznaje informacje o podłączonym urządzeniu i konfigurowana jest transmisja. Struktura deskryptorów jest bardzo złożona i są one pogrupowane na [27]:

- Deskryptor urządzenia - zawiera informację o producencie, identyfikatorze urządzenia, wersji oprogramowania, liczbie konfiguracji,
- Deskryptor tekstu - posiada tablice tekstu używane przez pozostałe deskryptory,
- Deskryptor konfiguracji – informuje o ilości interfejsów wspieranych przez tą konfigurację, parametry zasilania, maksymalny pobierany prąd,
- Deskryptor interfejsu - przypisuje klasę urządzenia (HID), podklasę, protokół, liczbę endpointów,
- Deskryptor HID - zawiera informacje o zawartości deskryptora raportu i deskryptora fizycznego oraz ich wielkości, kraj docelowy urządzenia,
- Deskryptor raportu - określa wielkość oraz strukturę danych (raportu) przesyłanych przez urządzenie do hosta (lub odwrotnie).
- Deskryptor fizyczny - jest opcjonalny i określa informację o części ciała użytej do kontroli urządzenia.
- Deskryptor Endpoint - określa typ i możliwości komunikacji USB (channel albo pipe) oraz maksymalną wielkość pakietu.

Generując projekt programem „STM32CubeMX” otrzymujemy gotową strukturę deskryptorów, odpowiadających działaniu myszki wraz z funkcją do wysyłania raportu. Deskryptor raportu nie został opisany komentarzami, więc aby być pewnym struktury i długości raportu zmieniono go na wygenerowany domyślny deskryptor raportu myszki w programie „HID Descriptor Tool”. Deskryptor raportu znajduje się w pliku „usbd\_hid.c”.

```
__ALIGN_BEGIN static uint8_t
HID_MOUSE_ReportDesc[HID_MOUSE_REPORT_DESC_SIZE] __ALIGN_END =
{
    0x05, 0x01,                                // USAGE_PAGE (Generic Desktop)
    0x09, 0x02,                                // USAGE (Mouse)
    0xa1, 0x01,                                // COLLECTION (Application)
    0x09, 0x01,                                //     USAGE (Pointer)
    0xa1, 0x00,                                //     COLLECTION (Physical)
    0x05, 0x09,                                //         USAGE_PAGE (Button)
    0x19, 0x01,                                //         USAGE_MINIMUM (Button 1)
    0x29, 0x03,                                //         USAGE_MAXIMUM (Button 3)
    0x15, 0x00,                                //         LOGICAL_MINIMUM (0)
```

```

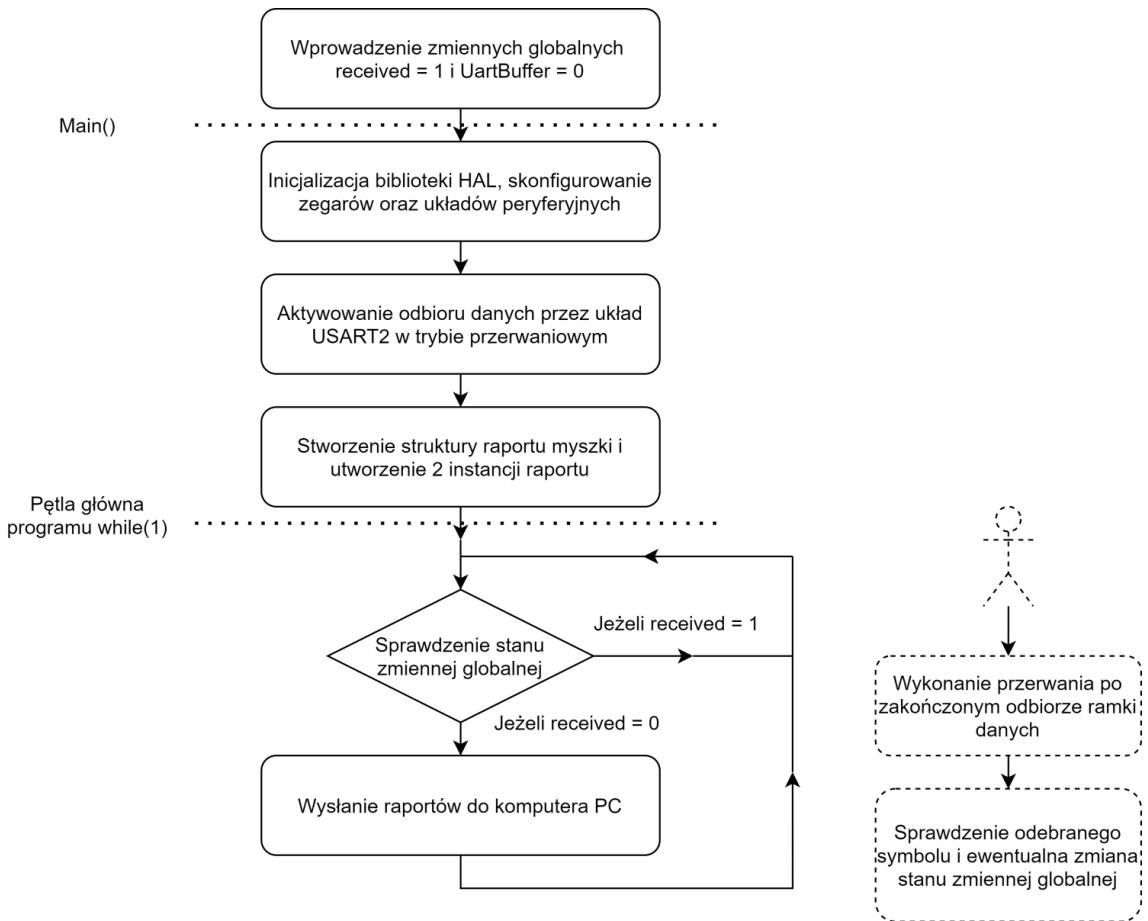
0x25, 0x01,           // LOGICAL_MAXIMUM (1)
0x95, 0x03,           // REPORT_COUNT (3)
0x75, 0x01,           // REPORT_SIZE (1)
0x81, 0x02,           // INPUT (Data,Var,Abs)
0x95, 0x01,           // REPORT_COUNT (1)
0x75, 0x05,           // REPORT_SIZE (5)
0x81, 0x03,           // INPUT (Cnst,Var,Abs)
0x05, 0x01,           // USAGE_PAGE (Generic Desktop)
0x09, 0x30,           // USAGE (X)
0x09, 0x31,           // USAGE (Y)
0x15, 0x81,           // LOGICAL_MINIMUM (-127)
0x25, 0x7f,           // LOGICAL_MAXIMUM (127)
0x75, 0x08,           // REPORT_SIZE (8)
0x95, 0x02,           // REPORT_COUNT (2)
0x81, 0x06,           // INPUT (Data,Var,Rel)
0xc0,                 // END_COLLECTION
0xc0                  // END_COLLECTION
};


```

Komentarze informują, że 3 pierwsze bity raportu będą powiadamiać komputer o wciśnięciu przycisku myszy, o numerze odpowiadającemu numerze bitu.

- 1 to w systemie Windows „lewy przycisk myszy”, opowiadający za akcję przy podwójnym wciśnięciu i przeciągania ikonek,
- 2 to „prawy przycisk myszy” rozwijający właściwości obiektów i przypisywany jest w aplikacjach do różnych celów,
- 3 przycisk wprowadzający dodatkowe serowanie, który jest rzadko przypisany przez przewagę urządzeń z dwoma lub pojedynczym przyciskiem.

Kolejne 2 bajty odpowiadają za zmianę pozycji położenia kurSORA na komputerze, które będą przyjmowały wartości zerowe w programie odbiornika. Po zmianie zawartości tablicy deskryptora raportu skorygowano wartość stałej „HID\_MOUSE\_REPORT\_DESC\_SIZE” odpowiedzialnej za jej wielkość na 50. Stała znajduje się w pliku „usbd\_hid.h”.



Rys. 4.7. Schemat blokowy programu odbiornika

Na początku pliku main.c dodano zmienną globalną „received” typu uint8\_t o wartości 1 i „UartBuffer” tego samego typu o wartości 0. Zmienna „received” będzie mogła przyjmować 2 stany - 1 oraz 0. Domyślną jej wartością jest 1 i zmieniana jest na 0 tylko w momencie odebrania ramki danych i utrzymuje swój stan do momentu wysłania raportu do PC. Do zmiennej „UartBuffer” wprowadzana będzie odebrana wartość przez układ UART. Przed typem zmiennej „received” został dodany dopisek volatile, aby kompilator nie zamienił jej na stałą, gdyż bez obsługi przerwania jej wartość nie byłaby zmieniana.

```

volatile uint8_t received = 1;
uint8_t UartBuffer = 0;

```

Następnie w funkcji głównej main() zainicjalizowano bibliotekę HAL, skonfigurowano zegary oraz układy peryferyjne – USART2, USB\_DEVICE, GPIO, zgodnie z projektem wykonanym w programie „STM32CubeMX”. Procedura konfigurująca zegary jest zawarta w pliku main.c a dla reszty układów jest zawarta w osobnych plikach .c. Dodano do pliku zewnętrzny uchwyt do struktury opisującej konfigurację interfejsu USB. Wykorzystano

funkcję HAL\_UART\_Receive\_IT do odbioru przez układ UART pojedynczego bajtu w trybie przerwaniowym, która w momencie odbioru ramki danych przypisuje jej wartość do zmiennej „UartBuffer”.

```
int main(void)
{
    /* USER CODE BEGIN 1 */

    /* USER CODE END 1 */

    /* MCU Configuration-----*/
    /*-----*/
    /* Reset of all peripherals, Initializes the Flash interface and the
    Systick. */
    HAL_Init();

    /* USER CODE BEGIN Init */

    /* USER CODE END Init */

    /* Configure the system clock */
    SystemClock_Config();

    /* USER CODE BEGIN SysInit */

    /* USER CODE END SysInit */

    /* Initialize all configured peripherals */
    MX_GPIO_Init();
    MX_USART2_UART_Init();
    MX_USB_DEVICE_Init();
    /* USER CODE BEGIN 2 */
    extern USBD_HandleTypeDef hUsbDeviceFS;

    HAL_UART_Receive_IT(&huart2, &UartBuffer, 1);
}
```

Stworzono strukturę raportu interfejsu USB dla myszki (zgodnie z deskryptorem raportu) i utworzono 2 instancje struktury odpowiadające raportom wcisnięcia 1 przycisku myszy oraz jego zwolnienia.

```
struct Raport{
    uint8_t buttons;
    int8_t X_displacement;
    int8_t Y_displacement;
};

struct Raport Raport_Clicked = {0, 0, 0};
struct Raport Raport_Idle = {0, 0, 0};

Raport_Clicked.buttons = 0x01;
Raport_Clicked.X_displacement = 0;
Raport_Clicked.Y_displacement = 0;
```

Następnie program wchodzi do pętli głównej programu. W jej wnętrzu na początku dodano pętlę blokującą while(received), która uniemożliwia programowi wykonania dalszej części pętli głównej. Pętla blokująca sprawdza w sposób ciągły czy została odebrana oczekiwana wartość przez układ UART. W przypadku jej odebrania program wychodzi z pętli while(received) i jest wykonywana część programu odpowiedzialna za wysłanie raportów do PC. Wysyłany jest raport myszki z wcisniętym 1 przyciskiem, mikrokontroler czeka 20ms i wysyłany jest kolejny raport informujący komputer o zwolnieniu przycisku myszy. Czas oczekiwania między wysłanymi raportami nie spowoduje pominięcia obsługi odebranych symboli, gdyż ramki danych będą otrzymywane najczęściej z odstępem 150ms. Na końcu zmieniana jest wartość zmiennej globalnej „received” na 1, aby program ponownie wszedł w pętlę blokującą.

```
while (1)
{
    /* USER CODE END WHILE */
    while(received);

    USBD_HID_SendReport(&hUsbDeviceFS, &Raport_Clicked, 3);
    HAL_Delay(20);
    USBD_HID_SendReport(&hUsbDeviceFS, &Raport_Idle , 3);
    received = 1;
    /* USER CODE BEGIN 3 */
}
/* USER CODE END 3 */
}
```

Obsługa przerwania (callback) układu UART została umieszczona pod funkcją main(). W momencie jej wykonania odebrana wartość jest wprowadzana do zmiennej „UartBuffer”. Wewnątrz obsługi przerwania sprawdzane jest za pomocą instrukcji warunkowej if czy otrzymana wartość przez układ jest równa 85 (binarnie 0b01010101). Nie ma potrzeby sprawdzania źródła sygnału przerwania, gdyż jest to jedyny aktywny układ UART w mikrokontrolerze i tylko układ UART2 może zmieniać wartość zmiennej „UartBuffer”. W przypadku spełnienia powyższych wymagań zmieniana jest wartość zmiennej globalnej „received” na 0. Po realizacji instrukcji warunkowej ponownie aktywowany jest odbiór ramki danych przez układ UART2 w trybie przerwaniowym.

```
void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
{
    if (UartBuffer == 85){
        received = 0;
```

```
        }
    HAL_UART_Receive_IT(&huart2, &UartBuffer, 1);
}
```

Memory Regions		Memory Details					
Region		Start address	End address	Size	Free	Used	Usage (%)
RAM		0x20000000	0x20008000	32 KB	28,3 KB	3,7 KB	1,56%
FLASH		0x08000000	0x08010000	64 KB	52,12 KB	11,88 KB	18,56%

Rys. 4.8. Objętość programu odbiornika

## 5. URUCHOMIENIE I TESTY

W procesie uruchamiania zawarte są takie czynności jak: wstępna wizualna weryfikacja płytki PCB, uważne zbadanie czy układ nie posiada zwarć, przylutowanie do obwodu drukowanego komponentów elektronicznych, zbadanie napięć i generowanych sygnałów poprzez wgranie programów testowych. Po uruchomieniu nadajnika i odbiornika, układy zostaną zbadane pod kątem transmisji optycznej, komunikacji z komputerem i finalnie zostanie wykonany test praktyczny.

Do pomiaru napięcia, prądu, polaryzacji i napięcia przewodzenia diod oraz testowania ciągłości elektrycznej zostanie użyty multymetr UT61E firmy UNI-T. Tester ciągłości elektrycznej umożliwia zbadanie płytki drukowanej układu pod kątem zwarć. Badanie napięcia informuje czy mieści się ono w zakresie tolerancji zgodnie z założeniami. Pomiar prądu umożliwia zbadanie czy komponenty elektroniczne nie przekraczają swojego maksymalnego natężenia prądu. Funkcja ta również może posłużyć do oszacowania długości czasu nadajnika na akumulatorze dla różnych nastaw potencjometru lub ile prądu będzie pobierał odbiornik przez port USB komputera PC. Tester diod ułatwi pracę projektantowi przez informację, które wyprowadzenie jest anodą i katodą.

Podczas uruchamiania i testów układy zostaną zasilone z wykorzystaniem zasilacza laboratoryjnego Zhaoxin RXN-305D. Umożliwia on płynną regulację napięcia w zakresie od 0 do 30 woltów i prądu od 0 do 5 amperów. Urządzenie może pracować w 2 trybach: stałego napięcia i stałego prądu. W trybie stałego napięcia ustawiana jest wartość napięcia a skonfigurowana wartość prądu jest jedynie jego ograniczeniem. Jeżeli doszłoby do przekroczenia prądu (obciążenie miałoby zbyt niską rezystancję), urządzenie zmniejszyłoby napięcie aby utrzymać stałą wartość prądu równą ograniczeniu. Sytuacja byłaby równoznaczna z przejściem urządzenia w tryb stałego prądu. Aby utrzymać urządzenie na stałe w tym trybie należałoby ustawić maksymalne możliwe napięcie 30V, aby przyrząd miał możliwość wysterować wysokim prądem większą rezystancję. Korzystając z prawa Ohma, można stwierdzić, że urządzenie jest w stanie wysterować maksymalnym natężeniem prądu 5A obciążenie większe lub równe  $6\Omega$ , przy ustawieniu maksymalnego napięcia 30V. Zasilacz posiada możliwość precyzyjnej i zgrubnej regulacji prądu i napięcia przez 2 pary pokręteł. Podczas pracy wyświetlany jest tryb pracy urządzenia oraz aktualna generowana wartość napięcia i prądu z dokładnością do 100mV i 10mA.



