



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Projekt dyplomowy

Projekt i wykonanie interfejsu światłowodowego dla układu sterowania trójfazowego falownika napięcia dedykowanego dla silników PMSM

Design and Implementation of Fiber Optic Interface for Three-phase Voltage Inverter Control System for PMSM Motors

Autor:	<i>Paweł Wojciech Wiktor</i>
Kierunek studiów:	Elektrotechnika
Opiekun pracy:	<i>dr hab. inż. Adam Penczek</i>

Kraków, 2024

Spis treści

Rozdział 1. Wstęp	4
1.1. Wprowadzenie	4
1.2. Cel oraz zakres projektu dyplomowego	4
Rozdział 2 – Opis systemu sterowania dla silników PMSM	6
2.1. Sterownik B-BOX RCP	6
2.2. Moduł trójfazowego falownika napięcia	8
2.3. Silnik PMSM	10
Rozdział 3 – Projekt obwodu interfejsu światłowodowego dla układu sterowania trójfazowego falownika napięcia	11
3.1. Założenia projektowe	12
3.2. Koncepcja rozmieszczenia elementów na płycie PCB	13
3.3. Schemat elektryczny	14
3.3.1. Sekcja złącza sygnałowego	15
3.3.1.1. Złącze krawędziowe J60, model <i>MEC1-120-02-F-D-EM2</i>	15
3.3.1.2. Złącze J1	16
3.3.2. Sekcja wejść/wyjść cyfrowych	17
3.3.2.1. Odbiornik światłowodowy, model <i>AFBR-2624Z</i>	17
3.3.2.2. Nadajnik światłowodowy, model <i>AFBR-1624Z</i>	19
3.3.3. Sekcja wyjść analogowych	20
3.3.3.1. Złącze pomiarowe typu <i>RJ-45</i> , model <i>CUC-SP-J1ST-S/R4LT</i>	21
3.4. – Wykonanie obwodu	22
3.4.1. Widok ogólny	22
3.4.2. Widok zewnętrznej warstwy górnej – <i>Top Layer</i>	23
3.4.3. Widok warstwy środkowej 1 – <i>Middle Layer 1</i>	23
3.4.4. Widok warstwy środkowej 2 – <i>Middle Layer 2</i>	24
3.4.5. Widok zewnętrznej warstwy dolnej – <i>Bottom Layer</i>	25
3.4.6. Wizualizacja 3D	26
Rozdział 4 – Montaż elementów elektrycznych oraz wykonanie testów poprawności	27
4.1. Testy poprawności	28
4.2. Lutowanie elementów elektrycznych	29
Rozdział 5 – Podsumowanie	30
Bibliografia	31
Załączniki	32
Spis tabel i rysunków	33

Streszczenie

W projekcie dyplomowym pod tytułem „*Projekt i wykonanie interfejsu światłowodowego dla układu sterowania trójfazowego falownika napięcia dedykowanego dla silników PMSM*” opisano czynności związane ze skonstruowaniem interfejsu komunikacyjnego, który umożliwia połączenie wyprowadzeń obiektu w postaci modułu trójfazowego falownika napięcia *EPC9167* dedykowanego dla układów napędowych z silnikami o magnesach trwałych, wykonanych w standardzie „*TTL*” wraz z wyprowadzeniami systemu szybkiego prototypowania dla układów sterowania *B-BOX* wykonanymi w standardzie transmisji światłowodowej.

W pracy inżynierskiej zawarto opis stanowiska badawczego systemu do testowania silników PMSM składającego się z wyżej wymienionych elementów wraz z ich specyfikacjami, przedstawiono założenia projektowe i stworzoną dokumentację techniczną interfejsu oraz udokumentowano procesy montażu i testowania.

Projekt zakończono podsumowaniem zawierającym wnioski dotyczące projektowania interfejsów komunikacyjnych, opinię na temat napotkanych problemów oraz możliwości rozwoju.

Abstract

The diploma project entitled as “*Design and Implementation of Fiber Optic Interface for Three-phase Voltage Inverter Control System for PMSM Motors*” describes steps related to the construction of a communication interface, which enables connection of three-phase voltage inverter module *EPC9167* dedicated to drive systems with permanent magnet synchronous motors, made in “*TTL*” standard with a rapid prototyping controller *B-BOX* made in fiber-optic transmission standard.

Engineering thesis includes a test bench description of the PMSM motor test system comprising of the above-mentioned components with their specifications, presents design requirements and created technical documentation of the interface and documents the assembly and testing processes.

The project was finished with conclusions of communication interfaces designing process, an opinion on the encountered problems and opportunities for development.

Rozdział 1. Wstęp

1.1. Wprowadzenie

Rozwój technologii w dziedzinie elektroniki mocy oraz sterowania silnikami stawia przed projektantami wyzwania związane z minimalizacją rozmiaru, zwiększaniem funkcjonalności i sprawności oraz ze zmniejszaniem poboru energii. Jednym z rozwiązań jest implementacja zaawansowanych układów elektronicznych zmieniających napięcie stałe na napięcie zmienne w procesie sterowania silnikami PMSM.

Silniki PMSM zyskują coraz większą popularność jako urządzenia wykorzystane na przykład w sprzętach AGD domowego użytku ze względu na swoje właściwości dynamiczne, wysoką sprawność oraz niskie zużycie energii.

Przed przystąpieniem do masowej produkcji konkretnego systemu należy określić zapotrzebowanie ilości sygnałów sterujących i parametrów sterowania. W fazie testowania można do tego wykorzystać sterowniki szybkiego prototypowania, które posiadają „przewymiarowaną” oraz zróżnicowaną ilość wyprowadzeń zarówno cyfrowych jak i analogowych.

Wśród sterowników szybkiego prototypowania, korzystnym wyborem są modele oparte na technologii w standardzie transmisji światłowodowej. Zaletami takiego rozwiązania jest możliwość propagacji danych na duże odległości, eliminacja problemów związanych z utratą sygnału, niski czas propagacji czy brak utraty jakości sygnału.

Aby była możliwość implementacji systemu szybkiego prototypowania, należy dopasować standard wyprowadzeń tego systemu do obiektu sterowanego. Zapewnienie komunikacji pomiędzy urządzeniami, które mają skonfigurowane wejścia i wyjścia w różnych standardach można uzyskać poprzez stworzenie interfejsu komunikacyjnego.

W przypadku standardu transmisji światłowodowej, wykorzystuje się interfejsy oparte na konwerterach, które oprócz translacji światłowodowo-elektrycznej zapewniają izolację galwaniczną – jeden z wymogów układów prototypowania.

1.2. Cel oraz zakres projektu dyplomowego

Celem projektu dyplomowego jest stworzenie obwodu drukowanego, umożliwiającego połączenie obiektu w postaci trójfazowego falownika napięcia *EPC9167* dedykowanego do obsługi układów napędowych z silnikami PMSM z systemem szybkiego prototypowania układów sterowania *B-BOX* firmy „imperix”.

Podstawową funkcją jaką ma spełniać projektowany układ jest konwersja sygnałów logicznych w standardzie transmisji światłowodowej obsługiwanych przez sterownik *B-BOX* na cyfrowe sygnały elektryczne w standardzie „TTL” obsługiwane przez moduł falownika. Dodatkową funkcją jest rozprowadzenie sygnałów pomiarowych w standardzie analogowym wykorzystując złącza *RJ-45* tak, aby można je było w łatwy sposób podłączyć do sterownika *B-BOX*.

Projekt dyplomowy obejmuje swym zakresem podział na trzy etapy.

W pierwszej części należy wykonać opis systemu, dla którego projektowany jest interfejs, czyli układu do szybkiego prototypowania systemów sterowania dla zespołów napędowych takich jak silniki PMSM, który zawiera obiekt sterowany w postaci silnika i modułu trójfazowego falownika napięcia oraz obiekt wymuszający w postaci sterownika RCP.

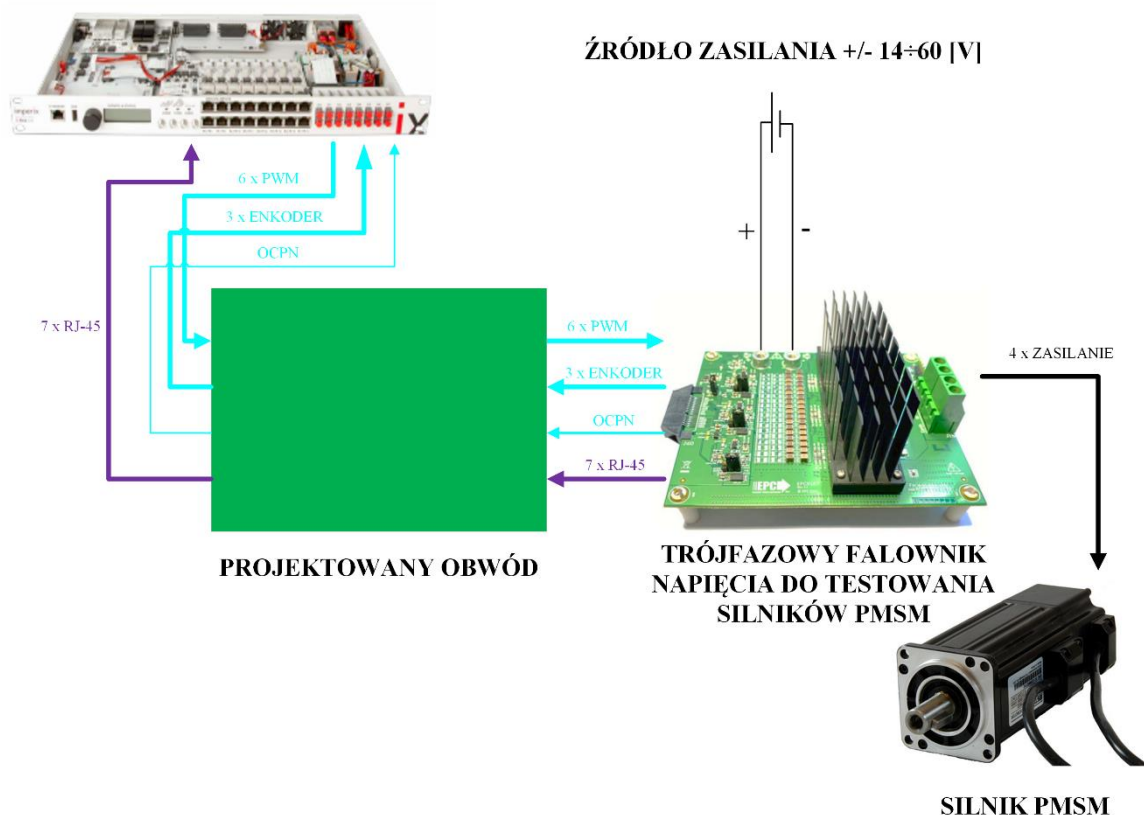
W etapie drugim nazwanym jako etap projektowy należy przedstawić założenia projektowe oraz zaprezentować stworzoną dokumentację techniczną interfejsu światłowodowego. Do stworzenia dokumentacji przewidziano wykorzystanie profesjonalnego oprogramowania „*Altium Designer Professional (23.9.2)*”.

Po uzyskaniu egzemplarza płytki, w ostatnim etapie należy zawrzeć opis procesu montażu oraz procesów testowania układu.

Rozdział 2 – Opis systemu sterowania dla silników PMSM

Celem projektu było skonstruowanie urządzenia umożliwiającego połączenie sterownika *B-BOX* firmy „imperix”, którego wyprowadzenia wykonano w standardzie transmisji światłowodowej oraz modułu trójfazowego falownika *EPC9167* firmy „EPC” o wyprowadzeniach wykonanych w standardzie „TTL”. Obiekt sterowany w postaci silnika z przekształtnikiem DC/AC, obiekt wymuszający w postaci systemu szybkiego prototypowania układów sterowania oraz interfejs komunikacyjny tworzą stanowisko do testowania układów napędowych pokroju silników PMSM, którego schemat blokowy zaprezentowano na rysunku 1.

