



**AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE**  
**WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI**  
**INSTYTUT ELEKTRONIKI**

**PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA**

*Dydaktyczna platforma pojazdu autonomicznego typu „Line Follower”  
oparta o płytę rozwojową NUCLEO-STM32G491RE*

*Didactic platform of the Line Follower type of autonomous vehicle base on evaluation board  
NUCLEO-STM32G491RE*

Autor: *Jakub Stelmach*  
Kierunek studiów: Elektronika i Telekomunikacja  
Opiekun pracy: *dr. hab. inż. Cezary Worek, prof. AGH*

Kraków, 2025



# Spis treści

SPIS STOSOWANYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW .....	1
STRESZCZENIE PRACY .....	3
WSTĘP .....	4
CEL PRACY .....	5
DYDAKTYCZNE PLATFORMY TYPU LINE-FOLLOWER – STAN TECHNIKI .....	6
ROZDZIAŁ 1 Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera.....	8
1.1 Szczegółowe założenia części sprzętowej platformy Line-Follower .....	8
1.2 Schemat blokowy projektowanego Line-Followera.....	9
1.3 Opis zaprojektowanych modułów składowych projektowanego Line-Followera .....	10
1.3.1 Opis modułu <i>LF-Mainboard</i> .....	11
1.3.2 Opis modułu <i>LF-Reflectance-Sensor</i> .....	21
1.3.3 Zasada działania czujnika wykrywającego odchylenie linii od środka układu .....	25
1.3.4 Opis modułu LF-Battery-Connector oraz podstawy POLOLU ZUMO .....	26
ROZDZIAŁ 2 Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera.....	27
2.1 Założenia wstępne oprogramowania kontrolno-sterującego Line-Followera .....	27
2.2 Opracowane algorytmy kontrolno-sterujące .....	28
2.2.1 Architektura komunikacji pomiędzy modułami Line-Followera.....	28
2.2.2 Schemat blokowy algorytmu zarządzającego modułem LF-Mainboard .....	31
2.2.3 Schemat blokowy algorytmu zarządzającego modułem LF-Reflectance-Sensor.....	33
2.2.4 Schemat blokowy algorytmu sterującego Line-Followerem bazujący na NUCLEO-STM32G491RE .....	35
ROZDZIAŁ 3 Montaż oraz testy prototypu Line-Followera.....	36
3.1 Montaż podstawy POLOLU ZUMO .....	37
3.2 Montaż i uruchamianie modułów LF-Mainboard oraz LF-Reflectance-Sensor .....	38
3.2.1 Porównanie z prekursorem – LF-Zumo v2.0 .....	39
3.2.2 Diagnostyka problemów w trakcie uruchamiania LF-Mainboard .....	40
3.2.3 Diagnostyka problemów w trakcie uruchamiania LF-Reflectance-Sensor .....	43

<b>3.3 Pomiary oraz symulacja sekcji zasilania LF-Mainboard.....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.1 Omówienie modelu symulacyjnego sekcji zasilania .....</b>	<b>44</b>
<b>3.3.2 Omówienie stanowiska pomiarowego sekcji zasilania.....</b>	<b>45</b>
<b>3.3.3 Wyniki oraz podsumowanie pomiarów.....</b>	<b>48</b>
<b>PODSUMOWANIE I WNIOSKI.....</b>	<b>51</b>
<b>SPIS ILUSTRACJI ORAZ TABEL .....</b>	<b>53</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>55</b>
<b>ZAŁĄCZNIK A Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera .....</b>	<b>58</b>
<b>ZAŁĄCZNIK B Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool G491RE .....</b>	<b>69</b>
<b>ZAŁĄCZNIK C Tabele z danymi symulacyjnymi oraz pomiarowymi sekcji zasilania.....</b>	<b>73</b>

## **SPIS STOSOWANYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW**

LF (ang. Line Follower) – platforma jezdna stworzona w celu podążania za wyznaczoną trasą w postaci linii

PCB (ang. Printed Circuit Board) – płyta pokryta przewodzącymi ścieżkami służąca do montażu na niej elementów

USB (ang. Universal Serial Bus) – szeroko stosowana w technice komputerowej magistrala danych

LDO (ang. Low Dropout Regulator) – układ liniowy umożliwiający obniżanie napięcia do zadanego poziomu

LED (ang. Light Emitting Diode) – rodzaj diody półprzewodnikowej emitującej światło widzialne

UART (ang. Universal Asynchronous Receiver Transmitter) – rodzaj asynchronicznego interfejsu komunikacyjnego często stosowanego do komunikacji pomiędzy systemami wbudowanymi

MEMS (ang. MicroElectroMechanical System) – urządzenia elektroniczne zawierające mikromechanikę

I<sup>2</sup>C (ang. Inter-Integrated Circuit) – rodzaj synchronicznego interfejsu komunikacyjnego służący do komunikacji master–slave pomiędzy mikrokontrolerem a czujnikami

TOF (ang. Time Of Flight) – rodzaj czujnika mierzącego odległość za pomocą liczenia czasu potrzebnego na powrót fali odbitej od przeszkody.

PD (ang. Power-Delivery) – technologia pozwalająca na zwiększenie mocy ładowania urządzenia poprzez zwiększenie napięcia.

SPI (ang. Serial Peripheral Interface) – interfejs komunikacyjny stosowany w systemach wbudowanych

CS (ang. Chip Select) - sygnał wykorzystywany w komunikacji SPI w celu wyboru urządzenia, z którym nawiązywana jest komunikacja

GPIO (ang. General Purpose Input Output) - porty wejścia, wyjścia ogólnego przeznaczenia

I/O (ang. Input / Output) – porty wejścia / wyjścia

## **SPIS STOSOWANYCH SYMBOLI I SKRÓTÓW**

IMU (ang. Internal Measurement Unit) – czujniki dostarczające dane nawigacyjne

THT (ang. Through-Hole Technology) – technologia montażu przewlekanego elementów elektronicznych

SMD (ang. Surface Mount Devices) – technologia montażu powierzchniowego podzespołów elektronicznych

WiFi (ang. Wireless Fidelity) – technologia łączności bezprzewodowej

## STRESZCZENIE PRACY

Praca dotyczy zaprojektowania, wykonania i przetestowania dydaktycznej platformy mobilnej typu Line-Follower, bazującej na płytce rozwojowej NUCLEO-STM32G491RE. Projekt ma na celu stworzenie uniwersalnego narzędzia edukacyjnego do nauki projektowania układów elektronicznych, programowania oraz analizy danych z czujników.

### Rozdział 1: Opis części sprzętowej

Rozdział opisuje komponenty urządzenia, w tym płytę główną (LF-Mainboard), moduł czujników odbiciowych (LF-Reflectance-Sensor), oraz podstawę POLOLU ZUMO. Omówiono funkcjonalność modułów, takich jak układy zasilania, mikrokontrolery, czujniki środowiskowe i natężenia światła, a także diody RGB. Przedstawiono założenia projektowe i schemat blokowy systemu.

### Rozdział 2: Opis części kontrolno-sterującej

W tej części omówiono architekturę oprogramowania kontrolno-sterującego poszczególnych modułów oraz komunikację między nimi za pomocą interfejsu UART. Przedstawiono schematy blokowe zaprojektowanych algorytmów zarządzających modułami LF-Mainboard i LF-Reflectance-Sensor oraz algorytm sterujący całym Line-Followerem. Algorytmy te umożliwiają pracę autonomiczną.

### Rozdział 3: Montaż i testy prototypu.

Opisano proces montażu i uruchamiania prototypu, w tym diagnostykę problemów konstrukcyjnych oraz weryfikację poprawności działania. Zwrócono uwagę na porównanie z wcześniejszym modelem LF-Zumo v2.0, wskazując na uproszczenia konstrukcji i rozszerzenie funkcjonalności w nowej wersji.

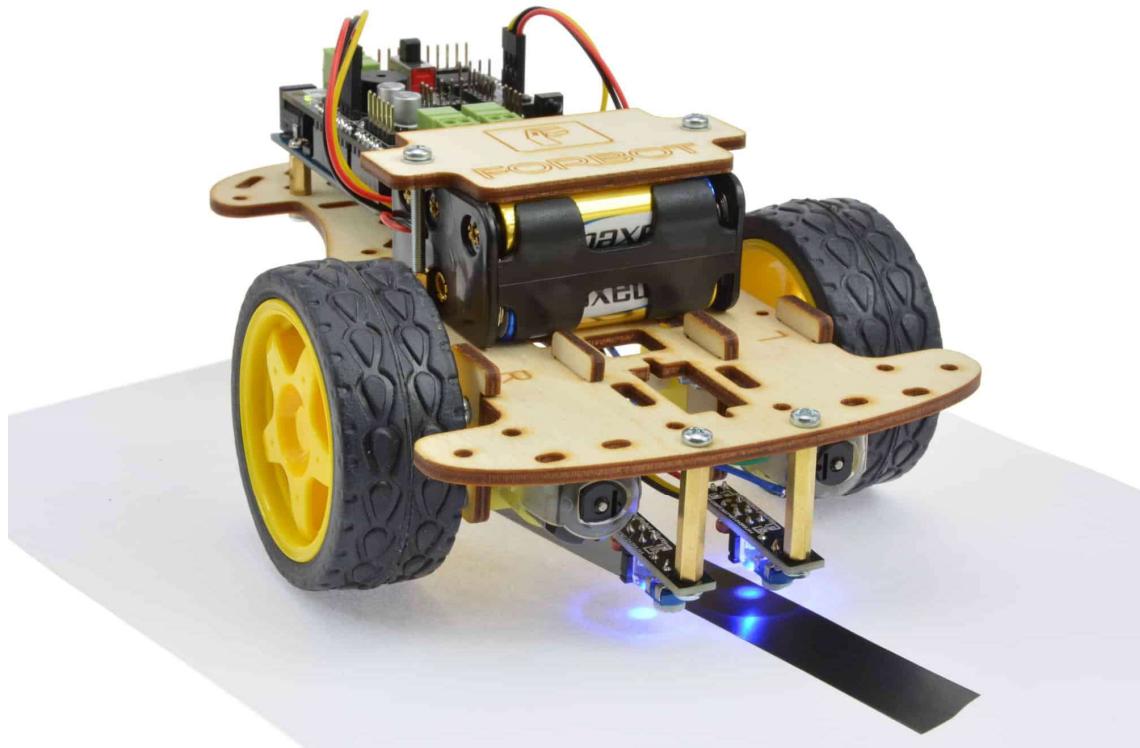
### Podsumowanie i wnioski

Stworzono funkcjonalną platformę Line-Follower oraz udało się zrealizować część z zaprojektowanych algorytmów sterujących. Zastosowanie modułów microBUS w przyszłości zwiększy możliwości rozbudowy, a otwarta dokumentacja czyni projekt użytecznym dla przyszłych studentów i inżynierów. W przyszłości planowane jest opublikowanie projektu jako „open hardware” i „open software” na stronie Instytutu Elektroniki AGH.

## WSTĘP

Line follower, czyli robot podążający za linią, jest jednym z najpopularniejszych i najczęściej spotykanych typów robotów mobilnych. Jego głównym zadaniem jest poruszanie się wzdłuż wyznaczonej trasy, zazwyczaj oznaczonej kontrastującą linią na powierzchni, przy użyciu czujników umożliwiających wykrywanie tej linii. Na rynku jest wiele firm zajmujących się dystrybucją rozwiązań wykorzystywanych przy budowaniu tego typu robotów, a wśród nich są POLOLU, SPARKFUN, FORBOT czy KAMAMI.

Platformy tego typu znajdują zastosowanie w dziedzinach takich jak edukacja (tworzenie oraz projektowanie układów elektronicznych, programowanie) oraz hobbistycznych zawodach, w których konkurencje polegają na przetestowaniu oraz zaprezentowaniu możliwości danych platform [1]. Ich prosta konstrukcja, szeroki wachlarz opcji rozbudowy oraz dostarczenie w jednym miejscu możliwości nauki projektowania układów elektronicznych i programowania sprawiają, że są doskonałym polem doświadczalnym zarówno dla początkujących, jak i zaawansowanych inżynierów robotyki oraz pożądanym rozwiązaniem z dydaktycznego punktu widzenia.



Rys. 1 Robot typu line-follower budowany w ramach kursu budowy robotów na platformie FORBOT [2]

## CEL PRACY

Celem pracy dyplomowej było zaprojektowanie, wykonanie oraz uruchomienie platformy jezdnej typu line-follower, zwanej dalej Line-Followerem, która w przyszłości może stanowić bazę dla innych projektów oraz zostać wykorzystana jako platforma dydaktyczna w Instytucie Elektroniki AGH. Opracowana konstrukcja opiera się na platformie ZUMO firmy POLOLU zachowując pełną kompatybilność z jej rozwiązaniami mechanicznymi [3]. Dzięki zastosowaniu szerokiego zestawu czujników, mikrokontrolerów oraz modułów mechanicznych, możliwe będzie wykorzystanie jej w ramach różnych programów dydaktycznych, takich jak projektowanie układów elektronicznych, programowanie mikrokontrolerów czy analiza danych z czujników.

Projekt charakteryzuje się uproszczoną konstrukcją, co ułatwia początkującym adeptom elektroniki analizowanie schematów i płytki PCB, zaprojektowanych oraz wykonanych w ramach niniejszej pracy dyplomowej. Platforma została wyposażona w moduł będący płytą rozwojową NUCLEO-64 zawierającą mikrokontroler z serii STM32G491RE [4] zwany dalej NUCLEO-STM32G491RE, co zapewnia kompatybilność z płytą Sensor Link Utility Tool G491RE, wyposażoną w cztery gniazda microBUS [5] zaprojektowaną pierwotnie przez mgra inż. A. Klasia oraz zmodyfikowaną na potrzeby używanego modułu NUCLEO-64 (schematy w **załączniku B** na końcu pracy). Takie rozwiązanie zwiększa uniwersalność urządzenia i jego późniejsze potencjalne zastosowania.

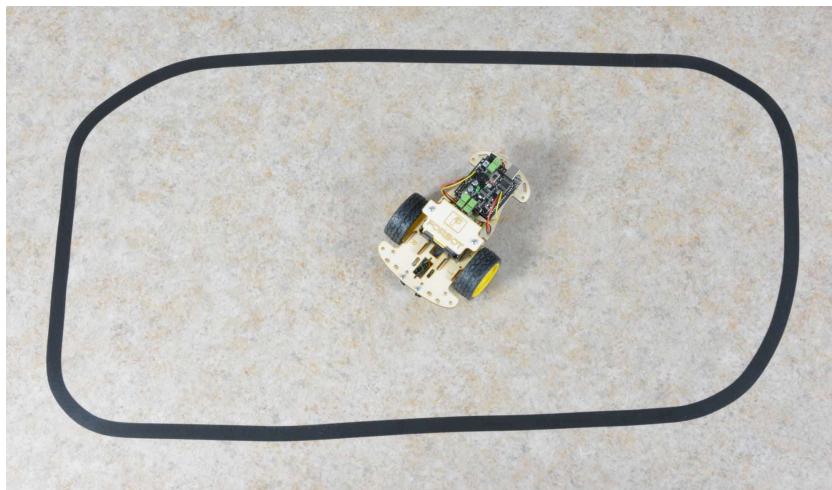
Do budowy systemu wykorzystane zostały dobrze udokumentowane i łatwo dostępne podzespoły, co nie tylko ułatwia dalszy rozwój projektu, ale także pozwala na zastosowanie ich w ramach innych zadań inżynierskich. Oprogramowanie zostało napisane w różnych środowiskach programistycznych takich jak VSCode [6] oraz STM32CubeIDE [7], aby umożliwić przyszłym użytkownikom zapoznanie się z szerokim zakresem narzędzi i metod programowania. Komunikacja z urządzeniem może odbywać się za pośrednictwem interfejsów Bluetooth [8] lub USB [9].

Platforma ta, dzięki swojej uniwersalności oraz kompatybilności z powszechnie wykorzystywany standardami, może posłużyć jako solidna baza dydaktyczna oraz punkt wyjścia dla wielu przyszłych projektów realizowanych zarówno w celach edukacyjnych, jak i badawczych. W przyszłości planowane jest umieszczenie projektu na stronie Instytutu Elektroniki AGH jako projekt „open software” i „open hardware”.

## DYDAKTYCZNE PLATFORMY TYPU LINE-FOLLOWER – STAN TECHNIKI

Platformy tego rodzaju pojawiły się już w latach 70, gdy na Uniwersytecie Stanford opracowano jeden z pierwszych robotów typu line-follower, wykorzystujących kamerę do śledzenia białej linii. W tamtym okresie zaczęto je stosować w początkowych etapach rozwoju robotyki mobilnej. Z biegiem czasu znalazły zastosowanie głównie w rozrywce, ze względu na ograniczoną użyteczność w zaawansowanych badaniach. Nazwa nawiązuje do podstawowego zadania, jakie wykonują, czyli „śledzenia linii” [1] [10]

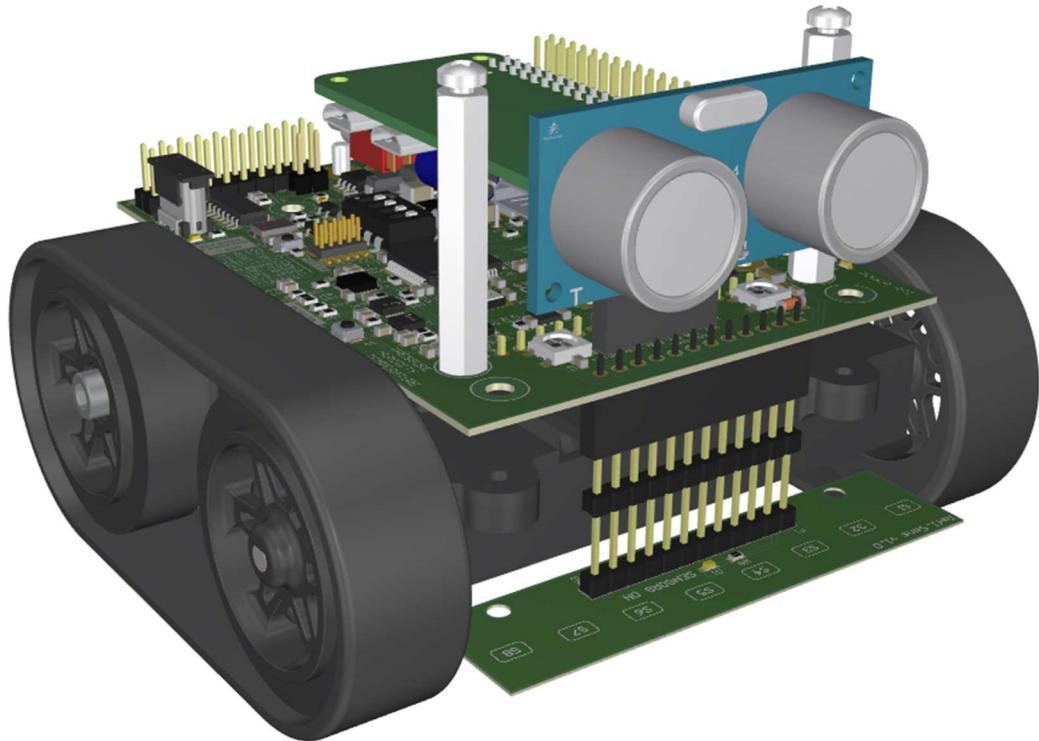
Obecnie roboty te są najczęściej wykorzystywane w zawodach polegających na jak najszybszym pokonywaniu labiryntów lub tras wyznaczonych na podłodze za pomocą czarnej taśmy (Rys. 2). Stanowią przede wszystkim narzędzia rozrywkowe, szczególnie popularne w środowiskach akademickich i szkolnych. Jednym z głównych producentów modułów do platform jest POLOLU.



Rys. 2 przykładowy line-follower [2] oraz czarna linia wykonana z taśmy izolacyjnej wytyczającej tor jazdy

Wiele dostępnych robotów typu line-follower jest konstruowanych metodami amatorskimi. Często wykorzystuje się moduły, które nie są do siebie idealnie dopasowane, co wymaga kreatywnego podejścia, aby mogły ze sobą współpracować. Dokumentacje są napisane ogólnikowo przez co liczne problemy pojawiające się podczas budowy takich robotów nie mają jasnych i opracowanych rozwiązań, co powoduje, że proces nauki bywa przerywany przez konieczność naprawiania nie do końca zrozumiałych usterek. Tego typu problemy zabierają początkującym wiele czasu, odciągając uwagę od zrozumienia kluczowego zagadnienia, jakim jest np. poznanie działania magistrali I<sup>2</sup>C.

W ramach poprzedniego wcielenia projektu została stworzona platforma na bazie POLOLU ZUMO, LF-Zumo v1, zaprojektowana przez mgra inż. P. Bujaka w ramach projektu inżynierskiego [11], a następnie rozwijana przez mgra inż. W. Łukasika [12] (LF-Zumo V2.0 widoczna na Rys. 3). Urządzenie wyposażone jest w mikrokontroler STM32F103, moduł ESP32, moduł Raspberry Pi Zero W oraz wiele czujników w tym temperatury, wilgotności i ciśnienia.



Rys. 3 Wizualizacja 3D prekursora zaprojektowanego Line-Followera, LF-Zumo v2.0

Niniejsza praca ma na celu stworzenie nowej wersji tej platformy edukacyjnej od podstaw, uwzględniając wszystkie wnioski oraz wiedzę wynikającą z tej wcześniejszych iteracji. Nowa wersja, mimo uproszczeń, dalej ma spełniać wszystkie wymagania jakie zostały przed nią postawione, takie jak możliwość zastosowania różnych rodzajów czujników i baza, czyli POLOLU ZUMO. Modyfikacji uległy jednostki zarządzające - mikrokontrolery, oraz zrezygnowano z wbudowanego modułu WiFi na rzecz rozszerzenia platformy o możliwość dołączenia dodatkowych czujników zgodnych ze standardem microBUS.

## **ROZDZIAŁ 1**

### **Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera**

W tym rozdziale omówione zostaną komponenty składowe urządzenia. Przedstawiony zostanie opis poszczególnych układów, ich zastosowanie w projekcie oraz możliwości, jakie oferują w kontekście wymaganych pomiarów.

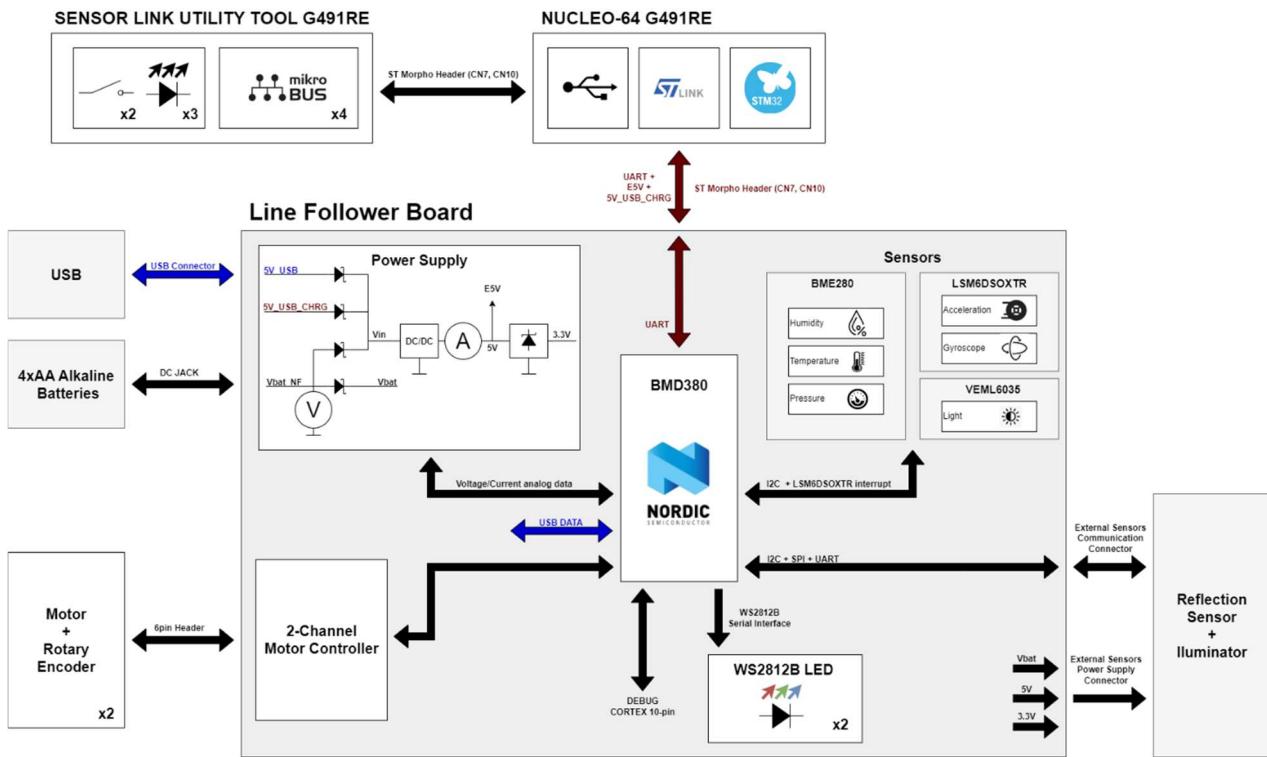
#### **1.1 Szczegółowe założenia części sprzętowej platformy Line-Follower**

1. Złożenie całego urządzenia powinno być zoptymalizowane pod kątem kosztów, a dokumentacja ma być prosta, łatwo dostępna i czytelna.
2. Dwustopniowe zasilanie przy pomocy przetwornicy (+5 V) oraz LDO (+3,3 V)
3. Płyta główna powinna posiadać wbudowany mikrokontroler nRF 52840 zawarty w module BMD-380 [13] wraz z możliwością obsługi komunikacji BLUETOOTH [8] oraz gniazdo dla NUCLEO-STM32G491RE [4] jako głównego procesora odpowiadającego za algorytmy poruszania (przynajmniej 512kB flash).
4. Trzy źródła zasilania – baterie alkaliczne LR6 4xAA umieszczone w zewnętrznym koszyku wbudowanym w podstawę jezdnią podłączone za pomocą złącza DC-JACK, złącze USB znajdujące się na płycie głównej oraz złącze USB znajdujące się na NUCLEO-STM32G491RE.
5. Na płycie głównej znajdować ma się czujnik temperatury, wilgotności, ciśnienia, akcelerometr, żyroskop oraz czujnik światła.
6. Urządzenie ma umożliwiać podłączenie 4 układów w standardzie microBUS – realizowane za pomocą dodatkowego PCB - SENSOR LINK UTILITY TOOL G491RE zaprojektowanego oraz zrealizowanego przez mgra inż. A. Klasia, z wprowadzonymi zmianami pod kątem wyprowadzeń dla wymaganego mikrokontrolera
7. Sterownik silników oraz dwa enkodery w celu pomiaru prędkości.
8. Czujnik linii oraz odległości realizowany za pomocą dodatkowego PCB zawierający przynajmniej 8 czujników odbiciowych.
9. Dwie programowalne diody LED RGB WS2812B [14].

# ROZDZIAŁ 1

## Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

### 1.2 Schemat blokowy projektowanego Line-Followera



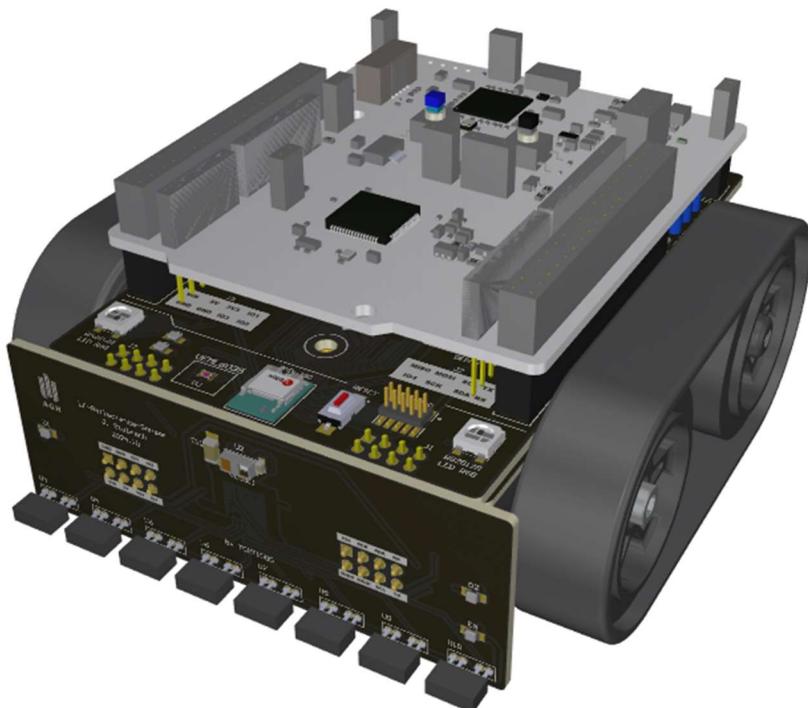
Rys. 4 Schemat blokowy Line-Followera

Na Rys. 4, zaprezentowano układ płyty głównej, schemat połączeń oraz opcje zastosowania zewnętrznych modułów. Znajdują się na nim między innymi czujniki prędkości obrotowej, mikrokontroler NUCLEO-STM32G491RE, dodatkowa płytka z czujnikami microBUS, moduł z czujnikami linii i odległości, a także opcje zasilania – zarówno z portu USB, jak i zestawu baterii AA. W projekcie zastosowano gotowy moduł BMD-380 oparty na mikrokontrolerze nRF52840 firmy Nordic Semiconductor [15] z wbudowanym układem obsługującym Bluetooth, co uprościło projektowanie PCB dzięki zintegrowanemu torowi antenowemu.

Zastosowanie dodatkowej, zewnętrznej płyty z czujnikami wynika z chęci stworzenia platformy modułowej, która będzie mogła być w przyszłości w łatwy sposób modyfikowana. Również dzięki temu rozwiązaniu możliwe było zaprojektowanie sensora odbiciowego, który znajduje się bardzo blisko podłożu – zwiększa to dynamikę odczytów, oraz pozwala na łatwy montaż czujnika odległości który mierzy odległość w osi prostopadłej do powierzchni płyty.

**ROZDZIAŁ 1**  
**Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera**

### 1.3 Opis zaprojektowanych modułów składowych projektowanego Line-Followera



Rys. 5 Wizualizacja pełnego modelu 3D, w pełni zmontowanego Line-Followera

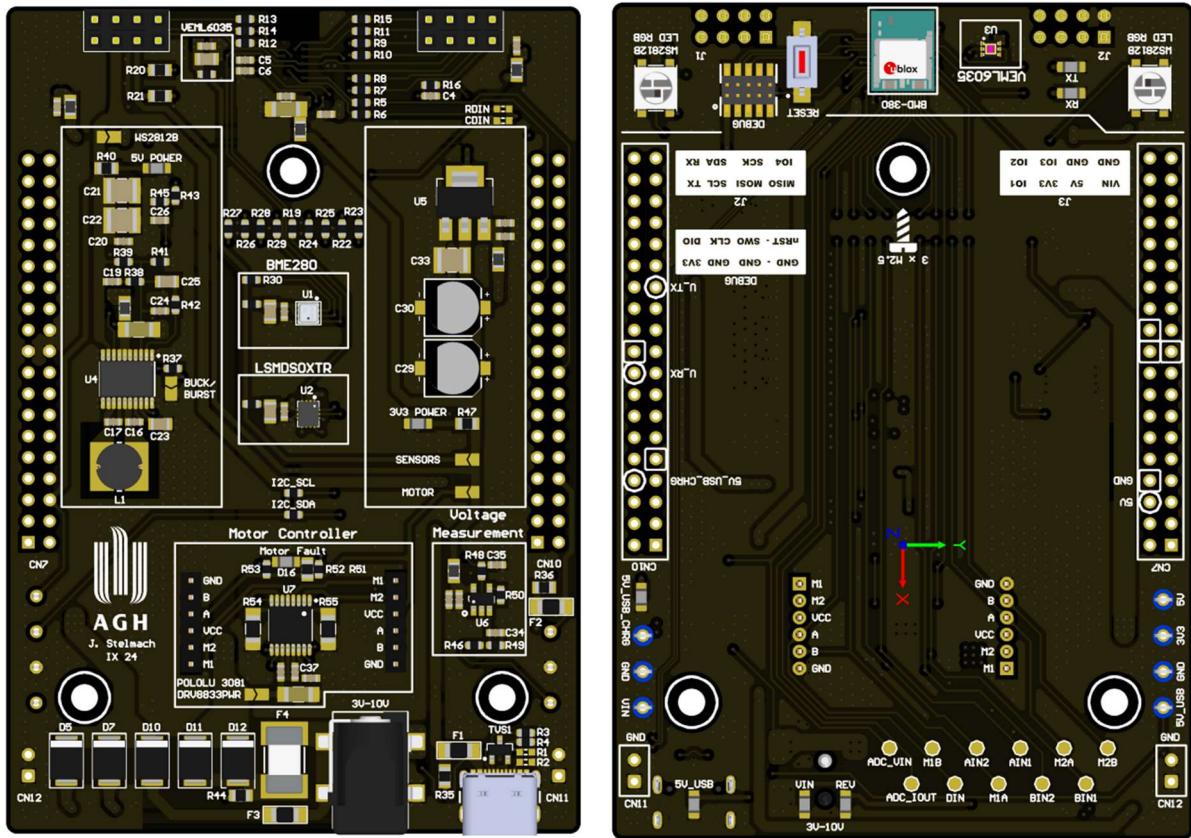
Na część sprzętową przedstawioną na Rys. 5 składają się:

1. Płyta główna *LF-Mainboard*.
2. Płyta z czujnikami *LF-Reflectance-Sensor*.
3. Płyta służąca do zamontowania terminali baterii *LF-Battery-Connector*.
4. Podstawa LF-Zumo firmy POLOLU, oznaczenie 1418.
5. Dwa silniki POLOLU, oznaczenie 2212.
6. Dwa czujniki prędkości silników POLOLU, oznaczenie 3081.
7. Dwa mosiężne dystanse M2.5 6mm.
8. Jeden dystans M2.5 5mm.
9. Trzy śruby M2.5 z łbem stożkowym o długości 3mm.
10. Trzy nakrętki DIN493 niskoprofilowe [16].
11. Złącze kątowe DC JACK 5,5mm x 2,5mm + 15cm przewód 2x1mm<sup>2</sup>.
12. Moduł NUCLEO-STM32G491RE.

