

**Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji**

INSTYTUT ELEKTRONIKI

Projekt dyplomowy

*Sterownik procesowy silnika BLDC z funkcjonalnością IoT*

*BLDC engine process controller with IoT functionality*

Autor: *Hubert Kolano*

Kierunek studiów: *Elektronika i Telekomunikacja*

Opiekun pracy: *dr. Inż. Dominik Grochala*

Kraków, *2024*

Spis treści

[1. Wstęp 3](#_Toc175874079)

[2. Założenia projektowe 4](#_Toc175874080)

[2.1. Cel projektu 4](#_Toc175874081)

[2.2. Wymagania techniczne sterownika 4](#_Toc175874082)

[2.3. Specyfikacja silnika BLDC 5](#_Toc175874083)

[2.4. Architektura projektu sterownika 9](#_Toc175874084)

[2.4.1. Schemat blokowy 9](#_Toc175874085)

[2.4.2. Sposób sterowania silnikiem 9](#_Toc175874086)

[2.4.3. Możliwość montażu płytki w szafie elektrycznej 11](#_Toc175874087)

[3. Stworzenie PCB sterownika silnika BLDC 12](#_Toc175874088)

[3.1. Wybór komponentów 12](#_Toc175874089)

[3.1.1. Mikrokontroler 14](#_Toc175874090)

[3.1.2. Układy scalone zasilania 20](#_Toc175874091)

[3.1.3. Moduł komunikacji RS-232 21](#_Toc175874092)

[3.1.4. Układ napięcia sterującego silnikiem 22](#_Toc175874093)

[3.1.5. Ekran interfejsu fizycznego 23](#_Toc175874094)

[3.1.6. Programator 23](#_Toc175874095)

[3.2. Wybór oprogramowania 24](#_Toc175874096)

[3.3. Tworzenie schematu ideowego 25](#_Toc175874097)

[3.3.1. Sekcja zasilania 25](#_Toc175874098)

[3.3.2. Układ komunikacji rs-232 26](#_Toc175874099)

[3.3.3. Układ wzmacniaczy do analogowego wyjścia napięcia. 27](#_Toc175874100)

[3.3.4. Odczyt prędkości i sterowanie kierunkiem 28](#_Toc175874101)

[3.3.5. Podłączenie mikrokontrolera 29](#_Toc175874102)

[3.3.6. Układ programatora 30](#_Toc175874103)

[3.4. Projektowanie PCB 31](#_Toc175874104)

[3.5. Fizyczne wykonanie PCB 34](#_Toc175874105)

[4. Tworzenie Software’u 36](#_Toc175874106)

[5. Testowanie 36](#_Toc175874107)

# Wstęp

Celem pracy jest zaprezentowanie procesu zaprojektowania i zaprogramowanie urządzenia, które będzie służyło jako sterownik silnika BLDC (Brushless Direct Current motor) używanego w pracowni laboratoryjnej. W pracy będzie ukazany cały proces tworzenia urządzenia na podstawie ustalonych wcześniej od niego wymagań. Silnik jest sterowany normalnie za pomocą potencjometru, sterownik ma za zadanie podnieść precyzje tego rozwiązania oraz umożliwić pomiar jego obrotów. Sterownik ma również za zadanie umożliwić ustawienie parametrów pracy silnika poprzez zewnętrzne interfejsy, w tym bezprzewodowe nadające urządzeniu funkcjonalność IoT (Internet of Things).

\*Reszta wstępu zostanie dopisana wraz z ukończeniem pracy\*

# Założenia projektowe

W tym rozdziale przedstawione zostaną podstawowe założenia projektowe związane z realizacją sterownika procesowego silnika BLDC z funkcjonalnością IoT. Na wstępie określone zostaną cele oraz wymagania techniczne, które będą spełniane w ramach projektu. Następnie zostaną opisane szczegółowe specyfikacje silnika BLDC, do którego tworzony jest sterownik, wraz z kluczowymi parametrami, mającymi wpływ na wybór komponentów i algorytmów sterowania. Na końcu omówiony zostanie koncept projektu, obejmujący wybór architektury systemu, zastosowane technologie oraz opis funkcjonalności, jakie ma realizować sterownik.

## Cel projektu

Celem projektu jest zaprojektowanie, zaprogramowanie i przetestowanie sterownika elektrycznego silnika BLDC. Sterownik ma sterować prędkością obrotową silnika, przy czym ma on spełniać wszystkie wymagane od niego funkcjonalności, wynikające z potrzeb laboratorium jak i samej specyfiki silnika BLDC do którego jest tworzony. Sterownik ma zapewnić stabilną i efektywną pracę silnika i zapewnić możliwie intuicyjną obsługę.

## Wymagania techniczne sterownika

Urządzenie jest projektowane z myślą i przeznaczeniem do sterowania silnikiem BLDC znajdującym się w laboratorium, gdzie do przeprowadzania prac badawczych potrzebny jest do spełnienia szereg następujących wymagań:

* **dokładność** – silnik powinien być sterowany z dokładnością co do 0,5 RPM (Revolutions Per Minute) przy maksymalnych 60 RPM,
* **interfejs RS-232** – jest to interfejs wykorzystywany do komunikacji z innymi urządzeniami w laboratorium przy pomocy złącza DB9,
* **fizyczny interfejs** – urządzenie ma posiadać ekran i przyciski pozwalające na zmienianie parametrów pracy silnika,
* **funkcjonalność IoT** – możliwość zmiany ustawień za pomocą bezprzewodowej komunikacji,
* **połączenie z silnikiem poprzez gniazdo DB25** – silnik ma wyprowadzony od siebie kabel zakończony wspomnianym konektorem, sterownik ma mieć możliwość jego wpięcia,
* **możliwość zamontowania na szynie DIN** – urządzenie ma się znajdować w szafie elektrycznej, jego wymiary i sposób montażu, mają to umożliwić.

## Specyfikacja silnika BLDC

Silniki bezszczotkowe prądu stałego (BLDC) charakteryzują się wysoką sprawnością, trwałością oraz precyzyjną kontrolą prędkości, co sprawia, że są szeroko wykorzystywane w różnych branżach. Dzięki eliminacji szczotek, stosowanych w tradycyjnych silnikach komutatorowych, silniki BLDC mają mniejsze straty energii oraz zużycie mechaniczne. Znajdują zastosowanie m.in. w elektronice użytkowej (wentylatory, napędy dysków twardych), pojazdach elektrycznych, robotyce, automatyce przemysłowej oraz systemach klimatyzacyjnych i wentylacyjnych (HVAC) [1].