Rys. 5.1. Multimetr UNI-T UT61E i zasilacz laboratoryjny Zhaixin RXN-305D

Oscyloskop DSO-150 zostanie wykorzystany do zbadania sygnałów: diod podczerwieni, PWM diod efektu świetlnego oraz wyjścia odbiornika podczerwieni. Umożliwia on odczyt wartości napięcia (stanu logicznego) przez ustaloną wartość próbek, umieszczonych w czasie względem aktywacji sygnału wyzwalającego. Przyrząd posiada 1 kanał wejściowy, częstotliwość próbkowania 1MHz, pasmo pracy 200kHz. Impedancja wejściowa przyrządu to  $1M\Omega/20pF$ . Czułość urządzenia można regulować od 5mV do 20V na podziałkę a podstawę czasu od  $10\mu s$  do 500s na podziałkę. Zapisywany przebieg odpowiada 1024 punktom. Na wszystkich zdjęciach z oscyloskopu odniesienie 0V będzie występować na wysokości 1 podziałki licząc od dolnej krawędzi.

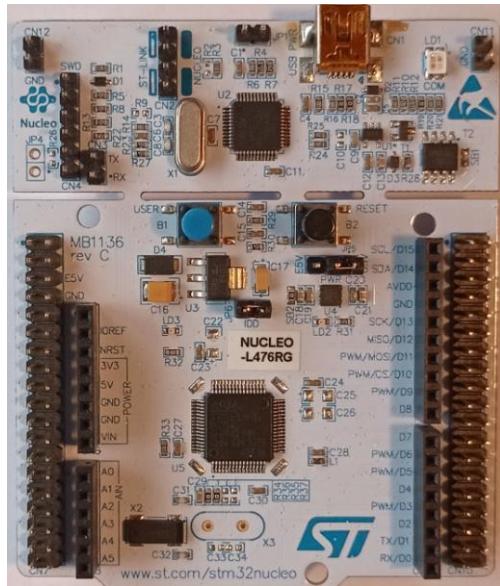
Połączenia stałe między komponentami elektronicznymi a płytą drukowaną powstaną podczas procesu lutowania. Polega on na połączeniu dwóch elementów metalowych za pomocą spoiwa lutowniczego o temperaturze wyższej od temperatury topnienia spoiwa, lecz niższej od temperatury topnienia metali. W trakcie pracy wymagającej dotykania układów rękojma będą zakładane rękawiczki ESD, chroniące układy przed wyładowaniami elektrostatycznymi. Urządzenia będą lutowane za pomocą lutownicy kolbowej zawartej w stacji lutowniczej Solomon SL-20, pracującej z temperaturą  $300^\circ C$ . Zostanie użyte spoiwo lutownicze SN60Pb40 o średnicy 0,56mm firmy Cynel, który jest stopem cyny (60%) z ołówkiem (40%) z dodatkiem topnika. W przypadku lutowania elementów SMT z większą ilością wyprowadzeń, zostanie wykorzystany topnik „pasta do lutowania” firmy TermoPasty. Do ewentualnego usuwania nadmiaru cyny z padów zostanie wykorzystana plecionka z topnikiem. Natomiast w przypadku potrzeby rozlutowania elementu zostanie użyta stacja na gorące powietrze TECHREBAL 858D z wąską dyszą

i temperaturą powietrza 300°C. Po procesie lutowania płytka drukowana zostanie wyczyszczona z resztek topnika za pomocą alkoholu izopropylowego.



Rys. 5.2. Stacja lutownicza Solomon SL-20 i TECHREBAL 858D

Do programowania mikrokontrolerów zostanie użyty programator ST-LINK/V2 zawarty w płytce deweloperskiej NUCLEO-L476RG. W celu aktywowania tej funkcji wyjęto obie zworki w złączu CN2. Aby uzyskać komunikację debugera z komputerem PC, należy podłączyć PCB przewodem mini USB do portu USB komputera. Podłączenie linii interfejsu SWD płytki NUCLEO (złącze CN4) do odpowiadających linii badanego mikrokontrolera wraz z oprogramowaniem na komputerze PC, umożliwi wgranie do jego pamięci FLASH nowego programu.



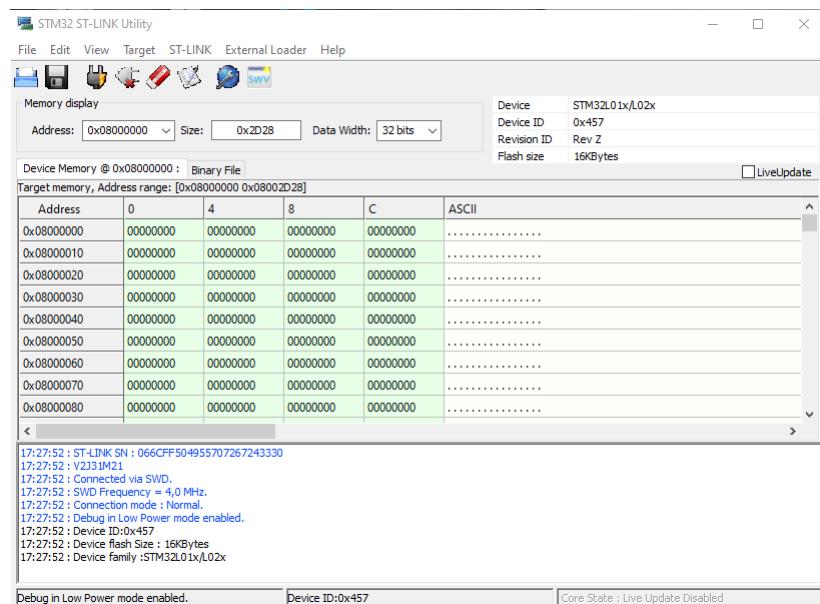
Rys. 5.3. Płytkę NUCLEO-L476RG

Kod programów testowych był generowany za pomocą programu komputerowego „STM32CubeMX”. Zadbano o ustawienie maksymalnego taktowania zegarów mikrokontrolerów, aby ich pobór prądu był taki sam jak w docelowych aplikacjach. Kod był budowany w środowisku „TrueStudio for STM32 9.3.0” i wgrywany z użyciem płytki NUCLEO64 do mikrokontrolerów przez program „STM32 ST-LINK Utility”.

## 5.1. URUCHOMIENIE I TESTY NADAJNIKA

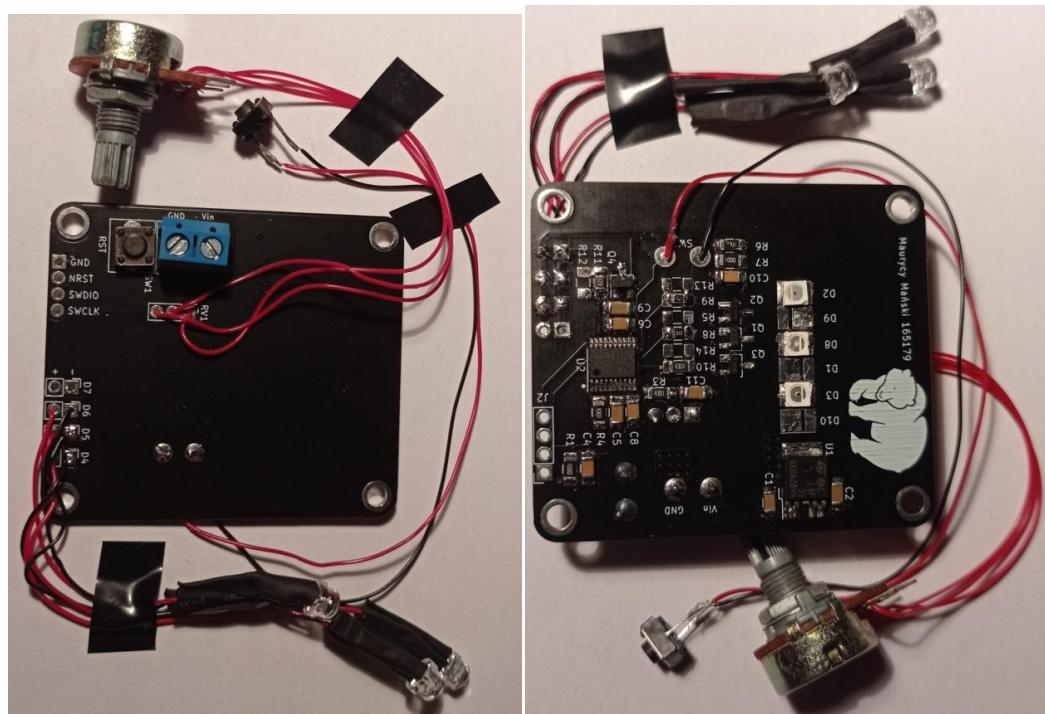
Na początku zbadano otrzymaną płytę drukowaną wizualnie pod kątem dokładności odwzorowania od plików projektowych i wyszukiwane były ewentualne zwarcia lub uszkodzenia mechaniczne. Po przejściu wstępnej weryfikacji sprawdzono testerem ciągłości linie zasilania w poszukiwaniu zwarcia. Nie zauważono, żadnych defektów obwodu drukowanego. Pierwszym elementem lutowanym do PCB był układ U1 czyli stabilizator napięcia a po nim sąsiadujące kondensatory C1 i C2 wymagane do poprawnej pracy stabilizatora. Zgodnie z opisami na płytce wprowadzono pod kątem w otwory złącz zasilania przewody od zasilacza laboratoryjnego tj. przewód dodatni zasilacza (+) do  $V_{in}$  a przewód ujemny (-) do GND. Podano napięcie maksymalne 4,2V i minimalne 2,5V, przy ograniczeniu prądu około 100mA. Zgodnie z przewidywaniami zmierzony prąd płynący przez stabilizator był bliski zera. Dla napięcia wejściowego 4,2-3,3V, na wyjściu występowało stałe 3,3V

a poniżej tego zakresu napięcie wyjściowe było równe wejściowemu. Po upewnieniu się, że zasilanie w poprawny sposób podaje napięcie i nie występują zwarcia na płytce rozpoczęto lutowanie mikrokontrolera. Posiada on wiele gęsto umieszczonych wyprowadzeń co utrudnia montaż, dlatego układ U2 przylutowano od razu po zasilaniu. Do tego procesu wykorzystano dodatkowy topnik ułatwiający rozprowadzenie równej ilości spoiwa na wszystkie piny i usunięcie zwarć (spoiwa) między nimi. Aby móc zweryfikować działanie mikrokontrolera przylutowano rezystor R4 i kondensatory odprzegąające C5, C6, C8, C9. Połączono przewodami odpowiadające linie interfejsu SWD nadajnika z debuggerem ST-LINK/V2 zawartym w płytce deweloperskiej NUCLEO-L476RG. Płytkę NUCLEO podłączono do komputera PC za pomocą przewodu mini USB a płytka nadajnika podłączono do napięcia 4,2V z użyciem zasilacza laboratoryjnego. Program „STM32 ST-LINK Utility” prawidłowo rozpoznał rodzinę układu i wielkość pamięci FLASH a w polu roboczym aplikacji ukazał się podgląd pamięci urządzenia.



Rys. 5.4. Rozpoznanie mikrokontrolera nadajnika przez program ST-LINK Utility

Następnie przylutowano do obwodu drukowanego po kolej: tranzystory, rezystory i kondensatory a na końcu diody LED. Kolejność była podyktywana gęstością umieszczenia wyprowadzeń w obudowie, jak również wolną przestrzenią wokół danego elementu. Po gotowej pierwszej warstwie PCB przylutowano złącze zasilania i przycisku resetu na drugiej warstwie. Wykonano tą czynność na końcu aby zachować płaską powierzchnię przy lutowaniu reszty komponentów i tym samym ułatwić proces montażu.



Rys. 5.5. Nadajnik

Za pomocą cienkich przewodów miedzianych prylutowano diody podczerwieni, przycisk oraz potencjometr do ich padów. Do testów użyto większy potencjometr o rezystancji  $50\text{k}\Omega$  od docelowego potencjometru montażowego, który zostanie użyty i wklejony w obudowę nadajnika.

Moduł ładowarki z akumulatorem i płytka nadajnika zostały zbadane osobno. Jest to spowodowane faktem, że ciężko byłoby dokładnie przebadać nadajnik przy maksymalnym i minimalnym naładowaniu akumulatora. Napięcie maksymalne ogniva 4,2V będzie początkowo szybko maleć a przy najniższym będzie na granicy wyładowania. Przy pełnym naładowaniu akumulatora rozważano takie zagrożenia jak nadmierne nagrzewanie się układu lub zbyt wysoki prąd na elementach półprzewodnikowych – stabilizatorze, tranzystorach i diodach. Na granicy wyładowania ogniva należało zbadać czy diody przewodzą prąd a jeżeli tak to jaka jest jego wartość oraz ocenić odczucia wizualne strumienia świetlnego. Zbadano z wykorzystaniem zasilacza laboratoryjnego jak układ się zachowuje przy takich czynnikach jak maksymalne i minimalne napięcie zasilania oraz maksymalne i minimalne obciążenie. Sprawdzono również wartość napięcia wysokiego stanu logicznego mikrokontrolera a także napięcia i prądy pojedynczych diod lub ich połączeń równoległych (diody podczerwieni). Podczas pomiarów z powodów bezpieczeństwa zaklejono diody taśmą izolacyjną i założono okulary ochronne.

Wszystkie diody przewodzą przy najniższym napięciu zasilania. W tym stanie wizualnie promieniowanie czerwonej diody było najjaśniejsze, później diody zielonej a na końcu niebieskiej. Dlatego dobrym rozwiązaniem było wykorzystanie czerwonego koloru do sygnalizacji przyciśnięcia przycisku. Przez większość czasu pojedynczego cyklu, akumulator będzie zapewniał stałe napięcie 3,3V, więc zmniejszona intensywność świecenia diod LED będzie informować użytkownika o stanie ogniska bliskim rozładowania. Przy najwyższym napięciu zasilania diody świeią odczuwalnie podobną jasnośćą. Zgodnie z przewidywaniami ciepło ze stabilizatora jest efektywnie oddawane na sąsiadujący obszar płytki drukowanej, co ogranicza jego maksymalną temperaturę. Źródła ciepła znajdują się w pewnej odległości od mikrokontrolera, przez co temperatura układu nie zwiększała się znacząco. Zauważono, że przy podpiętym amperomierzem szeregowo z zasilaniem diody wizualnie świeią mniej intensywnie a wskazanie prądu na zasilaczu maleje. Jest to spowodowane niezerową rezystancją szeregową przyrządu pomiarowego, która w momencie przepływu prądu powoduje spadek napięcia dostarczanego do płytki drukowanej. Zmniejszone napięcie zasilania wprowadza wcześniejsze nasycenie tranzystorów oraz obniża napięcie wysokiego stanu logicznego co dodatkowo zmniejsza prąd bazy i kolektora. Do celów zbadania rezystancji amperomierza w UT61E skorzystano z zapasowego multimetru UT33A firmy UNI-T. Do mikrokontrolera wgrano program załączający 3 diody i zbadano zachowanie układu przy braku szeregowo podpiętego amperomierza oraz z amperomierzem w zakresie miliamperów/mikroamperów i amperów. Zapasowym multimetrem mierzono spadek napięcia na amperomierzu, napięcie na złączu zasilania PCB i wyjściowe napięcie stabilizatora.

