

AGH

AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

WYDZIAŁ INFORMATYKI, ELEKTRONIKI I TELEKOMUNIKACJI

INSTYTUT ELEKTRONIKI

Projekt dyplomowy

Modułowy system do pomiaru parametrów przetwornic DC/DC

Modular Device For Measuring DC/DC Converter Parameters

Imię i nazwisko:

Krzysztof SIKORA

Kierunek studiów:

ELEKTRONIKA

Opiekun pracy:

dr inż. Jacek OSTROWSKI

Spis treści

Spis treści	3
1 Cel pracy	5
2 Wstęp	7
2.1 Wstęp teoretyczny - przetwornice napięciowe DC	7
2.2 Prezentacja problemu	8
3 Przegląd obecnych rozwiązań	11
3.1 Rozwiązania dostępne na rynku komercyjnym	11
3.2 Alternatywne rozwiązania	12
3.3 Proponowane rozwiązanie	13
4 Realizacja projektu	15
4.1 Projekt elektroniki	15
4.1.1 Kontroler	15
4.1.2 Zasilacz regulowany	24
4.1.3 Obciążenie aktywne	32
4.2 Oprogramowanie	37
4.2.1 Moduł kontrolera	37
4.2.2 Pozostałe moduły	40
4.3 Mechanika	42
5 Testy	47
5.1 Testy	47
5.1.1 Testy zasilacza regulowanego	47
5.1.2 Testy obciążenia aktywnego	47
5.1.3 Pomiar prądu i napięcia	47
5.1.4 Automatyczny pomiar sprawności przetwornicy	47
6 Podsumowanie	51
A Moduł kontrolera	57
B Moduł zasilacza regulowanego	70
C Moduł obciążenia aktywnego	81
D Panele przycisków	81

Rozdział 1

Cel pracy

Celem pracy jest zaprojektowanie, wykonanie i przetestowanie urządzenia do pomiarów parametrów przetwornic DC-DC. Urządzenie powinno spełniać następujące warunki:

- możliwość pomiaru sprawności przetwornic, regulacji napięcia wyjściowego, zakresu napięć wejściowych i prądów obciążenia,
- modularność konstrukcji,
- możliwość dodania kolejnych modułów, umożliwiających wykonywanie innych pomiarów,
- łatwość modyfikacji sprzętu i oprogramowania,
- niska cena w porównaniu do rozwiązań komercyjnych.

W celu spełnienia przedstawionych powyżej założeń, zaprojektowane urządzenie musi posiadać:

- zintegrowany zasilacz regulowany,
- zintegrowane obciążenie aktywne,
- wbudowany kontroler, pozwalający na pracę bez konieczności podłączania do komputera, wyposażony w podstawowy interfejs użytkownika z wyświetlaczem.

W rozdziale 2 przedstawiono budowę i rodzaje przetwornic DC-DC.

W rozdziale 3 zaprezentowano rozwiązania komercyjne urządzeń do pomiaru parametrów przetwornic. Opisano również zasadę działania projektowanego urządzenia.

W rozdziale 4 zawarto opis realizacji projektu, zarówno pod kątem elektroniki, oprogramowania, jak i obudowy.

W rozdziale 5 przedstawiono testy skonstruowanego urządzenia.

Rozdział 2

Wstęp

W rozdziale 2 opisano klasyfikację i budowy różnych rodzajów przetwornic DC-DC.

2.1 Wstęp teoretyczny - przetwornice napięciowe DC

Przetwornice napięciowe DC/DC (ang. *DC/DC Converter*), nazywane również przekształtnikami napięcia, bądź konwerterami mocy [1], to układy umożliwiające zmianę napięć i prądów w celu poprawnego zasilania innych urządzeń elektronicznych / elektrycznych. Zadanie, polegające na dostarczeniu do obciążenia wymaganej wartości napięcia, realizować można na kilka sposobów, w zależności od dostępnych dla projektanta źródeł mocy (napięcia lub prądu), a także oczekiwanej sprawności kompletnego rozwiązania.

Rozważając wyłącznie zmianę napięcia DC na DC, przy założeniu, że napięcie dostarczane do obciążenia ma być mniejsze niż wejściowe, zastosować można proste dzielniki rezystancyjne, bądź regulatory liniowe. Główną wadą takiego rozwiązania jest jednak niska sprawność, czyli stosunek mocy dostarczanej do obciążenia, do mocy pobieranej przez układ zasilacza, zgodnie ze wzorem 2.1.

$$\eta = \frac{P_{load}}{P_{in}} \quad (2.1)$$

Jeśli więc potrzebne jest podwyższenie napięcia, odwrócenie jego polaryzacji, bądź konieczne jest zwiększenie sprawności zasilacza, najbardziej optymalnym rozwiązaniem okazuje się przetwornica impulsowa. Przetwornice impulsowe, inaczej zasilacze impulsowe (ang. SMPS - *Switch Mode Power Supply*) [2], umożliwiają podwyższanie, obniżanie i odwracanie napięć wejściowych oraz cechują się wysoką, w porównaniu do innych rozwiązań, sprawnością.

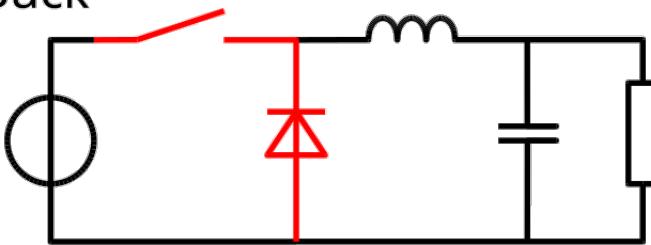
Wyróżnić należy w tym miejscu trzy podstawowe typy przetwornic impulsowych DC/DC, czyli przekształcających napięcia stałe:

- buck - przetwornica obniżająca napięcie,
- boost - przetwornica podwyższająca napięcie,
- buck-boost - przetwornica umożliwiająca zarówno obniżanie jak i podwyższanie napięcia wejściowego.

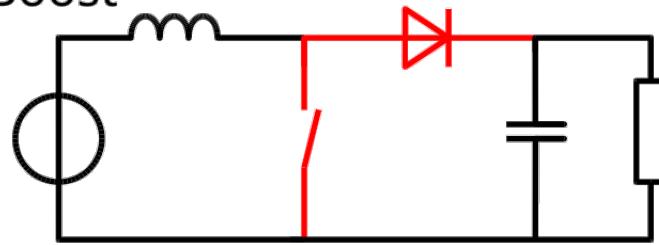
Na rysunku 2.1 przedstawiono przykładowe schematy układów realizujących te trzy typy przetwornic napięciowych.

Istnieją także inne implementacje przetwornic napięciowych, takie jak np.: Ćuk, SEPIC. Ze względu m.in. na ich skomplikowaną konstrukcję (np. stosowanie kondensatora szeregowego), są one dużo mniej popularne od powyżej przedstawionych. W przypadku konwertera typu buck-boost, należy zauważyć, iż odwraca on napięcie wejściowe, w związku z czym w niektórych przypadkach stosuje się zamiast tego szeregowe połączenie układów buck oraz boost, w celu zachowania polaryzacji napięcia względem wspólnej masy.

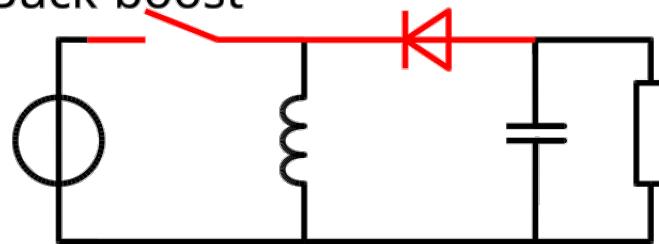
Buck



Boost



Buck-boost



Rysunek 2.1: Przetwornice typu buck, boost oraz buck-boost.

2.2 Prezentacja problemu

Przetwornice napięciowe znalazły zastosowanie w znacznej większości urządzeń elektronicznych. Są one stosowane w komputerach, telefonach, zegarkach, urządzeniach medycznych, automatyce, a obecnie nawet w wielu urządzeniach laboratoryjnych i profesjonalnym sprzęcie pomiarowym. Na stosowanie w tak szerokim zakresie aplikacji, niekiedy bardzo wymagających, pozwolił rozwój półprzewodników, w tym powstanie układów GaN, tranzystorów HEMT i innych, a także integracja niezbędnych elementów przełączających w niewielkich układach scalonych. Do dziś, największym problemem pozostają elementy magnetyczne (cewki) oraz kondensatory. W związku z tym, współczesne zasilacze impulsowe pracują z coraz to większymi częstotliwościami przełączania, a co za tym idzie, rosną wymagania co do ich elementów składowych.

Projektanci mają więc do wyboru wiele układów scalonych, elementów przełączających, jak i pasywnych, które należy dobrać odpowiednio do danego zastosowania. W tym celu, należy znać podstawowe parametry przetwornicy, takie jak:

- zakres napięć wejściowych - minimalne oraz maksymalne napięcie wejściowe, dla którego przetwornica utrzymuje zadane napięcie wyjściowe,
- regulacja napięcia wyjściowego - zakres zmian napięcia wyjściowego w pełnym zakresie napięć zasilających i dopuszczalnych prądów obciążenia,

- sprawność - stosunek mocy wyjściowej do mocy wejściowej, określający jednocześnie ilość mocy wydzielanej przez samą przetwornicę, zgodnie z 2.1,
- poziom szumów wyjściowych - podawany zazwyczaj jako V_{RMS} oraz $V_{peak-peak}$,
- fizyczne wymiary układu - ograniczone m.in. pobieraną mocą i częstotliwością przełączania.

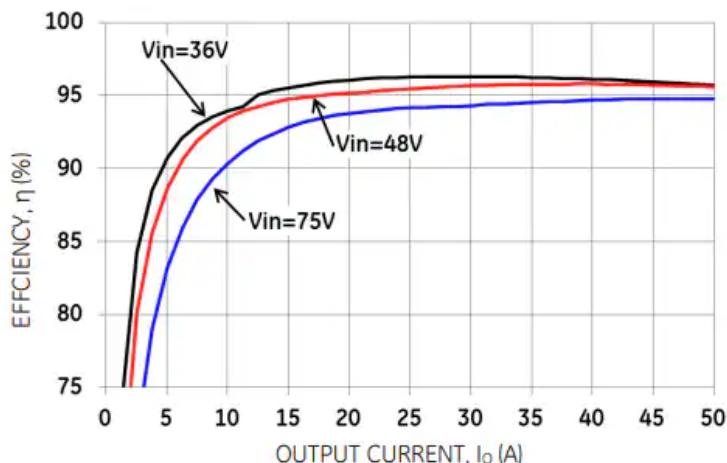
W zastosowaniach precyzyjnych, takich jak urządzenia pomiarowe, niewątpliwie najważniejszą cechą będzie poziom szumów. Jeśli jednak urządzenie zasilane jest baterijnie i wymaga się od niego długiego czasu pracy, konieczne okaże się zoptymalizowanie projektu pod kątem sprawności. Niestety, nie jest się w stanie poprawić każdego parametru z osobna, nie wpływając na pozostałe.

Dzięki rozwojowi technologii, konstruktor może obecnie symulować działanie zasilacza, korzystając z oprogramowania takiego jak np. SPICE [4]. Pozwala to na przewidywanie zachowania projektowanego układu jeszcze przed jego skonstruowaniem. Niestety, na parametry finalnego produktu wpływają mogą elementy pasożytnicze i rozbieżność parametrów modeli elementów, które są stosowane. Konieczna jest więc weryfikacja fizycznego układu i jego pomiary.

Do najpopularniejszych pomiarów należą:

- pomiar szumów wyjściowych - wykonywany zwykle pod obciążeniem, za pomocą oscyloskopu, bądź analizatora widma,
- pomiar regulacji napięcia wyjściowego - wykonywany przy pomocy woltomierza pod obciążeniem,
- pomiar sprawności - wymagane jest tu zmierzenie poziomu mocy wejściowej i wyjściowej dla danego obciążenia.

Zdecydowanie najbardziej czasochłonnym z powyższych staje się pomiar sprawności. Jeśli bowiem chcemy zbadać sprawność przetwornicy w szerokim zakresie napięć wejściowych, czy też prądów obciążenia, dokonujemy wielu pomiarów, których wynikiem są np. przedstawione tu wykresy 2.2.



Rysunek 2.2: Przykładowy wykres sprawności przetwornicy w zależności od napięcia wejściowego i prądu obciążenia, źródło: [5].

Do wykonania takiego pomiaru, potrzebne są zazwyczaj:

- zasilacz regulowany - zasilający mierzoną przetwornicę,
- obciążenie aktywne - pozwalające na zmianę pobieranego z przetwornicy prądu,
- dwa woltomierze - do pomiaru napięcia wejściowego i wyjściowego,
- dwa amperomierze - do pomiaru prądów wejściowego i wyjściowego.

Zakładając, że woltomierze i amperomierze (pomiar mocy) są zintegrowane w układy zasilacza i obciążenia aktywnego, potrzebne są jedynie te dwa urządzenia. Niestety, często konieczne jest ręczne zapisywanie wyników każdego pomiaru i ponowna zmiana ustawień obu urządzeń, a następnie obróbka otrzymanych danych.

Rozwiązania tego problemu, które mogą skrócić czas i usprawnić proces charakteryzacji przetwornicy, przedstawione zostaną w rozdziale 3 wraz z projektowanym urządzeniem, które integruje niezbędne do wykonania pomiarów elementy.

Rozdział 3

Przegląd obecnych rozwiązań

W rozdziale zaprezentowano konstrukcje podobne do realizowanego urządzenia oraz przedstawiono jego ogólną zasadę działania.

3.1 Rozwiązania dostępne na rynku komercyjnym

Obecnie na rynku możemy znaleźć urządzenia, które integrują w sobie komponenty niezbędne do realizacji omawianego problemu pomiaru parametrów przetwornic. Za przykład służyć może m.in. N6705C od firmy Keysight [24], przedstawiony na zdjęciu 3.1.

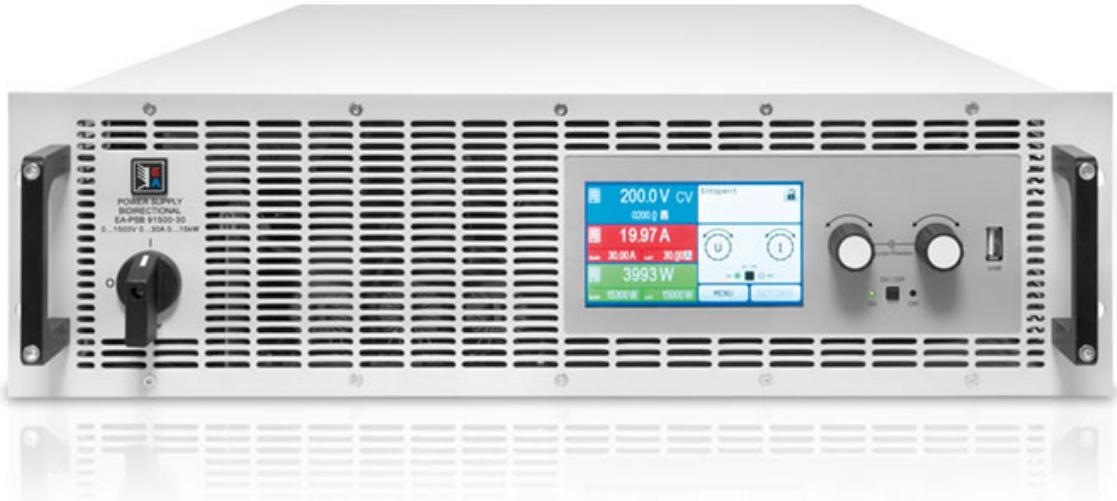


Rysunek 3.1: N67005C firmy Keysight.

Przedstawione urządzenie posiada funkcje oscyloskopu, precyzyjnego woltomierza, miernika prądu, generatora funkcyjnego oraz logowania danych.

Kolejną opcję stanowią tzw. Bidirectional Power Supplies, jak np. te od firmy ElektroAutmatik [33]. Poniżej 3.2 widoczne jest jedno z takich urządzeń.

Takie przyrządy integrują w sobie zasilacze DC - najczęściej przetwornice impulsowe o dużej mocy - oraz obciążenie aktywne. Pozwala to na pomiar mocy wyjściowej i wejściowej. Znaleźć można urzą-



Rysunek 3.2: Przykładowy zasilacz dwukierunkowy od ElektroAutmatik.

dzenia tego typu od różnych producentów, różniące się parametrami, obudową (w tym przypadku typu rack), czy też interfejsami komunikacyjnymi.

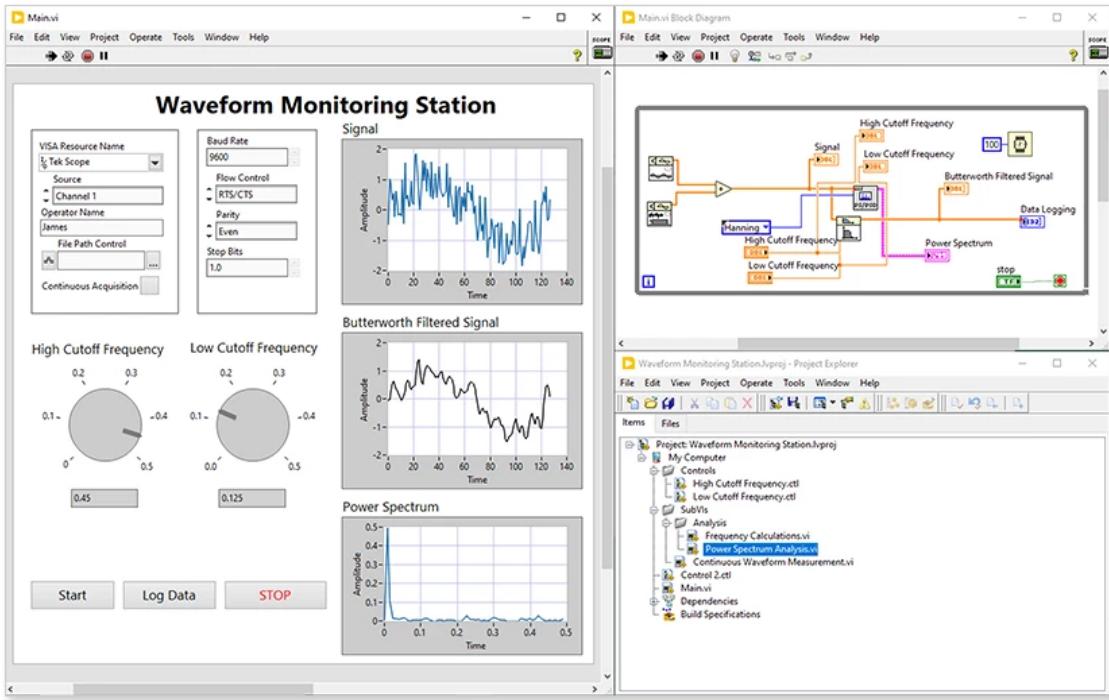
Cechą wspólną obu zaprezentowanych rozwiązań jest niestety ich wysoka cena. Są to narzędzia dla specjalistów, mające wąski zakres zastosowań, w związku z czym ciężko jest znaleźć podobne instrumenty w budżecie kilku lub kilkunastu tysięcy złotych. Kolejną wadą może okazać się brak możliwości modyfikacji, zarówno sprzętu, jak i oprogramowania. Użytkownik nie ma pełnej kontroli nad działaniem swojego sprzętu, co w niektórych wypadkach utrudnia przeprowadzenie wymaganych testów, bądź pomiarów.

3.2 Alternatywne rozwiązania

Chcąc pozbyć się problemu ceny oraz braku możliwości dostosowywania urządzeń do wymagań użytkownika, inżynier może zdecydować się na zbudowanie własnego stanowiska testowego, służącego pomiarowi parametrów przetwornic napięciowych. Jak już wspomniano, w tym celu można wykorzystać zasilacz regulowany, obciążenie aktywne, woltomierz, amperomierz, oscyloskop (np. do pomiaru szumów wyjściowych). Aby usprawnić proces testowania, tego typu instrumenty posiadają często interfejsy komunikacyjne, takie jak: RS232, RS485, Ethernet, USB. Umożliwia to podłączenie do komputera i zdalne sterowanie parametrami tych instrumentów. W zależności od producenta, dokonuje się tego poprzez dedykowaną aplikację, interfejsowy albo odpowiednie API. Przykładowymi językami programowania, które można wykorzystać do kontroli stanowiska testowego są Python [38] i LabView [39].

Najczęściej wybieranym środowiskiem do tego typu zastosowań pozostaje LabView. Na rysunku 3.3 przedstawiony został przykładowy interfejs użytkownika stworzony przy jego pomocy.

Do niewątpliwych zalet takiego rozwiązania należy zaliczyć możliwość wykorzystania posiadanego już sprzętu, a także łatwość rozbudowy i przystosowania do innego typu pomiarów. Niestety, może się okazać, że wykorzystywane instrumenty nie posiadają łatwo dostępnego API, które umożliwiałyby integrację. Nierzadko przeszkodę stanowi także samo środowisko, do którego użycia niejako zmusza producent.



Rysunek 3.3: Przykładowy interfejs stworzony przy pomocy LabView.

3.3 Proponowane rozwiązanie

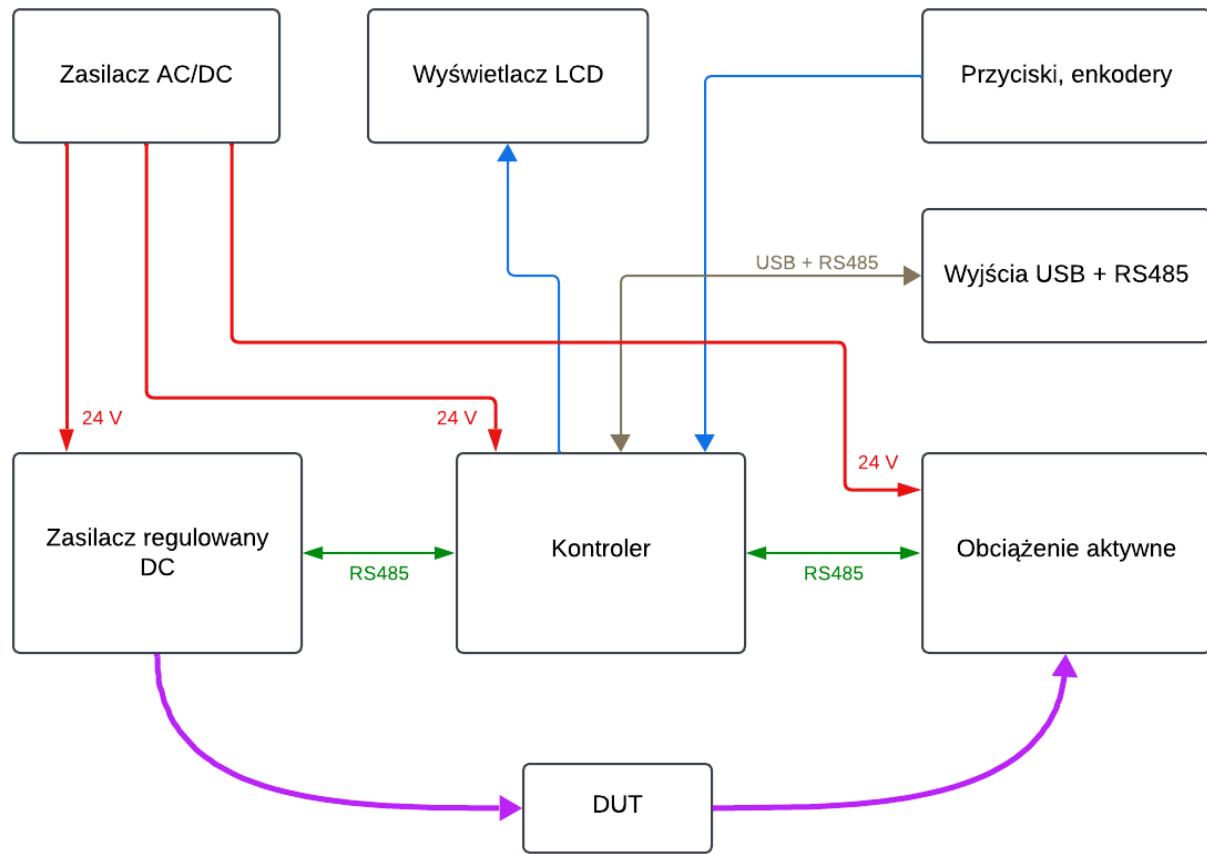
Proponowane rozwiązanie zakłada projekt trzech modułów: kontrolera, obciążenia aktywnego i zasilacza regułowanego, które komunikują się między sobą przy pomocy odpowiedniego interfejsu. Elementy te zostały przedstawione na schemacie blokowym 3.4. W celu umożliwienia użytkownikowi sterowania poszczególnymi modułami, urządzenie musi posiadać duży i czytelny wyświetlacz, a także panel frontowy z przyciskami i enkoderami. Dodatkowe złącza USB oraz RS485 mają na celu umożliwienie sterowania poprzez komputer lub inne urządzenie laboratoryjne. Za zasilanie wszystkich modułów odpowiada zasilacz, przekształcający napięcie sieciowe 230V AC na 24V DC, co pozwala uniknąć projektowania dedykowanych zasilaczy sieciowych dla każdego modułu.

Kolejnym ważnym aspektem jest zakres napięć i prądów, jakie dostarczyć należy do testowanej przetwornicy, oznaczonej na schemacie jako DUT (ang. *Device Under Test*). Zdecydowano się na zakres napięć wyjściowych 0-20 V i prąd do 2 A dla zasilacza regułowanego, jak również 0-20 V dla napięć wejściowych obciążenia aktywnego, z maksymalnym prądem 2A, co daje maksymalną wydzielaną moc na poziomie 40W. Zdaniem autora, jest to zakres wystarczająco szeroki do testowania większości przetwornic, jakie stosowane są w wielu urządzeniach. Zakłada to bowiem możliwość testowania przetwornic pracujących z napięciami: 3.3V, 5V, 9V, 12V, 15V, 20V, które znaleźć można np. w USB Power Delivery, a także przetwarzających napięcie z akumulatorów LiIon, LiPo, lead-acid, LiFePO4.

Jak łatwo zauważać, urządzenie takie umożliwia nie tylko pomiar parametrów przetwornic. Zasilacz regułowany oraz obciążenie aktywne mogą też być wykorzystywane oddzielnie, zasilając inne urządzenia elektroniczne, dokonując pomiarów napięć i poboru prądu. Do mniej oczywistych zastosowań zaliczyć można pomiar pojemności baterii, mierząc ich ładowanie i rozładowanie, pomiar rezystancji przewodów, a co za tym idzie także ich długości, czy też automatyzacja pomiarów dokonywanych przez inne sprzęt laboratoryjne, co można uzyskać podłączając je do wyprowadzeń kontrolera.

Znając już założenia projektu pod kątem elektrycznym, należy się skoncentrować nad aspektem mechanicznym urządzenia. W celu uzyskania modularnej konstrukcji, która umożliwi dalszą rozbudowę, zdecydowano się ujednolicić konstrukcję poszczególnych modułów. Każdy z nich posiada PCB o wymiarach 150x100 mm. Wejściowe napięcie zasilające to 24V DC. Komunikacja natomiast odbywa się poprzez interfejs RS485.

Szczegółowe rozwiązania układowe zostały przedstawione w rozdziale 4, gdzie prezentowany jest zarówno projekt elektroniki, jak i obudowy i okablowania.



Rysunek 3.4: Schemat blokowy urządzenia.

Rozdział 4

Realizacja projektu

W tym rozdziale opisany został proces projektowania zarówno elektroniki, jak i elementów mechanicznych, a także tworzenia oprogramowania urządzenia.

4.1 Projekt elektroniki

Projekt elektroniki podzielony został na poszczególne moduły, które zostały opisane szczegółowo w kolejnych rozdziałach. Aby przyspieszyć proces projektowania oraz zapewnić kompatybilność między modułami, niektóre podukłady wykorzystywane są we wszystkich trzech modułach. Z uwagi na stopień rozbudowania projektów, nie przedstawiono tu wszystkich schematów elektronicznych oraz projektów PCB, a jedynie najważniejsze omawiane fragmenty. Można je natomiast znaleźć w załączniku.

Przedstawione tu schematy elektroniczne oraz projekty płyt PCBA powstały przy pomocy oprogramowania Altium Designer [6], korzystając z licencji studenckiej AGH.

4.1.1 Kontroler

W tej sekcji przedstawiono projekt kontrolera - modułu, który umożliwia sterowanie zasilaczem regulowanym, obciążeniem aktywnym i potencjalnie innymi urządzeniami.

Schemat blokowy

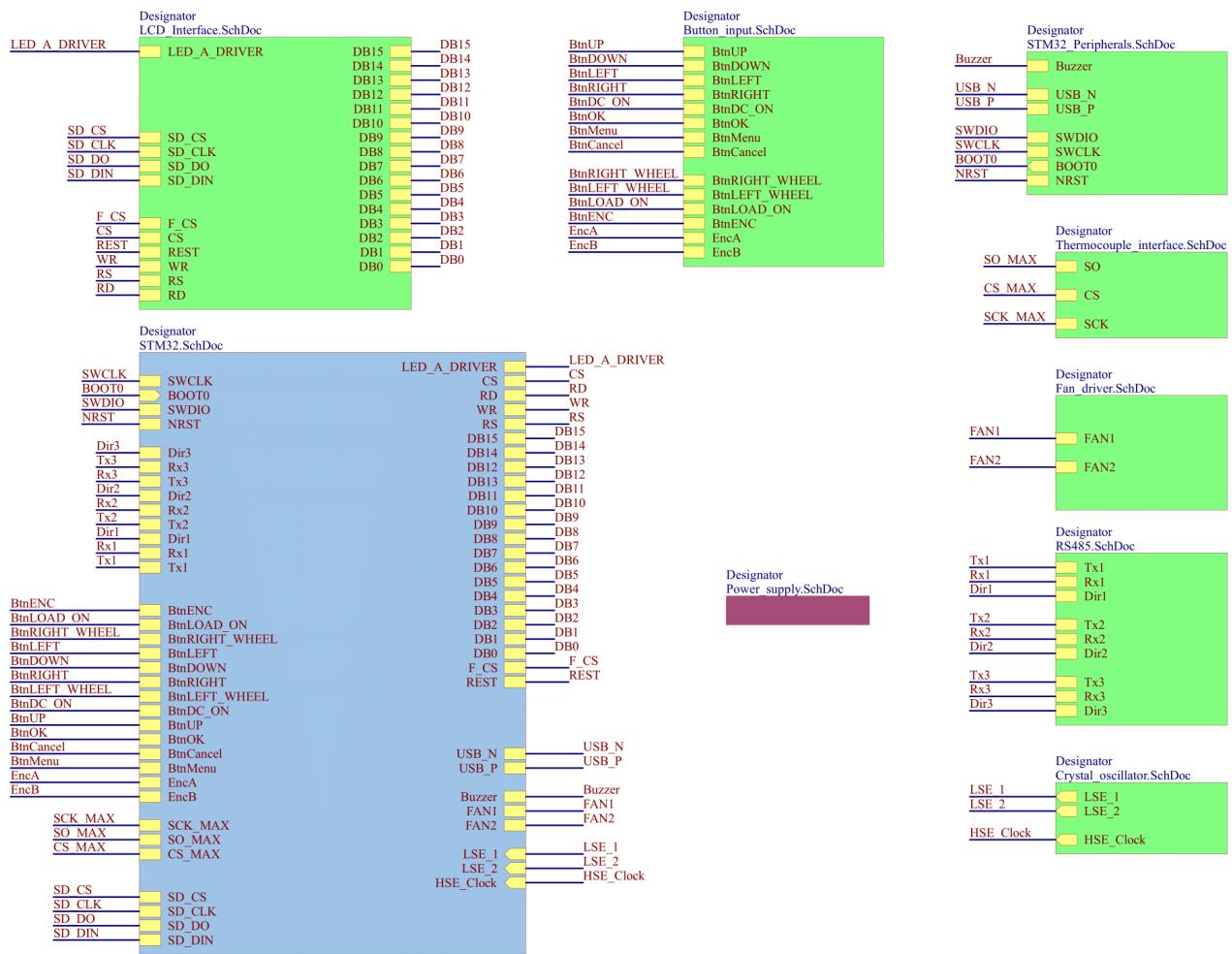
Rysunek 4.1 przedstawia schemat blokowy modułu kontrolera, na którym widoczne są wszystkie jego podstawowe bloki składowe.

Centralnym elementem układu jest mikrokontroler omówiony w następnej sekcji. Oprócz niego, znajduje się tu interfejs wyświetlacza LCD, złącza umożliwiające podłączenie przycisków oraz enkoderów, złącze termopary z dedykowanym układem, kontroler wentylatorów, interfejsy RS485, a także inne układy peryferyjne.

Sekcja mikrokontrolera

Wybranym do modułu kontrolera mikrokontrolerem jest STM32F401VET6 [7]. Jest to układ oparty o 32-bitowy rdzeń ARM Cortex M4, taktowany maksymalną częstotliwością 84MHz. W wybranej wersji posiada on 512kB pamięci typu Flash oraz 96kB pamięci podręcznej RAM. Wśród jego interfejsów znajdują się: UART, I2C, SPI, wbudowany kontroler USB 2.0 full-speed. Możliwe jest również skorzystanie z wbudowanego układu RTC (Real Time Clock). Wyjścia / wejścia układu mogą być taktowane z częstotliwością aż 42MHz, co okazało się ważne podczas podłączania wyświetlacza poprzez interfejs równoległy.

Kluczowymi aspektami przy wyborze mikrokontrolera była wielkość pamięci wbudowanej, dostępność wymaganych interfejsów, szybkość działania, a także łatwość programowania. Mikrokontrolery z serii STM32 posiadają bowiem liczne biblioteki do obsługi popularnych układów peryferyjnych, co



Rysunek 4.1: Schemat blokowy modułu kontrolera.

wraz z oprogramowaniem STM32CubeMX pozwala na szybkie testowanie i łatwą modyfikację oprogramowania.

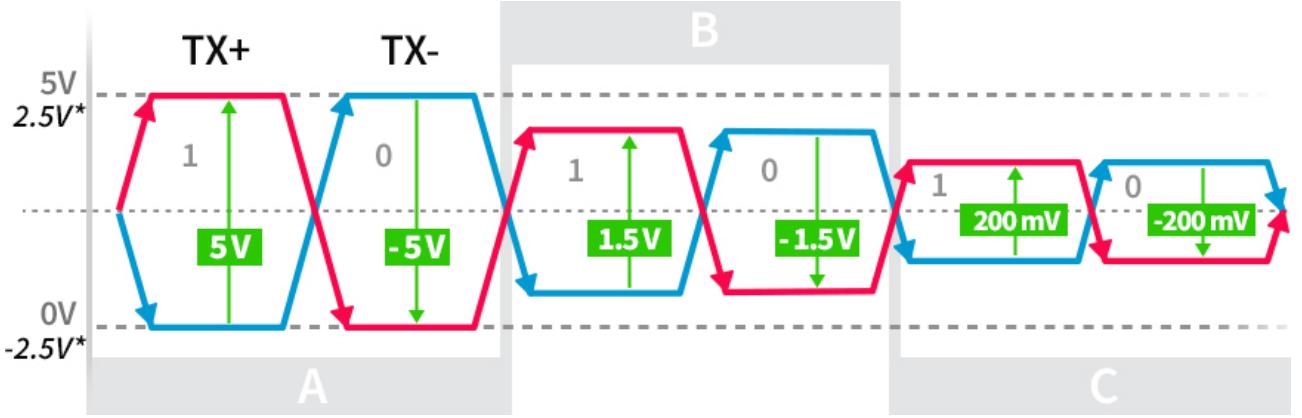
Wśród załączonych schematów, STM32F401 znajduje się na stronie zatytułowanej "Moduł kontrolera: STM32". Oprócz niego, na stronie tej widać niezbędne do prawidłowej pracy kondensatory filtrujące zasilanie, oddziennie dla linii VDD, VDDA, a także wbudowanych regulatorów, podpięte pod wyprowadzenia VCAP_1, VCAP_2, zgodnie z zaleceniami producenta zawartymi w datasheet [7].

Komunikacja RS485

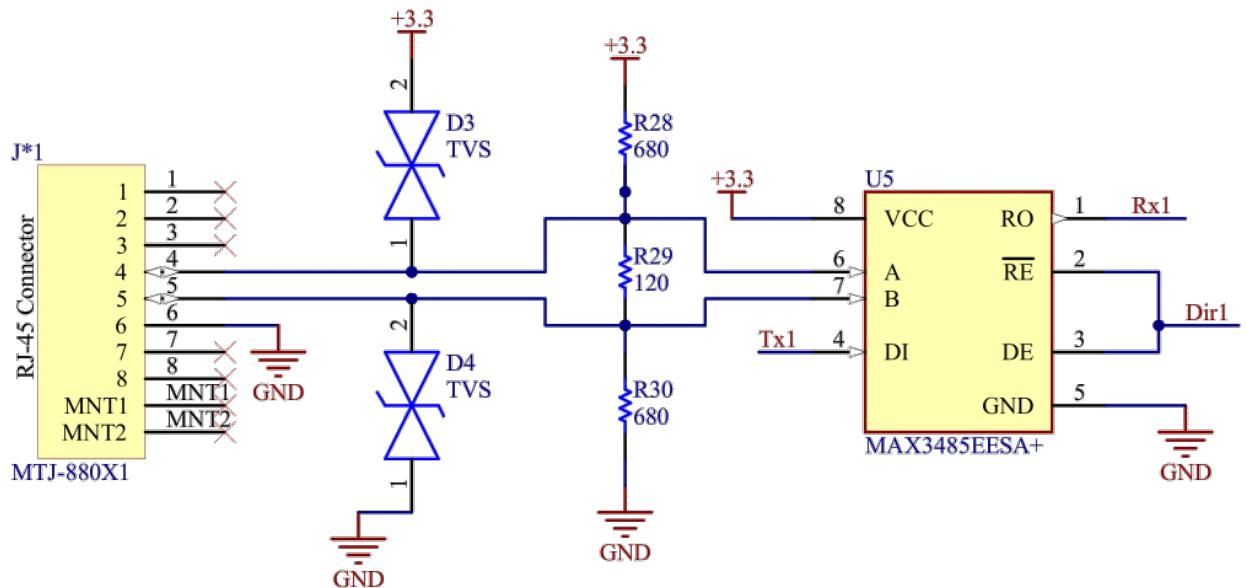
Do komunikacji z pozostałymi modułami wybrany został interfejs RS485, obecnie nazywany EIA-485 [8]. Standard RS485 składa się z pary różnicowej, nie ma konieczności podłączania sygnału zwrotnego, jednak w niektórych przypadkach może to poprawić jakość transmisji. Umożliwia ona podłączenie do 32 układów nadajnika / odbiornika, a najczęściej stosowaną topologią podłączenia jest magistrala (szyna).

Standard definiuje parę różnicową, jako dwie linie, oznaczone odpowiednio A oraz B. Jeśli na linii A, napięcie jest mniejsze od napięcia na linii B, odczytywane jest to jako logiczna jedynka (1). W przeciwnym wypadku, występuje logiczne zero (0). Maksymalne dopuszczalne wspólne obu linii może wawać się w zakresie od -7V do +12V, a napięcia różnicowe są z zakresu 0V do 5V. Przykład komunikacji przedstawiony jest na rysunku 4.2.

W modułach kontrolera, zasilacza regulowanego, a także obciążenia aktywnego, zastosowano układ nadajnika / odbiornika RS-485, oparty o układ MAX3485 (rysunek 4.3). Jest to wersja bardzo popularnego transceivera MAX485, przystosowana do pracy z napięciem zasilającym 3.3V.



Rysunek 4.2: Poziomy napięć w standardzie RS485, źródło [10].



Rysunek 4.3: Schemat zastosowanego układu transceivera RS485.

Do wyprowadzeń A oraz B układu MAX3485 [9] podłączone zostały rezystory terminujące o wartościach 680Ω oraz 120Ω . Rezystory te odpowiadają za ustawienie biasu na liniach, a także zapobiegają odbiciom, będąc dopasowane do impedancji charakterystycznej linii transmisyjnej (standardowo 120Ω dla pary skrętki).

Przy konektorze znalazło się również miejsce na diody TVS (Transient Voltage Suppression), stanowiące ochronę przed przepięciami na liniach magistrali.

Do popularnych złącz wykorzystywanych do interfejsów RS485 i RS422 należą złącza DB-9, bądź złącza śrubowe. W tym przypadku zdecydowano się jednak na rozwiązanie oparte o złącza RJ45, na których wyprowadzono również masę (GND). Dzięki podłączeniu linii A i B do pinów 4 i 5 złącza, możliwe jest wykorzystanie klasycznych kabli o postaci skrętki, np. patchcord, mając pewność, że połączenie będzie działać niezależnie od wykorzystywanego standardu okablowania.