Silnik z do jakiego projektujemy sterownik to model BLDC58-35LEB z serii BLDC58 firmy Mclennan. Wszystkie parametry jakie można znaleźć odnośnie do tego silnika są zamieszczone do pobrania ze strony producenta [2]. Z dokumentacji wiele danych musimy odczytać ze schematów.

Obraz zawierający tekst, zrzut ekranu, diagram, krąg

Opis wygenerowany automatycznieRys. 2.1 Schemat przedstawiający opis przewodów wyprowadzonych z silnika.

Na Rys.2.1 producent zamieścił parę kluczowych informacji, takich jak fakt, że silnik poza zasilaniem, potrzebuje również sterowania analogowym sygnałem napięcia (producent sugeruje dzielnik napięcia wykonany przy pomocy potencjometru), które przekłada się na prędkość obrotów. Jest również wyprowadzony przewód, którym poprzez podanie wysokiego lub niskiego stanu logicznego steruje się kierunkiem obrotów oraz przewód, który generuje sygnał impulsowy liniowo o częstotliwości liniowo zależnej od obrotów silnika. Znajdują się tam wszystkie potrzebne parametry:

* zasilanie **24 [V]** napięcia stałego,
* zakres sygnału napięcia sterowania: **0-4 [V],**
* maksymalna prędkość obrotowa: **3650 RPM** (obciążenie może ograniczyć do 3000RPM)**,**
* generator sygnału: **36ppr** (pulses per revolution)oznacza ilość pulsów generowaną na obrót

Obraz zawierający tekst, diagram, krąg, Rysunek techniczny

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 2.2 Przykładowy schemat podłączeń dla podstawowej kontroli prędkości.

W dokumentacji możemy znaleźć Rys. 2.2, która jest przykładem podstawowego układu do kontroli pracy tego silnika, widzimy, że przewód odpowiadający za kierunek, nie może znajdować się w stanie wysokiej impedancji, dodatkowo wyliczmy sobie jego napięcie stanu wysokiego korzystając z równania na napięcie wyjściowe dzielnika napięciowego:

(1)

gdzie:

* – napięcie wejściowe przyłożone do układu dzielnika napięciowego,
* ​ – napięcie wyjściowe pobierane z węzła pomiędzy rezystorami i
* ​ – rezystor znajdujący się pomiędzy napięciem wejściowym a wyjściem,
* ​ – rezystor znajdujący się pomiędzy wyjściem a masą (punkt odniesienia).

Podstawiając do równania:

Można zauważyć, że dzielnik napięcia z potencjometrem użytym do sterowania napięcia działa na tych samych wartościach, dla pewności więc autor założył, że jego sterownik będzie w stanie zapewnić napięcie sterujące **w zakresie 0-5 [V].**

Ponadto nie jest sprecyzowane napięcie impulsów generowanych na wyjściu silnika, więc w fazie projektowania warto uwzględnić, że może być to zarówno 24 [V] jak i 5 [V].

**Wykonane modyfikacje silnika**

Silnik w laboratorium ma dostarczone zewnętrzne zasilanie o wartości 24 [V], jego wszystkie przewody są poprowadzone kablem, który jest zakończony wtykiem DB15.

Obroty silnika na wyjście są również przeniesione przy pomocy dołożonej przekładni, efektem tego obroty na wyjściu są zmniejszone 50-krotnie, czyli **maksymalnie 73 RPM bez obciążenia.** Interfejs powinien uwzględniać obroty na wyjściu przekładni, mimo że silnik będzie wysyłał sygnał niezależny od niej.

Obraz zawierający diagram, Czcionka, linia, tekst

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 2.3 Przedstawienie numeracji pinów złącza DB15 [3].

Zakładając numeracje pinów w danym złączu, taką samą jak na Rys. 2.3, wybrane piny mają podpięte następujące przewody silnika:

* **13** – zasilanie 24 [V]
* **12** – masa
* **9** – sterowanie prędkością obrotową silnika
* **14** – odczyt prędkości obrotowej silnika
* **1** – sterowanie kierunkiem pracy silnika

## Architektura projektu sterownika

### Schemat blokowy

Obraz zawierający diagram, tekst, Plan, zrzut ekranu

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 2.4 Schemat blokowy sterownika

Na Rys. 2.4 można zauważyć, że na jednostce mikrokontrolera będzie spoczywała obsługa kilku interfejsów naraz, warto będzie dobrać mikrokontroler mający wbudowaną część z nich. Dodatkowo mikrokontroler będzie zajmował się monitorowaniem parametrów silnika, dobrze byłoby zadbać o to, żeby przerwania wywołane obsługą interfejsów nie przerywały pomiarów i nastaw silnika. Ponadto trzeba zadbać o uzyskanie odpowiedniego zasilania zarówno dla mikrokontrolera (3,3V) jak i dla elementów kontrolujących pracę silnika (ustalone 0-5V) przy dostarczonych z silnika 24V.

### Sposób sterowania silnikiem

W projekcie trzeba rozważyć w jaki sposób sterownik będzie wytwarzał analogowe napięcie, które silnik będzie odbierał. W tym celu najlepszym i najprostszym wyborem jest użycie cyfrowo-analogowego przetwornika (DAC), który znajduje się w większości modeli mikrokontrolerów. DAC jest wbudowanym komponentem, umożliwiającym generowanie sygnałów analogowych na podstawie danych cyfrowych. DAC konwertuje cyfrowe dane binarne na ciągłe napięcie lub prąd, proporcjonalne do wartości wejściowej.

Dodatkowo niezbędne będzie wykorzystanie wzmacniacza, gdyż mikrokontroler może jedynie podać na wyjściu przetwornika maksymalne napięcie równe zasilaniu (3,3V), a założone zostało (w rozdziale 2.3), że do kontroli silnika zostanie wykorzystany większy zakres napięć (0-5V).

Przed przystąpieniem do wyboru mikrokontrolera należy sprawdzić jakiej minimalnej dokładności (rozdzielczości) potrzebny jest nam przetwornik DAC.

Załóżmy, że nasz wzmacniacz działa liniowo i przy pomocy mikrokontrolera sterujemy napięciem 0-5 V, a silnik liniowo zwiększa swoje obroty w zakresie 0,9 – 5,0 V. Część zakresu przetwornika działa w zakresie, w którym silnik nie rozpoczyna pracy, czyli przetwornik zostanie wykorzystany tylko w pewnej części, a dokładnie: .