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### 1.3.1 Opis modułu *LF-Mainboard*



Rys. 6 Wizualizacja 3D płyty głównej Line-Followera *LF-Mainboard*

Na płycie głównej Line-Followera przedstawionej na Rys. 6 znajdują się kluczowe podzespoły umożliwiające jazdę w trybie nieautonomicznym. Obejmuje ona sekcję zasilania z sumatorem źródeł zasilania (USB, DC-JACK, 5V\_USB\_CHRG z NUCLEO-STM32G491RE), przetwornicę BUCK-BOOST dostarczającą napięcie +5 V, regulator LDO dostarczający +3,3 V dla układów peryferyjnych, procesor wykonawczy z modułem Bluetooth BMD-380 do obsługi układów peryferyjnych oraz listwy kołkowe CN7 oraz CN10 do podłączenia modułu NUCLEO-STM32G491RE. Dodatkowo, płyta zawiera czujniki, wtórnik do pomiaru napięcia wejściowego i sterownik silników, kluczowy dla ruchu pojazdu.

Konstrukcja została zaprojektowana tak, aby wyeliminować konieczność użycia przewodów, dzięki czemu połączenia realizowane są bezpośrednio z użyciem listew kołkowych. Taka konfiguracja zapewnia odpowiednią sztywność i odporność na uszkodzenia, jednocześnie minimalizując problemy ze stykiem i usprawniając wdrożenie oraz utrzymanie pojazdu.

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

Pełny schemat znajduje się na końcu pracy w **załączniku A**, natomiast poniżej znajdują się omówione poszczególne bloki płyty głównej wraz z wizualizacjami 3D oraz wybranymi fragmentami schematów.

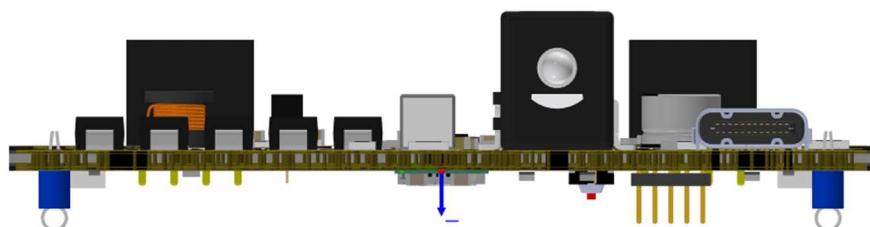
#### **Złącza zasilania**

Wśród złącz zasilających znajdują się:

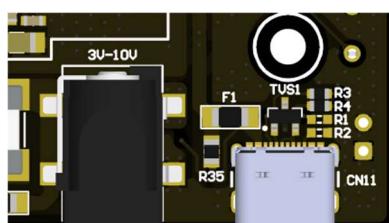
- **Złącze USB typu C** w standardzie 2.0.
- **Złącze DC-JACK**, przeznaczone głównie do podłączenia zestawu 4 baterii typu LR6, których sumaryczne napięcie pracy zawiera się w zakresie od 3 V do 6 V.

W związku z edukacyjnym charakterem projektu, na złącze DC-JACK można podać napięcie w zakresie od 3 V do 10 V z innych źródeł niż baterie, pod warunkiem zapewnienia co najmniej 2 A wydajności prądowej. To właśnie to złącze umożliwia zasilanie silników, których prąd pracy przekracza limity standardu USB 2.0. Jest powszechnie dostępne i szeroko stosowane w projektach. Dodatkowo do zasilania można wykorzystać złącze USB znajdujące się na NUCLEO-STM32G491RE, z którego może być zasilana logika Line-Followera. Ze względu na zaplanowane uproszczenia konstrukcji nie została użyta technologia typu Power-Delivery, która wprowadziłaby dodatkowe układy scalone i z tego samego powodu wykorzystane zostały baterie alkaliczne zamiast układu ładowającego wraz z bateriami Li-Ion.

Po prawej stronie wizualizacji widocznej poniżej (Rys. 7) znajduje się złącze USB C oraz DC-JACK. Na Rys. 8 przedstawiony jest widok złącz zasilających z góry.



Rys. 7 Wizualizacja 3D złącz zasilania Line-Followera od strony tylnej

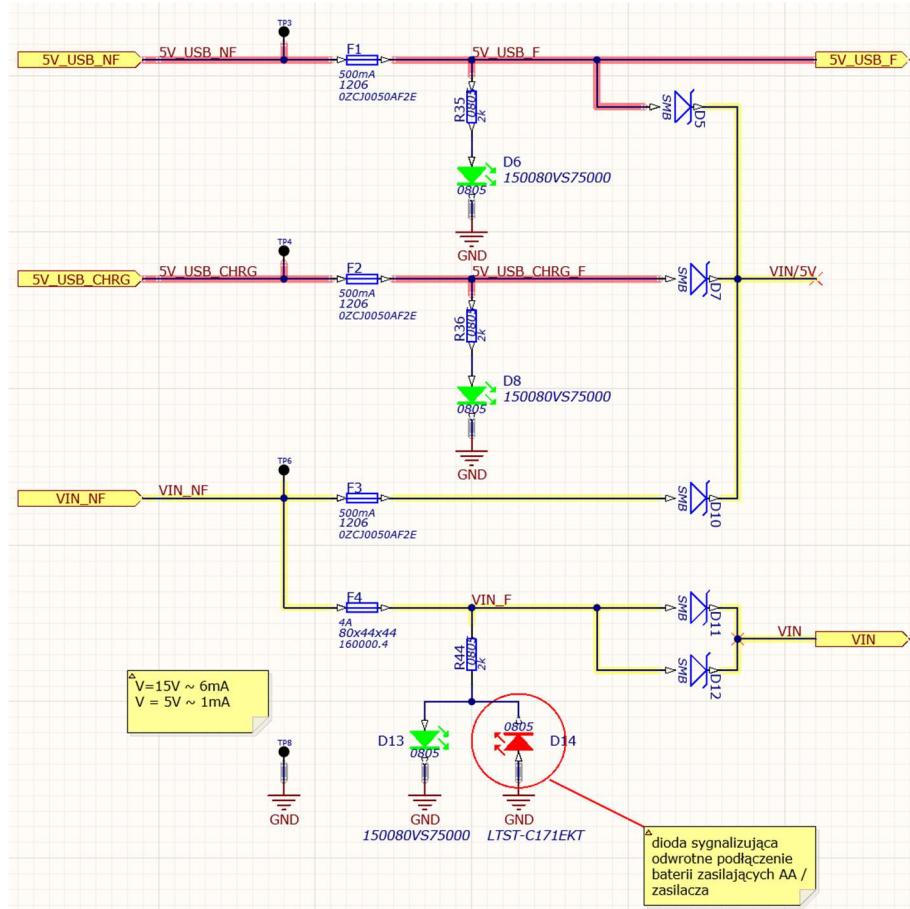


Rys. 8 Wizualizacja 3D złącz zasilania Line-Followera z góry

# ROZDZIAŁ 1

## Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

### Układ zabezpieczeń



Rys. 9 Schemat układu zabezpieczenia przed odwrotną polaryzacją oraz multipleksera źródeł zasilania

W ramach układu sumatora źródeł zasilania widocznego na Rys. 9, użyto popularnych oraz przystępnych cenowo diod SS24. Są to diody Schotki'ego o niskim napięciu przewodzenia, co wpływa na zmniejszenie strat mocy w tej sekcji ukłdu. Dodatkowym atutem tego obwodu jest spełnianie roli układu zabezpieczającego przed odwrotną polaryzacją, a w związku z tym moduł jest odporny na błąd w postaci np. odwrotnego włożenia baterii w koszyk, którego wystąpienie jest sygnalizowane poprzez zaświecanie się czerwonej diody D14.

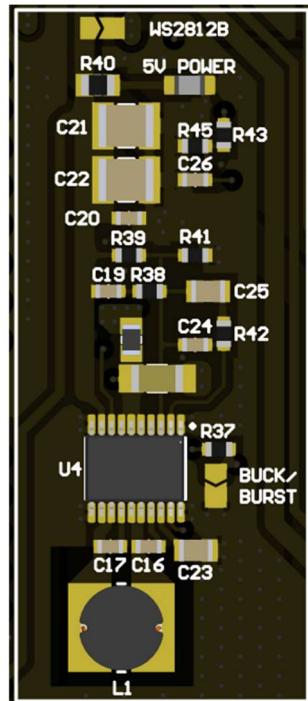
Węzeł VIN jest źródłem zasilania silników DC (zasilanie tylko ze złącza DC-JACK). Przy pełnym obciążeniu jedna dioda pracowałaby na granicy swojej wytrzymałości prądowej, dlatego zdecydowano się na użycie dwóch.

## ROZDZIAŁ 1

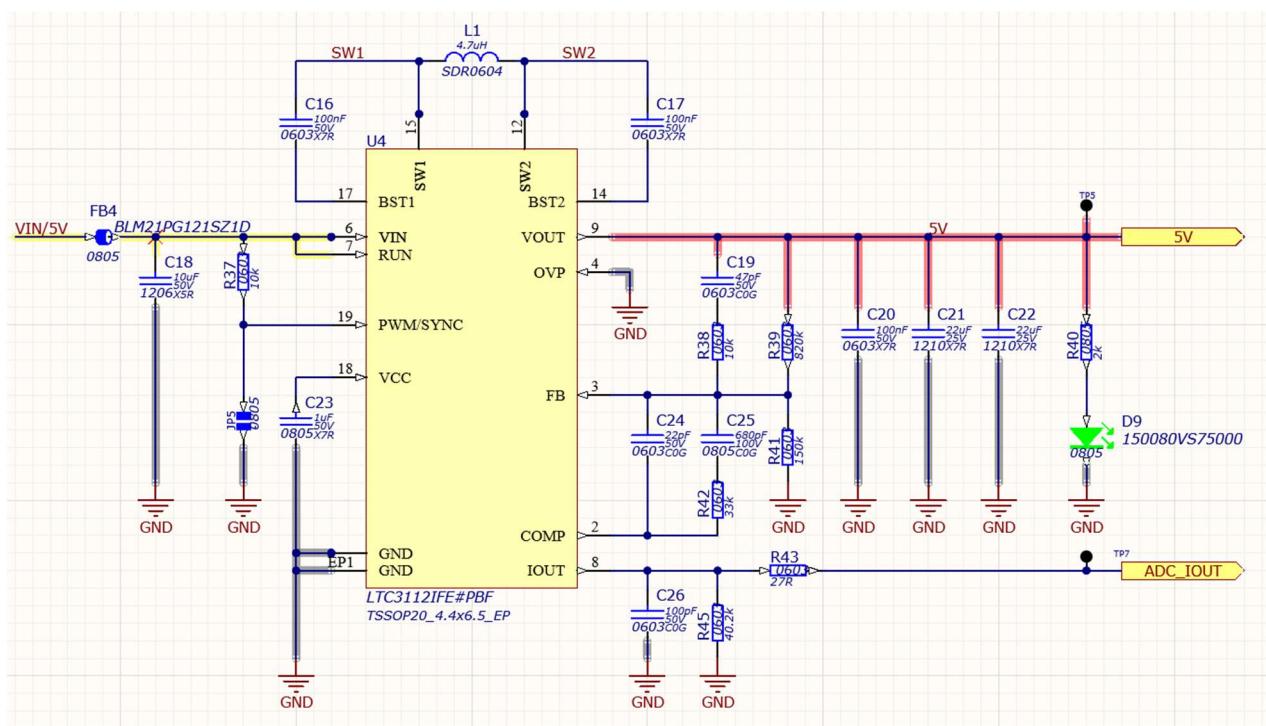
### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### Przetwornica LTC3112

Przetwornica buck-boost w topologii pełnego mostka, działająca w zakresie napięć wejściowych od +2,7 V do +15 V, zapewnia stabilne napięcie wyjściowe +5 V, które jest jednym ze standardowych poziomów zasilania dla układów elektronicznych. Dobór elementów w przetwornicy oparto na rekomendacjach producenta, co pozwala na precyzyjne porównanie osiągów z danymi zawartymi w dokumentacji technicznej. Zastosowanie jej podyktowane było zakresem napięć zasilania powyżej oraz poniżej napięcia wyjściowego wykraczającym poza możliwości pojedynczej przetwornicy typu buck lub boost. Według producenta jest to przetwornica dokładnie do takich zastosowań, cytując dokumentację [17], opis – „*LTC3112 jest przetwornicą buck-boost DC/DC o stałej częstotliwości kluczowania. Topologia pełnego mostka i wykorzystanie jednego induktora pozwalają na uzyskanie niskich szumów oraz bezproblemową pracę przy napięciach zasilania niższych, takich samych lub wyższych od napięcia wyjściowego*” (Rys. 10 oraz Rys. 11).



Rys. 10 Wizualizacja 3D przetwornicy LTC 3112 typu Buck-Boost wraz z niezbędnymi komponentami



Rys. 11 Schemat przetwornicy LTC3112 typu Buck-Boost wraz z niezbędnymi komponentami

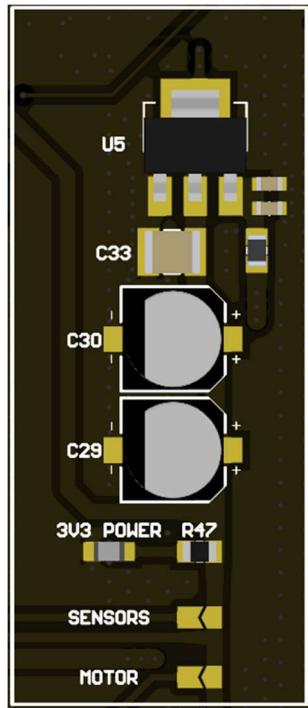
## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

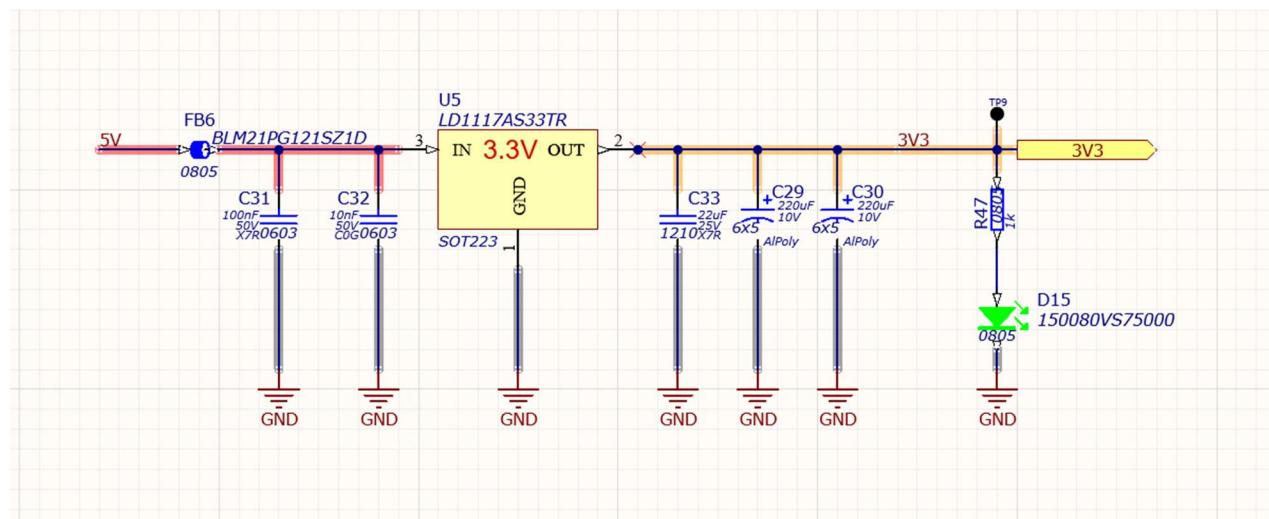
#### Regulator liniowy LD1117-3.3V

Jeden z najczęściej stosowanych regulatorów liniowych w elektronice. Generuje on stałe, nieregulowane napięcie wyjściowe na poziomie +3,3 V, przy maksymalnym prądzie wyjściowym wynoszącym 500 mA. Jego zasada działania jest bardzo prosta, cytując [18] str. 63, rozdział 1.6.5 - „*Układ sprzężenia zwrotnego śledzi napięcie na wyjściu, dokonując takiej zmiany rezystancji sterowanego opornika szeregowego (tranzystora), jaka jest konieczna do utrzymania napięcia stałego o regulacji ciągłej (ang. Linear regulated dc power supply)*”.

Należy jednak pamiętać, że wartości pracy stabilizatora odnoszą się do warunków idealnych – w praktyce prąd maksymalny jest niższy, głównie ze względu na ograniczenia termiczne. Aby zapewnić jak największą stabilność napięcia wyjściowego, regulator jest wspierany przez kondensatory o łącznej pojemności 462  $\mu$ F. Zasilanie układów poprzez zestaw przetwornicy oraz LDO pozwala zachować idealny kompromis między sprawnością sekcji zasilania a stabilnością wyjściowego napięcia zasilania oraz poziomem zakłóceń (Rys. 12 oraz Rys. 13).



Rys. 12 Wizualizacja 3D regulatora liniowego LD1117-3.3V wraz z potrzebnymi komponentami



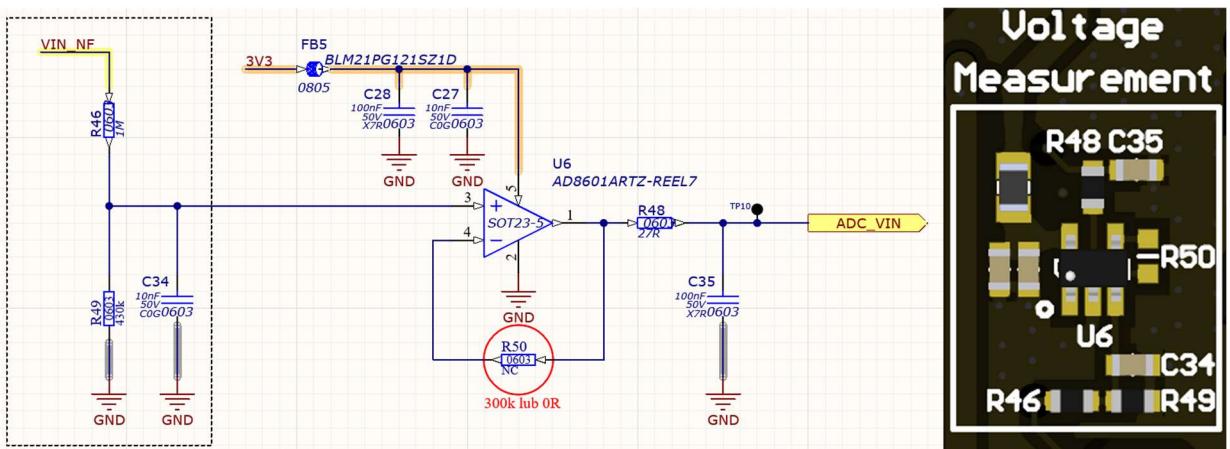
Rys. 13 Schemat regulatora liniowego LD1117-3.3V wraz z potrzebnymi komponentami

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

## Pomiar napięcia zasilania

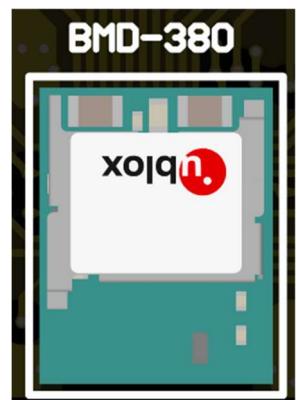
Pomiar realizowany jest za pomocą dzielnika napięcia o współczynniku podziału ~1/3, co wynika z przewidywanego maksymalnego napięcia wejściowego wynoszącego 10 V (limit narzucony przez sterownik silników) oraz maksymalnego napięcia możliwego do zmierzenia przez przetwornik ADC wbudowany w BMD-380, wynoszący +3,3 V. Ze względu na bardzo mały prąd płynący przez dzielnik zastosowano bufor napięciowy oparty na wzmacniaczu AD8601 firmy Analog Devices, który zachowuje stabilność przy jednostkowym wzmacnieniu [19] (Rys. 14). Układ pomiarowy dodaje funkcjonalność typową dla wielu urządzeń mobilnych, a jego działanie można łatwo przetestować na przykładzie Line-Followera.



Rys. 14 Schemat oraz wizualizacja 3D obwodu pomiaru napięcia zasilania

## **Moduł BMD-380**

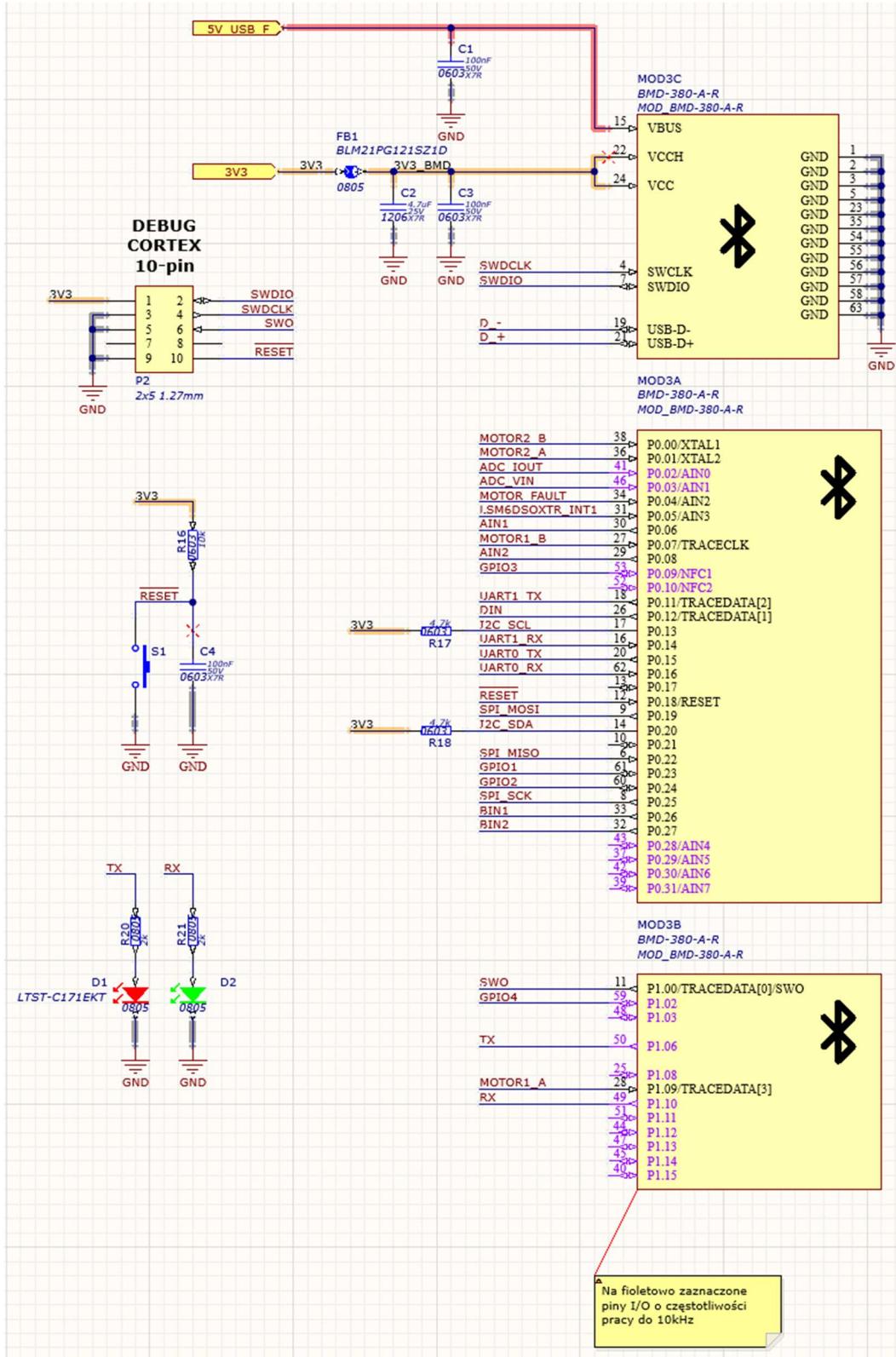
Jest to bardzo wszechstronny, energooszczędny układ wyposażony w mikrokontroler nRF52840, moduł komunikacyjny IEEE 802.15.4 oraz Bluetooth 5.0, posiada 64 wyprowadzenia z czego każde może być wykorzystane jako GPIO lub dowolny port, dowolnego interfejsu komunikacyjnego. Wykorzystany ze względu na ograniczoną ilość portów GPIO zawartych w NUCLEO-STM32G491RE co uniemożliwiło spełnienie założeń związanych z obsługą gniazd microBUS. Dodatkowo posiada gotową wbudowaną sekcję antenową oraz sekcję zasilania wraz z wewnętrznymi przetwornicami co upraszcza układ oraz projektowanie samej płytki (Rys. 15 oraz Rys. 16).



Rys. 15 Wizualizacja 3D modułu BMD-380

# ROZDZIAŁ 1

## Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera



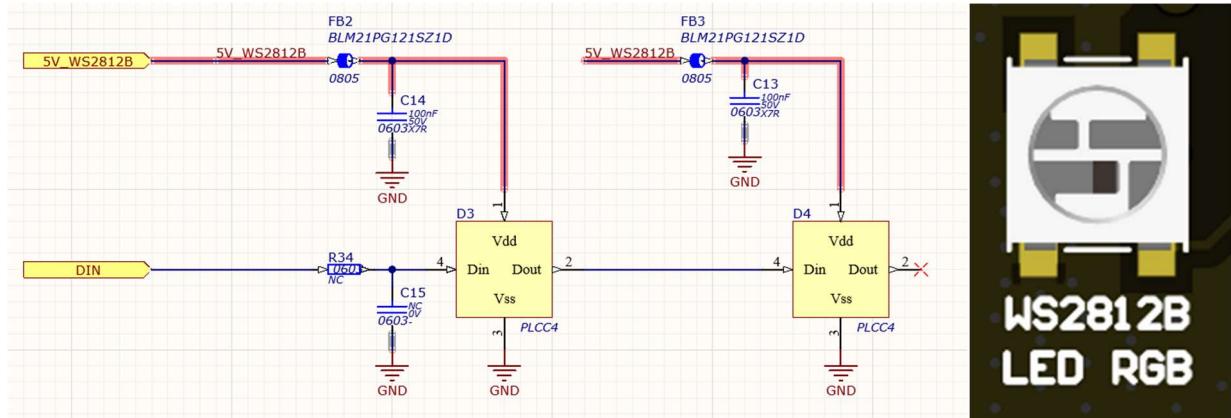
Rys. 16 Schemat połączeń modułu BMD-380

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### Diody WS2812B

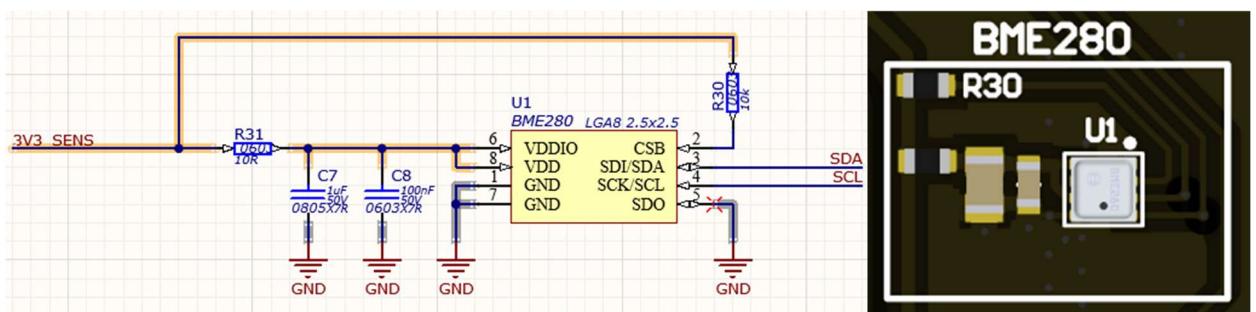
W projekcie zastosowano popularne diody programowalne, często wykorzystywane w innych projektach (Rys. 17). Wyposażone są w wbudowany układ logiczny, który umożliwia ich szeregowe sterowanie. W przypadku Line-Followera wykorzystano dwie takie diody, sterowane w łańcuchu.



Rys. 17 Schemat połączeń dwóch diod RGB WS2812B oraz wizualizacja 3D jednej diody

#### Czujnik środowiskowy BME280

Moduł czujników typu MEMS zasilany napięciem +3,3 V, zawiera czujnik temperatury, ciśnienia oraz wilgotności (Rys. 18). Komunikuje się z BMD-380 przy pomocy interfejsu I<sup>2</sup>C. Układ ten pozwala na zmniejszenie ilości komponentów co pozytywnie przekłada się na ogólny koszt urządzenia oraz skomplikowanie projektu.



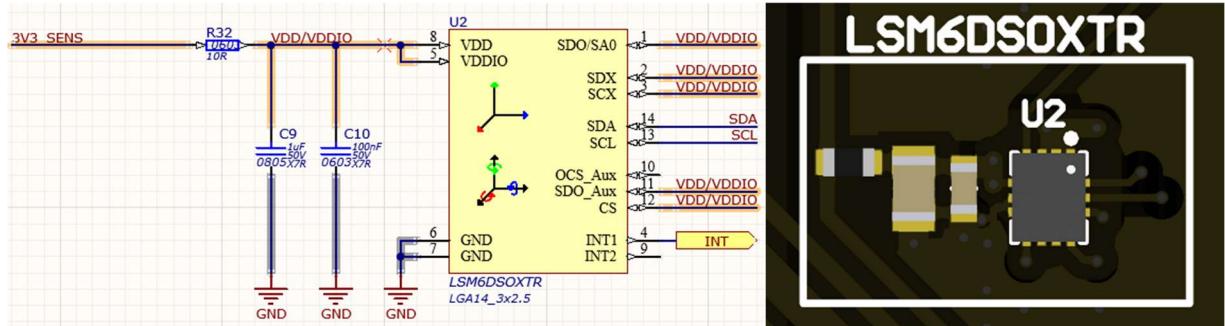
Rys. 18 Schemat oraz wizualizacja 3D połączeń czujnika BME280

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### Czujnik IMU LSM6DS0XTR

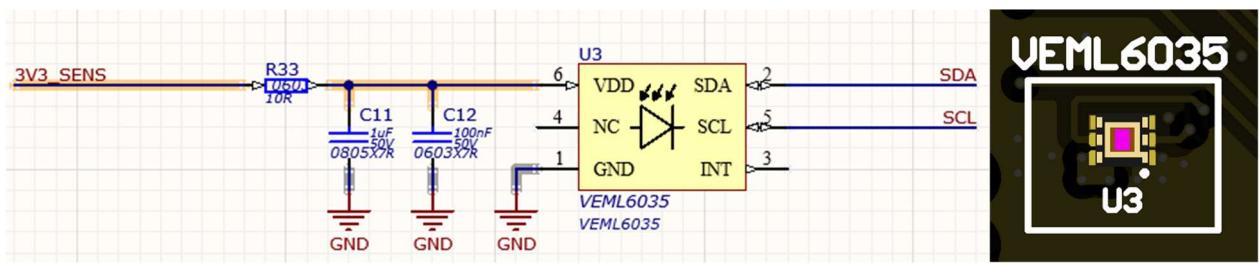
Kolejny moduł czujników wykonany w technologii MEMS zawiera sensor odpowiadający za pomiar przyspieszenia w 3 osiach - akcelerometr oraz sensor odpowiadający za pomiar przyspieszenia kątowego w 3 osiach - żyroskop. Komunikacja z BMD-380 następuje z wykorzystaniem interfejsu I<sup>2</sup>C (Rys. 19).



Rys. 19 Schemat oraz wizualizacja 3D połączeń czujnika LSM6DS0XTR

#### Czujnik natężenia światła VEML6035

W projekcie zastosowano precyzyjny czujnik natężenia światła VEML6035, który zwraca 16-bitową wartość. Komunikacja następuje tak jak w przypadku reszty czujników na płycie głównej z wykorzystaniem jednego interfejsu I<sup>2</sup>C. Zastosowany głównie z prostoty implementacji a jedna magistrala I<sup>2</sup>C scalająca komunikację wszystkich czujników pozwala na badanie jej zachowania w przypadku obecności więcej niż jednego urządzenia oraz wprowadza dodatkowy walor edukacyjny (Rys. 20).