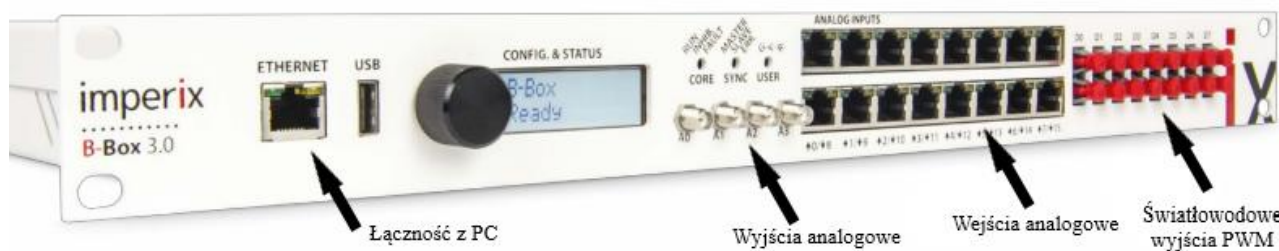
STEROWNIK SZYBKIEGO PROTOTYPOWANIA



Rysunek 1. Schemat blokowy systemu sterowania

2.1. Sterownik B-BOX RCP

Sterownik *B-BOX* firmy „imperix” to system szybkiego prototypowania układów sterowania. Do zalet tego modelu zalicza się możliwość testowania układów obciążenia z racji posiadania większej ilości wejść i wyjść niż wymaga tego aplikacja oraz możliwość programowania blokowego, które jest proste oraz wygodne w obsłudze dla użytkownika. Na rysunku 2 przedstawiono zdjęcie sterownika *B-BOX RCP*.

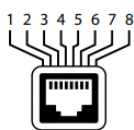


Rysunek 2. Zdjęcie sterownika imperix B-BOX RCP [1]

Model wyróżnia się zaawansowanymi możliwościami modulacji szerokości impulsu oraz licznymi wejściami/wyjściami analogowymi i cyfrowymi. Posiada również możliwość łączności z komputerem, a więc umożliwia współpracę ze zintegrowanym środowiskiem projektowania algorytmów blokowych pokroju oprogramowania „Matlab” z rozszerzeniem „Simulink”.

Sterownik posiada wyprowadzenia wejść analogowych w standardzie RJ-45. Koncepcję przyłączenia sygnałów do pinów złącza przewidywaną przez producenta przedstawiono na rysunku 3.

ANALOG INPUT CONNECTORS



Pin	Pair	Color	Description
1	2	orange stripe	+15 V
2	2	orange solid	+15 V
3	3	green stripe	0 V
4	1	blue solid	Positive input / current input
5	1	blue stripe	Negative input / ground
6	3	green solid	0 V
7	4	brown stripe	-15 V
8	4	brown solid	-15 V

Table 4. Pinout of the analog inputs.

Rysunek 3. Koncepcja przyłączenia sygnałów do pinów złącza RJ-45 [1]

W tabeli 1 wyszczególniono główne specyfikacje sterownika, które są wykorzystywane przez aplikację FOI.

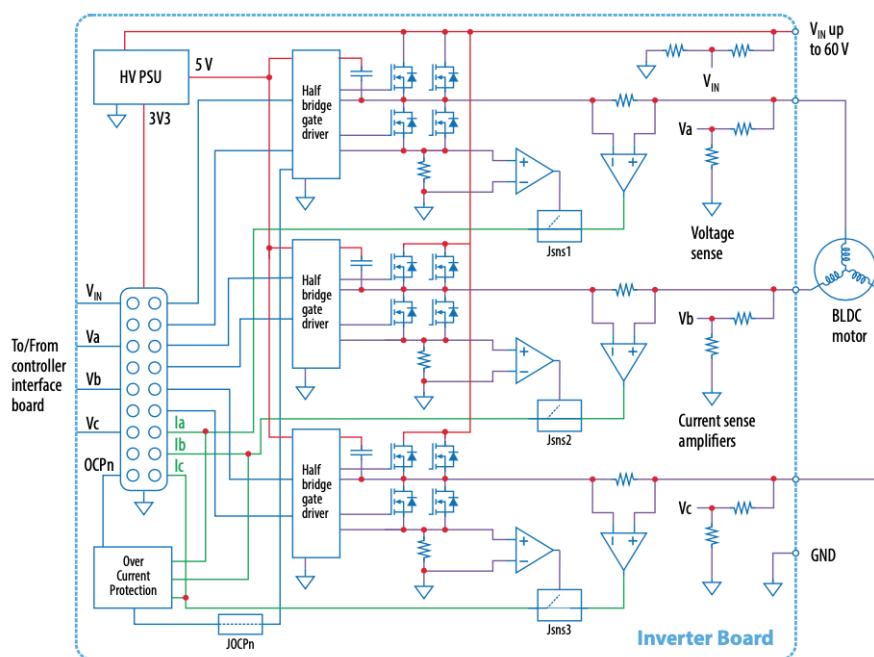
Tabela 1. Specyfikacje sterownika "B-BOX RCP" [1]

Komponent	Specyfikacja
Chip systemowy	Xilinx Zynq XC7030-3FBG676E, Klasa prędkości -3
System przetwarzania	ARM Cortex A9 1 [GHz] (2szt.), 1 [GB] DDR3
Programowalny układ logiczny (FPGA)	Kintex7 125K, Artix 7 35T (pomocniczy)
Przechowywanie	Pamięć flash 16 [MB] (2szt.), micro SD + eMMC 8 [GB]
Wyjścia PWM	Różne modulatory, rozdzielczość 4 [ns]
	Optyczne 50 [Mb/s] (16szt.)
	Elektryczne [3.3 V] (32szt.)
Wejścia analogowe	16 bitów / 500 kps jednocześnie (16szt.) + w pełni konfigurowalny front-end
Szybkie wejścia/wyjścia użytkownika	FPGA bezpośrednie [3.3 V] (36szt.)
Wejścia/wyjścia błędów	Cyfrowe [3.3 V] (16szt.), blokada optyczna, blokada elektryczna [5 V]

Szczegółowa specyfikacja oraz schematy poszczególnych komponentów znajdują się w dokumentacji technicznej sterownika umieszczonej jako załącznik 1 niniejszej pracy.

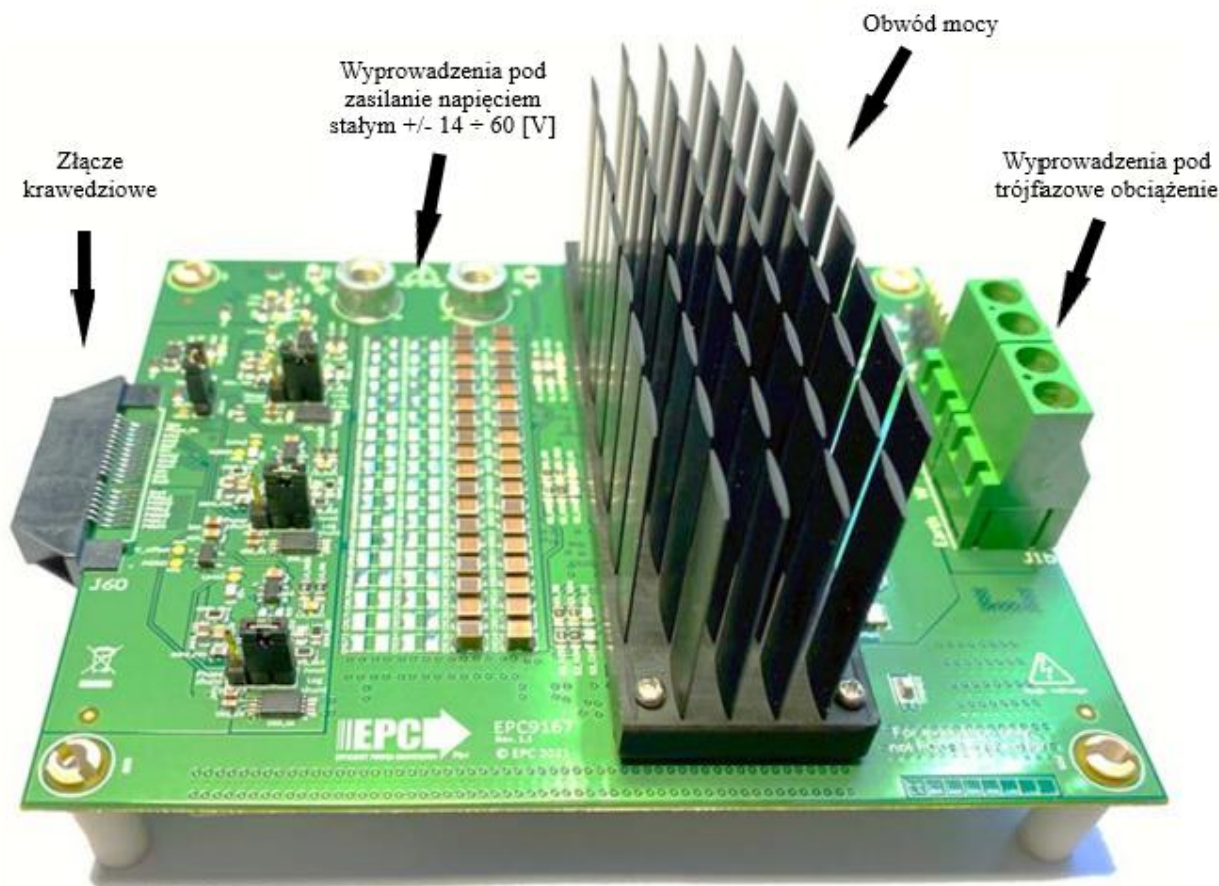
2.2. Moduł trójfazowego falownika napięcia

EPC9167 to zestaw uruchomieniowy trójfazowego falownika napięcia dedykowany dla silników PMSM. Działanie modułu falownika opiera się na wykorzystaniu dwunastu tranzystorów FET typu „*EPC2065 eGaN*”, gdzie para równoległych połączeń dwóch tranzystorów (w sumie czterech sztuk) w topologii mostkowej przypada na jedną fazę obwodu. Na rysunku 4 umieszczono schemat elektryczny modułu trójfazowego falownika napięcia.



Rysunek 4. Schemat elektryczny modułu trójfazowego falownika napięcia [2]

Podstawowa konfiguracja zakłada sterowanie silnikiem o magnesach trwałych. Układ zawiera element łączeniowy z interfejsem komunikacyjnym oraz z obiektem obciążenia. Oprócz aplikacji tranzystorów, układ zawiera element wykrywający wystąpienie przeciążenia prądowego, wzmacniacze operacyjne czy wyprowadzenia pod czujniki takie jak enkoder czy czujnik Halla. Rysunek 5 przedstawia zdjęcie modułu trójfazowego falownika napięcia.



Rysunek 5. Zdjęcie modułu trójfazowego falownika napięcia [2]

Na złączu krawędziowym oznaczonym przez producenta jako J60 zostały wyprowadzone sygnały analogowe pozyskane z czujników prądów i napięć, sygnały cyfrowe, czyli wejścia sterujące, wyjścia z enkodera oraz sygnały błędów. Moduł falownika posiada wyprowadzenia pod zewnętrzne zasilanie napięciem stałym. Z dokumentacji technicznej wynika, że nominalne napięcie zasilania to 48 [V], natomiast jest możliwość podpięcia napięcia zasilającego na zakresie ($\pm 14 \div 60$ [V]). Na rysunku 5 oznaczono również obwód mocy, którym jest trójfazowy falownik napięcia wraz z układem chłodzenia oraz czterobiegunowe złącze przeznaczone do podłączenia trójfazowego układu obciążenia, domyślnie przewidzianego jako silnik PMSM.

Moduł falownika wyposażony jest między innymi w sterowniki bramkowe i wbudowany zasilacz podtrzymujący logikę, czujniki prądu i napięcia dla wszystkich faz oraz czujnik napięcia stałego, czujnik temperatury „U40-AD590” czy wskaźniki LED.

Płytką posiada układ zabezpieczenia nadprądowego, które jest uruchamiane, jeśli wartość chwilowa prądu na jednej z faz przekroczy 50 [A]. Istnieje możliwość konfiguracji układu do detekcji przeciążenia prądowego, która przez złącze krawędziowe jest w stanie wysyłać sygnał do użytkownika, informujący o wystąpieniu przeciążenia. [2]

Szczegółowe specyfikacje znajdują się w dokumentacji techniczno-ruchowej umieszczonej jako załącznik 2 niniejszej pracy.