Warunki	Wskazanie prądu na zasilaczu [A]	Wskazanie napięcia na zasilaczu [V]	Napięcie na złączu zasilania PCB [V]	Napięcie na wyjściu stabilizatora [V]	Spadek napięcia na amperomierz [V]	Wskazanie prądu na amperomierz [mA]	Rezystancja amperomierza [Ω]
Brak amperomierza	0,16	2,5	2,57	2,525	-	-	-
Szeregowo podpięty amperomierz z zakresem miliamperów	0,01	2,5	2,466	1,806	0,1136	10,909	10,413
Szeregowo podpięty amperomierz z zakresem amperów	0,16	2,5	2,545	2,496	0,0217	163	0,133

Tabela 5.1. Pomiary amperomierza

W wyniku spadku napięcia na amperomierzu pracującym w zakresie miliamperów, napięcie na złączu zasilania PCB spadło o 113,6mV przez co napięcie na wyjściu stabilizatora obniżyło się do 1,806V. Jest to spowodowane podaniem na wejście stabilizatora napięcia blisko krańca zakresu jego pracy (poniżej 2,5V, gdzie ładowarka akumulatora docelowo przerwałaby jego pracę). Aby uniknąć spadków napięcia zasilania spowodowanych przepływem większego natężenia prądu, zdecydowano się w większości przypadków na pomiary z wykorzystaniem zakresu amperów. W tym trybie wartość natężenia prądu będzie podawana z dokładnością do 1 mA a wyższa dokładność byłaby nadmiarowa do tego zadania.

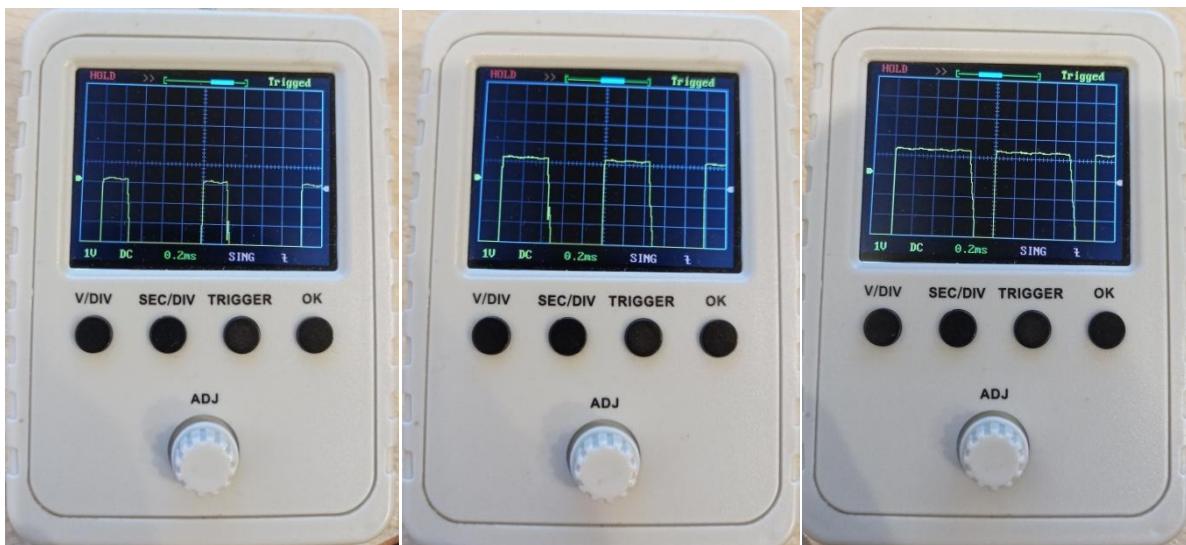
Parametr	Warunki	Napięcie zasilacza 4,2V	Napięcie zasilacza 2,5V
Napięcie wyjściowe stabilizatora [V]	Maksymalne obciążenie (wszystkie diody przewodzą maksymalny prąd)	3,295	2,456
Spadek napięcia na stabilizatorze [V]		0,8912	0,0473
Prąd zasilania [mA]		540	177
Napięcie wyjściowe stabilizatora [V]	Minimalne obciążenie (żadna dioda nie przewodzi prądu)	3,305	2,514
Spadek napięcia na stabilizatorze [V]		0,9691	0,0011
Prąd zasilania [mA]		4,285	4,276
Napięcie na czerwonej diodzie [V]	Załączony prąd jedynie na pojedynczy tranzystor (D = 100%) sterujący pojedynczą diodą lub kilkoma równolegle połączonymi diodami (IR)	2,0589	1,9902
Prąd na czerwonej diodzie [mA]		142,715	9,724
Napięcie na zielonej diodzie [V]		2,892	2,491
Prąd na zielonej diodzie [mA]		146,715	23,724
Napięcie na niebieskiej diodzie [V]		3,023	2,543
Prąd na niebieskiej diodzie [mA]		149,715	2,724
Napięcie na pojedynczej diodzie podczerwieni [V]		1,3207	1,2767
Prąd na pojedynczej diodzie podczerwieni [mA]		95,715	64,724
Napięcie na 3 równoległych diodach podczerwieni [V]		1,224	1,197
Prąd 3 równoległych diod podczerwieni [mA]		95,715	63,724
Napięcie $V_{OH}$ [V]		3,293	2,5

Tabela 5.2. Pomiary nadajnika

Mikrokontroler pobiera w całym zakresie napięcia zasilania około 4,2mA. Parametr ten zbadano wgrywając program nie załączający żadnej diody i wprowadzając amperomierz szeregowo, wyjątkowo z zakresem miliamperów między zasilaczem a układem. W zakresie amperowym przyrząd wskazywał wartość 4mA, zatem zakres miliamperowy w tym przypadku był dokładniejszy (nie wprowadzał znaczącego spadku napięcia). Prąd każdej diody z osobna wyznaczono w podobny sposób załączając ją poprzez tranzystor ze współczynnikiem wypełnienia 100% i od wyniku z zakresu amperowego był odejmowany wyznaczony wcześniej prąd mikrokontrolera. Podczas pomiarów z napięciem 4,2V diody przekroczyły prąd 150mA przy niższych napięciach niż zakładano. Spowodowało to konieczność korekcji (zwiększenia) rezystancji bazy diody czerwonej, zielonej i podczerwieni.

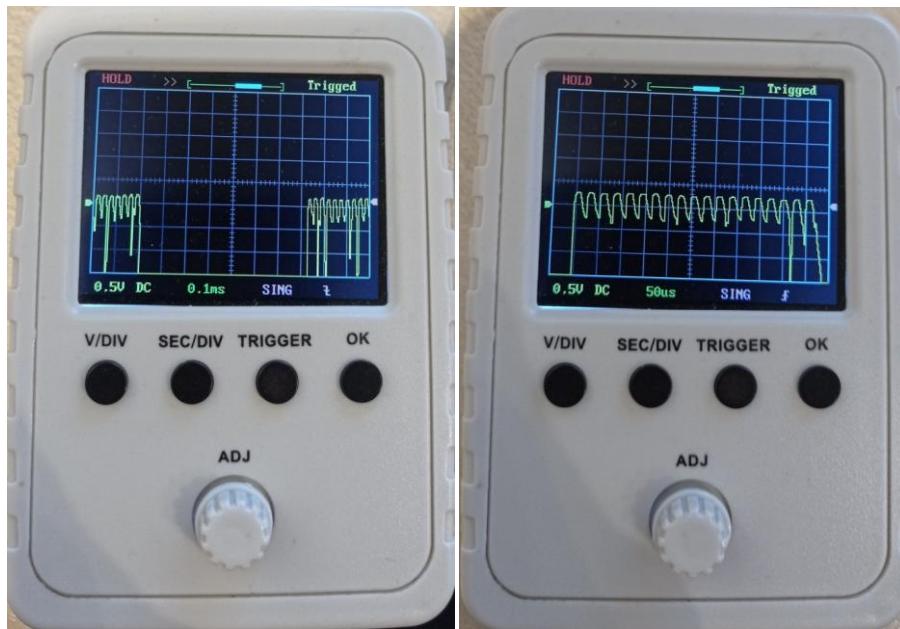
Przez diodę niebieską przepływa prąd 149,715mA przy spadku napięcia 3,023V, mieściąc się w bezpiecznym zakresie pracy. Dioda zielona nieznacznie przekroczyła maksymalny prąd stały wartością 161,715mA przy 2,916V. Dlatego zwiększoно jej rezystancję bazy do 5,1kΩ co zmieniło punkt pracy diody na 146,715mA przy 2,892V. Czerwony LED przekroczył bezpieczny prąd chwilowy wartością 216,715mA przy 2,1468V, przez co rezystancja bazy została zwiększoną do wartości 7,5kΩ. Skorygowany punkt pracy diody to 142,715mA przy 2,0589V. Zmieniono również rezystancję bazy w tranzystorze sterującym diodami podczerwieni na 12kΩ. Przy przylutowanej pojedynczej diodzie podczerwieni multimeter wskazywał prąd 95,715mA przy napięciu 1,3207V. Następnie dolutowano 2 identyczne diody równolegle a prąd się nie zmienił, gdyż tranzystor był daleki od stanu nasycenia. Napięcie minimalnie spadło do 1,224V co jest związane z podzieleniem prądu między 3 diody i zmianą jej punktu pracy. Napięcie wysokiego stanu logicznego  $V_{OH}$  w każdej badanej sytuacji było minimalnie niższe od wartości wyjściowego napięcia stabilizatora o wartość do max 10mV. Badanie zachowania układu przy maksymalnym obciążeniu miało na celu ocenienie stabilności działania urządzenia oraz stopnia jego nagrzewania się. W tej konfiguracji nadajnik się nieznacznie nagrzawał co jest naturalne przy tak wysokim prądzie, jednak nie wpływało to na pracę mikrokontrolera. Badanie układu przy najniższym obciążeniu miało na celu opisanie jego parametrów pracy przyłączonym jedynie mikrokontrolerze.

Zbadano w nadajniku generowanie sygnałów PWM. Ustawiono współczynnik wypełnienia diodzie czerwonej 25%, zielonej 50% i niebieskiej 75% przy częstotliwości 1kHz. Wykorzystano oscyloskop i sondami badano równolegle pady komponentów. Układ prawidłowo generuje sygnały PWM.



Rys. 5.6. Sygnały PWM efektu świetlnego

Do zbadania wysyłanego symbolu został wgrany program docelowej aplikacji. Sondy umieszczone na padach wybranej diody podczerwieni. Na zdjęciach oscyloskopu widać, że wykonywanych jest 19 impulsów, które trwają około 520 $\mu$ s. Przerwa między seriami impulsów trwa około 720 $\mu$ s. Pomierzone czasy pokrywają się z przewidywanymi czasami, określonymi w części oprogramowania nadajnika na rysunku ilustrującym przesyłanie symbolu.



Rys. 5.7. Sygnał diod podczerwieni przy akcji przycisku

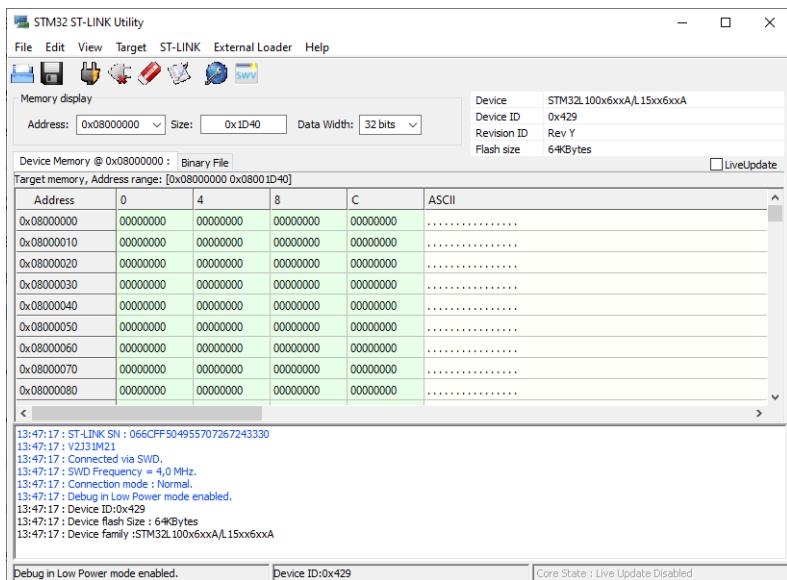
Z docelowym programem urządzenie pobiera przy maksymalnym napięciu zasilania i nastawie potencjometru od 140mA do 290mA (215mA średnio) w zależności od momentu cyklu efektu świetlnego a przy najniższym napięciu od 20mA do 100mA (60mA średnio). Zmniejszenie nastawy potencjometru powoduje zmniejszenie poboru prądu. Przy maksymalnym napięciu i maksymalnej nastawie potencjometru układ odczuwalnie znaczaco mniej się grzeje niż przy badaniu maksymalnego obciążenia. W momencie akcji przycisku chwilowy prąd urządzenia wzrasta przez prąd przewodzenia diod podczerwieni.

Po przylutowaniu przewodów koszyka akumulatora do modułu ładowarki zbadano proces ładowania. Włożono do koszyka ogniwo i podłączono do płytki ładowarki przewód USB C ładowarki sieciowej o maksymalnym prądzie 2A. Zapalił się czerwony LED a po pełnym naładowaniu dioda zgasła i zapalił się niebieski LED. Na zaciskach ogniwa multimeter wskazał napięcie 4,199V. Następnie sprawdzono funkcję modułu ładowarki chroniącą

akumulator przed nadmiernym rozładowaniem. Zasilono układ z użyciem ogniwa wkręcając przewody modułu ładowarki (wyprowadzenia OUT+ i OUT-) do złącza przykręcanego płytki nadajnika. Mikrokontroler posiadał wgrany docelowy program. Ustawiono potencjometrem podświetlenie o najwyższej jasności. Kontrolowano okresowo samoczynne odłączenie akumulatora. Ogniwo zostało odłączone samoczynnie przy napięciu napięcia 2,858V po około 17 godzinach pracy. Napięcie jest wyższe niż było to zakładane, jednak może być to spowodowane brakiem obciążenia. Akumulator został ponownie w pełni naładowany co zajęło około 4 godziny. W trakcie ładowania możliwe jest korzystanie z nadajnika.