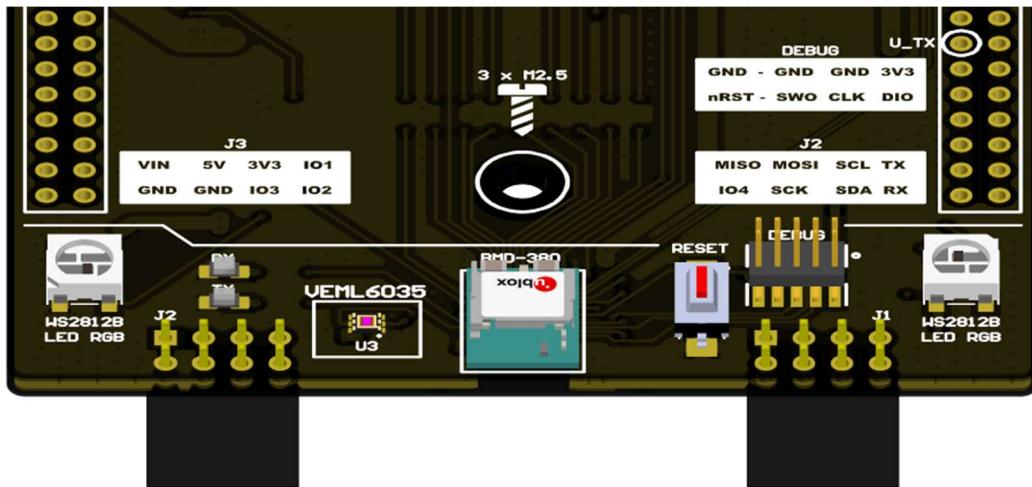
Rys. 20 Schemat oraz wizualizacja 3D połączenia czujnika VEML6035

**ROZDZIAŁ 1**  
**Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera**

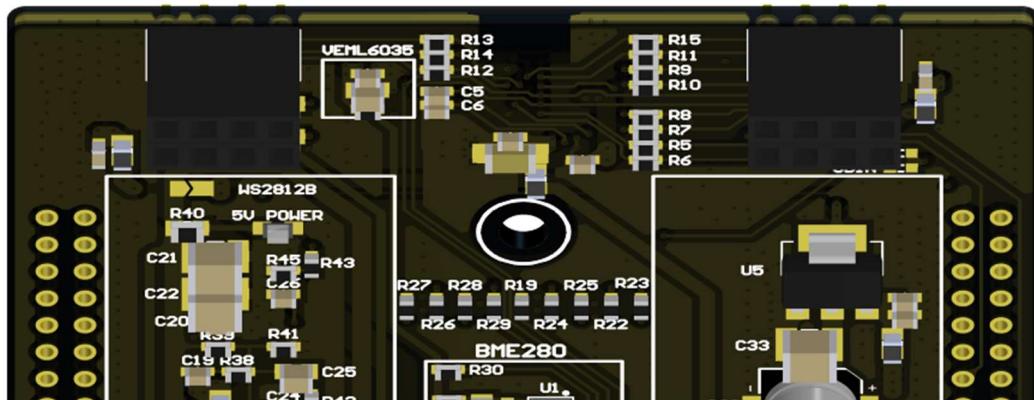
## Złącza służące do podłączenia płyty z zewnętrznymi czujnikami

Złącze służące do podłączania zewnętrznych płyt składa się z dwóch żeńskich gniazd kołkowych w konfiguracji 2x4 ( Rys. 21 oraz Rys. 22). Dla ułatwienia obsługi modułu wszystkie sygnały są opisane na nadrukach umieszczonych na płycie PCB. Złącza zawierają następujące sygnały:

- VBAT: napięcie zasilania pochodzące z gniazda DC-JACK (domyślnie zasilanie z baterii).
- +5 V: napięcie generowane przez przetwornicę Buck-Boost.
- +3,3 V: napięcie generowane przez regulator liniowy.
- Interfejsy komunikacyjne: UART, SPI, I<sup>2</sup>C (używany równocześnie do komunikacji z czujnikami na płycie LF-Mainboard).
- Cztery porty GPIO do ogólnych zastosowań (np. reset, CS).



Rys. 21 Wizualizacja 3D złączy umożliwiających podłączenie płyty przedniej Line-Followera, widok od góry

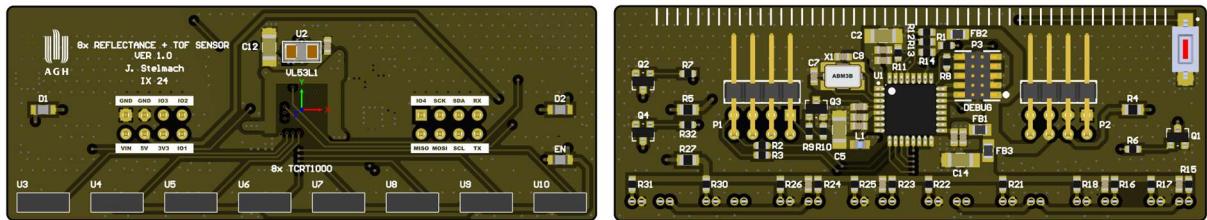


Rys. 22 Wizualizacja 3D złączy umożliwiających podłączenie płyty przedniej Line-Followera, widok od dołu

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### 1.3.2 Opis modułu *LF-Reflectance-Sensor*



Rys. 23 Wizualizacja 3D płyty LF-Reflectance-Sensor

Płyta LF-Reflectance-Sensor widoczna na Rys. 23 stanowi kluczowy element umożliwiający działanie układu w trybie autonomicznego śledzenia linii, co jest jej głównym przeznaczeniem, podkreślonym przez nazwę. Wyposażona jest w zintegrowany czujnik położenia względem linii, składający się z ośmiu sensorów odbiciowych TCRT1000, które wyróżniają się wysoką dynamiką pracy, odpowiadając wymaganiom dla tego typu zastosowania. Połączenie z płytą główną realizowane jest za pomocą dwóch kątowych listew w konfiguracji 2x4, co zapewnia pewne i stabilne połączenie.

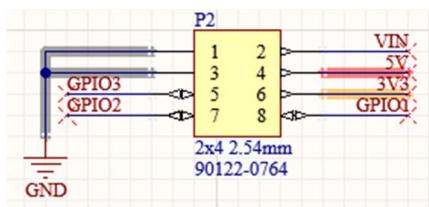
Dzięki bogatemu zasobowi dostępnych protokołów komunikacyjnych, płyta może być w łatwy sposób modyfikowana i rozwijana wraz z dalszym postępem projektu, co czyni ją wszechstronnym rozwiązaniem.

#### Zasilanie

Zasilanie płyty jest dostarczane z modułu płyty głównej za pośrednictwem złącz kołkowych. Wykorzystywane są dwa napięcia:

- +3,3 V: do zasilania procesora oraz czujnika odległości.
- +5 V: do zasilania czujników TCRT1000.

Takie rozwiązanie pozwala zminimalizować potrzebę stosowania dodatkowych podzespołów, co przekłada się na obniżenie kosztów projektu. Schemat podłączenia na Rys. 24 przedstawia szczegóły konfiguracji napięć i zasilania.



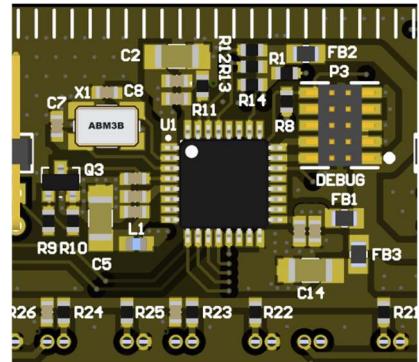
Rys. 24 Schemat podłączenia złącza z którego pozyskiwane jest zasilanie modułu LF-Reflectance-Sensor

# ROZDZIAŁ 1

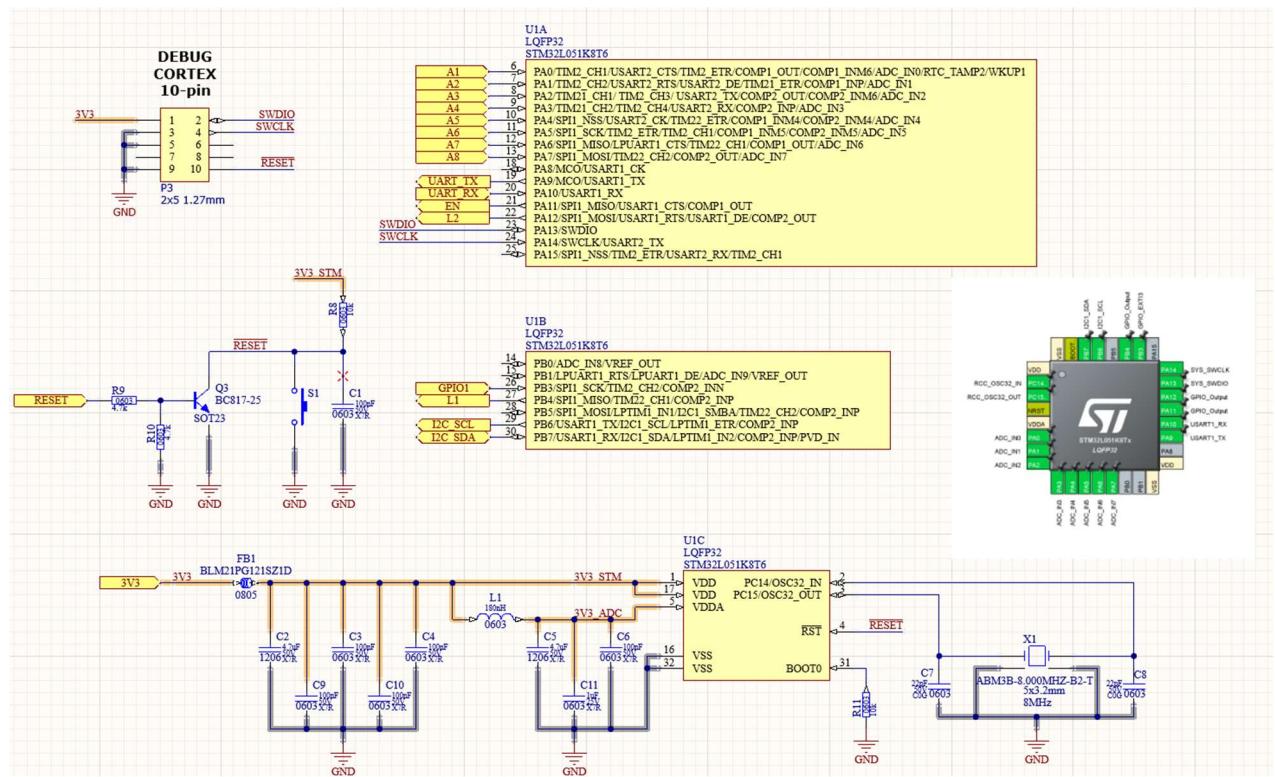
## Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

### Mikrokontroler STM32L051

STM32L051 to prosty i tani mikrokontroler, programowany z użyciem interfejsu SWD oraz złącza CORTEX DEBUG 10pin, posiada wymagane 8 wejść ADC o rozdzielcości 12bit, 3 wyjścia GPIO ogólnego przeznaczenia do sterowania diodami LED oraz tranzystorem załączającym listwę czujników odbiciowych (Rys. 25 oraz Rys. 26). Wykorzystany ze względu na ograniczoną liczbę portów I/O modułu BMD-380 znajdującego się na LF-Mainboard oraz NUCLEO-STM32G491RE. Dodatkowo ze względu na pomiary analogowe zastosowany został filtr LC na szynie zasilania przetwornika ADC służący do separacji zasilania części cyfrowej oraz analogowej.



Rys. 25 Wizualizacja 3D mikrokontrolera STM32L051 wraz z wymaganymi komponentami



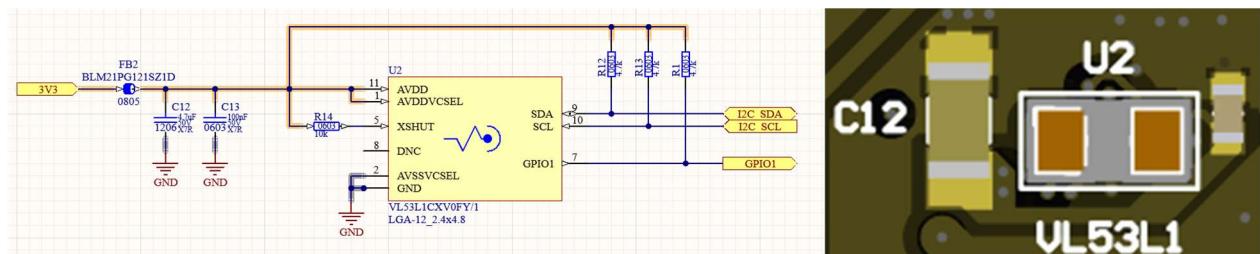
Rys. 26 Schemat połączeń mikrokontrolera STM32L051 wraz z wymaganymi komponentami

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### Czujnik odległości VL53L1

Czujnik VL53L1 TOF (Rys. 27) wykorzystywany jest w wielu urządzeniach codziennego użytku wymagających badania odległości od obiektów, np. w odkurzaczkach autonomicznych. Jego atutem jest pomiar siatki odległości pozwalający na bardziej precyzyjne omijanie przeszkód oraz analizowanie terenu. Nauka obsługi takiego czujnika niesie za sobą duży walor edukacyjny oraz może być przydatna w przyszłych projektach.



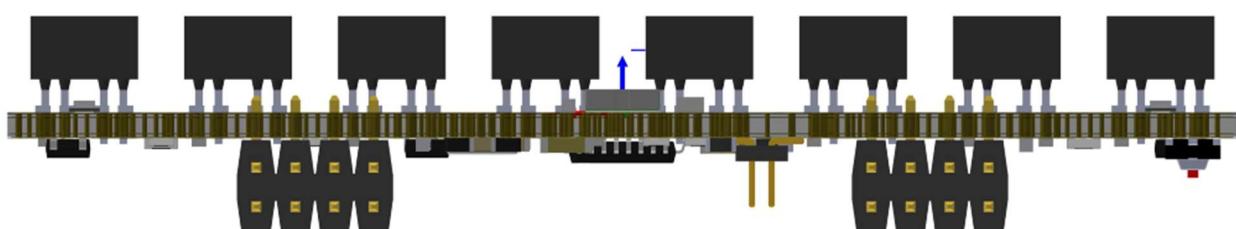
Rys. 27 Schemat oraz wizualizacja 3D czujnika TOF VL53L1

#### Czujnik wykrywania linii bazujący na ośmiu czujnikach TCRT1000

Czujnik zbudowany na tych sensorach analogowych posiada bardzo szeroką dynamikę działania – co jest wymagane dla stabilnego działania funkcji śledzenia linii. Osiem czujników rozmieszczonych w różnych odległościach 10mm umożliwia dokładny pomiar położenia pojazdu względem linii (Rys. 28 oraz Rys. 29). Czujniki wyposażone są w klucz tranzystorowy sterowany z poziomu mikrokontrolera umożliwiający na ich włączenie lub wyłączenie, np. w celu oszczędzania energii oraz diodę sygnalizującą stan włączenia – „EN” widoczne również na schemacie z Rys. 30.



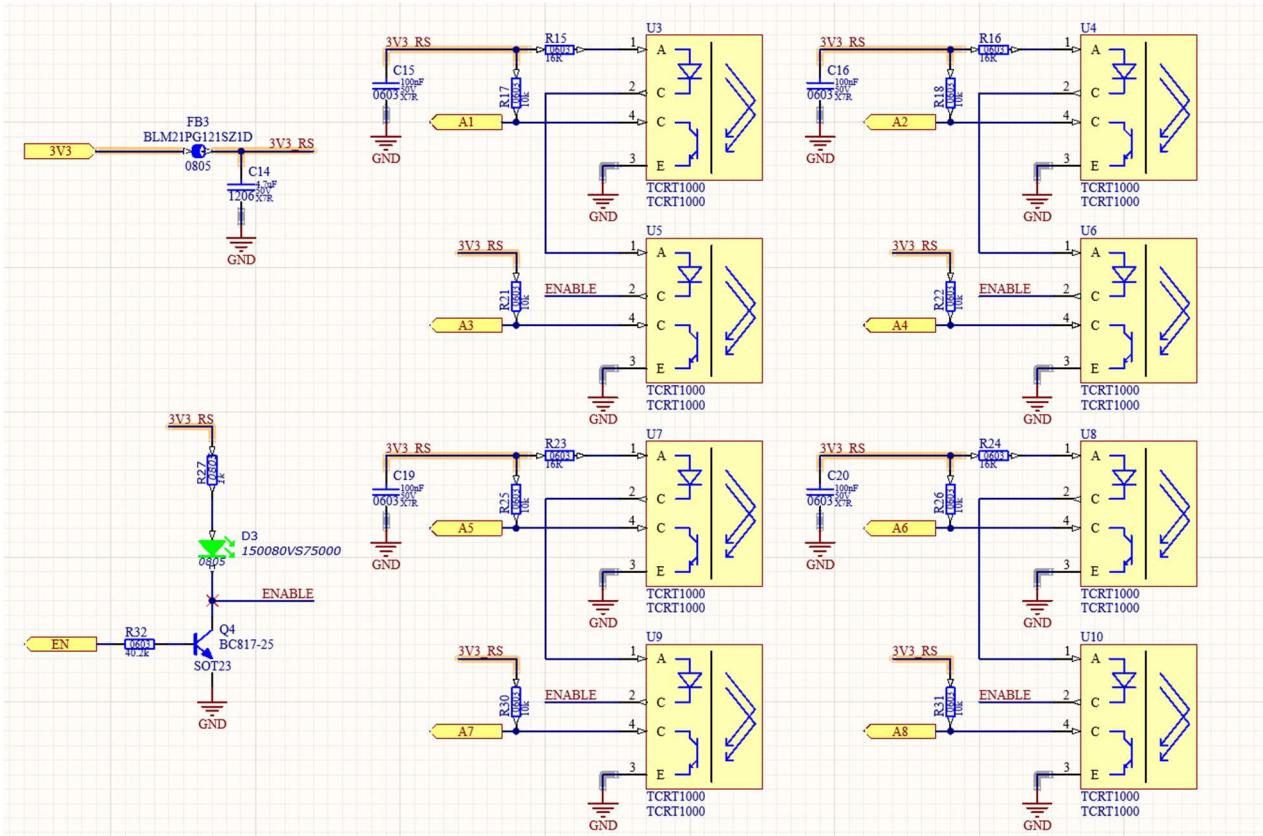
Rys. 28 Wizualizacja 3D sekcji czujników TCRT1000, widok z przodu



Rys. 29 Wizualizacja 3D sekcji czujników TCRT1000, widok z dołu

## ROZDZIAŁ 1

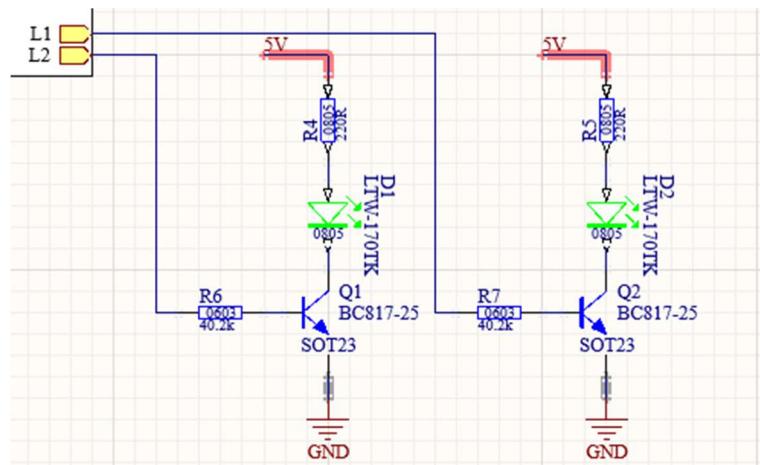
### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera



Rys. 30 Schemat połączeń sekcji czujników TCRT1000

## Pozostałe funkcje

Płyta zawiera przycisk reset oraz dwie diody sterowane z poziomu mikrokontrolera (D1 oraz D2 widoczne na Rys. 23 oraz Rys. 31), które pozwalają na sygnalizację stanu pracy modułu. Elastyczność projektu pozwala na dodanie dodatkowych czujników w przyszłości, w aktualnej wersji interfejsy komunikacyjne I<sup>2</sup>C oraz SPI jak i porty GPIO wyprowadzone na złączach łączących moduł z LF-Mainboard nie są wykorzystywane.



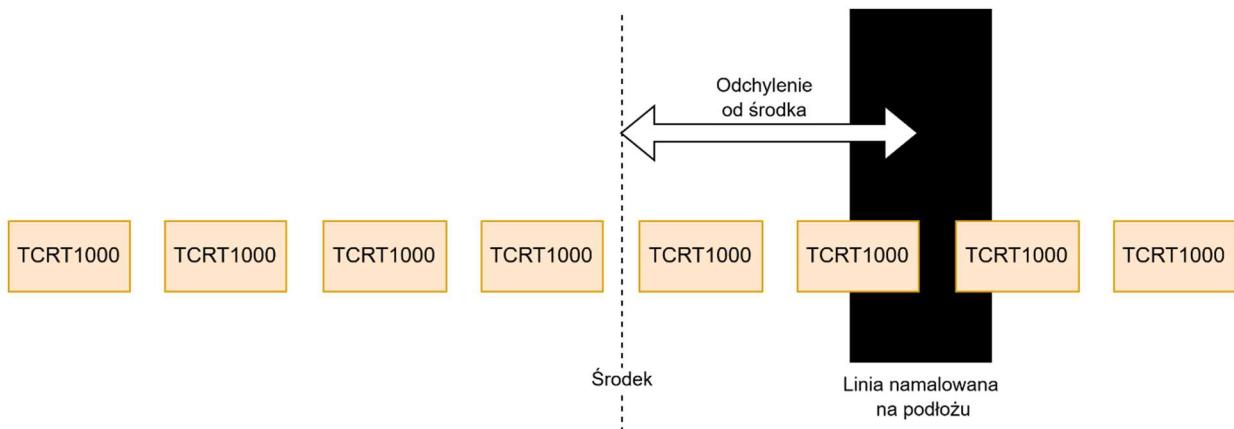
Rys. 31 Dodatkowe diody D1 oraz D2 umożliwiające sygnalizację pracy modulu

## ROZDZIAŁ 1

### Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera

#### 1.3.3 Zasada działania czujnika wykrywającego odchylenie linii od środka układu

Wykorzystany zestaw czujników TCRT1000 pozwala na pomiar odchylenia linii od środka układu co symbolizuje rysunek poniżej – szerokość linii powinna wynosić przynajmniej 10 mm, czyli szerokość odległości między dwoma czujnikami tak aby linia została poprawnie wykryta. Po odczytaniu generowanych sygnałów analogowych wartości te można interpretować jako histogram oraz policzyć jego „środek masy” czyli położenie pojazdu względem środka linii.



Rys. 32 Ilustracja działania sekcji czujników TCRT1000 jako dyskretnego czujnika położenia względem linii

Warto zaznaczyć, że układ przedstawiony na Rys. 32 jest bardziej rozwiniętą wersją czujnika wykrywania linii. Podstawowa wersja tego rozwiązania składa się z dwóch czujników, które wykrywają „zjechanie z linii” – układ taki jest prosty jednak nie umożliwia płynnej regulacji toru jazdy. Rozwiązanie to jest widoczne na line-followerze z wizualizacji 3D znajdującej się na Rys. 1.

**ROZDZIAŁ 1**  
**Opis części sprzętowej projektowanego Line-Followera**

### 1.3.4 Opis modułu LF-Battery-Connector oraz podstawy POLOLU ZUMO

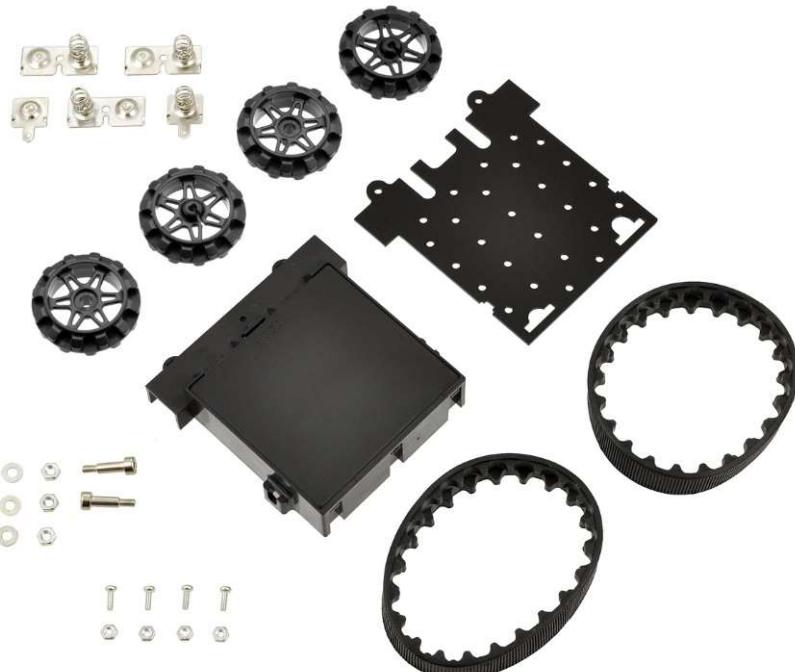


Rys. 33 Wizualizacja 3D modułu służącego do montażu terminali baterii w podstawie ZUMO

Prosta konstrukcja (Rys. 33), pozbawiona czujników i układów, stanowi alternatywę dla mocowania portów zasilania z baterii za pomocą taśmy lub kleju termotoplwego, co sugeruje producent w dokumentacji [20].

Na płycie znajdują się opis oraz otwory na dystanse i pady do mocowania terminali. Jej grubość to 1 mm, dlatego zastosowano mosiszne dystanse 5 mm zamiast 6 mm, aby zachować równy odstęp modułu LF-Mainboard od podstawy ZUMO.

Cała elektronika jest zamocowana do podstawy ZUMO wyprodukowanej przez firmę POLOLU (Rys. 34), której elementy składowe przedstawione są rysunku poniżej. Zamiast standardowych nakrętek #2-56 użyto łatwiej dostępnych, niskoprofilowych nakrętek zgodnych z normą DIN493. Cała konstrukcja jest zmontowana z wykorzystaniem śrub i dystansów M2.5, eliminując problemy z dostępnością odpowiedników w standardzie calowym.



Rys. 34 Zbiór oryginalnych elementów składowych POLOLU ZUMO [21]

**ROZDZIAŁ 2**  
**Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

## **ROZDZIAŁ 2**

### **Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

Rozdział trzeci poświęcony jest opisowi części kontrolno-sterującej Line-Followera. W rozdziale zaprezentowany został schemat działania, uwzględniający zarówno założenia projektowe, jak i implementację. W pracy wykorzystano środowisko programistyczne VSCode, wzbogacone o rozszerzenia do obsługi systemu czasu rzeczywistego Zephyr [22] oraz nRF Connect [23]. Zostały opracowane przez firmę Nordic Semiconductor i mogą posłużyć do zaprogramowania procesora znajdującego się w module BMD-380.

Do oprogramowania kontrolera STM32L051 oraz platformy NUCLEO-STM32G491RE użyto środowiska STM32CubeIDE w wersji 15.0, bazując na języku programowania C. Proces programowania modułu BMD-380 oraz STM32L051 realizowano za pomocą zewnętrznego programatora JLINK EDU, wspieranego oprogramowaniem firmy SEGGER (J-LINK, OZONE).

Ze względu na różnorodność środowisk i zastosowanego oprogramowania, algorytmy kontrolno-sterujące przedstawione zostały w formie uniwersalnych schematów blokowych, co ułatwi ich zrozumienie.

#### **2.1 Założenia wstępne oprogramowania kontrolno-sterującego Line-Followera**

1. Zaprojektowanie aplikacji na komputer umożliwiającej połączenie oraz sterowanie Line-Followerem.
2. Debugowanie z użyciem FTDI, J-LINK RTT używająca wbudowany port USB w module NUCLEO-STM32G491RE (ST-LINK) lub wbudowany na płytę główną port USB.
3. Układy mają działać niezależnie, urządzenie ma umożliwiać jazdę sterowaną oraz autonomiczną.

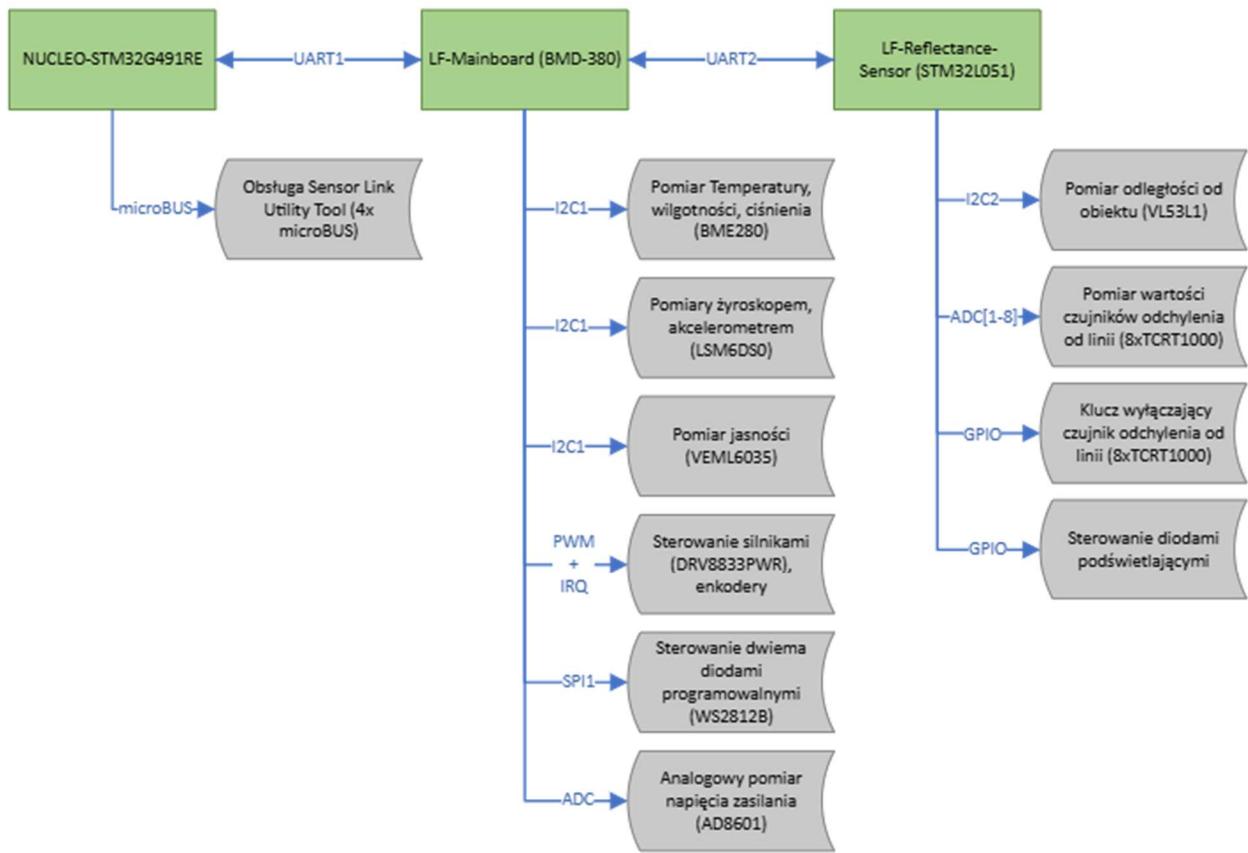
## ROZDZIAŁ 2

### Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera

## 2.2 Opracowane algorytmy kontrolno-sterujące

Zaprojektowane algorytmy kontrolno-sterujące pełnią rolę testową. Pozwalają na pracę w trybie autonomicznym, zawierają funkcje pozwalające na odczyt danych z czujników oraz sterowanie wszystkimi układami peryferyjnymi. Ostatecznie tylko część zaprojektowanych algorytmów została zaimplementowana na prototypie platformy.

### 2.2.1 Architektura komunikacji pomiędzy modułami Line-Followera



Rys. 35 Architektura komunikacji systemu wraz z informacjami jakie zawarte są na poszczególnych modułach

Komunikacja międzymodułowa w systemie odbywa się poprzez interfejsy UART (Rys. 35). Wszystkie interfejsy UART mają ustawione następujące parametry:

- Baudrate: 115200 bps
- Rozmiar pakietu: 8 bitów
- Bity stopu: 1
- Brak parzystości

**ROZDZIAŁ 2**  
**Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

### Działanie systemu:

1. Główny program na platformie NUCLEO-STM32G491RE wysyła zapytania do modułu LF-Mainboard (BMD-380).
2. Jeśli LF-Mainboard posiada wymagane dane, odsyła odpowiedź zawierającą odpowiednią wartość do NUCLEO-STM32G491RE.
3. W przypadku braku żądanego danych na module LF-Mainboard, zapytanie jest przekazywane dalej do płyty z czujnikami LF-Reflectance-Sensor, która odpowiada, a następnie odpowiedź jest zwracana bez zmian przez LF-Mainboard do NUCLEO-STM32G491RE.

Wszystkie wartości zapytań oraz komend zapisane są jako jeden zbiór dostępny na wszystkich modułach w łańcuchu w celu zapobiegania zdublowaniu komend i problemów z tym związanych (Tab. 1). Każde z nich posiada sprecyzowaną odpowiedź oraz ilość bajtów przesyłanych w procesie komunikacji. Poniżej tabela zawierająca zbiór komend występujących w oprogramowaniu obsługującym prototyp platformy.