2.3. Silnik PMSM

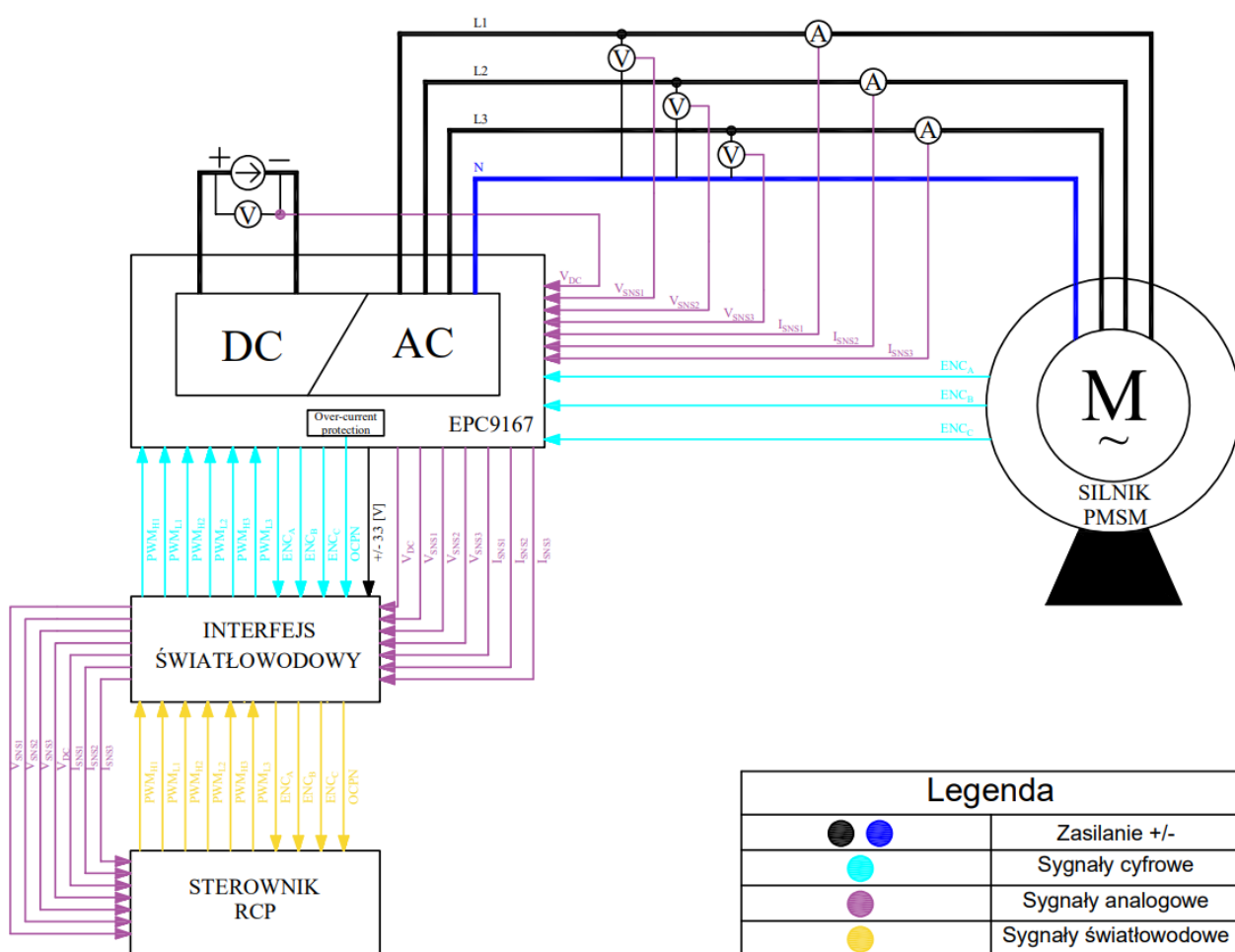
Silnik PMSM (*ang. Permanent Magnet Synchronous Motor*) to rodzaj synchronicznego silnika elektrycznego o magnesach trwałych na uzwojeniu wirnika oraz stojana. Jest to urządzenie, które osiąga stan równowagi podczas synchronizacji pracy obracania się wirnika z częstotliwością zasilającego prądu. Wśród kategorii silników synchronicznych wyróżnia się tym, że proces przekazywania wartości kąta obrotu wirnika odbywa się w sposób ciągły oraz praca uwzględnia sprzężenie zwrotne.

Wykorzystywany jest najczęściej w domowych sprzętach AGD lub w elektrycznym przemyśle transportu ze względu na wysoką sprawność, brak konieczności dostarczania energii do magnesów czy możliwości precyzyjnego ustalania pozycji oraz prędkości.

Silnik PMSM zasilany jest napięciem przemiennym oraz można go zdefiniować jako urządzenie o sinusoidalnych prądach oraz sinusoidalnym kształcie sił elektromotorycznych. [3]

Rozdział 3 – Projekt obwodu interfejsu światłowodowego dla układu sterowania trójfazowego falownika napięcia

Głównym zadaniem interfejsu światłowodowego w systemie do testowania silników PMSM była dwukierunkowa konwersja elektryczno-światłowodowa. Dodatkowo interfejs miał umożliwić propagację pomiarowych sygnałów w standardzie analogowym. Na rysunku 6 przedstawiono schemat ideowy systemu sterowania.



Rysunek 6. Schemat ideowy systemu sterowania

Opis indeksowania sygnałów cyfrowych oraz analogowych umieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Opis indeksowania sygnałów cyfrowych oraz analogowych

Indeks	Opis
PWM _{H1} , PWM _{H2} , PWM _{H3} , PWM _{L1} , PWM _{L2} , PWM _{L3}	Sygnały modulacji szerokości impulsu
ENCA, ENCB, ENCC	Sygnały z enkodera
OCPN	Sygnał zabezpieczenia nadprądowego
V _{DC}	Sygnał pomiaru napięcia stałego
V _{SNS1} , V _{SNS2} , V _{SNS3}	Sygnały pomiaru zmiennych napięć fazowych
I _{SNS1} , I _{SNS2} , I _{SNS3}	Sygnały pomiaru zmiennych prądów fazowych

3.1. Założenia projektowe

Stworzenie dokumentacji technicznej interfejsu przewidziano w oprogramowaniu „Altium Designer”. Jest to specjalistyczna aplikacja umożliwiająca tworzenie obwodów drukowanych od koncepcji projektowej do przygotowania plików potrzebnych do realizacji produkcyjnej.

W założeniach projektowych określono wymagania zarówno mechaniczne jak i elektryczne. Oprogramowanie „Altium Designer” umożliwia użytkownikowi definicję ustawień projektowych określających szerokości ścieżek, odstępów pomiędzy elementami, rozmiary przelotek czy definicję obwodu o wspólnej masie. Ustawienie zasad projektowych umożliwia w przyszłości unikanie błędów oraz wygodne sprawdzanie poprawności wykorzystując opcję dostępne w programie. [4] Założenia projektowe przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Założenia projektowe

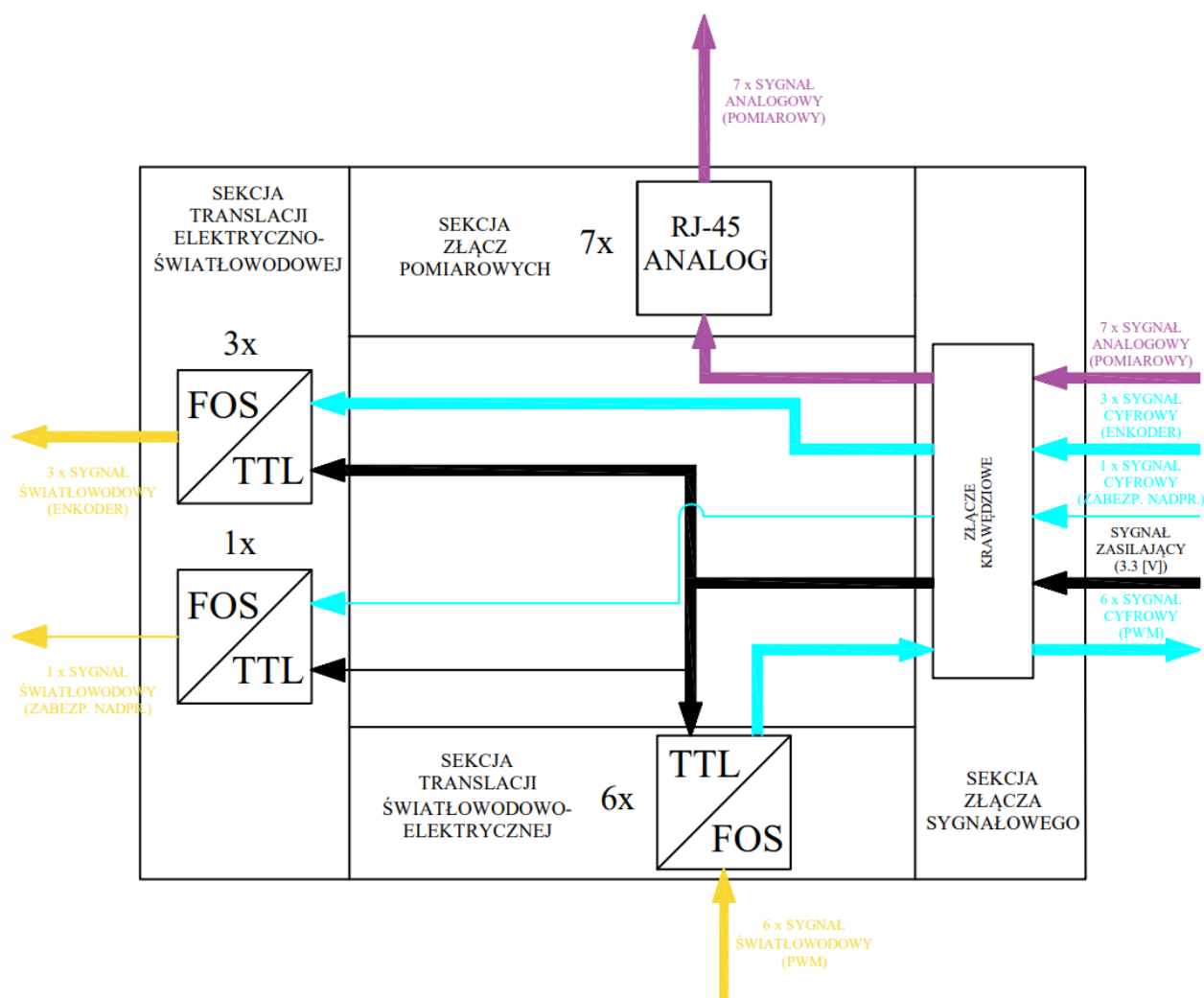
Założenia projektowe
1. Wykonanie obwodu drukowanego o wymiarach nie większych niż 260x100 [mm] (długość x szerokość)
2. Zaprojektowanie sześciu konwerterów światłowodowo-elektrycznych (odbiorniki)
3. Zaprojektowanie czterech konwerterów elektryczno-światłowodowych (nadajniki)
4. Zaprojektowanie siedmiu złącz RJ-45 umożliwiających propagację analogowych sygnałów pomiarowych
5. Doprowadzenie zasilania do układu o wartości $\pm 3,3$ [V]
6. Założenia dotyczące wymagań elektrycznych podczas projektowania płytki: <ul style="list-style-type: none">• Wartość odstępów elektrycznych dla elementów na poziomie 10 [mils]• Szerokość ścieżek sygnałów cyfrowych i analogowych w zakresie (10 ÷ 20) [mils]• Szerokość ścieżek sygnałów zasilających i uziemiających w zakresie (15 ÷ 30) [mils]• Wymiary przelotek dla części analogowej: średnica przejścia w zakresie (20 ÷ 40) [mils] oraz średnica otworu w zakresie (10 ÷ 20) [mils]• Wymiary przelotek dla części cyfrowej i zasilającej: średnica przejścia w zakresie (30 ÷ 60) [mils] oraz średnica otworu w zakresie (10 ÷ 30) [mils]

Założono, że wymiary interfejsu światłowodowego *FOI* nie powinny przekroczyć dwukrotności długości, czyli 260 [mm] oraz szerokości, czyli 100 [mm] płytki *EPC9167*.

Założenia dotyczące wymagań elektrycznych odnoszą się do możliwości technologicznych. Wartości dobrano możliwie najniższe jednocześnie zachowując wymagania pochodzące z norm, pozwalające uniknąć uszkodzeń mechanicznych.

3.2. Koncepcja rozmieszczenia elementów na płycie PCB

Mając na uwadze nadrzędne funkcje interfejsu komunikacyjnego takie jak dwukierunkowa konwersja elektryczno-światłowodowa oraz propagacja pomiarowych sygnałów w standardzie analogowym zdecydowano się na podział planowania obwodu na cztery sekcje: sekcję złącza sygnałowego, sekcję translacji światłowodowo-elektrycznej, sekcję translacji elektryczno-światłowodowej oraz sekcję złącz pomiarowych. Na rysunku 7 umieszczono koncepcję rozmieszczenia elementów na płycie *FOI*.