## 5.2. URUCHOMIENIE I TESTY ODBIORNIKA

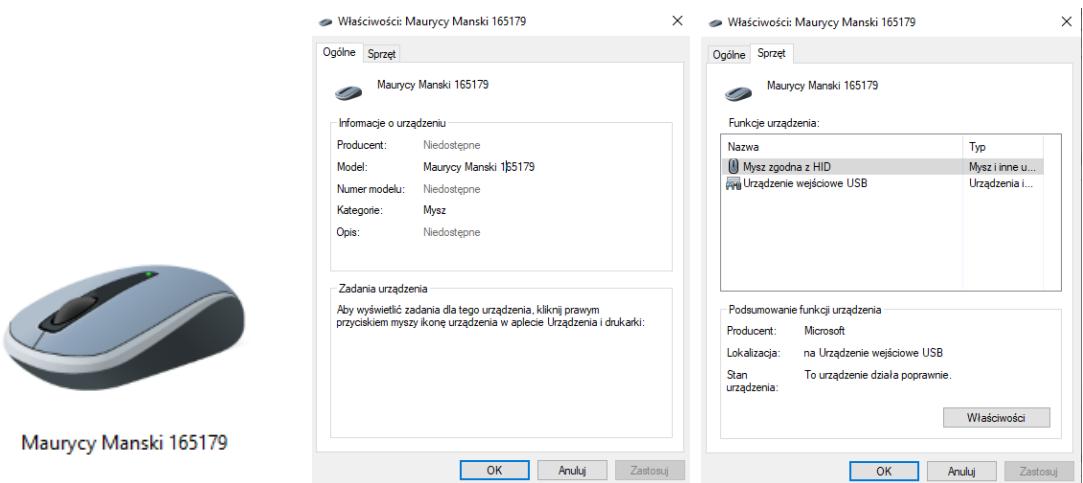
Podobnie jak w przypadku uruchamiania nadajnika w pierwszej kolejności zbadano odwzorowanie płytka drukowanej od plików projektowych, poszukiwano wizualnie uszkodzeń mechanicznych a testerem ciągłości elektrycznej upewniono się, że nie występują zwarcia na liniach zasilania. Proces lutowania rozpoczęto od przylutowania złącza J1 micro USB, stabilizatora napięcia U1 a następnie elementy potrzebne do jego pracy – koralik ferrityowy FB1 i kondensatory C1, C2, C13. Do sprawdzenia poprawności działania zasilania układu podłączono do PCB przewód micro USB, który doprowadzono do przejściówki USB A na przewody banan. Przejściówka umożliwia podanie napięcie na liniach zasilania a para różnicowa danych zostaje niepodłączona. Przewody banan wpięto do zasilacza laboratoryjnego, ustawiono napięcie 5V (które występowałoby w porcie USB PC) i ograniczono prąd do 50mA. Wskazanie zasilacza informowało, że układ nie pobiera prądu, co jest prawdą ponieważ zasilanie nie jest obciążone. Na wyjściu stabilizatora pojawiło się napięcie 3,286V. Po weryfikacji zasilania, rozpoczęto lutowanie mikrokontrolera U2 a po nim niezbędne komponenty do zbadania jego działania – rezystor R1 i kondensatory C3, C4, C5, C6, C8, C12, C14, C15. Ponownie zasilono układ z użyciem zasilacza laboratoryjnego, płytę NUCLEO podłączono przewodem mini USB do komputera a linie interfejsu SWD odbiornika połączono z opowiadającymi liniami płytka NUCLEO. Program „STM32 ST-LINK Utility” zidentyfikował rodzinę mikrokontrolera, wielkość pamięci i wyświetlił w obszarze roboczym jej zawartość.



Rys. 5.8. Rozpoznanie mikrokontrolera odbiornika przez program ST-LINK Utility

Po upewnieniu się, że mikrokontroler działa prawidłowo przylutowano do PCB układ oscylatora kwarcowego – oscylator Y1, kondensatory C10, C11 i rezistor R5; układ resetu – przycisk SW1 i kondensator C9; LED D3 z rezystorem R7. LED z rezystorem podłączony do pinu GPIO umożliwił zweryfikowanie działania programu po wykonaniu procedury przełączającej źródło taktowania na zewnętrzny oscylator. Wgrano do mikrokontrolera program testowy wykonujący w pętli głównej przełączanie co 1s stanów logicznych na wyprowadzeniu sterującym diodą LED (PE2). Po wgraniu programu można było zaobserwować naprzemienne świecenie diody LED i jego brak występujące w równych odstępach czasu około 1s. Oznacza to, że układ prawidłowo funkcjonuje z zewnętrznym źródłem taktowania a zamierzone czasy opóźnienia pokrywają się z czasem rzeczywistym.

Następnym krokiem było zbadanie działania układu USB mikrokontrolera. W tym celu przylutowano rezistor podciągający R4 oraz zabezpieczenie ESD U3. Stworzono zmodyfikowaną kopię docelowego programu, w którym pomijany był odbiór danych i w pętli głównej wysyłano co 3 sekundy raporty wciśnięcia lewego przycisku myszy i jego zwolnienia (z odstępem 20ms jak w przypadku docelowej aplikacji) do komputera osobistego. W systemie operacyjnym „Windows 10” urządzenie zostało wykryte jako myszka a co około 3s występowała akcja wciśnięcia lewego przycisku myszy. Informację o obecności podłączonego urządzenia zaobserwowano wchodząc w „Panel sterowania”, „Sprzęt i dźwięk”, „Urządzenia i drukarki” w karcie „Urządzenia”.



Rys. 5.9. Rozpoznanie odbiornika przez system Windows 10

Nazwa producenta nie jest wyświetlaną prawdopodobnie z powodu konieczności zarejestrowania urządzenia poprzez wykupienie numeru PID i VID urządzenia. Widoczność odbiornika i akcja przycisku została przetestowana również w systemie operacyjnym „Linux Mint 20”. Akcje wciśnięcia 1 przycisku myszy występują identycznie jak w przypadku systemu „Windows 10”. Korzystając z programu „lusb” w terminalu otrzymano listę urządzeń USB podłączonych do komputera. Odbiornik był widoczny jako urządzenie 006, został podany numer VID i PID oraz nazwa producenta urządzenia „STMicroelectronics”. Prawdopodobnie taki ciąg znaków jest przypisany do numeru VID mikrokontrolera i część zapisana w deskryptorze tekstu jest w tym programie pomijana.

```
Bus 001 Device 006: ID 0483:572b STMicroelectronics
```

Rys. 5.10. Rozpoznanie odbiornika przez program lusb w systemie Linux Mint 20

Korzystając z programu „dmesg” w terminalu, widoczne są dane zapisane w deskryptorze tekstu.

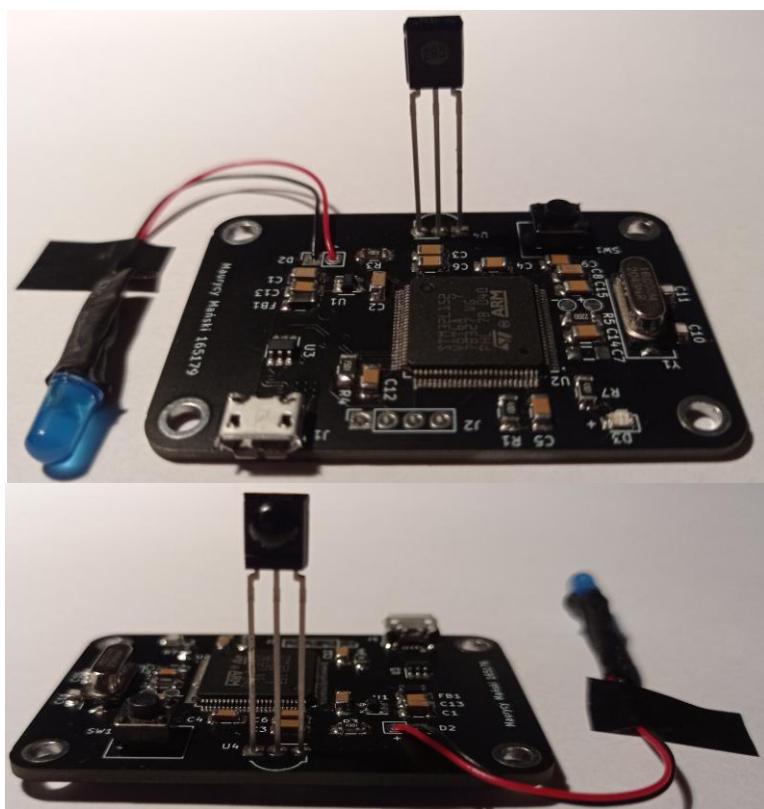
```
usb 1-2.4.3: new full-speed USB device number 5 using ehci-pci
usb 1-2.4.3: New USB device found, idVendor=0483, idProduct=572b, bcdDevice= 2.00
usb 1-2.4.3: New USB device strings: Mfr=1, Product=2, SerialNumber=3
usb 1-2.4.3: Product: Maurycy Manski 165179
usb 1-2.4.3: Manufacturer: Politechnika Gdanska
usb 1-2.4.3: SerialNumber: 6143E4333831
input: Politechnika Gdanska Maurycy Manski 165179 as /devices/pci0000:00/0000:00:12.2/usb1/1-2/1-2.4/1-2.4.3/1-2.4.3:1.0/0003:0483:572B.0007/input/input36
hid-generic 0003:0483:572B.0007: input,hidraw4: USB HID vi.11 Mouse [Politechnika Gdanska Maurycy Manski 165179] on usb-0000:00:12.2-2.4.3/input0
```

Rys. 5.11. Rozpoznanie odbiornika przez program dmesg w systemie Linux Mint 20

Wgrany program posiadał inicjalizację układu UART. Sprawdzono napięcie na wyprowadzeniu układu i utrzymywało się stałe napięcie 3,274V. W stanie domyślnym (bez

transmisi) utrzymuje się wysoki stan logiczny tak jak planowane jest to w przypadku odbiornika podczerwieni.

Kolejną czynnością było przylutowanie do płytki drukowanej odbiornika podczerwieni U4 oraz sygnalizator włączenia urządzenia – LED D3 z rezystorem R7. Dobrano rezistor o wysokiej rezystancji  $4,3\text{k}\Omega$  znaczaco ograniczający prąd a diodę przylutowano do padów z użyciem cienkich przewodów miedzianych. Nie było potrzeby umieszczenia kondensatora C7 oraz wykorzystania testpointów do poprawnej pracy mikrokontrolera. Dodatkowa linia debugera SWO również nie została użyta w trakcie testów.

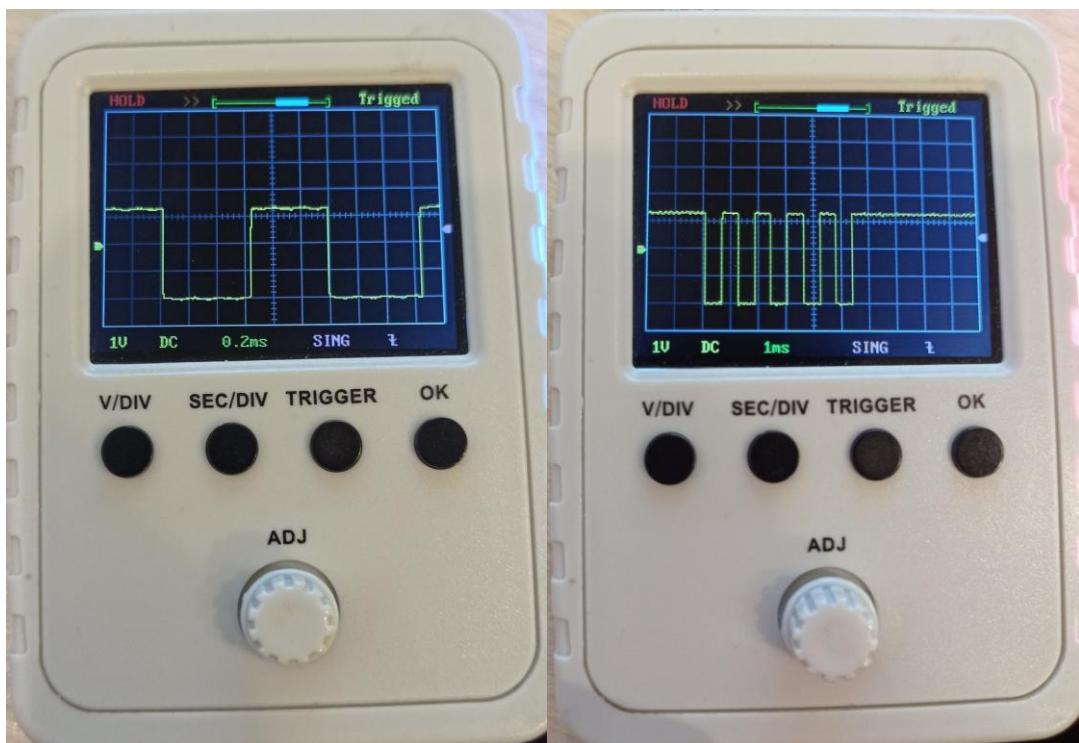


Rys. 5.12. Odbiornik

Odbiornik pobiera w sposób ciągły około  $11,4\text{mA}$  a na wynik ten składa się głównie pobór prądu przez mikrokontroler, odbiornik podczerwieni oraz sygnalizator włączenia urządzenia. Do odbiornika został wgrany docelowy program opisany w części poświęconej oprogramowaniu odbiornika. Po podłączeniu odbiornika do PC urządzenie jest wykrywane jak miało to miejsce poprzednio, jednak nie występują periodyczne akcje przycisku myszy. Aby wystąpiła akcja 1 przycisku myszy musi zostać odebrana określona ramka danych. Test komunikacji optycznej między nadajnikiem i odbiornikiem oraz wynikająca z niej akcja po stronie komputera zostanie opisana w podrozdziale poświęconym testom.

### 5.3. TESTY KOMUNIKACJI URZĄDZEŃ

Po uruchomieniu i osobnych testach nadajnika i odbiornika, konieczne było sprawdzenie komunikacji między urządzeniami. Czynnikami odgrywającymi rolę w komunikacji są: odległość urządzeń, poziom naładowania akumulatora nadajnika (wpływa on na wartość prądu przewodzenia diod i ich irradancję) oraz ich wzajemne usytuowanie w przestrzeni. Czynniki te determinują podczas transmisji poziom irradancji bliskiej podczerwieni w okolicy odbiornika. Irradancja określa czy bit zostanie odebrany oraz proporcje długości trwania stanów logicznych na wyjściu odbiornika [26]. Nasłonecznienie pomieszczenia oddziaływało na minimalny poziom irradancji przy której dochodzi do poprawnego odebrania bitu – czułość odbiornika podczerwieni. Wpływ na transmisję może mieć również wielkość pomieszczenia, stopień umebłowania (ilość i wielkość obiektów na których sygnał optyczny może być wytłumiony) oraz wolna droga optyczna między nadajnikiem i odbiornikiem. Każdy test w tym podrozdziale został wykonany na 2 systemach operacyjnych - „Windows 10” oraz „Linux Mint 20” podczas słonecznego dnia. Przyklejono taśmą izolacyjną diody podczerwieni do płytki nadajnika unieruchamiając je w prostopadłych do siebie kierunkach symulując w ten sposób ich docelowe położenie w obudowie.



Rys. 5.13. Sygnał na wyjściu odbiornika podczerwieni w momencie wcisnięcia przycisku

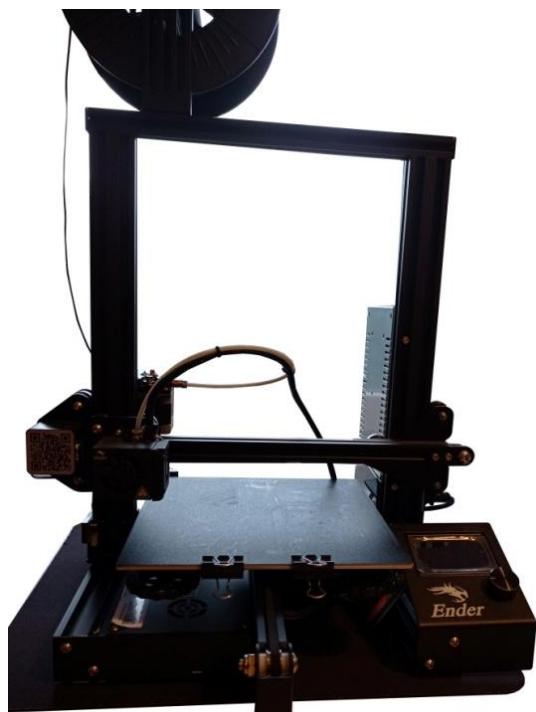
Pierwszy test miał miejsce w pokoju o wymiarach 4x7m z dużą ilością obiektów, przy napięciu zasilania 2,5V podawanego z zasilacza laboratoryjnego. Urządzenia znajdowały się naprzeciwko siebie na jednakowej wysokości (leżały na stole), w odległości około 30cm od siebie. Podłączono oscyloskop do wyjścia odbiornika podczerwieni. W wyniku wcisnięcia przycisku komputer wykonał akcję lewego przycisku myszy. Na rysunku widać, że czasy trwania wysokiego i niskiego stanu logicznego są niemalże identyczne tj. około 600 $\mu$ s. Mikrokontroler interpretuje przesyłaną wartość jako 85. Zmieniono napięcie zasilania na 4,2V i powtórzono test z identycznym skutkiem.