BAJT	TYP	KOMENTARZ	MAKSYMALNY ZAKRES WARTOŚCI	ROZDZIELCZOŚĆ	ROZMIAR [BAJT]
0x01	zapytanie	odległość od przeszkoły	0 do 800 [cm]	1cm	2
0x02	zapytanie	odchylenie od linii	(-30) do +30 [mm]	1mm	1
0x03	zapytanie	pomiar temperatury	(-40) do 100 [*C]	1*C	1
0x04	zapytanie	pomiar wilgotności	0 do 100 [%]	1%	1
0x05	zapytanie	pomiar ciśnienia	300 do 1100 [hPa]	1hPa	2
0x06	zapytanie	pomiar przyspieszenia w osi X	(-4) do 4 [g]	1mg	2
0x07	zapytanie	pomiar przyspieszenia w osi Y	(-4) do 4 [g]	1mg	2
0x08	zapytanie	pomiar przyspieszenia w osi Z	(-4) do 4 [g]	1mg	2
0x09	zapytanie	pomiar przyspieszenia kątowego w osi X	(-2000) do 2000 [dPs]	1dPs	2
0x0A	zapytanie	pomiar przyspieszenia kątowego w osi Y	(-2000) do 2000 [dPs]	1dPs	2
0x0B	zapytanie	pomiar przyspieszenia kątowego w osi Z	(-2000) do 2000 [dPs]	1dPs	2
0x0C	komenda	ustawienie prędkości lewego silnika	(-100) do 100 [%]	1%	1
0x0D	komenda	ustawienie prędkości prawego silnika	(-100) do 100 [%]	1%	1
0x0E	zapytanie	odczyt prędkości lewego silnika	(-1500) do 1500 [obr/min]	1obr/min	2
0x0F	zapytanie	odczyt prędkości prawego silnika	(-1500) do 1500 [obr/min]	1obr/min	2

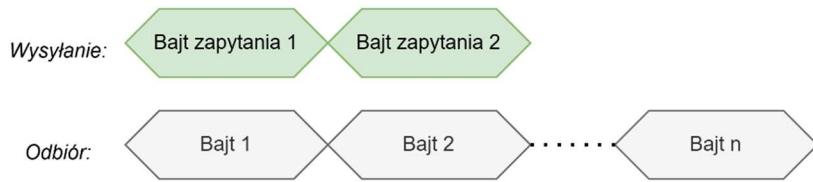
Tab. 1 Komendy wykorzystane w prototypowym oprogramowaniu Line-Followera

## ROZDZIAŁ 2

### Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera

#### Zapytanie o wartość

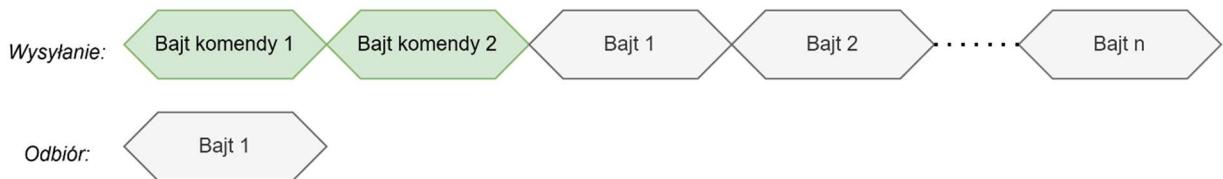
Komunikacja związana z zapytaniem o wartość polega na przesłaniu jednobajtowego słowa - wartości z zakresu  $0x00$  do  $0xFF$  (0 do 255 w systemie dziesiętnym). Odpowiedź jest odsyłana w formie sekwencji bajtów, których ilość jest ściśle powiązana z treścią zapytania lub odpowiednio interpretowana dla poszczególnego zapytania wartość oznaczająca błąd (Rys. 36). Aby zoptymalizować wykorzystanie kanału transmisyjnego, każdemu zapytaniu przypisana jest ściśle określona, niezmienna liczba bajtów (n) w odpowiedzi.



Rys. 36 Bajty występujące w przypadku nadania zapytania oraz odpowiedź

#### Komenda

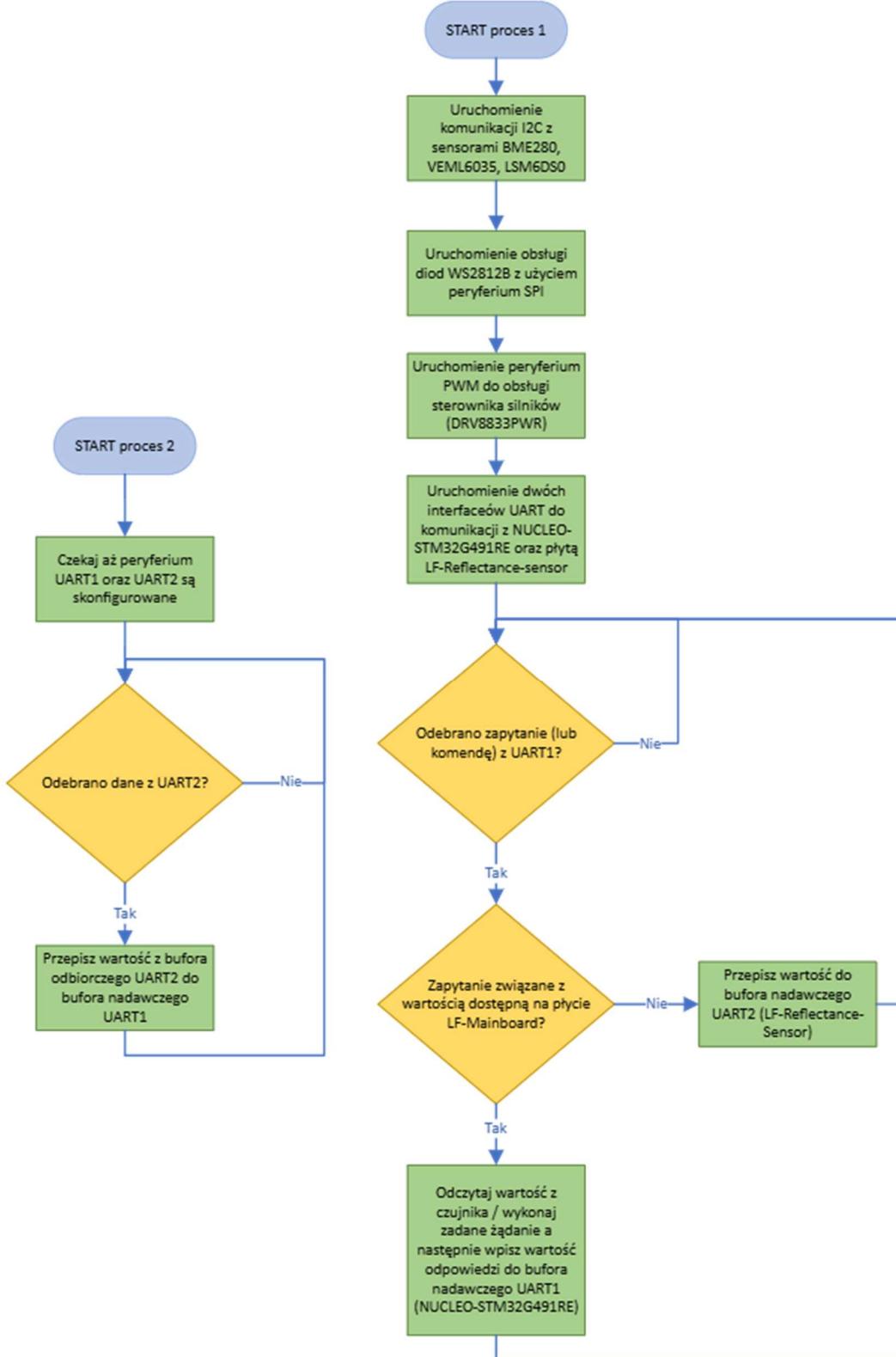
W przypadku wysyłania komend komunikacja składa się z komendy oraz wartości jaką chcemy ustawić. Odpowiedzią na zadaną komendę może być jeden bajt przyjmujący wartość  $0x00$  w przypadku braku możliwości wykonania komendy oraz  $0x01$  w przypadku sukcesu (Rys. 37). W przyszłości możliwe jest dodanie większej ilości sygnałów stanowiących sprzężenie zwrotne przy komunikacji lub całkowite z nich zrezygnowanie. Do dyspozycji są komendy obsługujące silniki oraz sterowanie diodami (Programowalnymi oraz nieprogramowalnymi, na module LF-Mainboard oraz z czujnikami odległości oraz położenia linii na module LF-Reflectance-Sensor).



Rys. 37 Bajty występujące w przypadku nadania komendy oraz odpowiedź

**ROZDZIAŁ 2**  
**Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

### 2.2.2 Schemat blokowy algorytmu zarządzającego modułem LF-Mainboard



Rys. 38 Schemat blokowy algorytmu obsługującego LF-Mainboard

## ROZDZIAŁ 2

### Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera

Algorytm przedstawiony na Rys. 38 obsługujący moduł LF-Mainboard (BMD-380) składa się z dwóch procesów. Jego zadaniem jest odczyt danych z czujników, sterowanie silnikami zgodnie z otrzymanymi komendami oraz przekazywanie informacji z płyty LF-Reflectance-Sensor do głównego modułu NUCLEO-STM32G491RE.

#### **Opis procesu 1**

Proces obejmuje inicjalizację i konfigurację układów peryferyjnych, w tym:

- Komunikację I<sup>2</sup>C do obsługi czujników BME280, VEML6035 oraz LSM6DS0.
- Sterowanie diodami RGB WS2812B za pomocą SPI.
- PWM do sterowania układem DRV8833PWR obsługującym silniki.
- Interfejsy UART1 i UART2 do komunikacji z modułami NUCLEO-STM32G491RE oraz LF-Reflectance-Sensor.

Po zakończeniu inicjalizacji algorytm przechodzi do działania w pętli. W tej fazie:

- Oczekuje sygnału z UART1.
- Jeśli dostępne są odpowiednie informacje, wykonuje odebrane polecenie, a wynik zapisuje do bufora nadawczego UART1.
- W przypadku braku wymaganych informacji układ przesyła dane do bufora nadawczego UART2, kierując je do dalszej obsługi.

#### **Opis procesu 2**

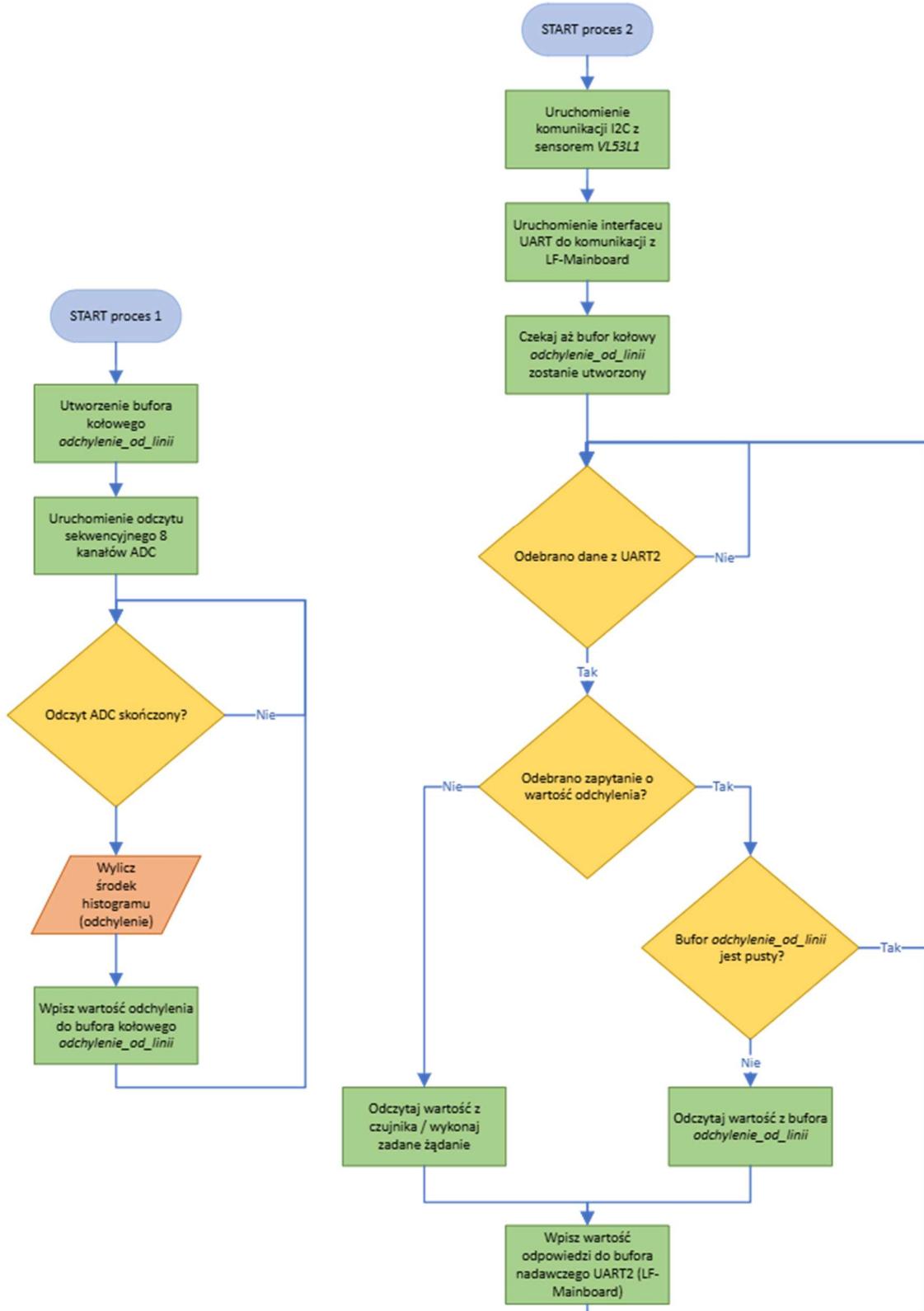
Prosty proces, którego jedynym zadaniem jest przekazywanie danych z bufora odbiorczego UART2 do bufora nadawczego UART1, nie wprowadzający żadnych zmian w przekazywanych danych. Proces ten zaczyna swoje działanie od momentu skonfigurowania komunikacji UART1 oraz UART2.

#### **Opracowana implementacja algorytmu**

W kodzie opracowanym z użyciem środowiska VSCode oraz rozszerzeń nRF Connect udało się uruchomić komunikację z czujnikami BME280 oraz VEML6035. Ze względów technicznych nie udało się uruchomić komunikacji z czujnikiem LSM6DS0 co wyjaśnione zostanie w kolejnym rozdziale, ale nie wpływa to jednak na możliwość poruszania kołami, którą Line-Follower posiada. Funkcjonalna jest również komunikacja międzymodułowa UART1 oraz UART2, diody RGB WS2812B mrugają naprzemiennie, aby sygnalizować poprawną pracę modułu.

**ROZDZIAŁ 2**  
**Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

### 2.2.3 Schemat blokowy algorytmu zarządzającego modułem LF-Reflectance-Sensor



Rys. 39 Schemat działania oprogramowania znajdującego się na płycie LF-Reflectance-Sensor

## ROZDZIAŁ 2

### Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera

Algorytm przedstawiony na Rys. 39 pełni dwie role zawarte w dwóch procesach, odczyt danych z przetwornika ADC oraz wyliczanie za ich pomocą odchylenia od środka linii (**1.3.3 Zasada działania czujnika wykrywającego odchylenie linii**) oraz zarządzanie komunikacją z modułem LF-Mainboard.

#### **Opis procesu 1**

Proces ten obejmuje konfigurację i inicjalizację pomiarów przy użyciu przetwornika ADC, a także utworzenie bufora kołowego, w którym zapisywane będą kolejne wartości odchylenia od linii. Jego zadaniem jest wykonywanie sekwencyjnych pomiarów sygnałów analogowych z czujników TCRT1000, obliczanie na ich podstawie wartości odchylenia oraz umieszczenie tych wyników w buforze kołowym.

Cały proces powtarza się cyklicznie od chwili uruchomienia modułu, w regularnych odstępach czasu – wystarczająco rzadko, by zapobiec przepelnieniu bufora, a jednocześnie na tyle często, by stale dostarczać świeże dane do pozostałych algorytmów sterowania.

#### **Opis procesu 2**

Proces rozpoczyna inicjalizację komunikacji I<sup>2</sup>C z czujnikiem odległości VL53L1 oraz UART do wymiany danych z płytą LF-Mainboard. Algorytm oczekuje na zapytanie płyty głównej (przesłane zapytanie od NUCLEO-STM32G491RE), które może dotyczyć odczytu wartości z czujnika odległości, uzyskania kolejnej wartości odchylenia od linii lub polecenia zmiany stanu włączenia diod bądź czujnika linii, oraz zwraca wynik do bufora nadawczego UART.

#### **Opracowana implementacja algorytmu**

W opracowanym testowym algorytmie wykonanym z użyciem oprogramowania STM32CubeIDE, zaimplementowana została część algorytmu wykrywania położenia względem linii oraz komunikacji międzymodułowej. Zasilanie czujników TCRT1000 włączone jest na stałe, a diody mrugają naprzemiennie w celu sygnalizacji poprawnego działania systemu.

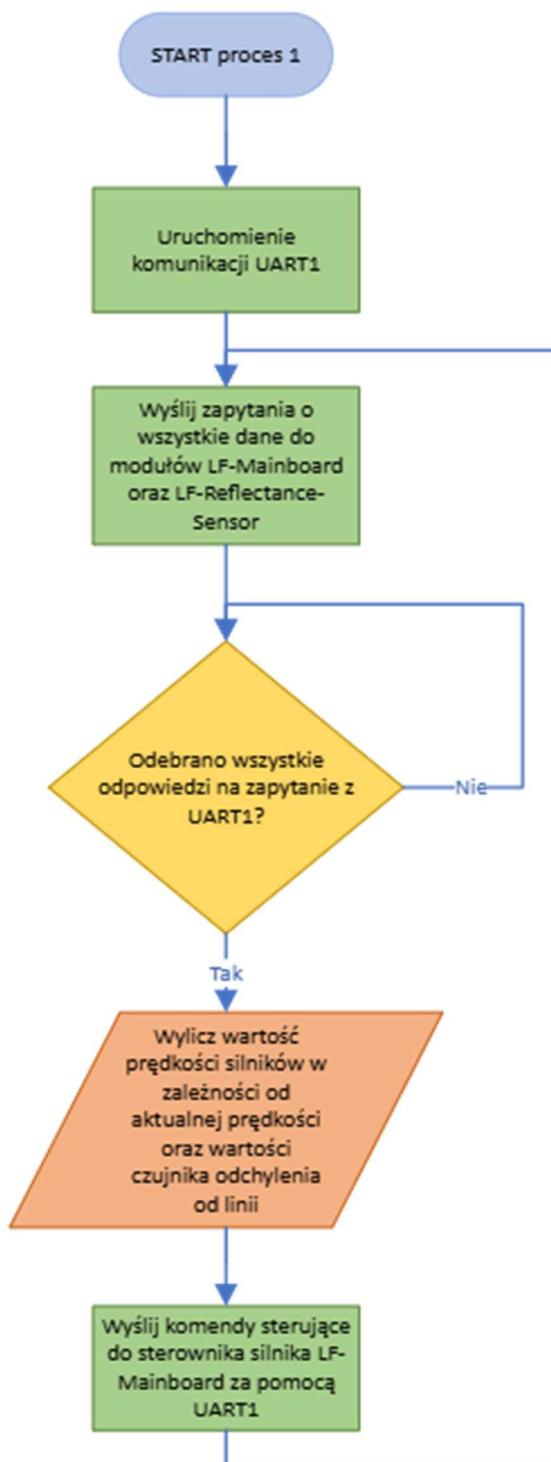
**ROZDZIAŁ 2**  
**Opis części kontrolno-sterującej projektowanego Line-Followera**

## 2.2.4 Schemat blokowy algorytmu sterującego Line-Followerem bazujący na NUCLEO-STM32G491RE

### Opis procesu oraz opracowana implementacja algorytmu

Podstawowy algorytm sterowania z Rys. 40 składa się z jednego procesu oraz nie korzysta z możliwości użycia modułów microBUS. Domyślnie w trybie blokującym układ odczytuje wartości wszystkich czujników znajdujących się na platformie, następnie bazując na aktualnych wartościach odchylenia względem linii oraz prędkości obrotowej silników, określa zmianę jaką musi wprowadzić w wypełnieniu impulsów (regulacja prędkości PWM), tak aby błąd wynikający z odchylenia środka pojazdu do linii dążył do zera. Wszystkie informacje przekazywane są tylko za pomocą interfejsu UART.

Algorytm ten jest bardzo prosty, jednak wystarczający do diagnostyki działania podstawowej funkcji Line-Followera jaką jest śledzenie linii.



Rys. 40 Schemat blokowy podstawowego działania głównego algorytmu sterującego Line-Followerem

**ROZDZIAŁ 3**  
**Montaż oraz testy prototypu Line-Followera**

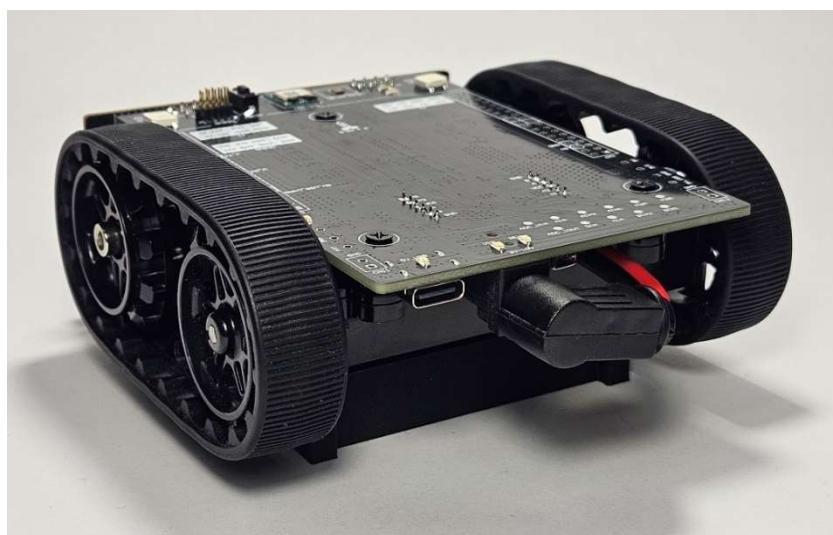
## **ROZDZIAŁ 3**

### **Montaż oraz testy prototypu Line-Followera**

W poniższym rozdziale przedstawiony został proces montażu oraz testów i diagnostyki prototypu widocznego na Rys. 41 oraz Rys. 41. W trakcie testów nie zostały zamontowane listwy kołkowe służące do podłączenia NUCLEO-STM32G491RE, ponieważ zakrywają opisy na płycie LF-Mainboard co utrudnia pracę z urządzeniem – zostanie to poprawione w końcowej wersji projektu. Moduły te zostały połączone za pomocą przylutowanych przewodów typu goldpin niewidocznych na zdjęciach.



Rys. 41 Fotografia zmontowanego pojazdu Line-Follower od przodu

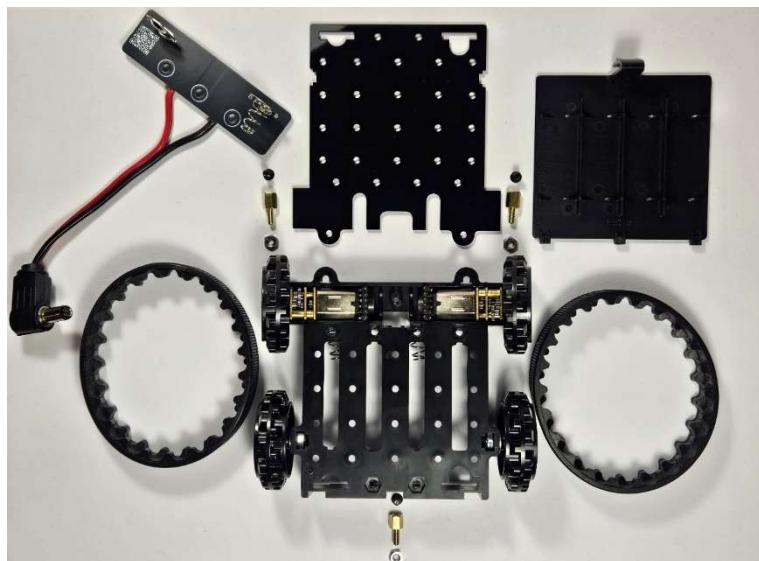


Rys. 42 Fotografia zmontowanego pojazdu Line-Follower od tyłu

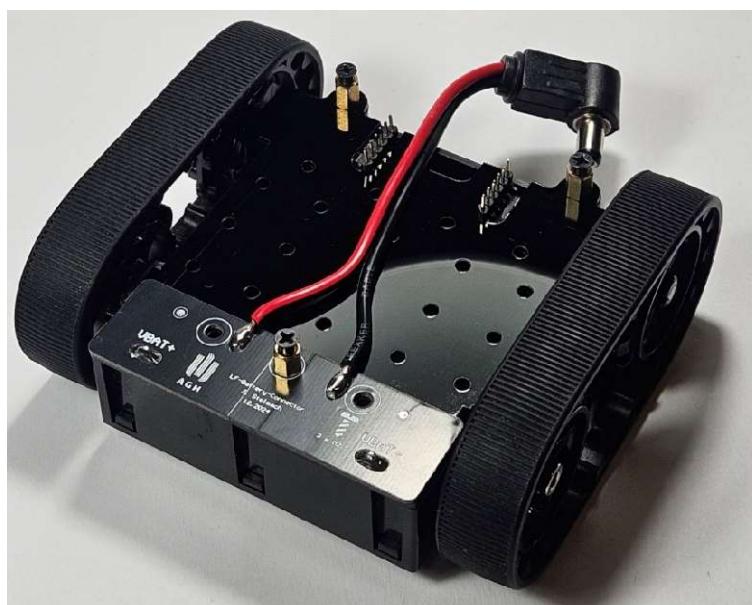
**ROZDZIAŁ 3**  
**Montaż oraz testy prototypu Line-Followera**

### 3.1 Montaż podstawy POLOLU ZUMO

Na początkowym etapie do podstawy zamocowano terminale baterii, a do płytki LF-Battery-Connector przymontowano końcowe terminale oraz przewód wyposażony w złącze DC-JACK (Rys. 43). Zamontowano również silniki z czujnikami prędkości obrotowej, koła i gąsienice. Wszystkie elementy wraz z perforowaną pokrywą, zostały połączone za pomocą dwóch dystansów M2.5 o długości 6 mm oraz jednego dystansu M2.5 5 mm, zamocowanego na wysokości płytki LF-Battery-Connector (**1.3.4 Opis modułu LF-Battery-Connector oraz podstawy POLOLU ZUMO**). Efekt został przedstawiony na Rys. 44.



Rys. 43 Fotografia wszystkich mechanicznych elementów składowych podstawy Line-Followera



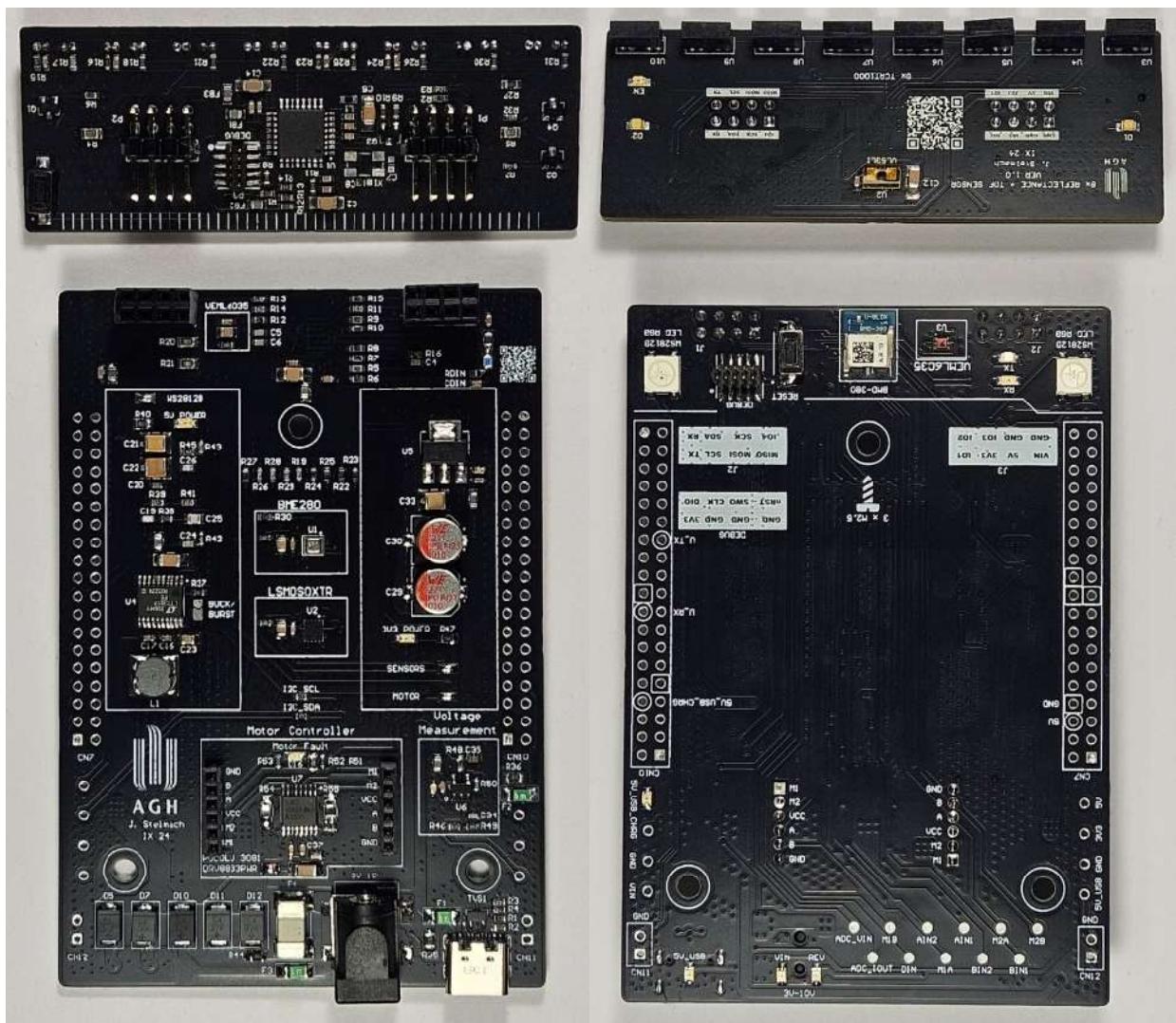
Rys. 44 Fotografia w pełni zmontowanej podstawy Line-Followera

### ROZDZIAŁ 3

#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

## 3.2 Montaż i uruchamianie modułów LF-Mainboard oraz LF-Reflectance-Sensor

Prototypy widoczne na Rys. 45 zostały zmontowane ręcznie. Planowanym sposobem montażu końcowej wersji jest montaż z wykorzystaniem pieca rozpływowego. Szczególną uwagę poświęcono czujnikom VL53L1 i BME280, które są wrażliwe na warunki lutowania. Ze względu na ich wrażliwość, lutowanie tych elementów wykonano dopiero po dokładnym umyciu płytki, unikając użycia topnika. Konieczność zachowania czystości wynikała z ryzyka uszkodzenia czujnika wilgotności w BME280 oraz elementów optycznych czujnika VL53L1 przez pozostałości topnika. Proces lutowania tych elementów przeprowadzono przy użyciu podgrzewacza oraz niskotemperaturowej pasty lutowniczej z dodatkiem bizmutu (MECHANIC typ: V4B45, stop: Sn42Bi58). Płyty LF-Mainboard wraz z LF-Reflectance-Sensor łączą się na wcisk bez użycia dodatkowych połączeń tak jak przewidziano w założeniach.