W przypadku, gdyby okazało się, że silnik nie potrzebuje tak szerokiego zakresu (np. wystarczy mu tylko 0,9 – 4 V), wykonanie modyfikacji wzmacniacza, aby zmniejszyć jego zakres będzie bardzo prosta. Jednak taka operacja zmieni nam % wykorzystania przetwornika do

Ustalmy wzór i dzięki któremu oda się policzyć wymaganą rozdzielczość, aby sterować obrotami z potrzebną nam dokładnością. Zakładany jest mniej korzystny % wykorzystania przetwornika:

(2)

Podstawiając do wzoru (2) ustaloną wcześniej z góry precyzję na poziomie 0,5 RPM oraz max 73RPM otrzymamy działanie:

Rozdzielczość 189 jest pokryta przez DAC o rozdzielczości 8 bitów (rozdzielczość 256 stanów) i taka rozdzielczość będzie wymagana przy wyborze mikrokontrolera.

### Możliwość montażu płytki w szafie elektrycznej

Aby zamontować sterownik w szafie elektrycznej, wykorzystane zostaną specjalne uchwyty pozwalające zamontować każde PCB z otworami we właściwym miejscu na szynie DIN.

Obraz zawierający zawias

Opis wygenerowany automatycznie przy średnim poziomie pewności

Rys. 2.5 Urządzenie do montowania PCB na szynie DIN

Aby umożliwić taki montaż, należy stworzyć PCB, które będzie miało 4 otwory na śruby wysokie na 47mm i dowolnie szerokie.

# Stworzenie PCB sterownika silnika BLDC

W tym rozdziale opisany zostanie proces stworzenia płytki PCB (Printed Circuit Board) dla sterownika silnika BLDC z funkcjonalnością IoT. Projekt PCB zapewnia odpowiednią fizyczną strukturę oraz połączenia dla wszystkich podzespołów sterownika. Proces stworzenia płytki PCB dla sterownika BLDC obejmie kilka kluczowych etapów:

1. projektowanie rozpocznie się od wyboru odpowiedniego oprogramowania,
2. wybór komponentów,
3. tworzenie schematu ideowego,
4. projektowanie płytki PCB,
5. montaż płytki PCB.

Dokładne wykonanie każdego etapu pozwoli na stworzenie wydajnego i niezawodnego systemu sterowania dla silnika BLDC, który będzie w stanie spełnić postawione wcześniej wymagania.

## Wybór komponentów

W procesie projektowania jednym z kluczowych etapów jest dobór odpowiednich komponentów elektronicznych. Przy wyborze elementów do tego projektu brane są pod uwagę trzy główne kryteria: **koszt**, **dostępność** a przede wszystkim **prostota zastosowania.**

Zastosowanie komponentów, które są łatwe do implementacji i mają szeroką dokumentację, może być obrane w projektach, które nie są tworzone z myślą o masowej produkcji, tylko o pojedynczych egzemplarzach. W takim wypadku warto oszczędzić czas projektowania wybierając prostsze do implementacji zastosowania. Prostota zastosowania oznacza również łatwość integracji z innymi elementami układu oraz dostępność gotowych bibliotek wspierających dany komponent w środowiskach programistycznych. W ten sposób możliwe jest szybsze i bardziej niezawodne wdrożenie funkcji sterowania oraz komunikacji bezprzewodowej.

Koszt komponentów odgrywa istotną rolę w każdym projekcie. W projekcie można zastosować popularne komponenty zwykłej klasy, ze względu na podstawowe zastosowanie i podstawowe wymagania (praca w pokojowej temperaturze, w infrastrukturze, która nie jest newralgiczna).

Dodatkowo w kwestii kosztów wyboru układów scalonych, ważne jest sprawdzić, czy wymagają one dodatkowego osprzętu w postaci zewnętrznie przyłączonych kondensatorów, cewek czy rezystorów. Typowo te elementy mają bardzo mały koszt za jednostkę, jednak przez to można je kupić tylko hurtem, więc warto dobierać układy scalone tak, aby potrzebować jak najmniej różnych elementów pasywnych, co ograniczy potrzebną do zamówienia ilość partii.

W kwestii dostępności, warto zobaczyć, czy da się zamówić wszystkie komponenty u jednego dostawcy oraz czy gwarantuje on wysyłkę ich wszystkich w przystępnym terminie – zamawiając wiele komponentów łatwo o pomyłkę i zamówić produkt niedostępny chwilowo na magazynie. Błąd taki może nam zatrzymać pracę nad projektem, a bardzo możliwe jest, że na stanie magazynu znajduje się bliźniaczy element.

Wybór komponentów elektronicznych opartych na powyższych kryteriach znajduje swoje uzasadnienie w literaturze, która wskazuje na konieczność zbalansowania kosztów, dostępności i niezawodności elementów [4].

Komponenty postanowiłem zamawiać ze strony Aliexpress.pl ze względu na dużą dostępność i niską cenę, minusem jest długi czas oczekiwania przesyłki, jednak dłuższy okres i tak będzie nieunikniony oczekiwaniem na produkcję i dostawę PCB.

### Mikrokontroler

Wybór mikrokontrolera to najważniejszy wybór, dlatego powinno się wykonać go jako pierwszy, może on znacząco wpłynąć na decyzje w wyborze innych elementów ze względu na interfejsy jakie obsługuje i w jaki sposób się go programuje.

W projekcie rozważono wybór trzech różnych mikrokontrolerów z rodzin: Arduino, STM32 oraz ESP32.

**Arduino**Jedna z najbardziej znanych platform mikrokontrolerowych, ceniona za prostotę i łatwość użycia, zwłaszcza dla początkujących. Najpopularniejsze mikrokontrolery Arduino to układy oparte na architekturze AVR, takie jak **ATmega328P**.