Przy warunkach opisanych w poprzednim teście zbadano jak system spełnia swoje zadanie przy periodycznym wciskaniu przycisku z dużą częstotliwością. Programowe ograniczenie odstępu czasowego 150ms między wykrywalnymi naciśnięciami przycisku okazało się na tyle krótkie, że pomimo starań szybkiego wciskania przycisku nie doświadczono pominięcia akcji jakiegokolwiek wcisnięcia przycisku. Nie zaobserwowano również wielokrotnej akcji przycisku przy jego jednokrotnym wcisnięciu.

Ostatnim testem było badanie działania systemu przy różnych rozmieszczeniach urządzeń w przestrzeni względem siebie wewnętrz różnych pomieszczeń. Odbiornik był umieszczany w miejscach dobrze dostępnych (np. stół, szafka) i podłączony do komputera a nadajnik był zasilany akumulatorowo i zmieniał swoje położenie. Kierując wybraną diodę podczerwieni w okolicę odbiornika za każdym razem obserwowano na komputerze akcję wcisnięcia przycisku (testy w obrębie jednego pokoju). Bardzo często zdarzało się, że mimo braku celowania diodami w kierunku odbiornika i tak ramka danych była poprawnie odbierana – przez (wyłumiające) odbicia sygnału optycznego od ścian lub innych obiektów. Szczególnie dokładnie przebadano urządzenia przy docelowych warunkach pracy – jednakowa wysokość ich położenia, odległość do 1m, nadajnik nie jest odwrócony tyłem do odbiornika. Przy docelowych warunkach transmisja urządzeń funkcjonowała bez zarzutu. Zdarzyły się przypadki braku reakcji systemu na wcisnięcie przycisku przy celowaniu diodami w narożniki pokoju lub przysłaniając ciałem urządzenia. Nie są to jednak planowane warunki, w których wykorzystywany będzie nadajnik. Oczywistym czynnikiem utrudniającym komunikację był brak wolnej drogi optycznej między urządzeniami. Najdłuższą odległość między urządzeniami przy której udało się odebrać symbol to około 6m. Urządzenia były ustawione w jednej linii przodem do siebie a droga ta zawierała 2 pokoje i łączący je wąski przedpokój. Założono, że w tej transmisji największy udział miała 1 dioda z przodu nadajnika a wynik testu był substytutem testu w wolnej przestrzeni.

## 6. KONSTRUKCJA MECHANICZNA

W tym rozdziale zostanie omówiony proces projektowania obudów urządzeń oraz integracja ich fizycznych kopii z elementami elektronicznymi. Elementy konstrukcyjne zostały opracowane z użyciem programu CAD „Autodesk Fusion 360”. Po sporządzeniu modeli 3D w tym programie komputerowym, zostały wygenerowane pliki w formacie .stl. Następnie modele przetransportowano do programu (Slicer) przerabiającego pliki na format zrozumiały przez drukarkę 3D. Do tego celu w projekcie zostało wykorzystane środowisko „Ultimaker Cura 4.6.1”. Zastosowano drukarkę 3D „Ender 3” firmy Creality korzystającą z technologii FDM w układzie kartezjańskim. Wygenerowane pliki z instrukcjami dla drukarki 3D w formacie .gcode dostarczono do urządzenia z użyciem karty microSD. We wszystkich drukach użyto następujących parametrów: wypełnienie 100%, prędkość 50mm/s, prędkość przy 1 warstwie 25mm/s, prędkość przy drukowaniu zewnętrznej krawędzi ściany 25mm/s, generowanie podpór. Przed rozpoczęciem druku zaprojektowanych obiektów slicer dodał drukowanie linii przy bocznej krawędzi pola roboczego oraz wokół drukowanego obiektu (Skirt). Po procesie montażu urządzeń ponownie przebadano działanie systemu.



Rys. 6.1. Creality Ender 3

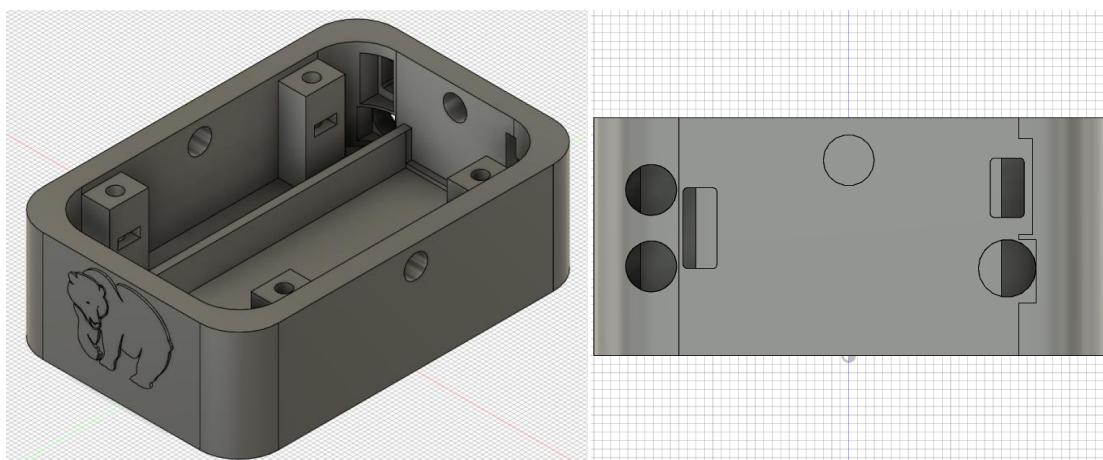
Prawie wszystkie wydrukowane elementy zostały wykonane z filamentu PLA. Jest to tworzywo wygodne w prototypowaniu przez łatwość druku, niską cenę, współpracuje z większością klejów, umożliwia ewentualne pomalowanie druków, jest biodegradowalne, dobrze odwzorowuje proporcje modelu (nie jest wrażliwy na zmiany temperatury, niski skórcz) oraz jest substancją wytrzymałą. Zwrcono uwagę na wady tego rozwiązania tj. wrażliwość na ciepło, kruchosć oraz brak elastyczności. Wszystkie druki z PLA wykonano z wysokością pojedynczej warstwy na poziomie 0,16mm, wysokością pierwszej warstwy 0,2mm, temperaturą dyszy 200°C i temperaturą blatu 50°C. Element przezroczysty został zrealizowany z użyciem filamentu Eazy PET-G. Wykorzystano substancję ze względu na dostępność przezroczystego modelu materiału. Przy tym druku zastosowano parametry: temperatura dyszy 230°C, temperatura blatu 50°C, wysokość pojedynczej warstwy 0,2mm, wysokość pierwszej warstwy 0,2mm.

## 6.1. KONSTRUKCJA NADAJNIKA

Konstrukcja nadajnika odnosi się do stworzenia obudowy urządzeniu, która poza jego zabezpieczeniem przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz ESD, będzie również zawierała elementy funkcjonalne konieczne do działania przycisku. Strukturę nadajnika podzielono na 3 części: spodnią, przezroczystą i górną. W część spodnią wklejane będą takie elementy układu jak: koszyk z akumulatorem, diody LED podczerwieni, potencjometr, moduł ładowarki akumulatora w tym złącze USB C i diody LED sygnalizujące stan ładowania, przełącznik zasilania układu. Przejrzysty element ma za zadanie przekazywać sygnały optyczne w zakresie widzialnym na zewnątrz obudowy i umieszczony w nim zostanie przycisk oraz sprężyny. Część górna będzie elementem ruchomym, którego przesunięcie będzie zależne od akcji użytkownika. Ze względu na skomplikowanie układu konieczne było regularne badanie możliwości występowania kolizji elementów konstrukcyjnych ze sobą lub z komponentami elektronicznymi.

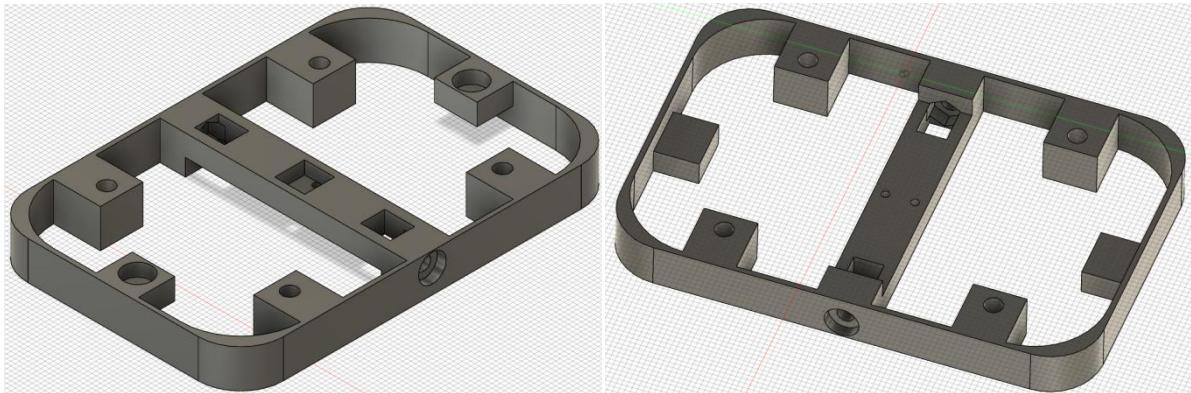
Aby utrzymać wymagania funkcjonalne rozmiarów urządzenia, wymiary części spodniej to 60x90mm a krawędzie boczne zostały wygładzone promieniem 10mm. Ściany boczne i ściana dolna są grubości 5mm, co zapewni dużą wytrzymałość największej części konstrukcji. Wysokość komponentu to 28mm. Została dodana kieszeń na koszyk na akumulator o wymiarach 77x22mm. Wzdłuż dłuższej krawędzi dodano ściany o wysokości

8mm i grubości 2mm. Przewody koszyka są poprowadzone od krótszych ścian bocznych na wysokości bliskiej podstawy, dlatego wzdłuż tych krawędzi wprowadzono wypukłe prostopadłościany o wysokości jedynie 1mm trzymające koszyk w tej płaszczyźnie. Jedną z dwóch krótszych ścian bocznych elementu spodniego wykorzystano do obsługi urządzenia – ładowania, regulacji podświetlenia, włączania i wyłączania. W trakcie użytkowania ścianą ta będzie zwrócona w kierunku komputera. Na równoległej ścianie bocznej (przedniej) dodano wypukłe na 0,5mm logo niedźwiedzia [20] mające informować użytkownika, że jest to przód urządzenia. Logo te będzie mogło zostać pomalowane ponieważ element będzie drukowany z materiału PLA. Jedną połowę ściany tylniej zagospodarowano do ładowania – wprowadzono otwory 6mm na diody LED ładowarki i otwór 4x9,5mm na złącze USB. Drugą połowę spożytkowano na potencjometr i przełącznik – otwór o średnicy 3,4mm i 4x7mm. Krawędzie złącza USB C i przełącznika wygładzono promieniem 0,5mm. Zadbano aby wklejane komponenty elektroniczne były dobrze spasowane poprzez zmniejszenie grubości ścian bocznych od środka w obszarach gdzie było to konieczne. Na 3 ścianach bocznych (lewej, prawej i tylniej) wprowadzono otwory na diody podczerwieni o średnicy 6mm. Zlokalizowane są na środkowej szerokości ścian a ich środki są oddalone 5mm od krawędzi górnych. Dodano 4 prostopadłościany 10x7x21,4mm przy dłuższych krawędziach bocznych w położeniu przed występowaniem zaokrągleń krawędzi bocznych. Między krawędzią górną i wstawionymi prostopadłościanami jest przestrzeń 1,6mm na płytę PCB. Na środkach prostopadłościanów umieszczono otwory o średnicy 3,5mm oddalone od siebie 50mm przy dłuższej krawędzi i 43mm przy krótszej, zachowując rozkład otworów płytki drukowanej. Aby możliwe było wkręcenie śrub w otwory wprowadzono kieszenie na nakrętki śrub M3. Zamodelowano nakrętkę jako graniastosłup prawidłowy sześciokątny o długości krawędzi podstawy 3,25mm i wysokości 2,5mm. Kieszenie umieszczono na wysokości 11,4-13,9mm względem podłoża prostopadłościanów.



Rys. 6.2. Część spodnia obudowy nadajnika

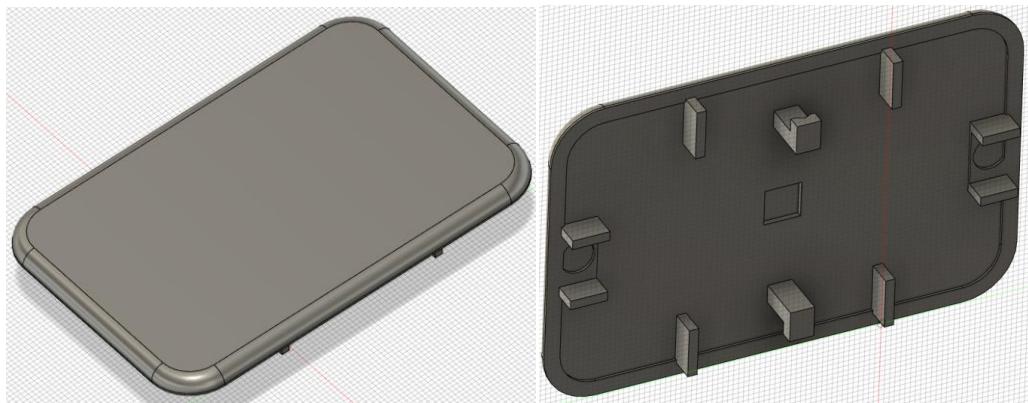
Część przezroczysta ma długość i szerokość identyczną jak część spodnia. Również rozkład otworów, ich średnica i promień zaokrąglenia krawędzi bocznych ma ten sam. Wysokość części to 9mm. Element ten będzie nakładany na płytę PCB leżącą na części spodniej. W części przezroczystej występują przedłużenia 4 prostopadłościanów, które będą utrzymywać w bezruchu PCB. Na środkowej szerokości krótszych ścian bocznych dodano 2 prostopadłościany 8,5x10x5mm, gdzie krawędź górna bryły pokrywa się krawędzią górną części. Prostopadłościany posiadają otwory o średnicy 6,5mm i głębokości 3mm. Na środku szerokość dłuższej krawędzi umieszczono część łączącą ściany boczne o szerokości 10mm. Na środku dodano kieszeń na przycisk o wymiarach 7x7x3mm. W kieszeni znajdują się 2 otwory o średnicy 1,5mm przez które przechodzić będzie przewody do przycisku. W członie środkowym znajduje się również blokada maksymalnego położenia części górnej. Znajdują się na nim otwory 7x5,628mm, przez które przechodzić będzie wypukły element części górnej. Blżej krawędzi bocznej znajduje się kieszeń na nakrętkę śruby M3 – zamodelowane identyczne jak w części spodniej. Fakt występowania wkręcionej śruby będzie blokować maksymalne położenie części górnej. Poza otworami 3,2mm dodano wgłębienie 2mm o średnicy 6,5mm w celu ukrycia łączów śrub. Żeby nie doprowadzić do kolizji komponentów elektronicznych na PCB z członem środkowym zmniejszono jej grubość od strony podłożą o 4mm.