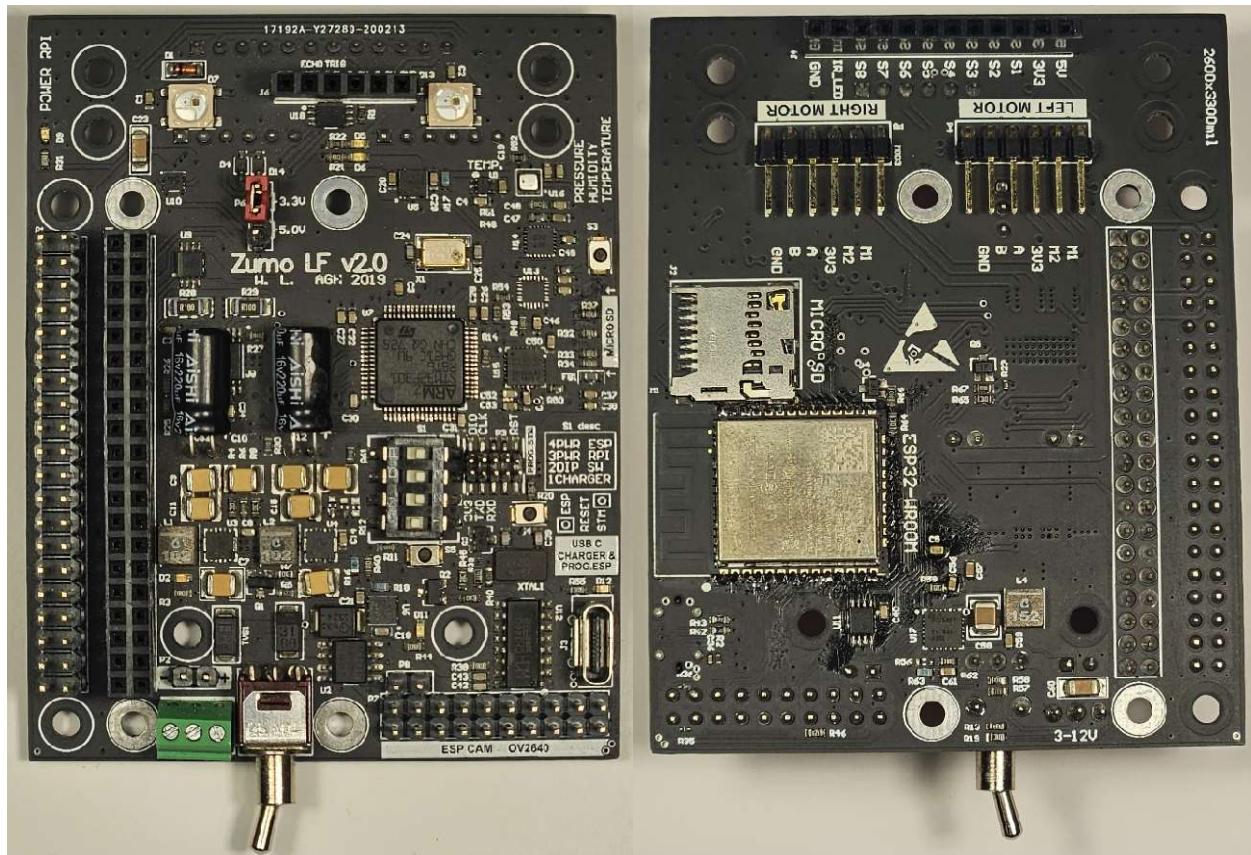
Rys. 45 Fotografia zmontowanych modułów Line-Followera, LF-Mainboard oraz LF-Reflectance-Sensor

### ROZDZIAŁ 3

#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

##### 3.2.1 Porównanie z prekursorem – LF-Zumo v2.0

Jednym z celów stworzenia Line-Followera było jego uproszczenie. Komponenty zostały rozmieszczone na większej powierzchni i pogrupowane, dzięki wprowadzeniu do projektu dodatkowej modularności. Taki zabieg ułatwia zaznajomienie z platformą a dodatkowe opisy umożliwiają pracę z nią nawet bez dostępu do dokumentacji. Mimo tych zabiegów użycie NUCLEO-STM32G491RE umożliwiło poszerzenie funkcjonalności o zastosowanie dodatkowych czujników zgodnych ze standardem microBUS. Nie było to możliwe na poprzedniej platformie. Dodatkowo wprowadzenie modułu BMD-380 pozwoliło na zmniejszenie ilości dodatkowych komponentów potrzebnych do uruchomienia mikrokontrolera a wbudowany tor radiowy, w tym obsługa BLUETOOTH zlikwidowała potrzebę użycia modułu ESP-32. Poniżej na Rys. 46 znajdują się zdjęcia platformy LF-Zumo v2.0



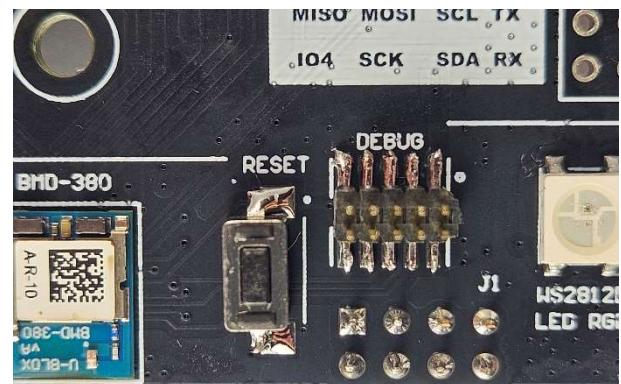
Rys. 46 Zdjęcia platformy LF-Zumo v2

### 3.2.2 Diagnostyka problemów w trakcie uruchamiania LF-Mainboard

Po zmontowaniu płyt, pojawiło się kilka nieprzemyślanych rozwiązań, które w celu zapewnienia niezawodności działania i użytkowania wymagają poprawy. Błędy te nie były krytyczne i w większości udało się je rozwiązać bez przeprojektowania całości płyty, przykładowo problem z opisami wspomniany na początku tego rozdziału.

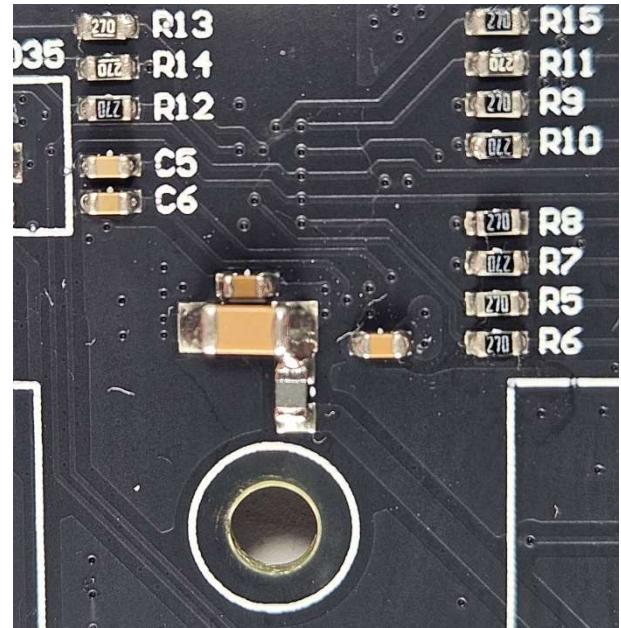
#### Diagnostyka problemów z rozmieszczeniem niektórych komponentów

Brak modelu 3D spowodował, że złącze programatora (DEBUG) znajduje się zbyt blisko do przycisku RESET (Rys. 47), złącze nie nachodziło w całości na gniazdo i powodowało to problemy z programowaniem modułu BMD-380. W przyszłości warto wziąć to pod uwagę i złącze programatora umieszczać w odpowiednio dużej odległości od wystających elementów.



Rys. 47 Fotografia przedstawiająca tymczasowe rozwiązanie problemu ze złączem programatora na płycie LF-Mainboard

Innym problemem, który może sprawiać trudności w docelowym zastosowaniu, jest lokalizacja rdzenia ferrytowego dostarczającego zasilanie do BMD-380 (Rys. 48). Znajduje się on bardzo blisko mosiężnego dystansu, co w przypadku nieostrożnego użytkowania może prowadzić do kontaktu tych elementów. W skrajnych przypadkach, zwłaszcza przy użyciu przewodów typu goldpin, istnieje ryzyko zwarcia. Rozwiązaniem w obecnym projekcie jest unikanie luźnych przewodów, jednak w sytuacji, gdy moduł będzie wykorzystywany w nieprzewidziany sposób, zagrożenie nadal pozostaje. Dlatego w przyszłej wersji projektu planuje się umieszczenie tego elementu w większej odległości, co zwiększy bezpieczeństwo.

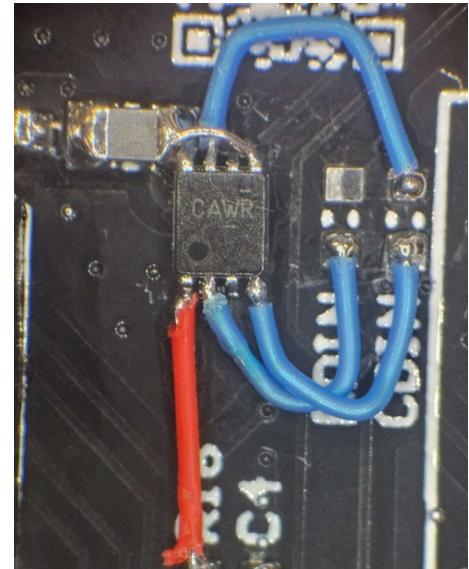


Rys. 48 Fotografia przedstawiająca problem odległości rdzenia ferrytowego od dystansu mosiężnego na płycie LF-Mainboard

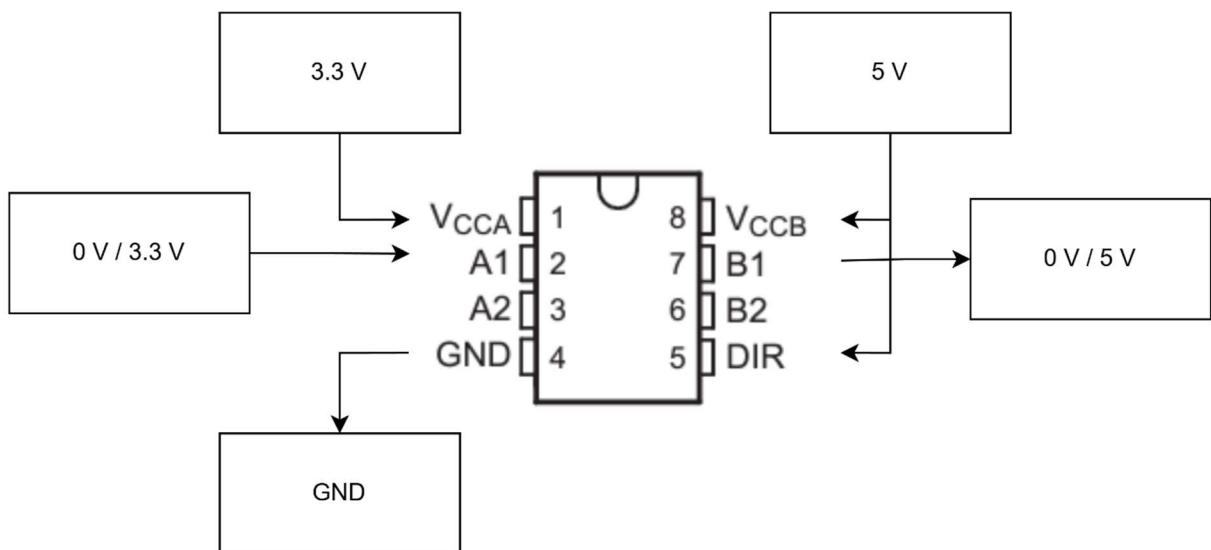
## Diagnostyka problemów z uruchomieniem diod RGB WS2812B

W wyniku pierwszego uruchomienia okazało się, że diody WS2812B wymagają konwertera poziomów logicznych. Ta kwestia często jest pomijana przy modułach dostępnych w intrenecie, ponieważ w skrajnych przypadkach układ działa (zwłaszcza jeżeli napięcia oscylują w odległości kilkunastu mV od napięcia progowego – jakiekolwiek zakłócenia potrafią wtedy wzbudzić układ). Całość została zmontowana przy użyciu przewodów połączeniowych metodą „point to point” (Rys. 49), a działający już układ zostanie uwzględniony na schematach poprawionej wersji LF-Mainboard. Dla ukazania skali na fotografii po prawej kod QR ma 5mm szerokości, a zdjęcie wykonane zostało z wykorzystaniem mikroskopu.

W celu zamiany poziomów logicznych użyty został układ bufora trójstanowego - SN74LVC2T45, schemat na Rys. 50. Zastosowanym w docelowym rozwiązaniu układem będzie jednokanałowy konwerter poziomów SN74LV1T34, jest on buforem logicznym o zmniejszonych poziomach napięć wejściowych tak aby wspierał konwersję poziomów oraz wymaga jedynie pojedynczego zasilania [24].



Rys. 49 Fotografia zmodyfikowanej linii sterującej diodami WS2812B pod mikroskopem

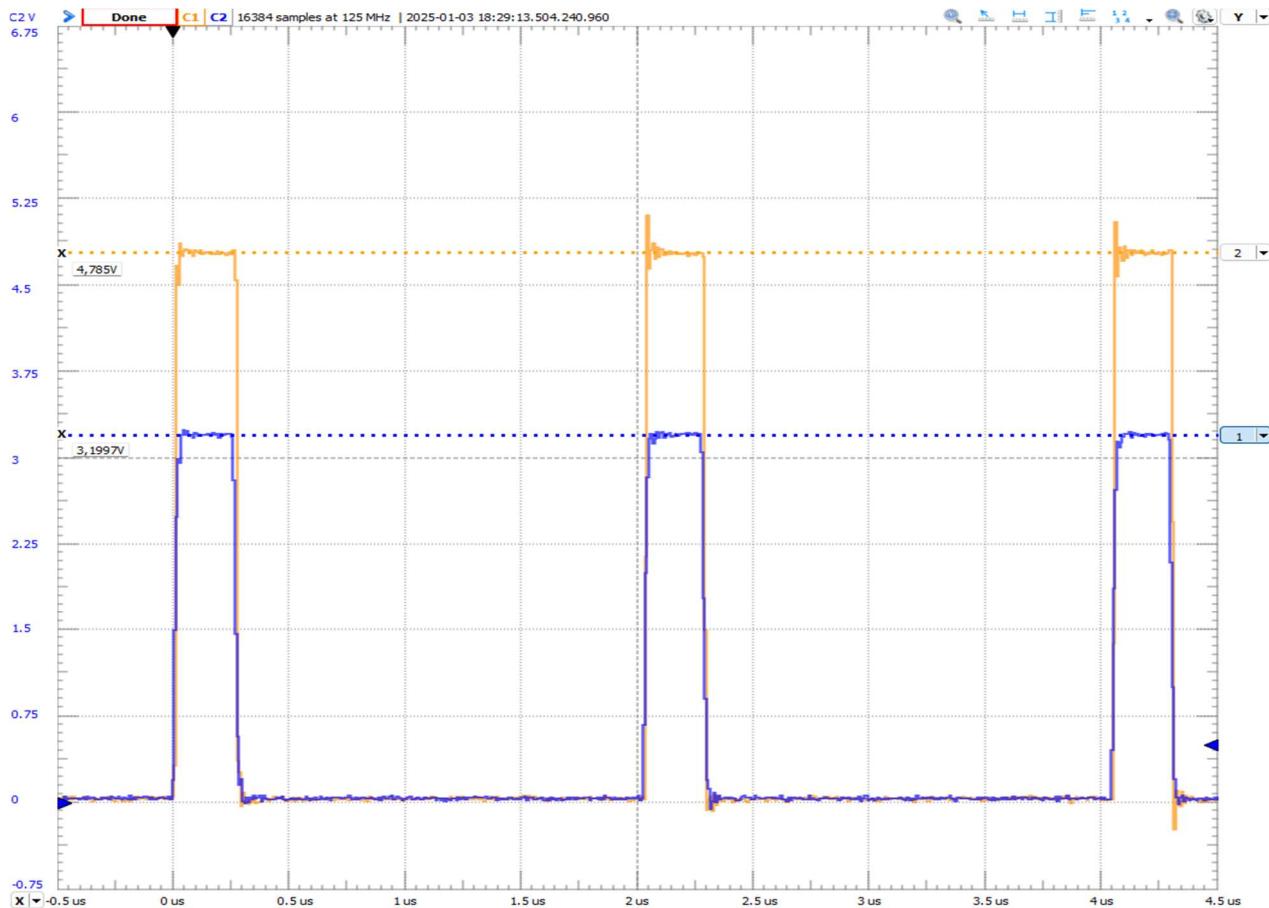


Rys. 50 Schemat blokowy podłączenia bufora trójstanowego jako konwerter poziomów

### ROZDZIAŁ 3

#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

Pomiary zbudowanego konwertera zostały przeprowadzone przy użyciu ANALOG DISCOVERY 3 [25] z nakładką umożliwiającą podłączenie sond oscyloskopowych. Z racji dydaktycznego charakteru projektu tego typu urządzenie będzie często towarzyszyło pracy z Line-Followerem. Wyniki z Rys. 51 jasno pokazują, że układ działa, a poziom napięcia z 3,2 V jest konwertowany na 4,79 V co jest wystarczające do poprawnego działania układu sterowania.



Rys. 51 Oscylogram działania zbudowanego konwertera poziomów, napięcia przed i po konwerterze

### Diagnostyka problemu z uruchomieniem LSM6DS0XTR

Układ ten po zamontowaniu nie identyfikował się na żadnym z możliwych adresów, po próbie ponownego przylutowania problem dalej występował, a ze względu na obudowę LGA nie było możliwe wykonanie odpowiednich poprawek. Prawdopodobnym powodem braku reakcji jest brak rezystorów podciągających i podłączenie niektórych sygnałów (zgodnie z notą katalogową) bezpośrednio pod szynę zasilającą, co mogło spowodować zwarcie w układzie. Problem ten zostanie rozwiązyany wraz z poprawioną wersją prototypowej płyty LF-Mainboard.

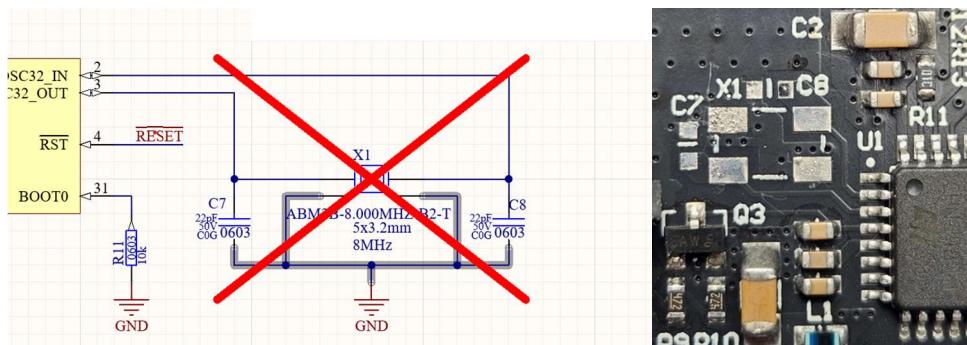
### ROZDZIAŁ 3

#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

#### 3.2.3 Diagnostyka problemów w trakcie uruchamiania LF-Reflectance-Sensor

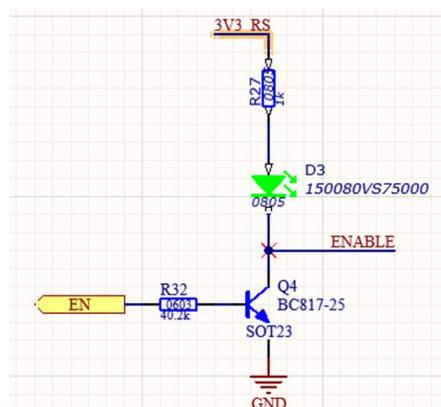
W trakcie testów został wykryty błąd, przeoczone zostało podłączenie wysokoczęstotliwościowego oscylatora kwarcowego pod wejścia odpowiadające za niskoczęstotliwościowy oscylator taktujący RTC mikrokontroler STM32L051K8T6, ponieważ w obudowie LQFP32 nie ma wyprowadzonych połączeń pod zewnętrzny wysokoczęstotliwościowy oscylator kwarcowy. W związku z tym błędem, rezonator kwarcowy został zdemontowany oraz został użyty wbudowany generator RC (Rys. 52).

Sytuacja ta poskutkowała uproszczeniem projektu. Precyza oscylatora kwarcowego nie jest wymagana w układzie, gdzie generator RC jest wystarczający, a jego brak ogranicza koszty budowy pojedynczej płytki.



Rys. 52 Schemat oraz fotografia przedstawiająca zdemontowany oscylator kwarcowy X1 wraz z pojemnościami C7 oraz C8

Drugim problemem był zbyt duży rezistor ograniczający prąd bramki tranzystora Q4 włączającego czujnik linii, R32 na schemacie z Rys. 53 – z tego względu oraz mniejszemu wzmacnieniu pradowemu tranzystora Q4, odkładało się na nim zbyt duże napięcie co powodowało pogorszenie działania czujników TCRT1000. Zdecydowano na zamianę jego wartości na  $10\text{ k}\Omega$  w celu poprawnego nasycenia tranzystora.



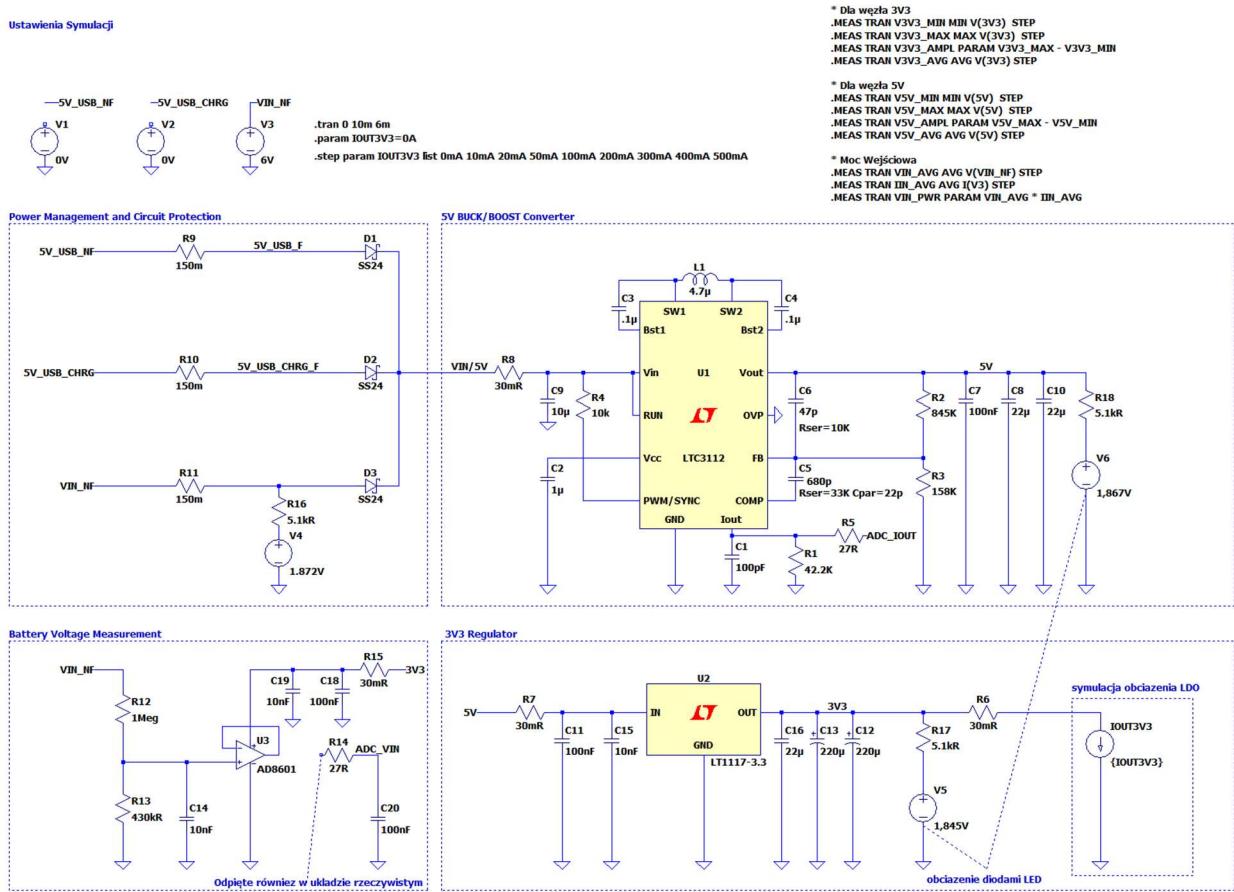
Rys. 53 Schemat przedstawiający klucz tranzystorowy zasilający zasilanie na czujnik położenia względem linii

## ROZDZIAŁ 3

### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

### 3.3 Pomiary oraz symulacja sekcji zasilania LF-Mainboard

#### 3.3.1 Omówienie modelu symulacyjnego sekcji zasilania



### ROZDZIAŁ 3

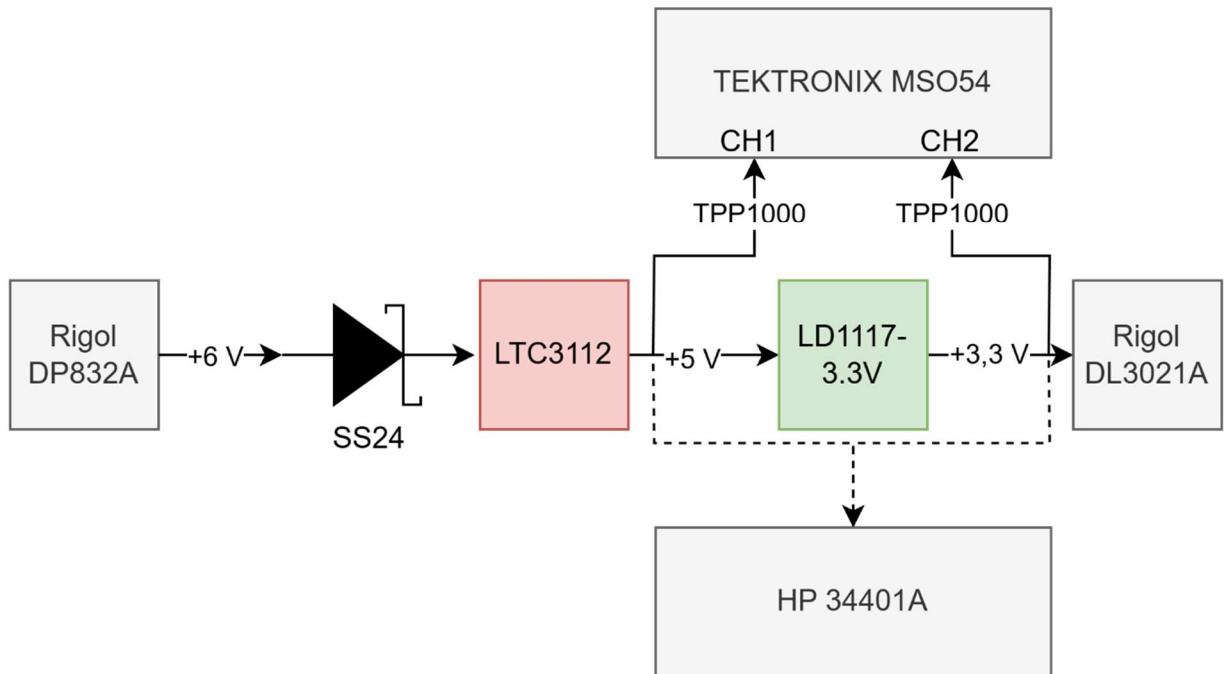
#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

##### 3.3.2 Omówienie stanowiska pomiarowego sekcji zasilania

Pomiary zostały wykonane po zmontowaniu płyty LF-Mainboard. W celu pomiaru sekcji zasilania oprócz rozpięcia wszystkich zworek (wszystkich elementów oznaczonych symbolem JP\* na schematach urządzenia z **złącznika A**) usunięty został rezystor znajdujący się na wyjściu układu AD8601 (układ BMD-380 nadal pobierał energię będąc zasilany poprzez rezystor znajdujący się na wyjściu wzmacniacza AD8601 oraz wewnętrzną diodę zabezpieczającą wejście układu). Wszystkie napięcia znajdują się na złączach służących do podłączenia zewnętrznej płyty LF-Reflectance-Sensor, wszystkie pomiary przeprowadzane w odniesieniu do wyprowadzeń GND. Schemat blokowy stanowiska pomiarowego znajduje się na rysunku Rys. 55, a samo stanowisko na Rys. 56.

Do wykonania pomiarów sprawności oraz tętnień zostały wykorzystane następujące urządzenia:

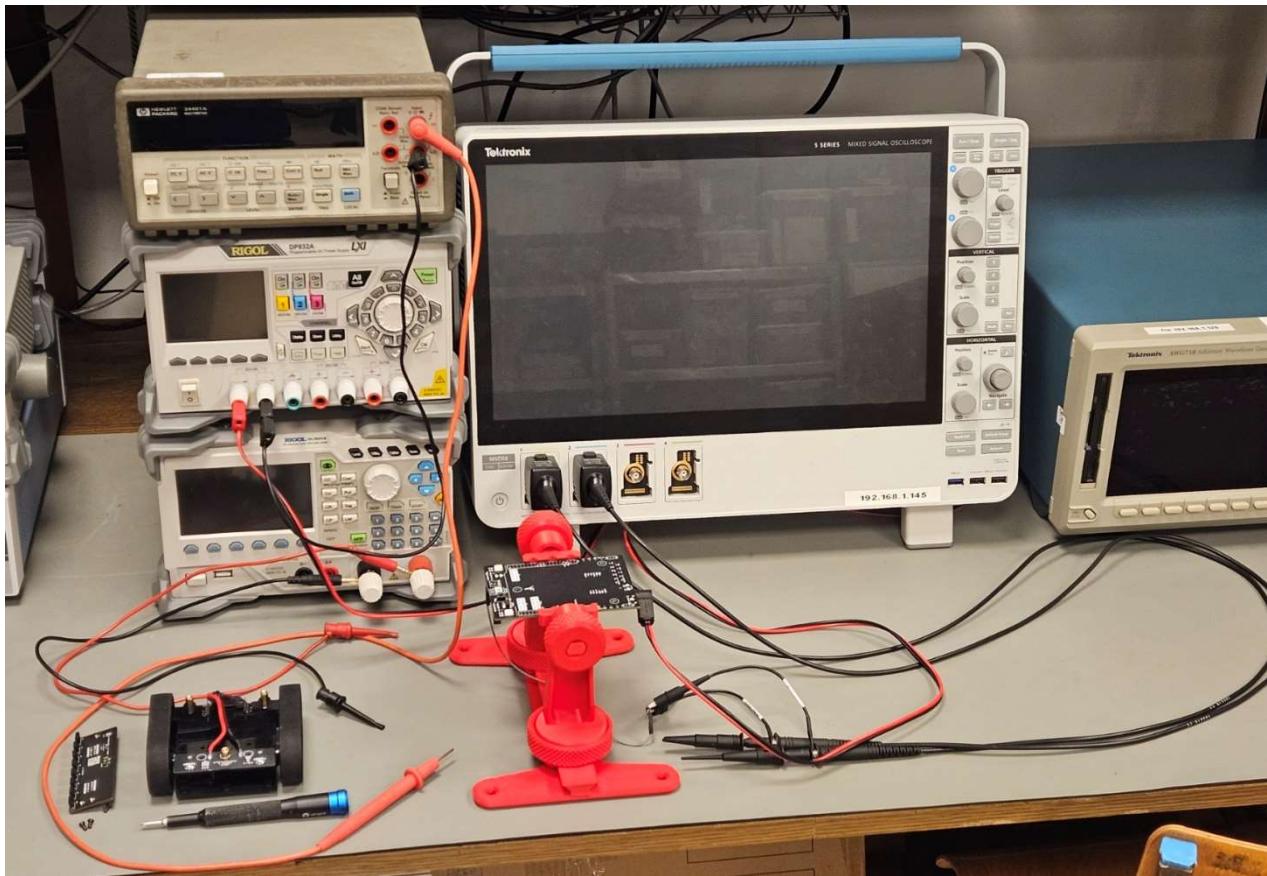
- Oścylkop TEKTRONIX MSO54 wraz z sondami TPP1000.
- Zasilacz Rigol DP832A jako źródło zasilania modułu.
- Obciążenie elektroniczne Rigol DL3021A jako stałoprądowe obciążenie sekcji zasilania.
- Multimetr HP 34401A za pomocą którego zmierzone zostały napięcia stałe panujące w obwodzie.



Rys. 55 Schemat blokowy obwodu pomiaru poziomów napięcia stałego oraz tętnień z uwzględnieniem diody SS24

### ROZDZIAŁ 3

#### Montaż oraz testy prototypu Line-Followera

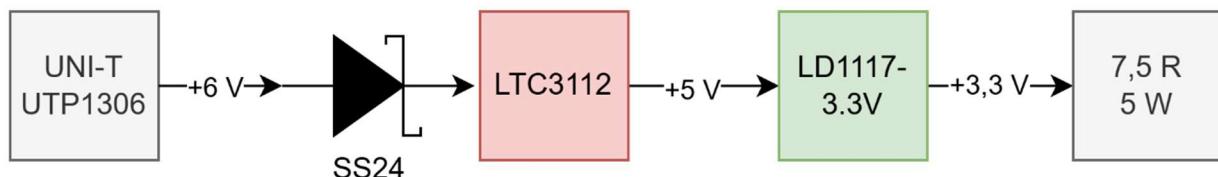


Rys. 56 Stanowisko służące do pomiarów tętnień oraz sprawności

Dodatkowo zdecydowano o wykonaniu analizy termicznej pod obciążeniem w celu sprawdzenia stabilności oraz niezawodności układu w trakcie długiego czasu pracy. Schemat blokowy układu pomiarowego przedstawiono na Rys. 57, a jego zdjęcie na Rys. 58.

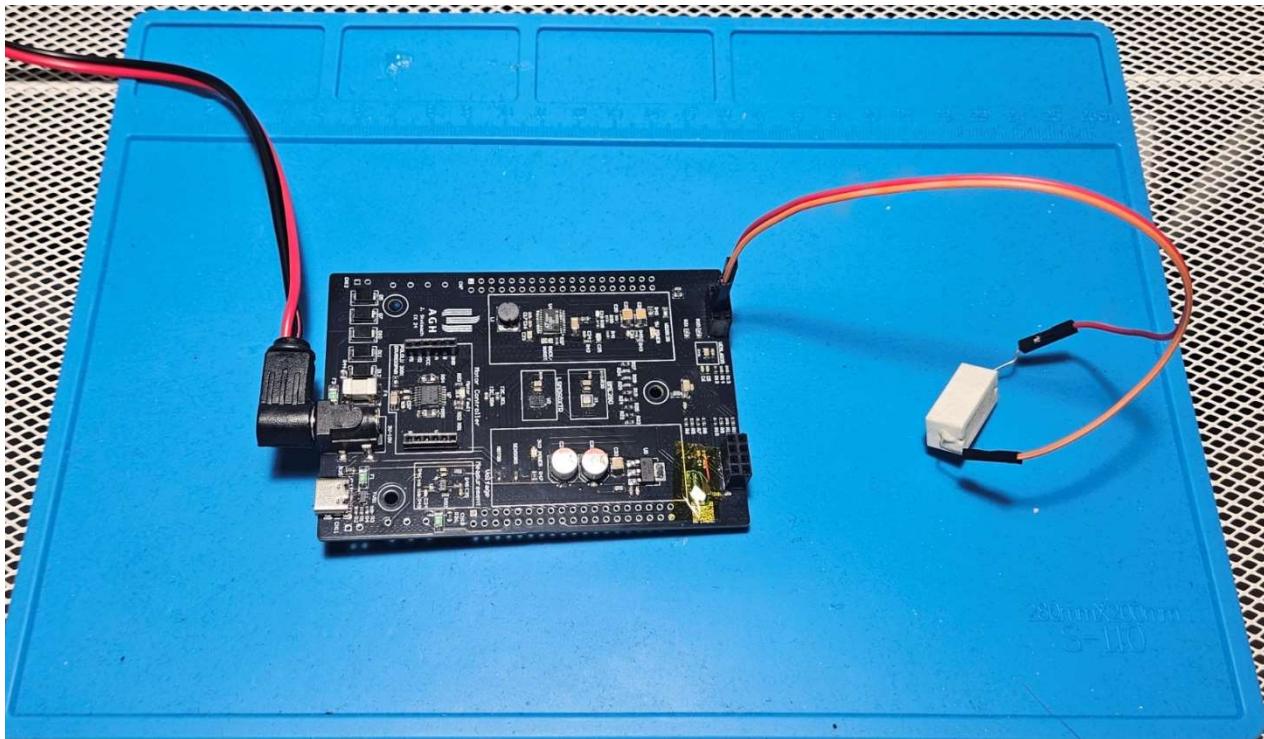
W jego skład wchodzą:

- Kamerę termowizyjną UNI-T UTi721M wraz z aplikacją mobilną do jej obsługi.
- Obciążenie w postaci rezystora ceramiczny THT o mocy 5 W i rezystancji  $7,5\ \Omega$  (wymusił w obwodzie wyjściowym LDO prąd na poziomie 435 mA).
- Zasilacz UNI-T UTP1306 jako źródło zasilania modułu.