Rysunek 7. Koncepcja rozmieszczenia elementów na płycie *FOI*

Złącze krawędziowe przewidziane w sekcji złącza sygnałowego to fizyczny element łączeniowy modułu falownika oraz *FOI*. Odpowiada za przekazanie sygnałów zasilających na poziomie napięcia wynoszącym $\pm 3,3$ [V], sygnałów uziemiających, sygnałów pomiarowych oraz sterujących.

W sekcji translacji światłowodowo-elektrycznej przewidziano sześć konwerterów o indeksie „TTL/FOS”. „TTL” (ang. *Transistor-Transistor Logic*) to technologia logicznych sygnałów

cyfrowych w standardzie maksymalnie pięciowoltowym, natomiast „FOS” (ang. Fibre Optic Signal) to technologia sygnałów w standardzie transmisji światłowodowej.

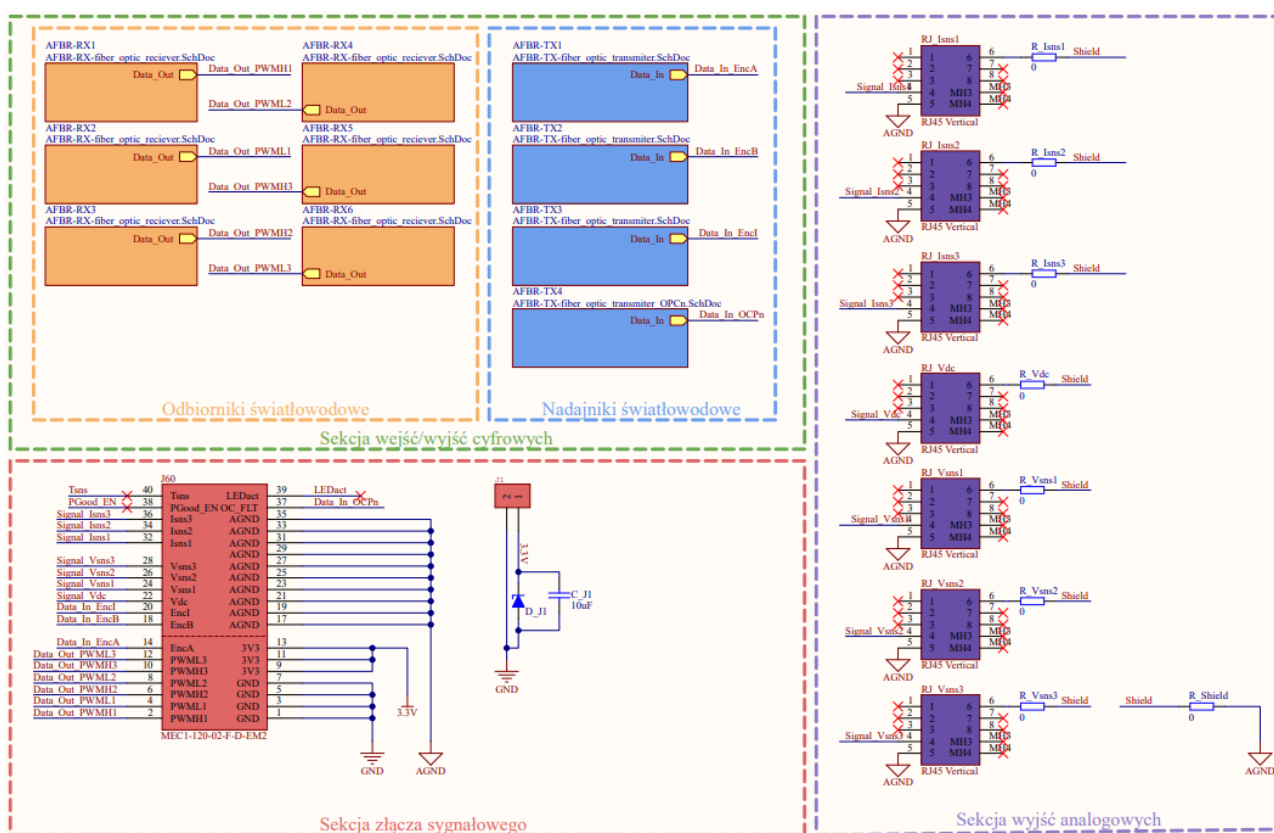
W sekcji translacji elektryczno-swiatłowodowej zaplanowano umieszczenie trzech nadajników oznaczonych koncepcyjnie jako „FOS/TTL”, których zadaniem była konwersja sygnałów pochodzących z enkodera oraz nadajnika obsługującego sygnał wyzwolenia układu zabezpieczenia nadprądowego.

W sekcji złącz pomiarowych przewidziano siedem złącz RJ-45, które umożliwiają przekazanie sygnałów pomiaru napięcia stałego, pomiaru napięć fazowych oraz pomiaru prądów fazowych do sterownika B-BOX.

3.3. Schemat elektryczny

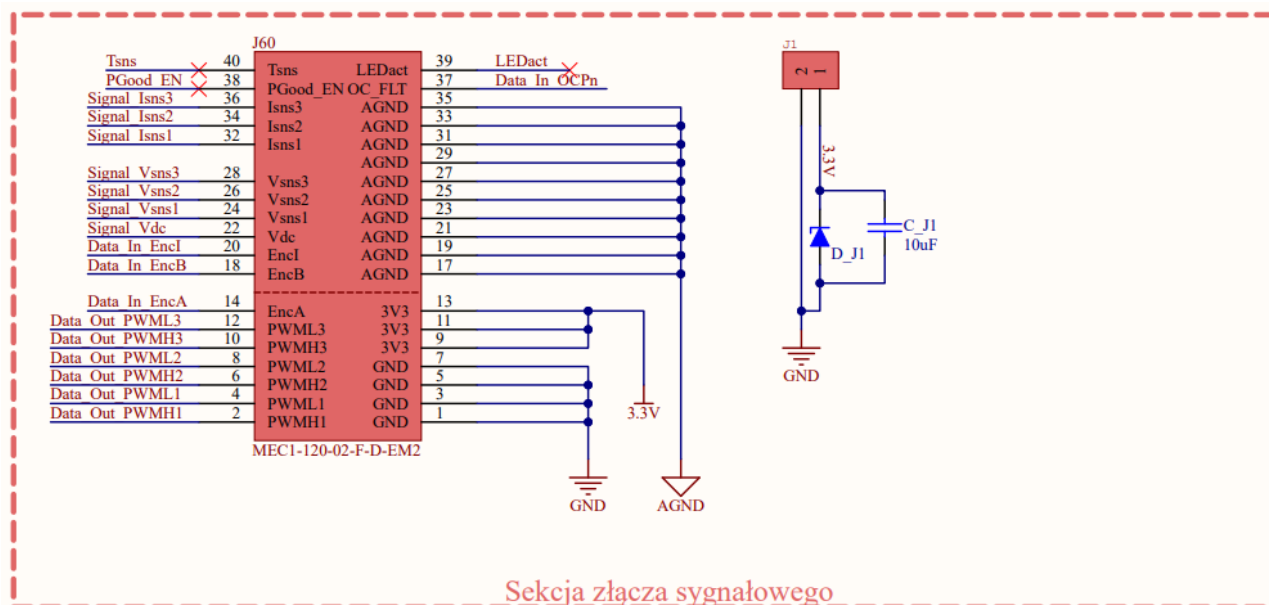
Na rysunku 8 zaprezentowano schemat elektryczny projektowanego obwodu PCB. Na schemacie można wyróżnić następujące sekcje:

- Sekcja złącza sygnałowego (na schemacie oznaczona kolorem czerwonym)
- Sekcja wejść/wyjść cyfrowych (na schemacie oznaczona kolorem zielonym)
- Sekcja wyjść analogowych (na schemacie oznaczona kolorem fioletowym)



3.3.1. Sekcja złącza sygnałowego

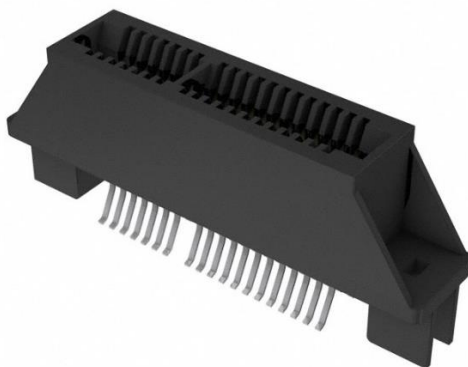
W sekcji złącza sygnałowego umieszczono blok złącza krawędziowego, którego fizyczna wersja znajduje się na płycie *EPC9167* oraz blok dodatkowego złącza zasilającego. Rysunek 9 przedstawia część schematu głównego ilustrującą sekcje złącza sygnałowego.



Rysunek 9. Schemat elektryczny sekcji złącza sygnałowego

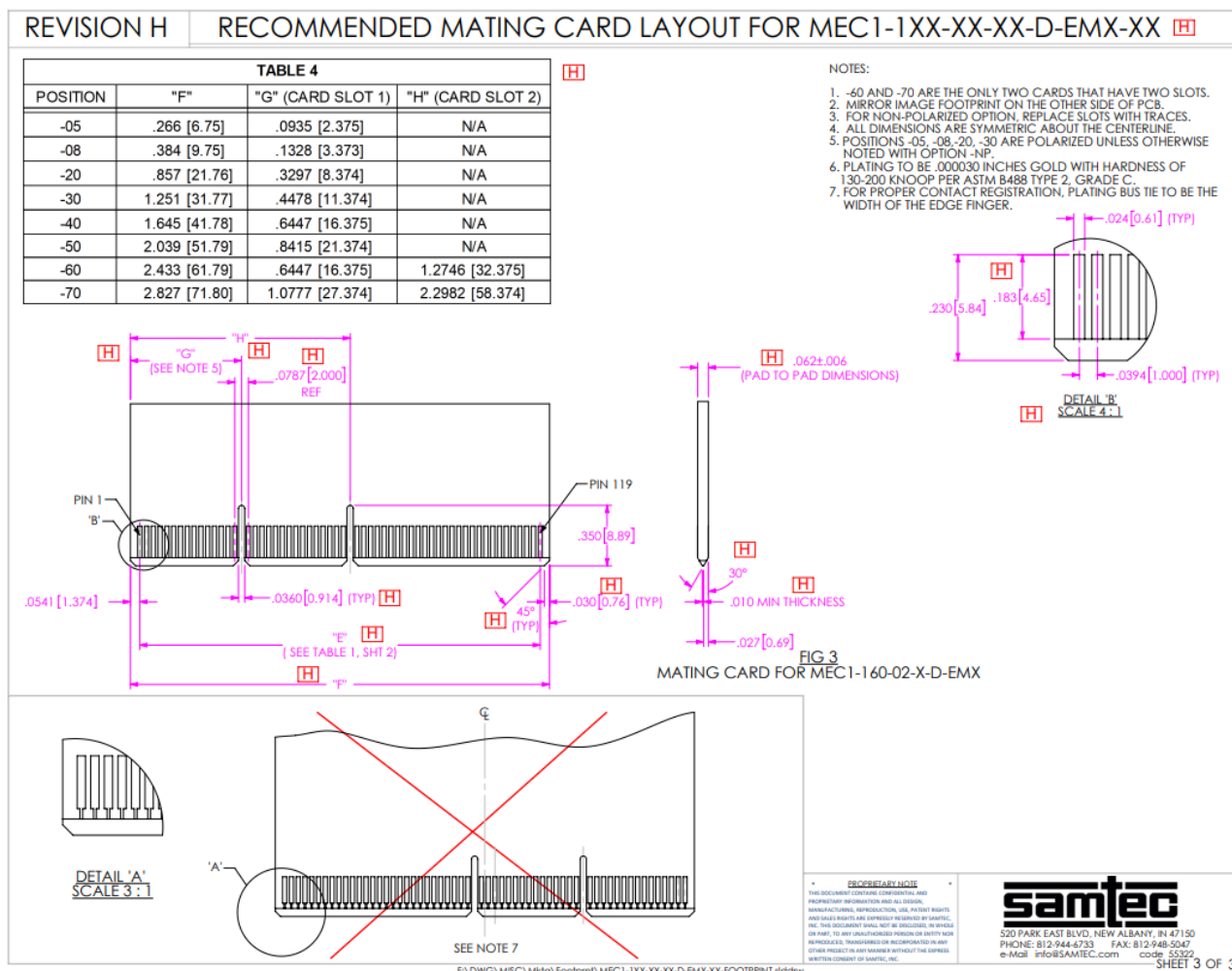
3.3.1.1. Złącze krawędziowe J60, model MEC1-120-02-F-D-EM2

Złącze krawędziowe *MEC1-120-02-F-D-EM2* firmy „Samtec” to czterdziesto-pinowy element, który został przewidziany przez producenta *EPC9167* do przesyłania sygnałów sterujących, pomiarowych oraz zasilających do interfejsu komunikacyjnego (Rysunek 10).