Rys. 6.3. Część przezroczysta obudowy nadajnika

Długość i szerokość części jest identyczna jak w przypadku dwóch pozostałych części. Dodano zaokrąglenie krawędzi górnej ściany o promieniu 3mm. Wyciągnięto te zaokrąglenie w kierunku dolnym o 0,5mm. Grubość górnej ściany i ścian bocznych to 3mm. Na środku ściany dolnej dodano wgłębienie 7x7x1mm, w którego przestrzeń wprowadzony zostanie wycinek gumy, w celu poprawy wrażeń z naciskania przycisku. Na ścianie dolnej umieszczono również detale biorące udział w blokowaniu: maksymalnej wysokości części, przemieszczenia części w 2 płaszczyznach podczas wciskania (prowadnice),

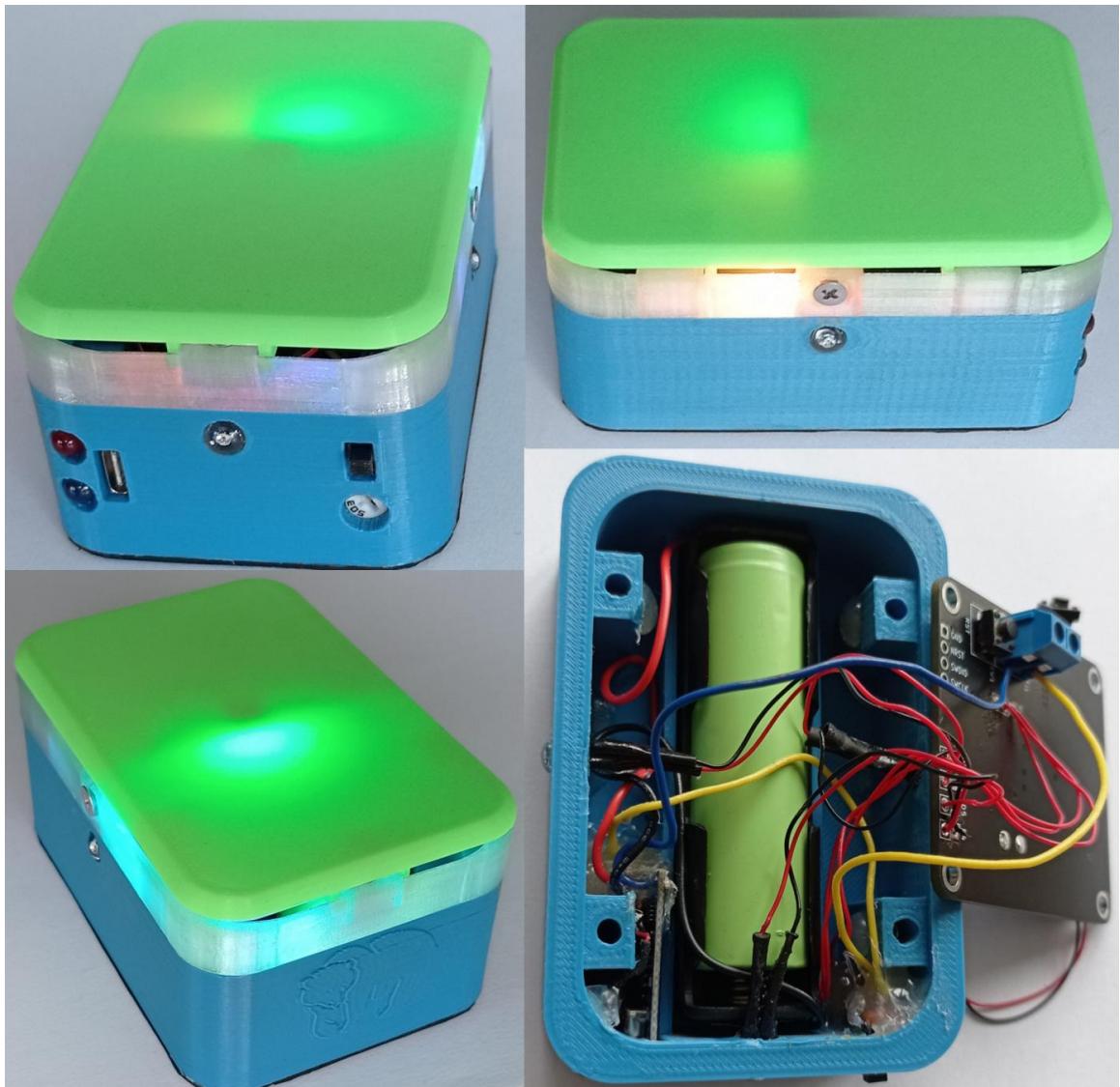
przemieszczenia sprężyn. Prowadnice zostały umieszczone blisko członów mocujących sprężyny oraz po wewnętrznych stronach 4 członów z otworami części przezroczystej. Ich wymiary to 1,8x9,6(7,1 przy sprężynach)x5mm i utrzymują odstęp 0,4mm od detalami części przezroczystej. Szczegóły blokujące przemieszczenie sprężyn to wypukłe na 0,5mm prostopadłościany z wgłębieniem na sprężynę o głębokości 0,5mm i średnicy 6,5mm. Detale blokujące maksymalną wysokość części to wypukłe elementy w kształcie litery „L” o wymiarach 9x6x4,6mm z wyprofilowaną w kształcie śruby blokadą na wysokości 1.9mm.



Rys. 6.4. Część górną obudowy nadajnika

Wydrukowano część spodnią z PLA w kolorze błękitnym, część górną z PLA w kolorze jasnozielonym a część przezroczystą z transparentnego Eazy PET-G. Proces montażu rozpoczęto od umieszczenia nakrętek M3 do części spodniej i unieruchomienie ich za pomocą kleju na gorąco. Wylutowano diody LED z płytki drukowanej modułu ładowarki i zastąpiono je odpowiednikami wykonanymi w technologii THT przymocowanymi na cienkich przewodach miedzianych. Przyklejono grubsze przewody miedziane do terminali płytki ładowarki OUT+, OUT- oraz przewody koszyka akumulatora. Umieszczono diody ładowarki oraz gniazdo USB w otworach obudowy a następnie założano ładowarkę i diody klejem na gorąco. Jeden przewód wyjściowy ładowarki przyklejono do skrajnej pozycji przełącznika i doklejono dodatkowy grubszy przewód miedziany do pozycji środkowej. Wylutowano duży potencjometr w układzie i przyklejono docelowy potencjometr montażowy, tak aby jego skrajna pozycja przeciwna do wskazówek zegara odpowiadała wyłączeniu podświetleniu. Wklejono potencjometr i przełącznik w obudowę klejem na gorąco, w ten sposób aby przełącznik w pozycji dolnej odpowiadał wyłączeniu urządzeniu. Następnie wklejono diody podczerwieni a po nim koszyk akumulatora uniwersalnym klejem epoksydowym, tak aby plus akumulatora nie sąsiadował z wklejoną diodą (co ma ułatwić jego ewentualne wymiany). Wkręcono przewody ładowarki i przełącznika do płytki drukowanej nadajnika. Wgrano program załączający diody LED podczerwieni i zweryfikowano aparatem w telefonie

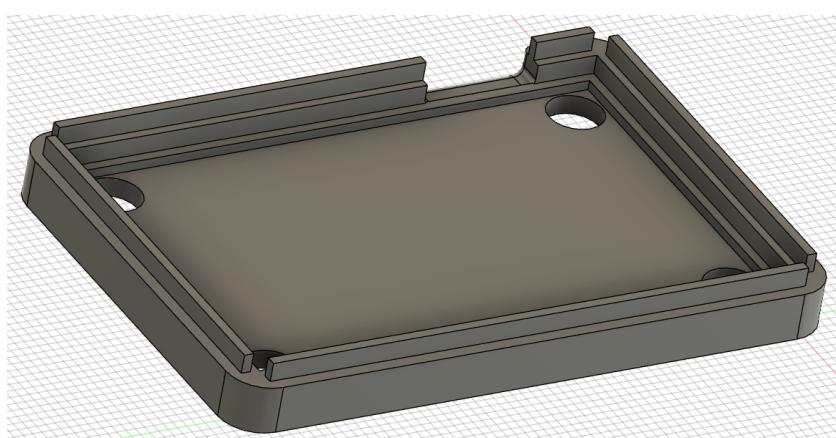
komórkowym ich działanie i ciągłość połączeń (promieniowanie było widoczne jako kolor fioletowy). Po pomyślnym teście wgrano ponownie do mikrokontrolera docelowy program. Poukładano przewody a następnie nałożono PCB na część spodnią, tak aby diody RGB były skierowane w kierunku logo, do góry. Odlutowano przycisk od przewodów aby przełożyć je przez otwory. Ponownie przymontowano przewody do przycisku i umieszczono go w kieszeni. Włożono nakrętki M3 w kieszenie części przezroczystej. Część przezroczysta została nałożona na PCB i przykręcono 4 śruby. Umieszczono sprężyny we wgłębiach w części przezroczystej. Finalnie umieszczono część górną na część przezroczystą i przykręcono 2 śruby do części przezroczystej blokując wysokość części górnej. Z pośród arkuszy gumy NBR, SBR i EPDM o grubości 1mm wykazano najlepsze właściwości antypoślizgowe u odmiany SBR, która została wykorzystana do wyklejenia podłożą części spodniej.



Rys. 6.5. Nadajnik umieszczony w obudowie

## 6.2. KONSTRUKCJA ODBIORNIKA

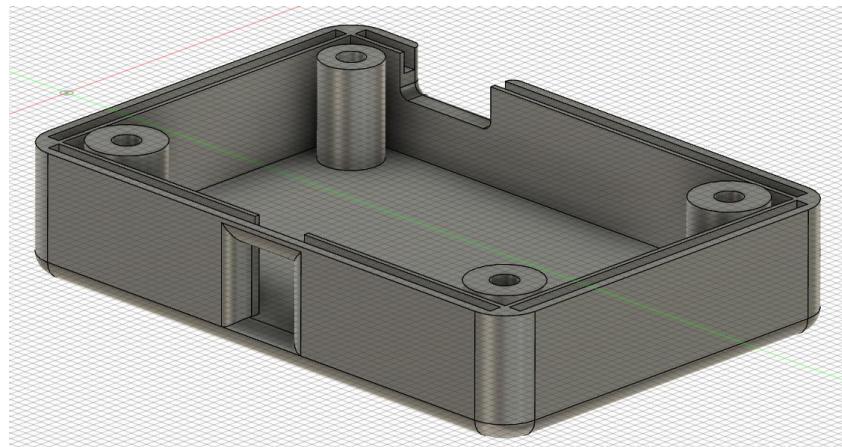
Konstrukcja odbiornika odnosi się jedynie do zastosowania obudowy chroniącej urządzenie przed uszkodzeniami mechanicznymi oraz ESD. Obudowę odbiornika podzielono na 2 części – spodnią oraz górną. Część spodnia posiada dopasowaną kieszeń na płytę drukowaną o jej wymiarach z minimalnym dodatkiem wolnej przestrzeni tj. 58,2x38,2mm. Przewidziano odstające luty komponentów THT dolnej warstwy obwodu drukowanego, dlatego PCB będzie utrzymywać się na ramce o szerokości 1mm a powierzchnia wypełniająca ramkę została oddalona o 1mm w kierunku podstawy. Płytkę drukowaną znajdująca się będzie 3mm nad podłożem. Wprowadzono 4 otwory montażowe o średnicy 5,7mm w rozstawieniu zgodnym z otworami na obwodzie drukowanym. Szerokość otworu jest szerokością tła dobranej śruby M3. W planowanym miejscu złącza micro USB wprowadzono otwór uwzględniający rozmiary kabla przy jego zakończeniu. W celu utrzymania stałej pozycji względem siebie przez obie części w 2 prostopadłych kierunkach, nałożono na górną powierzchnię ścian bocznych 4 prostopadłosciany – po jednym na każdą ścianę. Wypukłe segmenty będą wchodziły w odpowiadające wklęsłe składniki części górnej. Wypukłe człony mają wysokość 2mm, szerokość 1mm i długość 58mm (przy USB 39,75m i 6,25mm) przy dłuższych krawędziach i 38mm przy krótszych. Otwory zostały wprowadzone do wkręcenia śrub łączących oba elementy (i płytę pomiędzy nimi) uniemożliwiając obiektem na oddalenie się od siebie. Wysokość spodniej części jest równa 5mm (z członami wypukłymi 7mm).



Rys. 6.6. Część spodnia obudowy odbiornika

Wspomniane wypukłe składniki zostały poszerzone w każdym kierunku o 0,2mm aby była możliwość spasowania obu części ze sobą. Drukowane elementy 3D posiadają

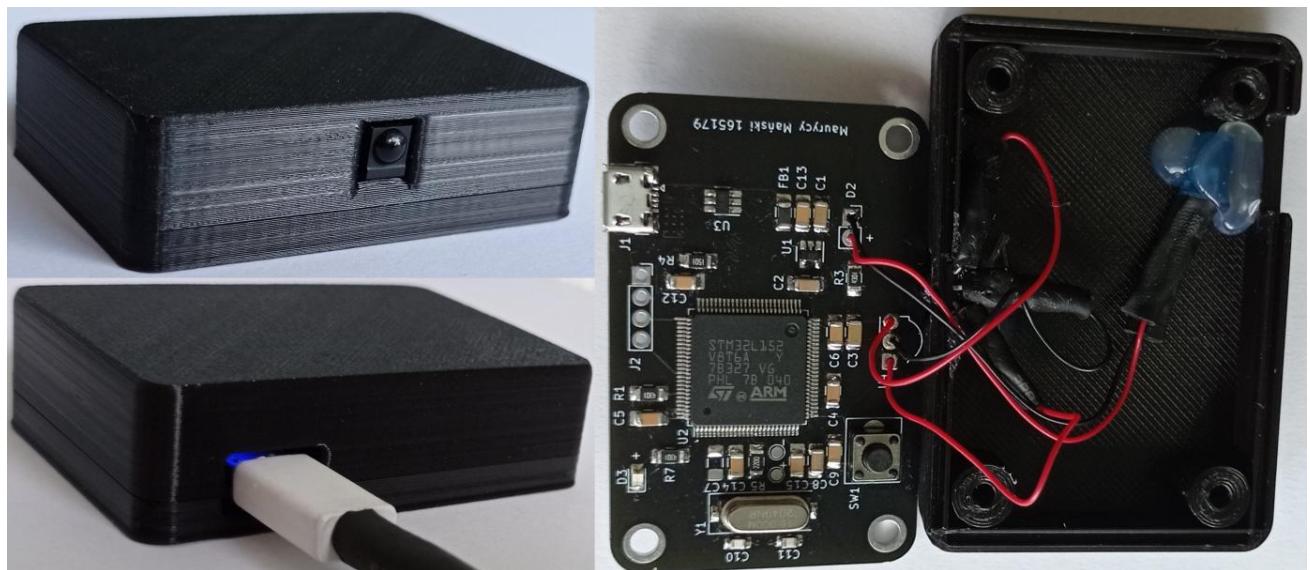
ograniczoną dokładność odwzorowania modelu 3D, dlatego należy wprowadzać odrobinę przestrzeni między łączonymi częściami. W części górnej zadano również o otwór dla złącza micro USB. Korzystając z lokalizacji otworów części spodniej poprowadzono 4 walce na części górnej o średnicy 8mm i otworze w środku o średnicy 2,9mm. Jedynie średnica walca sąsiadującego ze złączem USB została zmniejszona do 6,5mm ze względu na złącze. Średnica otworów została tak dobrana aby była minimalnie mniejsza od średnicy śruby M3, umożliwiając wkręcenie śrub bez posiadania wcześniej przygotowanego gwintu. Walce mają wysokość 10,2mm i wystają one poza obrus części o 0,2mm w celu zminimalizowania luzów między płytka a częściami (płytki posiada grubość mniejszą niż 2mm). Na dłuższej ścianie bocznej równoległej do ściany złącza USB dodano otwór na odbiornik podczerwieni o wielkości 7,5x6,5mm. Zlokalizowany jest on na środku szerokości ściany w najwyższej pozycji, nie ingerując w ścianę górną, której grubość to 3mm. Aby odbiornik po wklejeniu znalazł się w jednej linii z obudową (nie był zbyt schowany wewnątrz obudowy), grubość ściany na jego szerokości została zredukowana o 1mm od środka. Wygładzono krawędzie otworu odbiornika i krawędzie na górnej ścianie promieniem 2mm.