Rys. 57 Schemat blokowy obwodu analizy temperaturowej z uwzględnieniem diody SS24

**ROZDZIAŁ 3**  
**Montaż oraz testy prototypu Line-Followera**

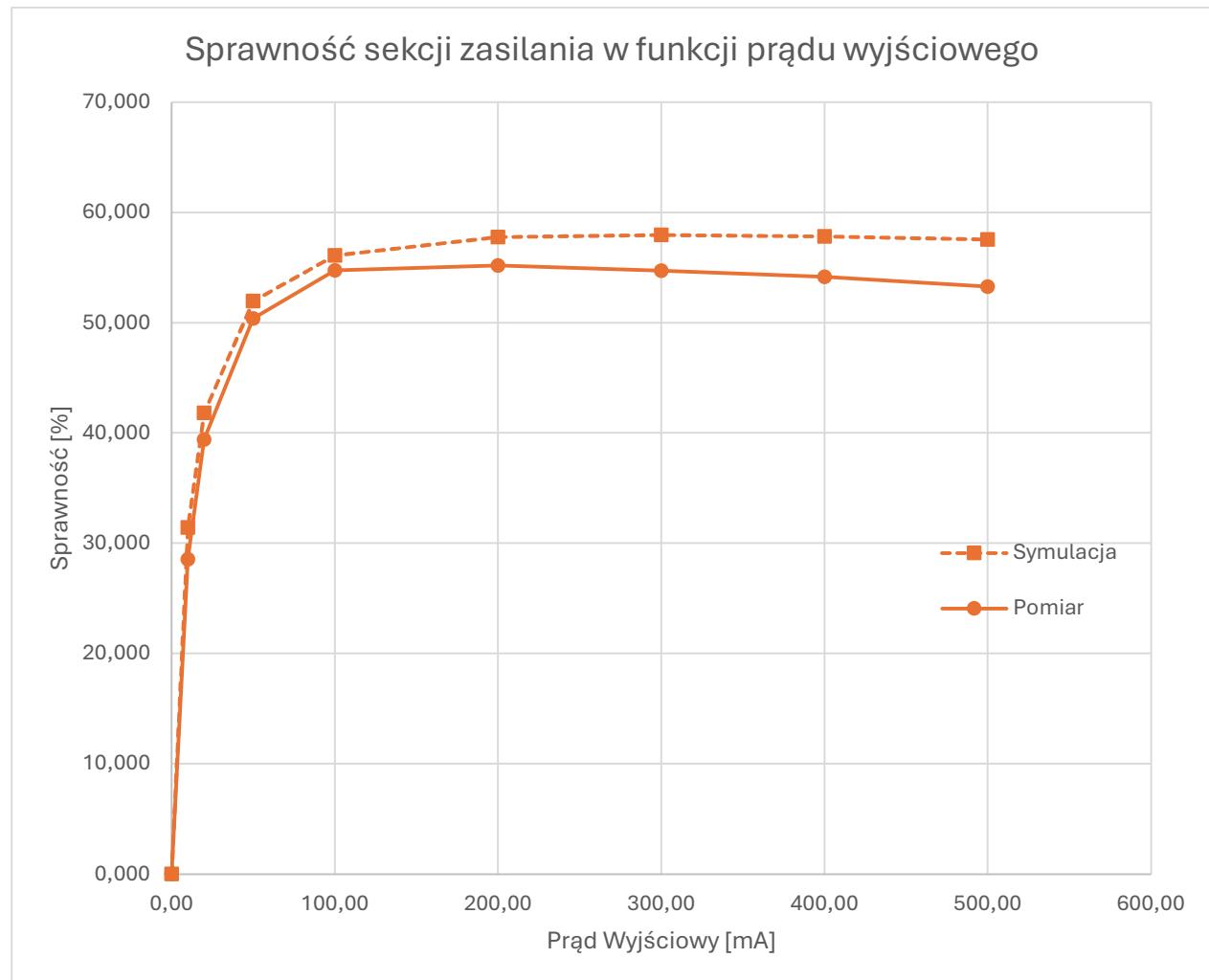


Rys. 58 Fotografia podłączenia Line-Followera do stanowiska testowego służącego do pomiarów za pomocą kamery termowizyjnej

### 3.3.3 Wyniki oraz podsumowanie pomiarów

#### Pomiary oraz symulacje sprawności

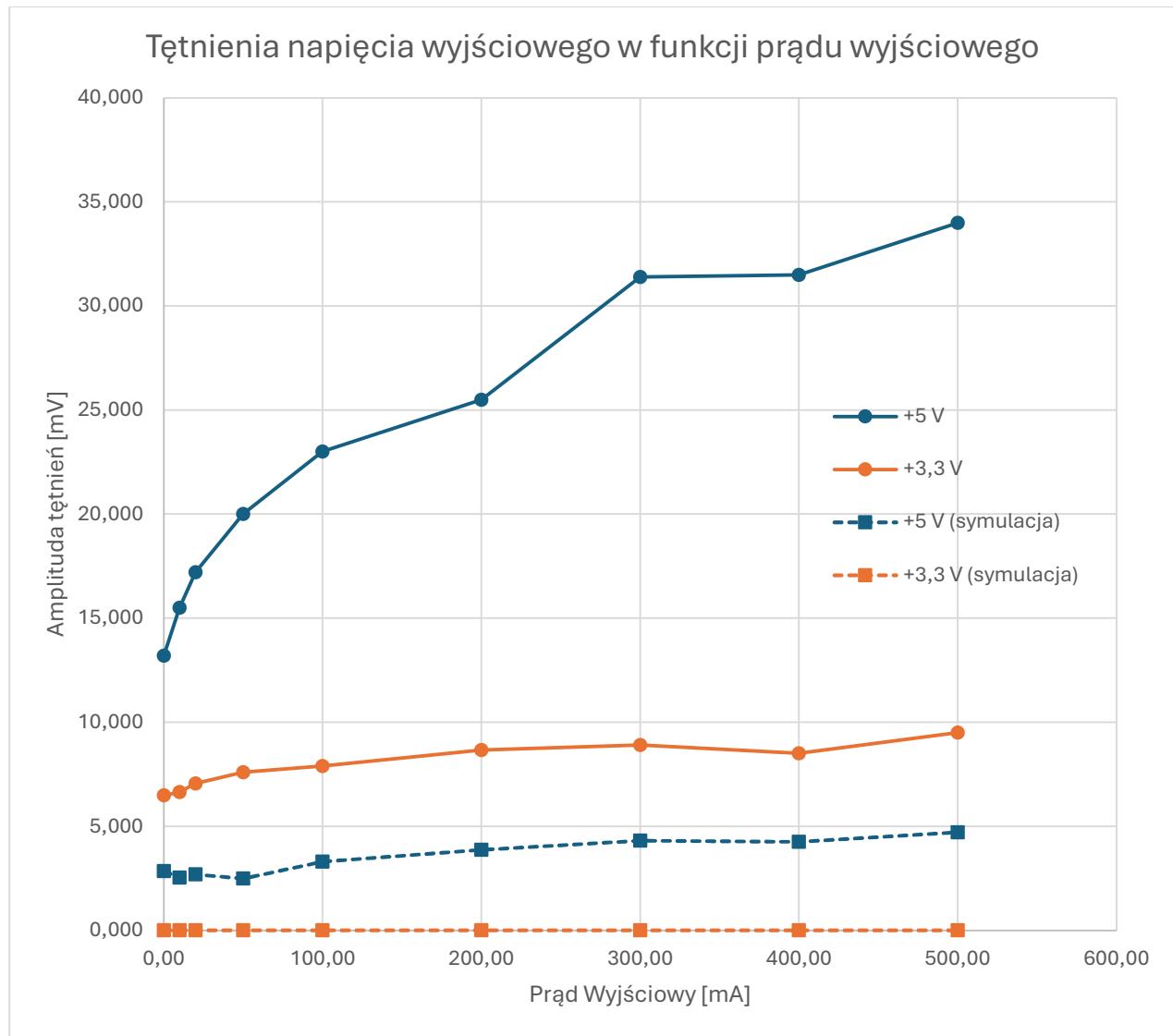
W wyniku wykonanych pomiarów oraz symulacji narysowano dwa wykresy zbiorcze zawierające charakterystyki sprawności energetycznej w funkcji prądu obciążenia przy napięciu zasilania na poziomie 6V. Na poniższym wykresie (Rys. 59) możemy zaobserwować częściową zbieżność symulacji z rzeczywistymi pomiarami dla mniejszych obciążzeń. Problem pojawi się wraz ze zwiększeniem prądu wyjściowego. Bazując na danych pomiarowych znajdujących się w tabelach w **załączniku C**, spadek sprawności bezpośrednio wynika z nadmiernego spadku napięcia na LDO w układzie rzeczywistym porównując z symulacją. Może to być spowodowane zbyt idealnym modelem symulacyjnym (dostarczonym przez Analog Devices w ramach LTSpice) albo zwiększeniem strat wraz ze wzrostem temperatury układu scalonego w trakcie pracy przy granicznych obciążeniach.



Rys. 59 Wykres sprawności sekcji zasilania w funkcji prądu wyjściowego

## Pomiary oraz symulacje tętnień napięcia

Symulacja amplitudę tętnień, bez uwzględnienia rzeczywistych elementów pasożytniczych, dokładności przyrządów i zakłóceń wpływających na pomiar, cechuje się znacznym błędem (Rys. 60). Powoduje to, brak wierności odwzorowania rzeczywistych wartości mierzonych amplitud. Pomiary przeprowadzone w rzeczywistych warunkach znacznie odbiegały od wyników symulacji. Na taki wynik może się dodatkowo składać bardzo mały zakres pomiarowy oraz zakłócenia generowane przez same urządzenia, przykładowo obciążenie aktywne jakim był obciążany obwód.



Rys. 60 Wykres amplitud tętnienia napięcia przetwornicy oraz LDO w funkcji prądu wyjściowego

## Pomiary termiczne

Dodatkowe badanie przeprowadzone z wykorzystaniem kamery termowizyjnej potwierdziło, że po ustaleniu stabilnej temperatury układ działa poprawnie. W ciągu 30 minut ciągłego obciążania napięcie było stabilne, a temperatury układu nie przekroczyły 60 °C (Rys. 61), co ilustruje poniższe zdjęcie. Najbardziej rozgrzany element to podpięty rezystor w roli obciążenia, a jego temperatura oscyluje wokół 80 °C. W regionie R1 znajduje się LDO, jego temperatura pracy przy niemal maksymalnym obciążeniu wynosi 55 °C. Warto zaznaczyć, że przetwornica ma minimalnie podniesioną temperaturę natomiast induktor ma temperaturę otoczenia (region R2).



Rys. 61 Fotografia przedstawiająca rozkład temperatur po 30-minutowym obciążaniu sekcji zasilania

Bazując na tych obserwacjach, sekcja zasilania spełnia założenia projektowe, regulator liniowy nie przegrzewa się w pełnym zakresie swojej obciążalności a zakłócenia na wyjściu mieszczą się w zakresie 10mV amplitudy. Warto zaznaczyć, że jest to wartość nieosiągalna w normalnej pracy. Maksymalna zmierzona wartość prądu na zmontowanym urządzeniu w trakcie normalnej pracy, złączonym czujnikiem położenia linii oraz złączonymi wszystkimi diodami świecącymi wynosiła w trakcie testów 190 mA.

## **PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

W ramach niniejszej pracy zrealizowano główny cel, jakim było opracowanie i uruchomienie prototypu urządzenia typu Line-Follower. Projekt pozwolił nie tylko na implementację kluczowych założeń, ale także na identyfikację problemów i przygotowanie bazy do dalszego rozwoju. Porównując opracowany prototyp z jego poprzednikiem – LF-Zumo v2.0 – wprowadzono istotne zmiany oraz uproszczenia.

Zrealizowane zadania:

- Uruchomiono większość układów peryferyjnych takich jak BME280, VEML6035, DRV8833PWR, w tym czujnik wykrywania odchylenia od linii oraz prosty algorytm obliczający środek histogramu na bazie danych z czujników TCRT1000
- Opracowano uproszoną konstrukcję PCB, zapewniającą dodatkową przestrzeń na płytce w porównaniu do LF-Zumo v2, co umożliwia łatwiejsze wprowadzanie poprawek i modyfikacji
- Rozwiązano problemy wynikające z braku konwertera poziomów logicznych, co umożliwiło poprawne działanie układu diod LED RGB WS2812B.
- Stworzono dokumentację projektową oraz symulację sekcji zasilania urządzenia, pozwalającą na ogólne scharakteryzowanie jej parametrów.

Problemy i ograniczenia:

- Brak pełnej implementacji wszystkich założeń, takich jak tryb ręcznego sterowania pojazdem czy bardziej zaawansowana stabilizacja ruchu – zaprojektowane algorytmy stanowią tylko podstawę umożliwiającą przetestowanie urządzenia.
- Problemy z działaniem żyroskopu i akcelerometru wynikające z zastosowania obudowy LGA, utrudniającej modyfikacje na etapie testów.
- Ograniczenia oprogramowania symulacyjnego uniemożliwiły przeprowadzenie precyzyjnej symulacji działania wszystkich układów.
- Nie wykorzystano możliwości obsługi microBUS, co jednak nie wpływa na podstawową funkcjonalność urządzenia.
- Stwierdzono konieczność stosowania rezystorów podciągających w układach wrażliwych na uszkodzenia, nawet wbrew zaleceniom producenta.

## **PODSUMOWANIE I WNIOSKI**

Wnioski i plany rozwojowe:

- Nowa wersja płytki PCB powinna uwzględniać poprawki, takie jak rezistory podciągające, lepsze rozmieszczenie elementów oraz eliminacja konieczności stosowania improwizowanych rozwiązań.
- Rozszerzenie istniejących algorytmów o bardziej zaawansowane funkcje, w tym tryb nieautonomiczny oraz bardziej precyzyjne algorytmy sterowania pojazdem.
- Nowy prototyp ma uwzględniać pełną integrację z funkcjonalnościami, których realizacja nie była możliwa na obecnym etapie.

Pomimo napotkanych trudności, praca ta dostarczyła wielu cennych doświadczeń, które stanowią solidną podstawę do dalszego rozwoju projektu i opracowania jego ulepszonej wersji. Po wprowadzeniu poprawek projekt ma zostać opublikowany na stronie Instytutu Elektroniki AGH jako materiał edukacyjny wspierający rozwój kompetencji studentów w dziedzinie programowania oraz projektowania układów elektronicznych.

**SPIS ILUSTRACJI ORAZ TABEL**

Rys. 1 Robot typu line-follower budowany w ramach kursu budowy robotów na platformie FORBOT [2] .....	4
Rys. 2 przykładowy line-follower [2] oraz czarna linia wykonana z taśmy izolacyjnej wytyczająca tor jazdy.....	6
Rys. 3 Wizualizacja 3D prekursora zaprojektowanego Line-Followera, LF-Zumo v2.0 .....	7
Rys. 4 Schemat blokowy Line-Followera .....	9
Rys. 5 Wizualizacja pełnego modelu 3D, w pełni zmontowanego Line-Followera .....	10
Rys. 6 Wizualizacja 3D płyty głównej Line-Followera LF-Mainboard .....	11
Rys. 7 Wizualizacja 3D złącz zasilania Line-Followera od strony tylnej .....	12
Rys. 8 Wizualizacja 3D złącz zasilania Line-Followera z góry .....	12
Rys. 9 Schemat układu zabezpieczenia przed odwrotną polaryzacją oraz multiplekser źródeł zasilania .....	13
Rys. 10 Wizualizacja 3D przetwornicy LTC 3112 typu Buck-Boost wraz z potrzebnymi komponentami.....	14
Rys. 11 Schemat przetwornicy LTC3112 typu Buck-Boost wraz z potrzebnymi komponentami.....	14
Rys. 12 Wizualizacja 3D regulatora liniowego LD1117-3.3V wraz z potrzebnymi komponentami .....	15
Rys. 13 Schemat regulatora liniowego LD1117-3.3V wraz z potrzebnymi komponentami.....	15
Rys. 14 Schemat oraz wizualizacja 3D obwodu pomiaru napięcia zasilania .....	16
Rys. 15 Wizualizacja 3D modułu BMD-380 .....	16
Rys. 16 Schemat połączeń modułu BMD-380.....	17
Rys. 17 Schemat połączeń dwóch diod RGB WS2812B oraz wizualizacja 3D jednej diody.....	18
Rys. 18 Schemat oraz wizualizacja 3D połączeń czujnika BME280.....	18
Rys. 19 Schemat oraz wizualizacja 3D połączeń czujnika LSM6DS0XTR .....	19
Rys. 20 Schemat oraz wizualizacja 3D połączeń czujnika VEML6035 .....	19
Rys. 21 Wizualizacja 3D złącz umożliwiających podłączenie płyty przedniej Line-Followera, widok od góry....	20
Rys. 22 Wizualizacja 3D złącz umożliwiających podłączenie płyty przedniej Line-Followera, widok od dołu....	20
Rys. 23 Wizualizacja 3D płyty LF-Reflectance-Sensor.....	21
Rys. 24 Schemat podłączenia złącza z którego pozyskiwane jest zasilanie modułu LF-Reflectance-Sensor....	21
Rys. 25 Wizualizacja 3D mikrokontrolera STM32L051 wraz z wymaganymi komponentami.....	22
Rys. 26 Schemat połączeń mikrokontrolera STM32L051 wraz z wymaganymi komponentami.....	22
Rys. 27 Schemat oraz wizualizacja 3D czujnika TOF VL53L1.....	23
Rys. 28 Wizualizacja 3D sekcji czujników TCRT1000, widok z przodu.....	23
Rys. 29 Wizualizacja 3D sekcji czujników TCRT1000, widok z dołu .....	23
Rys. 30 Schemat połączeń sekcji czujników TCRT1000 .....	24
Rys. 31 Dodatkowe diody D1 oraz D2 umożliwiające sygnalizację pracy modułu .....	24
Rys. 32 Ilustracja działania sekcji czujników TCRT1000 jako dyskretnego czujnika położenia wzgldem linii ....	25
Rys. 33 Wizualizacja 3D modułu służącego do montażu terminali baterii w podstawie ZUMO.....	26
Rys. 34 Zbiór oryginalnych elementów składowych POLOLU ZUMO [21] .....	26
Rys. 35 Architektura komunikacji systemu wraz z informacjami jakie zawarte są na poszczególnych modułach .....	28

## SPIS ILUSTRACJI ORAZ TABEL

Rys. 36 Bajty występujące w przypadku nadania zapytania oraz odpowiedź .....	30
Rys. 37 Bajty występujące w przypadku nadania komendy oraz odpowiedź.....	30
Rys. 38 Schemat blokowy algorytmu obsługującego LF-Mainboard .....	31
Rys. 39 Schemat działania oprogramowania znajdującego się na płycie LF-Reflectance-Sensor .....	33
Rys. 40 Schemat blokowy podstawowego działania głównego algorytmu sterującego Line-Followerem.....	35
Rys. 41 Fotografia zmontowanego pojazdu Line-Follower od przodu.....	36
Rys. 42 Fotografia zmontowanego pojazdu Line-Follower od tyłu .....	36
Rys. 43 Fotografia wszystkich mechanicznych elementów składowych podstawy Line-Followera .....	37
Rys. 44 Fotografia w pełni zmontowanej podstawy Line-Followera .....	37
Rys. 45 Fotografia zmontowanych modułów Line-Followera, LF-Mainboard oraz LF-Reflectance-Sensor.....	38
Rys. 46 Zdjęcia platformy LF-Zumo v2 .....	39
Rys. 47 Fotografia przedstawiająca tymczasowe rozwiązanie problemu ze złączem programatora na płycie LF-Mainboard.....	40
Rys. 48 Fotografia przedstawiająca problem odległości rdzenia ferrytowego od dystansu mosiężnego na płycie LF-Mainboard .....	40
Rys. 49 Fotografia zmodyfikowanej linii sterującej diodami WS2812B pod mikroskopem .....	41
Rys. 50 Schemat blokowy podłączenia bufora trójstanowego jako konwerter poziomów .....	41
Rys. 51 Osciylogram działania zbudowanego konwertera poziomów, napięcia przed i po konwerterze .....	42
Rys. 52 Schemat oraz fotografia przedstawiająca zdemontowany oscylator kwarcowy X1 wraz z pojemnościami C7 oraz C8.....	43
Rys. 53 Schemat przedstawiający klucz tranzystorowy załączający zasilanie na czujnik położenia względem linii .....	43
Rys. 54 Schemat symulacyjny sekcji zasilania Line-Followera.....	44
Rys. 55 Schemat blokowy obwodu pomiaru poziomów napięcia stałego oraz tężnień z uwzględnieniem diody SS24 .....	45
Rys. 56 Stanowisko służące do pomiarów tężnień oraz sprawności.....	46
Rys. 57 Schemat blokowy obwodu analizy temperaturowej z uwzględnieniem diody SS24 .....	46
Rys. 58 Fotografia podłączenia Line-Followera do stanowiska testowego służącego do pomiarów za pomocą kamery termowizyjnej .....	47
Rys. 59 Wykres sprawności sekcji zasilania w funkcji prądu wyjściowego.....	48
Rys. 60 Wykres amplitud tężnienia napięcia przetwornicy oraz LDO w funkcji prądu wyjściowego.....	49
Rys. 61 Fotografia przedstawiająca rozkład temperatur po 30-minutowym obciążaniu sekcji zasilania .....	50
Tab. 1 Komendy wykorzystane w prototypowym oprogramowaniu Line-Followera.....	29

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministerstwo Edukacji Narodowej, „Rola robotyki w rozrywce,” [Online]. Available: <https://zpe.gov.pl/a/przeczytaj/DUpr2MS6R>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2023].
- [2] FORBOT, „Kurs budowy robotów – #7 – line follower, czyli bolid F1,” [Online]. Available: <https://forbot.pl/blog/kurs-budowy-robotow-line-follower-czyli-bolid-f1-id19363>. [Data uzyskania dostępu: 02 01 2025].
- [3] POLOLU, „Strona główna platformy Zumo "Zumo Robots and Accessories",” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/category/129/zumo-robots-and-accessories>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [4] STMicroelectronics, „Dokumentacja płyty ewaluacyjnej NUCLEO-STM32G491RE,” [Online]. Available: <https://www.st.com/en/evaluation-tools/nucleo-g491re.html#documentation>. [Data uzyskania dostępu: 03 01 2025].
- [5] MIKROE, „Specyfikacja standardu microBUS,” [Online]. Available: <https://download.mikroe.com/documents/standards/mikrobus/mikrobus-standard-specification-v200.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [6] MICROSOFT, „Dokumentacja Visual Studio Code,” [Online]. Available: <https://code.visualstudio.com/docs>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [7] ST, „Zintegrowane środowisko uruchomieniowe STM32CubeIDE,” [Online]. Available: <https://www.st.com/en/development-tools/stm32cubeide.html>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [8] WIKIPEDIA, „standard Bluetooth,” [Online]. Available: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Bluetooth>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [9] WIKIPEDIA, „standard USB,” [Online]. Available: <https://pl.wikipedia.org/wiki/USB>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [10] WIKIPEDIA, „Mobile robot,” [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile\\_robot](https://en.wikipedia.org/wiki/Mobile_robot). [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].

## BIBLIOGRAFIA

- [11] P. Bujak, *Projekt Inżynierski, "Dydaktyczna platforma samobieżnego pojazdu typu Line Follower"*, Akademia Górnictwo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- [12] W. Łukasik, *Projekt Inżynierski, "Rozszerzenie funkcjonalności dydaktycznej platformy samobieżnego pojazdu autonomicznego typu "line follower""*, Akademia Górnictwo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.
- [13] u-blox, „Dokumentacja modułu BMD-380,” [Online]. Available: [https://content.u-blox.com/sites/default/files/BMD-380\\_DataSheet\\_%28UBX-19039467%29.pdf](https://content.u-blox.com/sites/default/files/BMD-380_DataSheet_%28UBX-19039467%29.pdf). [Data uzyskania dostępu: 05 01 2025].
- [14] Worldsemi, „Dokumentacja diod LED RGB WS2812B,” [Online]. Available: <https://cdn-shop.adafruit.com/datasheets/WS2812B.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [15] NORDIC SEMICONDUCTOR, „Dokumentacja mikrokontrolera nRF52840,” [Online]. Available: [https://docs.nordicsemi.com/bundle/ps\\_nrf52840/page/keyfeatures\\_html5.html](https://docs.nordicsemi.com/bundle/ps_nrf52840/page/keyfeatures_html5.html). [Data uzyskania dostępu: 05 01 2025].
- [16] AUTOSPORT-BEARINGS, „Norma nakrętek DIN934/DIN493,” [Online]. Available: <https://www.autosport-bearings.co.uk/wp-content/uploads/2016/06/lock-nuts-DIN-943-493.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [17] ANALOG DEVICES, „Dokumentacja techniczna przetwornicy LTC3112,” [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/3112fd.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 02 01 2025].
- [18] P. Horowitz i H. Winfield, Sztuka elektroniki 1, Sulejówek: Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, 2022.
- [19] ANALOG DEVICES, „Dokumentacja wzmacniacza AD8601,” [Online]. Available: [https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8601\\_8602\\_8604.pdf](https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ad8601_8602_8604.pdf). [Data uzyskania dostępu: 03 01 2025].
- [20] POLOLU, „Dokumentacja złożenia platformy POLOLU ZUMO "Assembling the Zumo,"” [Online]. Available: <https://www.pololu.com/docs/0J54/3>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].

## BIBLIOGRAFIA

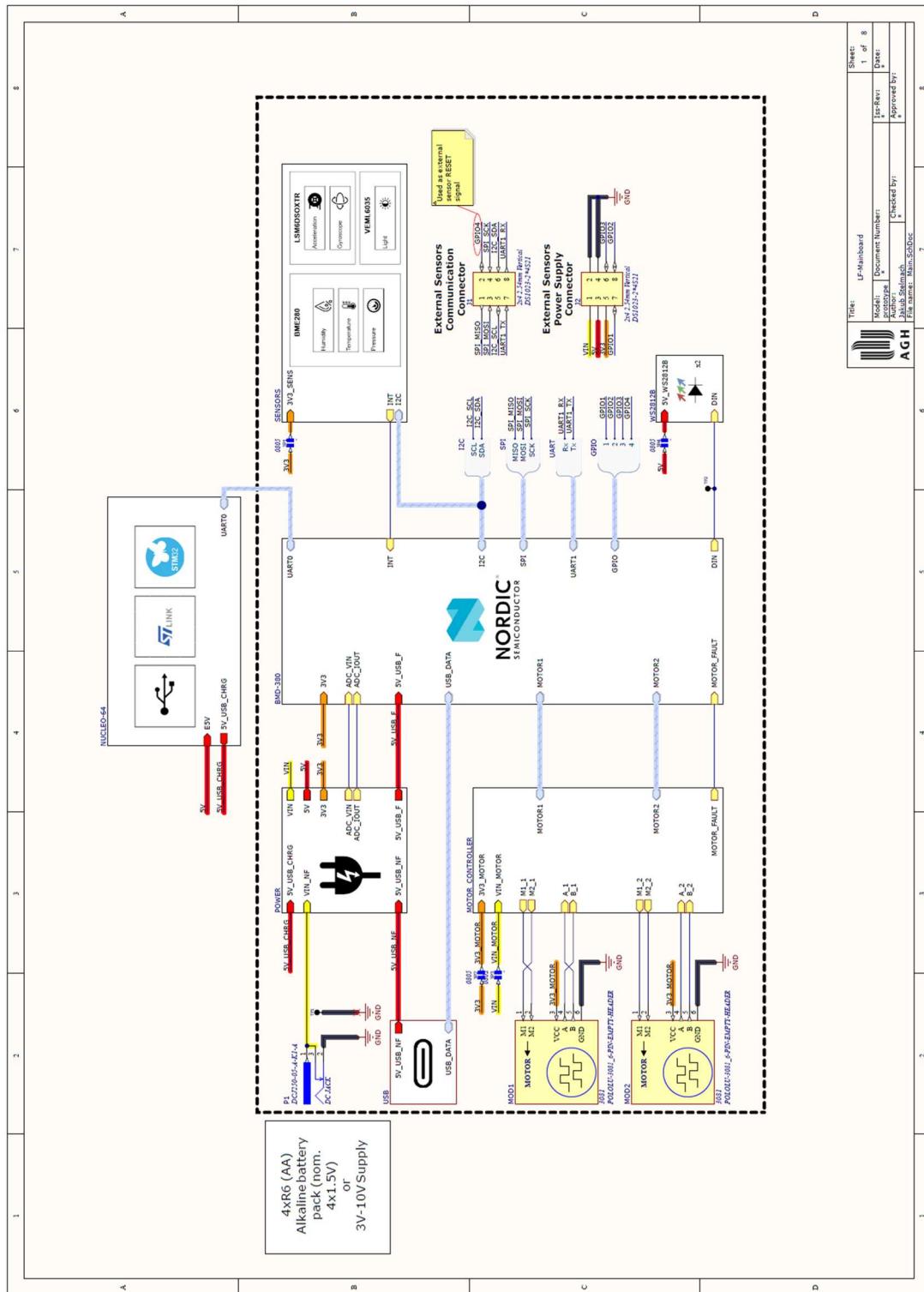
- [21] POLOLU, „Dokumentacja POLOLU ZUMO, spis komponentów "Introduction"," [Online]. Available: <https://www.pololu.com/docs/0J54/1>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [22] ZEPHYR Project, „Overview presentation,” [Online]. Available: <https://www.zephyrproject.org/wp-content/uploads/2024/12/Zephyr-Overview-20241203.pdf>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [23] NORDIC Semiconductor, „nRF Connect for VS Code,” [Online]. Available: <https://www.nordicsemi.com/Products/Development-tools/nRF-Connect-for-VS-Code>. [Data uzyskania dostępu: 30 12 2024].
- [24] TEXAS INSTRUMENTS, „Dokumentacja bufora SN74LV1T34,” [Online]. Available: [https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lv1t34.pdf?ts=1735889424922&ref\\_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F](https://www.ti.com/lit/ds/symlink/sn74lv1t34.pdf?ts=1735889424922&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F). [Data uzyskania dostępu: 03 01 2025].
- [25] DIGILENT, „Dokumentacja ANALOG DISCOVERY 3,” [Online]. Available: [https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-3/start?srsltid=AfmBOoqXZDhHitXXvAv6lpu0XfUpuGnX8aS6gmqrXZwMLhOW5P\\_K9gyC](https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-3/start?srsltid=AfmBOoqXZDhHitXXvAv6lpu0XfUpuGnX8aS6gmqrXZwMLhOW5P_K9gyC). [Data uzyskania dostępu: 05 01 2025].