Rysunek 10. Zdjęcie złącza krawędziowego, model MEC1-120-02-F-D-EM2 [5]

Spośród dostępnych rozwiązań, zdecydowano się na wymiarowe dopasowanie krawędzi obwodu FOI oraz wyprowadzenie ścieżek co w założeniu miało umożliwić nałożenie płytek na siebie w celu uzyskania komunikacji. Na rysunku 11 umieszczono fragment dokumentacji złącza, która stanowi załącznik 3 niniejszej pracy.



Rysunek 11. Fragment dokumentacji technicznej złącza MEC1-120-02-F-D-EM2 [6]

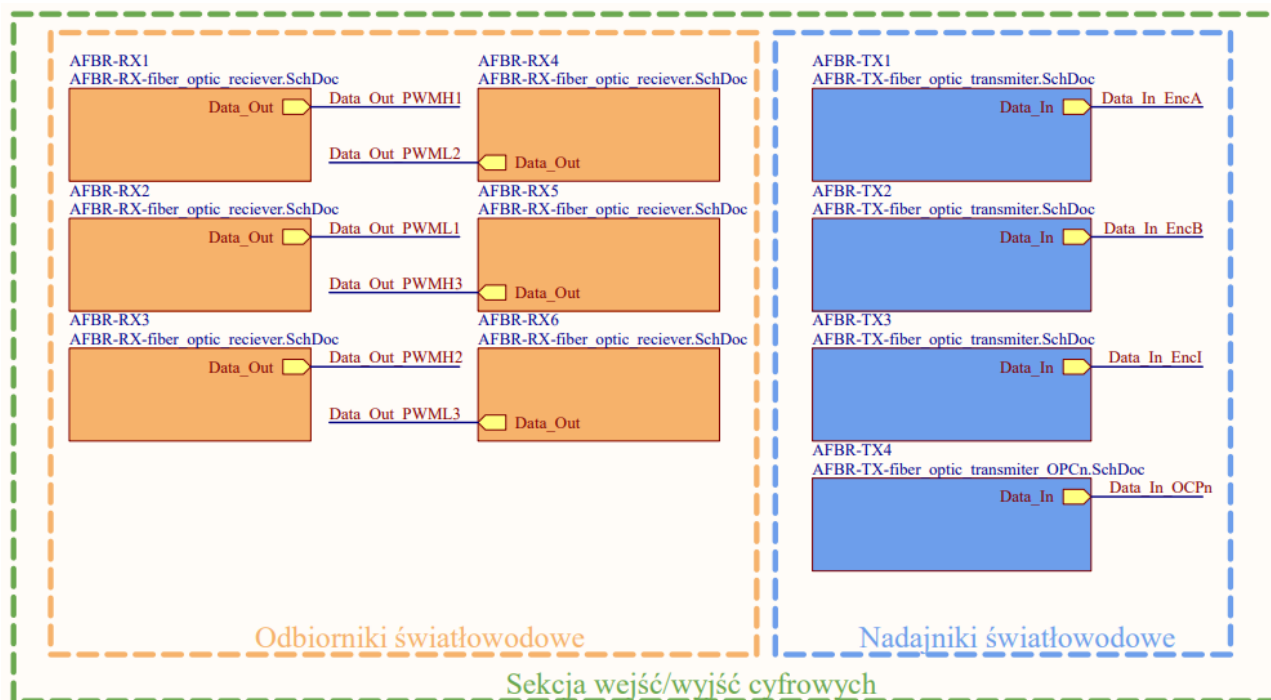
Na podstawie danych z dokumentacji mechanicznej udostępnionej przez producenta takich jak szerokość pojedynczego wyprowadzenia, odległości pomiędzy wyprowadzeniami, wymiary wcięć oraz kształt i wymiary krawędzi złącza zaprojektowano wcześniej wspomniane połączenie.

3.3.1.2. Złącze J1

Złącze J1 posiada dwa wyprowadzenia nadające się do doprowadzenia zewnętrznego zasilania. Umieszczono je podczas projektowania obwodu w celu dostarczenia sygnału zasilającego w fazie testowania przed podłączeniem do modułu falownika.

3.3.2. Sekcja wejść/wyjść cyfrowych

W sekcji wejść/wyjść cyfrowych, której schemat przedstawiono na rysunku 12 umieszczono konwertery światłowodowe (odbiorniki i nadajniki),



Rysunek 12. Schemat elektryczny sekcji wejść/wyjść cyfrowych

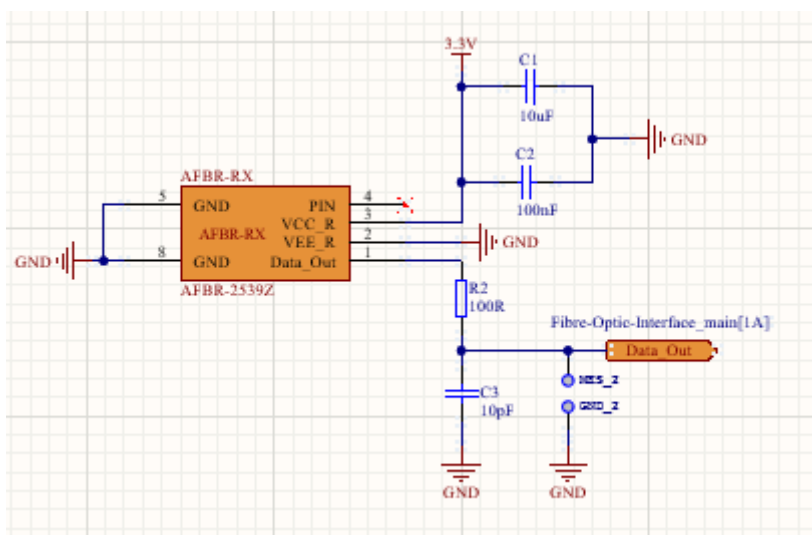
Bloki odbiorników oznaczone na schemacie kolorem pomarańczowym posiadają port wyjściowy w postaci wyprowadzenia przekonwertowanego sygnału modulacji szerokości impulsu, natomiast bloki nadajników oznaczone na schemacie kolorem niebieskim posiadają port wejściowy w postaci wyprowadzenia sygnałów pochodzących z enkodera oraz z obwodu wykrywającego wystąpienie przeciążenia prądowego w standardzie „TTL”.

3.3.2.1. Odbiornik światłowodowy, model AFBR-2624Z

Konwerter firmy „Broadcom” służący do translacji światłowodowo-elektrycznej został wykonany w wersji pionowej ze względu na umiejscowienie przyłącza pod przewód światłowodowy. Na rysunkach 13 oraz 14 umieszczono zdjęcie odbiornika światłowodowego oraz zaprojektowany schemat elektryczny pojedynczego kanału na podstawie noty aplikacyjnej od producenta.



Rysunek 13. Odbiornik światłowodowy, model AFBR-2624Z [7]



Rysunek 14. Schemat elektryczny odbiornika światłowodowego

Na linii sygnałowej przyłączonej do wyprowadzenia „Data_Out” umieszczono filtr dolnoprzepustowy RC w celu blokowania częstotliwości o wartościach wyższych niż wartość częstotliwości odcięcia oraz punkty umożliwiające podłączenie sondy pomiarowej wyposażonej w elektrody przeciwnych biegunów, pozwalającej zweryfikować poprawność zaprojektowania ścieżek czy ilustracji przebiegu na ekranie oscyloskopu.

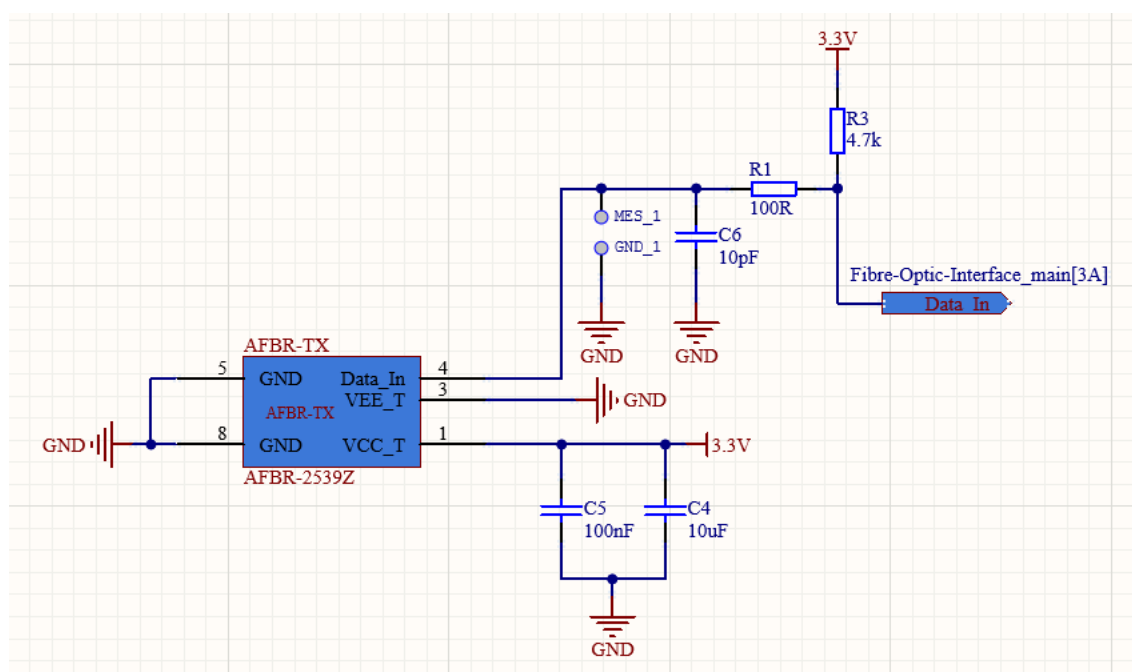
Na wyprowadzenie „VCC_R” dostarczano zasilanie do urządzenia. Na linii zasilającej umieszczono dwa kondensatory stabilizujące napięcie. Umieszczenie ich możliwie jak najbliżej konwerterów pozwala na minimalizację zakłóceń za pośrednictwem skrócenia ścieżki prądowej.

3.3.2.2. Nadajnik światłowodowy, model AFBR-1624Z

Nadajnik AFBR-1624Z został wykonany w poziomej wersji ze względu na umiejscowienie przyłącza pod przewód światłowodowy. Na rysunku 15 zaprezentowano zdjęcie modelu wykorzystanego w projekcie interfejsu, natomiast rysunek 16 ilustruje schemat elektryczny pojedynczego kanału konwertera.



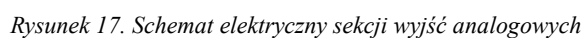
Rysunek 15. Nadajnik światłowodowy, model AFBR-1624Z [8]



Rysunek 16. Schemat elektryczny nadajnika światłowodowego

W konwerterach odpowiedzialnych za sygnały pochodzące z enkodera zastosowano dwa punkty pomiarowe, natomiast w konwerterze obsługującym sygnał błędu nadprądowego zastosowano jeden punkt o indeksie „*OCPn*”.

W sekcji wyjść analogowych, której schemat elektryczny umieszczono na rysunku 17 przewidziano umieszczenie siedmiu złącz *RJ-45*.



3.3.3.1. Złącze pomiarowe typu *RJ-45*, model *CUC-SP-JIST-S/R4LT*

W projekcie wykorzystano model *CUC-SP-JIST-S/R4LT* firmy „*Phoenix Contact*”, którego zdjęcie zaprezentowano na rysunku 18.



Rysunek 18. Zdjęcie złącza typu *RJ-45*, model *CUC-SP-JIST-S/R4LT* [9]

Model *CUC-SP-JIST-S/R4LT* to standardowe, ośmio-pinowe złącze typu *RJ-45* wykonane w standardzie ethernetowym o przewlekany rodzaj montażu.