Rys. 6.7. Część górna obudowy odbiornika

Wymiary obudowy odbiornika przy złączonych obu elementach to 18x44,5x64,5mm. Grubość ścian bocznych to 3,15mm. Zaoblono krawędzie boczne obudowy urządzenia (obu części) promieniem 4mm. Otwór złącza USB tworzony przez 2 części ma wymiary 12x7mm a jego krawędzie również zostały wygładzone promieniem 1mm. Wydrukowano elementy obudowy odbiornika z użyciem materiału PLA w kolorze czarnym, co pozwoli na zakamuflowanie obiektu przed użytkownikiem w trakcie sesji terapii.

W pierwszej kolejności sprawdzono spasowanie obu elementów. Rozlutowano odbiornik podczerwieni z płytki drukowanej. Wygięto wyprowadzenia, skrócono ich długość. Wklejono odbiornik klejem na gorąco do części górnej. Przylutowano ponownie wyprowadzenia układu scalonego do PCB z użyciem cienkich przewodów a luty zabezpieczono koszulkami termokurczliwymi. Niebieską diodę LED wklejono klejem na gorąco do górnej części nad otworem złącza micro USB. Ma to prowadzić efekt niebieskiego podświetlenia gniazda o niskiej intensywności w momencie włączenia urządzenia. Konieczne było wydrukowanie podkładek o średnicy 6mm, średnicy otworu 3,6mm i grubości 0,5mm. Umieszczono płytkę drukowaną odbiornika wewnętrz spodniej, od dołu wprowadzono śruby M3 o długości 10mm i średnicy łączna 5,6mm. Na wystające ponad PCB śruby nałożono wydrukowane podkładki. Złączono obie warstwy ze sobą i wkręcono śruby.



Rys. 6.8. Odbiornik umieszczony w obudowie

## 7. PODSUMOWANIE

Skonstruowany system spełnia wszystkie postawione przed nim wymagania funkcjonalne. Umożliwia dzieciom chorym lub posiadającym dysfunkcje na korzystanie z aplikacji terapeutycznych, kiedy występowanie przewodu i większej liczby przycisków w standardowej myszce powoduje utrudnienia w pracy. Wprowadzenie podświetlenia i kontrastowej kolorystyki elementów przycisku są również czynnikami mającym motywować użytkownika do jego lokalizacji i pracy ze sprzętem. Przycisk (nadajnik) komunikuje się optycznie z odbiornikiem podłączonym do portu USB komputera PC. Wciśnięcie przycisku powoduje wykonanie akcji wciśnięcia 1 przycisku myszy (popularnie nazywanym „lewym przyciskiem myszy”). Działanie urządzeń zostało potwierdzone w systemie operacyjnym „Windows 10” oraz „Linux Mint 20”. Przez wykorzystanie klasy HID w urządzeniu USB instalacja sterownika nie jest potrzebna i jest ono gotowe do użycia po jego rozpoznaniu przez system operacyjny.

Do wykonania niniejszego projektu zostały określone wymagania funkcjonalne oraz zbadane aktualnie występujące rozwiązania rynkowe. Wybrano komponenty elektroniczne, wykonano schematy elektryczne i zaprojektowano obwody drukowane. Przed zleceniem płytka PCB do profesjonalnego wyprodukowania firmie, wykonano samodzielnie prototypy układów w warunkach domowych, dzięki którym wykryto problemy i błędy projektowe a docelowe płytki drukowane okazały się zaprojektowane bezbłędne. Oba urządzenia zostały polutowane i uruchomione. Zbadano sygnały generowane przez układy oraz komunikację optyczną między nimi. Zaprojektowano obudowy dla nadajnika i odbiornika w programie CAD i wydrukowano je z użyciem drukarki 3D. Finalnie zintegrowano układy elektroniczne z wydrukowanymi elementami konstrukcyjnymi.

Możliwy jest rozwój funkcjonalności systemu poprzez zmianę oprogramowania odbiornika. Urządzenie USB klasy HID może posłużyć do wysyłania tekstu lub sygnałów urządzeń wskazujących. Przykładowo urządzenia mogłyby posłużyć do automatyzacji pewnych czynności wykonywanych na komputerze osobistym przy użyciu pojedynczego przycisku.

Oba urządzenia zostaną przekazane do ośrodka zajmującego się rozwojem u dzieci komunikacji alternatywnej i wspomagającej. Badane tam będzie zaangażowanie do pracy i zainteresowanie użytkowników sprzętem, które zweryfikują wymagania funkcjonalne.

## BIBLIOGRAFIA:

- [1] Jerzyk M., Grycman M., Bucyk M.: MODEL AKTYWNY - KOMUNIKACJA ALTERNATYWNA I WSPOMAGAJĄCA, Wydawnictwo Poligraf sp. z.o.o., grudzień 2020
- [2] <https://www.youtube.com/watch?v=3Txzhi5REQQ>, Konferencja na temat AAC - Alina Smyczek, (dostęp 15.05.2021r.)
- [3] <https://www.centrumincorpore.pl/oferta/nowoczesne-terapie/69-komunikacja-wspomagajaca-i-alternatywna-aac> (dostęp 15.05.2021r.)
- [4] <https://ppp7.edu.gdansk.pl/pl/page/informacje/zagadnienia-logopedyczne/makaton> (dostęp 15.05.2021r.)
- [5] <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/nauka-i-tehnika-spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne/spoleczenstwo-informacyjne-w-polsce-w-2019-roku,2,9.html> (dostęp 15.05.2021r.)
- [6] <https://aac.netidea.pl/> (dostęp 15.05.2021r.)
- [7] Karta katalogowa *Lithium Ion NCR18650B Panasonic, version 13.11 R1, 2012 SANYO Energy (U.S.A) Corporation*, <https://www.batteryspace.com/prod-specs/NCR18650B.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [8] <https://www.best-microcontroller-projects.com/tp4056-page2.html> (dostęp 15.05.2021r.)
- [9] Karta katalogowa TC4056A, File No: S & CIC1103, Shenzhen Fu Man Electronics Group Co., Ltd., Version 1.1, <https://datasheetspdf.com/pdf-file/1309136/FUMANELECTRONICS/TC4056A/1> (dostęp 27.05.2021r.)
- [10] Karta katalogowa DW01A, PUOLOP, Rev B 2016-4-12, [https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1901091236\\_PUOLOP-DW01A\\_C351410.pdf](https://datasheet.lcsc.com/szlcsc/1901091236_PUOLOP-DW01A_C351410.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [11] Karta katalogowa TPS63001DRCT, SLVS520C –MARCH 2006–REVISED OCTOBER 2015, Texas Instruments Incorporated, [https://www.ti.com/cn/lit/ds/slvs520c/slvs520c.pdf?ts=1632754287152&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/cn/lit/ds/slvs520c/slvs520c.pdf?ts=1632754287152&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F) (dostęp 27.05.2021r.)
- [12] Karta katalogowa LDF33PT-TR, DocID025502 Rev 1, December 2013 STMicroelectronics, [https://www.micros.com.pl/mediaserver/STLDF33PT-TR\\_0001.pdf](https://www.micros.com.pl/mediaserver/STLDF33PT-TR_0001.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [13] Karta katalogowa STM32L011F4P6, DocID027973 Rev 5, September 2017 STMicroelectronics, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l011d4.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [14] Getting started with STM32L0xx hardware development, DocID026156 Rev 2, January 2015 STMicroelectronics, [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00112257-getting-started-with-stm32l0xx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00112257-getting-started-with-stm32l0xx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [15] Horowitz P., Hill W.: Sztuka elektroniki. 1 , wydanie 12 zmienione, WKŁ., Warszawa 2018.
- [16] Karta katalogowa OSI5LA56A1A, OptoSupply, <https://datasheet.octopart.com/OSI5LA56A1A-OptoSupply-datasheet-44597052.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [17] Karta katalogowa OSXX3535C1A-150mA, OptoSupply, VER A.1.1, [https://xonstorage.blob.core.windows.net/pdf/optosupply\\_osw43535c1a150ma\\_sup11manufacturerlin\\_knew.pdf](https://xonstorage.blob.core.windows.net/pdf/optosupply_osw43535c1a150ma_sup11manufacturerlin_knew.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [18] <https://pl.wikipedia.org/wiki/Tranzystor> (dostęp 15.05.2021r.)

- [19] Karta katalogowa BCW66K, 2009 Infineon Technologies AG, Munich Germany 2011-09-30, [https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BCW66K-DS-v01\\_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca389011547504ebe1a07](https://www.infineon.com/dgdl/Infineon-BCW66K-DS-v01_01-en.pdf?fileId=db3a304314dca389011547504ebe1a07) (dostęp 27.05.2021r.)
- [20] [https://www.pinclipart.com/pindetail/iTbwmRx\\_grizzly-bear-silhouette-bear-silhouette-svg-free-clipart/](https://www.pinclipart.com/pindetail/iTbwmRx_grizzly-bear-silhouette-bear-silhouette-svg-free-clipart/) (dostęp 15.05.2021r.)
- [21] Karta katalogowa MIC5365/6, Revision 3.1, July 16 2013, <https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/mic5365.pdf> (dostęp 15.05.2021r.)
- [22] Karta katalogowa USBLC6-2, Doc ID 11265 Rev 5, October 2011, <https://www.numworks.com/resources/engineering/hardware/electrical/part/stusblc6-esd-protection-645a312d.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [23] Karta katalogowa STM32L152V8T6A, DocID024330 Rev 5, August 2017, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32l151cb-a.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [24] Getting started with STM32L1xxx hardware development, AN3216, DocID17496 Rev 7, June 2013, [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/cd00273528-getting-started-with-stm32l1xxx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/cd00273528-getting-started-with-stm32l1xxx-hardware-development-stmicroelectronics.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [25] USB hardware and PCB guidelines using STM32 MCUs, AN4879, Rev 4 - December 2018, [https://www.st.com/resource/en/application\\_note/dm00296349-usb-hardware-and-pcb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf](https://www.st.com/resource/en/application_note/dm00296349-usb-hardware-and-pcb-guidelines-using-stm32-mcus-stmicroelectronics.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)
- [26] Karta katalogowa TSOP48, Document Number 82090, Rev. 11, 23-Jun-03, <http://www.farnell.com/datasheets/30500.pdf> (dostęp 27.05.2021r.)
- [27] Device Class Definition for Human Interface Devices (HID), Firmware Specification—6/27/01 Version 1.11, [https://www.usb.org/sites/default/files/documents/hid1\\_11.pdf](https://www.usb.org/sites/default/files/documents/hid1_11.pdf) (dostęp 27.05.2021r.)

## WYKAZ RYSUNKÓW:

Rys. 1.1. Przykład piktogramów w metodzie Makaton [4].....	7
Rys. 1.2. Przykłady gestów w metodzie Makaton [4].....	8
Rys. 2.1. a) schemat rozwiązania konkurencyjnego b) konkurencyjny przycisk „JELLY BEAN” c) zmodyfikowana myszka „MYSZ DO SWITCHY” [6] .....	10
Rys. 3.1. Schemat ideowy projektowanego systemu .....	12
Rys. 3.2. Ogniwko NCR18650B firmy Panasonic .....	17
Rys. 3.3. Charakterystyka ładowania NCR18650B [7] .....	17
Rys. 3.4. Charakterystyki wyładowania NCR18650B [7].....	18
Rys. 3.5. Ładowarka ogniwka litowo jonowego z jej schematem [8].....	19
Rys. 3.6. Koszyk na ogniwko 18650.....	20
Rys. 3.7. Charakterystyka sprawności układu TPS63001DRCR w zależności od poboru prądu [11] .....	21
Rys. 3.8. Charakterystyka napięcia wyjściowego układu LDF33PT-TR w zależności od napięcia wejściowego [12] .....	22

Rys. 3.9. Charakterystyki mocy wydzielanej i sprawności LDF33PT-TR od napięcia wejściowego.....	23
Rys. 3.10. Schemat zasilania nadajnika .....	24
Rys. 3.11. Schemat mikrokontrolera nadajnika .....	27
Rys. 3.12. Charakterystyki układu regulacji jasności .....	28
Rys. 3.13. Złącze programatora nadajnika .....	29
Rys. 3.14. Sygnały PWM ze współczynnikami wypełnienia a) D = 75% b) D = 50% c) D = 25% .....	31
Rys. 3.15. Rysunki ideowe i symbole tranzystora bipolarnego NPN i PNP.....	33
Rys. 3.16. Schemat nadajnika podczerwieni .....	34
Rys. 3.17. Schemat efektu świetlnego .....	36
Rys. 3.18. Obwód drukowany nadajnika.....	39
Rys. 3.19. Prototyp obwodu drukowanego nadajnika .....	40
Rys. 3.20. Schemat zasilania odbiornika .....	42
Rys. 3.21. Schemat układu ESD i złącza micro USB .....	43
Rys. 3.22. Schemat mikrokontrolera odbiornika.....	44
Rys. 3.23. Schemat oscylatora kwarcowego [24] .....	45
Rys. 3.24. Kondensatory odsprzęgające zasilanie mikrokontrolera odbiornika.....	46
Rys. 3.25. Złącze do programowania mikrokontrolera odbiornika .....	46
Rys. 3.26. Schemat blokowy odbiornika podczerwieni [26].....	48
Rys. 3.27. Przykład działania odbiornika [26].....	49
Rys. 3.28. Przykładowa ramka danych odebrana przez odbiornik [26].....	49
Rys. 3.29. Schemat odbiornika podczerwieni .....	50
Rys. 3.30. Obwód drukowany odbiornika (1/2) .....	51
Rys. 3.31. Obwód drukowany odbiornika (2/2) .....	52
Rys. 3.32. Prototyp obwodu drukowanego odbiornika .....	52
Rys. 4.1. Konfiguracja nadajnika w programie CubeMX .....	54
Rys. 4.2. Schemat blokowy programu nadajnika .....	55
Rys. 4.3. Sygnały RGB efektu świetlnego .....	58
Rys. 4.4. Schemat przesyłanej ramki danych .....	64
Rys. 4.5. Objętość programu nadajnika.....	64