Obraz zawierający Komponent elektroniczny, Element obwodu, Inżynieria elektroniczna, elektronika

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.1 Arduino Uno WiFi REV2  
Źródło: store.arduino.cc

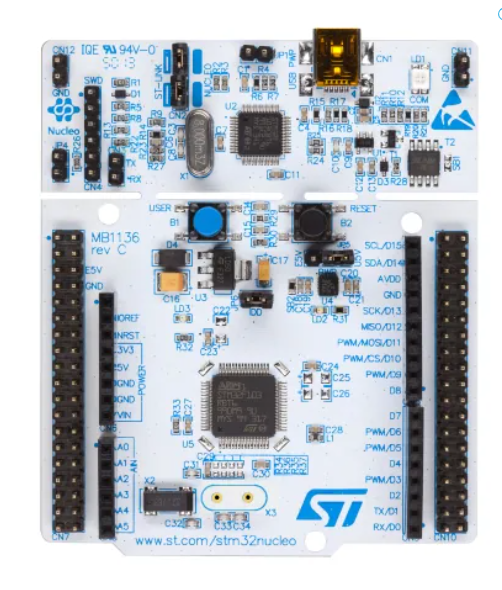
Istnieją również o wiele bardziej rozbudowane platformy, takie jak na Rys 3.1, jednak są one droższe i dalej oferują dość ograniczoną pinów przeznaczoną dla użytkownika.

Kluczowe cechy platformy Arduino:

* **Łatwość programowania**: Arduino oferuje prosty w użyciu środowisko IDE oraz ogromne wsparcie społeczności, co czyni go idealnym wyborem dla osób rozpoczynających pracę z mikrokontrolerami.
* **Mniejsza moc obliczeniowa**: typowe mikrokontrolery Arduino (np. ATmega328P) mają całkiem niską moc obliczeniową (16 MHz) oraz ograniczoną pamięć RAM i Flash.
* **Ogromna ilość bibliotek i gotowych projektów**: poza stworzonym przez firmę Arduino środowiskiem, bardzo duża popularność jego wpływa na ogrom gotowych bibliotek open-source, które mogę znacznie ułatwić pracę, nie musząc pisać wszystkiego od zera.

Choć Arduino sprawdza się dobrze w prostych projektach, jego ograniczenia w zakresie wydajności oraz braku wbudowanej łączności bezprzewodowej czynią je mniej atrakcyjnym wyborem w przypadku prowadzonego projektu.

**STM32**STM32 to seria mikrokontrolerów produkowanych przez STMicroelectronics, opartych na architekturze ARM Cortex-M. Jest to bardziej zaawansowana platforma w porównaniu do Arduino i oferuje szeroki zakres możliwości. Firma oferuje szereg różnych klas mikrokontrolerów zależnie od wymaganego od nas zastosowania. **Seria L** oferuje rozwiązania jak najbardziej energooszczędne, **seria W** ma możliwość obsługi bezprzewodowych peryferiów, a **seria F** świetnie się sprawdzi jako ogólne zbalansowane rozwiązanie.



Rys. 3.2 STM32F334R8 Nucleo-64 płytka prototypowa  
Źródło: st.com/en/evaluation-tools

Kluczowe cechy STM32:

* **Wysoka wydajność**: STM32, zwłaszcza modele z serii F4 lub F7, oferują znacznie większą moc obliczeniową niż mikrokontrolery Arduino, dzięki wykorzystaniu rdzeni ARM Cortex-M o taktowaniu od 72 MHz do ponad 200 MHz, niektóre produkty posiadają nawet 2 rdzenie.
* **Bogate peryferia**: STM32 oferuje rozbudowane możliwości w zakresie interfejsów peryferyjnych, takich jak DAC, ADC, SPI, I2C, UART, CAN oraz Ethernet. Jest to bardzo elastyczna platforma dla bardziej wymagających aplikacji przemysłowych i komercyjnych, większość z ich platform posiada bardzo dużą ilość obsługi pinów przeznaczoną dla użytkownika.
* **Trudniejsza implementacja**: STM32, mimo swoich możliwości, jest trudniejsze w implementacji niż Arduino, wymagając bardziej zaawansowanych narzędzi programistycznych (np. STM32CubeMX) oraz wiedzy na temat konfiguracji peryferiów i zarządzania zasobami systemowymi.

STM32 to mocna platforma, szczególnie w projektach, gdzie wymagane są skomplikowane obliczenia i zaawansowane peryferia. Jednak, nie posiada ona wbudowanego modułu Wi-Fi, dodatkowo ich użycie wymaga o wiele bardziej dogłębnego przestudiowania dokumentacji, wraz z większymi możliwościami rośnie trud ich wykorzystania. Ponadto układy tej firmy te są droższe i większość ich możliwości nie znajduje wykorzystana w tym projekcie.

**ESP32**Mikrokontroler produkowany przez Espressif, który zyskał popularność dzięki szerokim możliwościom w zakresie łączności bezprzewodowej oraz zaawansowanym funkcjom cyfrowo-analogowym.

Obraz zawierający elektronika, Inżynieria elektroniczna, Komponent elektroniczny, Element obwodu

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.3 ESP32-DevKitM-1  
Źródło: https://docs.espressif.com/projects/esp-idf

Kluczowe cechy ESP32:

* **Wbudowane Wi-Fi oraz Bluetooth**: ESP32 ma zintegrowane moduły Wi-Fi oraz Bluetooth, co czyni go idealnym rozwiązaniem dla aplikacji IoT,
* **Dwa przetworniki DAC (cyfrowo-analogowe)**: w odróżnieniu od reszty (za wyjątkiem niektórych droższych modeli STM32), ESP32 ma dwa przetworniki DAC.
* **Wysoka wydajność**: ESP32-WROOM jest wyposażony w dwurdzeniowy procesor taktowany z częstotliwością 40 MHz, co zapewnia odpowiednią moc obliczeniową do przetwarzania danych w czasie rzeczywistym.
* **Rozbudowane GPIO i funkcje peryferyjne**: ESP32 oferuje szeroką gamę interfejsów peryferyjnych, takich jak UART, SPI, I2C, co czyni go wszechstronnym narzędziem do obsługi różnych komponentów.
* **Obsługa środowiska Ardunio:** wspieranie tego prostego środowiska przez ESP32 znacznie ułatwia pracę nad projektem.

ESP32 jest bardzo atrakcyjnym rozwiązaniem, zwłaszcza w kontekście aplikacji IoT, dzięki swojej zdolności do integracji bezprzewodowej oraz dużej elastyczności w zarządzaniu wejściami/wyjściami. Dodatkowym atutem jest szerokie wsparcie społeczności oraz dostępność wielu bibliotek i przykładów kodu.

**Ostateczny wybór**

Z modeli ESP32 zdecydowano się na wybór modelu mikrokontrolera **ESP32-WROOM-E**, który jest najnowszym z najpopularniejszej serii WROOM. Seria ta jest jedną z najpopularniejszych poprzez swoją wszechstronność i zadowalającą moc obliczeniową, a to wszystko zawarte w bardzo niskiej cenie.