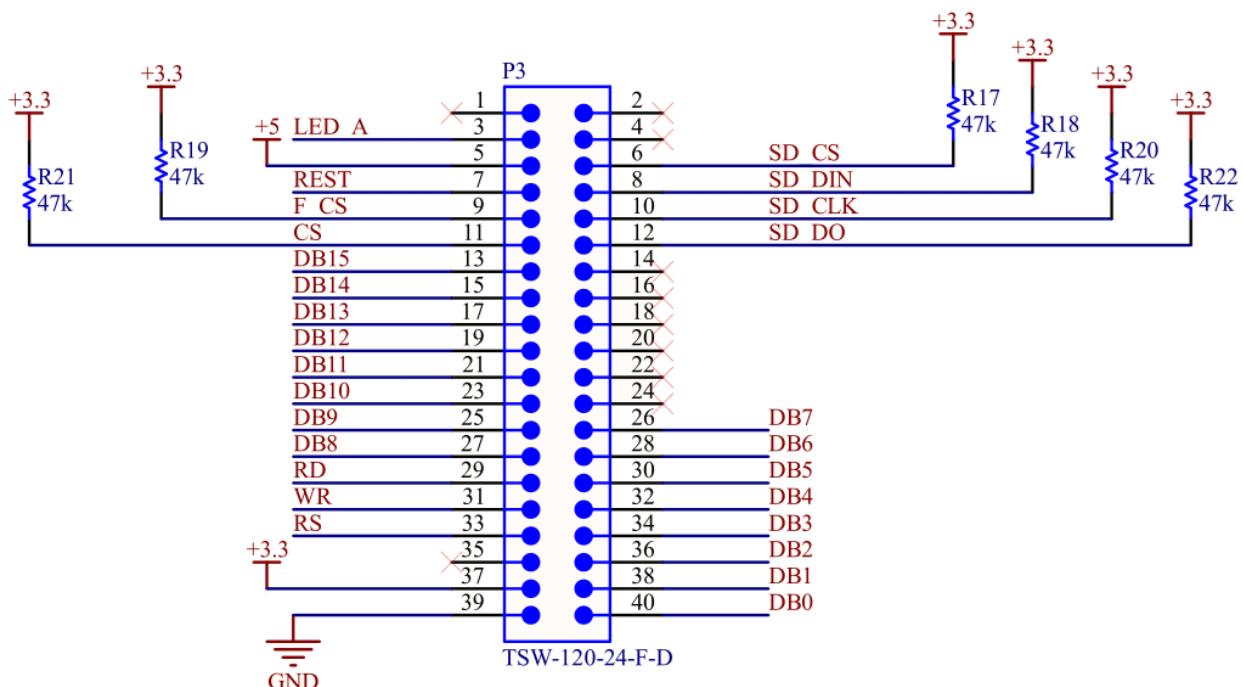
Układ MAX3485 konwertuje sygnały odebrane poprzez interfejs wejściowy na UART (Rx , Tx). Z uwagi na fakt, że standard ten, w przeciwieństwie do RS422, obsługuje komunikację typu half-duplex, konieczne jest jeszcze wybranie kierunku komunikacji poprzez wyprowadzenia \overline{RE} i DE .

Wyświetlacz LCD

Wybór wyświetlacza podyktowany był przede wszystkim rozmiarem, rozdzielcością i ceną. Ostatecznie zdecydowano się na moduł 7"LCD o rozdzielcości 800x480 px z wbudowanym kontrolerem SSD1963 [11].

Kontroler SSD1963 daje możliwość sterowania matrycami LCD, o rozdzielcości do 864x480 px, poprzez interfejs równoległy o szerokości 8/9/16/18/24-bitów. Ma wbudowany bufor o pojemności 1215kB i wsparcie dla m.in. sprzętowego obracania obrazu.

Poniższy schemat (4.4) przedstawia złącze wykorzystywane do komunikacji z modulem wyświetlacza. Jest to złącze szpilkowe o rastrze 2.54 mm, dokładnie takie samo jak występujące na zastosowanym wyświetlaczu. Dzięki temu możliwe jest połączenie między nimi przy pomocy 40-pinowej taśmy IDC. Na złączu poza pinami od kontrolera SSD1963 widać także piny od złącza karty SD, które znajduje się na płytce wraz z wyświetlaczem. Sam wyświetlacz wymaga zasilania 3.3V oraz 5V.



Rysunek 4.4: Schemat złącza wyświetlacza.

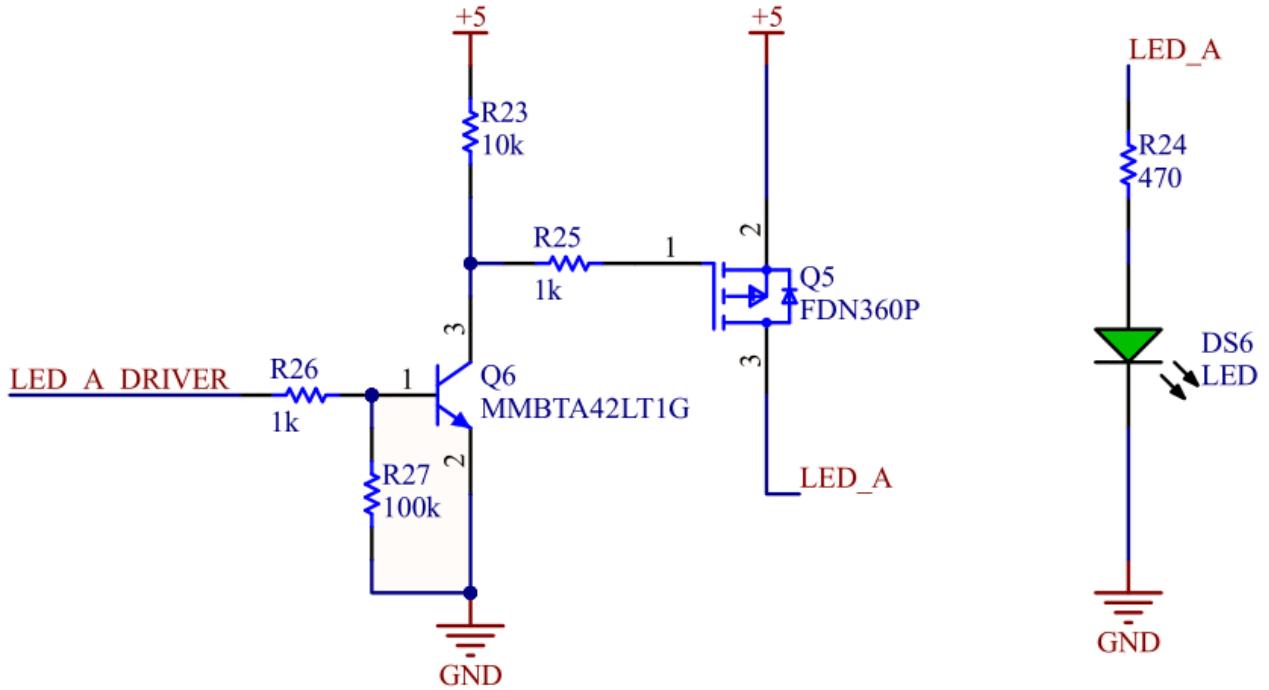
Dodatkowo możliwe jest sterowanie podświetleniem matrycy poprzez pin LED_A. W celu regulacji podświetlenia z poziomu mikrokontrolera zdecydowano się na realizację poniższego układu sterowania podświetleniem (4.5).

Zastosowanie dodatkowego tranzystora typu NPN (oznaczonego na schemacie jako Q6) pozwala na przełączanie napięcia 5V poprzez piny GPIO mikrokontrolera, pracujące z napięciem VDD (3.3V).

Interfejs użytkownika

Do sterowania urządzeniem przez użytkownika służą oddzielne płytka PCB, posiadające przyciski i enkoder. Za ich pomocą możliwa jest zmiana opcji menu programu, ustawień poszczególnych pozycji menu i konfiguracja kontrolera. Na płytce, poza przyciskami, znalazły się również filtry RC, mające na celu wytłumienie drgań styków (debouncing). Ich schematy zamieszczone zostały w załączniku. Łączą się one z modulem kontrolera przy pomocy 10-pinowych taśm IDC.

Modele 3D PCB zostały przedstawione na poniższym zdjęciu 4.6.



Rysunek 4.5: Schemat sterowania podświetleniem matrycy LCD.

Termopara

Podczas pomiaru przetwornic napięciowych, wydzielać może się w nich znaczna ilość ciepła. Jest to wynik strat w układzie, które objawiać się mogą postępującą degradacją parametrów przetwornicy. Możliwe jest również przegrzanie elementów przełączających, takich jak diody i tranzystory. Dlatego też, zdecydowano się umożliwić pomiar temperatury poszczególnych komponentów, wykorzystując w tym celu termoparę [12].

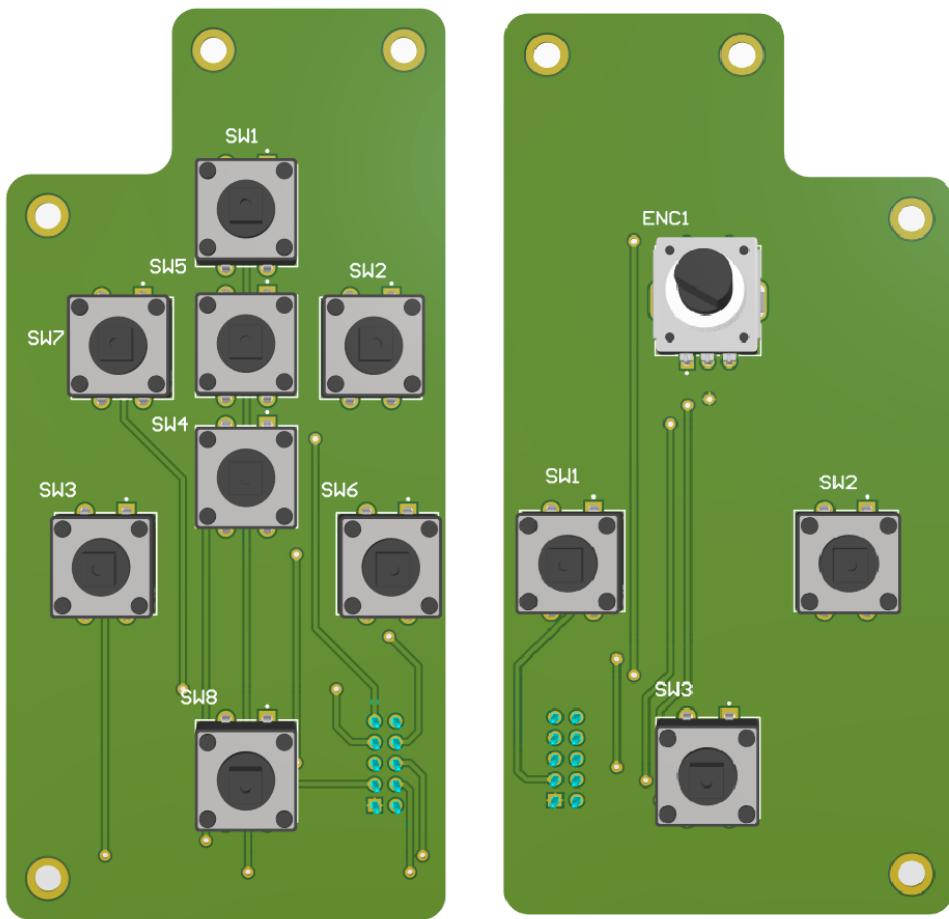
Termopara jest to element składający się z dwóch różnych przewodników, na których styku występuje zjawisko Seebecka (rysunek 4.7). Objawia się ono wytworzeniem napięcia na przewodnikach, czyli przewodach termopary. Napięcie to zależy od typu termopary, czyli zastosowanych materiałów. W celu pomiaru temperatury, wykorzystywany jest układ przetwornika ADC mierzący napięcie na złączu termopary. Wymagana jest również kompensacja tzw. zimnego końca, tzn. znajomość temperatury w jakiej znajduje się układ pomiarowy, podłączony do przewodów termopary.

W celu uproszczenia pomiaru powstały gotowe układy scalone, posiadające wbudowane przetworniki, układ kompensujący i linearyzujący, mogące cyfrowo przesyłać mierzoną temperaturę. W projekcie zdecydowano się na wykorzystanie układu MAX6675 do termopar typu K [13].

Ten prosty układ, widoczny na schemacie 4.8, umożliwia odczytanie temperatury przez mikrokontroler poprzez prosty interfejs SPI.

Zasilanie

Do każdego modułu dostarczone jest zasilane 24V DC. Przedstawione w tym rozdziale układy potrzebują jednak również napięć zasilających 5V oraz 3.3V, przy czym wyświetlacz wymaga odpowiednio 400mA prądu na linii 5V oraz 200mA na linii 3.3V. Głównie z tego względu, nie ma możliwości zastosowania regulatora liniowego do obniżenia napięcia 24V do 5V, gdyż wydzielałaby się w nim zbyt duża moc. Zdecydowano więc o skorzystaniu ze zintegrowanej przetwornicy obniżającej napięcie. Na rysunku 4.9 widać układ AMSR1-7805-NZ [15]. Posiada on wydajność prądową 1A, przy sprawności powyżej 85%. Dzięki wysokiej częstotliwości przełączania, przy zastosowaniu wyłącznie kondensatorów $22\mu\text{F}$ na wejściu oraz wyjściu układu, możliwe jest uzyskanie szumu napięcia wyjściowego na poziomie



Rysunek 4.6: Modele PCB z przyciskami i enkoderem w programie Altium Designer.

poniżej 75mV peak-peak. Jego obudowa i układ wyprowadzeń zgodny jest z popularną serią stabilizatorów liniowych 78xx. Dzięki temu możliwa jest łatwa wymiana układu na inny, kompatybilny. Z tego powodu na płycie PCB znalazło się miejsce na dodatkowe kondensatory filtrujące zasilanie, których pojemność można dostosować do stosowanego układu.

Następnie, napięcie 5V przetwarzane jest na 3.3V przy pomocy stabilizatora liniowego, widocznego na schemacie 4.10.

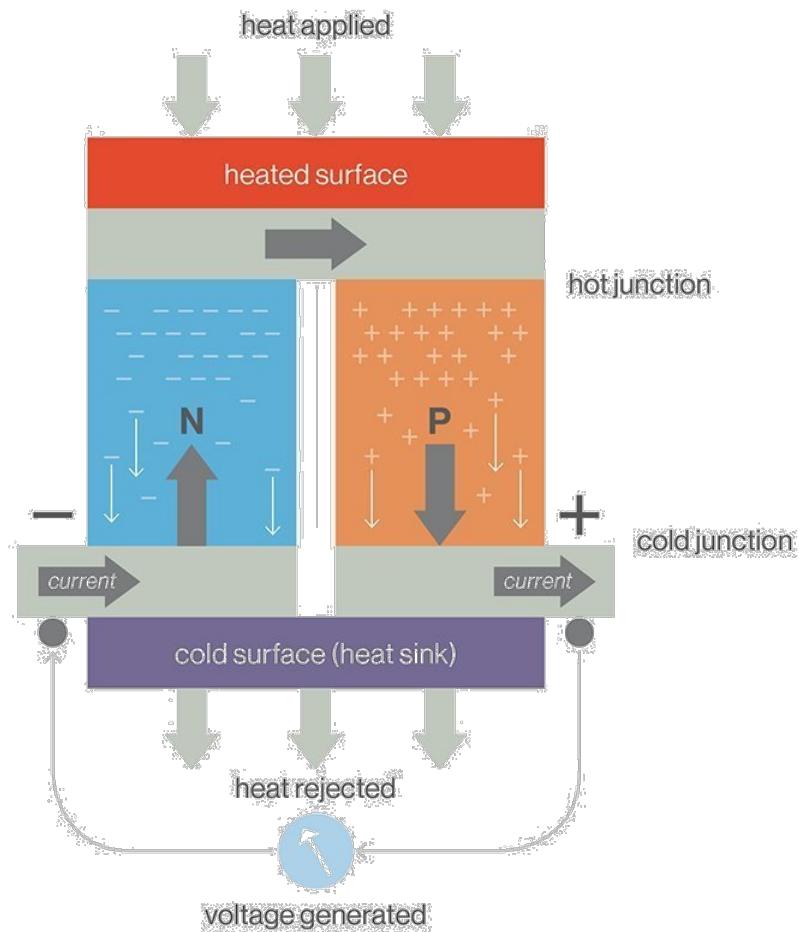
Pozwala to na ograniczenie szumów na linii 3.3V, która odpowiada za zasilanie układów takich jak mikrokontroler STM32, które mogą być wrażliwe na zmiany napięcia zasilającego. Regulator TLV76133 [16] jest kompatybilny wyprowadzeniowo z układami 1117. Jego maksymalny prąd wyjściowy to 1A i wymaga on jedynie niewielkich kondensatorów na swoim wejściu i wyjściu.

W celu zabezpieczenia znajdujących się na PCB elementów przed odwrotną polaryzacją oraz zwarciem, przy wejściu zasilającym zastosowano diody Schottkiego oraz bezpiecznik szeregowy. Widoczne są one na rysunku 4.11.

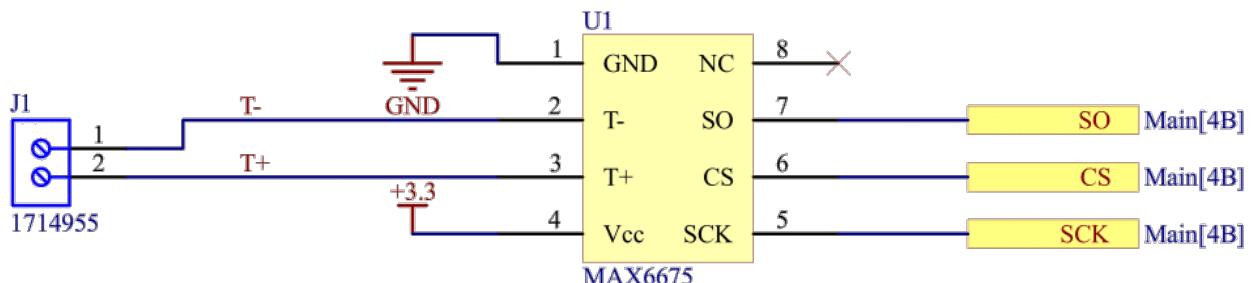
Pozostałe komponenty

Moduł kontrolera posiada również wiele innych komponentów. Wśród nich są:

- buzzer - pozwalający na dźwiękowe powiadomianie, np. o zakończeniu procesu pomiaru,
- złącze USB typu B - z dodatkowym układem USBLC6 zabezpieczającym przed przepięciami,
- bateria RTC - pozwalająca na zapamiętanie stanu zegara i pracę układu RTC wbudowanego w mikrokontroler w tle, bez zewnętrznego zasilania,



Rysunek 4.7: Zjawisko Seebecka wykorzystywane w termoparze, źródło [14].

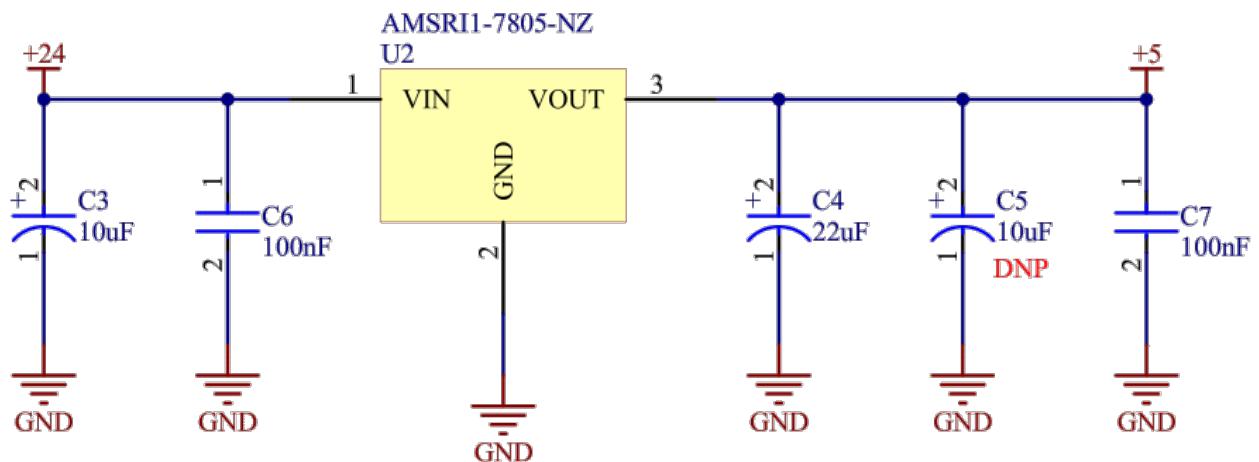


Rysunek 4.8: Układ MAX6675 do pomiaru temperatury.

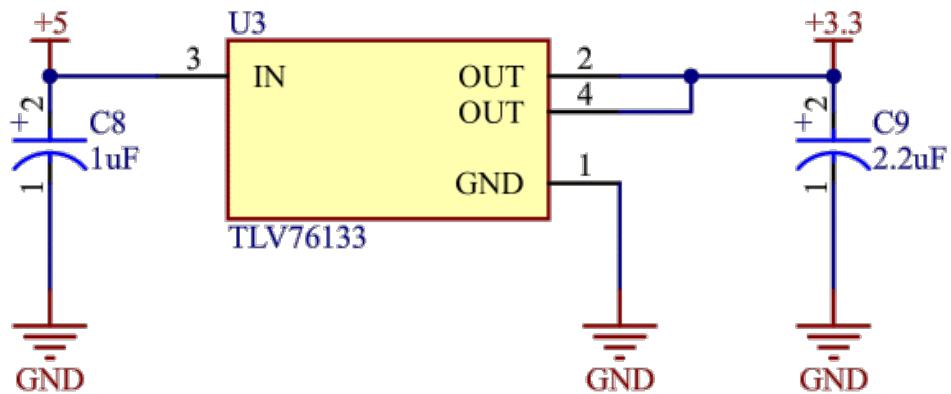
- generatory kwarcowe - scalony generator o wyjściowym przebiegu 8Mhz zapewniający stabilną pracę interfejsów mikrokontrolera, takich jak USB oraz kwarc 32.768kHz przeznaczony dla układu wbudowanego zegara,
- sterownik wentylatorów - pozwalający na załączanie obciążzeń zasilanych napięciem 24V, przeznaczony do sterowania znajdującymi się w obudowie urządzeń wentylatorami.

Układy te znaleźć można w załączniku na stronach „Moduł kontrolera: peryferia”, „Moduł kontrolera: oscylatory” oraz „Moduł kontrolera: sterownik wentylatorów”.

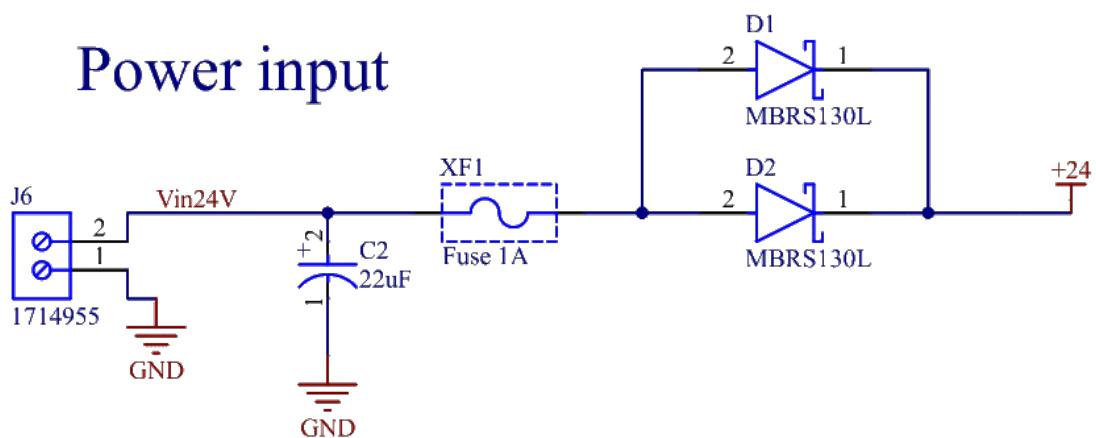
Schemat sterownika wentylatorów działa na zasadzie analogicznej, jak 4.5, umożliwiając załączanie



Rysunek 4.9: Przetwornica przetwarzająca zasilanie 24V na 5V.



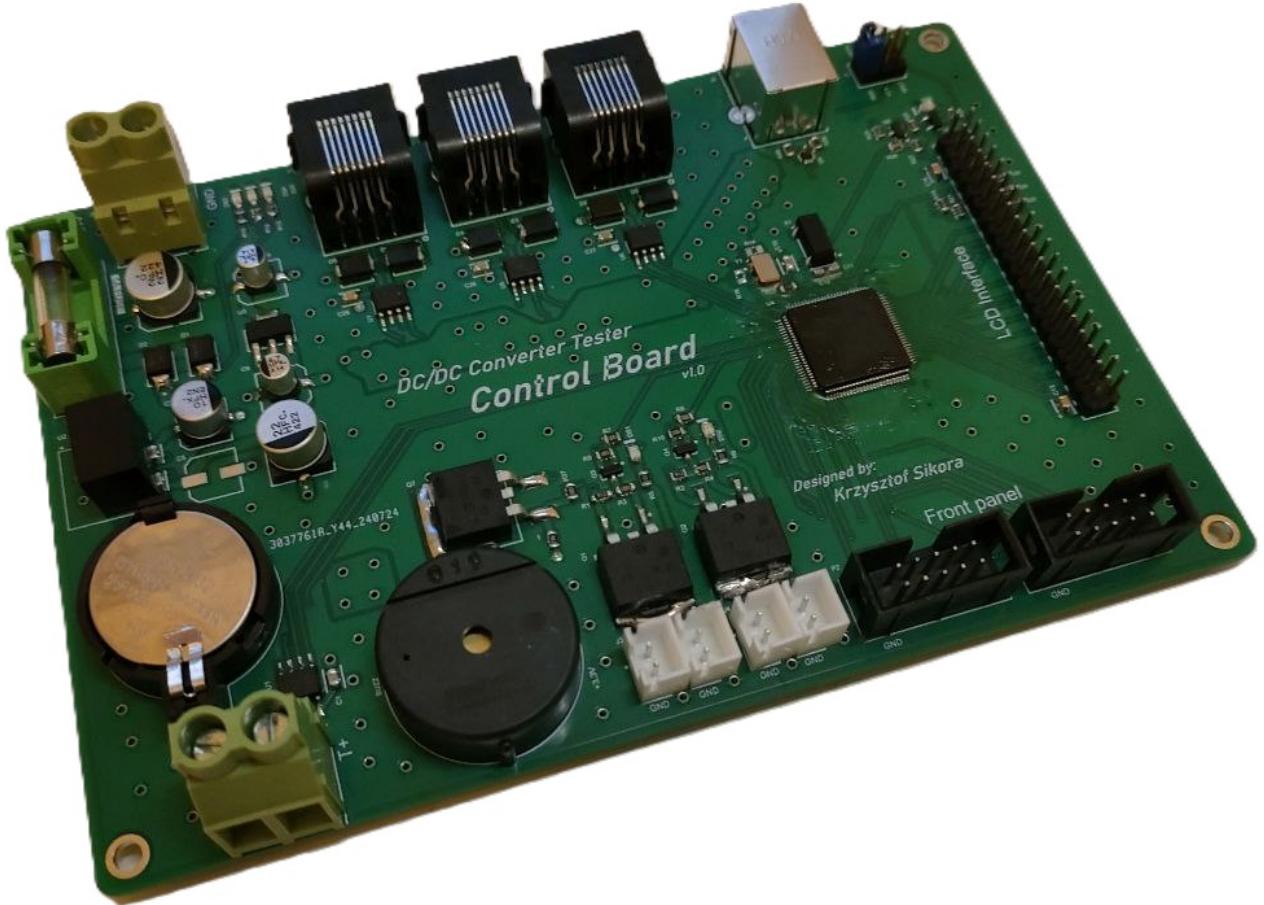
Rysunek 4.10: Stabilizator liniowy 3.3V.



Rysunek 4.11: Zabezpieczenia wejścia zasilającego.

wyższego napięcia (24V) poprzez wyjście GPIO mikrokontrolera.

Projekt PCB



Rysunek 4.12: Zlutowana płytka PCB modułu kontrolera.

Projekt PCB modułu kontrolera został wykonany z wykorzystaniem z oprogramowaniem Altium Designer. Płytki wykonane zostały przez JLCPCB [28]. Płytki kontrolera ma wymiary 100 mm x 150 mm. Jest to PCB czterowarstwowe o grubości 1.6 mm.

Wykorzystany został domyślny stackup producenta, przedstawiony na rysunku 4.13. Górna oraz dolna warstwa miedzi wykorzystane zostały do prowadzenia sygnałów cyfrowych i analogowych. Warstwa druga (wewnętrzna) jest warstwą przeznaczoną dla linii zasilających (5 V, 3.3 V, 24 V), a trzecia jest warstwą masy (GND). Taki stackup pozwala na dokładną kontrolę impedancji, co wykorzystane zostało przy prowadzeniu ścieżek pary różnicowej sygnałów USB.

Płytki PCB pozostałych modułów (zasilacza regulowanego oraz obciążenia aktywnego) wykonane zostały, korzystając z tego samego stackupu. Posiadają one również takie same wymiary (szerokość i długość).

Na płytce kontrolera, przedstawionej na zdjęciu 4.12, widoczne są wszystkie omawiane w poprzednich punktach elementy. Z lewej strony zdjęcia widoczna jest sekcja zasilania, ze złączem wejściowym w górnej części. Poza przetwornicami 5 V i 3.3 V, widoczna jest również bateria zegara RTC - CR2032. W dolnym lewym rogu umieszczono złącze termopary typu K, wraz z układem MAX6675. Do komunikacji wykorzystano złącza RJ45, umieszczone w górnej części PCB, wraz ze złączem USB typu B. Po stronie prawej widoczne jest 40-pinowe złącze wyświetlacza, a poniżej złącza IDC, służące do podłączenia paneli z przyciskami oraz złącza JST 2.5 mm, przeznaczone do zasilania wentylatorów.

Centralny mikrokontroler STM32F4 jest otoczony przez układy oscylatorów HF oraz LF. Konden-

Layer	Material Type	Thickness	
Layer	Copper	0.035mm	
Prepreg	7628*1	0.2104mm	
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Core>	Core	1.065mm	1.1mm (with copper core)
inner Layer	Copper	0.0152mm	
Prepreg	7628*1	0.2104mm	
Layer	Copper	0.035mm	

Rysunek 4.13: Wykorzystywany stackup PCB.

satory filtrujące jego zasilanie, znajdują się na spodniej stronie płytki, co uprościło layout i pozwoliło zminimalizować pasożytnicze indukcyjności połączeń.

Widoczne tu ułożenie komponentów, w szczególności złącz, zostało ustalone w sposób, który umożliwił uproszczenie montażu mechanicznego w projektowanej obudowie, która przedstawiona została w sekcji 4.3.

Kompletny layout PCB, podzielony na poszczególne warstwy, przedstawiony został w załączniku.

4.1.2 Zasilacz regulowany

Kolejnym modułem zaprojektowanym i zmontowanym w ramach projektu, jest moduł zasilacza regulowanego. Został on zrealizowany w oparciu o przetwornicę impulsową obniżającą napięcie (buck). Pozwala ona na zasilanie układu testowanego (DUT). Napięcie wyjściowe ustalane jest przez wbudowany mikrokontroler, sterowany z modułu kontrolera.

Przetwornica obniżająca napięcie

Głównym elementem składowym modułu jest przetwornica napięciowa. Zdecydowano się skorzystać wyłącznie z przetwornicy impulsowej bez dodatkowego regulatora liniowego, ze względu na prostszą konstrukcję i dużo wyższą sprawność, dzięki czemu nie ma konieczności wykorzystywania dodatkowego radiatorka. Ponadto, do celów testowania układów przetwornic, nie jest wymagana niska pojemność wyjściowa zasilacza, co jest często spotykane przy konstrukcjach zasilaczy laboratoryjnych.

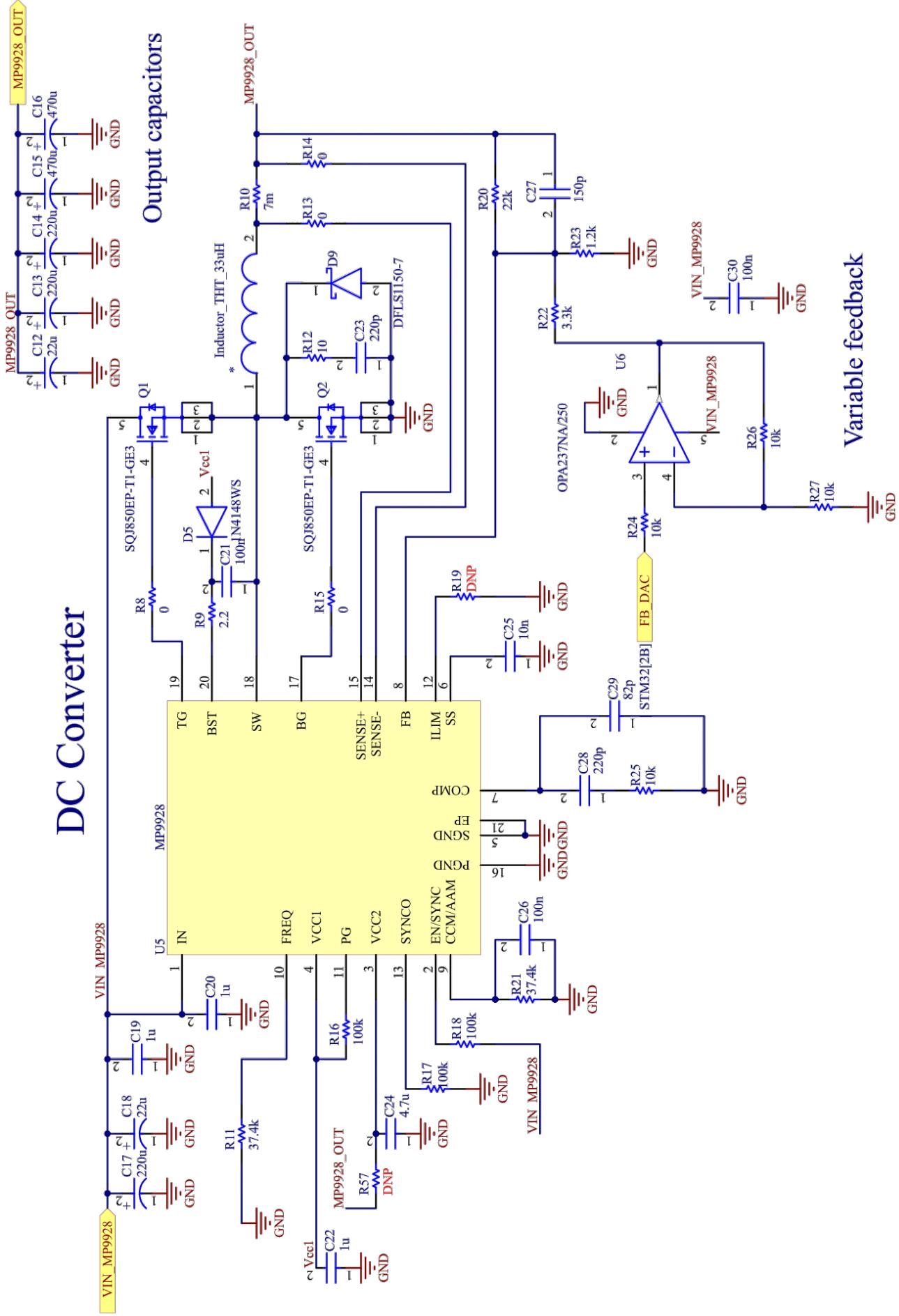
Wybrany układem scalonym przetwornicy obniżającej jest MP9928 [17]. Jest to układ przetwornicy synchronicznej, pozwalający na zasilanie napięciem do 60V. Cechuje się stosunkowo wysoką maksymalną częstotliwością przełączania, równą 1 MHz i umożliwia sterowanie ze współczynnikiem wypełniania nawet 99.5%.

Z uwagi na to, że jest to przetwornica synchroniczna, do przełączania napięcia wejściowego wykorzystuje ona dwa zewnętrzne tranzystory, w tym przypadku typu N MOS. Oznacza to, że konieczne jest wykorzystanie układu bootstrap do przełączania jednego z tranzystorów. Wybrane zostały polecone przez producenta tranzystory SQJ850EP [19]. Poza świetnym R_{DS} w stanie włączenia (nawet 0.023Ω), mają one także bardzo niski ładunek bramki (gate charge), na poziomie 20 nC, co umożliwia ich szybkie przełączanie i ogranicza straty.

Schemat przetwornicy został zaprezentowany na rysunku 4.14.

Układ wzorowany był na płytce ewaluacyjnej od producenta Monolithic Power Systems Inc [20].

W stosunku do niego, zmienione zostały jednak wartości wybranych kluczowych elementów. W celu ich doboru, skorzystano m.in. z symulatora MPSmart [21]. Jest to symulator oparty o narzędzia SIMetrix/SIMPLIS, przygotowany specjalnie w celach analizy działania układów przetwarzających moc. Pozwala on bowiem na symulację, wykorzystując metodę POP, czyli Periodic Operating Point, co pozwala na szybszą analizę parametrów przetwornic, bez potrzeby korzystania z symulacji transient.



Rysunek 4.14: Schemat układu przetwornicy MP9928.

Początkowe wartości elementów takich jak: pojemność kondensatorów wejściowych, wyjściowych, czy też indukcyjność cewki przełączającej, obliczone zostały jednak ręcznie. Niezbędne wzory zawarte są m.in. w książce Fundamentals of Power Electronics [22].

W celu obliczenia wartości indukcyjności cewki, skorzystać można ze wzoru 4.1.

$$L = \frac{V_{OUT} \cdot (V_{IN} - V_{OUT})}{V_{IN} \cdot \Delta I_L \cdot f_s} \quad (4.1)$$

$$\Delta I_L \approx 0.3 \cdot I_{LOAD}$$

ΔI_{LOAD} jest to prąd tężnień cewki. Standardowo jego wartość przyjmuje się jako 30% wartości prądu obciążenia, lecz może on być znacznie mniejszy. Z równania 4.1, po podstawieniu wartości napięć wejściowych, wyjściowych i prądu obciążenia otrzymujemy minimalną indukcyjność:

$$L = \frac{20V \cdot (24V - 20V)}{24V \cdot 4A \cdot 100kHz} = 8.33\mu H \quad (4.2)$$

W celu obniżenia szumów, z uwagi na brak ograniczeń rozmiaru fizycznego, zdecydowano się na zwiększenie wartości indukcyjności do 22uH. Dodatkowo, prąd saturacji cewki wynosić musi I_{MAX} , zgodnie z równaniem 4.3.

$$I_{MAX} = I_{LOAD} + \frac{\Delta I_L}{2} \quad (4.3)$$

$$I_{MAX} = 3A + \frac{1}{2}A = 3.5A$$

Równie ważny jest wybór kondensatora/-ów na wyjściu przetwornicy. Aby zapewnić niski poziom tężnień napięcia wyjściowego (ΔV_{out}), muszą one mieć odpowiednio dużą pojemność. Można wyliczyć ją ze wzoru 4.4.

$$C_{out} = \frac{\Delta I_L}{8 \cdot f_s \cdot \Delta V_{out}} \quad (4.4)$$

$$C_{out} = \frac{1A}{8 \cdot 100kHz \cdot 1mV} \approx 1.25mF$$

Wartość ta ($1.25mF = 1250uF$) obliczona została dla tężnień napięcia wyjściowego na poziomie 1mV, korzystając z noty [18].