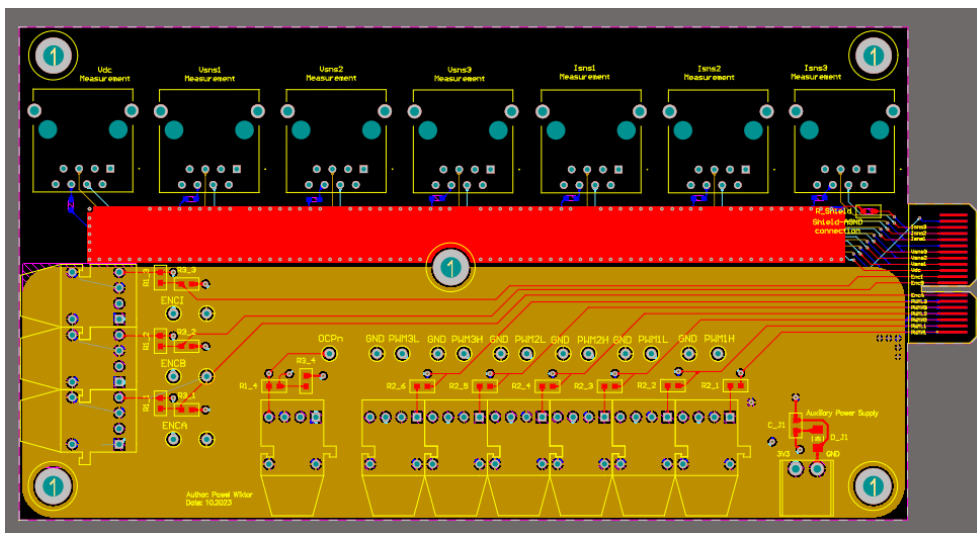
W odwołaniu do rysunku 3 przedstawiającego opis przeznaczenia pinów, na potrzeby tytułowego interfejsu wykorzystano wyprowadzenia odpowiedzialne za sygnał prądowy oraz sygnał uziemiający. Szóste wyprowadzenie o zerowym potencjale przewidziano na połączenie z ekranem analogowym wykorzystując rezystor o maksymalnie niskiej rezystancji.

3.4. – Wykonanie obwodu

Stosując się do założeń projektowych oraz zgodnie z koncepcją umieszczoną na rysunku 7 rozmieszczono elementy na płytce PCB.

3.4.1. Widok ogólny

Ogólna wizualizacja dwuwymiarowa to przekrojowy widok warstw sygnałowych płytki patrząc z góry. Na rysunku 19 zaprezentowano widok ogólny płytki *FOI*.



Rysunek 19. Widok ogólny płytki FOI

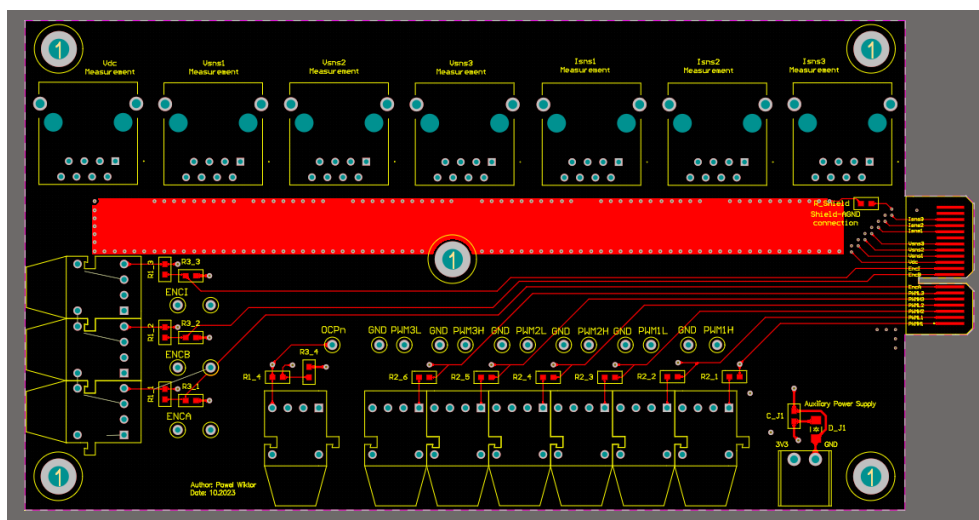
Płytkę FOI zaprojektowano jako czterowarstwowy obwód drukowany o wymiarach 155 x 80 [mm]. W celu zabezpieczenia przed uszkodzeniami mechanicznymi umieszczono podpory w postaci pięciu śrub M3.

Zdecydowano się na umieszczenie ekranu izolującego w celu separacji sygnałów analogowych od sygnałów cyfrowych. Separacja z wykorzystaniem ekranu pozwala na minimalizację zakłóceń elektromagnetycznych.

W prawej części widoku umieszczono wycięty fragment obwodu odpowiadający za połączenie z konektorem J60 zgodnie z dokumentacją techniczną złącza *MEC1-120-02-F-D-EM2*.

3.4.2. Widok zewnętrznej warstwy górnej – *Top Layer*

Projekt zakłada dwie warstwy zewnętrzne umożliwiające rozmieszczanie elementów. Jedną z nich jest warstwa górna, której wizualizację dwuwymiarową przedstawiono na rysunku 20.

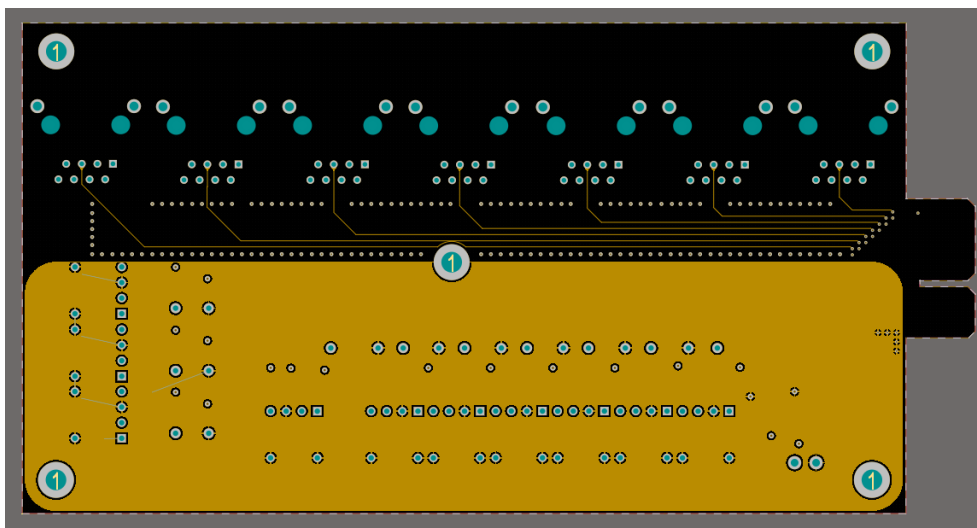


Rysunek 20. Widok zewnętrznej warstwy górnej

Założono, że należy umożliwić dostęp do wszystkich części użytkowych płytki FOI ustawionej na podporach. Z tego tytułu na warstwie górnej umieszczono wszystkie elementy zawierające wtyki pod przewody, złącze sygnałowe i zasilające oraz punkty pomiarowe.

3.4.3. Widok warstwy środkowej 1 – *Middle Layer 1*

Warstwa środkowa 1 została przewidziana do rozproszania sygnału masy cyfrowej oraz sygnałów analogowych (Rysunek 21).

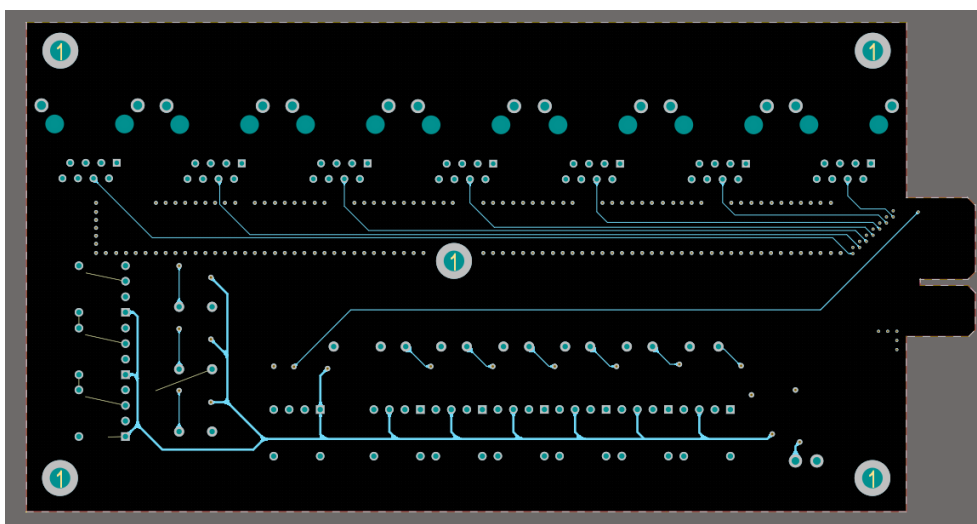


Rysunek 21. Widok warstwy środkowej 1

Masę cyfrową i masę analogową podłączono do odpowiednich wyprowadzeń na złączu krawędziowym.

3.4.4. Widok warstwy środkowej 2 – Middle Layer 2

Na warstwie środkowej 2 zaplanowano rozprowadzenie sygnałów zasilających (Rysunek 22).



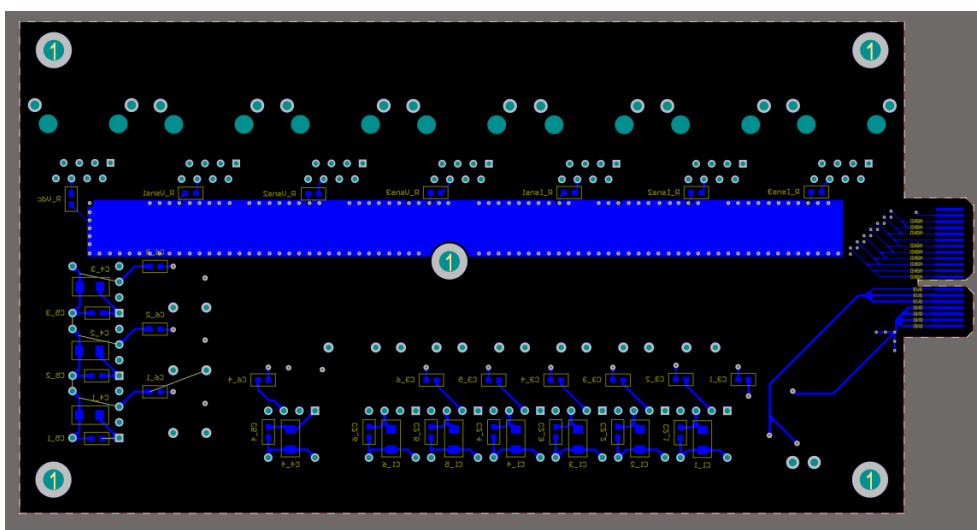
Rysunek 22. Widok warstwy środkowej 2

Ścieżki poprowadzone na tej warstwie służyły do zasilania obwodu napięciem 3.3 [V]. Sygnały poprowadzono zarówno ze złącza krawędziowego jak i z dodatkowego złącza zasilającego.

Przez fizyczną budowę ekranu separującego oraz fakt, że na warstwach sygnałowych znajdowały się jego okładki, na drugiej warstwie środkowej poprowadzono również sygnały analogowe.

3.4.5. Widok zewnętrznej warstwy dolnej – *Bottom Layer*

Ostatnią warstwą obwodu drukowanego była zewnętrzna warstwa dolna, której wizualizację dwuwymiarową przedstawiono na rysunku 23.



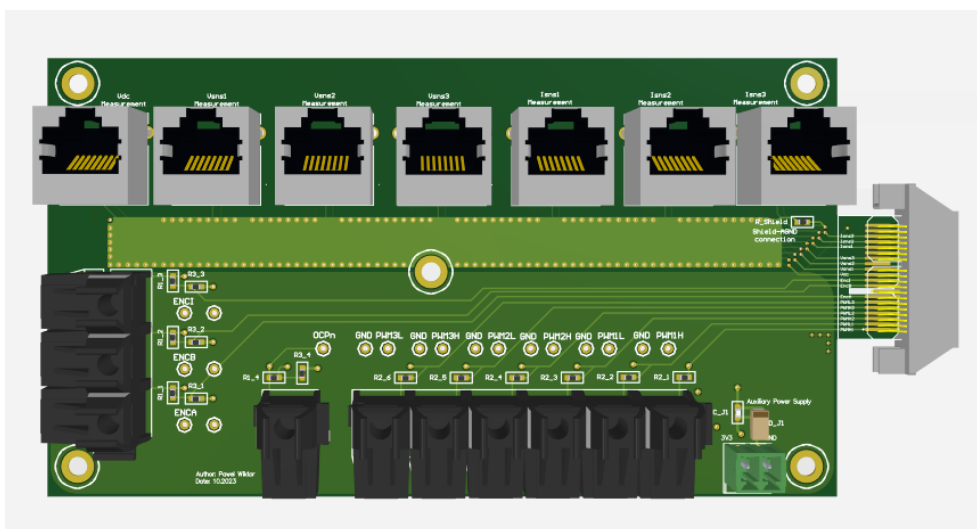
Rysunek 23. Widok zewnętrznej warstwy dolnej

Sposób połączenia *EPC9167* oraz *FOI* przez nałożenie ich na siebie zakładał wyprowadzenia złącza krawędziowego na dwóch warstwach zewnętrznych więc głównym przeznaczeniem warstwy dolnej było rozproszanie części sygnałów pochodzących ze złącza J60.