Rys. 4.6. Konfiguracja odbiornika w programie CubeMX.....	65
Rys. 4.7. Schemat blokowy programu odbiornika .....	69
Rys. 4.8. Objętość programu odbiornika.....	72
Rys. 5.1. Multimetr UNI-T UT61E i zasilacz laboratoryjny Zhaoxin RXN-305D .....	74
Rys. 5.2. Stacja lutownicza Solomon SL-20 i TECHREBAL 858D.....	75
Rys. 5.3. Płytnica NUCLEO-L476RG .....	76
Rys. 5.4. Rozpoznanie mikrokontrolera nadajnika przez program ST-LINK Utility.....	77
Rys. 5.5. Nadajnik.....	78
Rys. 5.6. Sygnały PWM efektu świetlnego .....	81
Rys. 5.7. Sygnał diod podczerwieni przy akcji przycisku .....	82
Rys. 5.8. Rozpoznanie mikrokontrolera odbiornika przez program ST-LINK Utility .....	84
Rys. 5.9. Rozpoznanie odbiornika przez system Windows 10.....	85
Rys. 5.10. Rozpoznanie odbiornika przez program lusb w systemie Linux Mint 20.....	85
Rys. 5.11. Rozpoznanie odbiornika przez program dmesg w systemie Linux Mint 20.....	85
Rys. 5.12. Odbiornik .....	86
Rys. 5.13. Sygnał na wyjściu odbiornika podczerwieni w momencie wciśnięcia przycisku.....	87
Rys. 6.1. Creality Ender 3.....	89
Rys. 6.2. Część spodnia obudowy nadajnika .....	91
Rys. 6.3. Część przezroczysta obudowy nadajnika .....	92
Rys. 6.4. Część górną obudowy nadajnika .....	93
Rys. 6.5. Nadajnik umieszczony w obudowie .....	94
Rys. 6.6. Część spodnia obudowy odbiornika .....	95
Rys. 6.7. Część górną obudowy odbiornika.....	96
Rys. 6.8. Odbiornik umieszczony w obudowie .....	97

## **WYKAZ TABEL:**

Tabela 5.1. Pomiary amperomierza .....	79
Tabela 5.2. Pomiary nadajnika .....	80

## WYKAZ WZORÓW:

$$I_{\text{lad}} = V_{\text{prog}} / R_3 * 1200 \text{ [A]} \quad (3.1)$$

$$P = U * I \text{ [W]} \quad (3.2)$$

$$\eta = P_{\text{out}} / P_{\text{in}} [\%] \quad (3.3)$$

$$\eta = U_{\text{out}} / U_{\text{in}} [\%] \quad (3.4)$$

$$RC = R * C \text{ [s]} \quad (3.5)$$

$$I_B = (V_{OH} - 0,7) / R_B \text{ [A]} \quad (3.6)$$

$$I_C = I_B * \beta \text{ [A], zakładając stan aktywny tranzystora bipolarnego} \quad (3.7)$$

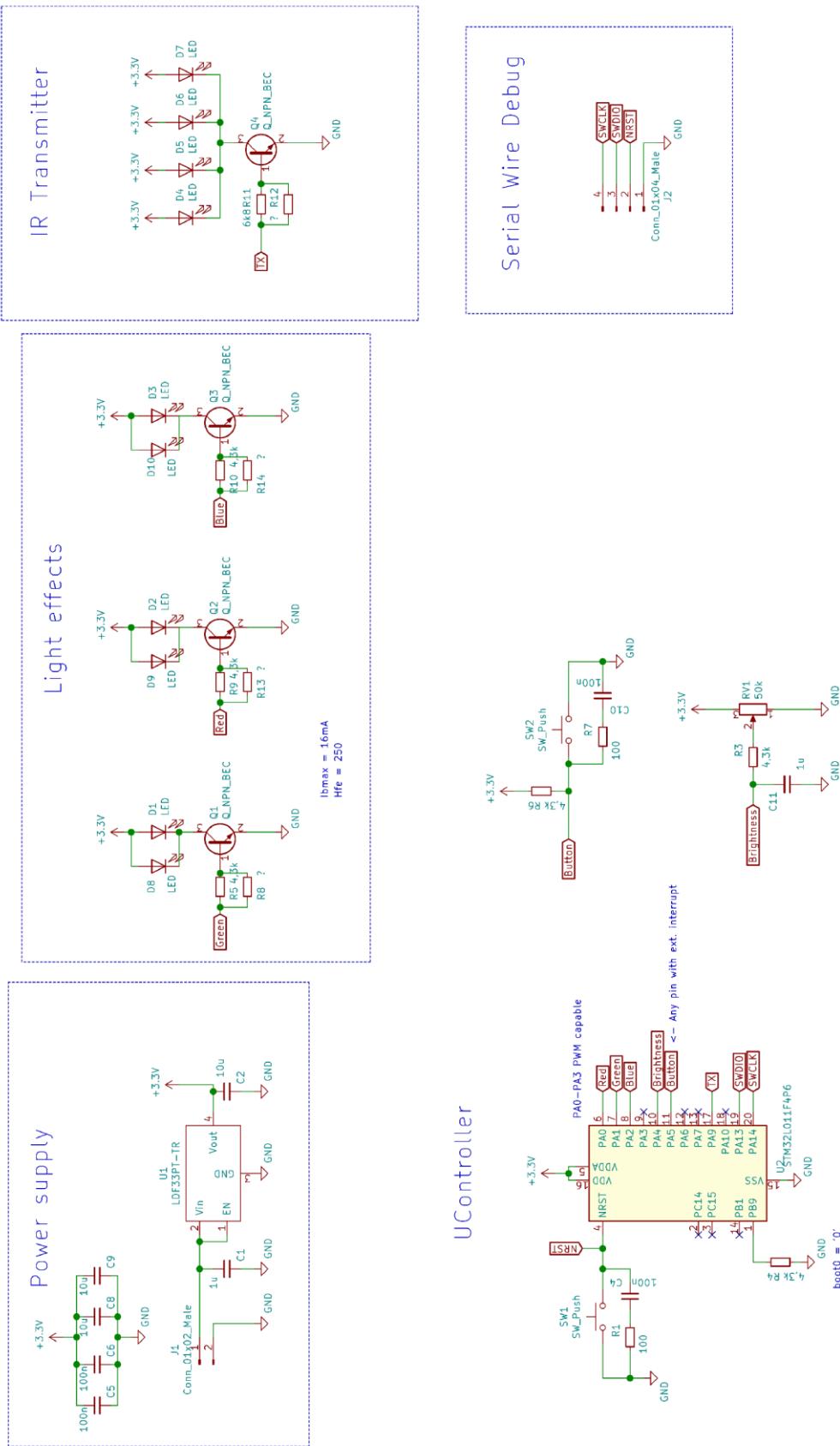
$$I_C = (V_{OH} - 0,7) / R_B * \beta \text{ [A], zakładając stan aktywny tranzystora bipolarnego} \quad (3.8)$$

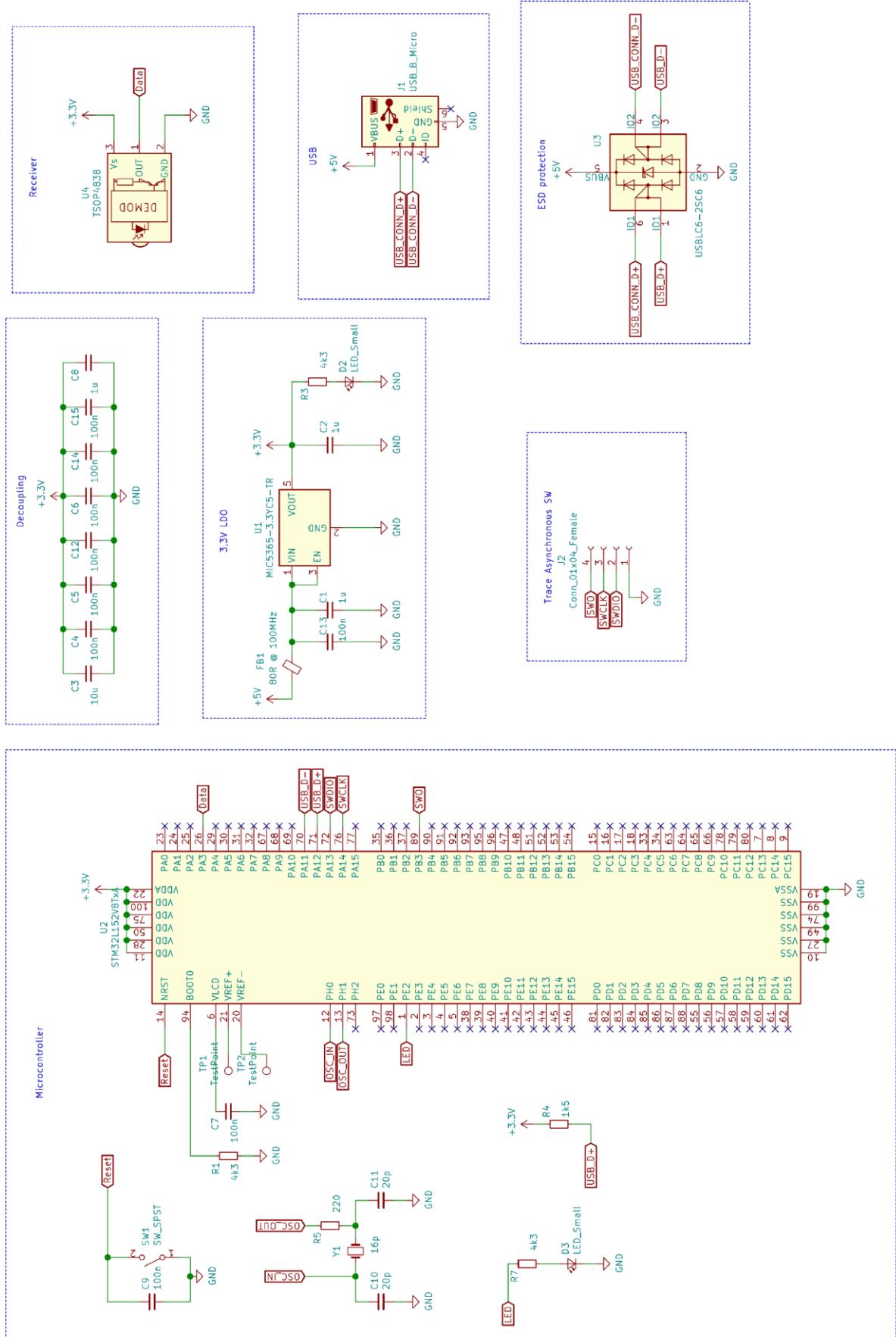
$$P_{\text{strat}} = V_{BE} * I_B + V_{CE} * I_C \text{ [W]} \quad (3.9)$$

$$P = I^2 * R \text{ [W]} \quad (3.10)$$

$$C_L = C_{L1} * C_{L2} / (C_{L1} + C_{L2}) + C_{\text{stray}} \text{ [24]} \quad (3.11)$$

## DODATEK A – SCHEMATY ELEKTRYCZNE





## DODATEK B – PROGRAMY MATLAB

### Stabilizator.m:

```
N = 10000; % liczba próbek

X = linspace(2.5,4.2,N);
Y = zeros(1,N);
Z = zeros(1,N);

for c = 1:N
    if X(c)< 3.5
        Y(c) = 100*(X(c)-0.2) / X(c);
        Z(c) = 0.2 * 0.5;
    else
        Y(c) = 100*(3.3/ X(c));
        Z(c) = (X(c) - 3.3) * 0.5;
    end
end

figure
plot(X,Y)
title('Sprawność stabilizatora')
xlabel('Napięcie na akumulatorze [V]')
ylabel('Sprawność stabilizatora [%]')
grid on

figure
plot(X,Z)
title('Moc wydzielana na stabilizatorze przy prądzie 0,5A')
xlabel('Napięcie na akumulatorze [V]')
ylabel('Moc wydzielana na stabilizatorze [W]')
grid on
```

### Thevenin.m:

```
R = 4300; %rezystor dodatkowy
C = 10^-5;
Pot = 50000;
N = 101; %liczba probek

X = linspace(0,100,N);
Rpot = zeros(1,N);
Rpot = (X/100*Pot .* (Pot - X/100 * Pot))./(X/100*Pot + Pot - X/100*Pot);

figure
plot(X,Rpot)
title('Rezystancja zastępcza Thevenina')
xlabel('Droga potencjometru [%]')
ylabel('Rezystancja zastępcza Thevenina [\Omega]')
grid on

figure
plot(X, (Rpot+R)*C)
title('Stała czasowa RC')
xlabel('Droga potencjometru [%]')
ylabel('Stała czasowa RC [s]')
grid on

figure
plot(X,1./(2*pi*(Rpot+R)*C))
title('Filtr dolnoprzepustowy')
xlabel('Droga potencjometru [%]')
ylabel('Częstotliwość odcięcia -3dB [Hz]')
grid on
```

### Efekt\_swietlny.m:

```
t = linspace(0,2*pi,1000);

x = (sawtooth(t+pi/2,1/2)+1)*50;
plot(t/(2*pi)*20,x,'g')
hold on
x = (sawtooth(t+pi,1/2)+1)*50;
plot(t/(2*pi)*20,x,'r')
hold on
x = (sawtooth(t, 1/2)+1)*50;
plot(t/(2*pi)*20,x,'b')

title('Sygnały RGB')
xlabel('Czas [s]')
ylabel('Unormowana intensywność [%]')
```

## DODATEK C – INSTRUKCJA OBSŁUGI

- Podłączyć przewód odbiornika (czarne urządzenie) do portu USB komputera, upewnić się że złącze świeci się na niebiesko z niewielką intensywnością.
- Umieścić odbiornik na płaskiej powierzchni (najlepiej na stole pod monitorem, ewentualnie na klawiaturze w przypadku laptopa) śrubami do dołu i odbiornikiem skierowanym na użytkownika.
- Włączyć nadajnik zmieniając pozycję jego przełącznika do góry a następnie ustawić poziom podświetlenia za pomocą śrubokręta płaskiego 4mm zmieniając nastawę ukrytego potencjometru (pokrętła) indywidualnie pod osobę użytkującą.
- W przypadku zauważenia słabszego poziomu podświetlenia (lub jego braku) mimo wysokiej nastawy potencjometru, należy podłączyć nadajnik do ładowarki sieciowej ze złączem USB C z prądem wyjściowym 2A. Korzystanie z urządzeń jest dozwolone w trakcie procesu ładowania. Dioda czerwona sygnalizuje proces ładowania a dioda niebieska informuje o jego zakończeniu. Ładowanie akumulatora zajmuje około 4 godziny (przy wyłączonym urządzeniu) a praca z maksymalnym podświetleniem wystarcza na około 17 godzin.
- Postawić nadajnik (kolorowy przycisk) na podobnej wysokości do odbiornika (najlepiej na wspólnym stole) na dystansie do 1 metra, diodami podczerwieni skierowanymi do odbiornika i logiem niedźwiedzia w kierunku użytkownika.
- Urządzenia są gotowe do działania, zalecane jest przetestowanie działania przed rozpoczęciem sesji rehabilitacji. W przypadku braku działania urządzeń i korzystania z systemu operacyjnego Windows 10 warto sprawdzić w panel sterowania>>sprzęt i dźwięk>>Urządzenia i drukarki w zakładce urządzenia czy system operacyjny prawidłowo rozpoznał urządzenie (odbiornik) o nazwie „Maurycy Manski 165179”. W systemie Linux Mint 20 będzie to program lusb lub dmesg.
- Po zakończeniu pracy należy wyłączyć urządzenia poprzez odłączenie przewodu USB od komputera i zmianę pozycji przełącznika w nadajniku w dół.
- **W trakcie sesji rehabilitacji wymagane jest okresowe sprawdzanie czy użytkownik poprawnie korzysta ze sprzętu. W przypadku wyczucia nadmiernego nagrzewania się urządzeń lub podejrzanej zapachu należy natychmiast przerwać działanie urządzeń. Osoby nieupoważnione nie powinny zmieniać położenia śrub montażowych w obu urządzeniach.**