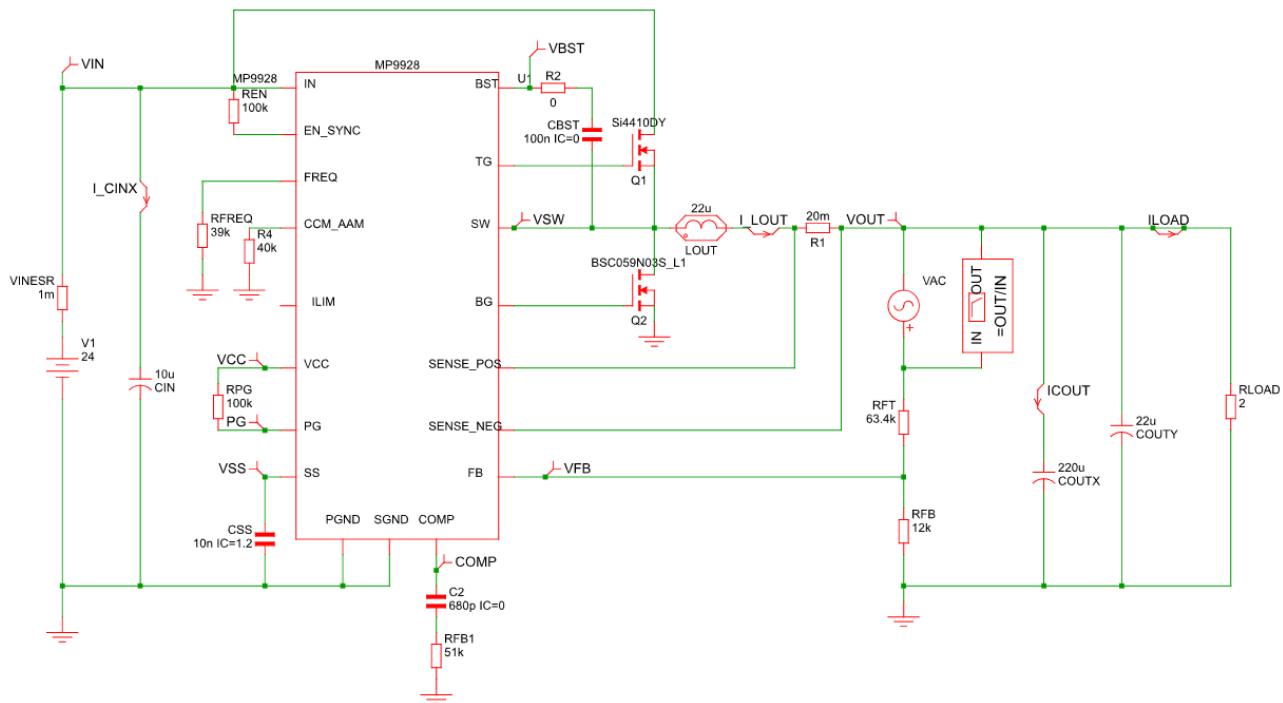
Po ustaleniu wartości podstawowych elementów przystąpiono do symulacji, która pozwoliła przetestować działanie przetwornicy i dokładnie dobrac wartości elementów wchodzących w skład obwodu kompensacji pętli sprzężenia zwrotnego. Schemat wykorzystywany do symulacji przedstawiono poniżej 4.15.

Jednym z wyników przeprowadzonych symulacji jest wykres bodego, przedstawiony na rysunku 4.16. Został on wygenerowany dla wyjściowego napięcia 5V przy prądzie 2A. Z przedstawionego wykresu można odczytać stabilność działania pętli sprzężenia zwrotnego przetwornicy, która w tym przypadku wynosi 82deg. Jest to wartość fazy dla częstotliwości, dla której wzmacnienie (gain) wynosi 0dB. Wartość ta na wykresie jest dodatnia, z uwagi na stosowanie w przetwornicy napięciowej dodatniego sprzężenia zwrotnego.

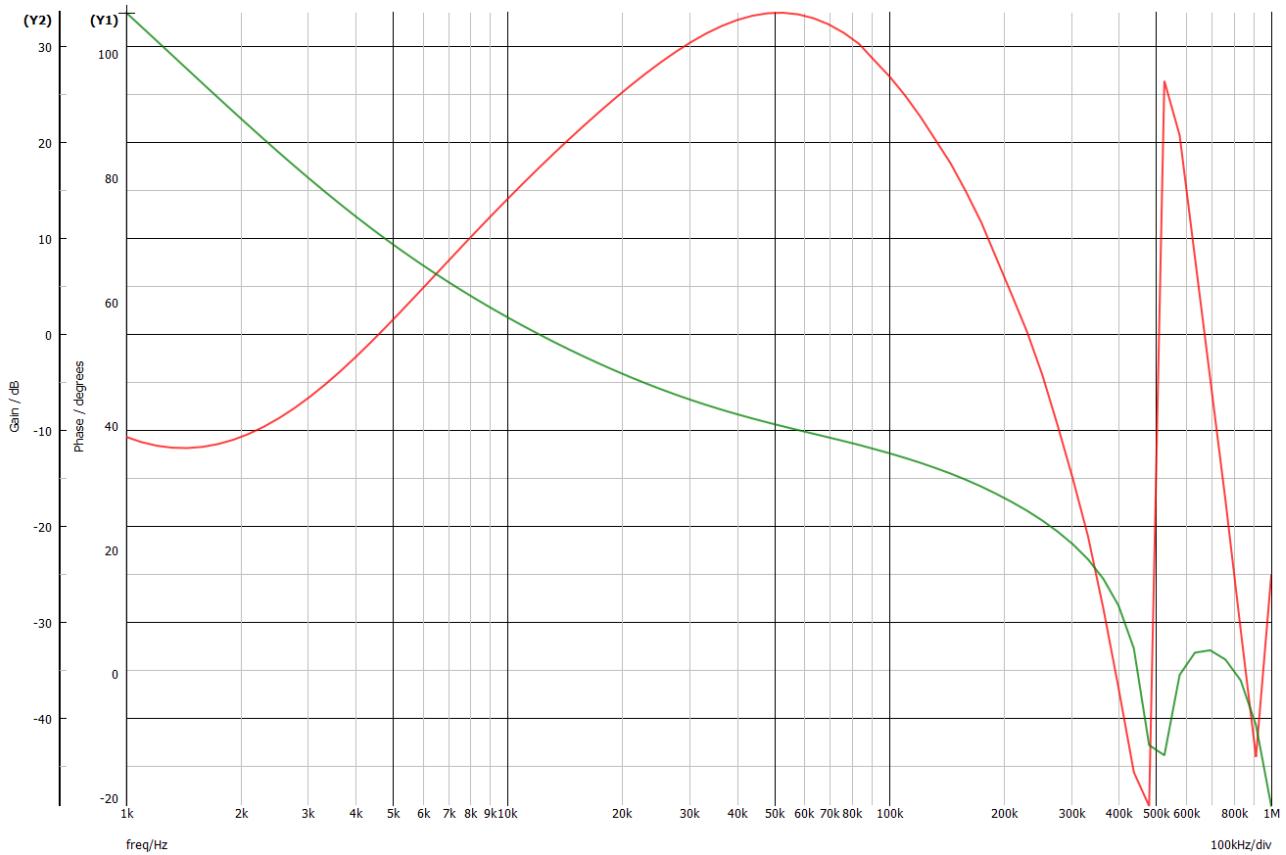
Po przeprowadzeniu szeregu symulacji ustalone zostały wartości pozostałych elementów, które zawarte zostały na schemacie 4.14.

Ważnym elementem, który pozwala na zmianę napięcia wyjściowego przetwornicy, jest układ, którego uproszczony schemat zawarty jest na rysunku 4.17.

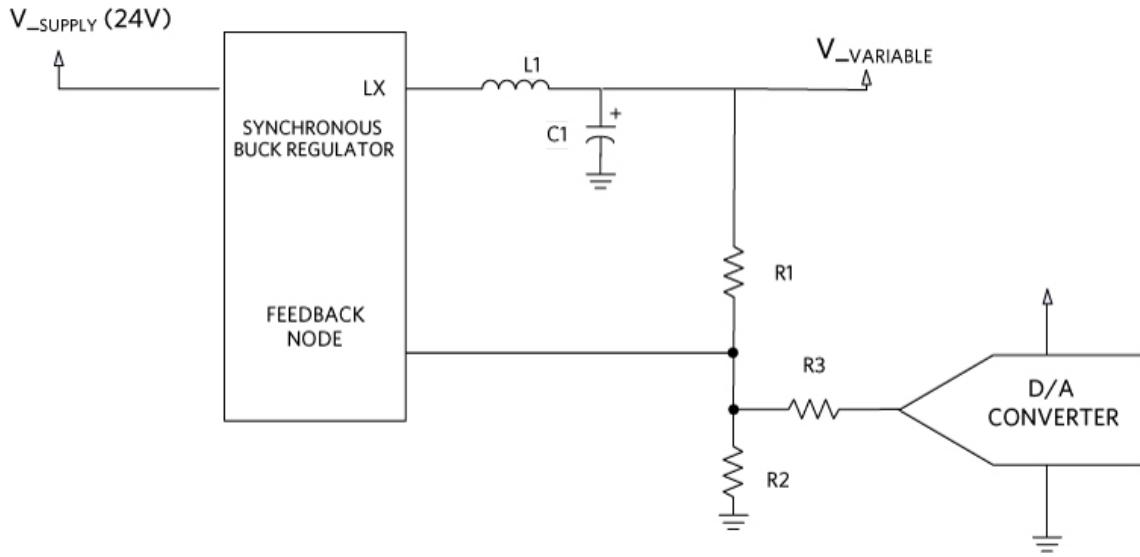
Dzięki niemu, zmieniając napięcie wyjściowe konwertera DAC (Digital to Analog Converter), w tym konkretnym przypadku wbudowanego w mikrokontroler STM32, można zmieniać napięcie wyjściowe przetwornicy impulsowej.



Rysunek 4.15: Schemat wykorzystywany do symulacji w programie MPSmart.

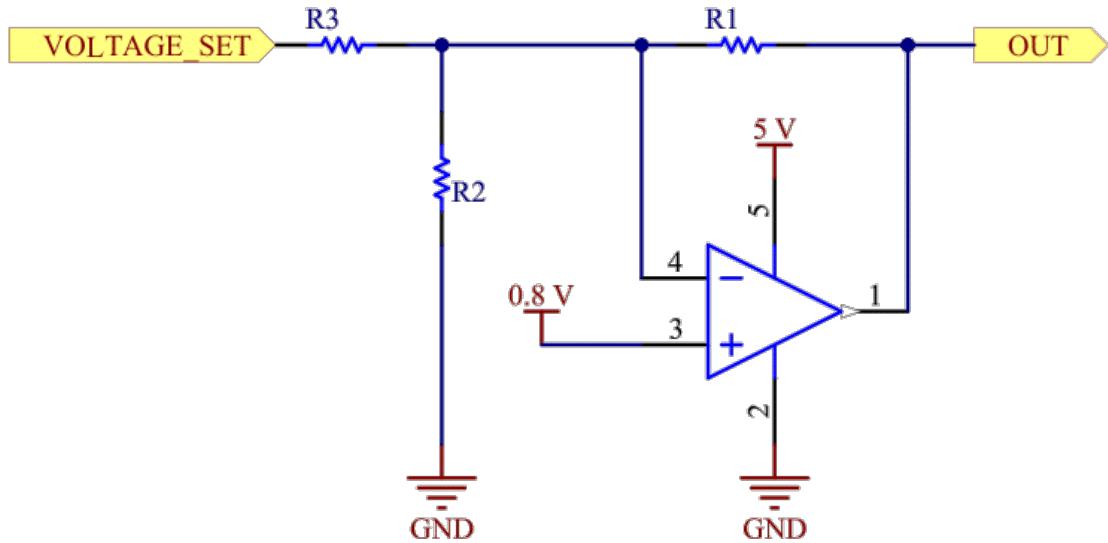


Rysunek 4.16: Wykres bodego uzyskany z symulacji przetwornicy.



Rysunek 4.17: Schemat układu pozwalającego na zmianę napięcia wyjściowego przetwornicy. Źródło: [23].

W celu łatwiejszego wyjaśnienia zasad działania tego układu, należy zauważać, że układ scalony sterujący przetwornicą, dąży do uzyskania na pinie FB (feedback) ustalonego napięcia, poprzez zmianę napięcia wyjściowego przetwornicy. Układ ten, pod kątem funkcjonalnym, jest więc identyczny do układu przedstawionego na rysunku 4.18.



Rysunek 4.18: Schemat pozwalający na analizę układu zmiany napięcia wyjściowego przetwornicy.

Analizując powyższy układ, można określić równanie 4.5.

$$V_{OUT} = V_{IN} \cdot \left(-\frac{R2}{R2 + R3} \right) \left(\frac{R1}{R2||R3} \right) + V_{REF} \cdot \left(1 + \frac{R1}{R2||R3} \right) \quad (4.5)$$

Jak łatwo zauważać, człon zawierający napięcie V_{REF} wynika z zastosowania wzoru na wzmacniacz nieodwracający. Z kolei współczynnik, przez który przemnażane jest napięcie V_{IN} wynika bezpośrednio

ze wzoru na wzmacnianie układu odwracającego. Można zauważyć, że napięcie wejściowe podzielone jest przez dzielnik napięcia, składający się z rezystorów R3 i R2.

Powyższe równanie przekształcić można w układ równań, pozwalający ustalić wartości rezystancji, przy założeniu danego zakresu napięcia z przetwornika cyfrowo-analogowego oraz dla danego zakresu napięć wyjściowych.

$$\begin{cases} 20 = m \cdot 0 + b \\ 0 = m \cdot 3 + b \end{cases} \quad \text{gdzie :} \quad (4.6)$$

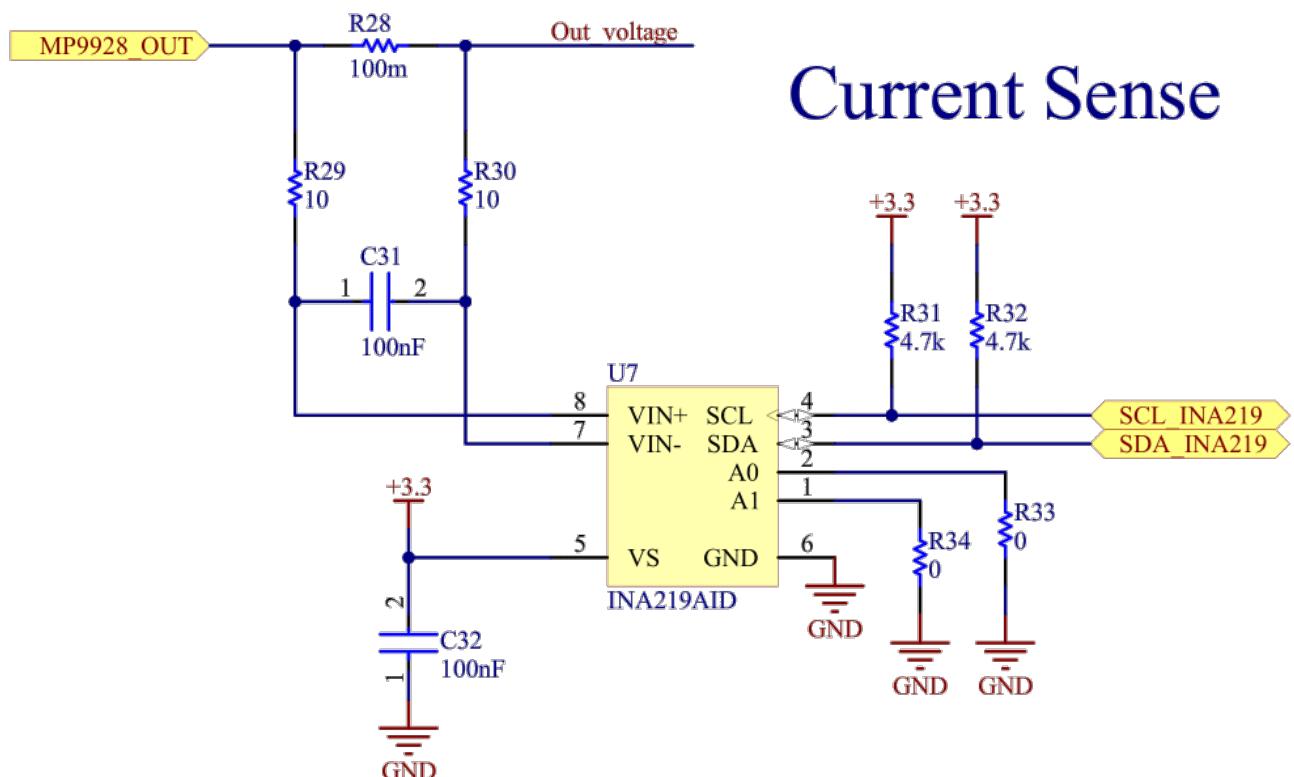
$$\begin{cases} m = -\left(\frac{R2}{R2+R3}\right)\left(\frac{R1}{R2||R3}\right) \\ b = V_{REF}(1 + \frac{R1}{R2||R3}) \end{cases}$$

Ustalone wartości rezystorów wynoszą odpowiednio:

$$\begin{aligned} R1 &= 22k\Omega \\ R2 &= 1.2k\Omega \\ R3 &= 3.3k\Omega \end{aligned} \quad (4.7)$$

Układ pomiaru prądu i napięcia

W celu pomiaru mocy wyjściowej, czyli efektywnie mocy pobieranej przez podłączone urządzenie (DUT), zastosowany został specjalny układ umożliwiający pomiar napięcia wyjściowego i prądu płynącego do obciążenia. Jego schemat przedstawiono poniżej na rysunku 4.19.



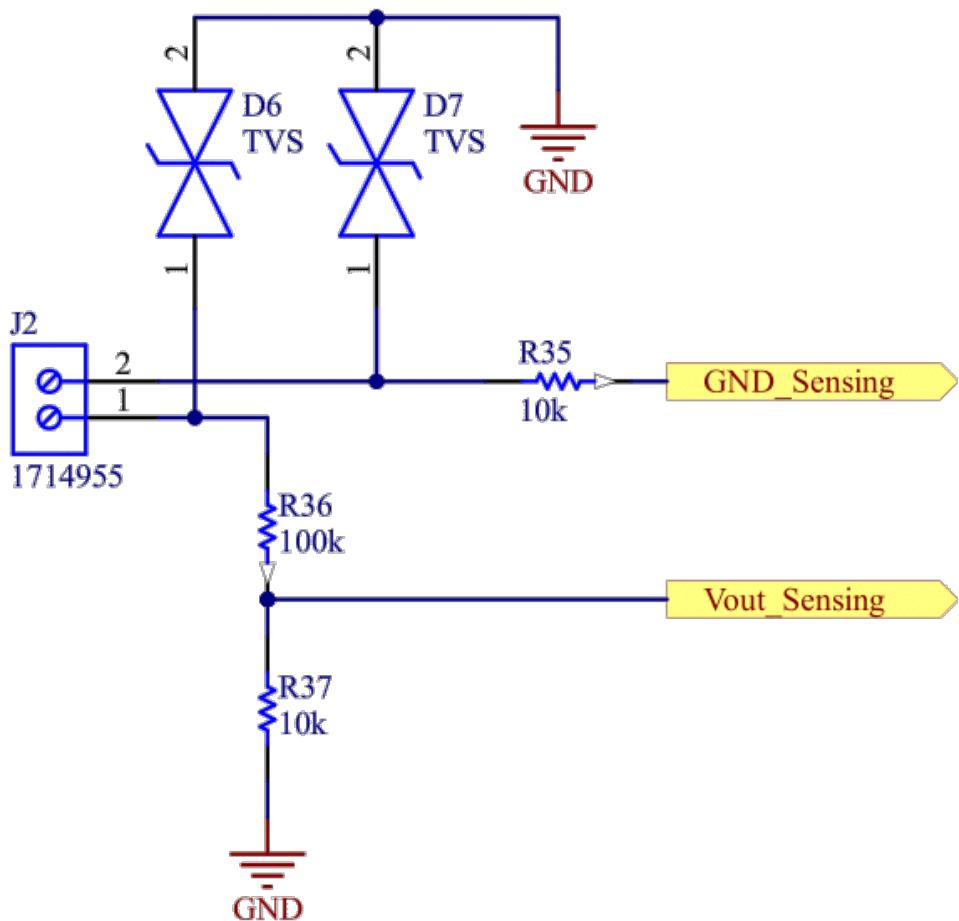
Rysunek 4.19: Schemat układu służącego do pomiaru mocy wyjściowej.

W centrum schematu widoczny jest układ scalony INA219 [25]. Umożliwia on pomiar napięć w zakresie 0 V do 26 V oraz pomiar prądu płynącego przez rezystor pomiarowy, na schemacie powyżej oznaczony jako R28. W pełnym zakresie temperatur pracy producent deklaruje dokładność pomiaru

na poziomie 0.5% wartości mierzonej. Pomiar dokonywany jest poprzez wbudowane przetworniki ADC (Analog to Digital Converter). Do pomiarów niewielkich napięć, układ wykorzystuje wbudowany PGA (Programmable Gain Amplifier), który umożliwia wzmacnienie sygnału wejściowego przed podaniem na wejście ADC. Następnie, wynik pomiaru zapisywany jest w odpowiednim rejestrze wewnętrznym układu, który odczytać można poprzez interfejs I2C. Rezystory oznaczone jako R29 oraz R30, wraz z kondensatorem C31, służą do tłumienia szumów występujących na mierzonej linii zasilającej. Elementy te są konieczne, jeśli w mierzonym sygnale wystąpić mogą szpilki napięciowe, bądź szумy o częstotliwościach powyżej 1 MHz, co należy uznać za prawdopodobne, jako że układ pomiarowy podłączony jest bezpośrednio do wyjścia modułu, podłączonego do innych urządzeń.

Zastosowanie układu INA219 gwarantuje uzyskanie dokładnego pomiaru prądu wyjściowego. Należy jednak zwrócić uwagę na powstały problem pomiaru napięcia wyjściowego, a dokładniej, napięcia na wejściu zasilanego urządzenia. Poprzez zastosowanie rezystora pomiaru prądu, należy skompensować występujący na nim spadek napięcia. Dodatkowo, kolejny spadek napięcia wprowadzany jest przez przewody zasilające, zarówno te od dodatniej linii zasilania, jak i przewód masy. Napięcie dostarczone do obciążenia może być więc znacznie odmienne, od tego na wyjściu przetwornicy.

W celu kompensacji tego spadku zastosowany został dodatkowy układ pomiarowy, jak na schemacie 4.20.



Rysunek 4.20: Schemat układu służącego do pomiaru napięcia dostarczanego do DUT.

Przedstawiony tu schemat składa się z jednego dzielnika napięciowego oraz zabezpieczeń w postaci diod TVS. Przy pomocy dodatkowych wyprowadzeń, czyli złącza J2, oraz dodatkowych przewodów pomiarowych (sense leads), możliwy jest różnicowy pomiar napięcia. Mierzone jest zarówno napięcie na dodatniej linii zasilającej, jak i na masie. Stosowanie dodatkowych przewodów, przez które płynie

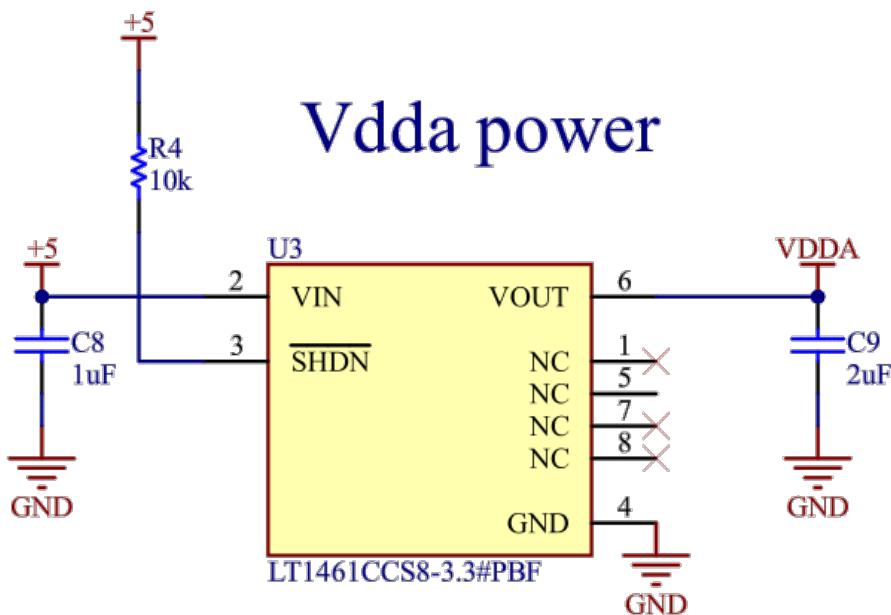
wyłącznie niewielki prąd pobierany przez przetworniki ADC, zapobiega występowaniu spadków napięć na tychże przewodach, zwiększając dokładność pomiaru.

Do pomiaru wartości napięć *GNDsensing* oraz *Voutsensing* wykorzystany został przetwornik ADC wbudowany w mikrokontroler STM32. Umożliwia on pomiar napięć, które osiągają wartości bliskie ujemnemu napięciu zasilającemu przetwornik (w tym przypadku GND - 0 V), a dzięki zastosowaniu oddzielnego układu precyzyjnego napięcia referencyjnego, cechuje się wystarczającą precyzją, umożliwiającą pomiar z rozdzielcością 12 bitów.

Mikrokontroler i dodatkowe układy

Moduł zasilacza regulowanego sterowany jest poprzez mikrokontroler STM32F303K8T6 [26]. Seria F3 od STMicroelectronics to układy przeznaczone do pracy w zastosowaniach mixed-signal, czyli łączących elementy cyfrowe z analogowymi. Wyposażone zostały one we wbudowane komparatory, wzmacniacze operacyjne, precyzyjne przetworniki ADC oraz DAC, a także układy DSP (Digital Signal Processing) i FPU (Floating Point Unit).

W projekcie modułu zasilacza wykorzystane zostały wbudowane układy ADC, służące do pomiaru napięcia na wejściu testowanego układu (DUT) oraz układ DAC do ustalenia napięcia wyjściowego przetwornicy napięciowej. Aby zapewnić wystarczającą dokładność pomiarów, wejście napięcia referencyjnego, które w przypadku wybranego mikrokontrolera zasila również jego część analogową, podłączono do dedykowanego regulatora liniowego. Wybranym układem jest LT1461CC [27], a jego schemat przedstawiony został na rysunku 4.21.

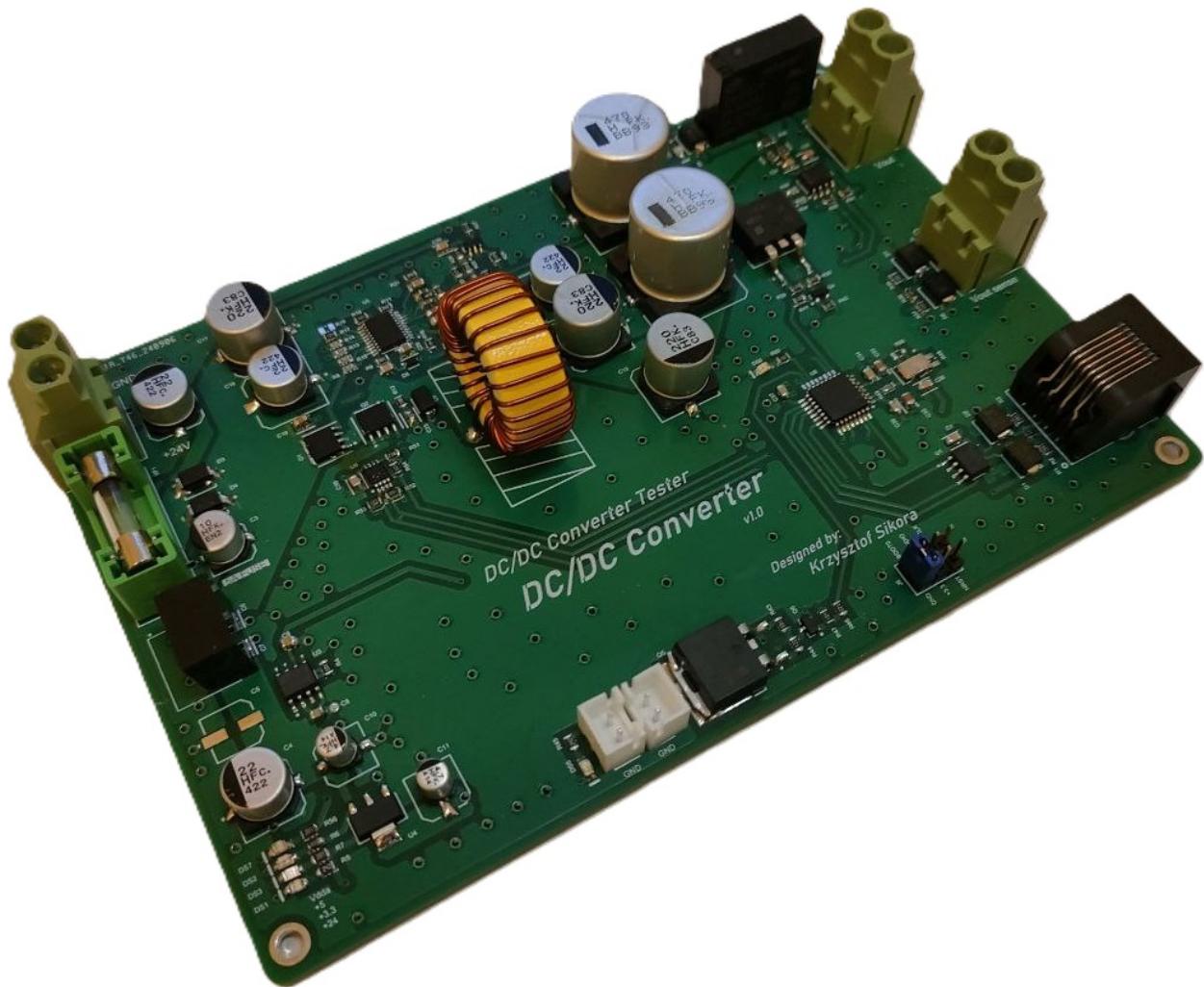


Rysunek 4.21: Schemat układu regulatora LT1461.

Jest to regulator liniowy, który w wersji L1461CS8-3.3 pozwala na uzyskanie na wyjściu stabilnego napięcia 3.3 V, z maksymalnym prądem do 50mA. Napięcie wyjściowe ustalone jest z dokładnością do 0.04% i cechuje się niewielkim dryfem temperaturowym, do 3ppm/°C.

Poza opisanymi wyżej komponentami, moduł zasilacza regulowanego posiada również kontroler wentylatorów, sterowany przez mikrokontroler przekaźnik pozwalający na odłączenie wyjścia napięciowego modułu oraz czujnik temperatury LM75. Pomiar z czujnika temperatury może być zapisywany wraz z innymi pomiarami, a także wykorzystywany jako wyzwalacz załączający wentylatory, zabezpieczając pozostałe układy.

Projekt PCB



Rysunek 4.22: Zlutowana płytka PCB modułu zasilacza regulowanego.

Przedstawione tu PCB (4.22) jest to złożony moduł zasilacza regulowanego. Parametry płytki, takie jak stackup czy wymiary, są analogiczne do tych, które przedstawione zostały w sekcji 4.1.1.

Z lewej strony zdjęcia widoczna jest sekcja zasilania, wraz ze złączem wejściowym. W części centralnej znajduje się przetwornica typu buck, oparta o układ MP9928, w obudowie TSSOP20-EP. Layout przetwornicy inspirowany był płytą deweloperską producenta [20]. Z uwagi na wykorzystanie cewki THT oraz większych kondensatorów wyjściowych jak i wejściowych, uległ on jednak znacznym modyfikacjom. Kluczowym aspektem było zachowanie jak najmniejszej impedancji połączeń elementów kluczujących, czyli tranzystorów NMOS, widocznych na płycie układu przetwornicy.

W prawym górnym rogu PCB widoczne są kolejno złącza: wyjście napięciowe przetwornicy wraz z przekaźnikiem i układem pomiaru prądu, wejście napięcia SENSE, złącze RJ45 służące do komunikacji z kontrolerem.

Dokładny layout płytki przedstawiony został w załączniku.

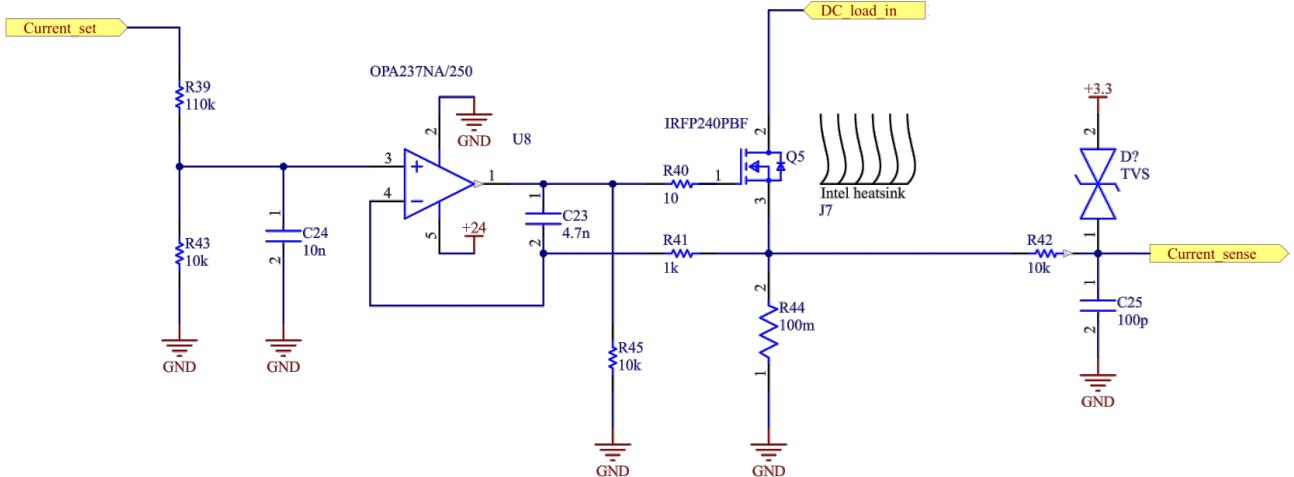
4.1.3 Obciążenie aktywne

Trzecim zaprojektowanym i wykonanym modelem jest moduł obciążenia aktywnego. Jest to układ bazujący na źródle prądowym, wykorzystującym pojedynczy tranzystor MOSFET. Umożliwia on obciążenie testowanego układu zadanym prądem. Prąd wyjściowy mierzonego układu ustalany jest poprzez

mikrokontroler. Analogicznie do przedstawionego wyżej modułu zasilacza regulowanego, sterowanie odbywa się poprzez interfejs RS485 z modułu kontrolera.

Układ ustalający prąd wyjściowy

Najważniejszym elementem modułu obciążenia aktywnego jest sterowane źródło prądowe, przedstawione na schemacie 4.23.



Rysunek 4.23: Schemat układu sterowanego źródła prądowego.

Najważniejszym elementem układu jest MOSFET typu N, konkretnie model IRFP240PBF [29] w obudowie TO-247AC. Jego maksymalny ciągły prąd I_D wynosi 12A, w temperaturze otoczenia 100°C, a maksymalne napięcie U_{DS} wynosi 200 V.

Prąd wyjściowy jest ustalany poprzez napięcie na wyjściu $Current_{set}$. Poprzez dzielik rezystancyjny podawane jest ono na wzmacniacz operacyjny OPA237. Do jego wejścia odwracającego podłączony jest rezystor R44, na którym mierzony jest prąd wyjściowy. Wzmacniacz operacyjny ustala na swoim wyjściu napięcie, konieczne do wyrównania napięć na jego wyjściach, a więc steruje napięciem bramki MOSFETA Q5 (V_{GS}). Zmieniający się przez to prąd, powoduje zmianę napięcia na rezystorze pomiarowym R44.

Zgodnie z przedstawionym tu działaniem układu, zapisać można równanie 4.8.

$$I_{OUT} = \frac{U_{R44}}{R_{44}} \quad (4.8)$$

gdzie :

$$U_{R44} = U_{IN} \cdot \frac{10k\Omega}{10k\Omega + 110k\Omega}$$

Ostatecznie, ustalony prąd wyjściowy jest więc dany wzorem 4.9.

$$I_{OUT} = \frac{1}{12} \cdot \frac{U_{IN}}{100m\Omega} \quad (4.9)$$

Zgodnie z założeniami projektu, napięcie wejściowe, które odkłada się na tranzystorze Q5 oraz rezystorze pomiarowym R_{44} , wynosi do 20 V, a maksymalny prąd to 2 A. W przedstawionym układzie możliwe jest jednak uzyskanie lepszych parametrów. Zdecydowano się więc ustalić zakres prądu na 0 - 3 A. Maksymalna moc wydzielana wtedy w układzie wynosi jednak $20V \cdot 3A = 60W$. Oznacza to, że konieczne jest odpowiednie chłodzenie tranzystora MOSFET.

Rozpatrzone dwa potencjalne rozwiązania problemu rozproszenia tak dużej mocy. Pierwszym jest zastosowanie wielu tranzystorów mocy połączonych równolegle. Pozwala ono na zastosowanie mniejszych tranzystorów (tj. o mniejszym prądzie drenu) i podzielenie prądu między nie, zmniejszając

wydielaną na każdym z nich moc. To z kolei umożliwia montaż mniejszych radiatorów, bądź montaż na wspólnym radiatorze, lecz z dużo większą całkowitą powierzchnią styku, a więc lepszym przewodnictwem cieplnym. Rozwiążanie to nie jest jednak bez wad. Mimo, iż tranzystory MOS w znacznej większości przypadków posiadają ujemny współczynnik temperaturowy prądu drenu, to dla niewielkich napięć V_{GS} , ten współczynnik może być dodatni. Opisuje to nota aplikacyjna AND8199/D [30]. Mając na uwadze przedstawione tam wykresy, jak również potencjalną rozbieżność charakterystyk różnych tranzystorów, należałoby zastosować oddzielne sterowanie bramek tranzystorów oraz niezależne rezystory pomiarowe na źródle każdego z nich. Dzięki temu, zapewniony zostaje równy podział prądu, a więc również mocy, między poszczególne tranzystory. W przeciwnym wypadku, w przypadku uszkodzenia, czy też zmiany parametrów jednego z MOSFETów, może się okazać, że pozostałe z nich pracują z dużo większym prądem, doprowadzając do ich przegrzewania i kolejnych uszkodzeń. Dla układów o niewielkich mocach, w tym takich jak przedstawiony, rozwiązanie to staje się bardziej kosztowne, z uwagi na dodatkową złożoność. Zdecydowano się więc na drugą rozpatrywaną opcję, a więc zastosowanie pojedynczego tranzystora o większym prądzie drenu i maksymalnej rozpraszanej mocy. Zastosowany tranzystor cechuje się rezystancją termiczną junction-to-case na poziomie do $0.83\text{ }^{\circ}\text{C/W}$.

Zgodnie z równaniem 4.10, wyliczyć można maksymalną rezystancję termiczną radiatora, dla danej temperatury złącza (ang. *junction*) tranzystora.

$$T_{junction} = P \cdot (R_{thJC} + R_{heatsink}) + T_{ambient}$$

gdzie:

$$(4.10)$$

$R_{heatsink}$ to rezystancja termiczna radiator-otoczenie

$T_{ambient}$ to temperatura otoczenia

W równaniu tym pominięty jest wpływ rezystancji termicznej między tranzystorem a radiatorem. Wynika ona z zastosowanego materiału termoprzewodzącego, takiego jak pasta termoprzewodząca, podkładka silikonowa. Dla temperatury otoczenia $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ i maksymalnej temperatury $T_{junction} = 150\text{ }^{\circ}\text{C}$, rezystancja radiatora wynosi 4.11.

$$150\text{ }^{\circ}\text{C} = 60\text{W} \cdot (0.83\text{ }^{\circ}\text{C/W} + R_{heatsink}) + 25\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{heatsink} \approx 1.25\text{ }^{\circ}\text{C/W}$$

$$(4.11)$$

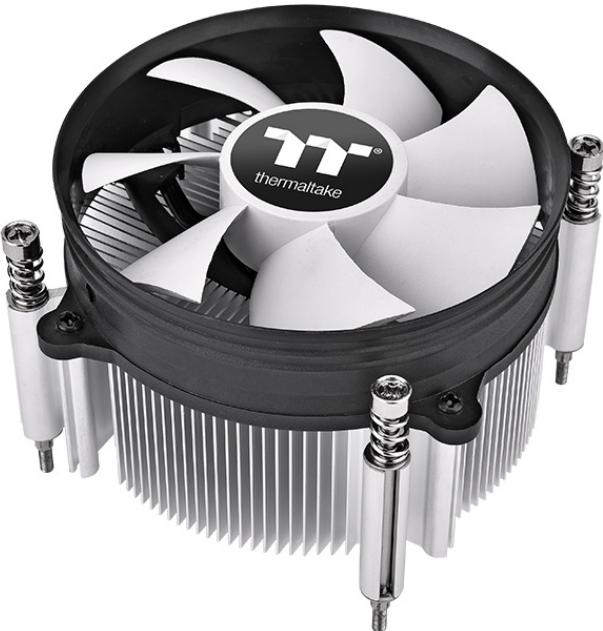
Przykładowy radiator przeznaczony do montażu na obudowie TO-247AC, przedstawiono na zdjęciu 4.24.



Rysunek 4.24: Przykładowy radiator do obudowy TO-247AC, model RA-T2X-51E [31].

Jego rezystancja termiczna wynosi około $3.5\text{ }^{\circ}\text{C/W}$. Konieczne jest więc zastosowanie bardziej wydajnego radiatora, bądź też chłodzenia aktywnego. Radiatory takie są jednak dużo bardziej kosztowne.