Wybór tego mikrokontrolera do projektu sterownika silnika BLDC z funkcjonalnością IoT był uzasadniony przede wszystkim jego wbudowaną funkcjonalnością bezprzewodową, co jest kluczowe dla aplikacji IoT. Mikrokontroler ten oferuje także dwa rdzenie pozwalające wykonywać pomiary ciągłe w czasie nienaruszone wywołaniem przerwań, co znacznie zwiększa dokładność i elastyczność, co jest niezbędne w kontekście precyzyjnego sterowania silnikiem BLDC. W porównaniu do STM32, ESP32 ma przewagę dzięki zintegrowanej łączności Wi-Fi i Bluetooth, wraz z wbudowaną anteną co pozwala na uniknięcie zakupu i montażu dodatkowych komponentów i upraszcza projekt. Posiada również wbudowane dwa 8 bitowe przetworniki DAC, które można połączyć celem uzyskania jeszcze wyższej precyzji. ESP32 jest optymalnym wyborem, zapewniającym odpowiednią wydajność, funkcjonalność IoT oraz prostotę implementacji.

### Układy scalone zasilania

W układach elektronicznych konieczne jest odpowiednie zarządzanie napięciami zasilającymi poszczególne moduły. Zbyt wysokie napięcie może doprowadzić do uszkodzenia elementów, podczas gdy zbyt niskie może uniemożliwić ich poprawne działanie. Dlatego stosuje się układy scalone przetworników napięcia, które przekształcają napięcie wejściowe na odpowiednie poziomy zgodnie z wymaganiami danego systemu. W tym celu wybrano dwa popularne układy scalone: **LM2596S-5** oraz **AMS1117-3.3**.

W projekcie sterownika, kluczowym zadaniem było dobranie odpowiednich układów scalonych, które zapewnią stabilne i efektywne zasilanie dla różnych podzespołów urządzenia. W związku z tym należało zastosować przetworniki napięcia, które obniżą napięcie z dostępnych 24V do poziomów odpowiednich dla mikrokontrolera i innych elementów układu [5].

**LM2596S-5**Przetwornik typu **buck**, znany również jako przetwornik **step-down**, to popularny rodzaj przetwornicy impulsowej stosowanej do obniżania napięcia wejściowego na niższe, stabilne napięcie wyjściowe. Jego zasada działania opiera się na cyklicznym przełączaniu elementów kluczujących, takich jak tranzystory MOSFET oraz magazynowaniu energii w elemencie indukcyjnym, np. dławiku.

Dzięki wykorzystaniu trybu impulsowego przetworniki buck mogą osiągać bardzo wysoką sprawność, często powyżej 90%. To sprawia, że są one szczególnie korzystne w aplikacjach, gdzie występuje znaczna różnica między napięciem wejściowym a wyjściowym. Wykorzystanie technik modulacji szerokości impulsu (PWM) pozwala na precyzyjną kontrolę napięcia wyjściowego w zależności od wymagań obciążenia.

Niestety, takie przetworniki często są droższe i wymagają podłączenia większej ilości elementów pasywnych o większych wartościach, ale przy zmianie napięcia z 24V do 5V będzie wymagane użycie takowego

Układ **LM2596S-5** to popularny przetwornik typu **buck (step-down)**, który jest wykorzystywany do zmniejszania napięcia wejściowego do niższego poziomu. W tym przypadku układ został zaprojektowany, aby przekształcić napięcie 24V na stabilne 5V [7].

**AMS1117-3.3**  
**LDO** (ang. **Low Dropout Regulator**) to stabilizator liniowy niskiego spadku napięcia, który umożliwia przetwarzanie napięcia wejściowego na niższe napięcie wyjściowe przy minimalnej różnicy między nimi. Przetwornik LDO składa się z tranzystora regulacyjnego (zwykle typu PNP lub MOSFET) oraz układu odniesienia napięcia i sprzężenia zwrotnego.

Przetworniki LDO są proste w budowie, generują niewielkie zakłócenia elektromagnetyczne (brak przełączania impulsowego), łatwo integrują się z innymi układami, a także mogą pracować przy minimalnej różnicy napięć wejściowego i wyjściowego. Jako ich wadę można wymienić niską efektywność, przy dużych różnicach napięć, ponieważ nadmiar energii rozpraszany jest w postaci ciepła. To może prowadzić do przegrzewania się układu i strat mocy [5].

Układ **AMS1117-3.3** to stabilizator liniowy, który przekształca napięcie wejściowe 5V na stabilne napięcie 3.3V. Jest on bardzo tani oraz wymaga minimalnej ilości elementów pasywnych (tylko dwa kondensatory) [8].

### Moduł komunikacji RS-232

Jednym z wymagań projektowych jest sposób komunikowania się za pomocą protokołu RS232, jednak wybrany przez nas mikrokontroler nie obsługuje go. Na rynku są gotowe rozwiązania oferujące prostą konwersje protokołu UART (który jest wbudowany w mikrokontroler) na RS232.

**UART** to uniwersalny asynchroniczny odbiornik-nadajnik stosowany do komunikacji szeregowej między dwoma urządzeniami. UART działa na zasadzie przesyłania danych w formie bitów szeregowych, gdzie każdy bit jest przesyłany jeden po drugim w ustalonym porządku (LSB lub MSB). UART nie wymaga sygnału zegarowego, a synchronizacja nadawcy i odbiorcy jest osiągana przez ustalenie wspólnej prędkości transmisji (baud rate) oraz użycie bitu startu i stopu.

**RS232** to starszy standard komunikacji szeregowej stosowany głównie w urządzeniach przemysłowych i komputerowych. RS232 definiuje zarówno sygnały elektryczne, jak i protokół wymiany danych, gdzie sygnały są przesyłane różnicowo między nadajnikiem a odbiornikiem, protokół ten zapewnia prędkość do 20 Kbps [6].

Moduł **MAX3232** to przetwornik napięć, który konwertuje sygnały UART (TTL) na sygnały RS232, dzięki czemu możliwa jest komunikacja między urządzeniami korzystającymi z różnych poziomów napięć. UART działa na poziomach logicznych 0-5V (lub 0-3.3V), podczas gdy RS232 wymaga napięć ±12V. **MAX3232** jest odpowiedzialny za przekształcenie poziomów logicznych TTL na poziomy wymagane przez RS232, co czyni go idealnym rozwiązaniem w projektach wymagających kompatybilności między tymi standardami [9].