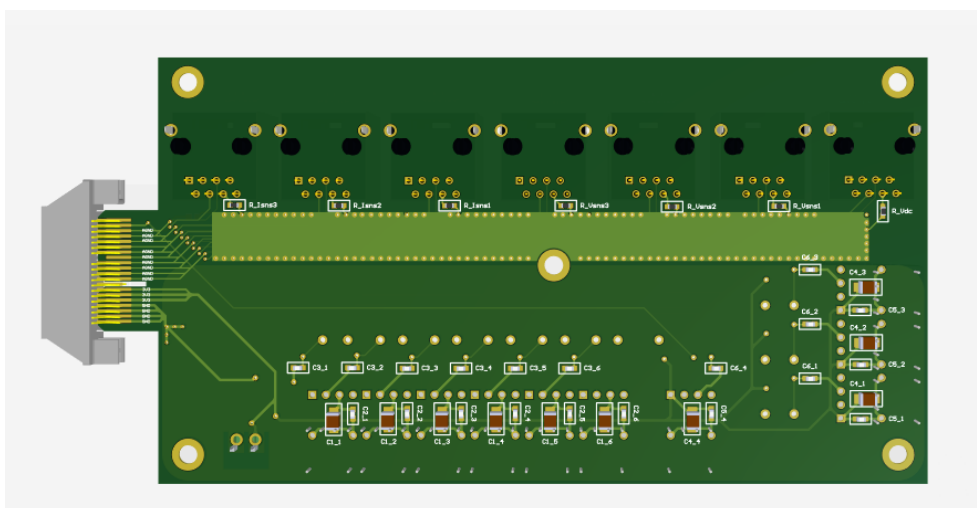
Ze względu umieszczenia konwerterów światłowodowych na warstwie górnej, ułożono kondensatory stabilizujące napięcie i filtrujące dokładnie pod nimi oraz możliwie najbliżej ich pinów w celu maksymalnego skrócenia ścieżek prądowych.

3.4.6. Wizualizacja 3D

Widoki trójwymiarowe służą do propozycji wyglądu płytki z poziomu projektowego oraz mogą stanowić wzór wykorzystany do procesu montażu. Umieszczono na niej trójwymiarowe wersje komponentów dokładniej opisanych w rozdziale projektowym. Wizualizację trójwymiarową zaprezentowano na rysunku 24 oraz 25.



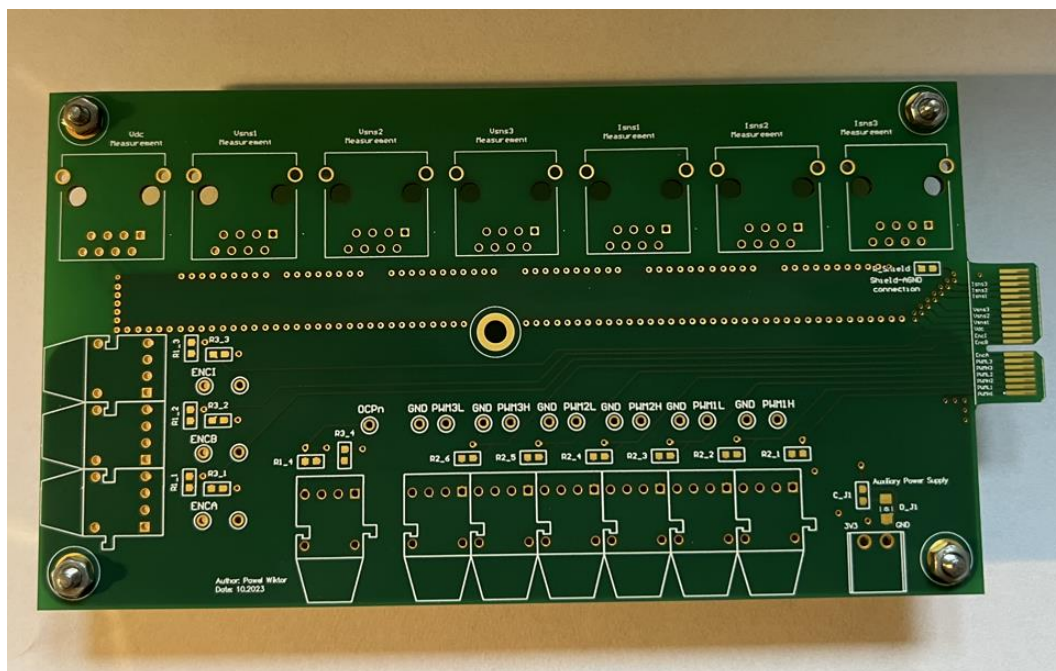
Rysunek 24. Wizualizacja 3D - widok z góry



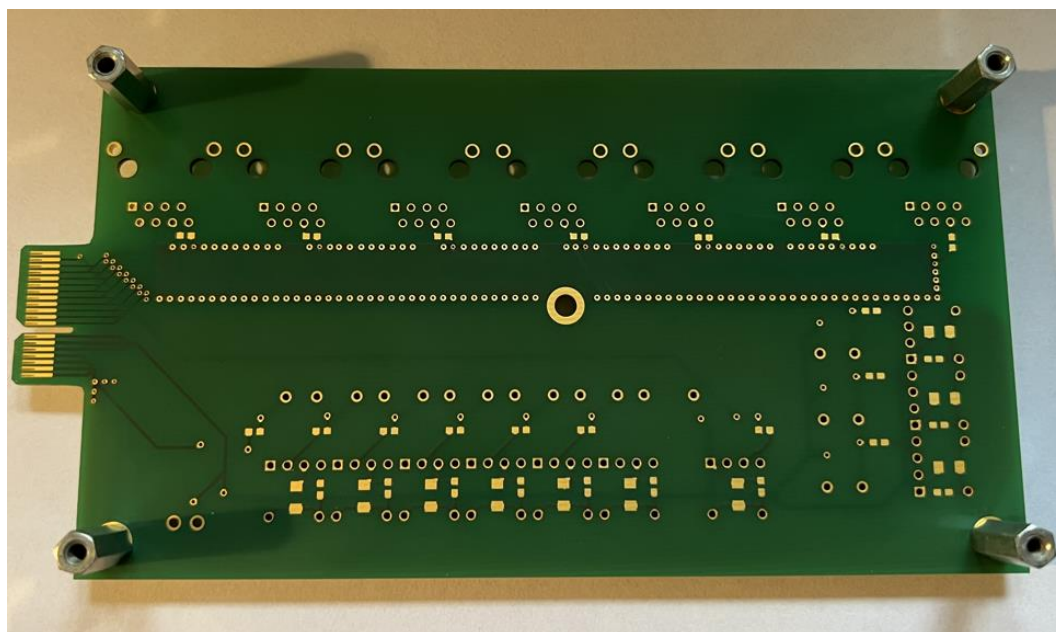
Rysunek 25. Wizualizacja 3D - widok z dołu

Rozdział 4 – Montaż elementów elektrycznych oraz wykonanie testów poprawności

Elementy elektryczne były wykonane zarówno w technologii powierzchniowej jak i technologii przewlekanej. Ilustracje zamieszczone na rysunkach 26 oraz 27 przedstawiają zdjęcie fizycznego obwodu *FOI*.



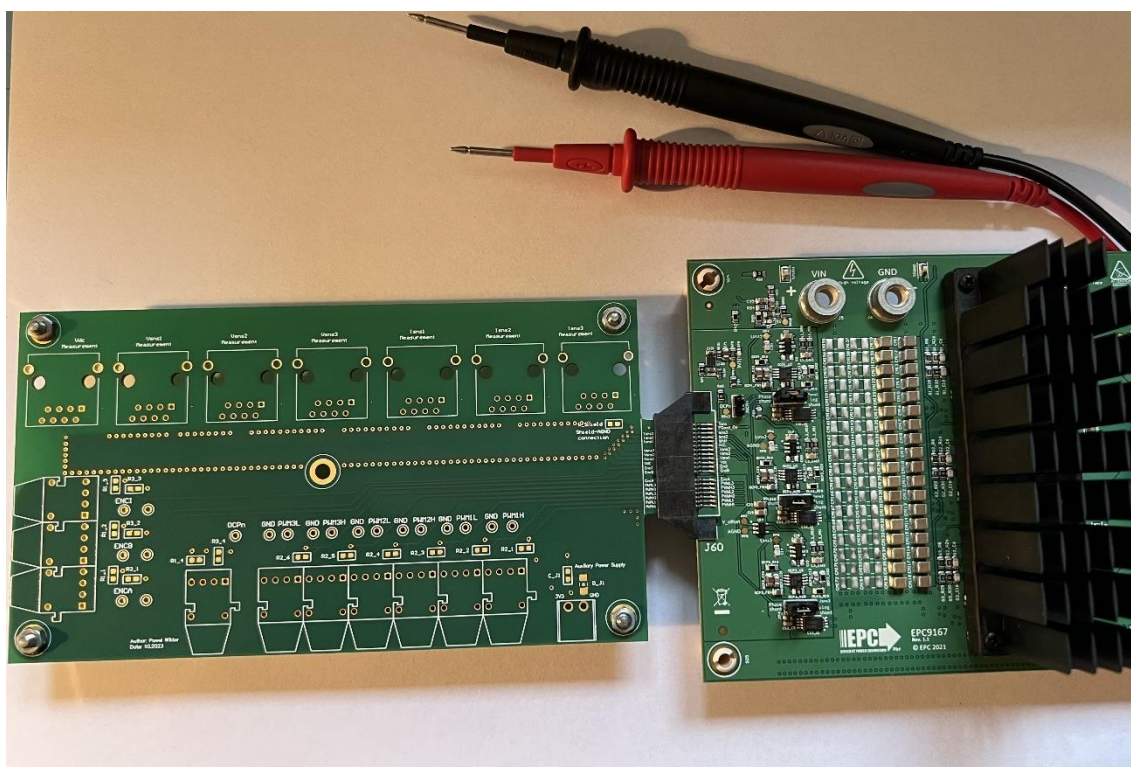
Rysunek 26. Zdjęcie fizycznego obwodu *FOI* - widok z góry



Rysunek 27. Zdjęcie fizycznego obwodu *FOI* - widok z dołu

4.1. Testy poprawności

Po otrzymaniu fizycznego obwodu drukowanego od firmy zewnętrznej zajmującej się produkcją należy wykonać szereg czynności pozwalający określić poprawność działania, nazywanych zbiorczo testami poprawności. W przypadku płytek „PCB” za wystarczające kryterium uznaje się weryfikację przewodzenia ścieżek w punktach łączeniowych. Na rysunku 28 zaprezentowano zdjęcie stanowiska pomiarowego do wykonania testów poprawności.