Tańską alternatywą, którą zdecydowano się zastosować w projekcie, jest wykorzystanie chłodzenia przeznaczonego do innego typu układu, a konkretnie chłodzenia CPU 4.25 stosowanego w komputerach PC.



Rysunek 4.25: Zastosowany radiator - Thermaltake Gravity i3.

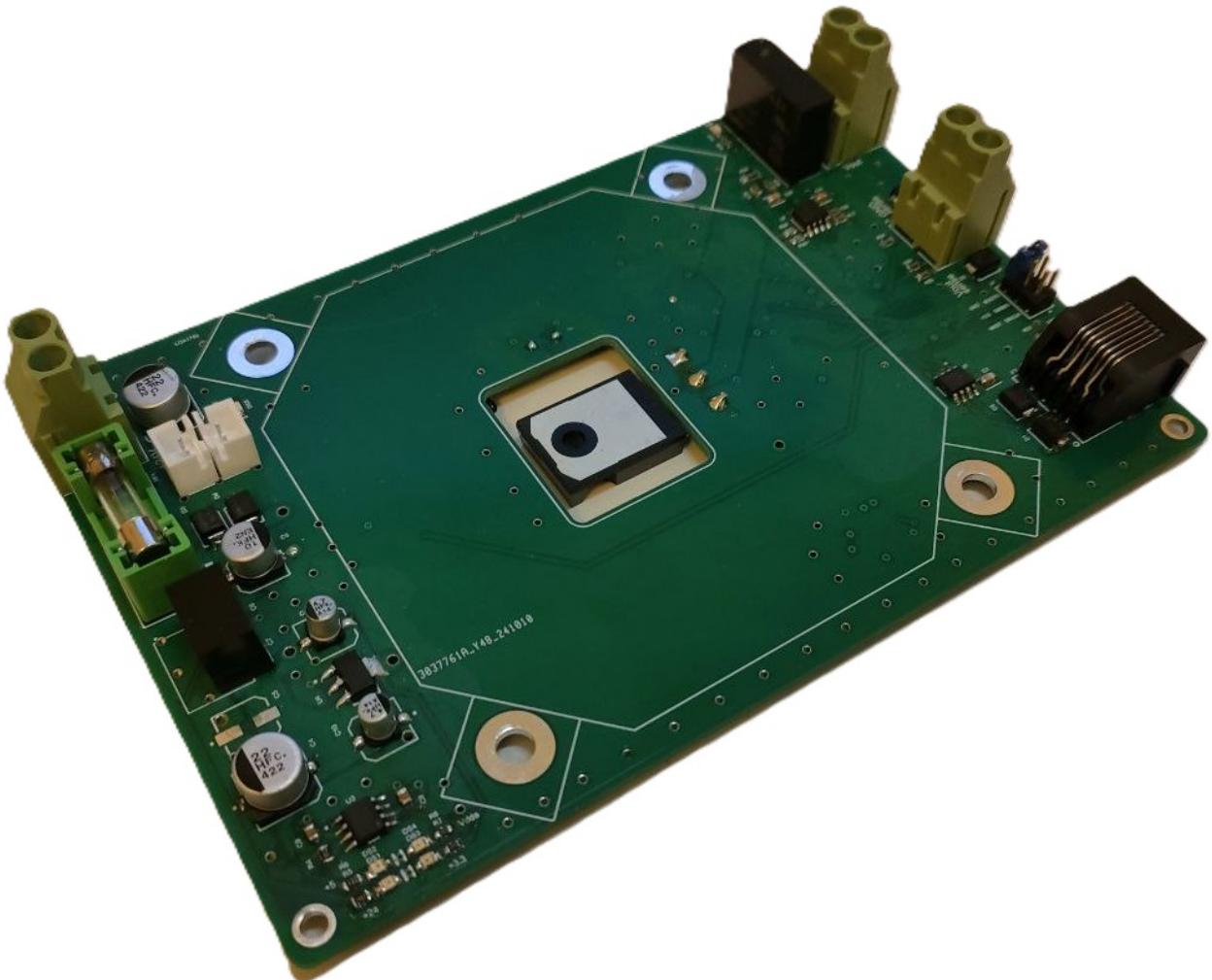
Zakupiony radiator, konkretnie Thermaltake Gravity i3 [32], nie posiada niestety w swojej specyfikacji konkretnego parametru rezystancji termicznej. Jest on przeznaczony do stosowania z procesorami na podstawkę LGA1700 o mocy do 95W, a więc z układami rozpraszającymi większą moc niż przewidywana.

Pozostałe układy

Wśród pozostałych układów w module obciążenia aktywnego znalazły się:

- mikrokontroler STM32F303K8T6,
- układ komunikacji RS485,
- układ pomiaru temperatury LM75,
- sterownik wentylatora 24V,
- układ pomiaru napięcia wejściowego SENSE,
- układ INA219 do pomiaru prądu i napięcia wejściowego.

Ich budowa jest analogiczna do przedstawionych w sekcji 4.1.2. Pozostałe schematy do modułu obciążenia aktywnego znajdują się również w załączniku.



Rysunek 4.26: Zlutowana płytka PCB modułu obciążenia aktywnego.

Projekt PCB

Na rysunku 4.26 widoczne jest zlutowane PCB modułu obciążenia aktywnego. Złącza, znajdujące się na płytce, są ułożone w tych samych miejscach co w module zasilacza regulowanego, który przedstawiony był już wcześniej (4.22).

W samym centrum płytki widoczne jest prostokątne wycięcie, w którym umieszczony został MOS-FET IRFP240. Na spodniej stronie płytki znalazły się także wzmacniacz operacyjny wraz z pozostałymi elementami, które tworzą część analogową układu. Na dolnej stronie płytki umieszczony został również mikrokontroler. Spowodowane to były umiejscowieniem radiatorka, którego otwory montażowe i obrys widać na górnej stronie. Z uwagi na jego rozmiar i ukształtowanie, konieczne było umiejscowienie elementów po przeciwniej stronie.

Tranzystor MOS musi być połączony z radiatorem w taki sposób, aby rezystancja termiczna tego połączenia była jak najmniejsza. Z uwagi na odległość kilku milimetrów, jaka powstaje między tylną powierzchnią obudowy TO-247, a radiatorem, zastosowano podkładkę, wyciętą z płyty miedzianej. Połączenie między elementami wypełnione jest poprzez elastyczne pady termiczne, a całość przykręcona do radiatorka, w którym wcześniej utworzono gwintowany otwór.

Dokładny layout płytki przedstawiony został w załączniku.

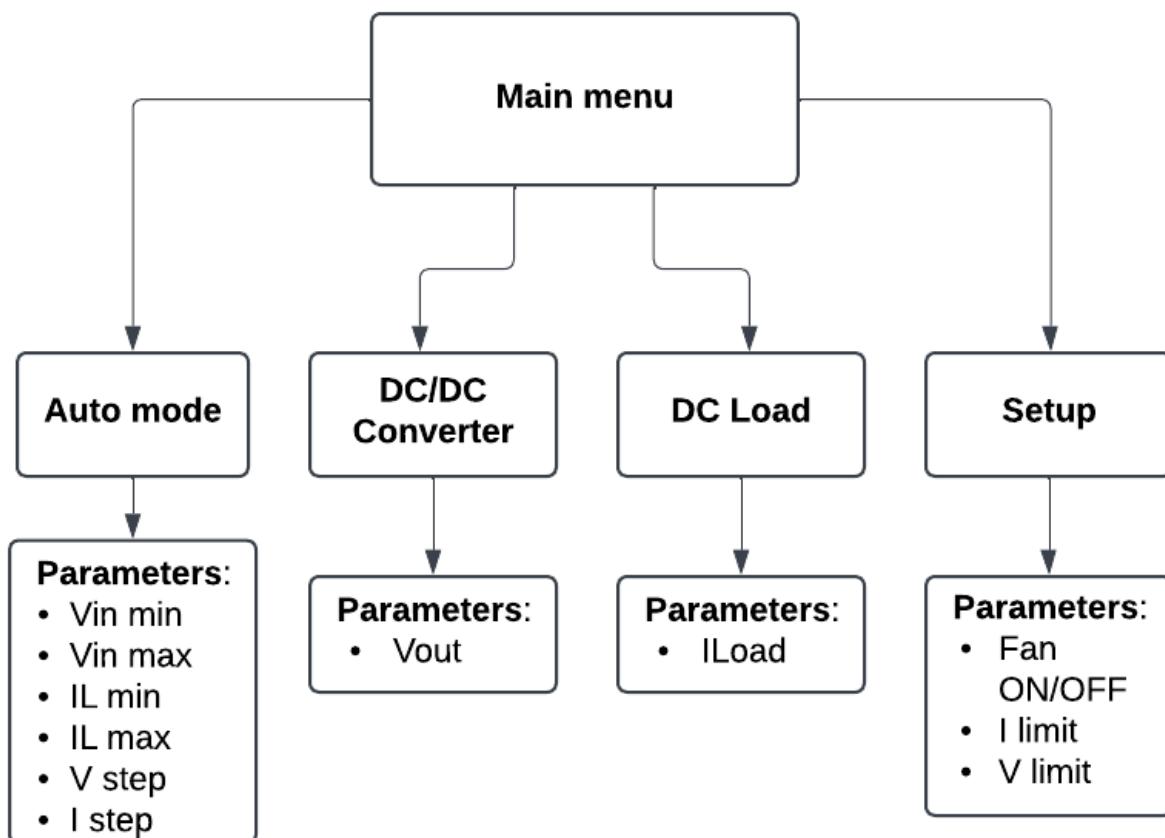
4.2 Oprogramowanie

W ramach projektu napisano także oprogramowanie na mikrokontrolery STM32, które znajdują się w modułach kontrolera, zasilacza i obciążenia aktywnego. Firmware dla poszczególnych układów napisany został w języku C, korzystając przy tym z programu STM32CubeMX i udostępnionych przez producenta bibliotek HAL (and. *Hardware Abstraction Layer*).

W dalszej części podrozdziału opisano działanie powstałego oprogramowania, z podziałem na poszczególne moduły.

4.2.1 Moduł kontrolera

Moduł kontrolera zarządza działaniem podłączonych do niego układów, a jednocześnie pełni funkcję interfejsu użytkownika. Najważniejsze było więc zapewnienie intuicyjnej obsługi urządzenia, poprzez stworzenie odpowiedniego menu. Zaimplementowano menu oparte o przedstawioną na rysunku 4.27 hierarchię.



Rysunek 4.27: Schemat menu użytkownika zaimplementowany w projekcie.

W oknie głównym (zdjęcie 4.28), przy pomocą przycisków (lewy, prawy), bądź enkodera, użytkownik ma możliwość wyboru odpowiedniego podmenu. Przejść do niego można wciskając przycisk *OK*. Jednocześnie, wciskając przyciski *DC_ON*, *LOAD_ON*, możemy włączyć lub wyłączyć wyjście odpowiedniego modułu.

Odczyt stanu przycisków dokonywany jest w tym przypadku poprzez ciągły odczyt stanu danego wejścia. W tym czasie, mikrokontroler nie musi bowiem wykonywać żadnej dodatkowej czynności. Odczyt stanu enkodera (obrót) dokonywany jest, korzystając z trybu *encoder mode* licznika wbudowanego w STM32. Dzięki temu możliwe jest sprawdzenie, czy enkoder zostało obrócony i o ile, odczytując

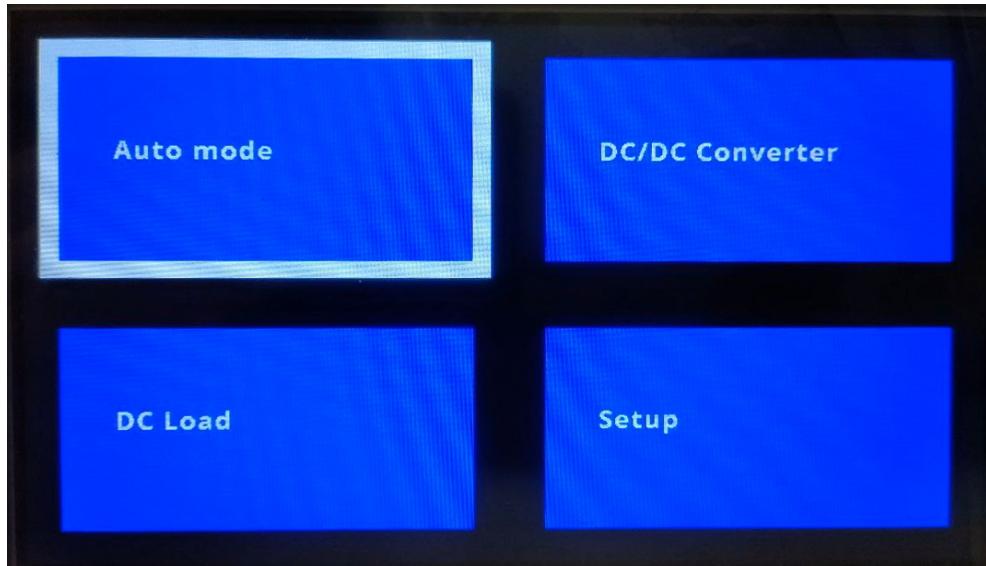
```

1 typedef enum
2 {
3     CMD_SET_OUTPUT_VOLTAGE = 0x01 ,
4     CMD_TURN_OUTPUT_ON = 0x02 ,
5     CMD_TURN_OUTPUT_OFF = 0x03 ,
6     CMD_TURN_FAN_ON = 0x04 ,
7     CMD_TURN_FAN_OFF = 0x05 ,
8     CMD_READ_TEMPERATURE = 0x06 ,
9     CMD_READ_CURRENT = 0x07 ,
10    CMD_READ_OUTPUT_VOLTAGE = 0x08 ,
11    CMD_SET_CURRENT = 0x09 ,
12    CMD_ACKNOWLEDGE = 0x10 ,
13    CMD_READ_SENSE_VOLTAGE = 0x11 ,
14    CMD_READ_CURRENT_SENSE = 0x12
15 } CommandType;

```

Listing 4.1: Lista dostępnych komend przesyłanych poprzez RS485.

wartość pojedynczego rejestru.



Rysunek 4.28: Zdjęcie menu głównego urządzenia.

Wciśnięcie jednego z przycisków, odpowiadających za przełączenie wyjścia innego modułu, powoduje wysłanie ramki z odpowiednią komendą do wybranego modułu. Możliwe do wysłania komendy zawarto w przedstawionym typie enumeracyjnym 4.1.

Do obsługi wyświetlacza, opartego o kontroler SSD1963, wykorzystano gotowy driver [34], który zmodyfikowano, aby przyspieszyć jego działanie poprzez bezpośrednią modyfikację rejestrów, z pominięciem HAL.

Komendy wysyłane są do pozostałych modułów za pośrednictwem interfejsu UART, korzystając z funkcji wbudowanych w biblioteki HAL. Aby zapewnić możliwość dalszej rozbudowy projektu o inne urządzenia, każdy moduł definiowany jest w postaci struktury, której przykład przedstawia kod 4.2.

Zdefiniowany jest tutaj numer fizycznego portu UART, adres urządzenia na magistrali i nazwa. Struktura przechowuje również wskaźniki na uniwersalne funkcje do wysyłania i odbierania danych.

Dzięki temu, możliwe jest wykorzystanie tych samych funkcji do obsługi wielu modułów. Przykładowo, kod 4.3, przedstawia funkcję załączającą wentylator w module.

```

1 DeviceModule dc_dc_converter =
2 {
3     .name = "DC/DC Converter",
4     .uart_number = 2,
5     .device_address = 1,
6     .sendCommand = UART_SendCommand,
7     .receiveCommand = UART_ReceiveCommand,
8 };

```

Listing 4.2: Przykładowa struktura definiująca moduł.

```

1 uint8_t Fan_On(DeviceModule* module)
2 {
3     CommandPacket cmd;
4     cmd.command = CMD_TURN_FAN_ON;
5
6     // Send the command
7     module->sendCommand( module->uart_number , &cmd );
8
9     return module->receiveCommand( module->uart_number , &cmd );
10 }

```

Listing 4.3: Przykładowa funkcja załączająca wentylator w module

Wywołując funkcję, podaje się wskaźnik na strukturę odpowiedniego modułu, która zawiera wszystkie informacje konieczne do przesłania komendy do konkretnego modułu.

Menu *Auto mode* oraz *DC/DC Converter* zostały przedstawione na kolejnych zdjęciach 4.29. Menu *DC Load* zostało zaprogramowane analogicznie do *DC/DC Converter*.



Rysunek 4.29: Wygląd pozostałych menu.

Pozwalają one na zmianę przedstawionych wcześniej na rysunku 4.27 parametrów. Można tego dokonać za pomocą zarówno przycisków, jak i enkodera, zmieniając niezależnie kolejne cyfry ustawianego napięcia, bądź prądu, zapisane w miliwoltach.

Po ustawieniu odpowiednich parametrów menu zasilacza regulowanego oraz obciążenia aktywnego zaczynają wyświetlać mierzony prąd wyjściowy i napięcia.

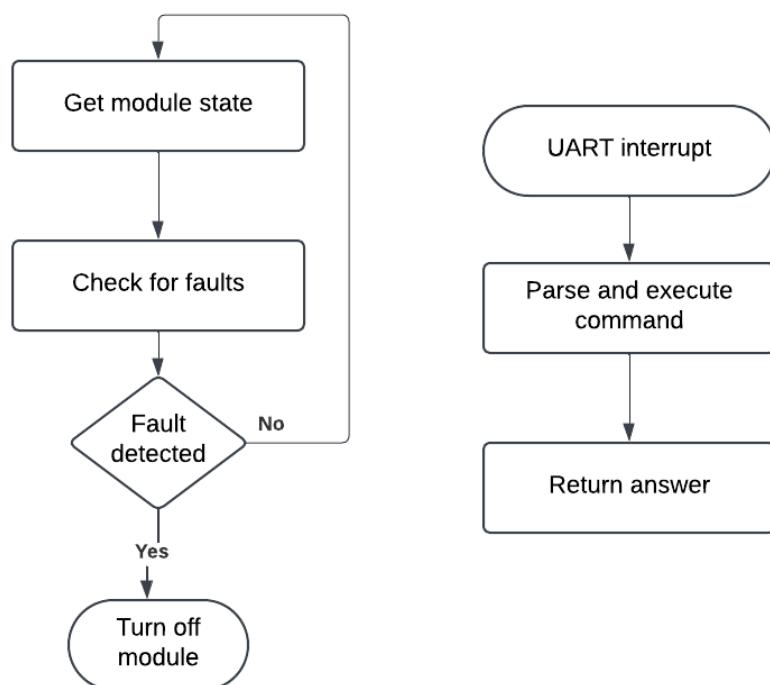
Po konfiguracji *Auto menu* następuje natomiast automatyczny pomiar sprawności podłączonej do urządzenia przetwornicy. Efektem tego pomiaru jest wykres sprawności. Przykładowy wykres przedstawiony został w rozdziale 5.

4.2.2 Pozostałe moduły

Pozostałe moduły, stanowiące urządzenia podrzędne, oczekują na komendę otrzymaną od kontrolera. W związku z tym, w głównej pętli programu, kontrolują one jedynie wartości mierzonych parametrów. Są wśród nich m.in. napięcie wyjściowe, prąd wyjściowy, temperatura modułu, stan wejść pomiarowych. W wypadku przekroczenia bezpiecznego limitu któregokolwiek z parametrów, wyłączone zostaje wyjście modułu (przekaźnik), a napięcie lub prąd wyjściowy ustawiony jest na wartość 0 V / 0 A.

Komendy odbierane poprzez interfejs UART, rozpoczynają procedurę przerwania. Następnie, odebrana ramka jest analizowana i w zależności od odebranej komendy podejmowana jest odpowiednia akcja, a następnie odsyłana odpowiedź. W przypadku odbioru komendy, która nie jest obsługiwana przez moduł, nie jest odsyłana odpowiedź (ACK - ang. *Acknowledge*).

Diagram przedstawiający opisane działanie przedstawiono na rysunku 4.30.



Rysunek 4.30: Diagram przedstawiający działanie kodu modułu.

Skrócony kod przerwania przedstawiono we fragmencie 4.4.

Najważniejszym zadaniem modułu zasilacza regulowanego jest zmiana napięcia wyjściowego. Odpoowiedzialna za to funkcja przedstawiona została we fragmencie kodu 4.5. Implementuje ona wzór, który jest przekształceniem równania 4.5.

Analogicznie, we fragmencie 4.6, przedstawiono funkcję ustawiającą prąd wyjściowy modułu obciążenia aktywnego, implementującą wzór 4.9.

Obie te funkcje wykorzystują wbudowane przetworniki DAC, korzystając z funkcji *HAL_DAC_SetValue()*. Do odczytu rejestrów układów INA219 (do pomiaru prądu i napięcia) oraz LM75 (do pomiaru temperatury), wykorzystywane są funkcje *HAL_I2C_Mem_Read()*. Przykładowo, kod 4.7 zawiera funkcje odczytującą temperaturę układu.

```

1 void HAL_UART_RxCpltCallback(UART_HandleTypeDef *huart)
2 {
3     CommandPacket receivedPacket, CommandPacket returnPacket;
4     unsigned char return_message[3] = "";
5
6     receivedPacket.command = rx_buff[0];
7     receivedPacket.data[0] = rx_buff[1];
8     receivedPacket.data[1] = rx_buff[2];
9
10    switch(receivedPacket.command)
11    {
12        case CMD_SET_OUTPUT_VOLTAGE:
13            float setVoltage = ((receivedPacket.data[0] << 8) |
14                receivedPacket.data[1]) / 100.0; // 500 (0x01F4) means 5V etc
15            Set_Output_Voltage(setVoltage);
16            returnPacket.command = CMD_ACKNOWLEDGE;
17            returnPacket.data[0] = receivedPacket.data[0];
18            returnPacket.data[1] = receivedPacket.data[1];
19            break;
20
21    }
22
23    return_message[0] = returnPacket.command;
24    return_message[1] = returnPacket.data[0];
25    return_message[2] = returnPacket.data[1];
26
27    HAL_GPIO_WritePin(Dir1_GPIO_Port, Dir1_Pin, GPIO_PIN_SET);
28    HAL_UART_Transmit(&huart1, return_message, sizeof(return_message),
29                      100);
30
31    HAL_GPIO_WritePin(Dir1_GPIO_Port, Dir1_Pin, GPIO_PIN_RESET);
32
33    memset(rx_buff, 0, sizeof(rx_buff));
34    HAL_UART_Receive_IT(&huart1, rx_buff, 3);
35 }
```

Listing 4.4: Funkcja odpowiadająca za ustawienie napięcia wyjściowego.

```

1 void Set_Output_Voltage(float voltage)
2 {
3     float DAC_Voltage = 1.56 - 0.075 * voltage;
4
5     uint32_t var = (uint32_t)(DAC_Voltage*ADC_BITS)/ADC_REFERENCE_VOLTAGE;
6
7     HAL_DAC_SetValue(&hdac1, DAC1_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, var);
8 }
```

Listing 4.5: Funkcja odpowiadająca za ustawienie napięcia wyjściowego.

```

1 void Set_Output_Current( float current )
2 {
3     float DAC_Voltage = current * 1.3;
4
5     uint32_t var = (uint32_t)(DAC_Voltage*ADC_BITS)/ADC_REFERENCE_VOLTAGE;
6
7     HAL_DAC_SetValue(&hdac1, DAC1_CHANNEL_1, DAC_ALIGN_12B_R, var);
8 }
```

Listing 4.6: Funkcja odpowiadająca za ustawienie prądu wyjściowego.

```

1 float LM75_Read_Temperature()
2 {
3     unsigned char buffer[2];
4
5     HAL_I2C_Mem_Read(&hi2c1, (LM75_ADDR), LM75_Temp, 1, buffer, 2, 1000);
6
7     float output = ((buffer[0] << 8) | buffer[1]) / 256.0;
8
9     return output;
10 }
```

Listing 4.7: Funkcja odczytująca temperaturę z układu LM75.

4.3 Mechanika

Poza częścią elektroniczną wraz z oprogramowaniem, stworzono również kompletny projekt obudowy, korzystając z programu Fusion 360, na licencji studenckiej [35].

Projekt części mechanicznej powstawał równolegle do projektu elektroniki, dzięki czemu możliwe było dopasowanie rozkładu złącz płytka PCB oraz wytworzenie odpowiedniego okablowania. Render przedstawiający widok zewnętrzny widoczny jest na rysunku 4.31.

Projekt oparty został o stelaż z profili aluminiowych 2020 (20 mm x 20 mm), które umożliwiają montaż pozostałych elementów dzięki nakrętkom młoteczkowym. Panele zewnętrzne wykonane zostały z aluminium o grubości 3 mm. Wycięte już na odpowiedni wymiar panele należało poddać obróbce w celu wykonania otworów na złącza, przyciski oraz wyświetlacz. Wykonano je na frezarce 3-osiowej - zmodyfikowanym urządzeniu Vevor 3018. Do stworzenia g-code wykorzystano narzędzie wbudowane w oprogramowanie Fusion 360, a następnie zmodyfikowano ręcznie w programie UGS (Universal G-code Sender) 4.32.

Pozostałe elementy wykonane zostały za pomocą druku 3D z materiału PLA, bądź ABS. Elementy te widoczne są na rysunku 4.33. Wśród nich znajdują się: narożniki obudowy, przyciski, gałka enkodera, mocowania wentylatorów, zasilacza 24 V, płytka PCB oraz wyświetlacz. Elementy mocujące płytki PCB oraz trzymające kable łączone są ze sobą za pomocą śrub wkręcanych w mosiężne inserty gwintowane, wtapiane w elementy plastikowe.

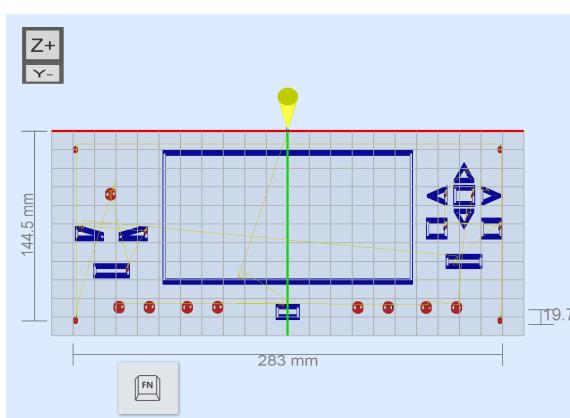
Kompletne złożone urządzenie przedstawiają zdjęcia 4.34 oraz 4.35.

Jako wyjścia oraz wejścia modułów zasilacza regulowanego i obciążenia aktywnego wykorzystano klasyczne złącza bananowe. Pomiędzy nimi, na panelu frontowym znajduje się gniazdo termopary typu K, konkretnie model 4559742 od RS COMPONENTS [36]. Styki złącza wykonane są z materiału odpowiedniego dla danego typu termopary, a kolor zgodny jest z normą IEC 60584-3. Z tyłu obudowy znalazło się także miejsce na złącza panelowe: USB typu B oraz RJ45, które można podłączyć do modułu kontrolera. Poniżej zamontowano złącze zasilania 230 V (wtyczka C14) z włącznikiem i bezpiecznikiem topikowym.

Zastosowane wentylatory to SUNON MF92252V3-A99-A, o wymiarach 92 mm x 92 mm i napięciu pracy 24 V. Ich wymiar umożliwił montaż bezpośrednio pomiędzy profilami aluminiowymi. W tyl-



Rysunek 4.31: Render obudowy projektu wykonany w programie Fusion 360.



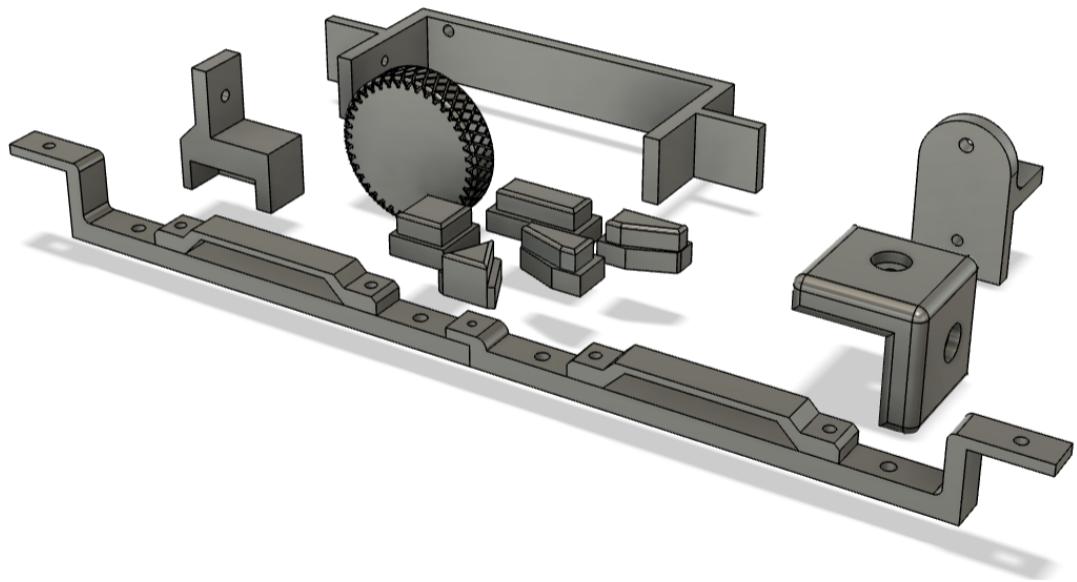
(a) Wizualizator UGS.



(b) Frezarka 3018.

Rysunek 4.32: Proces frezowania panelu frontowego.

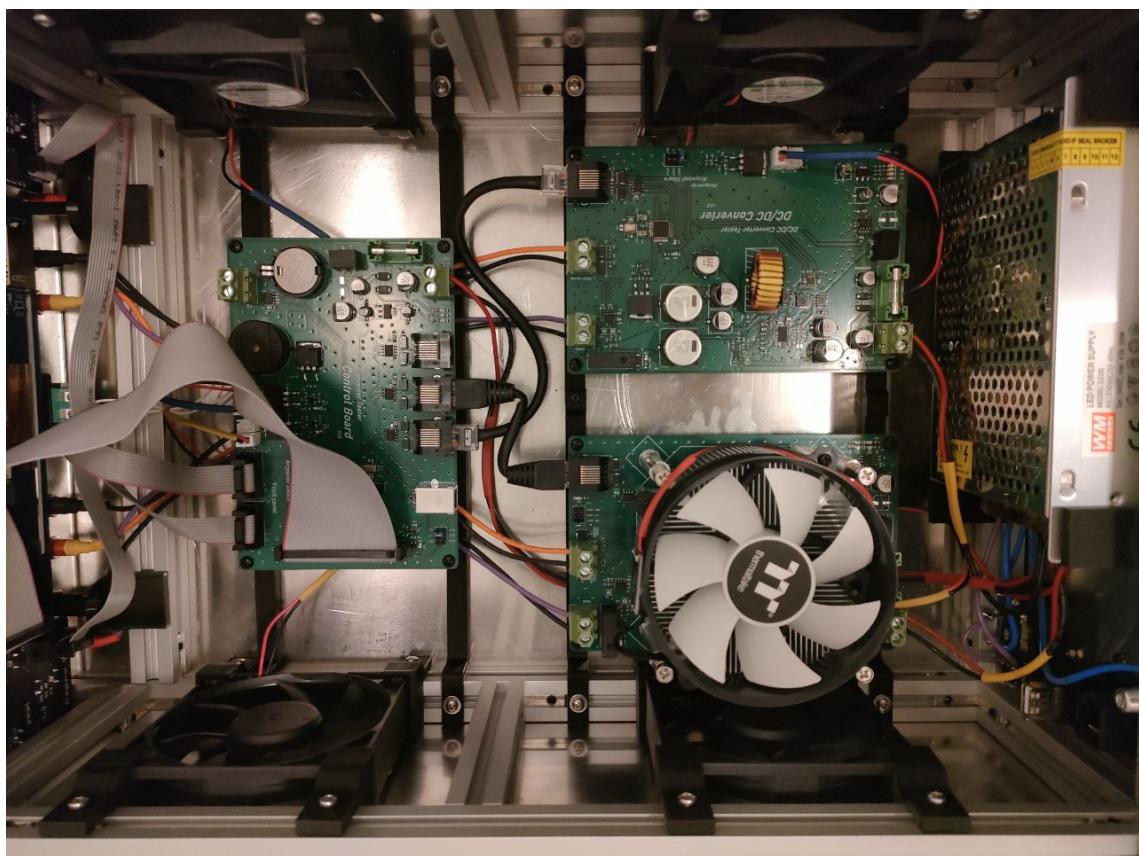
nej części obudowy widoczny jest główny zasilacz 24 V firmy Mean Well. Odpowiada on za zasilanie wszystkich trzech modułów z elektroniką. Doprowadzenia do obudowy metalowej napięcia 230 V połącza za sobą konieczność uziemienia obudowy, które wykonano przewodem połączonym z profilami aluminiowymi.



Rysunek 4.33: Elementy wykonane w technologii FDM.



Rysunek 4.34: Zdjęcie kompletnego urządzenia bez górnej pokrywy.



Rysunek 4.35: Widok urządzenia ze zmontowaną elektroniką.

Rozdział 5

Testy

W rozdziale opisano kolejne etapy testowania urządzenia.

5.1 Testy

Po złożeniu urządzenia przeprowadzono testy podstawowych funkcjonalności. Wyniki najważniejszych pomiarów przedstawiono w następnych podrozdziałach. Pomiary wartości prądu oraz napięcia dokonywane były multimetrami Uni-T UT60EU oraz UT107+.

5.1.1 Testy zasilacza regulowanego

Przy pomocy zewnętrznego obciążenia aktywnego zweryfikowano działanie przetwornicy w module zasilacza regulowanego. Zmierzono napięcie na wyjściu modułu dla trzech wybranych napięć (5 V, 9 V, 12 V, 15 V) oraz zakresu prądów od 0.1 A do 2 A. Zebrane dane przedstawiono w tabeli 5.1. Błąd względny obliczany jest ze wzoru: $\frac{V_{ustawione} - V_{zmierzzone}}{V_{ustawione}} \cdot 100\%$

5.1.2 Testy obciążenia aktywnego

Pomiary działania modułu obciążenia aktywnego wykonywano korzystając z zewnętrznego zasilacza laboratoryjnego PS-305D YIHUA. Napięcie na zasilaczu ustawiono na 6 V oraz 12 V. Zmierzono pobierany przez moduł prąd dla kilku ustalonych wartości. Zmierzone wartości przedstawia tabela 5.2. Błąd względny obliczany jest ze wzoru: $\frac{I_{ustawione} - I_{zmierzzone}}{I_{ustawione}} \cdot 100\%$

5.1.3 Pomiar prądu i napięcia

Sprawdzono również dokładność pomiaru prądu oraz napięcia, które dokonywane są w obu modułach poprzez układ INA219. Wykorzystano w tym celu moduł zasilacza regulowanego do ustalania napięcia wyjściowego do pomiaru napięcia oraz moduł obciążenia aktywnego, w celu sprawdzenia dokładności pomiaru prądu. Tabele 5.3 oraz 5.4 zawierają wyniki wykonanych pomiarów. Błąd względny liczony był analogicznie do pomiarów przedstawionych wcześniej.

5.1.4 Automatyczny pomiar sprawności przetwornicy

Jednym z głównych celów projektu, jakie przedstawione zostały na początku tej pracy, była automatyzacja pomiaru sprawności przetwornic napięciowych. W tym celu, wytworzono oprogramowanie pozwalające na wybór napięcia wejściowego oraz zakresu prądów obciążenia przetwornicy. Następnie, po podłączeniu badanego układu (DUT), załączany jest moduł zasilacza regulowanego i ustalane napięcie wejściowe. Obciążenie aktywne ustala następnie prąd wyjściowy DUT i oba moduły mierzą moc na swoich wejściach, tj. napięcie oraz prąd. Po wykonaniu pomiaru, liczona jest sprawność, czyli stosunek mocy wejściowej i wyjściowej. Proces ten wykonywany jest dla całego zakresu prądu obciążenia z wybranym krokiem. Po zakończeniu pomiarów, na wyświetlaczu urządzenia widoczny jest wykres

Napięcie ustawione [V]	Prąd wyjściowy [A]	Napięcie zmierzone [V]	Błąd względny [%]
5	0.1	4.972	0.56
5	0.5	4.94	1.2
5	1	4.888	2.24
5	1.5	4.832	3.36
5	2	4.784	4.32
9	0.1	8.992	0.0889
9	0.5	8.956	0.4889
9	1	8.904	1.0667
9	1.5	8.848	1.6889
9	2	8.802	2.2
12	0.1	12.004	-0.0333
12	0.5	11.965	0.2917
12	1	11.916	0.7
12	1.5	11.864	1.1333
12	2	11.812	1.5667
15	0.1	15.028	-0.1867
15	0.5	14.998	0.0133
15	1	14.936	0.4267
15	1.5	14.888	0.7467
15	2	14.852	0.9867

Tabela 5.1: Wyniki pomiarów modułu zasilacza regulowanego.

Napięcie zasilacza [V]	Prąd ustawiony [A]	Prąd zmierzony [A]	Błąd względny [%]
12	0.1	0.0994	0.6
12	0.5	0.4945	1.1
12	1	1.022	-2.2
12	1.5	1.514	-0.93333
12	2	1.981	0.95
6	0.1	0.0987	1.3
6	0.5	0.4889	2.22
6	1	1.001	-0.1
6	1.5	1.503	-0.2
6	2	1.992	0.4

Tabela 5.2: Wyniki pomiarów modułu obciążenia aktywnego.

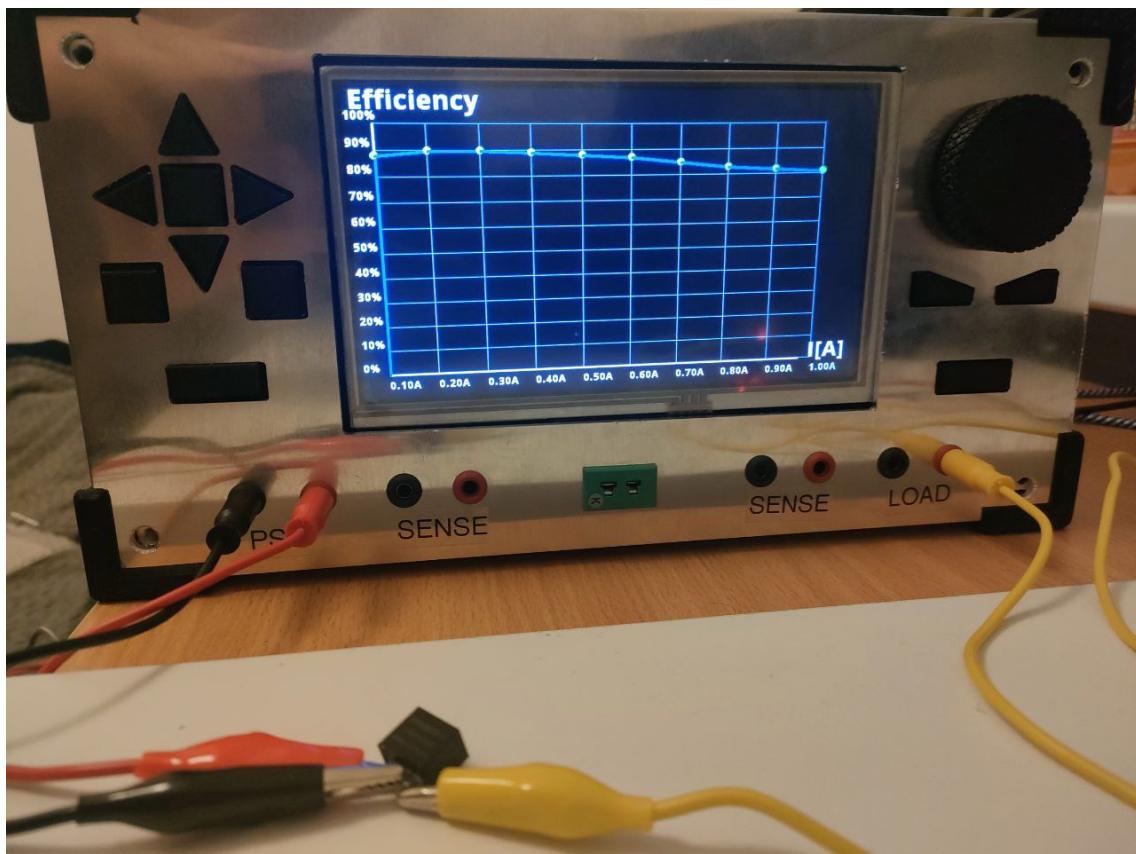
Napięcie zmierzone [V]	Napięcie rzeczywiste [V]	Błąd względny [%]
2.968	2.978	-0.336
4.988	4.986	0.040
7.992	8.001	-0.112
11.004	11.01	-0.054
15.028	15.05	-0.146
19.04	19.06	-0.105

Tabela 5.3: Pomiar napięcia przy pomocy układu INA219 oraz multimetru.