### Układ napięcia sterującego silnikiem

Wybrany mikrokontroler ma wbudowane dwa przetworniki DAC, sumując ich napięcie można uzyskać jeden, dokładniejszy przetwornik. Aby to zrobić potrzeba dwóch wzmacniaczy operacyjnych.

Ważnym jest zaznaczyć, że wzmacniacz będzie zasilany napięciem 5 V i również powinien być w stanie takie napięcie podać na wyjściu, wymaga to, żeby był wykonany w technologii rail-to-rail, pozwalającej uzyskać napięcie wyjściowe wzmacniacza bliskie napięciu zasilania (normalnie można spodziewać się maksymalnego napięcia wyjściowego mniejszego o ponad 1 V od napięcia zasilania) [11].

Nie wymagamy od wzmacniacza generowania dużego prądu na wyjściu, ponieważ przykładowy schemat producenta przedstawiający podłączenia silnika .sugerował sterowanie napięciem rzędu 10k Ω. Tak więc prądy rzędu 10mA wystarczą z nadmiarem.

Wszystkie nasze wymagania spełnia układ **LMC6482,** jest to układ scalony wykonany w technologii CMOS zawierający w sobie dwa wzmacniacze operacyjne. Potrafi on przekazywać napięcia na wyjściu bliskie napięciu zasilania i pracuje w wymaganym napięciu.

Żeby zbudować układ potrzeba również dostarczyć zasilanie -5V, łatwym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie układu **ICL7660.** Układ ten jest w stanie wytworzyć napięcie -5V z napięcia 5V. Należy uważać, aby nie wystawiać go na duże obciążenie, nie jest on przeznaczony dla dużych obciążeń. W projekcie będzie użyty tylko do zasilenia części wzmacniacza, którego wyjście trafia do wejścia wysokiej impedancji drugiego wzmacniacza, tak więc prądy płynące w tym układzie będą minimalne.

### Ekran interfejsu fizycznego

Jako ekran zdecydowano się na gotowy moduł zasilany napięciem 3,3 / 5 V. Obraz w tym module można ustawiać za pomocą komunikacji I2C.

Obraz zawierający elektronika, Urządzenie elektroniczne

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.4 Ekran użyty w projekcie  
Źródło: https://cdn.shopify.com/

Wybrano dwukolorowy ekran OLED, o rozdzielczości 128x64. Ekran o małych rozmiarach 1’3 cala, nie zajmie dużo miejsca, przy czym pozwoli wyświetlić wszystkie potrzebne informacje o parametrach silnika, w czytelny sposób (tylko 3 linijki tekstu). Technologia OLED dodatkowo jest bardzo energooszczędna.

### Programator

Aby zaprogramować na płytce ESP32 mikrokontroler, niezbędny jest układ, który pozwoli przekonwertowanie sygnału USB na UART. Dodatkowo, aby rozpocząć proces programowania należy na chwilę podciągnąć do masy pin EN, co spowoduje reset, a następnie podczas włączania się mikrokontrolera musi przez chwile być podciągnięty do masy pin GPIO0 [10].

Układ **CH340C** jest dwukierunkowym konwerterem USB na UART, a dodatkowo po odpowiednim podłączeniu, jest w stanie sam zresetować do stanu programowania. Użycie go jako programatora bardzo ułatwi prace związane z programowaniem mikrokontrolera.

## Wybór oprogramowania

Do realizacji projektu zdecydowano się na wykorzystanie oprogramowania **KiCad**, które jest jednym z najbardziej popularnych i wszechstronnych narzędzi dostępnych na rynku.

**KiCad** to oprogramowanie typu open-source, które umożliwia projektowanie zarówno prostych, jak i złożonych układów elektronicznych. Program ten jest szeroko stosowany w środowiskach akademickich, jak również w przemyśle, głównie ze względu na swoją elastyczność, szeroki zakres funkcji oraz brak opłat licencyjnych. KiCad oferuje wiele narzędzi do tworzenia schematów ideowych, projektowania PCB, a także wbudowane narzędzia do symulacji oraz generowania plików produkcyjnych, tak zwanych „*Gerber* *files*”.

Ponadto przez swoją popularność istnieje do niego wiele poradników jak i wiele utworzonych wątków na forum pozwalające na wyszukanie natrafionego potencjalnego problemu i jego rozwiązania.

W czasie pracy pisania była wykorzystywana wersja oprogramowania **KiCad 8.0.**

## Tworzenie schematu ideowego

Schematu ideowego używa się do odwzorowania połączeń elektrycznych między komponentami oraz ich funkcji w układzie. Na tym etapie weryfikujemy działanie projektu, zapewniając, że poszczególne elementy będą ze sobą poprawnie współpracować.

Elementy powinny być ułożone w sposób przejrzysty, który odzwierciedla przepływ sygnału i zasilania. Warto również zwrócić uwagę na odpowiednie grupowanie bloków funkcjonalnych – np. sekcji zasilania, komunikacji, sterowania itd. Przemyślany układ schematu ułatwi późniejsze projektowanie PCB [4].

Elementy na schemacie są łączone za pomocą tzw. **netów**, które reprezentują połączenia elektryczne między wyprowadzeniami komponentów. Ważne jest, aby połączenia były jasne i nie mylące. Zastosowanie **etykiet (labels)** może pomóc w identyfikacji poszczególnych sygnałów i zwiększa przejrzystość schematu.

### Sekcja zasilania

Obraz zawierający diagram, linia, tekst, zrzut ekranu

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.5 Schemat ideowy przedstawiajacy układy sterownika odpowiadające za zasilanie

Wszystkie układy podłączono do elementów pasywnych zgodnie z wskazówkami producenta, tak jak na Rys. 3.4. W przypadku tego projektu wymogi spełnia zamieszczany często w notach katalogowych *example application*, co znacznie ułatwia pracę.

Do wszystkich wyjść napięcia, dołączamy „power flag”, używa go tzw. ERC (Electrical Rule Check), który sprawdza czy aby na pewno wszystkie elementy na schemacie są przyłączone do zasilania.

Dodatkowo pod zasilanie 3,3 V zdecydowano się umieścić diodę z podpiętym szeregowo rezystorem. Jej celem będzie sygnalizowanie, że z układem zasilania jest wszystko w porządku.