Rysunek 28. Stanowisko do przeprowadzenia testów poprawności

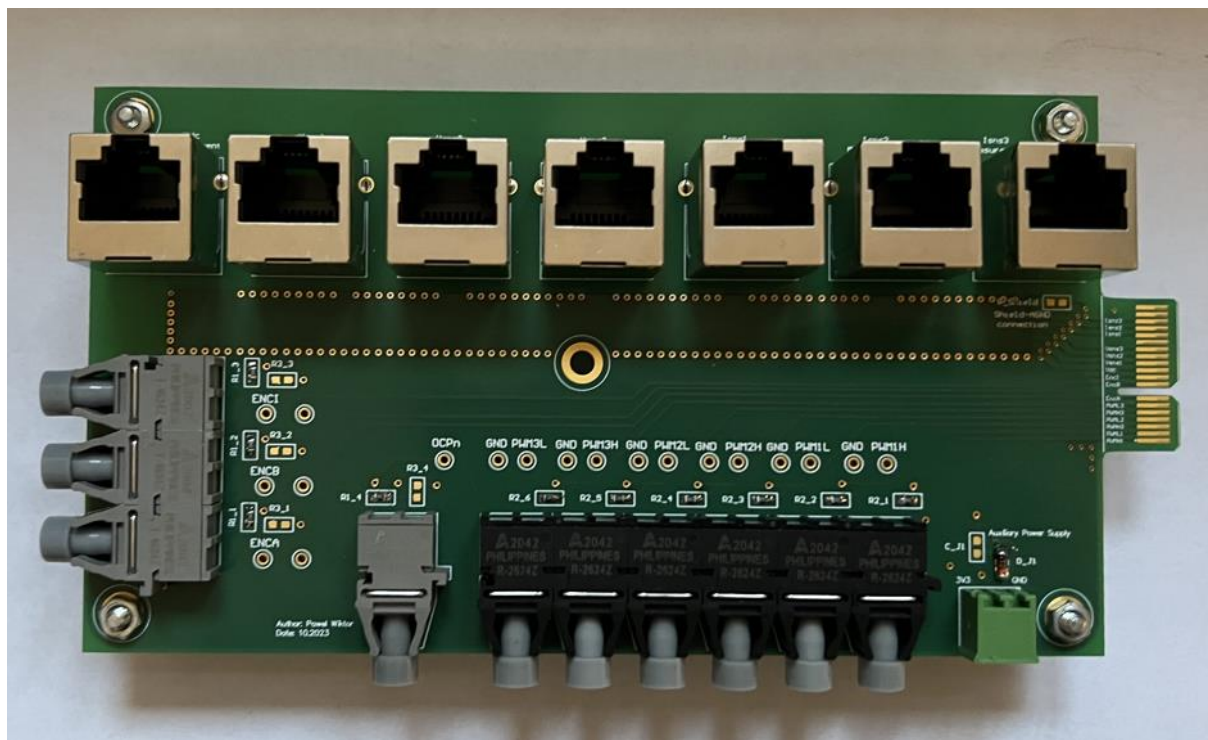
Testy poprawności wykonano wykorzystując multimetr cyfrowy z sondami pomiarowymi w trybie badania ciągłości obwodu.

Sprawdzono ciągłość przewodzenia na liniach sygnałów cyfrowych i analogowych oraz na liniach zasilających.

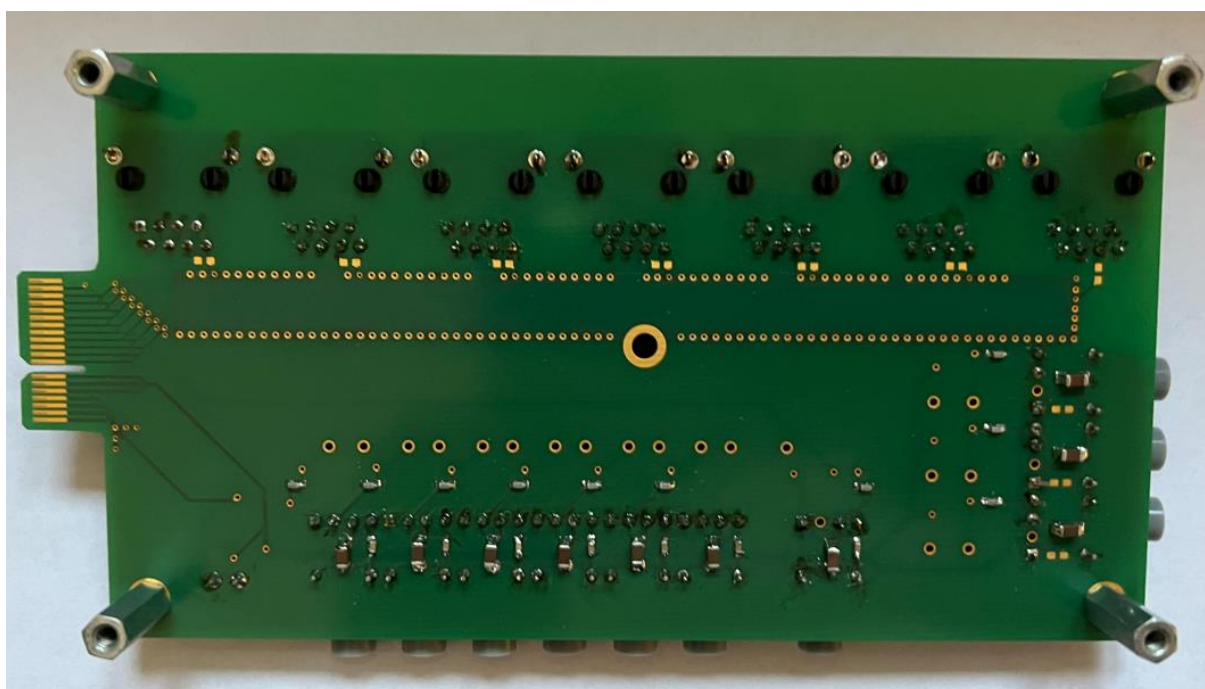
Zarejestrowano ciągłość na wszystkich badanych ścieżkach co pozwoliło stwierdzić poprawność zaprojektowania i wykonania obwodu oraz przystąpić do etapu montażu.

4.2. Lutowanie elementów elektrycznych

Po pomyślnej weryfikacji poprawności obwodu przystąpiono do procesu lutowania. Rozpoczęto od powierzchniowych elementów „0603” od spodniej części płytki, następnie zamontowano elementy wykonane w technologii przewlekanej. Widoki płytki po zakończonym procesie lutowania elementów zestawiono na rysunkach 29 oraz 30.



Rysunek 29. Wygląd końcowy płytki – widok z góry



Rysunek 30. Wygląd końcowy płytki – widok z dołu

Rozdział 5 – Podsumowanie

Celem projektu dyplomowego było stworzenie obwodu drukowanego, umożliwiającego połączenie obiektu w postaci trójfazowego falownika napięcia *EPC9167* dedykowanego do obsługi układów napędowych z silnikami PMSM z systemem szybkiego prototypowania układów sterowania *B-BOX* firmy „imperix”.

W projekcie dyplomowym opisano stanowisko systemu sterowania, opisano procesy projektowania, montażu i uruchomienia interfejsu oraz spełniono wszystkie założenia i cele projektowe.

W efekcie końcowym interfejs komunikacyjny umożliwia zarówno dwukierunkową konwersję sygnałów elektrycznych w standardzie „TTL” obsługiwanych przez moduł falownika na sygnały w standardzie transmisji światłowodowej obsługiwane przez sterownik *B-BOX* jak i propagację sygnałów pomiarowych w standardzie analogowym do sterownika wykorzystując złącza *RJ-45*.

Projekt dyplomowy umożliwił mi naukę obsługi profesjonalnego oprogramowania przeznaczonego dla obwodów drukowanych, pogłębienie wiedzy w zagadnieniach sterowania światłowodowego oraz udoskonalenie umiejętności lutowania elementów elektrycznych.

Bibliografia

- [1] Dokumentacja techniczna sterownika imperix B-BOX RCP – “*B-BOX_Datasheet*”
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa EPC9167 – „*EPC9167_qsg*”
- [3] Krykowski K. – „*Silniki PM BLDC*”, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2015, str. 14-16
- [4] „*Altium Designer – przewodnik po programie*”, Altium Limited, 2005-2019
- [5] Strona producenta „*SAMTEC*”, dedykowana dla urządzenia MEC1-120-02-F-D-EM2 – <https://www.samtec.com/products/mec1-120-02-f-d-em2>
- [6] Dokumentacja techniczna złącza MEC1-120-02-F-D-EM2 – „*mec1-1xx-xx-xx-d-emx-xx-footprint*”
- [7] Strona producenta „*BROADCOM*”, dedykowana dla urządzenia AFBR-2624Z – <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/industrial-control-general-purpose/650nm/afbr-2624z>
- [8] Strona producenta „*BROADCOM*”, dedykowana dla urządzenia AFBR-1624Z – <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/industrial-control-general-purpose/650nm/afbr-1624z>
- [9] Strona producenta „*Phoenix Contact*”, dedykowana dla urządzenia CUC-SP-J1ST-S/R4LT - <https://www.phoenixcontact.com/pl-pl/produkty/wkladka-zenska-cuc-sp-j1st-sr4lt-1149872>

Załączniki

- [1] Dokumentacja techniczna sterownika „imperix B-BOX RCP” – “*B-BOX_Datasheet.pdf*”
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa EPC9167 – „*EPC9167_qsg.pdf*”
- [3] Dokumentacja techniczna złącza MEC1-120-02-F-D-EM2 – „*mec1-lxx-xx-xx-d-emx-xx-footprint.pdf*”

Spis tabel i rysunków

- Tabela 1. Specyfikacja sterownika „B-BOX RCP” – źródło: dokumentacja techniczna sterownika imperix B-BOX RCP – “B-BOX_Datasheet”
 - Tabela 2. Opis indeksowania sygnałów cyfrowych oraz analogowych – opracowanie własne
 - Tabela 3. Założenia projektowe – opracowanie własne
-
- Rysunek 1. Schemat blokowy systemu sterowania – źródła:
 - Dokumentacja techniczna sterownika imperix B-BOX RCP – “B-BOX_Datasheet”
 - Dokumentacja techniczno-ruchowa EPC9167 – „EPC9167_qsg”
 - <http://kener.elektro.polsl.pl/epedlab/lect.php?no=b5&l=pl>
 - Rysunek 2. Zdjęcie sterownika imperix B-BOX RCP – źródło: dokumentacja techniczna sterownika imperix B-BOX RCP – “B-BOX_Datasheet”
 - Rysunek 3. Koncepcja przyłączenia sygnałów do pinów złącza RJ-45 – źródło: dokumentacja techniczna sterownika imperix B-BOX RCP – “B-BOX_Datasheet”
 - Rysunek 4. Schemat elektryczny modułu trójfazowego falownika napięcia – źródło: dokumentacja techniczno-ruchowa EPC9167 – „EPC9167_qsg”
 - Rysunek 5. Zdjęcie modułu trójfazowego falownika napięcia – źródło: dokumentacja techniczno-ruchowa EPC9167 – „EPC9167_qsg”
 - Rysunek 6. Schemat ideowy systemu sterowania – opracowanie własne
 - Rysunek 7. Koncepcja rozmieszczenia elementów na płycie FOI – opracowanie własne
 - Rysunek 8. Schemat główny – opracowanie własne
 - Rysunek 9. Schemat elektryczny sekcji złącza sygnałowego – opracowanie własne
 - Rysunek 10. Zdjęcie złącza krawędziowego, model MEC1-120-02-F-D-EM2 – źródło: <https://www.samtec.com/products/mec1-120-02-f-d-em2>
 - Rysunek 11. Fragment dokumentacji technicznej złącza MEC1-120-02-F-D-EM2 – źródło: Dokumentacja techniczna złącza MEC1-120-02-F-D-EM2 – „mec1-1xx-xx-xx-d-emx-xx-footprint”
 - Rysunek 12. Schemat elektryczny sekcji wejść/wyjść cyfrowych – opracowanie własne
 - Rysunek 13. Odbiornik światłowodowy, model "AFBR-2624Z" – źródło: <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/industrial-control-general-purpose/650nm/afbr-2624z>
 - Rysunek 14. Schemat elektryczny odbiornika światłowodowego – opracowanie własne
 - Rysunek 15. Nadajnik światłowodowy, model „AFBR-1624Z” – źródło: <https://www.broadcom.com/products/fiber-optic-modules-components/industrial/industrial-control-general-purpose/650nm/afbr-1624z>
 - Rysunek 16. Schemat elektryczny nadajnika światłowodowego – opracowanie własne

- Rysunek 17. Schemat elektryczny sekcji wyjść analogowych – opracowanie własne
- Rysunek 18. Zdjęcie złącza typu „RJ-45”, model CUC-SP-J1ST-S/R4LT – źródło:
<https://www.phoenixcontact.com/pl-pl/produkty/wkladka-zenska-cuc-sp-j1st-sr4lt-1149872>
- Rysunek 19. Widok ogólny płytki „FOI” – opracowanie własne
- Rysunek 20. Widok zewnętrznej warstwy górnej – opracowanie własne
- Rysunek 21. Widok warstwy środkowej 1 – opracowanie własne
- Rysunek 21. Widok warstwy środkowej 2 – opracowanie własne
- Rysunek 23. Widok zewnętrznej warstwy dolnej – opracowanie własne
- Rysunek 24. Wizualizacja 3D - widok z góry – opracowanie własne
- Rysunek 25. Wizualizacja 3D - widok z dołu – opracowanie własne
- Rysunek 26. Zdjęcie fizycznego obwodu FOI - widok z góry – opracowanie własne
- Rysunek 27. Zdjęcie fizycznego obwodu FOI - widok z dołu – opracowanie własne
- Rysunek 28. Stanowisko do przeprowadzenia testów poprawności – opracowanie własne
- Rysunek 29. Wygląd końcowy płytki – widok z góry – opracowanie własne
- Rysunek 30. Wygląd końcowy płytki – widok z dołu – opracowanie własne