Prąd zmierzony [A]	Prąd rzeczywisty [A]	Błąd względny [%]
0.124	0.121	2.419
0.241	0.238	1.244
0.4	0.399	0.250
0.544	0.541	0.551
0.841	0.836	0.594
1.048	1.042	0.572
1.267	1.259	0.631
1.58	1.567	0.822
1.812	1.781	1.710
2.052	2.01	2.046

Tabela 5.4: Pomiar prądu przy pomocy układu INA219 oraz multimetru.

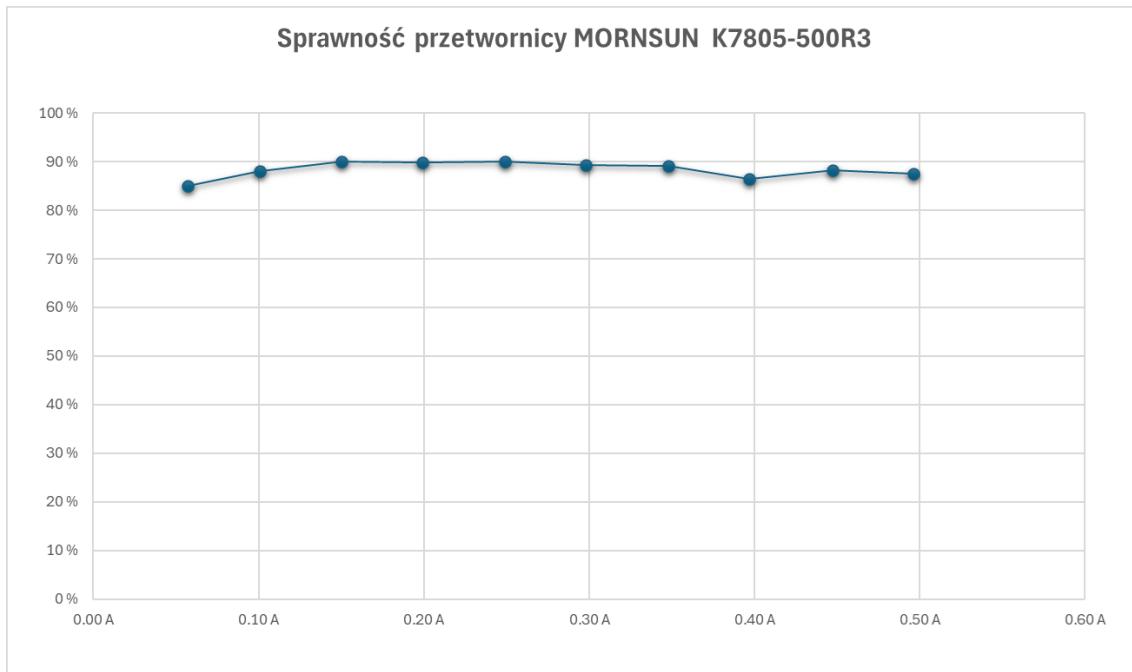
sprawności w podanym zakresie prądu obciążenia. Przykładowy wykonywany pomiar przedstawia zdjęcie 5.1.



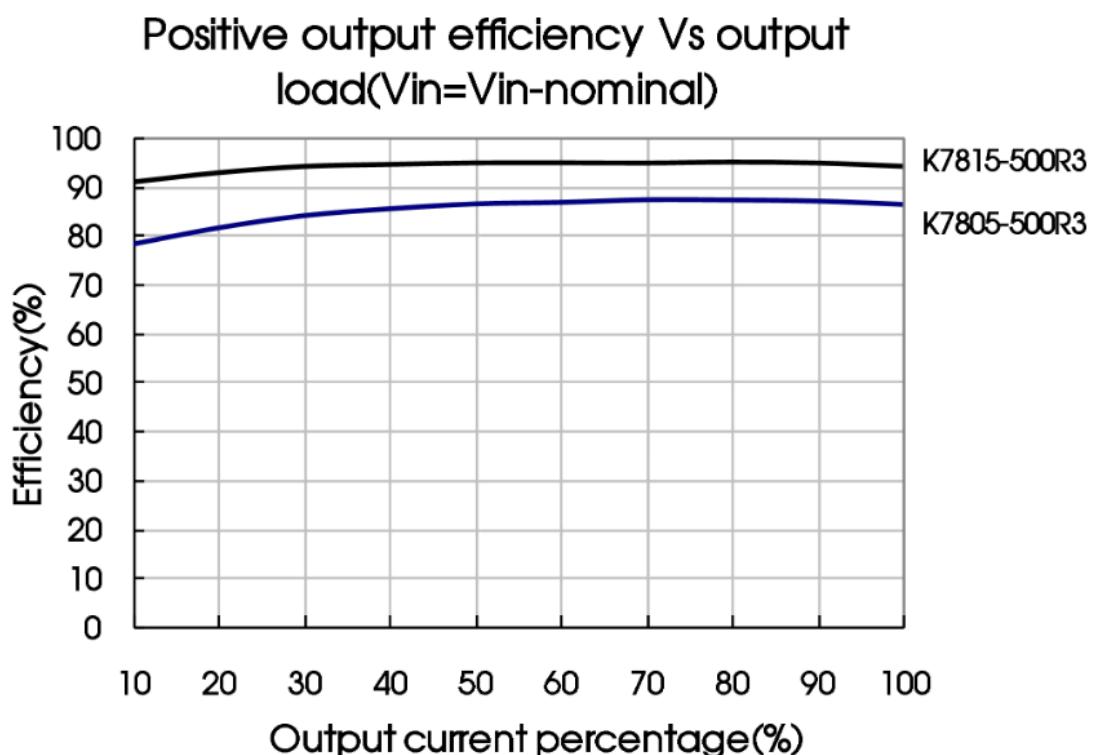
Rysunek 5.1: Automatyczny pomiar sprawności podłączonej przetwornicy.

Na zdjęciu widoczna jest przetwornica MORNSUN K7805-500R3 [37]. Jej napięcie wyjściowe to 5 V, natomiast maksymalny prąd to 500 mA. Pomiar wykonany został dla zakresu 0.1 A do 1 A, z krokiem 100 mA. Wartość 1 A przekracza oczywiście maksimum podane przez producenta, lecz testy wykazały stabilną pracę w temperaturze pokojowej do ponad 1 A, przy spadku napięcia wyjściowego do 4.4 V. Gwarantowany zakres 500 mA zakłada, że napięcie wyjściowe mieści się w zakresie 4% od ustalonej wartości.

Wykres 5.2 wygenerowany został z pomiarów w zakresie 0.05 A do 0.5 A prądu obciążenia, przy zasilaniu z napięcia 9 V. Jest on analogiczny do wykresu przedstawionego na rysunku 5.3.



Rysunek 5.2: Wykres powstały ze zmierzonych wartości mocy przetwornicy MORNSUN.



Rysunek 5.3: Wykres sprawności przetwornicy MORNSUN z dokumentacji producenta.

Zarówno wykres z dokumentacji producenta, jak i wygenerowany z pomiarów, przedstawiają podobną krzywą sprawności. Dla niewielkiego prądu wyjściowego sprawność wynosi około 85% i wzrasta do prawie 90% w połowie zakresu, po czym utrzymuje ten poziom, aż do pełnego zakresu 500 mA.

Rozdział 6

Podsumowanie

Celem niniejszej pracy było zaprojektowanie i wykonanie modułowego urządzenia, umożliwiającego automatyzację pomiarów przetwornic napięciowych (DC/DC). W tym celu konieczne było zaprojektowanie zasilacza regulowanego, obciążenia aktywnego oraz kontrolera, przy pomocy którego możliwe byłoby zarządzanie innymi modułami. Moduły te zostały wykonane, a następnie przetestowane. Stwierdzono poprawne działanie wszystkich elementów oraz zadowalającą dokładność stworzonego sprzętu.

Automatyczny pomiar sprawności przetwornicy wykorzystywany był wielokrotnie z pozytywnym wynikiem i znaczaco przyspieszał proces. Napisane oprogramowanie ocenione zostało przez osoby testujące jako responsywne i proste w użyciu. Wykonanie stosownej obudowy z odpornych materiałów, oraz przemyślany interfejs zapewniają sprawne działanie bez obaw o ewentualne uszkodzenia czy awarie. Zrealizowany projekt inżynierski wykorzystuje wiele elementów, które wybrane zostały przez autora pracy z myślą o dalszym rozwoju i potencjalnym modyfikacjom. W ramach tego, możliwe jest dodanie dodatkowych funkcjonalności automatycznego pomiaru innych parametrów przetwornic, czy też innych urządzeń, np.: pomiar pojemności akumulatorów, pomiar rezystancji przewodów metodą Kelvina.

Bibliografia

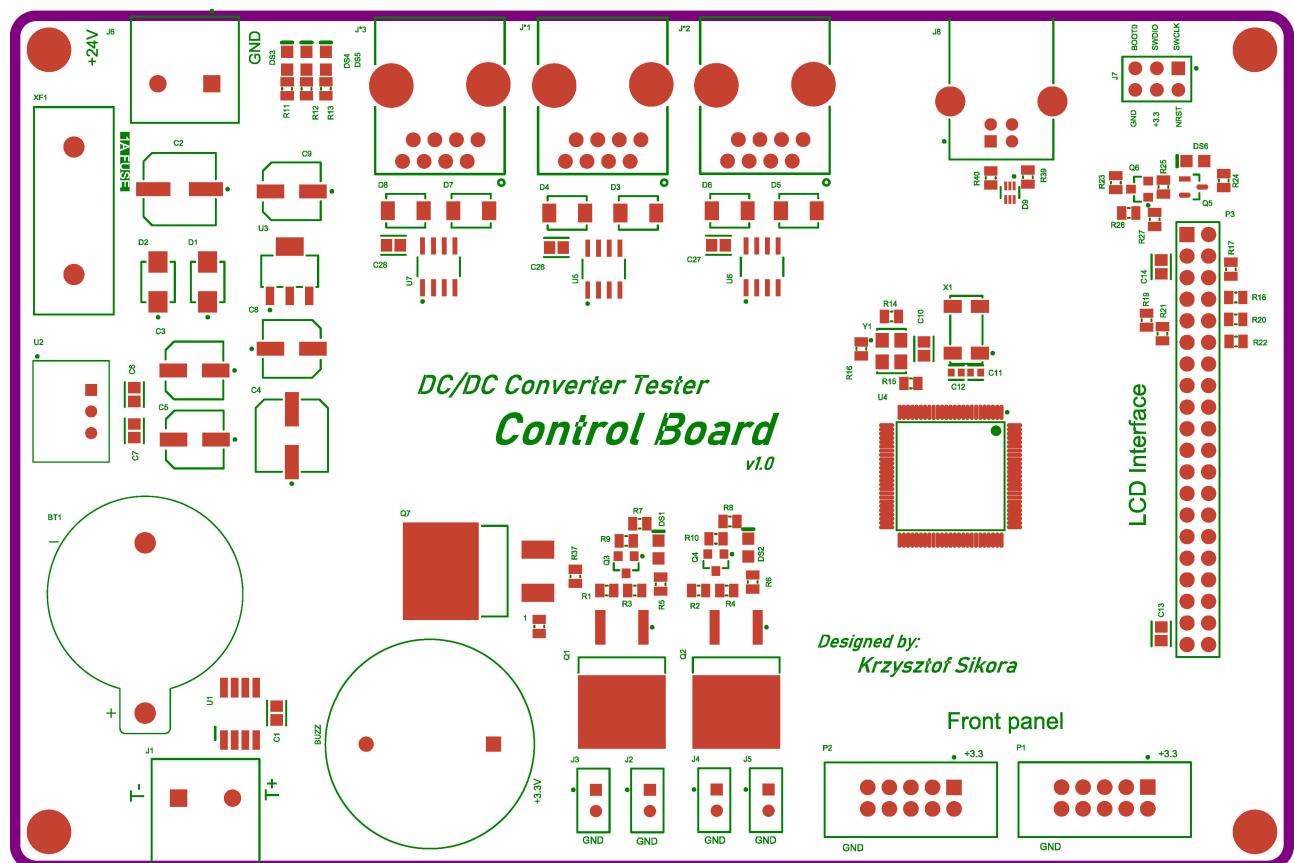
- [1] Przetwornice napięciowe, https://pl.wikipedia.org/wiki/Przetwornica_napi%C4%99cia, dostęp 01.11.2024 r.
- [2] Zasilacze impulsowe, https://pl.wikipedia.org/wiki/Zasilacz_impulsowy, dostęp 01.11.2024 r.
- [3] Przetwornica buck-boost, https://en.wikipedia.org/wiki/Buck%E2%80%93boost_converter, dostęp 01.11.2024 r.
- [4] SPICE, <https://en.wikipedia.org/wiki/SPICE>, dostęp 01.11.2024 r.
- [5] Moduł przetwornicy OmniON, <https://www.mouser.it/new/omnion-power/omnion-power-qsxw050a0b-dc-dc-modules/>, dostęp 01.11.2024 r.
- [6] Altium Designer, <https://www.altium.com/altium-designer>, dostęp 01.11.2024 r.
- [7] Datasheet STM32F401VET6, <https://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/30/91/86/2d/db/94/4a/d6/DM00102166.pdf/files/DM00102166.pdf/jcr:content/translations/en.DM00102166.pdf>, dostęp 01.11.2024 r.
- [8] Opis interfejsu RS485, <https://www.ccontrols.com/pdf/ExtV1N1.pdf>, dostęp 01.11.2024 r.
- [9] Datasheet MAX3485, <https://www.analog.com/media/cn/technical-documentation/data-sheets/1079.pdf>, dostęp 09.11.2024 r.
- [10] Standardy RS422/RS485, https://www.delock.com/infothek/RS-422_RS-485/RS-422_RS-485_e.html, dostęp 01.11.2024 r.
- [11] Kontroler SSD1963, https://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/SSD1963_LCD_Controller_%20Graphics_Card_DS50002915A.pdf, dostęp 01.11.2024 r.
- [12] Termopara, <https://pl.wikipedia.org/wiki/Termopara>, dostęp 01.11.2024 r.
- [13] Datasheet MAX6675, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/MAX6675.pdf>, dostęp 01.11.2024 r.
- [14] Zjawisko Seebecka, <https://www.techtarget.com/searchnetworking/definition/Seebeck-effect>, dostęp 01.11.2024 r.
- [15] Dokumentacja AMSRI1, <http://www.aimtec.com/site/Aimtec/files/Datasheet/HighResolution/amsr1-z.pdf>, dostęp 09.11.2024 r.
- [16] Dokumentacja LDO TLV76133, <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlv761.pdf>, dostęp 09.11.2024 r.
- [17] Dokumentacja układu przetwornicy MP9928, https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/MP9928/?srsltid=AfmB0oq7GuS46Yk88IgI9IL9-YGCLxkan8e_ik8h-mNoc0YwlZz8QCuL, dostęp 09.11.2024 r.

- [18] Basic Calculation of a Buck Converter's Power Stage, https://www.ti.com/lit/an/slva477b/slva477b.pdf?ts=1733342064235&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, dostęp 05.12.2024 r.
- [19] Dokumentacja tranzystora SQJ850EP, <https://www.vishay.com/docs/65280/sqj850ep.pdf>, dostęp 09.11.2024 r.
- [20] Płytnica ewaluacyjna MP9928, https://www.monolithicpower.com/en/documentview/productdocument/index/version/2/document_type/Datasheet/lang/en/sku/EV9928-F-00B/document_id/3375/, dostęp 09.11.2024 r.
- [21] Oprogramowanie MPSmart, https://www.monolithicpower.com/en/mpsmart-v9.html?srsltid=AfmB0op79k13gR70js1PbaIpAlMgfDhco18PwP2i3f6T2zJfTZ_qEZrz, dostęp 09.11.2024 r.
- [22] Fundamentals Of Power Electronics, autorzy: Robert W. Erickson , Dragan Maksimović, wydanie 2020
- [23] How to Design a Variable Output Buck Regulator, <https://www.analog.com/jp/resources/technical-articles/a-3step-approach-for-designing-a-variable-output-buck-regulator.html>, dostęp 10.11.2024 r.
- [24] Keysight N6705C, <https://www.keysight.com/us/en/product/N6705C/dc-power-analyzer-modular-600-w-4-slots.html>, dostęp 12.10.2024 r.
- [25] Dokumentacja układu pomiaru prądu i napięcia INA219, https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina219.pdf?ts=1731224153420&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F, dostęp 10.11.2024 r.
- [26] Dokumentacja mikrokontrolera STM32F303K8T6, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/stm32f303k8.pdf>, dostęp 10.11.2024 r.
- [27] Dokumentacja układu LT1461CC, <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/LT1461.pdf>, dostęp 10.11.2024 r.
- [28] Producent płytka PCB - JLCPCB, <https://jlcpcb.com/>, dostęp 10.11.2024 r.
- [29] Dokumentacja MOSFET typu N - IRFP240, <https://www.vishay.com/docs/91210/irfp240.pdf>, dostęp 10.11.2024 r.
- [30] Nota aplikacyjna AND8199/D, <https://www.onsemi.cn/PowerSolutions/document/AND8199-D.PDF>, dostęp 10.11.2024 r.
- [31] Dokumentacja radiatora RA-T2X-51E, <https://www.tme.eu/Document/ad1db061b7bf4b6eae656461c3bb5f61/RA-T2X-51E.pdf>, dostęp 10.11.2024 r.
- [32] Radiator thermaltake gravity i3, <https://www.thermaltake.com/gravity-i3.html>, dostęp 10.11.2024 r.
- [33] ElektroAutomatik, <https://elektroautomatik.com/en/products/dc-bidirectional-power-supplies/>, dostęp 12.10.2024 r.
- [34] Biblioteka drivera do SSD1963, <https://github.com/offpic/7-SSD1963-GPIO-HIGH-SPEED-STM32-STM32F401-GAUGE>, dostęp 12.10.2024 r.
- [35] Oprogramowanie fusion360, <https://www.autodesk.com/products/fusion-360>, dostęp 22.12.2024 r.
- [36] Złącze termopary RS COMPONENTS, https://pl.rs-online.com/web/p/akcesoria-do-czujnikow/4559742?srsltid=AfmB0ooj4xmu6XScA-BCboP2SBJIe7dSX3QR98rF_B7sTZLFJNxZeTKQ, dostęp 22.12.2024 r.

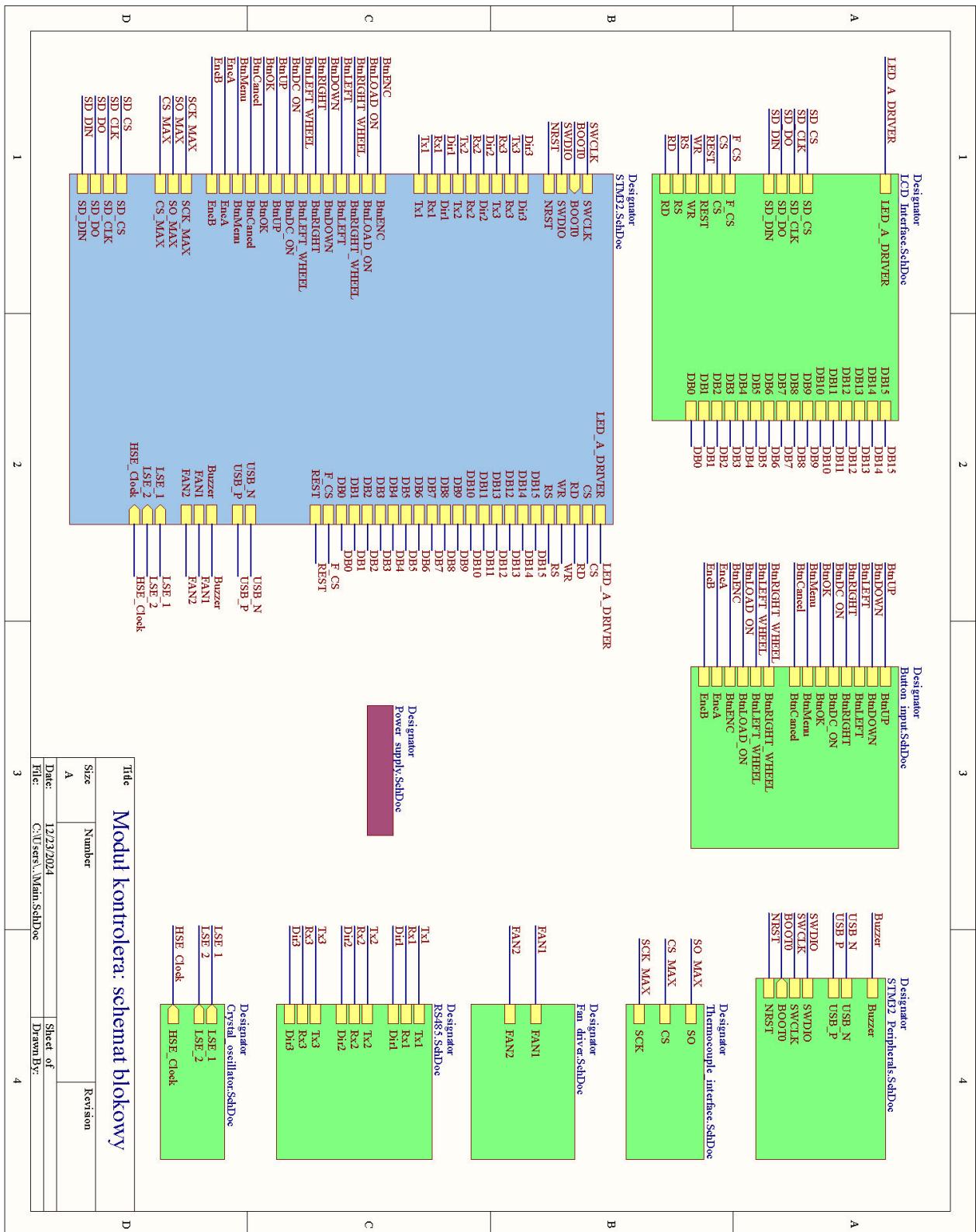
- [37] Dokumentacja przetwornicy MORNSUN k7805-500r3, <https://www.mornsun-power.com/html/pdf/K7805-500R3.html>, dostęp 22.12.2024 r.
- [38] Python, <https://www.python.org/>, dostęp 12.10.2024 r.
- [39] LabView, <https://www.ni.com/en/shop/labview.html>, dostęp 12.10.2024 r.

Dodatek A

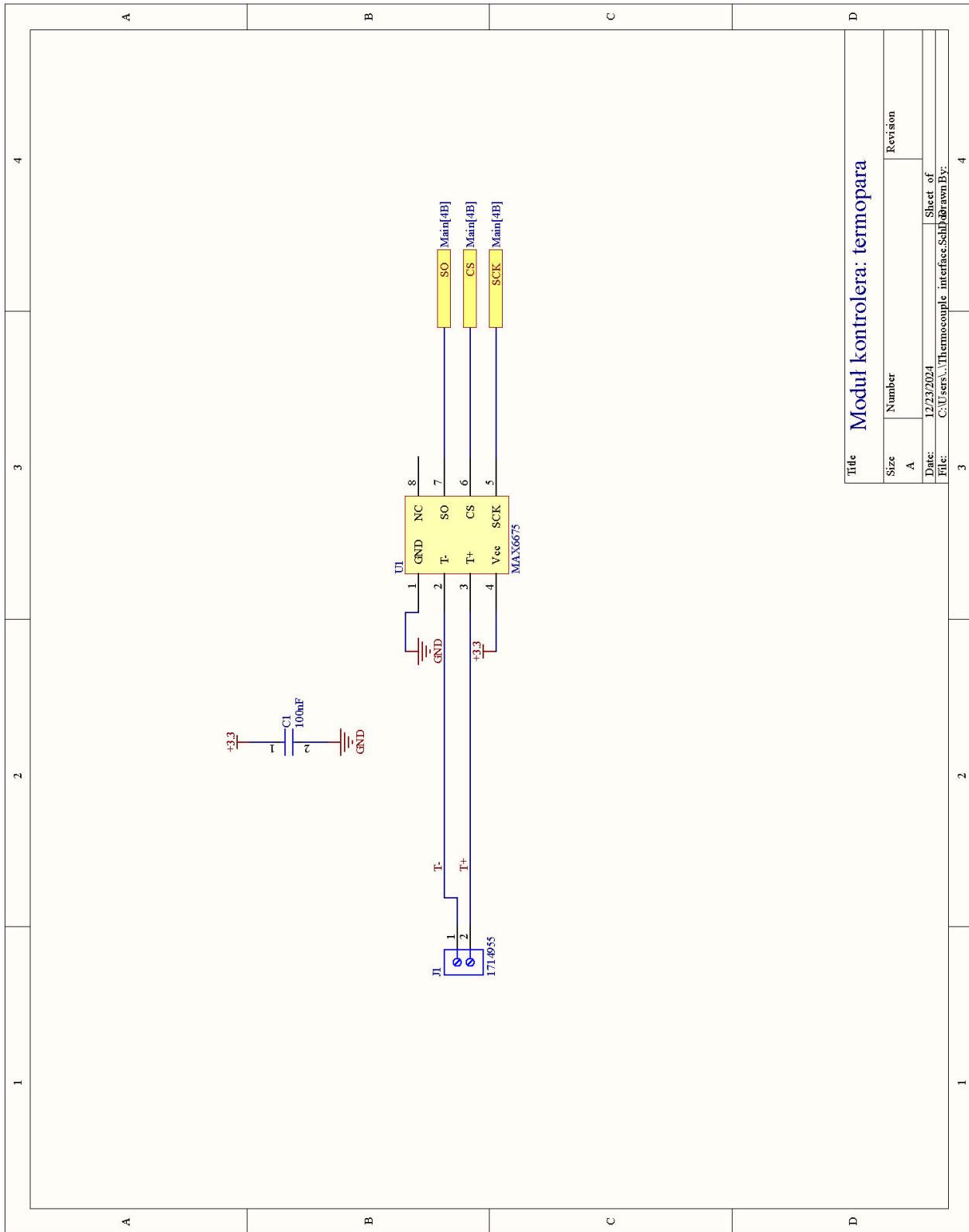
Moduł kontrolera



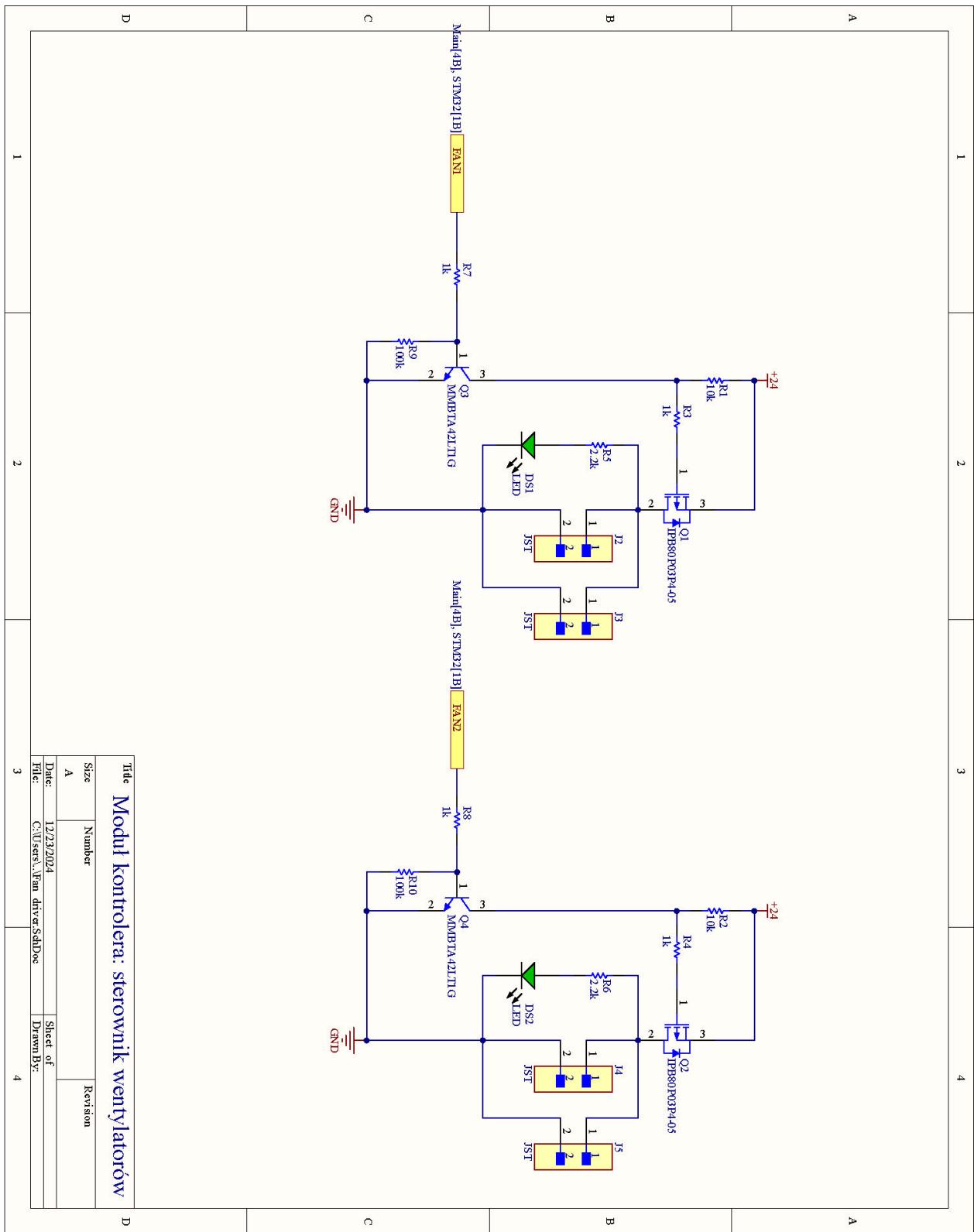
Rysunek A.1: Widok warstwy opisowej PCB.



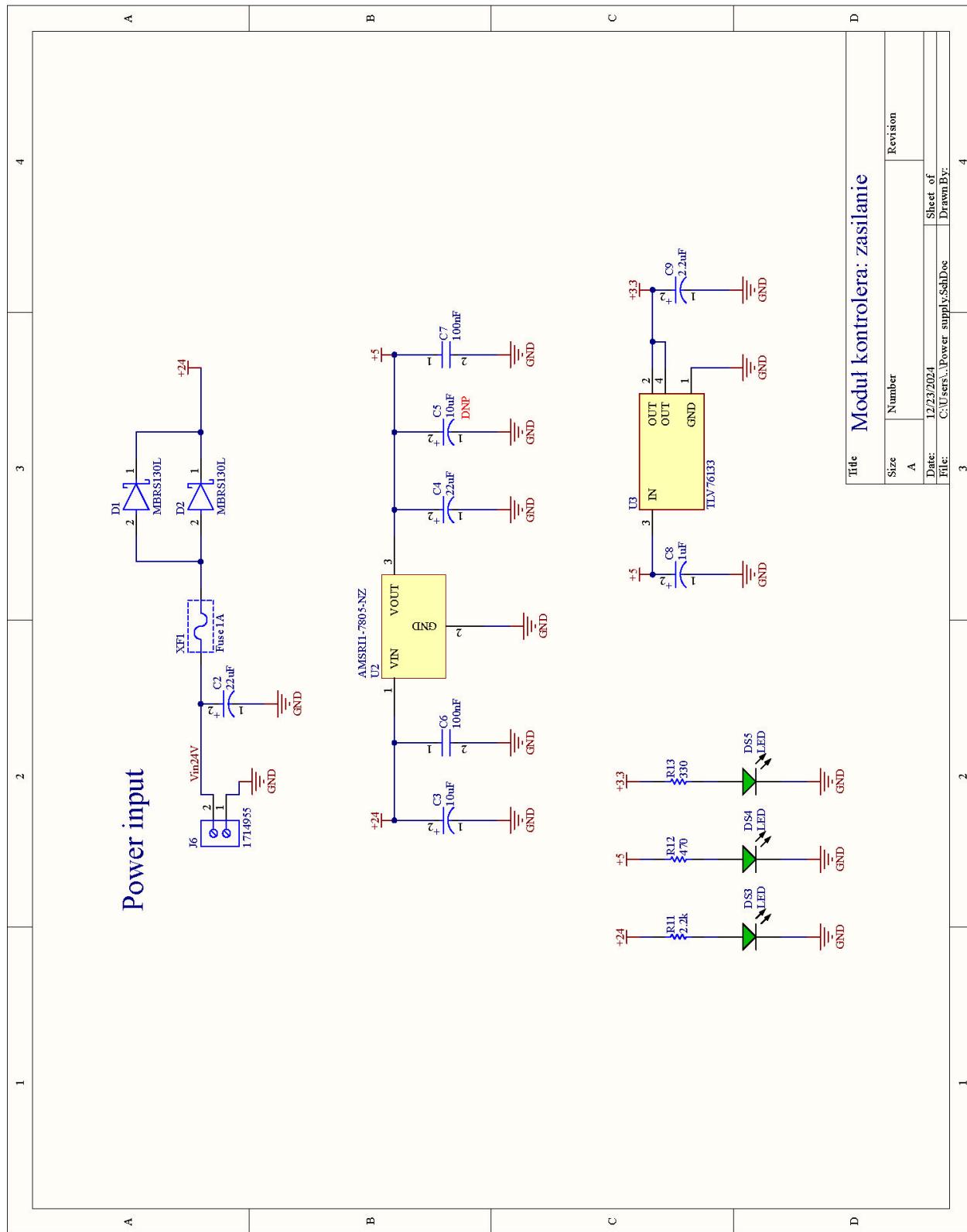
Rysunek A.2: Schemat blokowy modułu kontrolera.



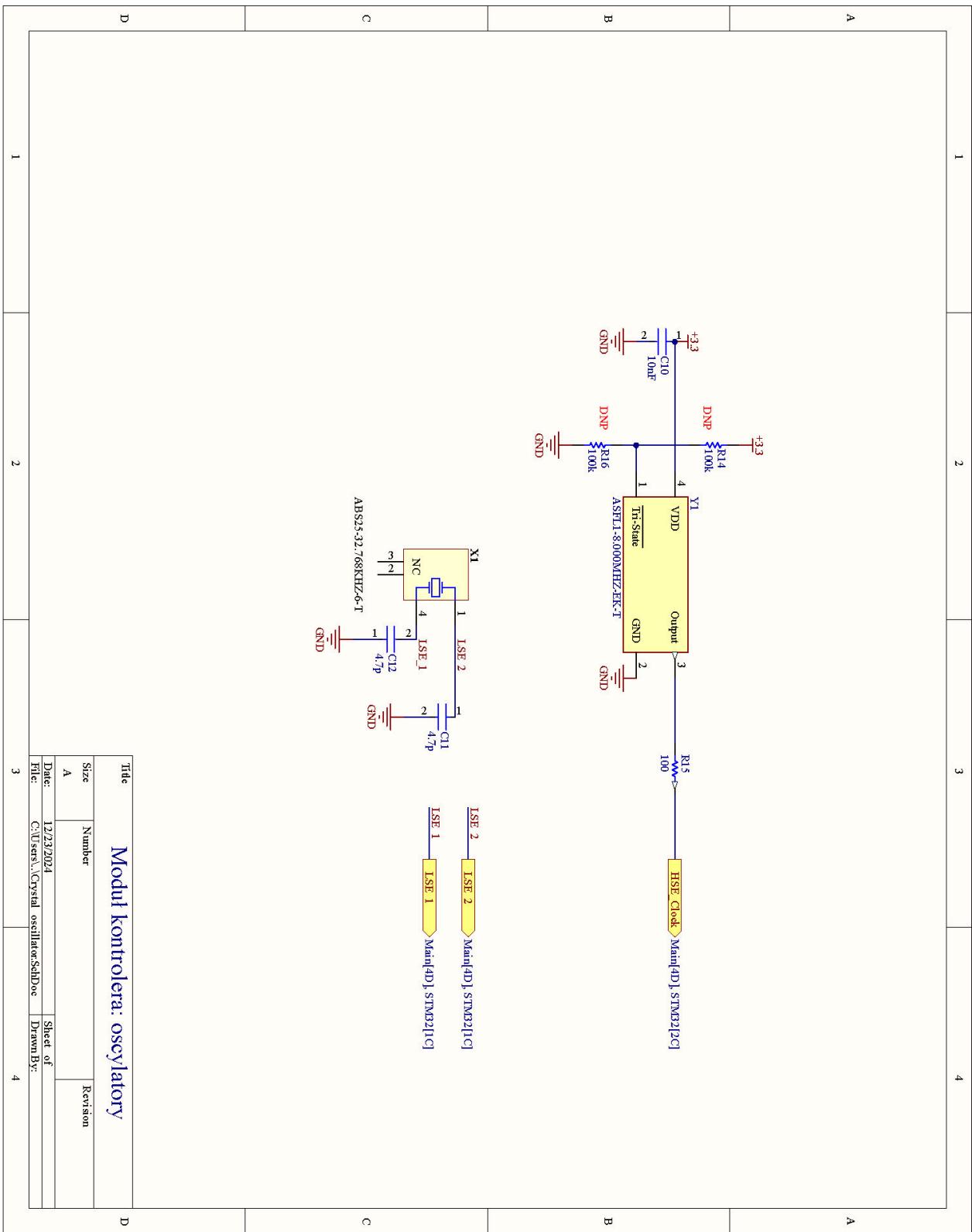
Rysunek A.3: Schemat układu termopary.



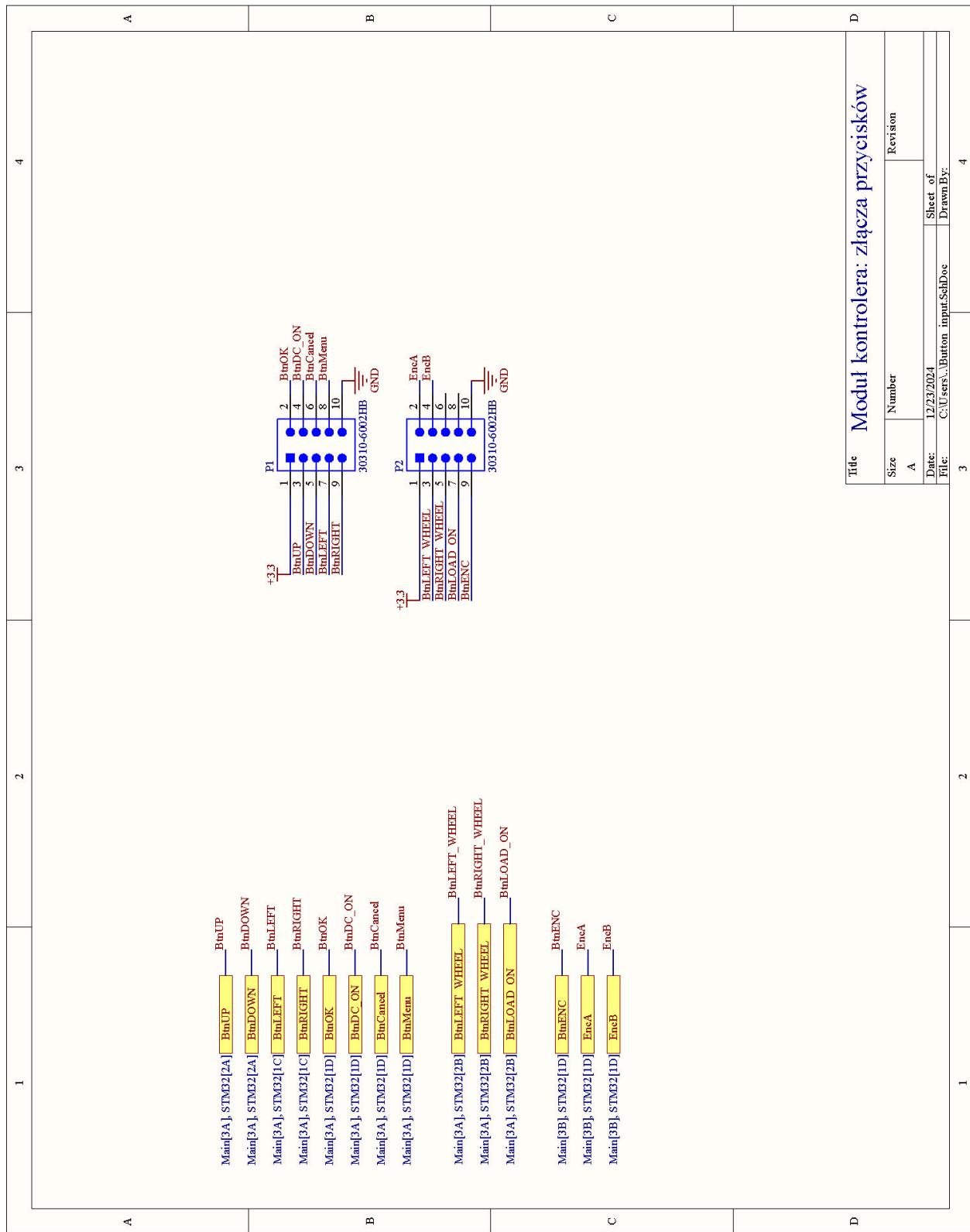
Rysunek A.4: Schemat kontrolera wentylatorów.