**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

**ZAŁĄCZNIK A**

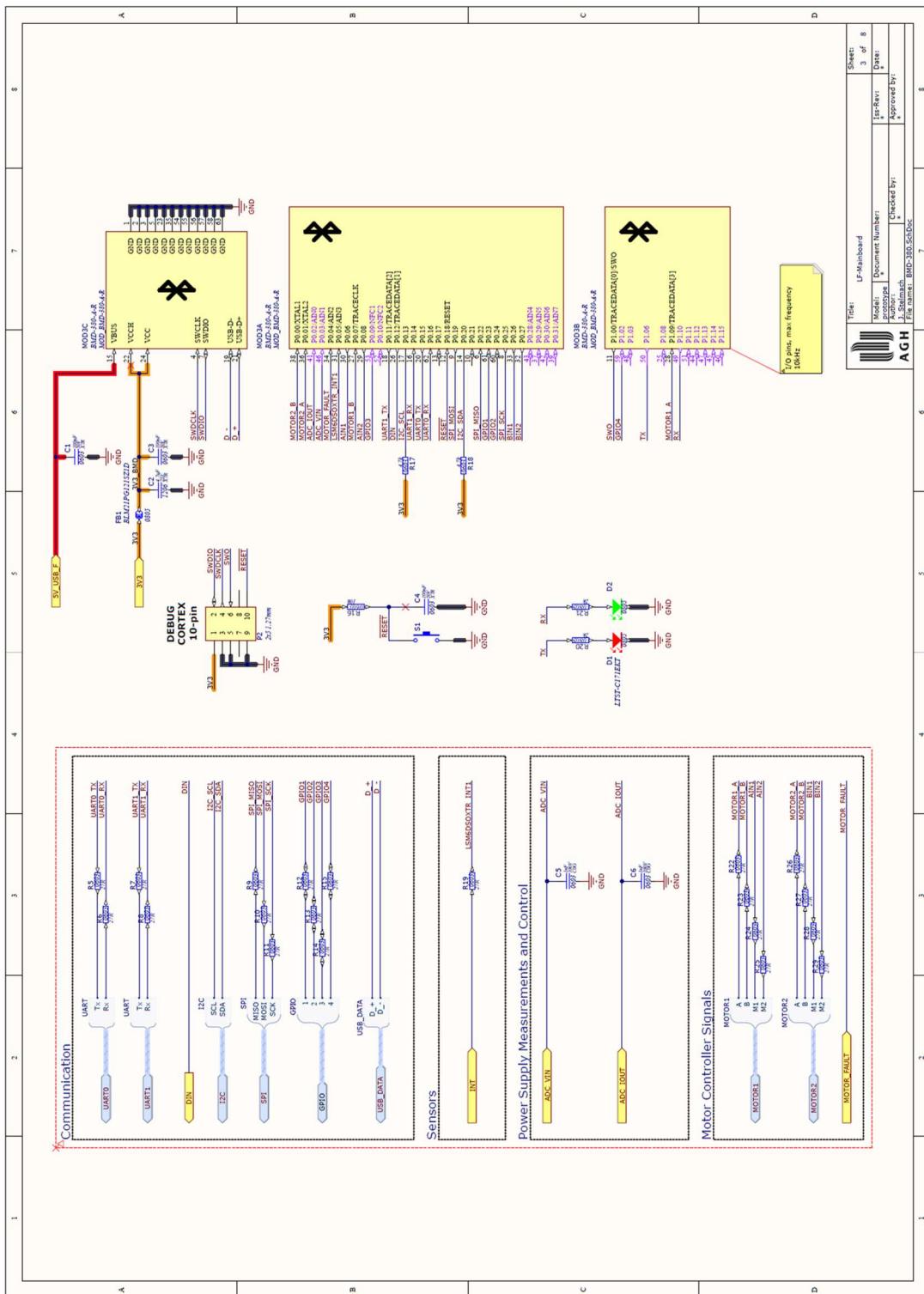
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, Main.SchDoc*



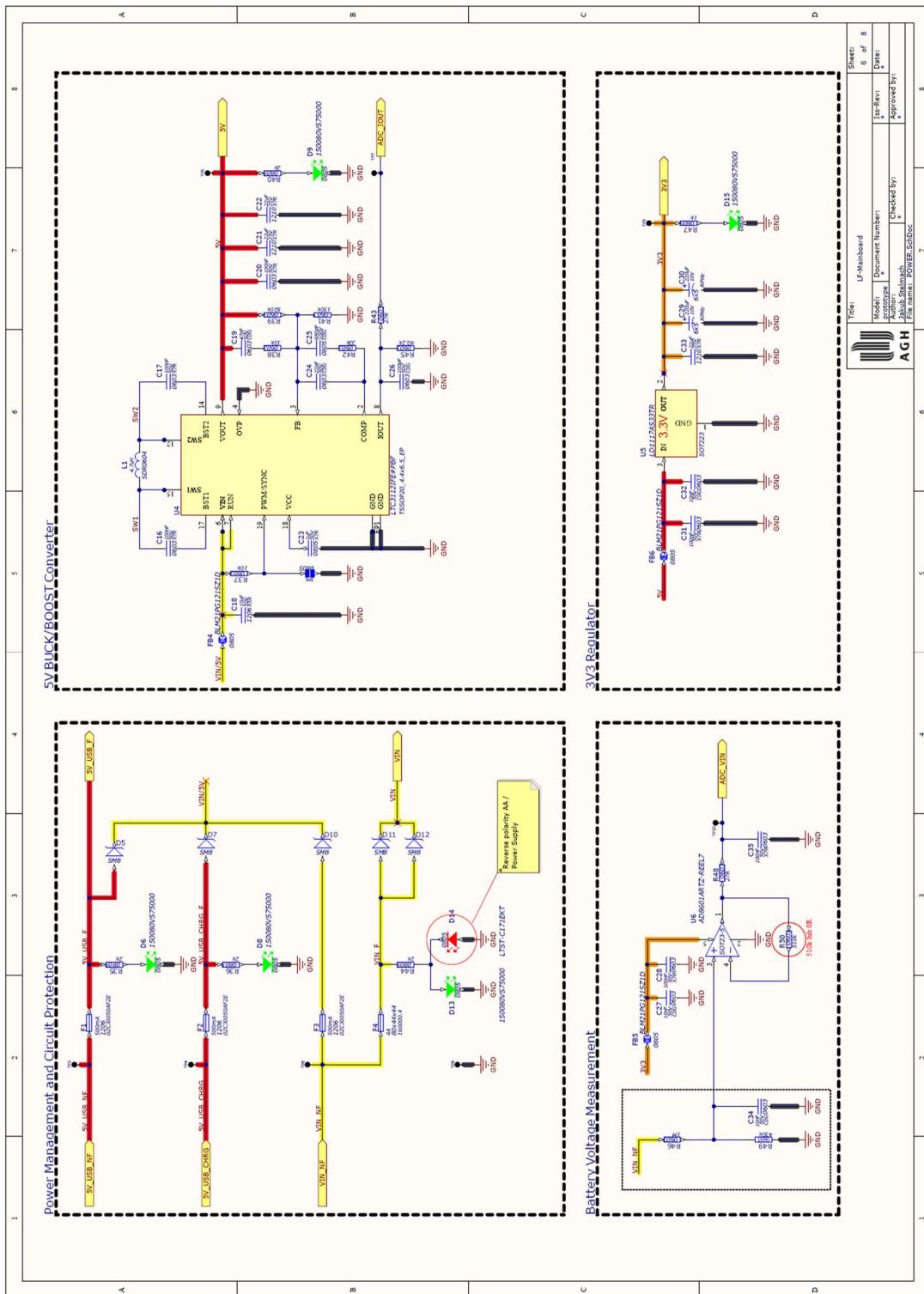
**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, BMD-380.SchDoc*



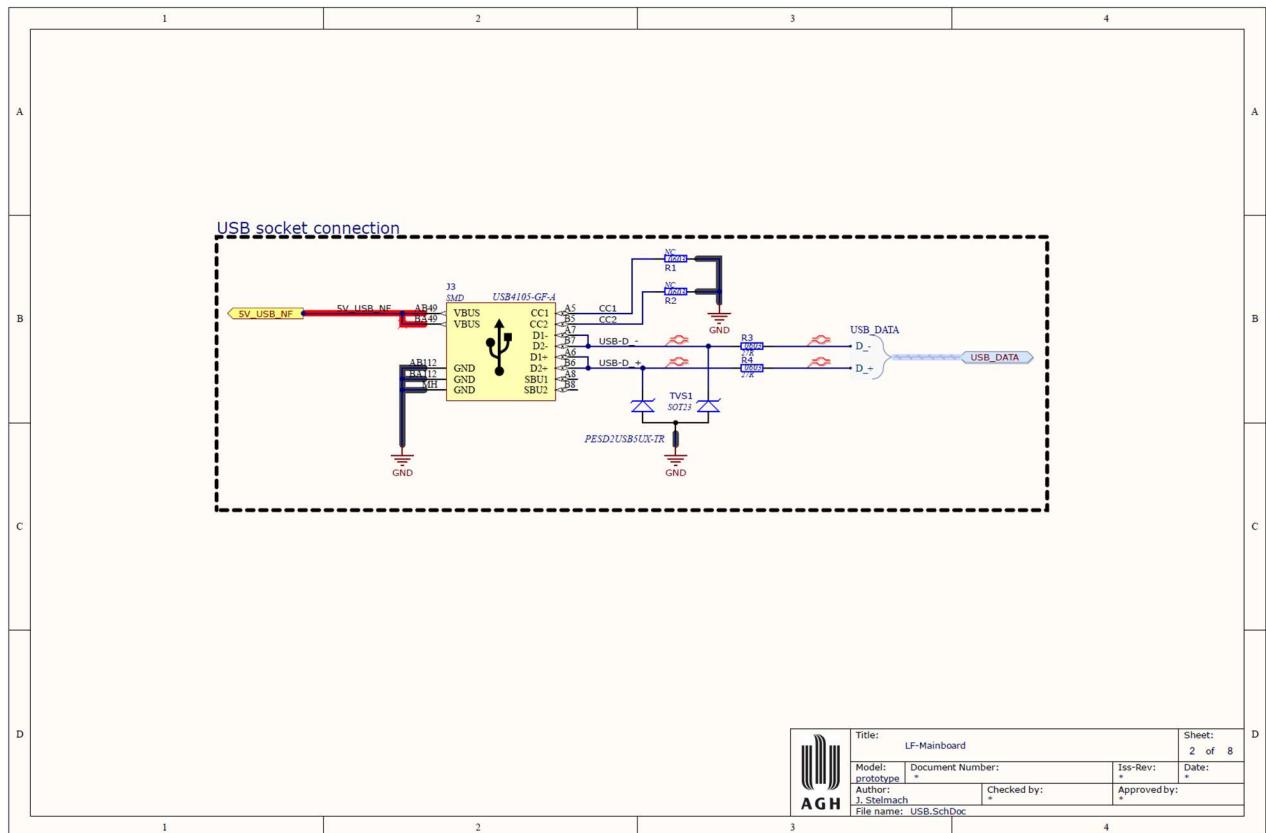
**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, POWER.SchDoc*

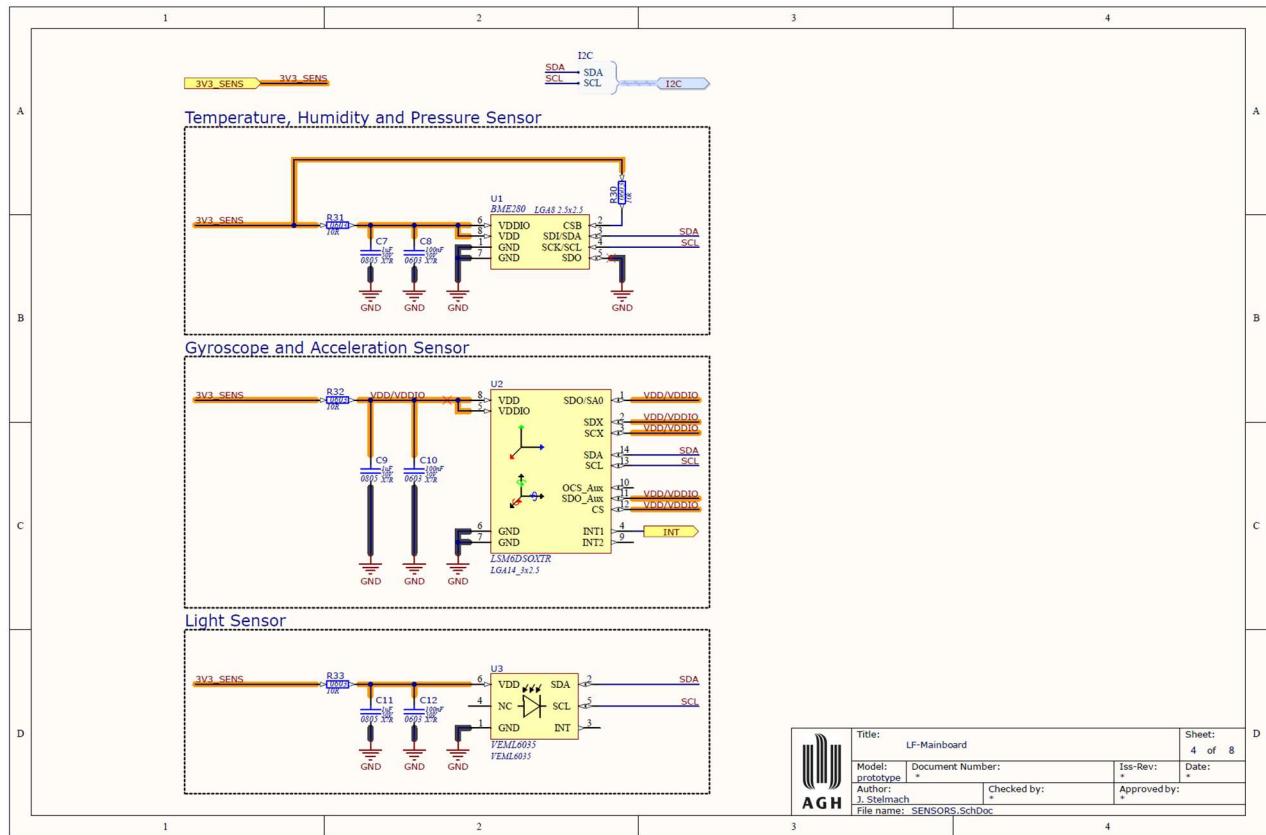


**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, USB.SchDoc*

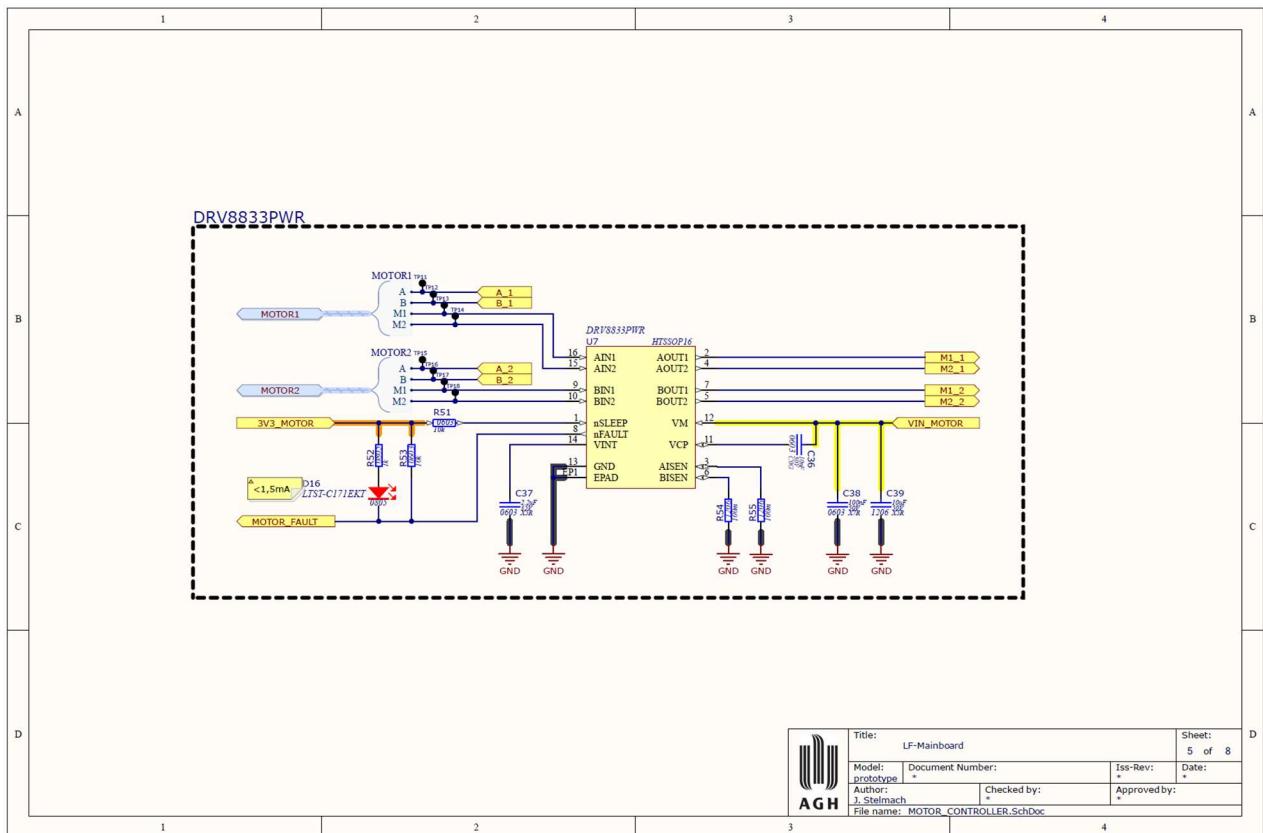


*LF-Mainboard, SENSORS.SchDoc*

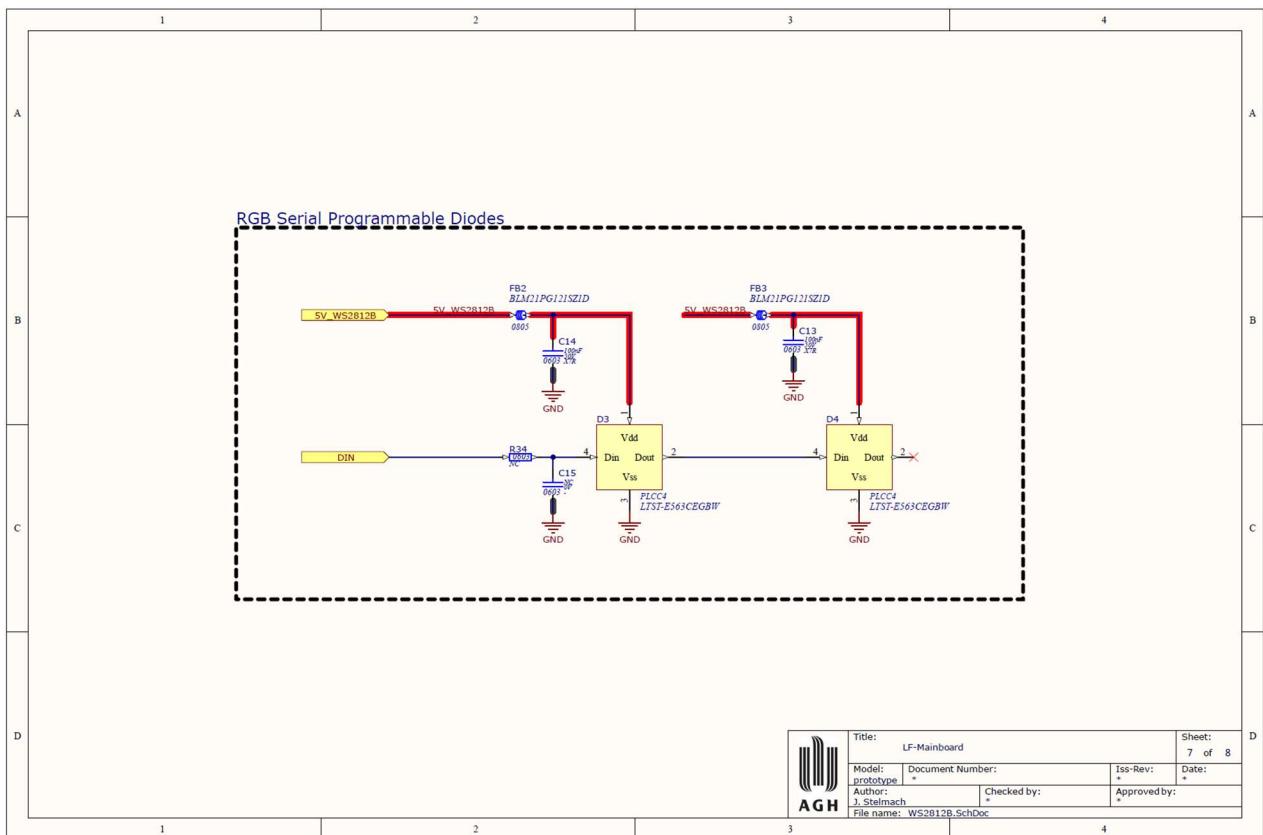


**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, MOTOR\_CONTROLLER.SchDoc*

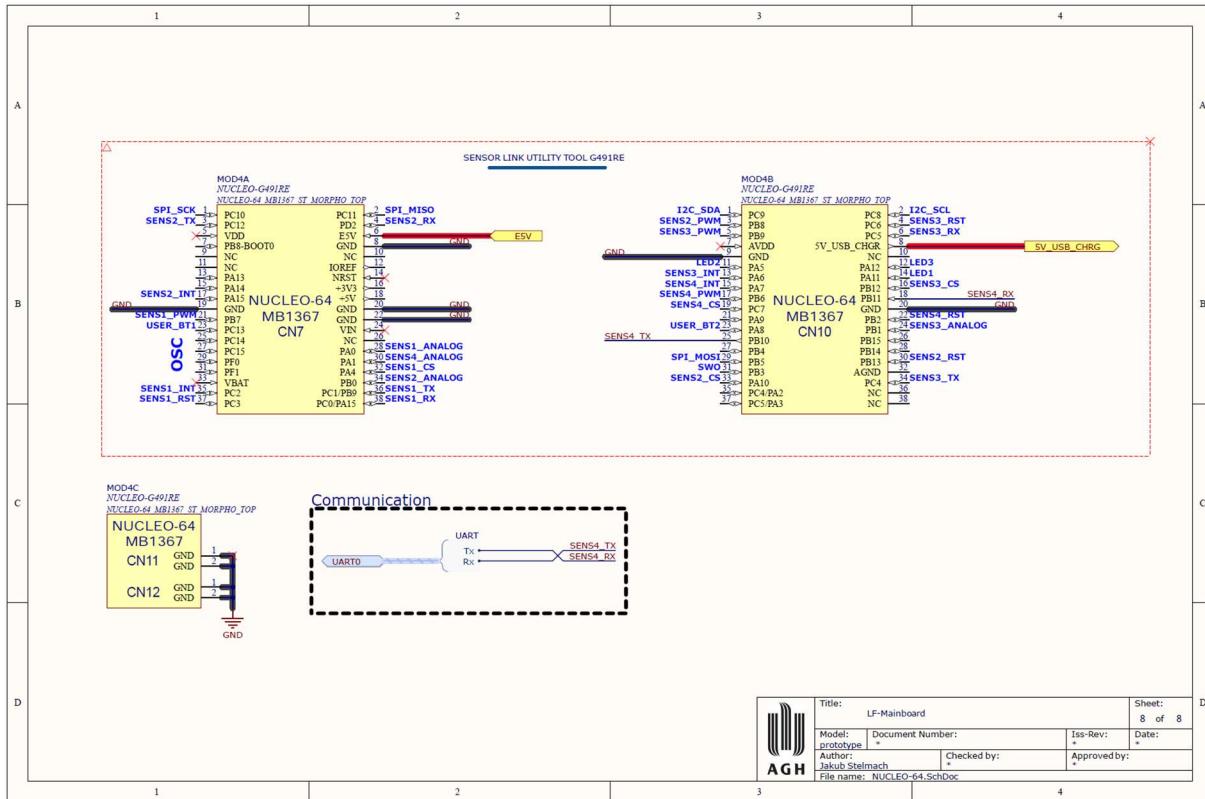


*LF-Mainboard, WS2812B.SchDoc*

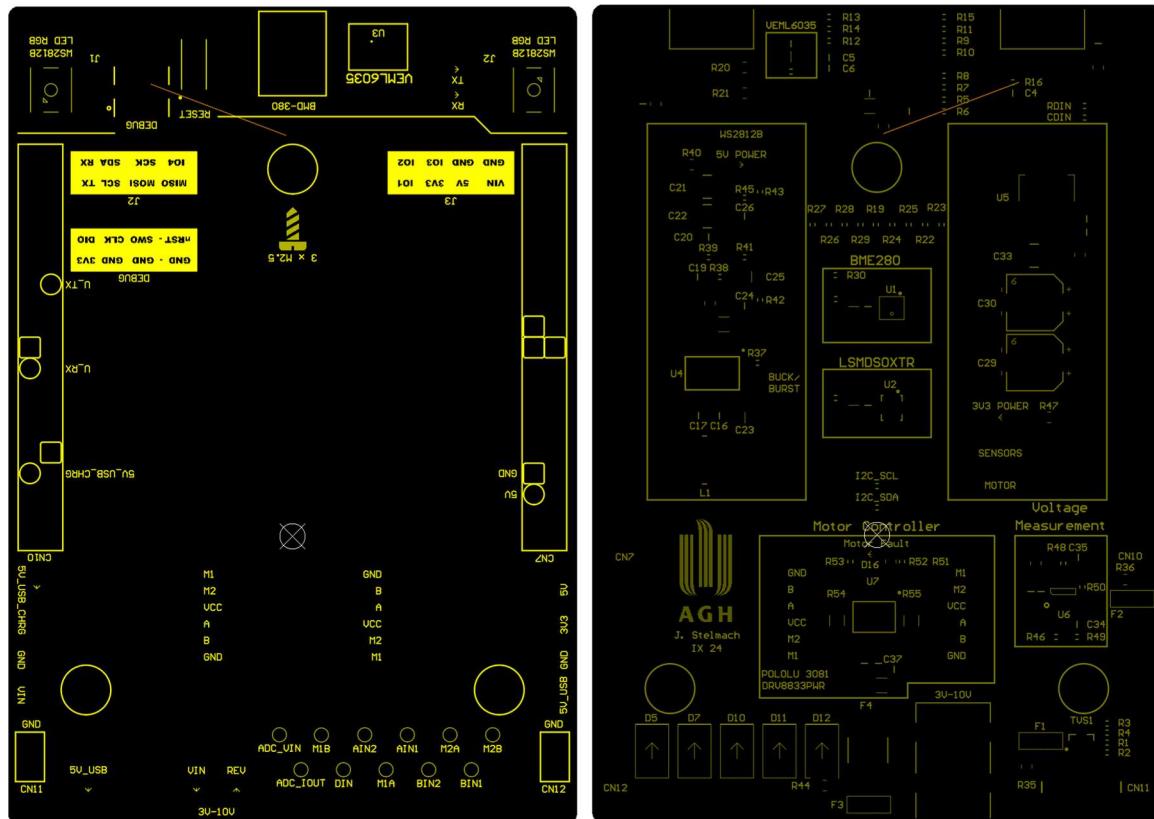


**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, NUCLEO-64.SchDoc*

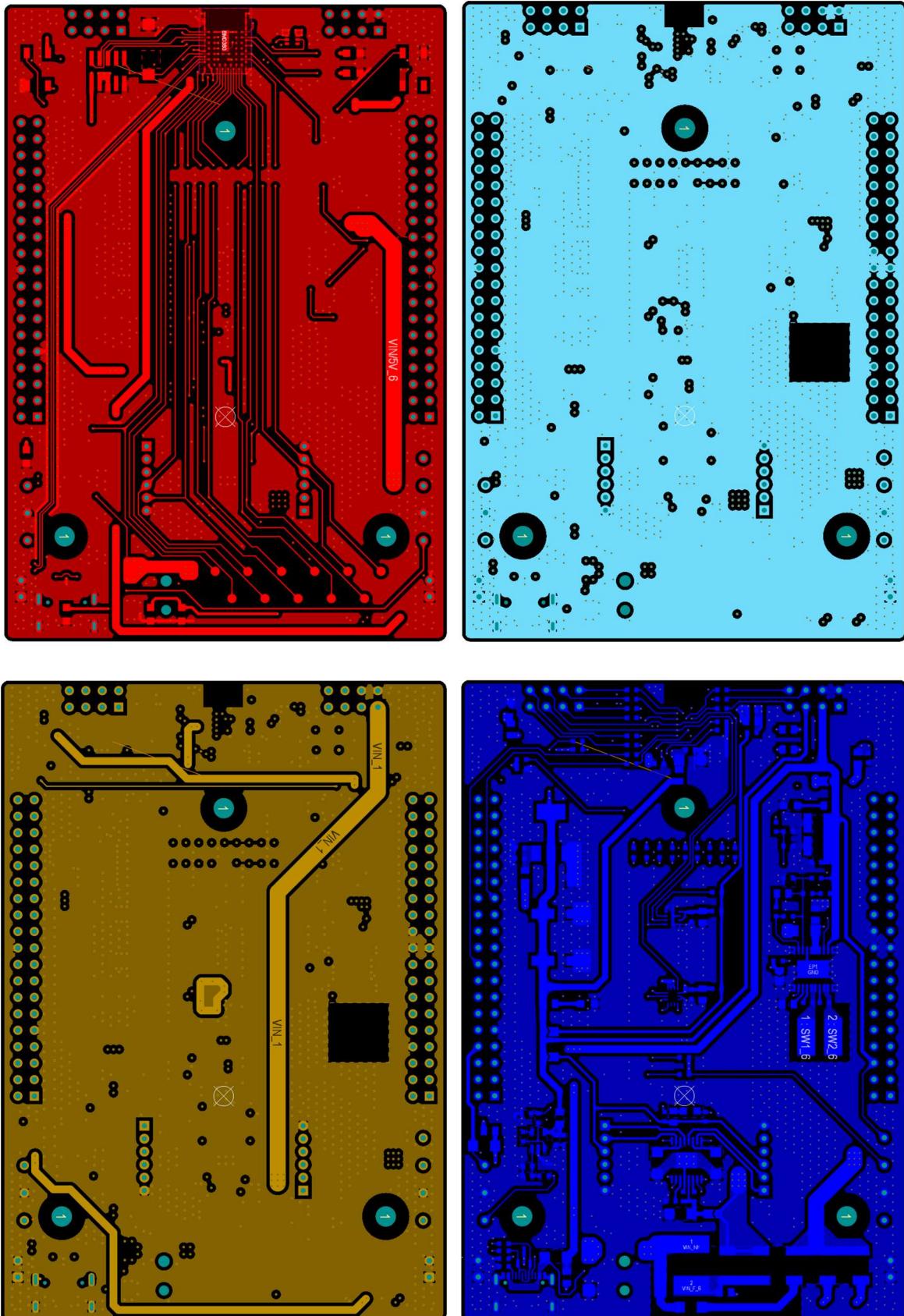


*LF-Mainboard, Top Overlay, Bottom Overlay (lustrzane odbicie)*



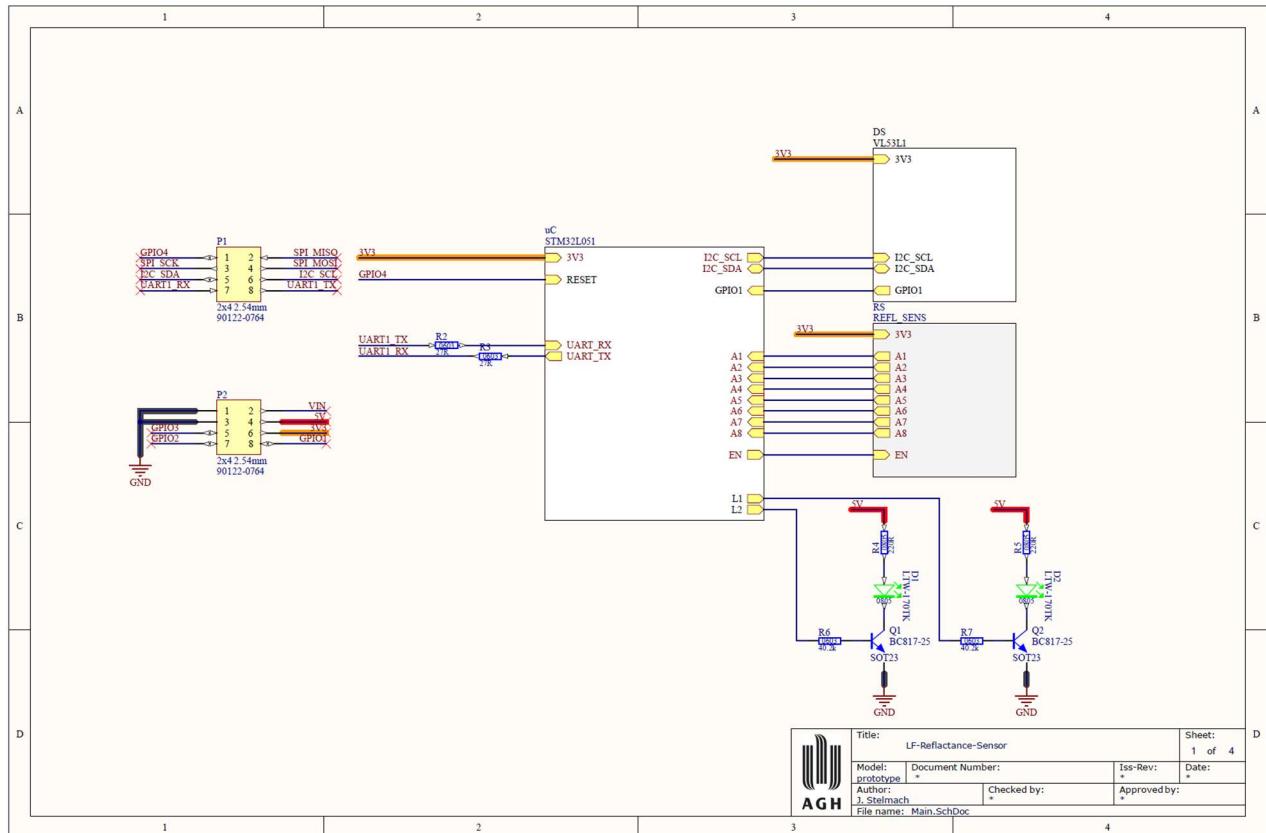
**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Mainboard, (1) Top Layer; (2) Layer 1, (3) Layer 2, (4) Bottom Layer*