### Układ komunikacji rs-232

Obraz zawierający tekst, diagram, zrzut ekranu, Plan

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.6 Sposób podłączenia konwertera MAX3232

Obraz zawierający tekst, zrzut ekranu, diagram, linia

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.7 Wyprowadzenia konektora DB9

Układ MAX3232 (Rys. 3.6) podłączamy zgodnie z instrukcjami producenta, następnie część układu z interfejsem RS232 podłączamy do pinów konektora DB9, które odpowiadają za komunikacje.

### Układ wzmacniaczy do analogowego wyjścia napięcia.

Obraz zawierający diagram, linia, Czcionka, Plan

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.8 Sposób podłączenia wzmacniaczy

W czasie wykonywania projektu zdecydowano się wykorzystać obydwa 8 bitowe przetworniki DAC mikrokontrolera poprzez podłączenie ich do sumującego wzmacniacza operacyjnego. Da to efekt równy sterowaniu z rozdzielczością dwa razy większą niż jednego DAC.

Napięcie na wyjściu wzmacniacza sumującego jest ujemne, dlatego aby na wyjściu otrzymać napięcie dodatnie, użyto jeszcze jeden wzmacniacz operacyjny, który będzie działał jako inwerter.

Obliczenia do wartości rezystorów:

Wstępnym założeniem jest wykorzystanie rezystorów rzędu 100k Ω oraz z szeregu dokładności 24

Wzór na napięcie wyjściowe wzmacniacza sumującego, mającego identyczne rezystory na wejściu:

Po przekształceniu:

A by uzyskać interesującą nas proporcje rezystorów, podstawiamy znane nam wartości napięć, oraz zakładamy że rezystory **Rwe** będą miały wartość 100k Ω.

Przybliżając wynik do wartości z szeregu E24:

Tabela 1 Wycinek tabeli „Najpopularniejsze szeregi i należące do nich wartości”  
Źródło: https://www.hifi.pl/slownik/szeregi.php

|  |  |
| --- | --- |
| **E24** | 10-11-12-13-15-16-18-20-22-24-27-30-33-36-39-43-47-51-56-62-68-75-82-91 |

Rezystor odpowiadający za sprzężenie zwrotne będzie miał wartość 75kΩ.

### Odczyt prędkości i sterowanie kierunkiem

Istnieje wątpliwość co do napięcia, jakie silnik może wytwarzać na generatorze impulsów służącym do pomiaru prędkości obrotowej. Dlatego w wypadku, gdyby to były 24V w obawie przed uszkodzeniem mikrokontrolera zaprojektowano dzielnik napięcia taki jak na Rys. 3.9. Gdyby jednak okazało się, że napięcie jest bezpieczne, a dzielnik uniemożliwia odczytanie wartości dla mikrokontrolera (za niskie napięcie), można wylutować rezystor podciągający do masy.

Obraz zawierający tekst, diagram, linia, Czcionka

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.9 Schemat dzielnika napięcia i tranzystora sterującego kierunkiem obrotów

Po prawej stronie Rys. 3.9, widoczny jest układ, który steruje podawaniem napięcia odpowiedzialnego za kierunek obrotów, poprzez mikrokontroler sterujący bramką tranzystora.

### Podłączenie mikrokontrolera

Obraz zawierający tekst, zrzut ekranu, diagram, Czcionka

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.10 Schemat podłaczeń mikrokontrolera

Mikrokontroler podłączamy zgodnie z zaleceniami producenta oraz wykorzystując interesujące nas piny zgodnie z ich przeznaczeniem. Dodatkowo wyprowadzono nawet nie użyte w projekcie piny, do złącz, na wszelki wypadek nieprzewidzianej konieczności skorzystania z nich. Na Rys. 3.10 możemy też zauważyć, że w razie potrzeby umieszczono przycisk podciągający do masy in EN, odpowiadający za reset mikrokontrolera [10].

### Układ programatora

Programator nie jest niezbędną częścią działania sterownika, jednak jest niezbędny do jego stworzenia. Z tego powodu zdecydowano potraktować programator jako oddzielny układ, który będzie można odczepić od reszty sterownika, celem przyszłego użycia w innych projektach.

Obraz zawierający tekst, diagram, zrzut ekranu, Plan

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.11 Schemat ideowy programatora ESP32 przy pomocy USB.

Na Rys 3.4 można zauważyć, że programator został zaprojektowany z myślą samodzielnego działania (własny układ zasilania 3,3 V) oraz z wyprowadzeniami pinów, które pozwolą na programowanie ESP32, które również ma wyprowadzone takie piny (a przynajmniej RX i TX).

Dodatkowo wykorzystano dwa tranzystory MOSFET pozwalające wykorzystać logikę układu do samoczynnego wejścia mikrokontrolera w tryb bycia programowanym.

Ważne do zaznaczenia jest, że interfejs USB wykorzystuje różnicową parę sygnałów, aby KiCad ją jako tako rozpoznał, co będzie pomocne podczas procesu fizycznego projektowania płytki, należy nazwać parę linii sygnału tak samo, przy czym jedną nazwę zakończyć znakiem „+”, a drugą znakiem „-”.

## Projektowanie PCB

Projektowanie płytki drukowanej to etap w tworzeniu urządzeń elektronicznych, który przekształca teoretyczny schemat ideowy w fizyczną warstwę, na której zostaną umieszczone wszystkie elementy elektroniczne.

Projektowanie PCB w programie KiCad rozpoczyna się od doboru odpowiednich **footprintów** dla elementów schematu ideowego. **Footprint** to fizyczny układ wyprowadzeń elementu, który zostanie odwzorowany na płytce drukowanej. Każdy element schematu musi mieć przypisany odpowiedni footprint, który odpowiada jego rzeczywistej obudowie

Obraz zawierający tekst, zrzut ekranu, Czcionka, numer

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.12 Wycinek z ekranu podczas pracy nad doborem footprintów

Po wybraniu footprintów, należy uwzględnić tolerancje zgodne z możliwościami produkcyjnymi dostawcy PCB. W tym projekcie zdecydowano się na dostawce JLCPCB, a jego możliwości i limity tolerancji można znaleźć na jego stronie internetowej. Tolerancje dotyczą szerokości ścieżek, odległości między nimi, a także wymiarów otworów przelotowych (vias) i padów lutowniczych. Wybieramy także ilośc warstw naszej płytki, do naszych zastosowań wystarczy najtańsza opcja – 2 warstwowa.