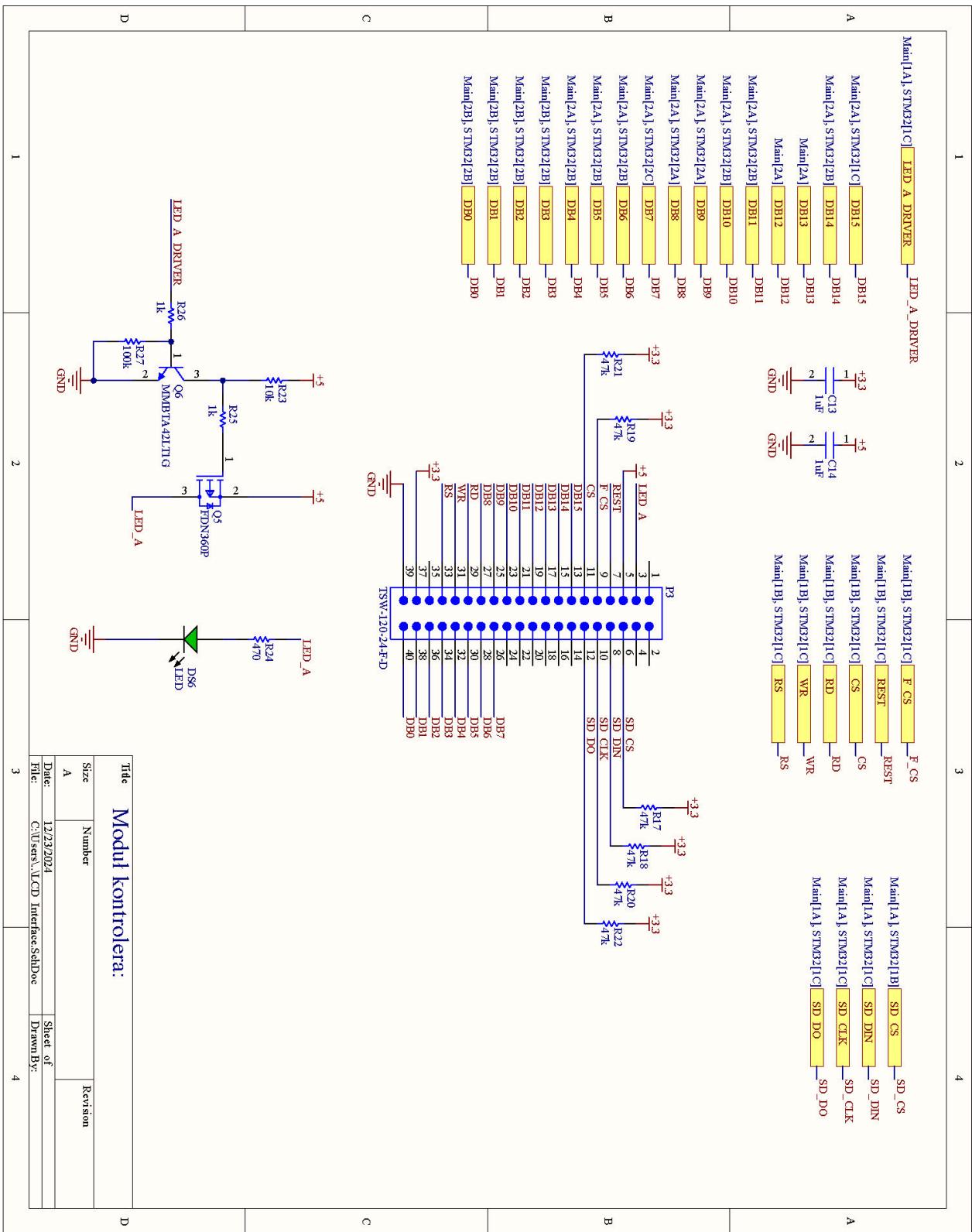
Rysunek A.5: Schemat sekcji zasilania.



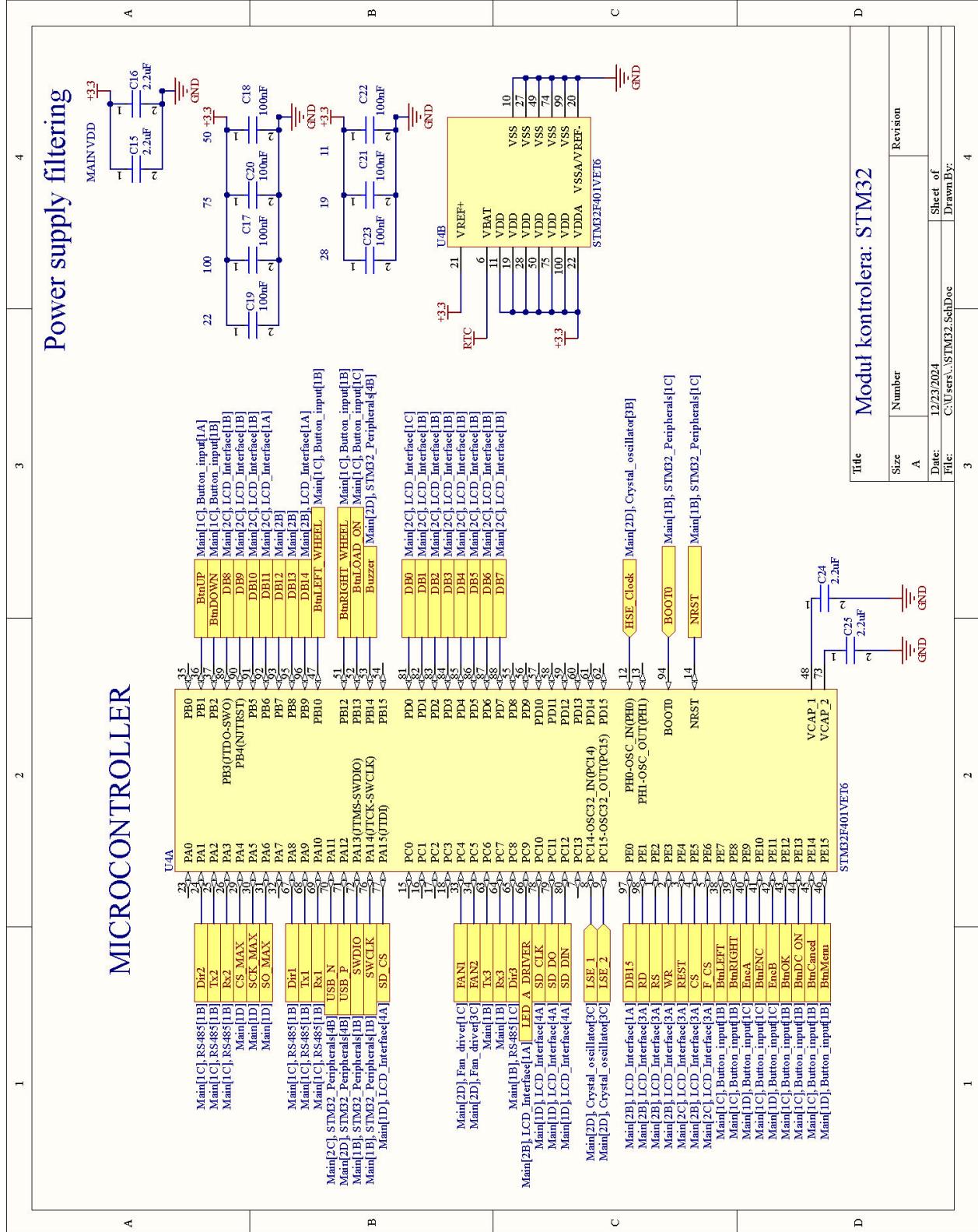
Rysunek A.6: Schemat układów oscylatorów.



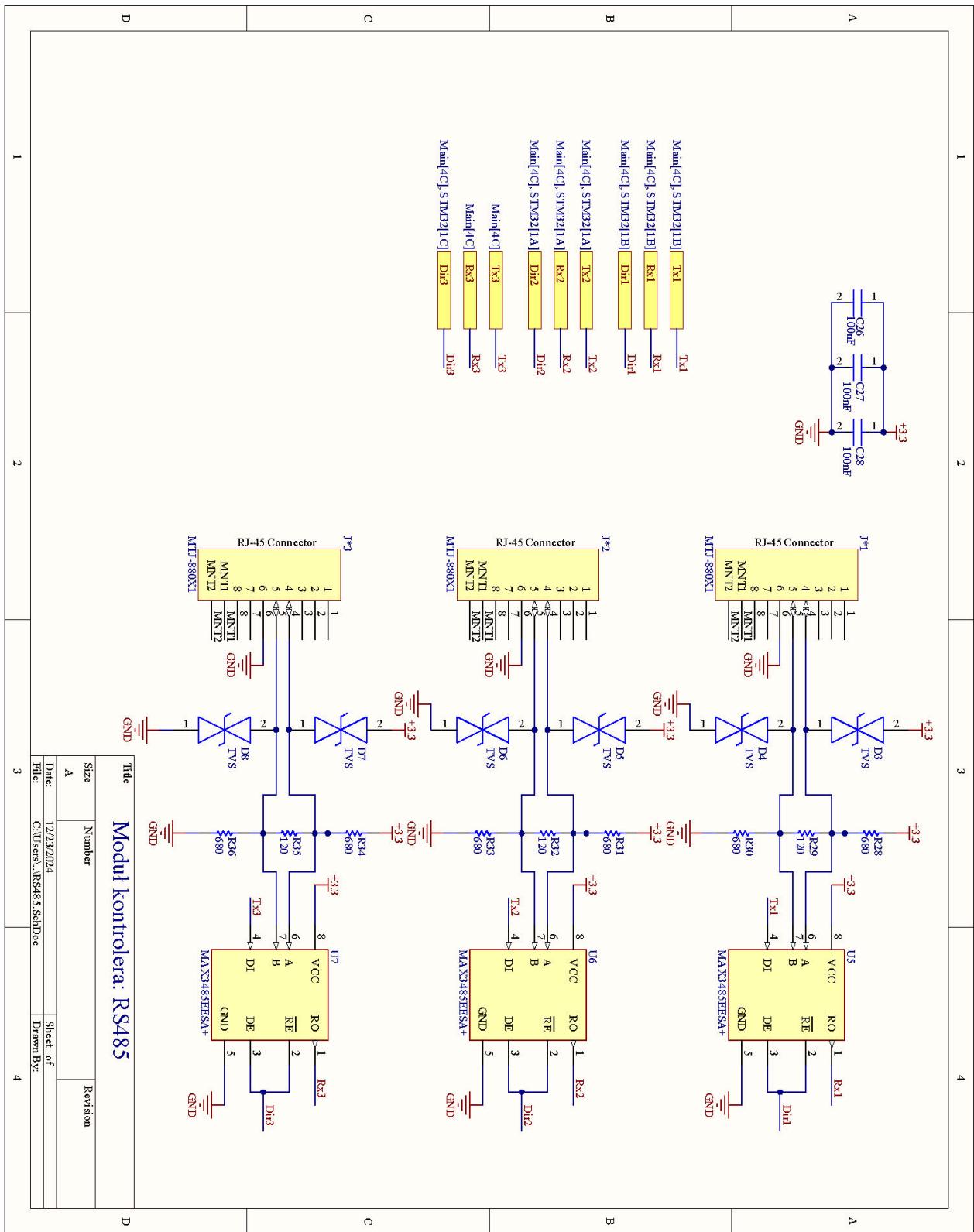
Rysunek A.7: Schemat wyprowadzeń przycisków.



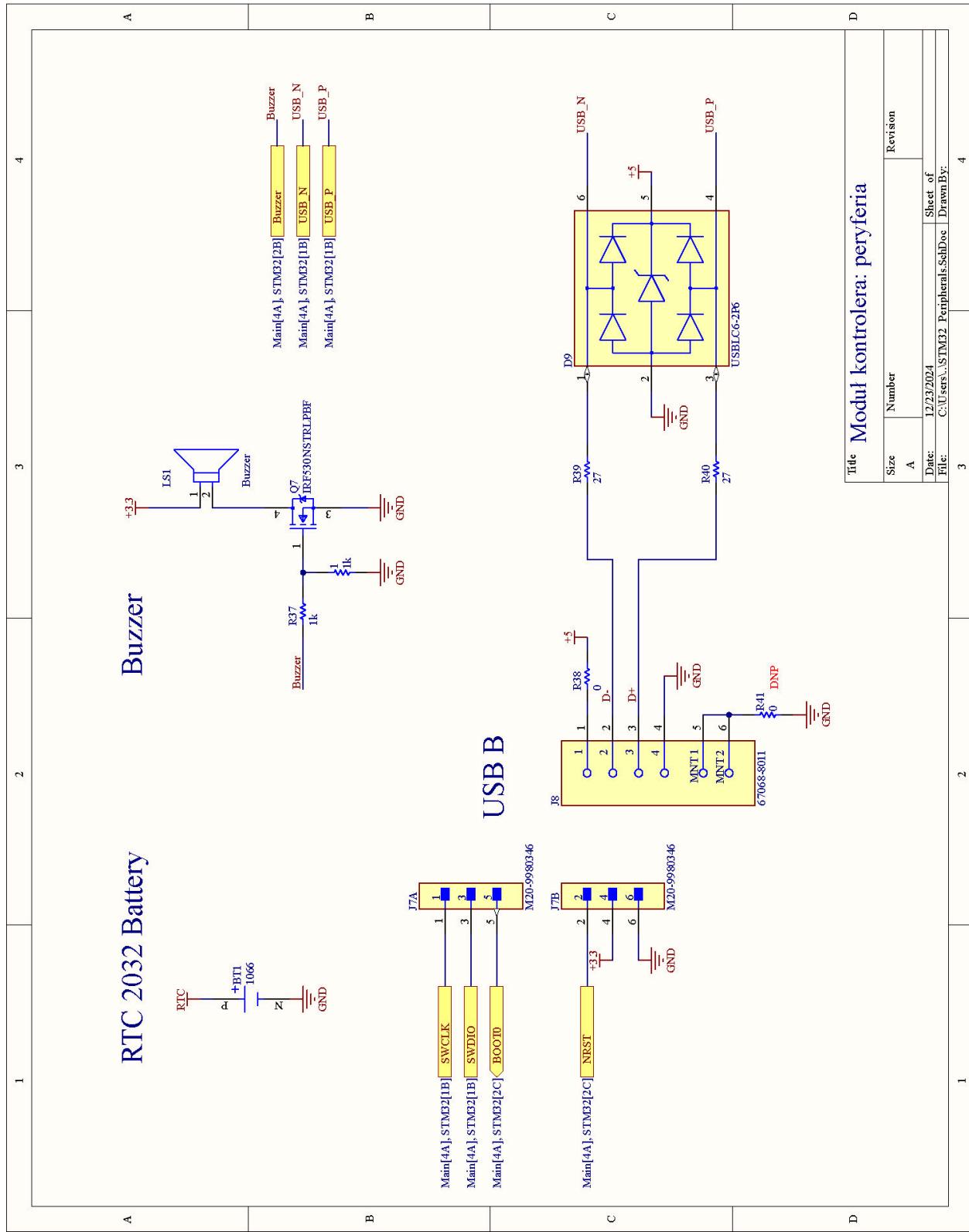
Rysunek A.8: Schemat wyrowadzania LCD.



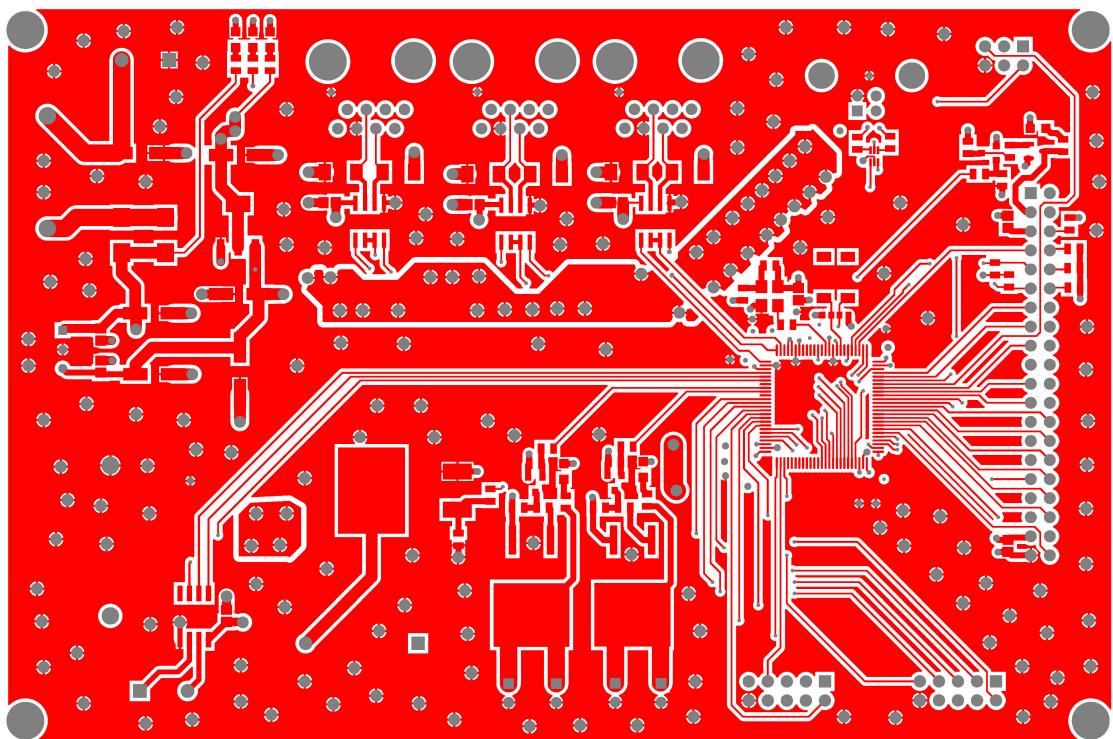
Rysunek A.9: Schemat mikrokontrolera STM32.



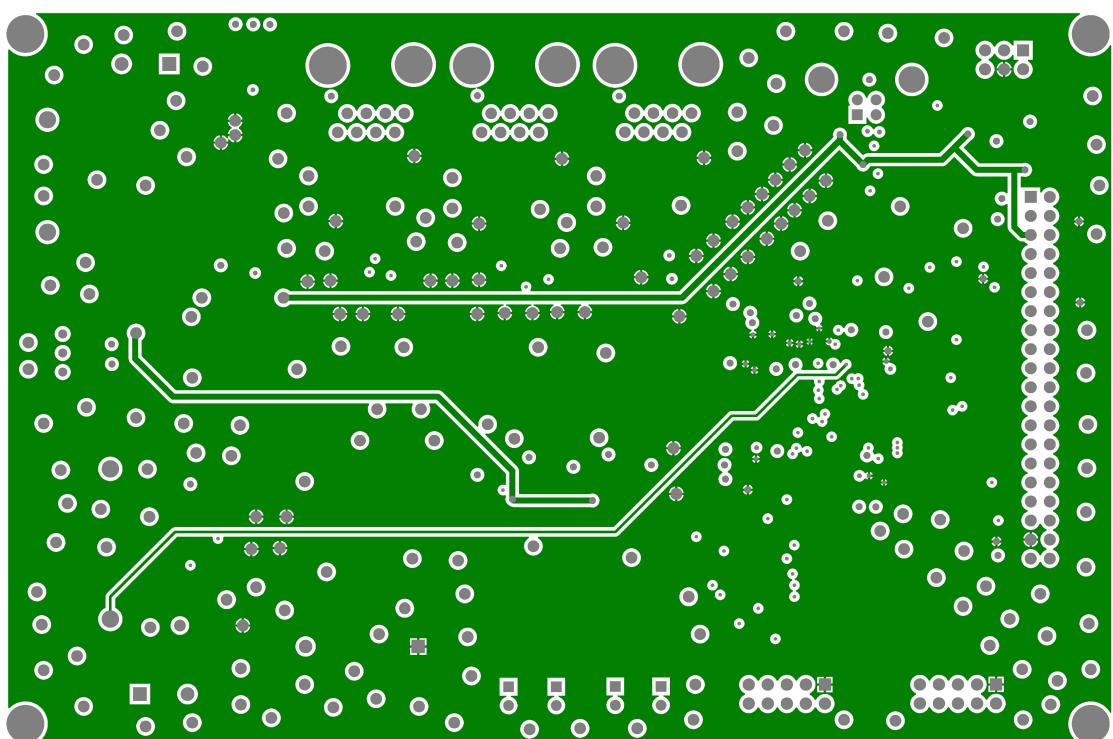
Rysunek A.10: Schemat RS485.



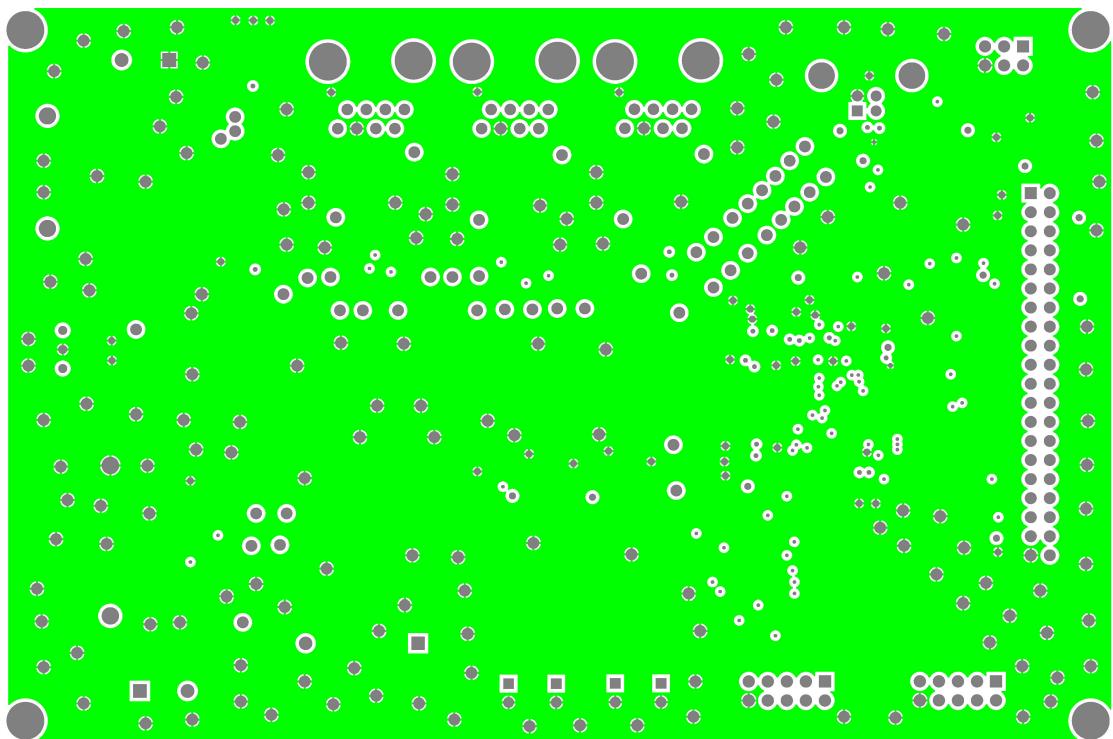
Rysunek A.11: Schemat układów peryferyjnych.



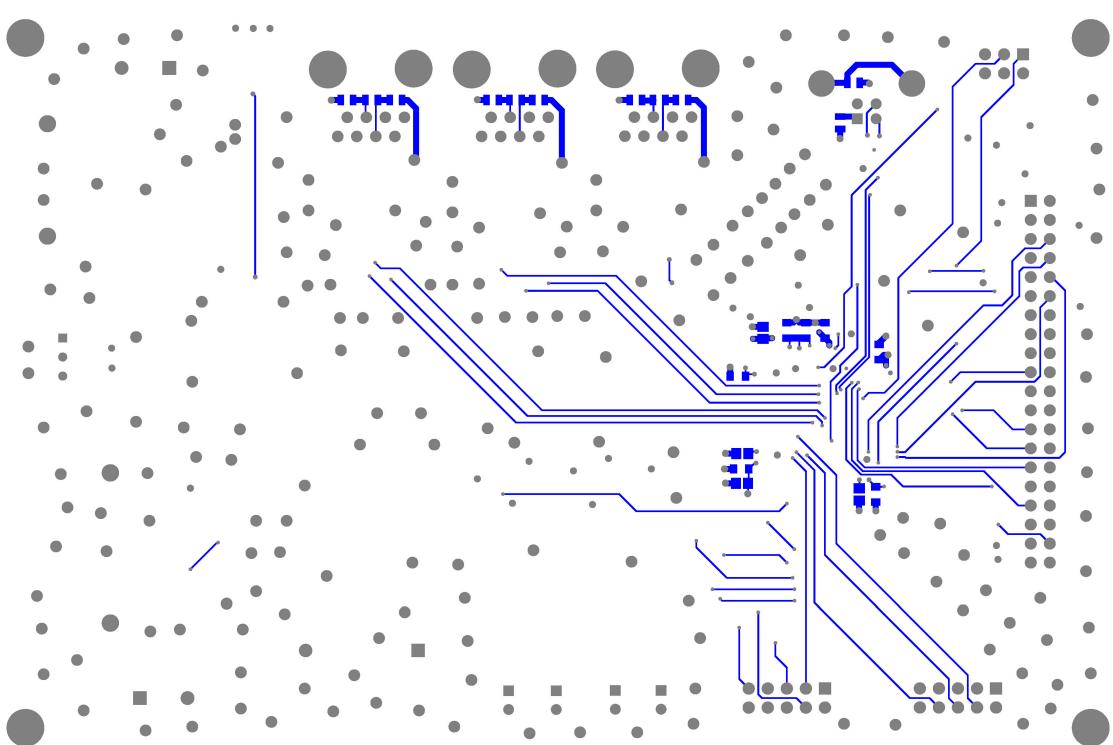
Rysunek A.12: Warstwa górska PCB.



Rysunek A.13: Warstwa wewnętrzna 1 PCB.



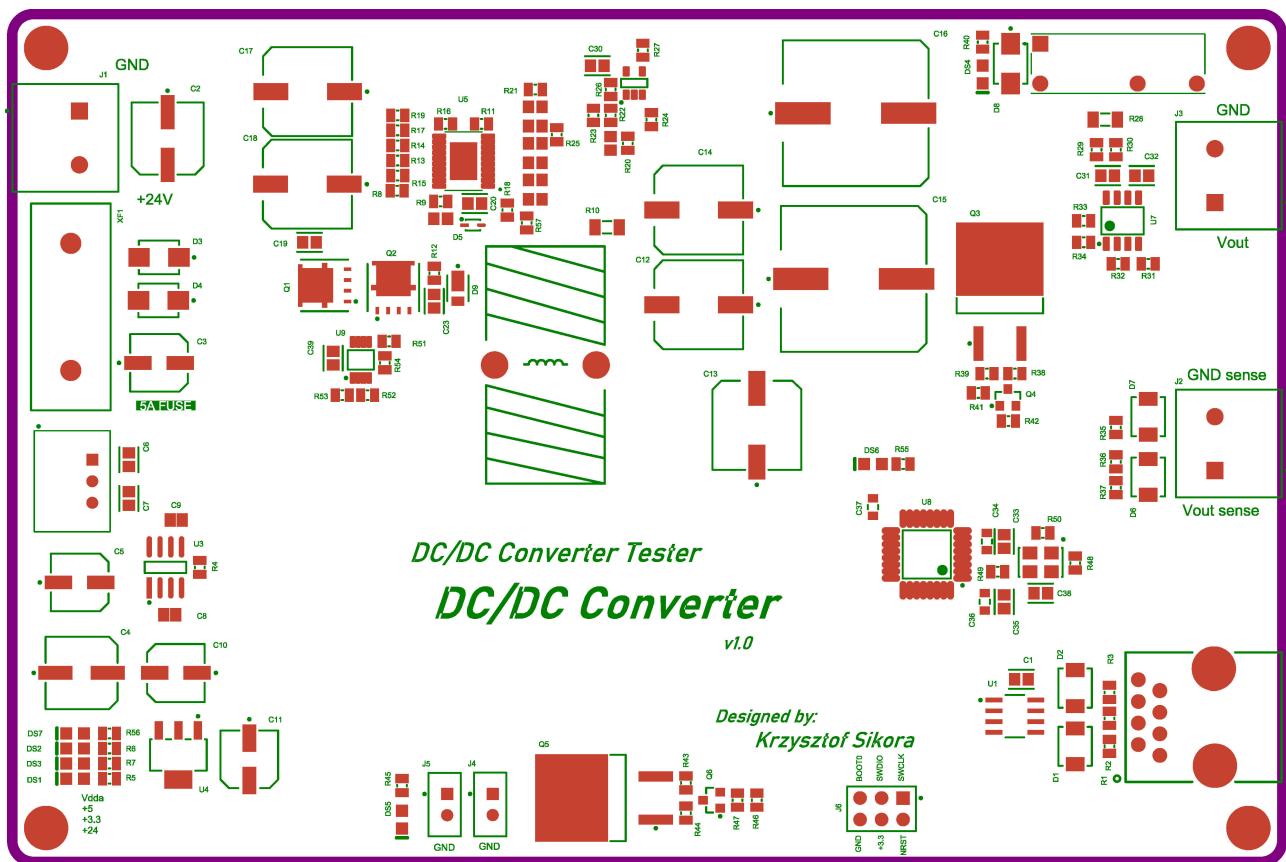
Rysunek A.14: Warstwa wewnętrzna 2 PCB.



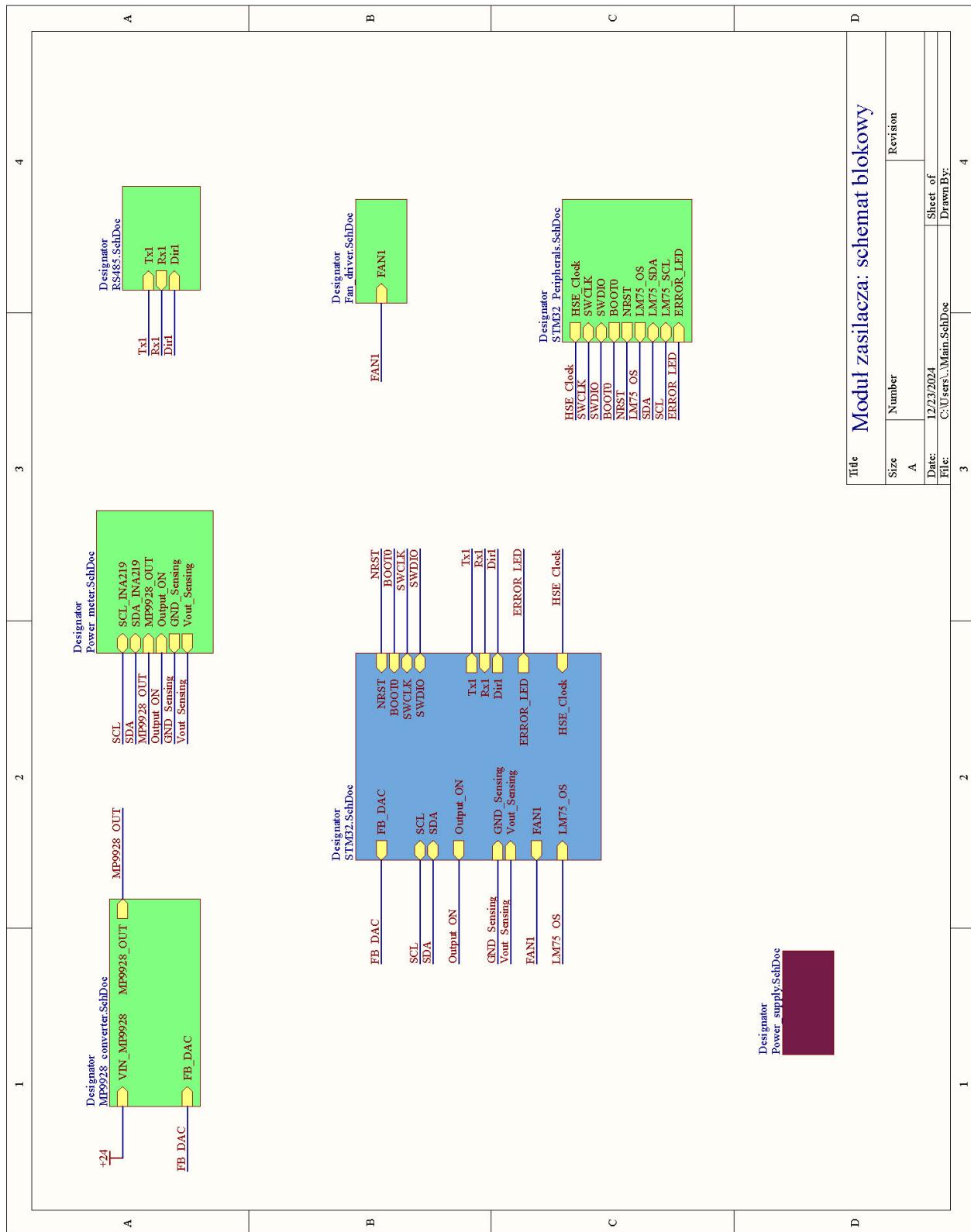
Rysunek A.15: Warstwa dolna PCB.

Dodatek B

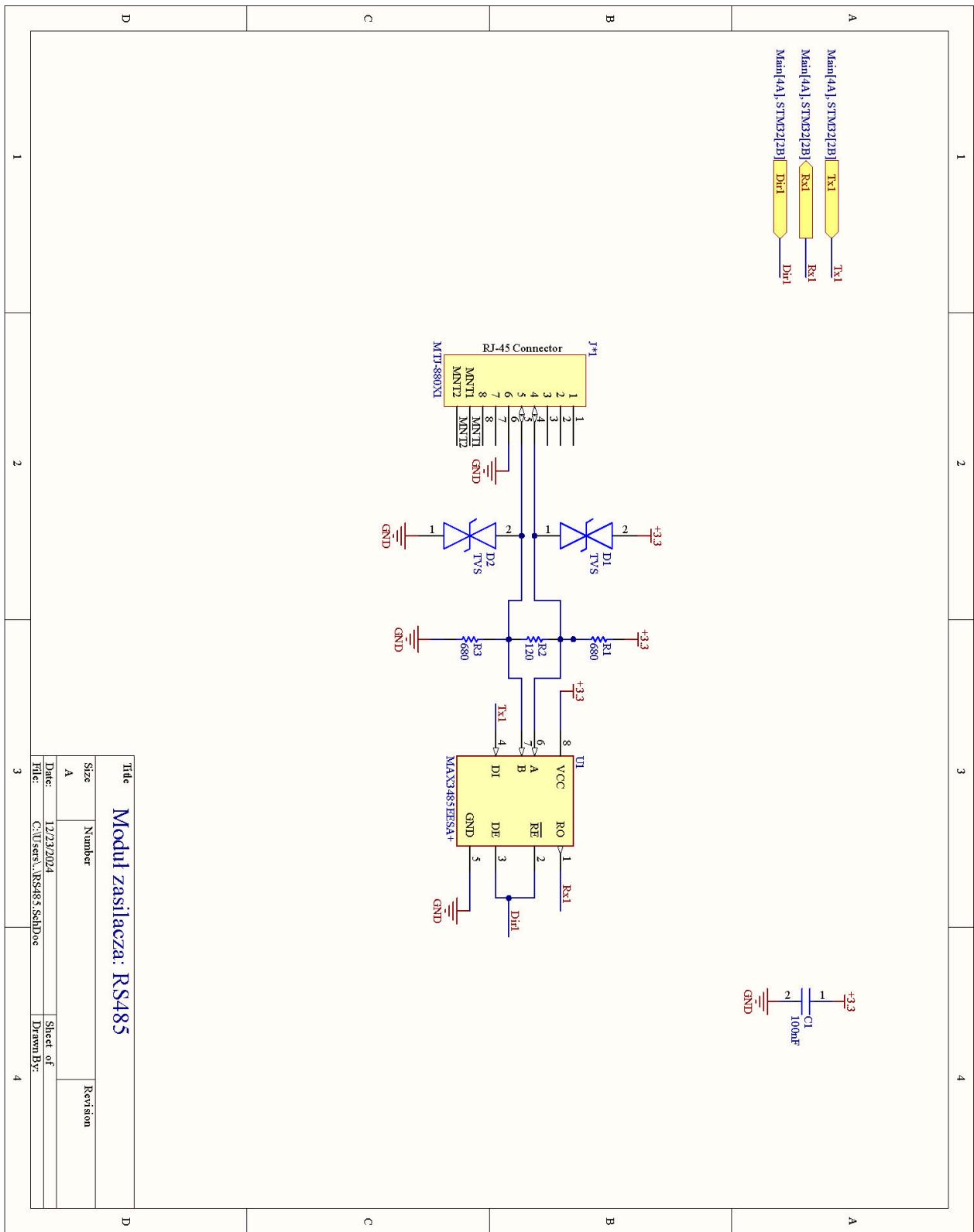
Moduł zasilacza regulowanego



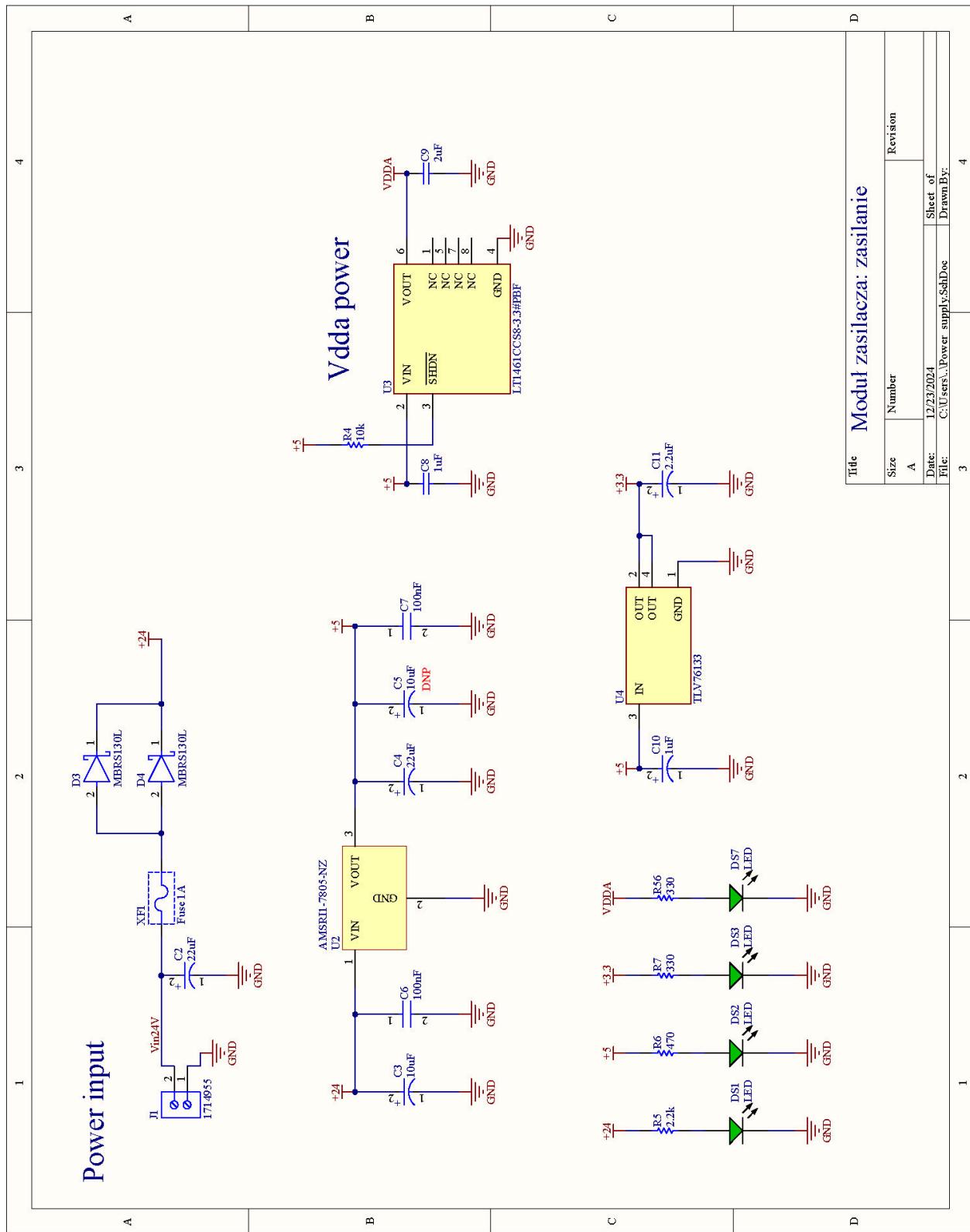
Rysunek B.1: Widok warstwy opisowej PCB.