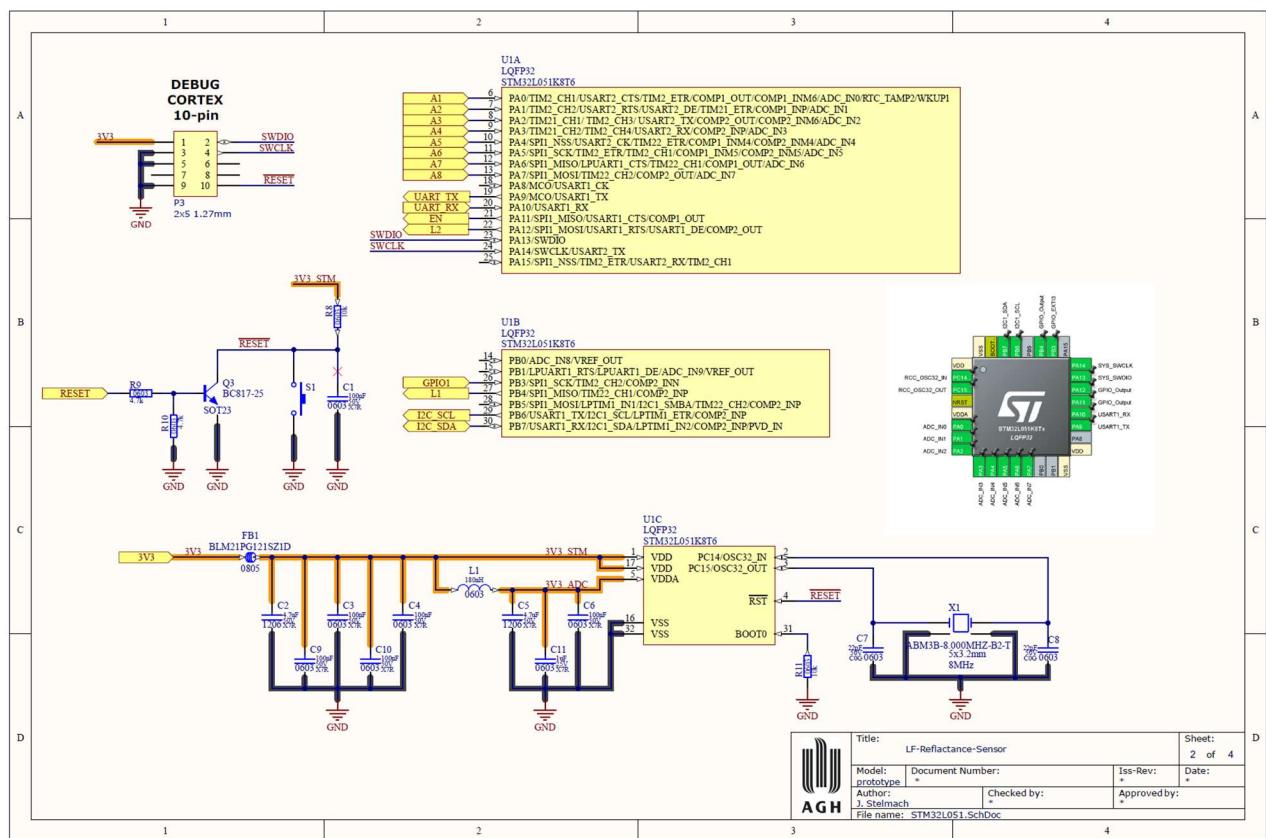


**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Reflectance-Sensor, Main.SchDoc*

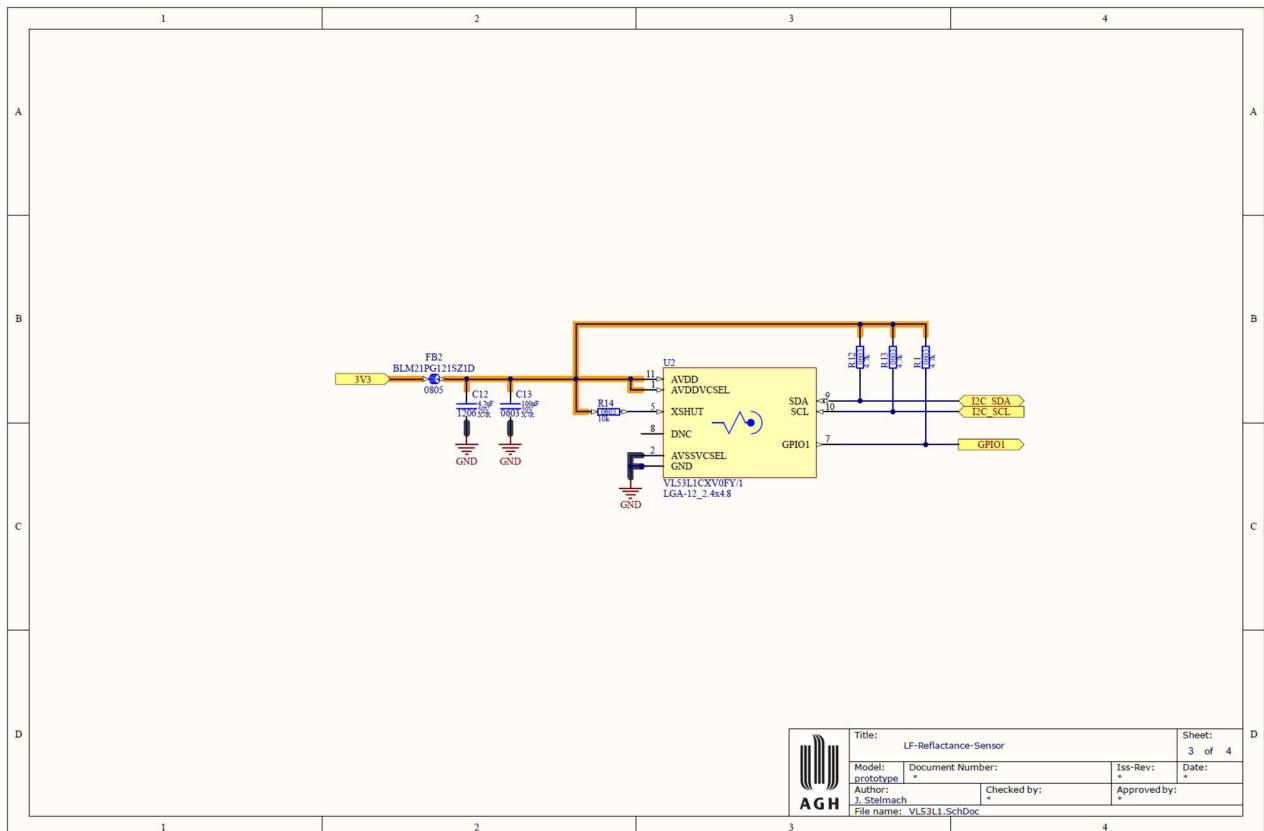


*LF-Reflectance-Sensor, STM32L051.SchDoc*

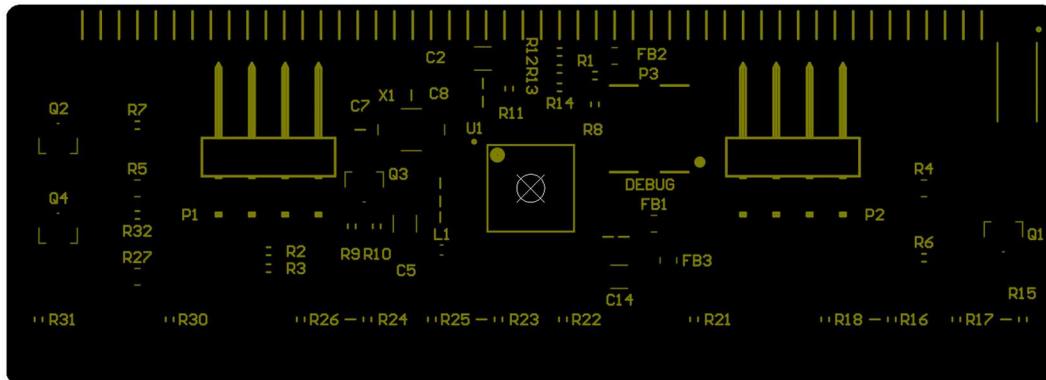
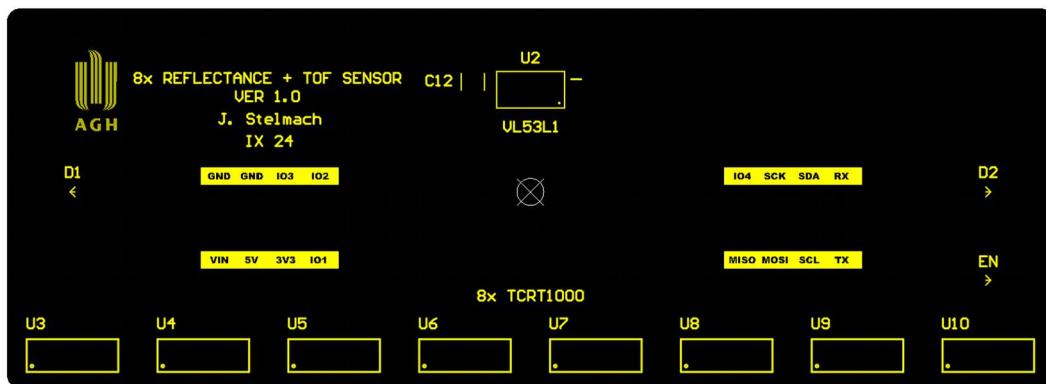


**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Reflectance-Sensor; VL53L1.SchDoc*

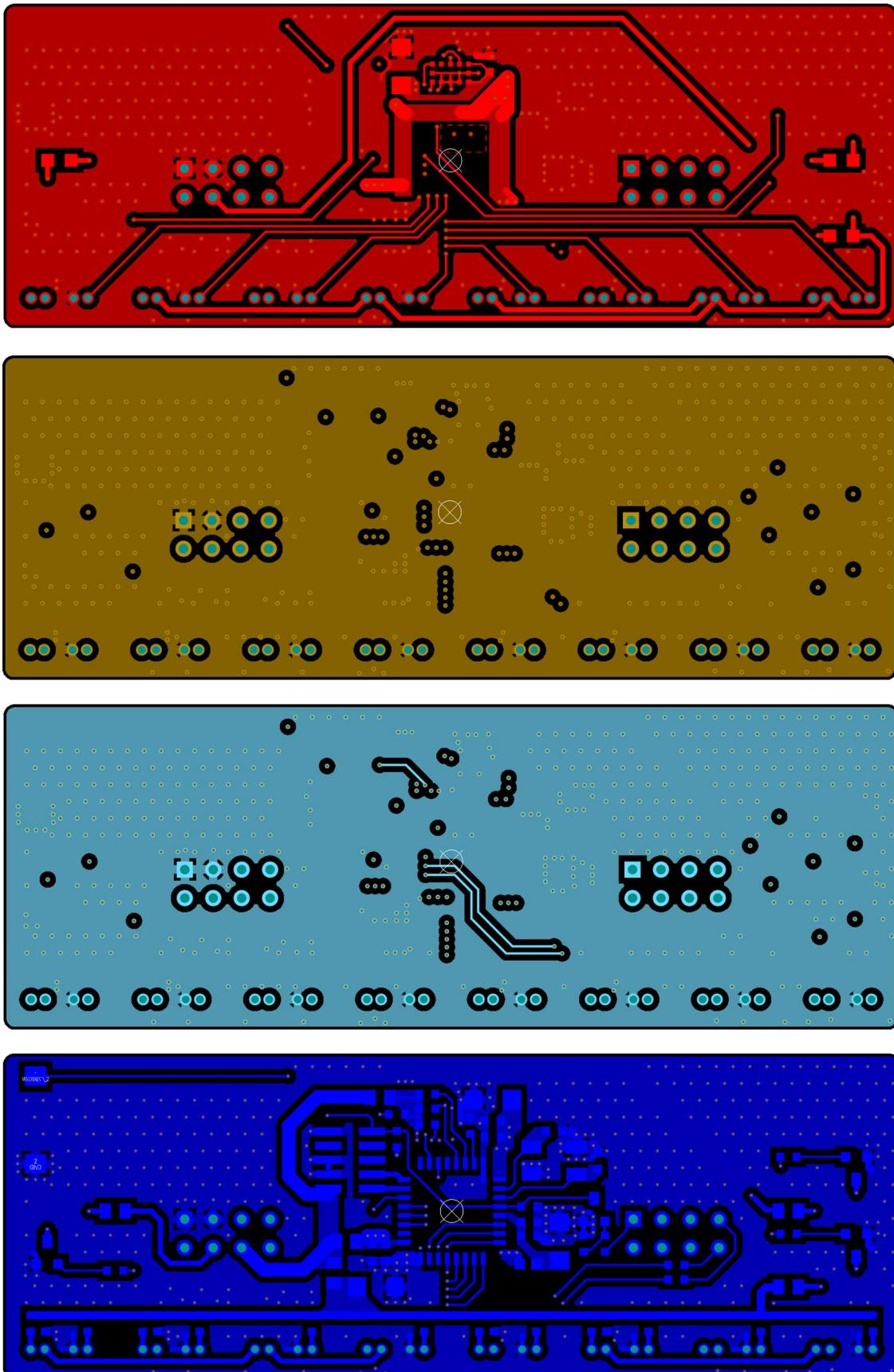


*LF-Reflectance-Sensor, Top Overlay, Bottom Overlay (lustrzane odbicie)*



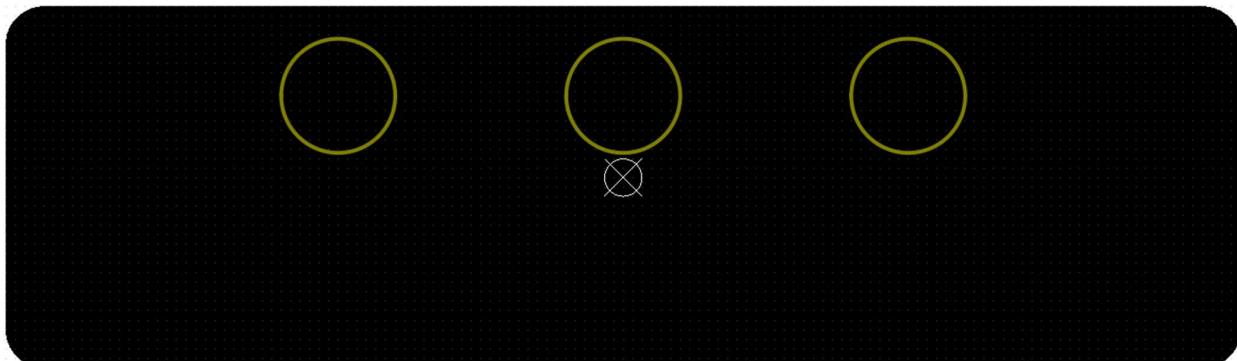
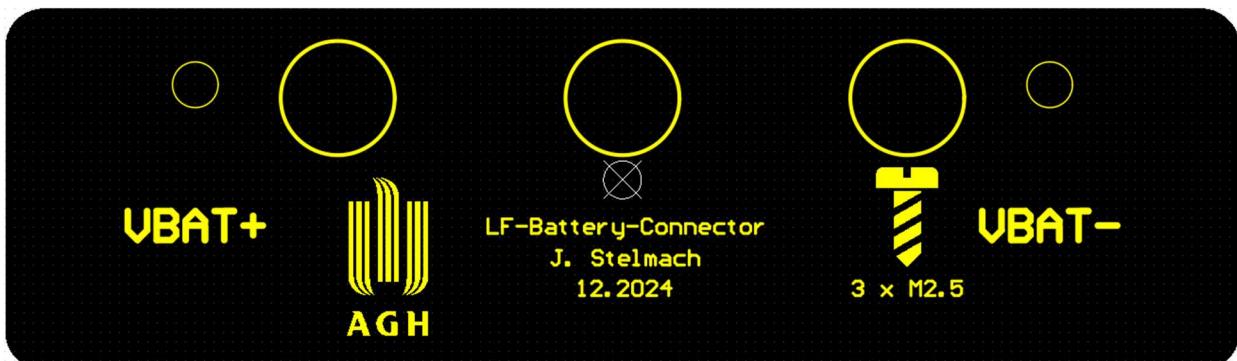
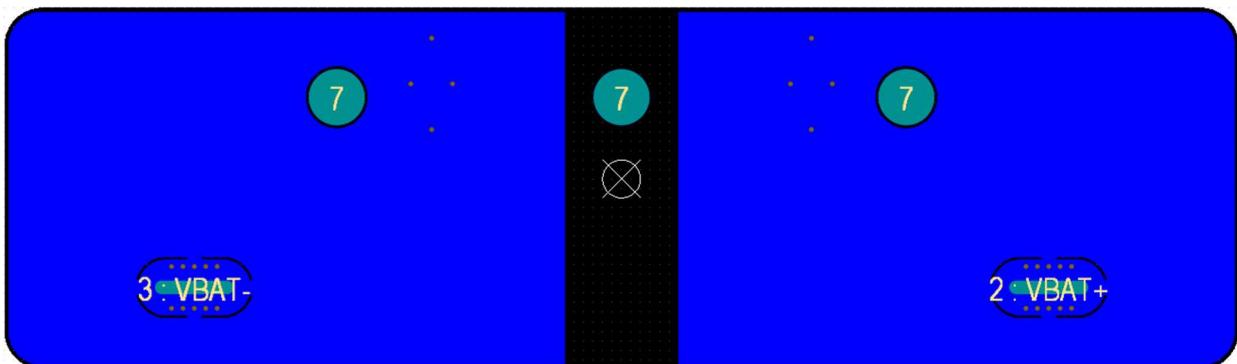
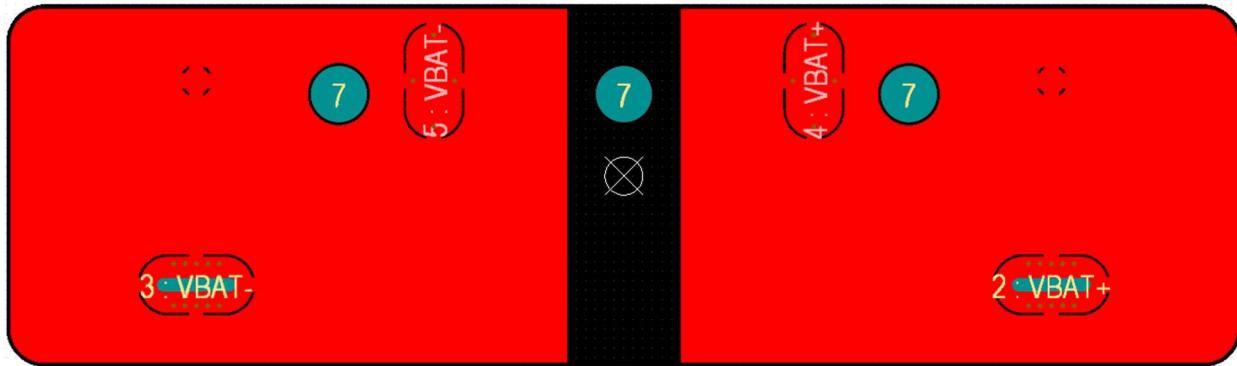
ZAŁĄCZNIK A  
Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera

*LF-Reflectance-Sensor; (1) Top Layer; (2) Layer 1, (3) Layer 2, (4) Bottom Layer*



**ZAŁĄCZNIK A**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Line-Followera**

*LF-Battery-Connector; (1) Top Layer; (2) Bottom Layer; Top Overlay, Bottom Overlay (lustrzane odbicie)*

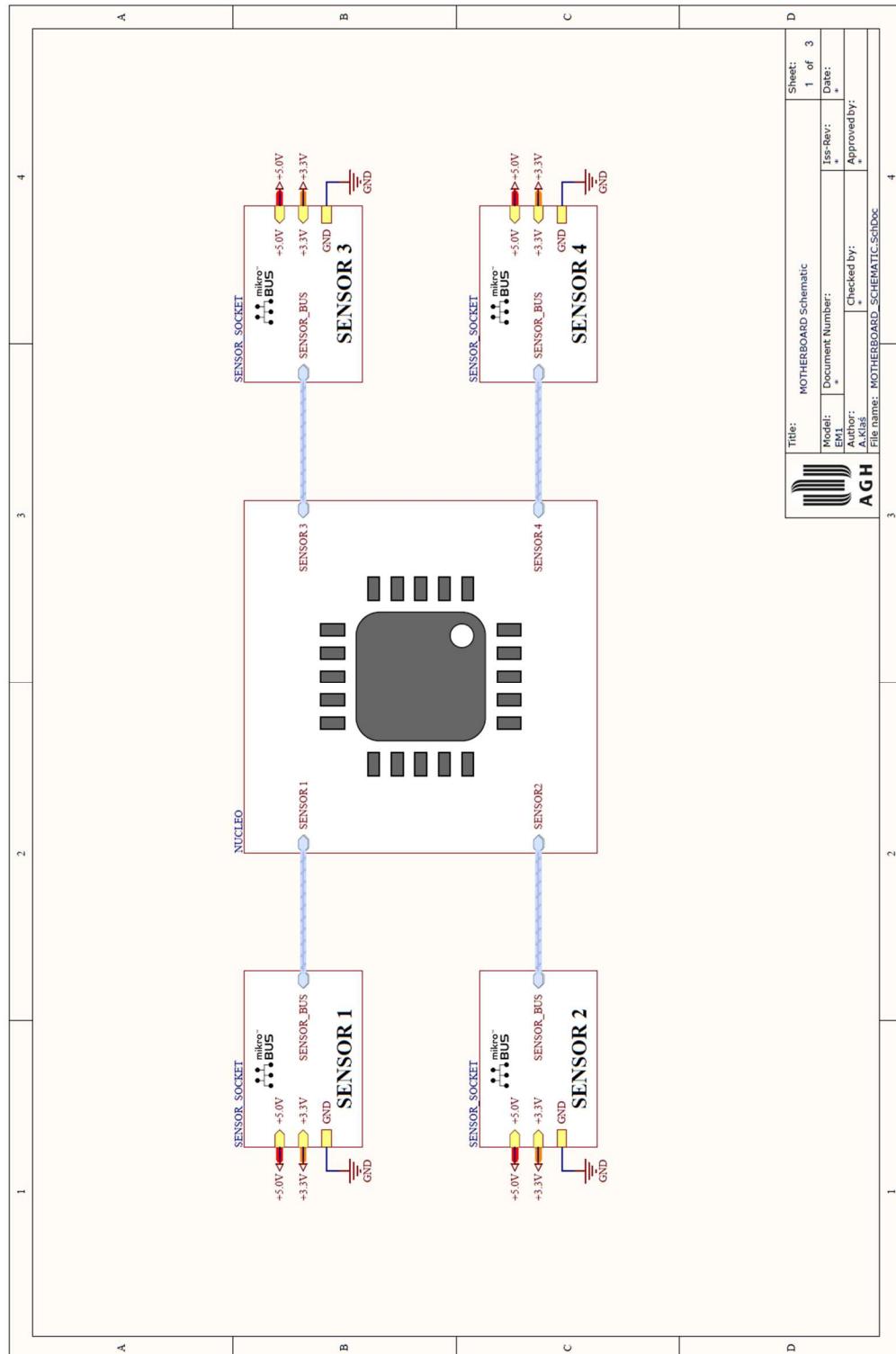


**ZAŁĄCZNIK B**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool G491RE**

**ZAŁĄCZNIK B**

**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool  
G491RE**

*Sensor Link Utility Tool G491RE, MOTHERBOARD\_SCHEMATIC.SchDoc*



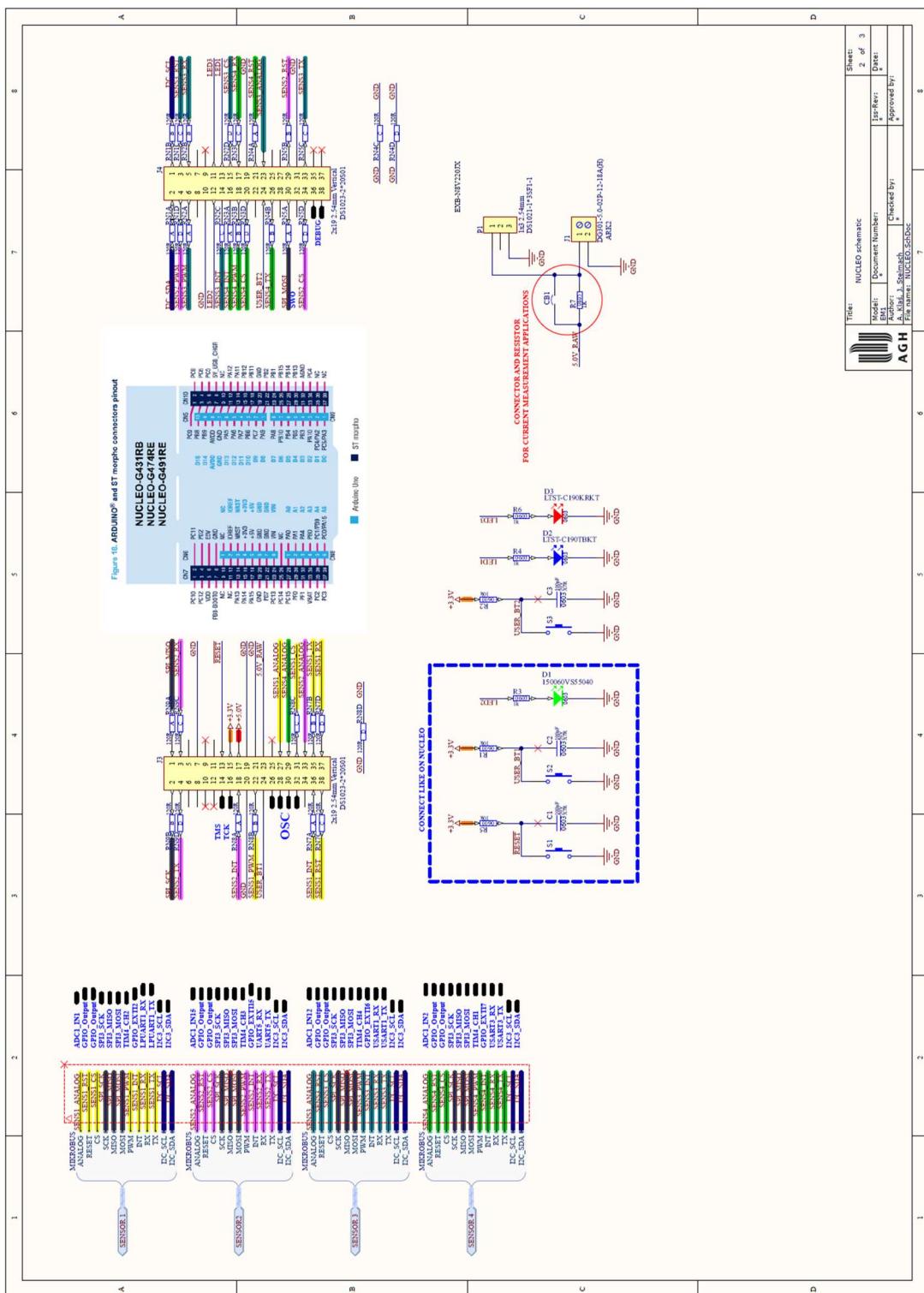
**ZAŁĄCZNIK B**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool G491RE**

*Sensor Link Utility Tool G491RE, SENSOR\_SOCKET.SchDoc x4*



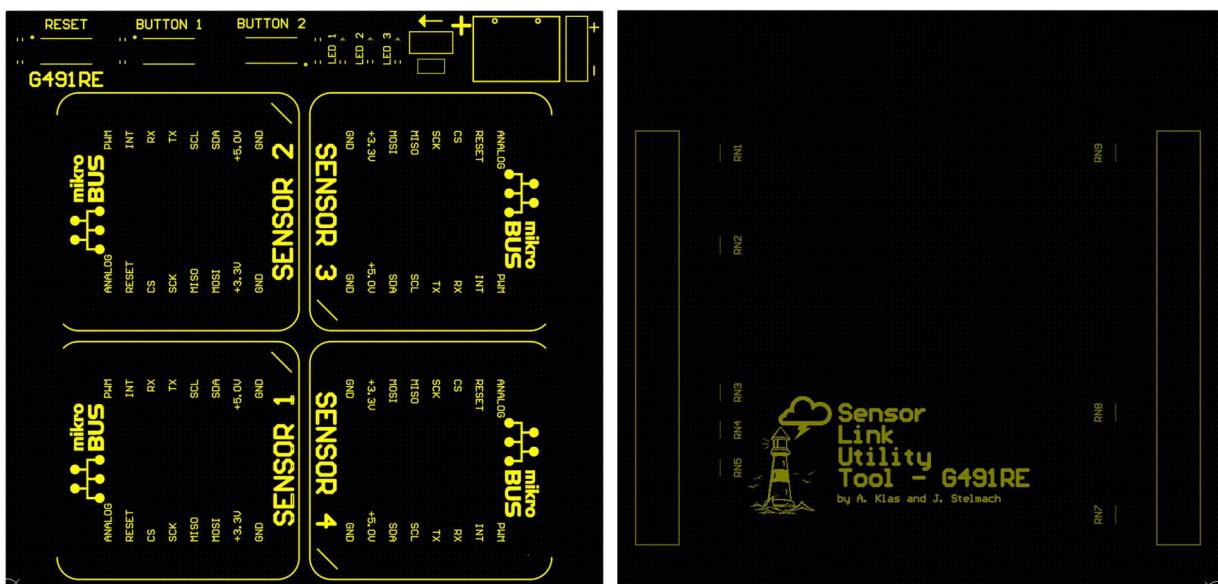
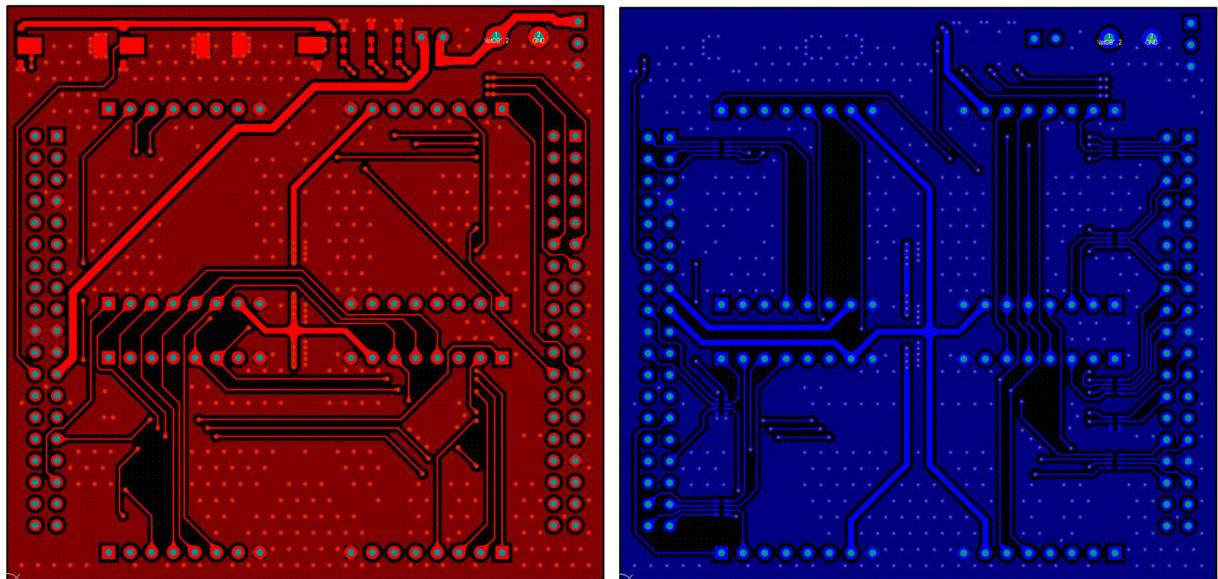
ZAŁĄCZNIK B  
Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool G491RE

*Sensor Link Utility Tool G491RE, NUCLEO.SchDoc*



**ZAŁĄCZNIK B**  
**Dokumentacja Schematów Oraz PCB Sensor Link Utility Tool G491RE**

*LF-Battery-Connector; (1) Top Layer; (2) Bottom Layer; Top Overlay, Bottom Overlay (lustrzane odbicie)*



**ZAŁĄCZNIK C**  
**Tabele z danymi symulacyjnymi oraz pomiarowymi sekcji zasilania**

**ZAŁĄCZNIK C**

**Tabele z danymi symulacyjnymi oraz pomiarowymi sekcji zasilania**

Prąd obciążenia [mA]	Prąd wejściowy [mA]	Wyniki pomiaru					
		+5 V	+3,3 V [V]	(tętnienia) [mV]	+3,3 V (tętnienia) [mV]	Pwe [W]	Pwy [W]
0,00	11,00	5,171	3,292	13,200	6,4830	0,066	0,000
10,00	19,21	5,171	3,290	15,500	6,6500	0,115	0,033
20,00	27,83	5,172	3,289	17,200	7,0600	0,167	0,066
50,00	54,30	5,173	3,283	20,000	7,6000	0,326	0,164
100,00	100,00	5,174	3,285	23,000	7,9000	0,600	0,328
200,00	198,00	5,178	3,278	25,500	8,6600	1,188	0,656
300,00	299,00	5,182	3,272	31,400	8,9000	1,794	0,982
400,00	402,00	5,186	3,265	31,500	8,5000	2,412	1,306
500,00	510,00	5,190	3,259	34,000	9,5000	3,060	1,630
							53,252

Prąd obciążenia [mA]	Prąd wejściowy [mA]	Wyniki symulacji					
		+5 V	+3,3 V [V]	(tętnienia) [mV]	+3,3 V (tętnienia) [mV]	Pwe [W]	Pwy [W]
0,00	8,72	5,074	3,301	2,849	0,00095	0,052	0,000
10,00	17,50	5,074	3,301	2,528	0,00191	0,105	0,033
20,00	26,31	5,074	3,300	2,684	0,00191	0,158	0,066
50,00	52,92	5,074	3,300	2,486	0,00238	0,318	0,165
100,00	98,04	5,074	3,300	3,304	0,00381	0,588	0,330
200,00	190,34	5,073	3,299	3,866	0,00453	1,142	0,660
300,00	284,62	5,073	3,299	4,315	0,00525	1,708	0,990
400,00	380,38	5,073	3,298	4,256	0,00691	2,282	1,319
500,00	477,59	5,073	3,298	4,714	0,00691	2,866	1,649
							57,548