PCB musi mieć 4 otwory na śruby (rozdział 2.4.3).

Kolejnym krokiem jest **rozmieszczenie elementów** na płytce PCB. Odpowiednie rozmieszczenie komponentów wpływa nie tylko na estetykę projektu, ale przede wszystkim na jego funkcjonalność i wydajność. Ważne punkty do zapamiętania podczas projektowania PCB:

* **Grupowanie elementów funkcjonalnie powiązanych** - elementy odpowiedzialne za zasilanie powinny być umieszczone blisko siebie, a kluczowe elementy sygnałowe możliwie jak najbliżej mikrokontrolera,
* **Optymalizacja miejsca** - elementy należy umieszczać tak, aby zajmowały jak najmniej miejsca, jednocześnie zapewniając dostęp do padów lutowniczych oraz wygodę montażu. Warto również uwzględnić możliwe zakłócenia elektromagnetyczne (EMI) i oddzielić ścieżki sygnałowe od zasilających.
* **Kondensatory odsprzęgające –** powinny być umiejscowione możliwie blisko wejść/wyjść pinów zasilających układy.

Po umiejscowieniu elementów na płytce, należy przystąpić do **prowadzenia połączeń** (routing) między nimi. Prowadzenie ścieżek to proces, w którym określa się przebieg sygnałów na płytce, łącząc wyprowadzenia poszczególnych elementów zgodnie z następującymi punktami:

* **Właściwa grubość ścieżek –** ścieżki, które wykonują połączenia zasilające, mogą mieć większy przekrój, aby uniknąć przepaleń się ścieżki.
* **Optymalizacja ścieżek -** ścieżki należy prowadzić jak najkrócej, minimalizując rezystancję oraz zakłócenia.
* **Reguły projektowe**: Ważne jest, aby ścieżki sygnałowe nie przecinały się i aby przestrzegać reguł projektowych (DRC – Design Rule Check) dotyczących odległości między ścieżkami, szerokości ścieżek i otworów.

Obraz zawierający obwód, zrzut ekranu, tekst, Inżynieria elektroniczna

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.13 Zaprojektowany PCB

Spełniając wszystkie postawione wymagania powstał widoczny na 3.13 projekt.

Obraz zawierający elektronika, Inżynieria elektroniczna, Komponent elektroniczny, obwód

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.14 Wizualizacja 3D wykonanego PCB

Program KiCad pozwala podejrzeć wizualizację 3D naszego projektu, tak jak na Rys. 3.14.

## Fizyczne wykonanie PCB

Po zakończeniu projektowania PCB w KiCad, należy wygenerować pliki produkcyjne **gerber files**, które są standardowym formatem akceptowanym przez producentów PCB. Pliki te zawierają wszystkie informacje potrzebne do wyprodukowania płytki, w tym warstwy miedzi, maski lutowniczej i opisów elementów. Tak wykonane pliki wysyłamy do producenta, który sprawdza poprawność plików swoim oprogramowaniem, następnie przyjmuje nasze zamówienie.

Obraz zawierający obwód, Inżynieria elektroniczna, Komponent elektroniczny, elektronika

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.15 Wygląd PCB po wypakowaniu z przesyłki.

Płytka wygląda bardzo dobrze, mimo to dobrą praktyką jest wykonać manualną inspekcje, czy wszystkie ścieżki są poprawnie wytrawione (nie widać przeskoku miedzi między nimi).

Jeżeli wszystko z nią w porządku, można zacząć wykonywać montaż elementów przy pomocy lutownicy. Elementy powinno się lutować od najmniejszego do największego. Należy zadbać o to, aby lut tworzył błyszczące i równomierne połączenie bez nadmiernej ilości cyny (tzw. zimne luty). Po wykonaniu montażu można sprawdzić wyrywkowo miernikiem poprawność lutów.

Obraz zawierający elektronika, Inżynieria elektroniczna, obwód, Element obwodu

Opis wygenerowany automatycznie

Rys. 3.16 PCB z zamontowanymi elementami \*wstawię lepsze zdjęcie jak skończę debugging\*

Płytka z zamontowanymi elementami i podłączona do zasilania, zgodnie z założeniami zapala ledy, jak widać to na Rys. 3.16.

\*TBD\*

# Tworzenie Software’u

# Testowanie

Obraz zawierający zrzut ekranu, tekst, oprogramowanie, Oprogramowanie multimedialne

Opis wygenerowany automatycznie

**BIBLIOGRAFIA**

1. Budziłowicz A., „Zastosowanie Silników BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor) we współczesnych napędach elektrycznych i w motoryzacji”, Instytut Naukowo-Wydawniczy "SPATIUM", Słupsk, 2015
2. Mclennan, specyfikacja techniczna: *bldc58-50l-50-watt-datasheet*, dostępna na stronie: <https://www.mclennan.co.uk/product/bldc58-50l-50-watt>
3. Lesker, opis złącza DB15 ze strony <https://www.lesker.com/newweb/process_instruments/pdf/kjlc-datasheet-alicat-15-pin.pdf>
4. Zieliński Cezary, „Podstawy projektowania układów cyfrowych”, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2003.
5. Wrotek Witold, "Elektronika bez oporu. Praktyczne układy elektroniczne," Wydawnictwo Helion, 2022.
6. Artykuł Advantech, “*What is RS-232? Fundamentals of the Protocol”,* [*https://www.advantech.com/en-us/resources/white-papers/506c05a1-f599-4615-ac54-8259385d61e8*](https://www.advantech.com/en-us/resources/white-papers/506c05a1-f599-4615-ac54-8259385d61e8)*, 10/22/2018*
7. Nota katalogowa LM2596S-5 firmyTexas Instruments, <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm2596.pdf>
8. Nota katalogowa AMS1117-3.3 firmy Advanced Monolithic Systems, <http://www.advanced-monolithic.com/pdf/ds1117.pdf>
9. Nota katalogowa MAX3232 firmy Maxim Integrated, <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
10. Nota katalogowa ESP32-WROOM-32E firmy Espressif, <https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-wroom-32e_esp32-wroom-32ue_datasheet_en.pdf>
11. Artykuł ze strony Toshiba, „What does rail-to-rail mean (Rail-to-Rail Op amp) ?”, <https://toshiba.semicon-storage.com/us/semiconductor/knowledge/faq/linear_opamp/what-does-rail-to-rail-mean.html>