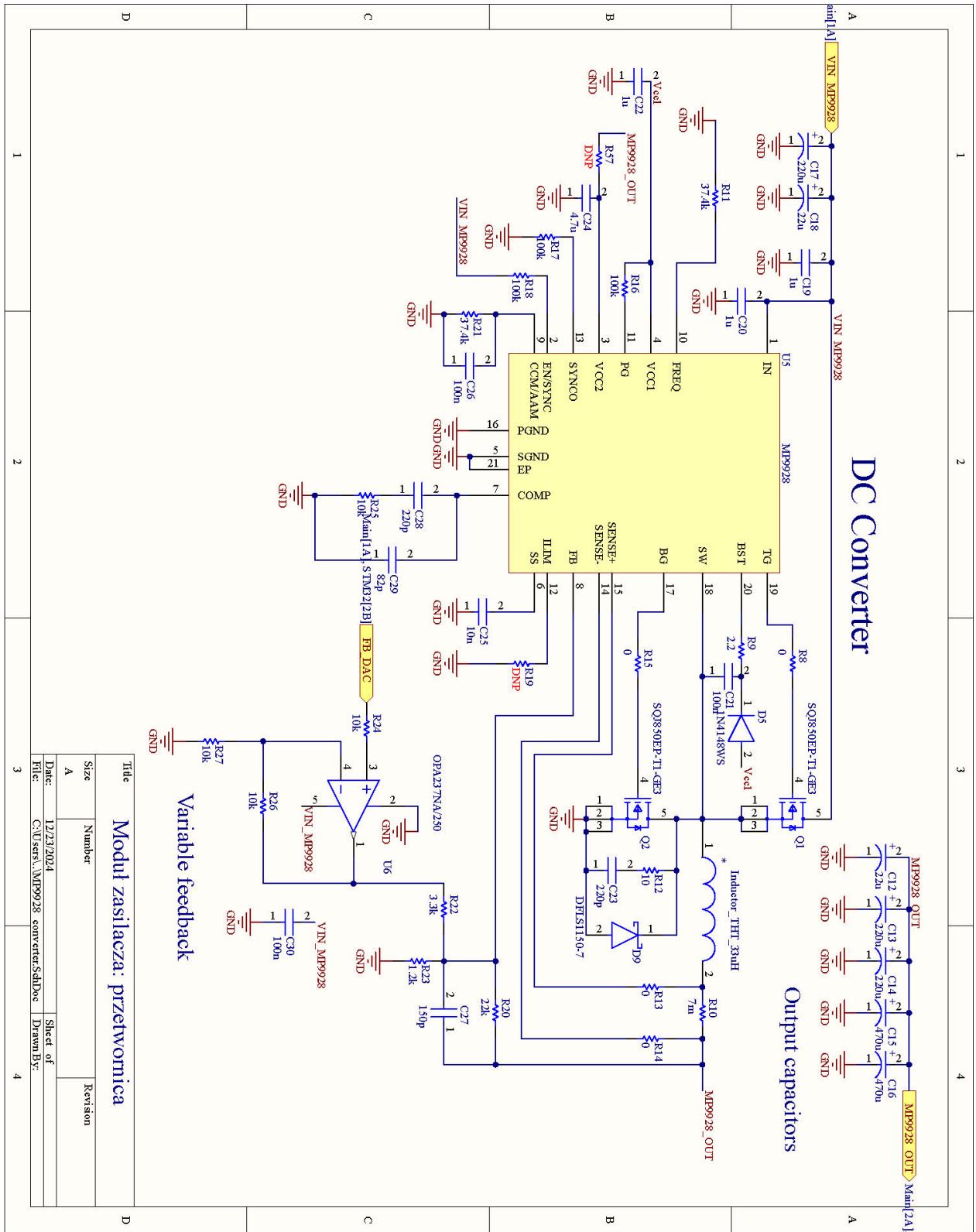
Rysunek B.2: Schemat blokowy modułu zasilacza.



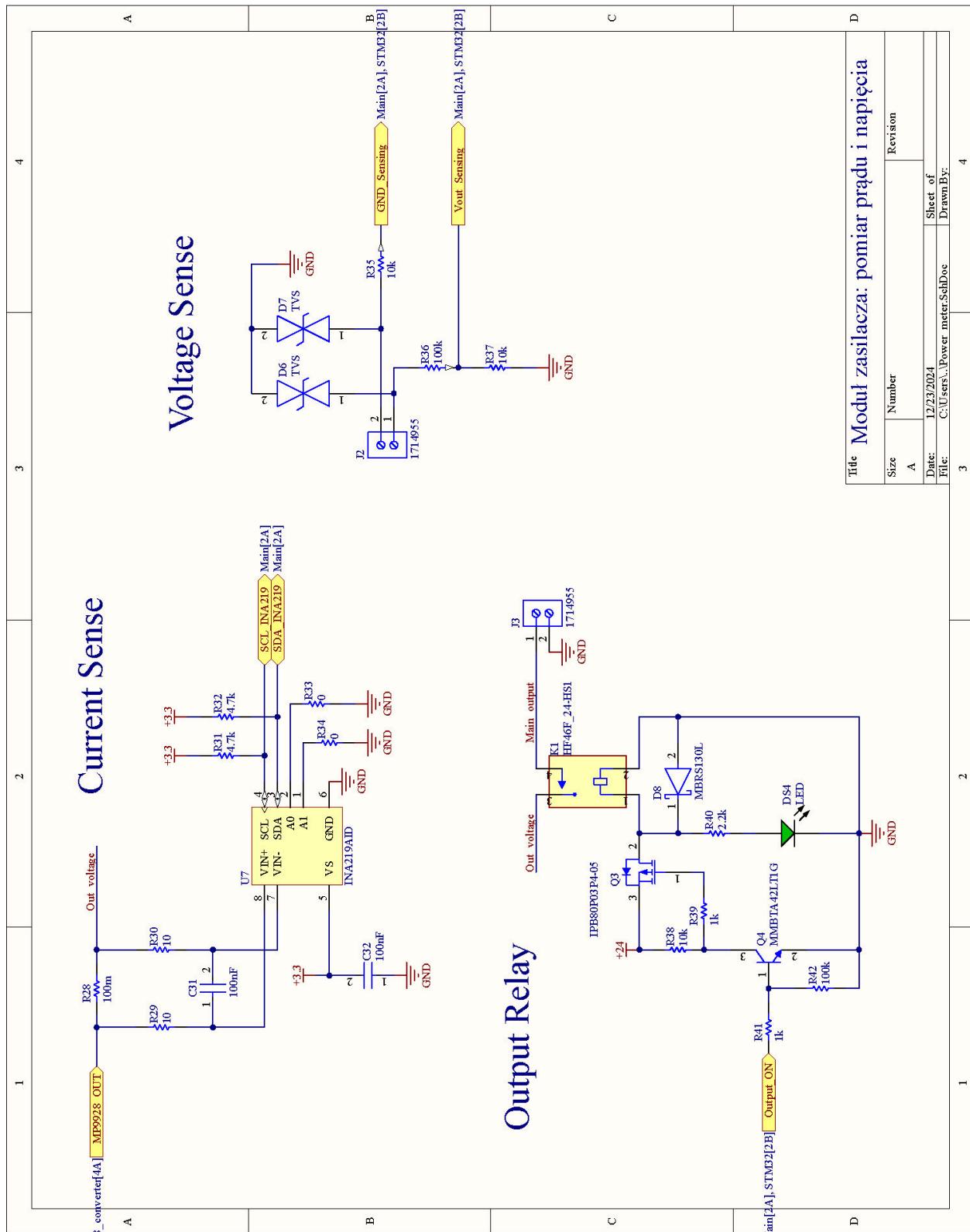
Rysunek B.3: Schemat RS485.



Rysunek B.4: Schemat sekcji zasilania.

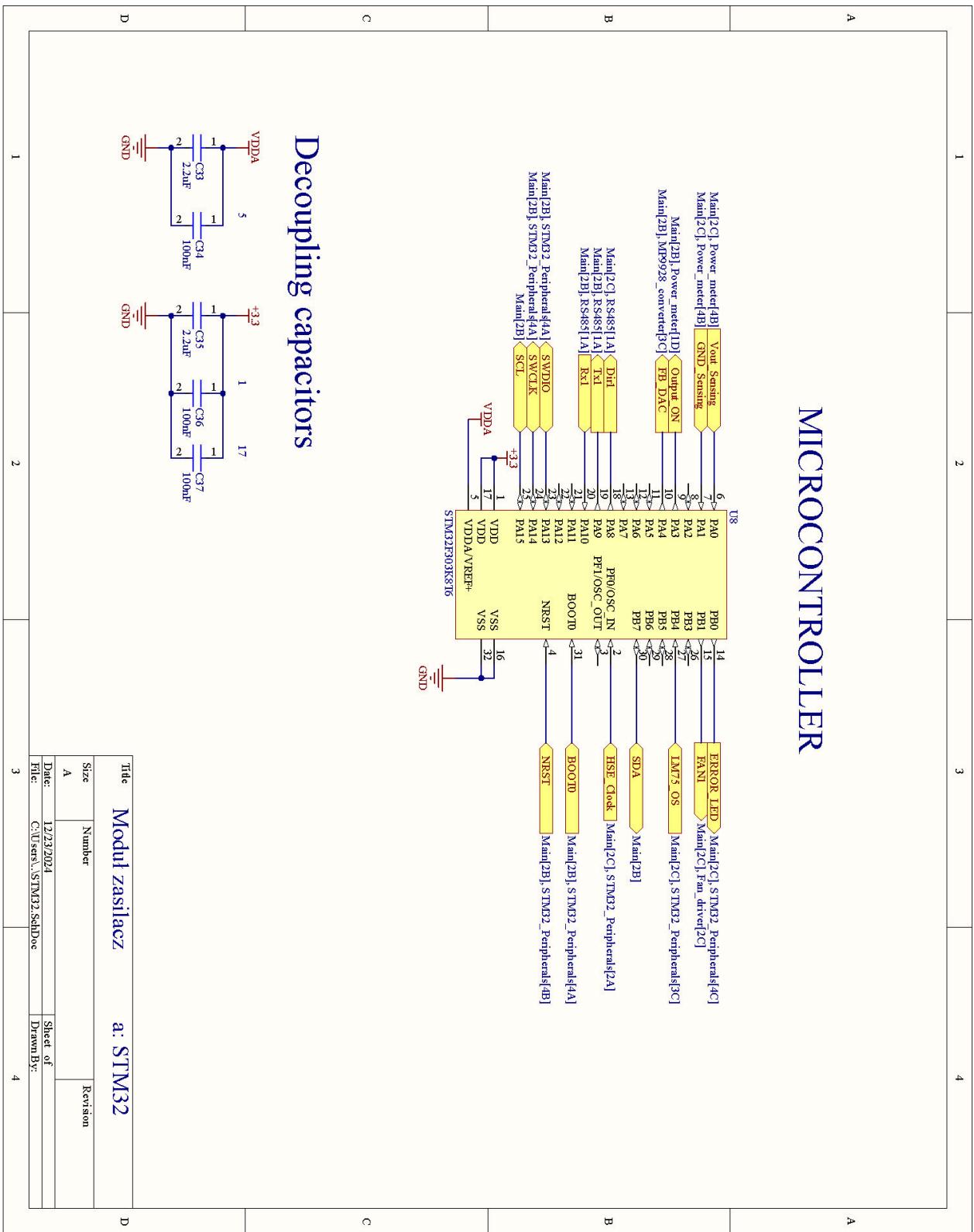


Rysunek B.5: Schemat przetwornicy MP9928.

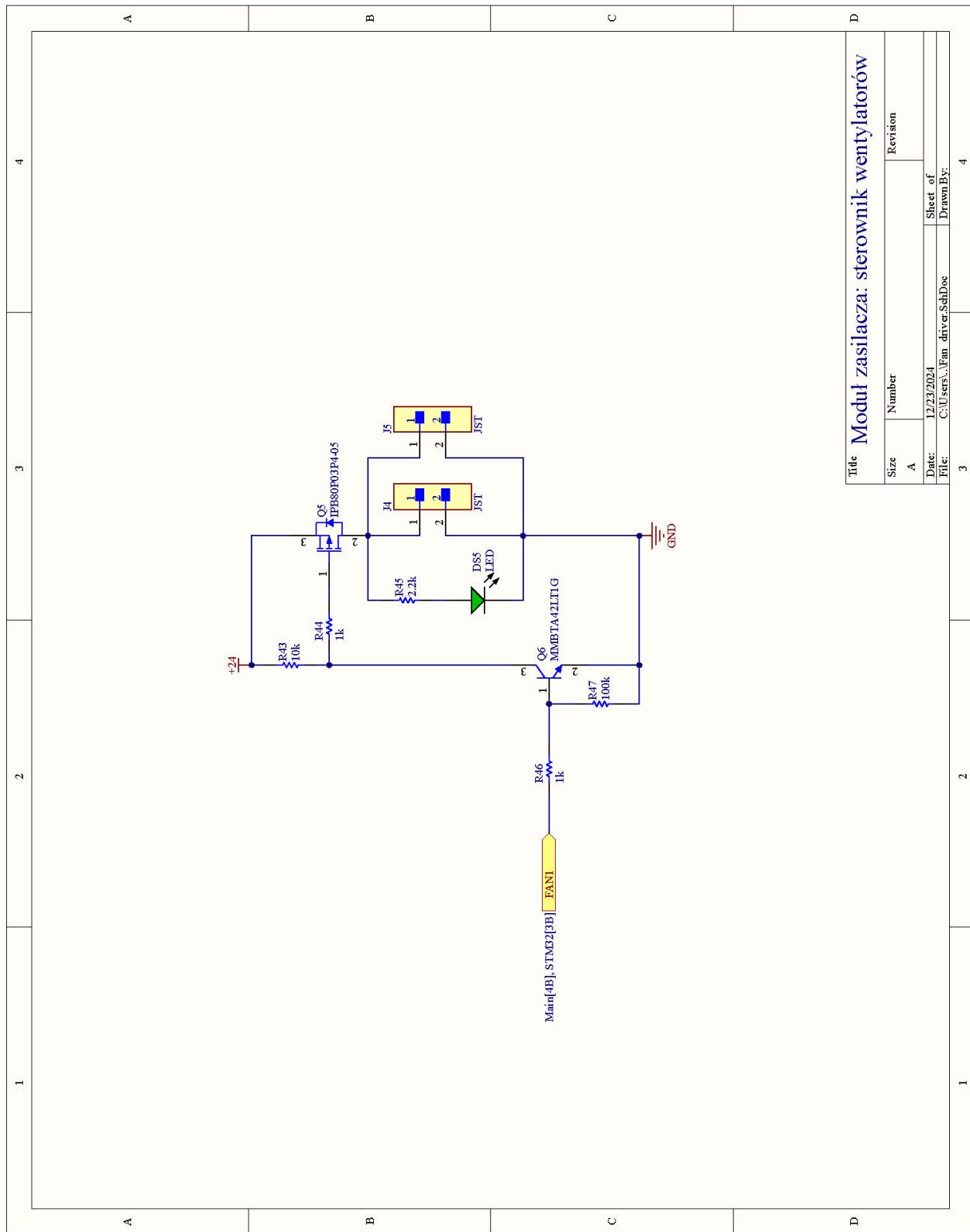


Rysunek B.6: Schemat układu pomiaru prądu.

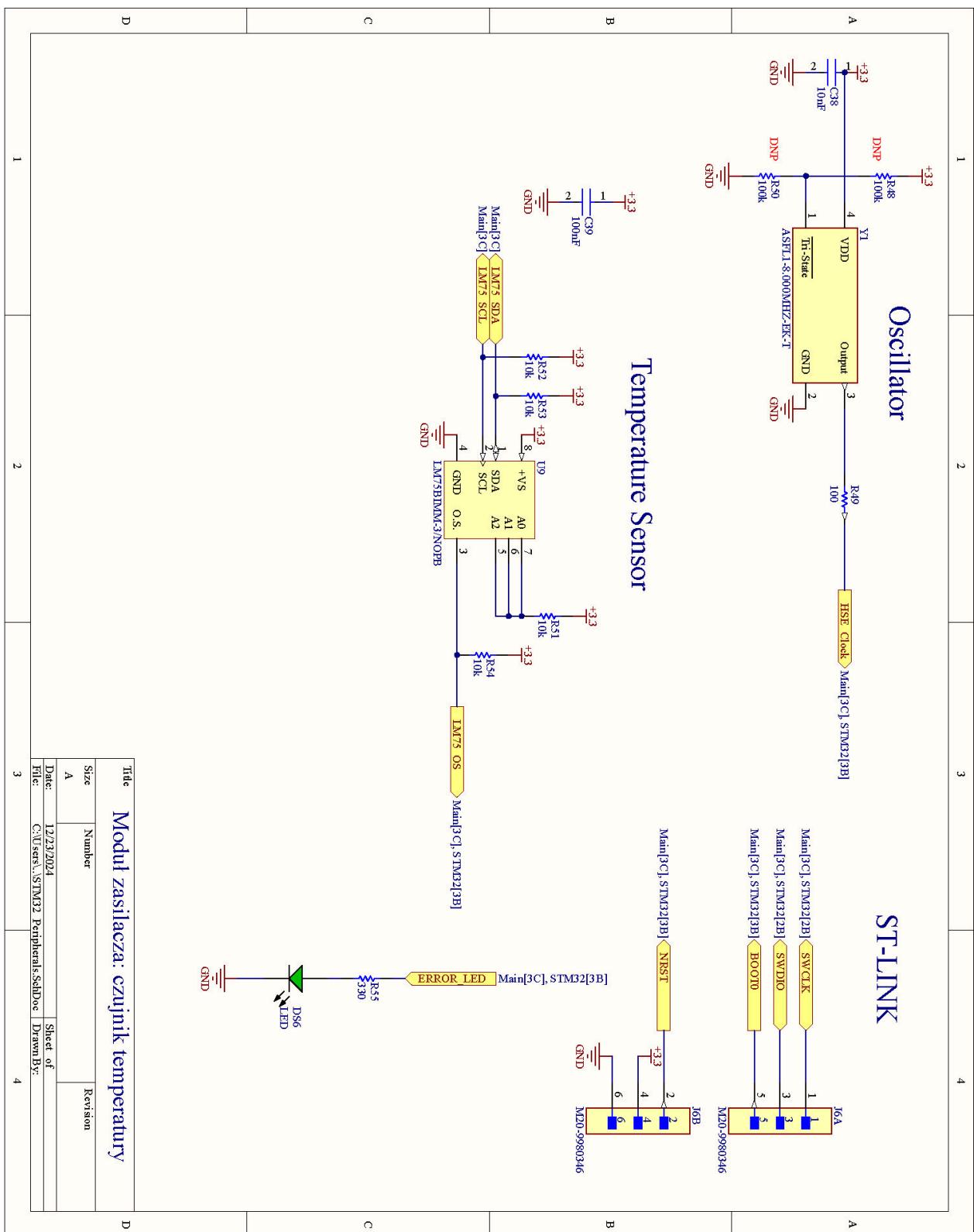
MICROCONTROLLER



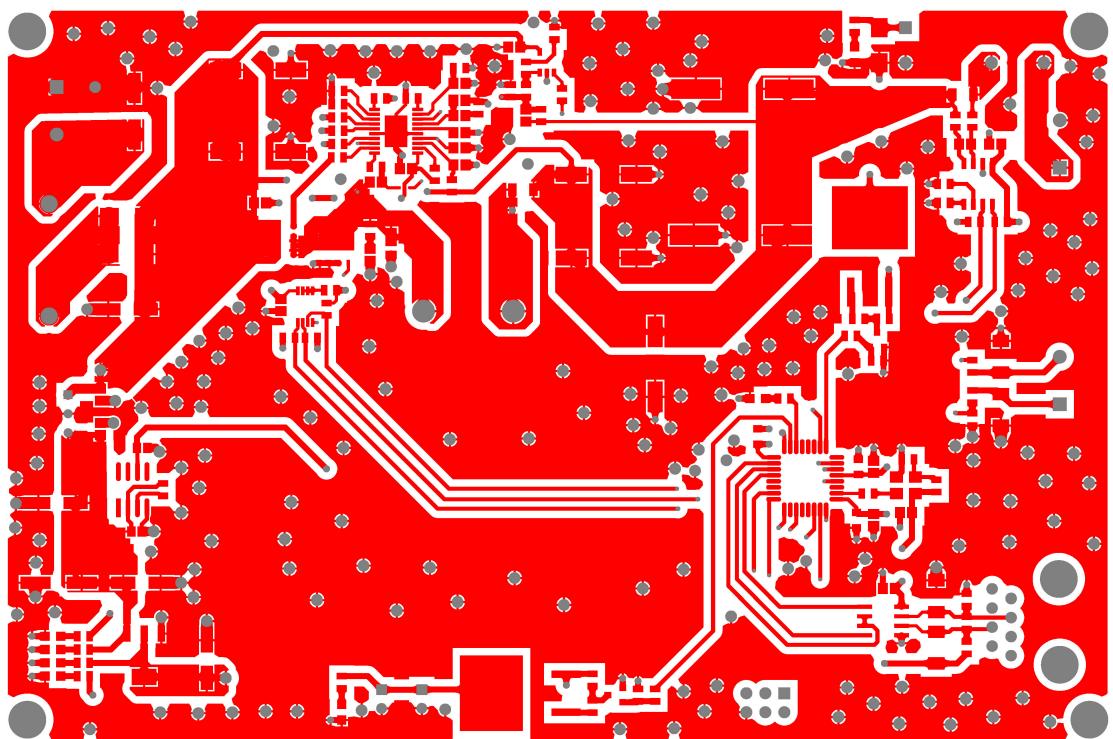
Rysunek B.7: Schemat mikrokontrolera STM32.



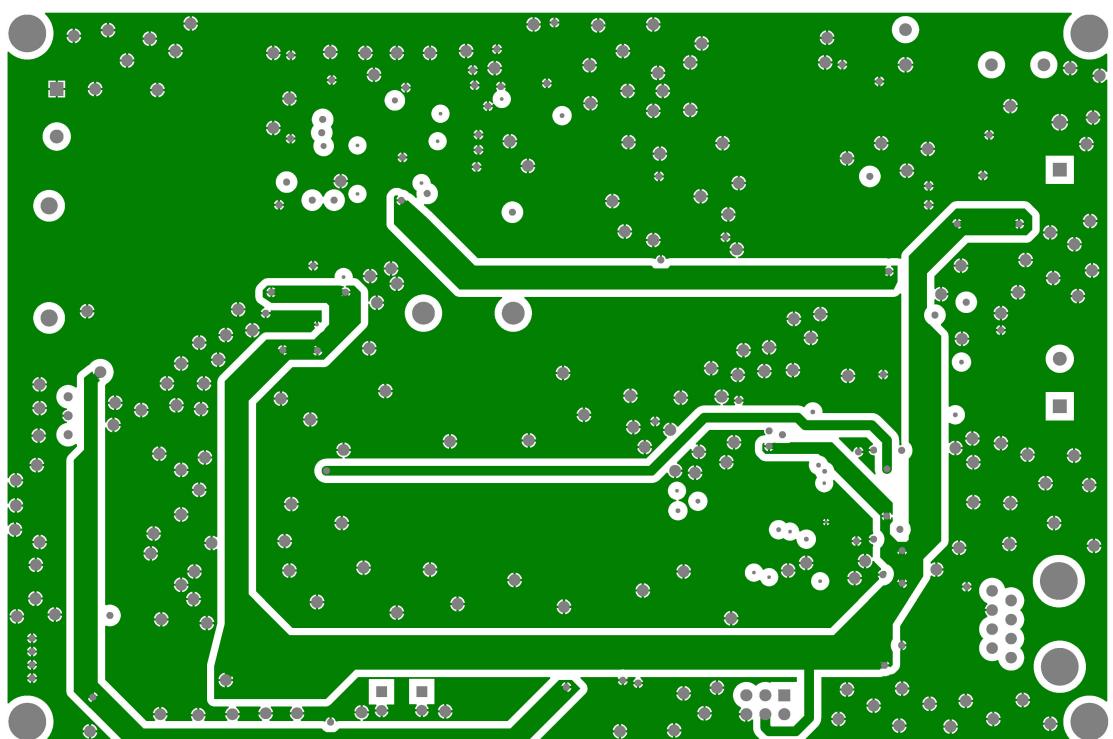
Rysunek B.8: Schemat sterownika wentylatorów.



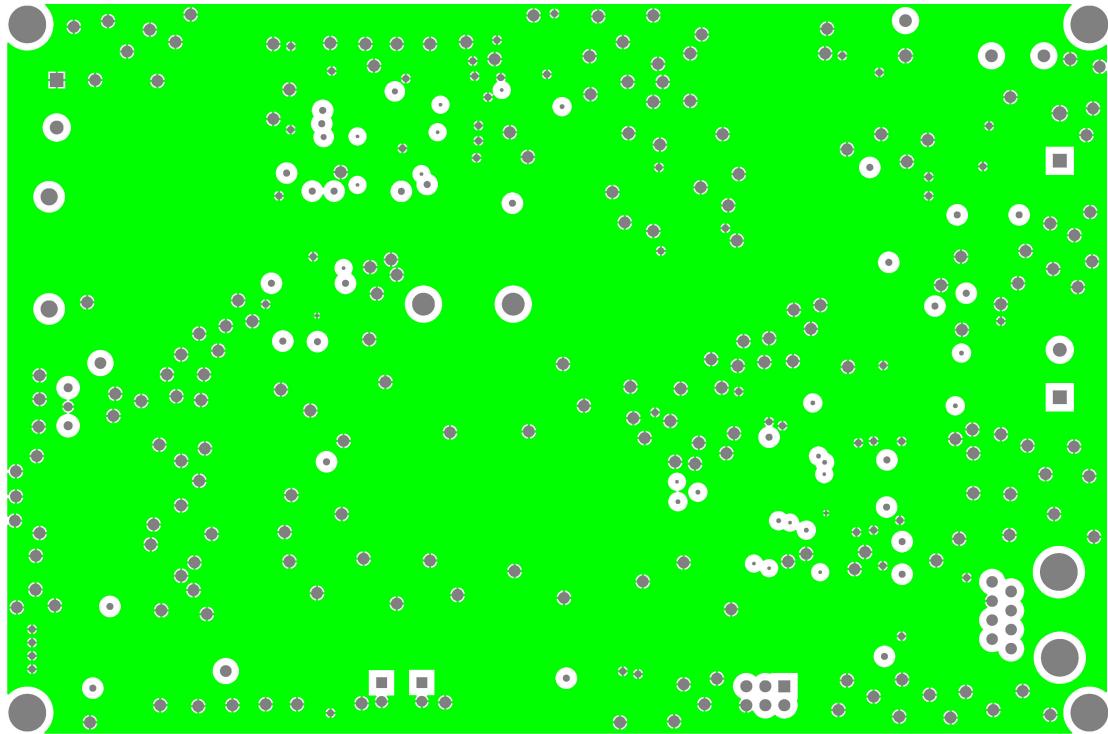
Rysunek B.9: Schemat układów peryferyjnych.



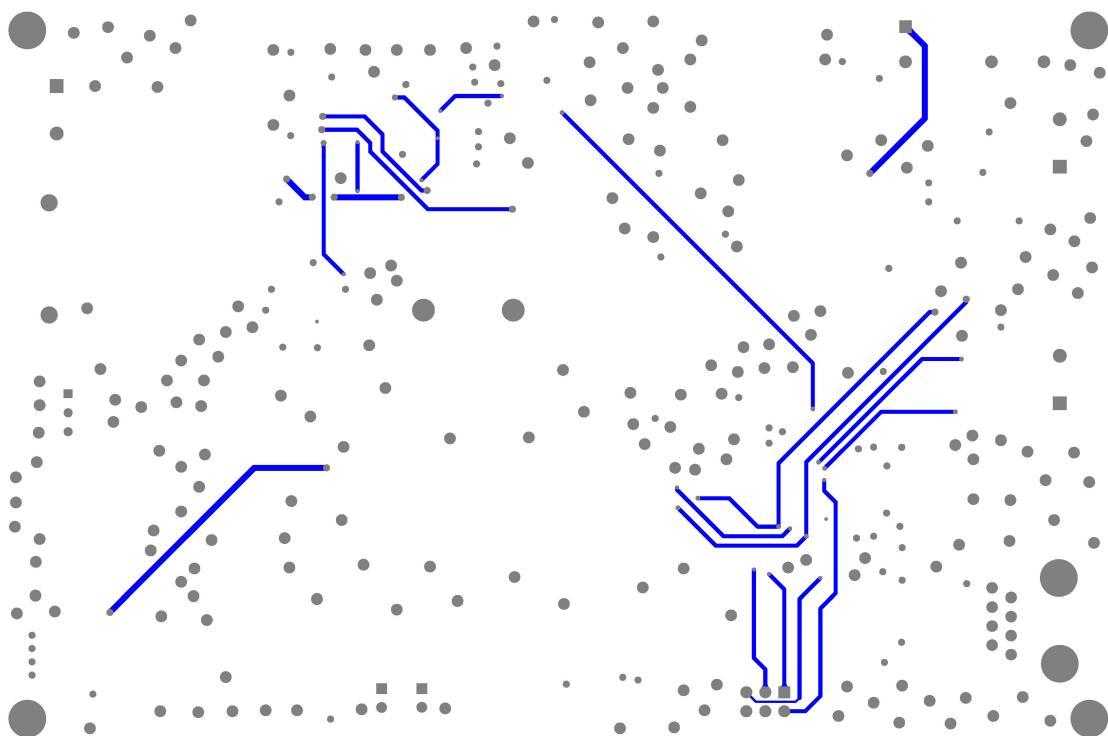
Rysunek B.10: Warstwa górna PCB.



Rysunek B.11: Warstwa wewnętrzna 2 PCB.



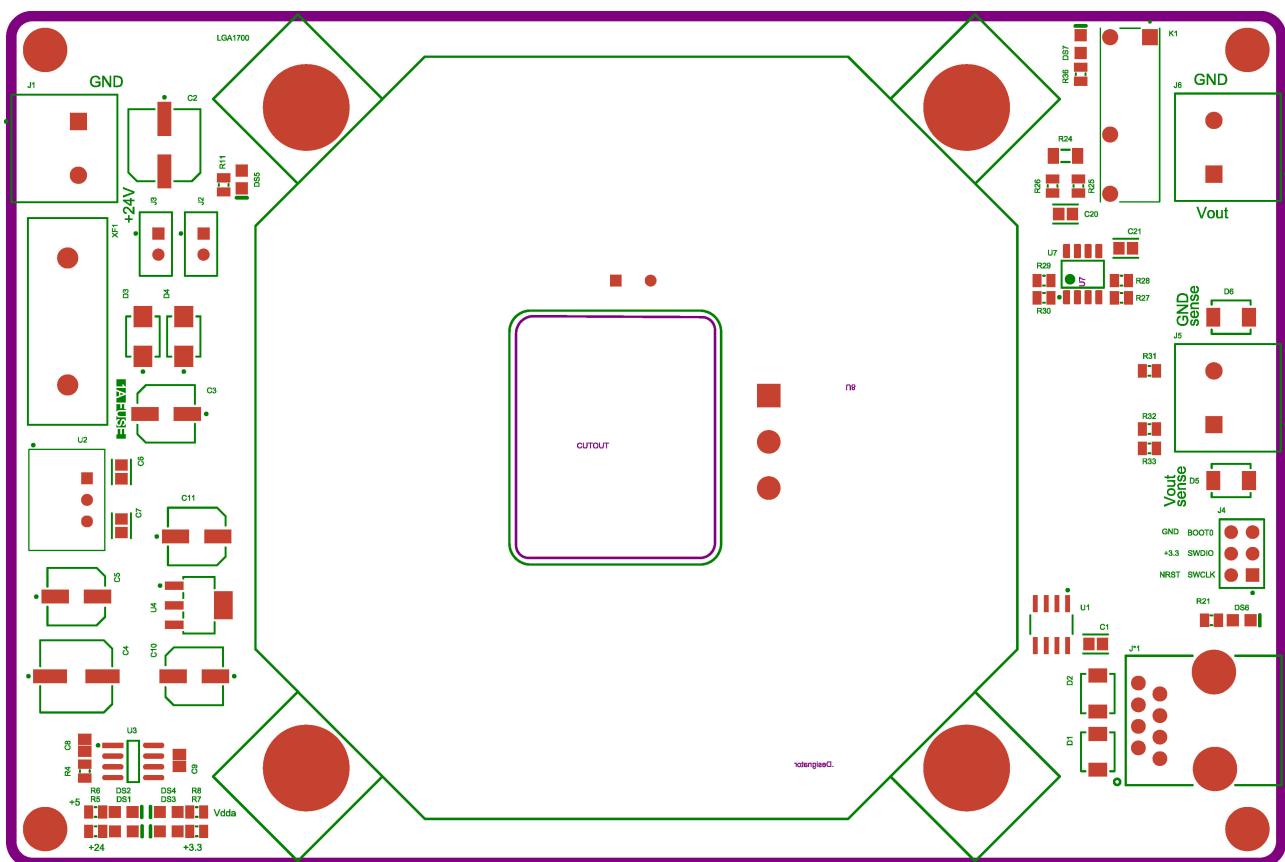
Rysunek B.12: Warstwa wewnętrzna 2 PCB.



Rysunek B.13: Warstwa dolna PCB.

Dodatek C

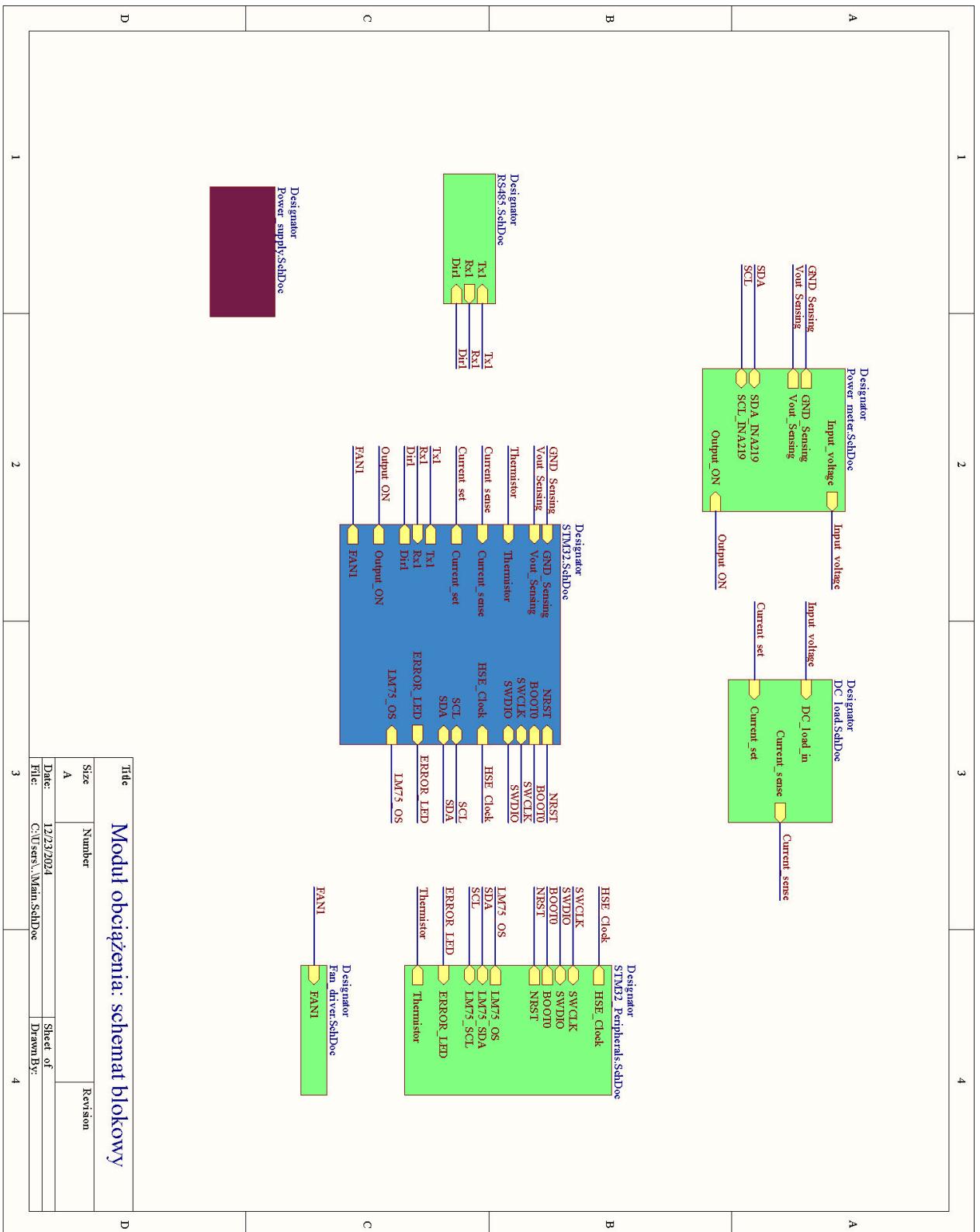
Moduł obciążenia aktywnego



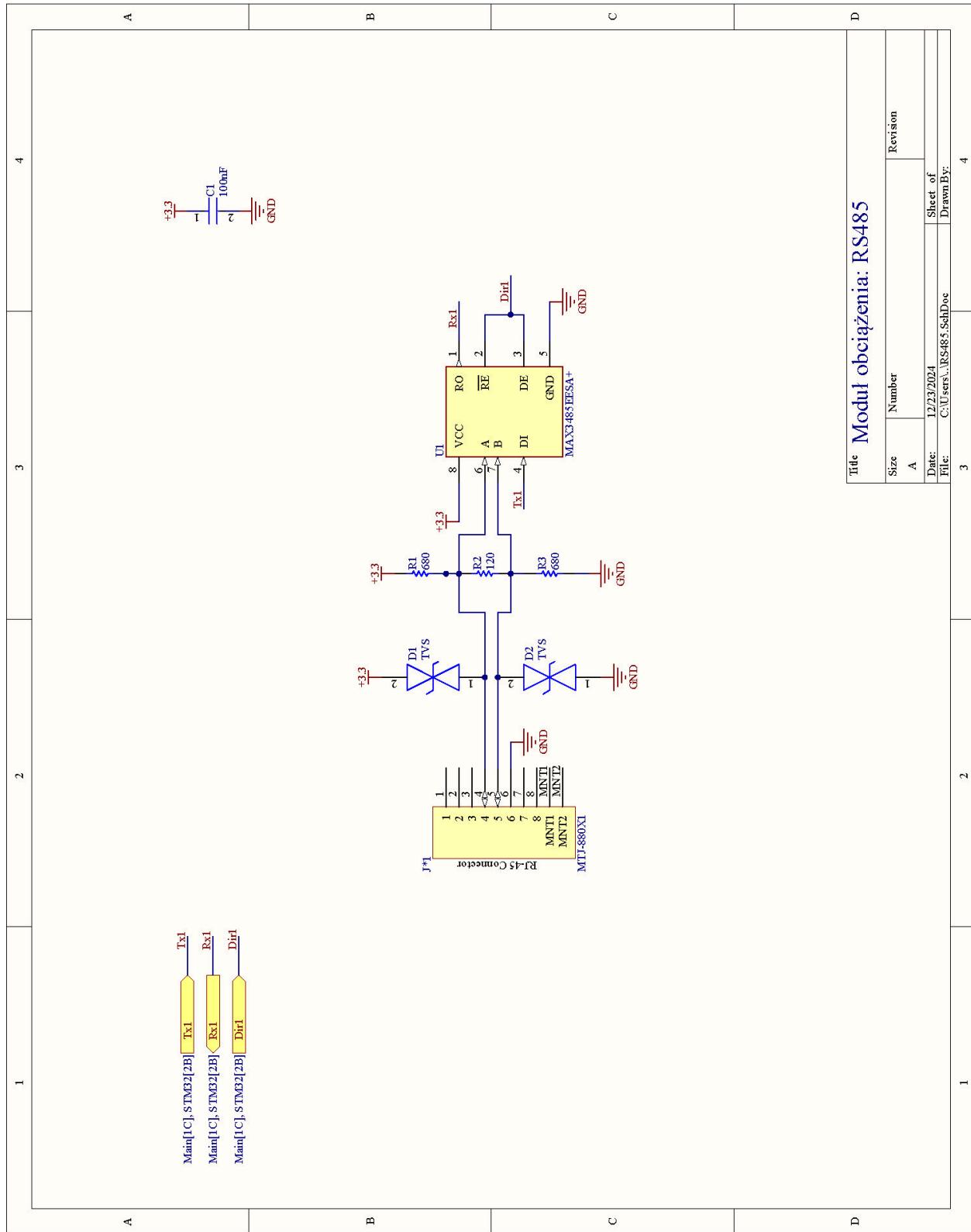
Rysunek C.1: Widok warstwy opisowej PCB.

Dodatek D

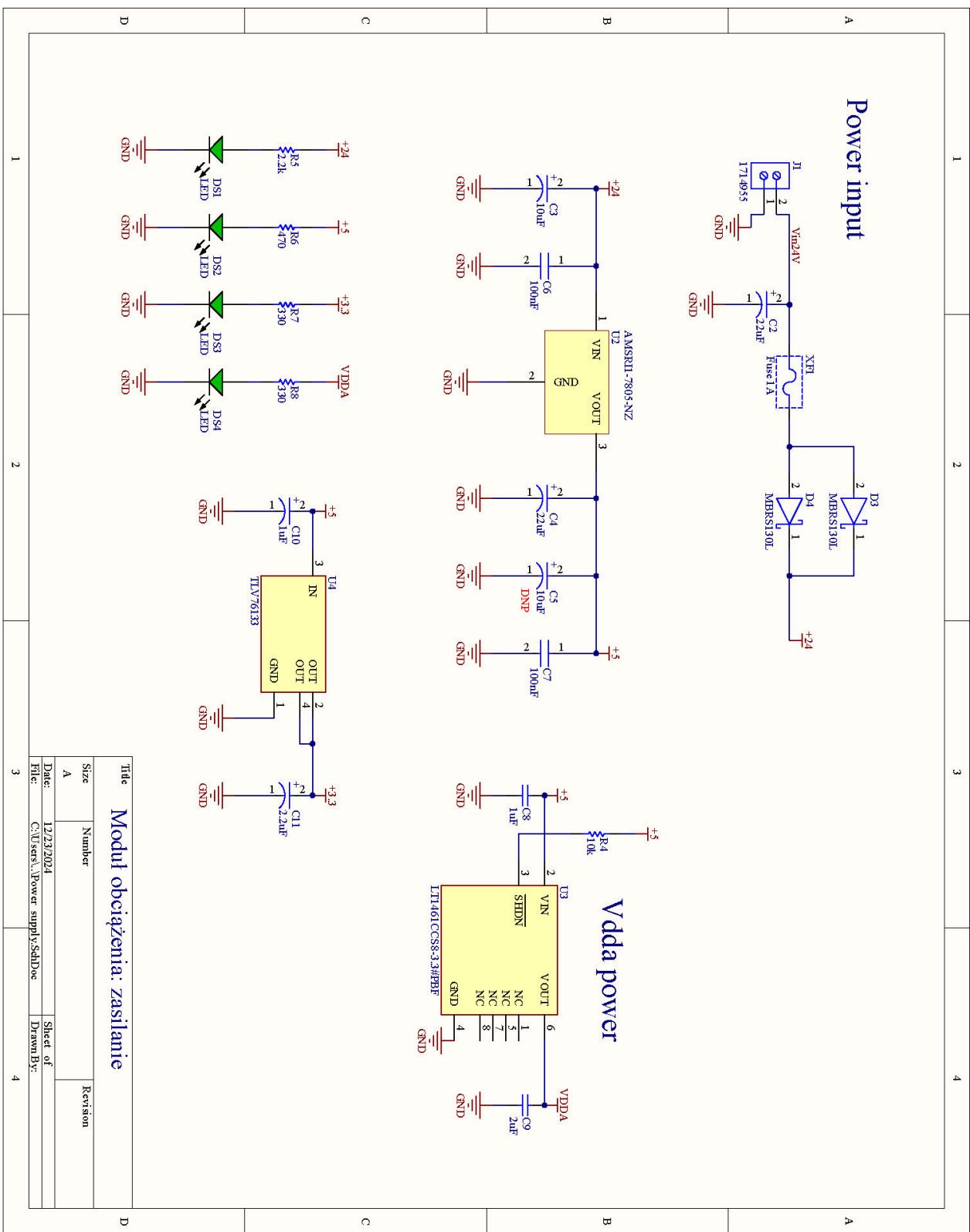
Panele przycisków



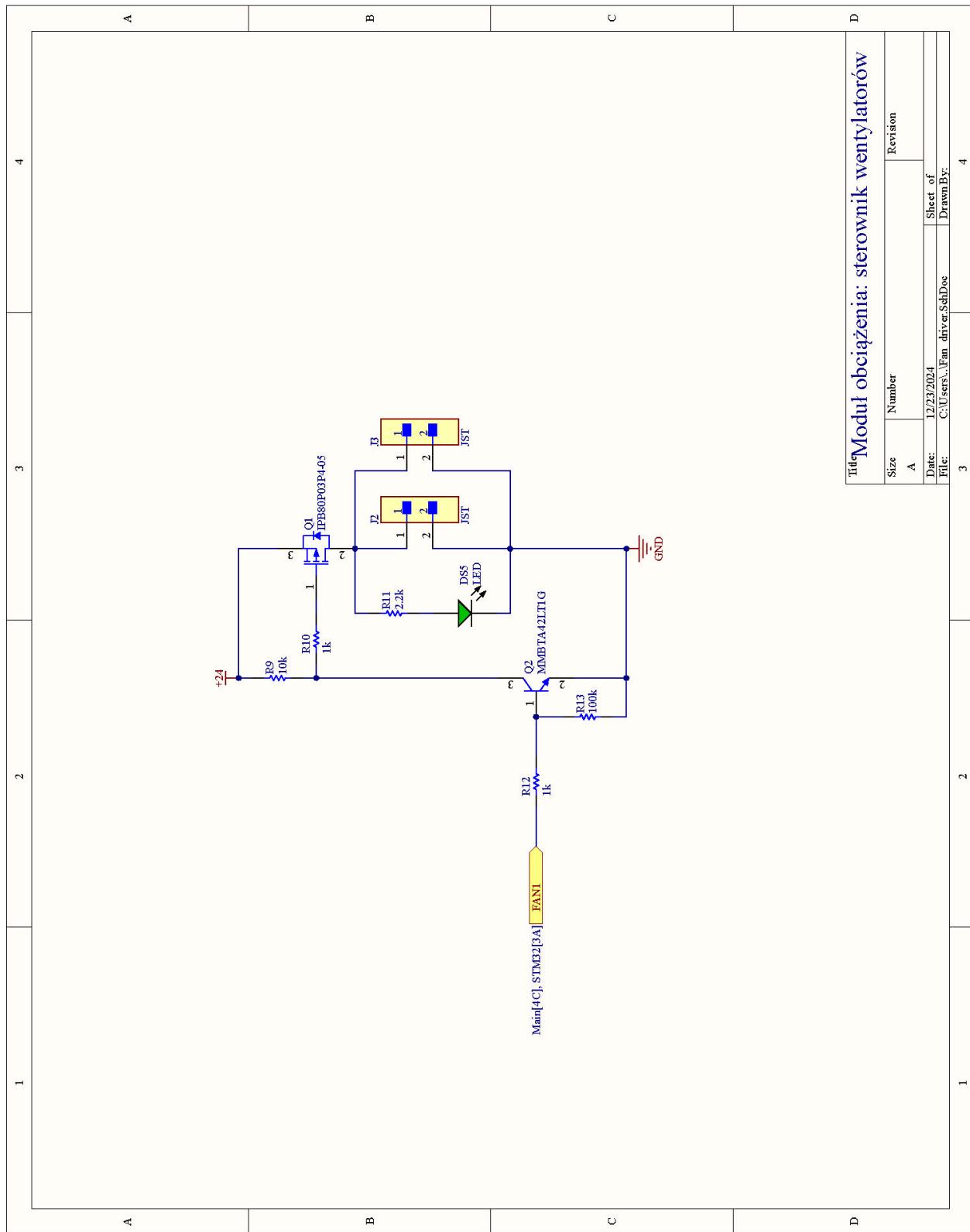
Rysunek C.2: Schemat blokowy modulu obciążenia aktywnego.



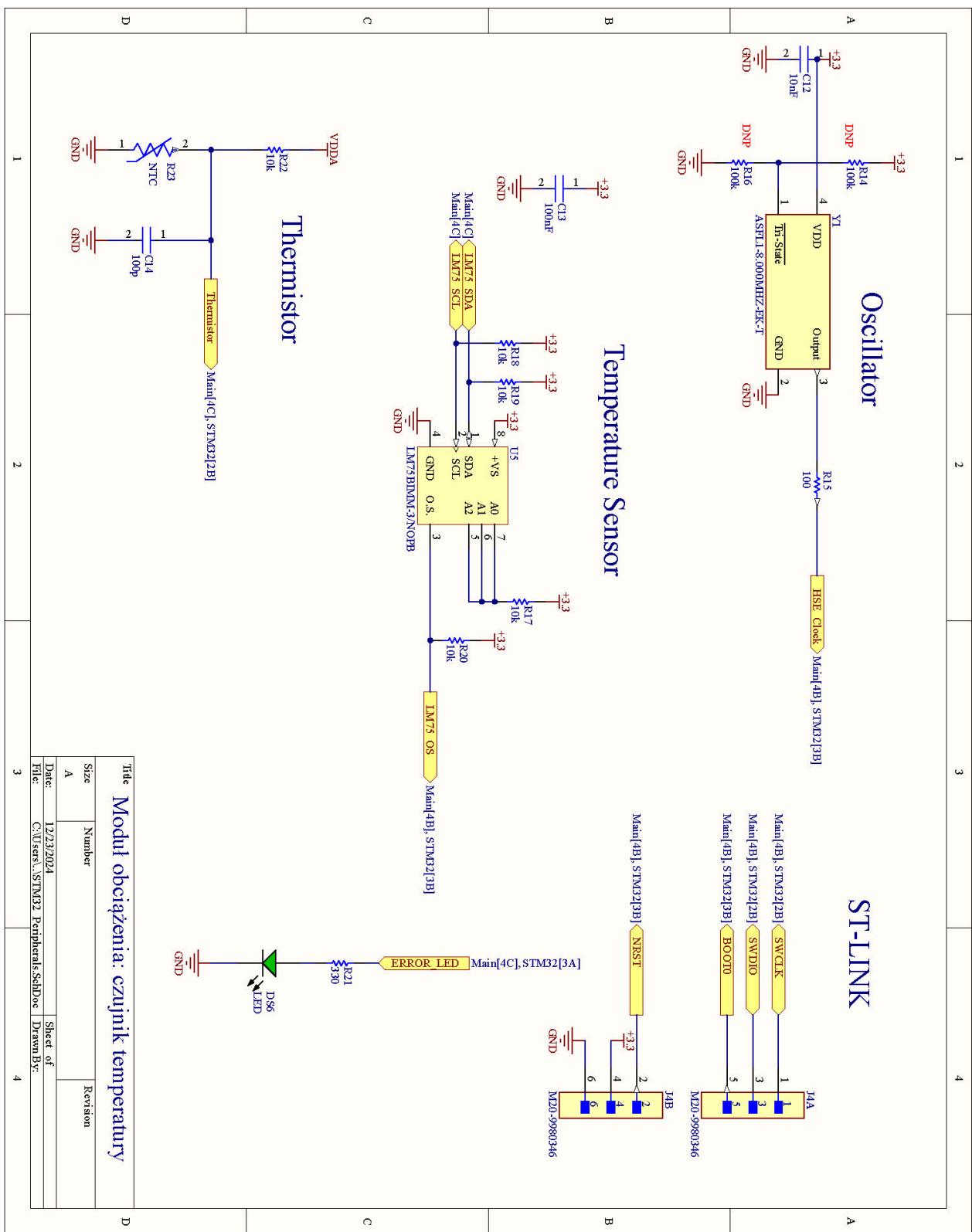
Rysunek C.3: Schemat RS485.



Rysunek C.4: Schemat sekcji zasilania.

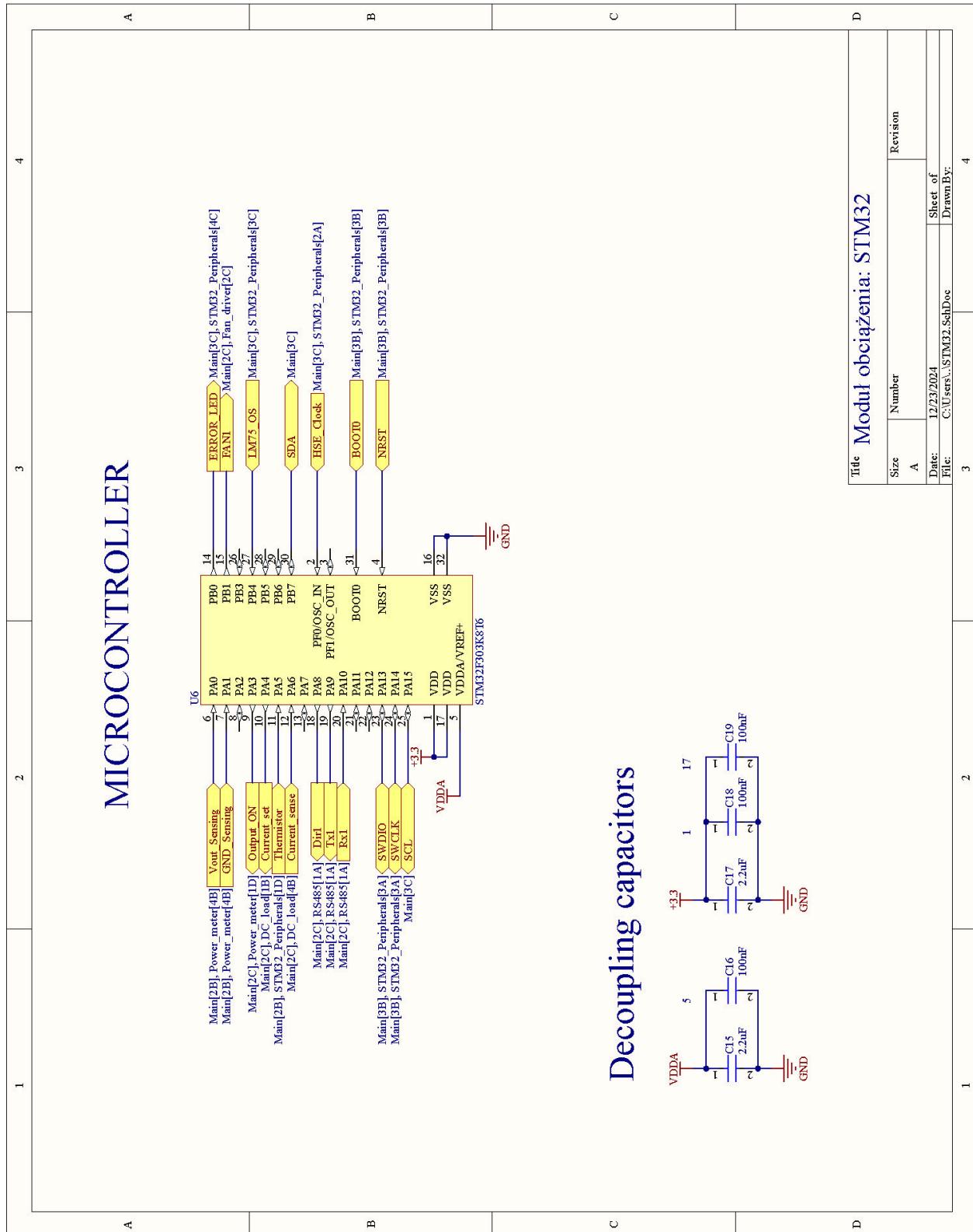


Rysunek C.5: Schemat sterownika wentylatorów.

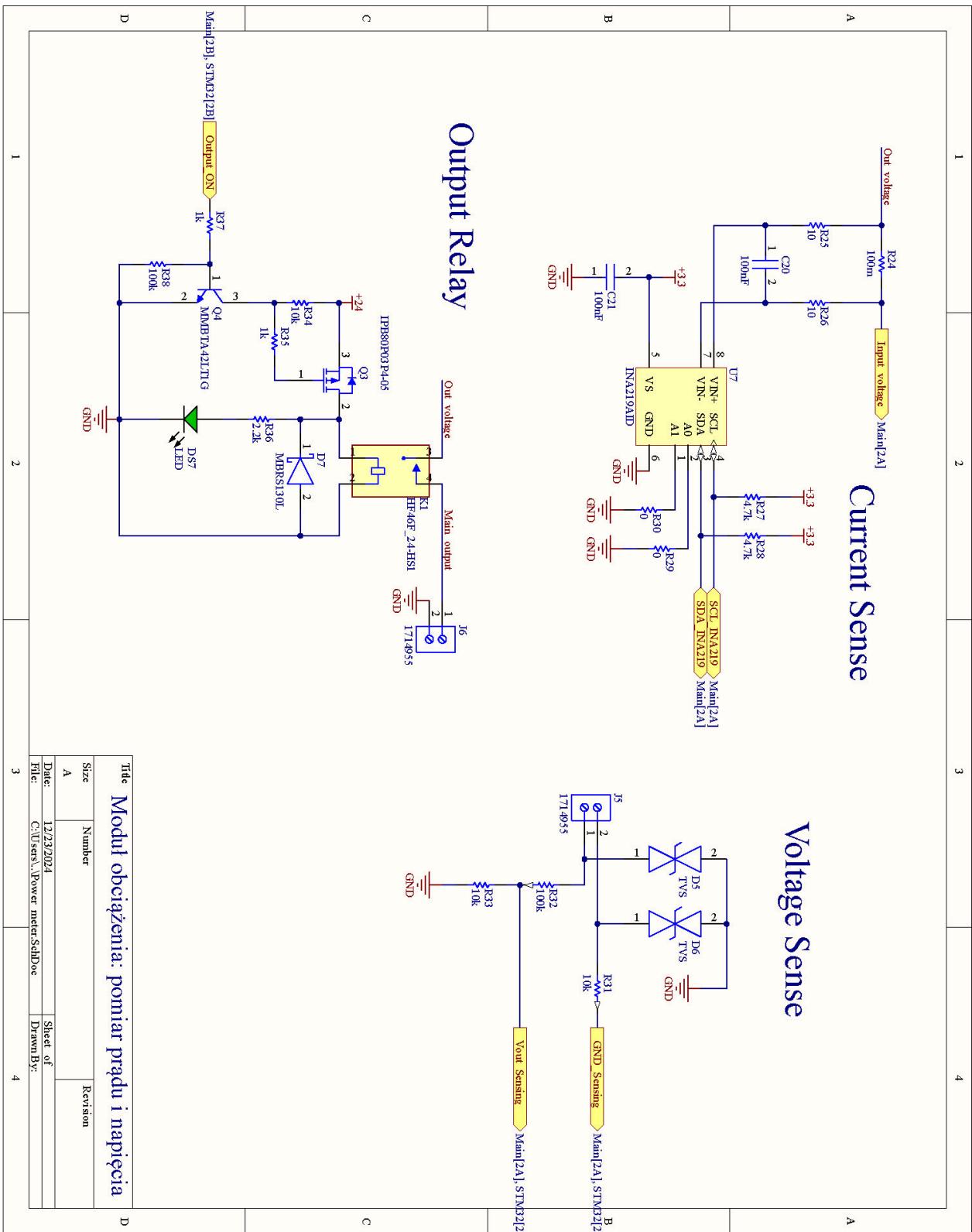


Rysunek C.6: Schemat układów peryferyjnych.

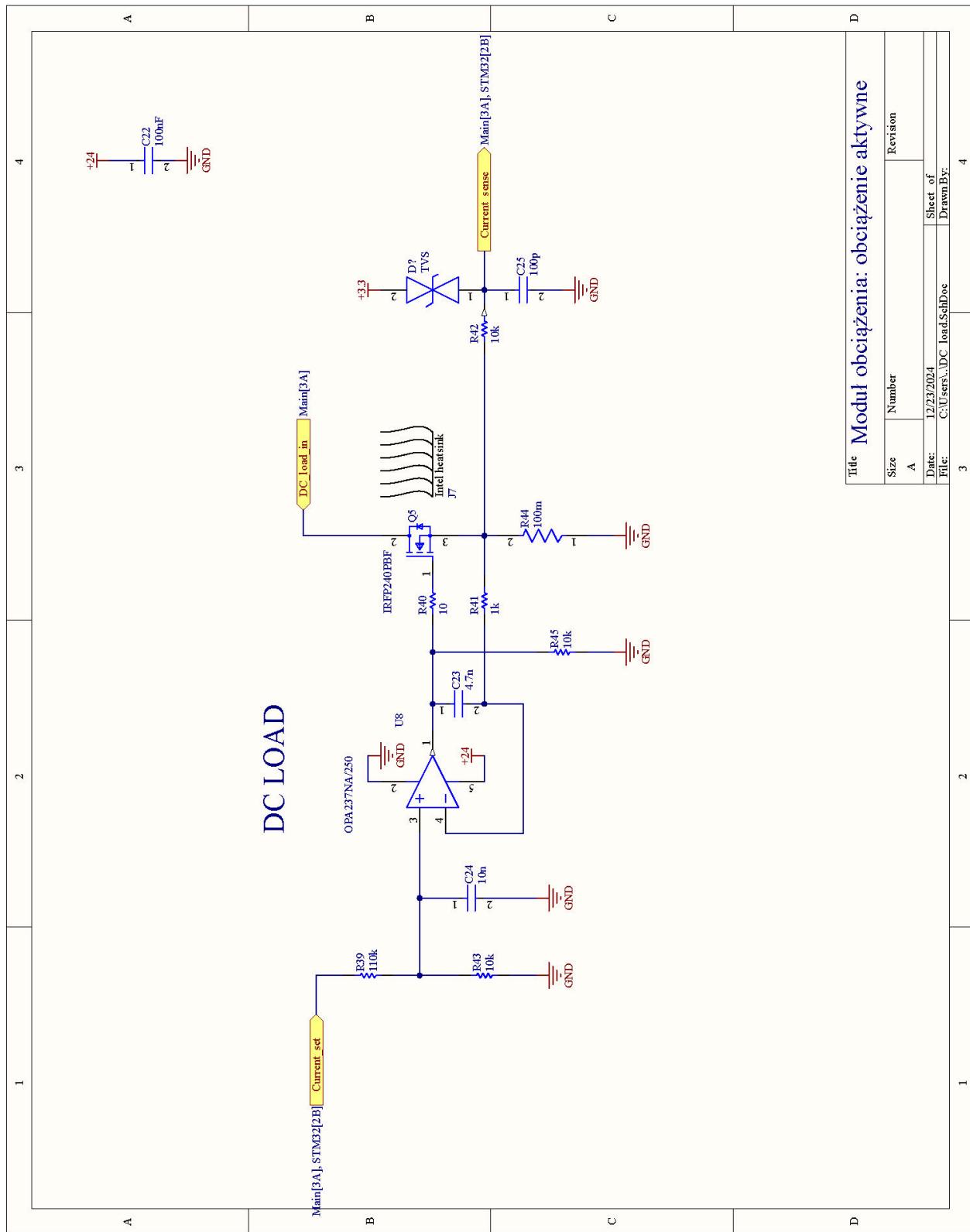
MICROCONTROLLER



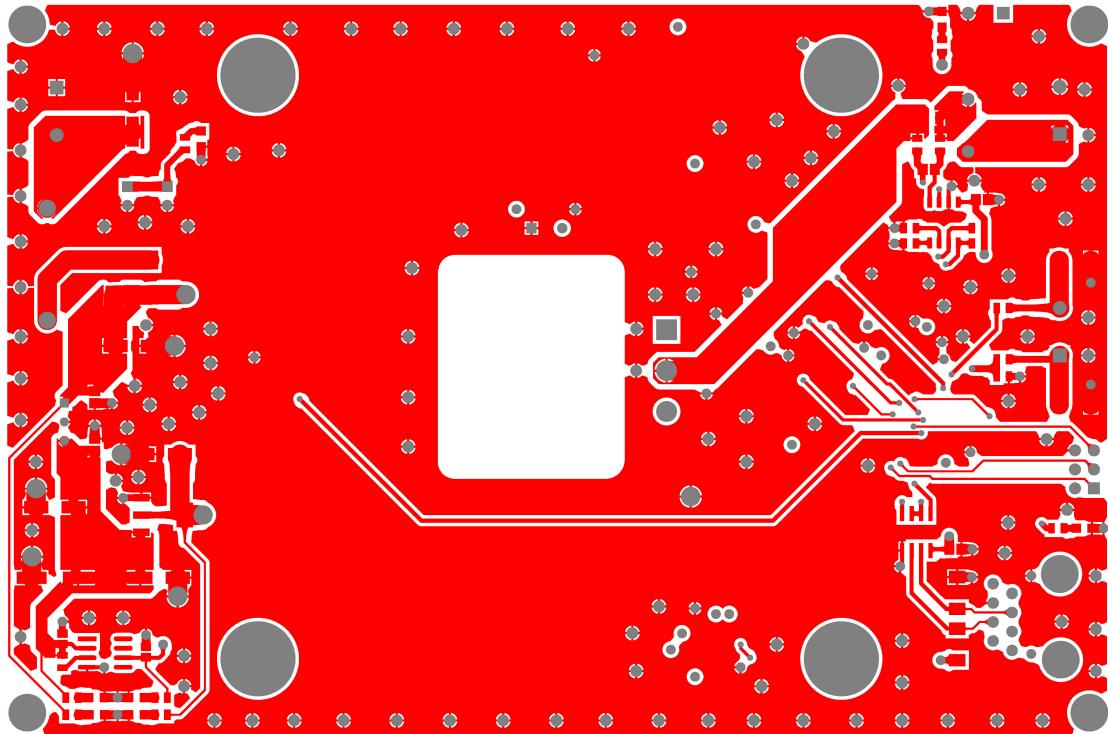
Rysunek C.7: Schemat mikrokontrolera STM32.



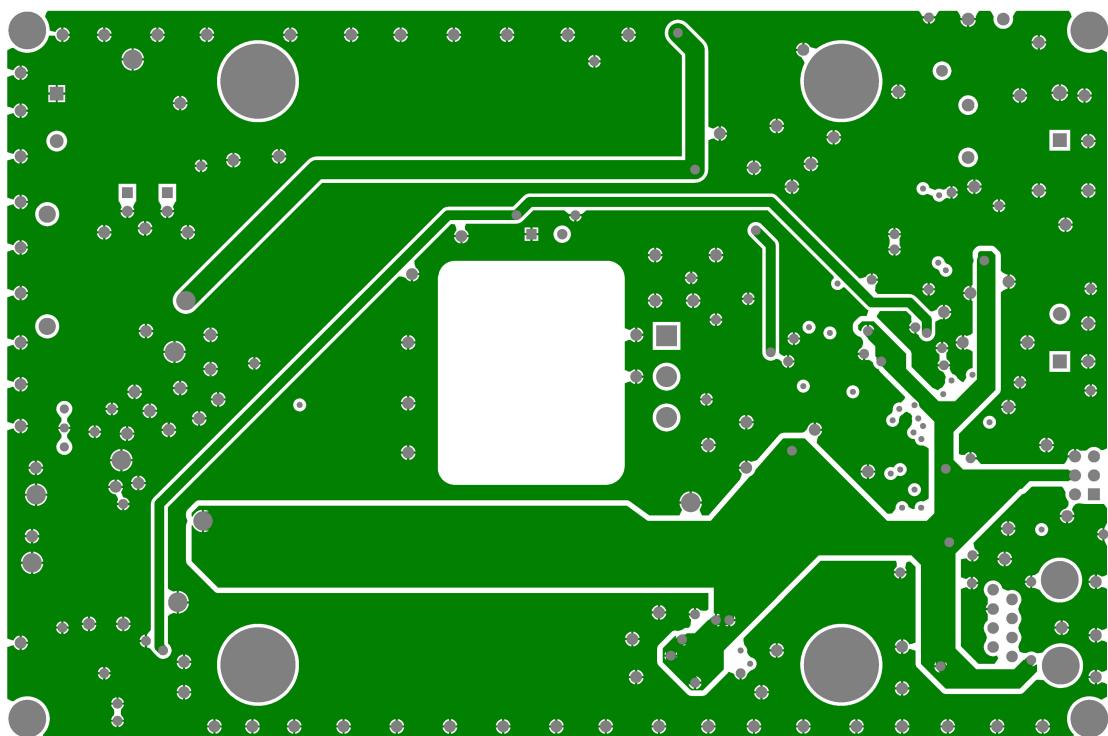
Rysunek C.8: Schemat układu pomiaru prądu.



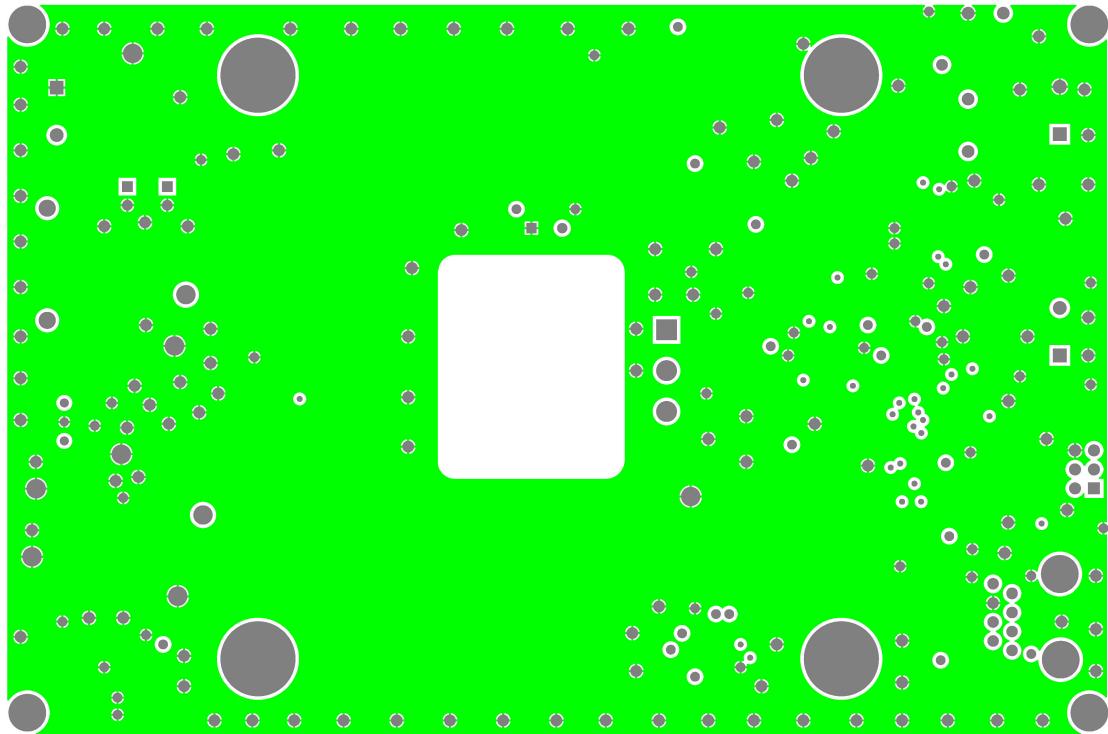
Rysunek C.9: Schemat obciążenia aktywnego.



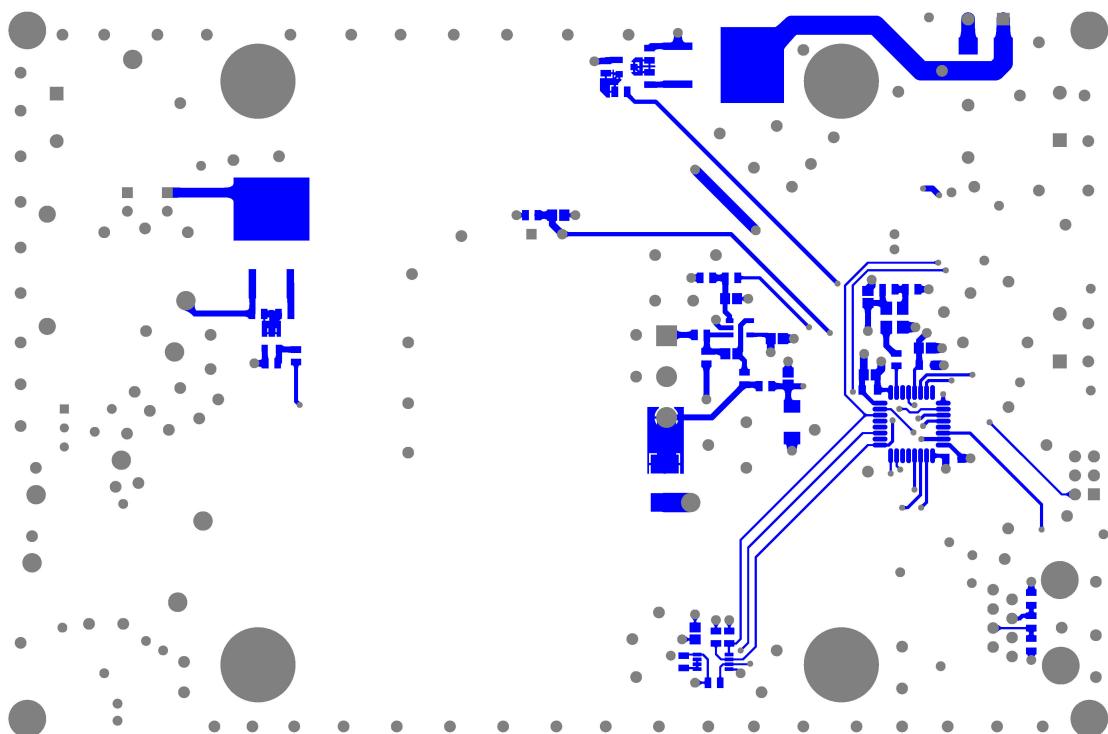
Rysunek C.10: Warstwa góra PCB.



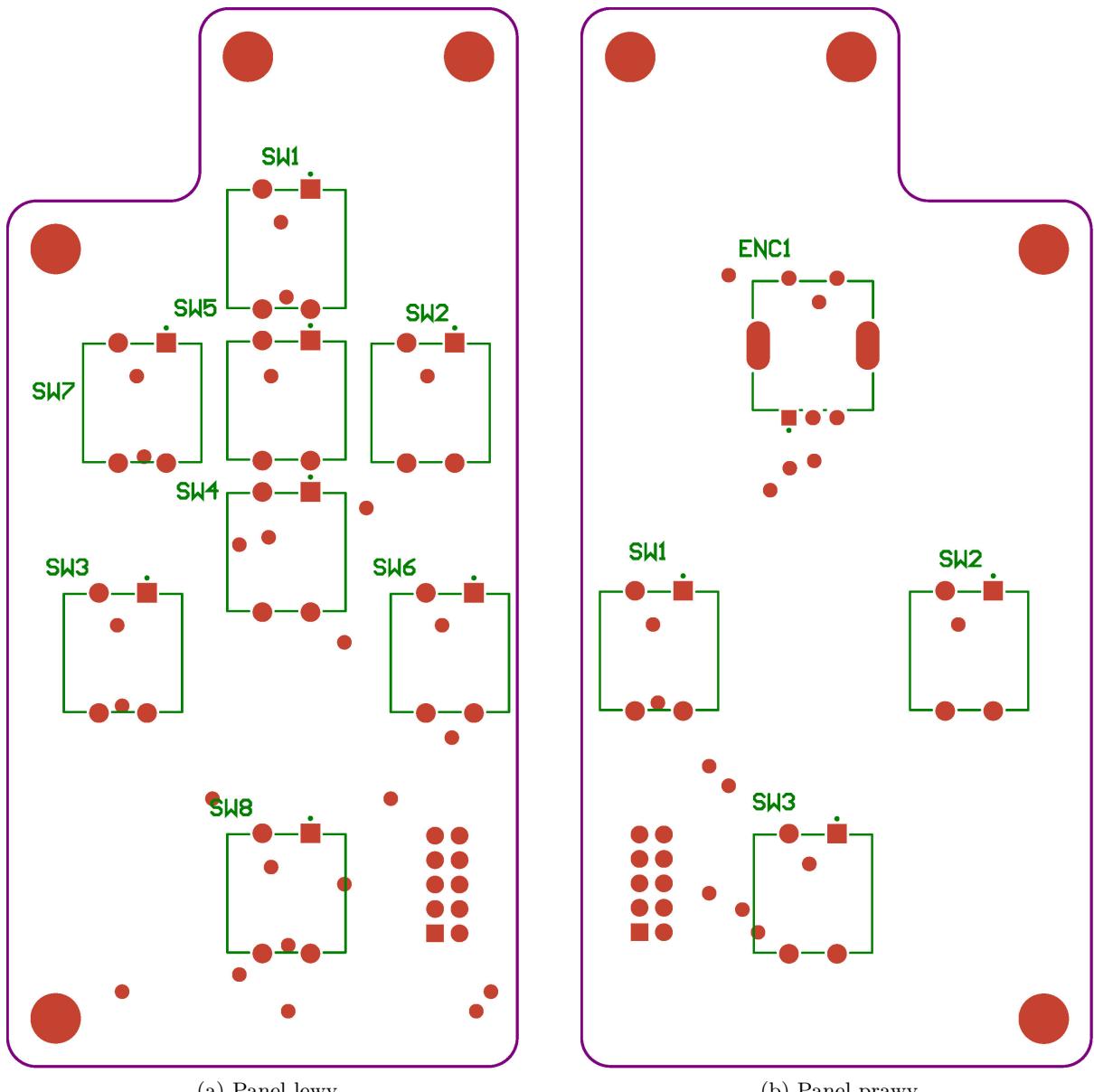
Rysunek C.11: Warstwa wewnętrzna 2 PCB.



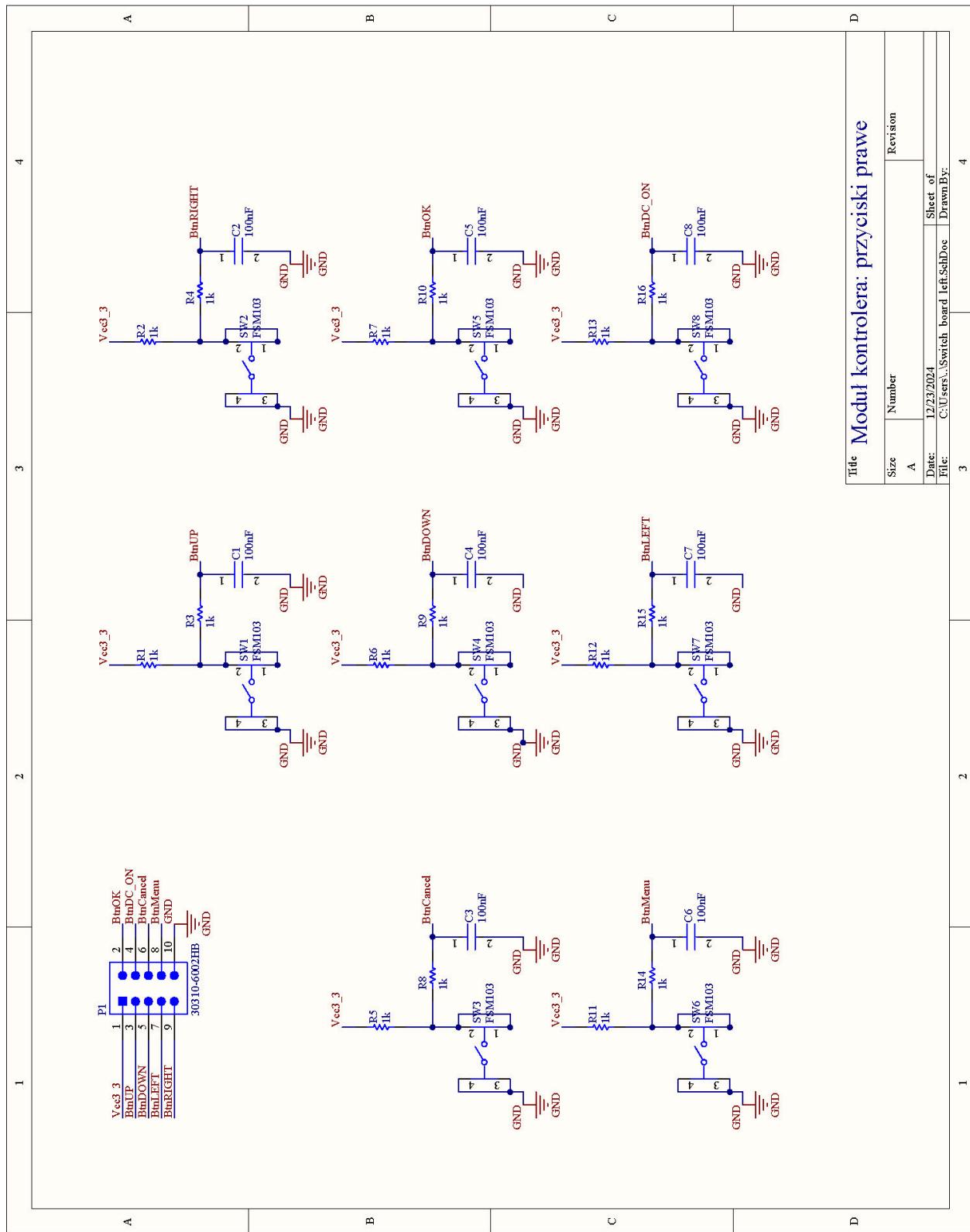
Rysunek C.12: Warstwa wewnętrzna 2 PCB.



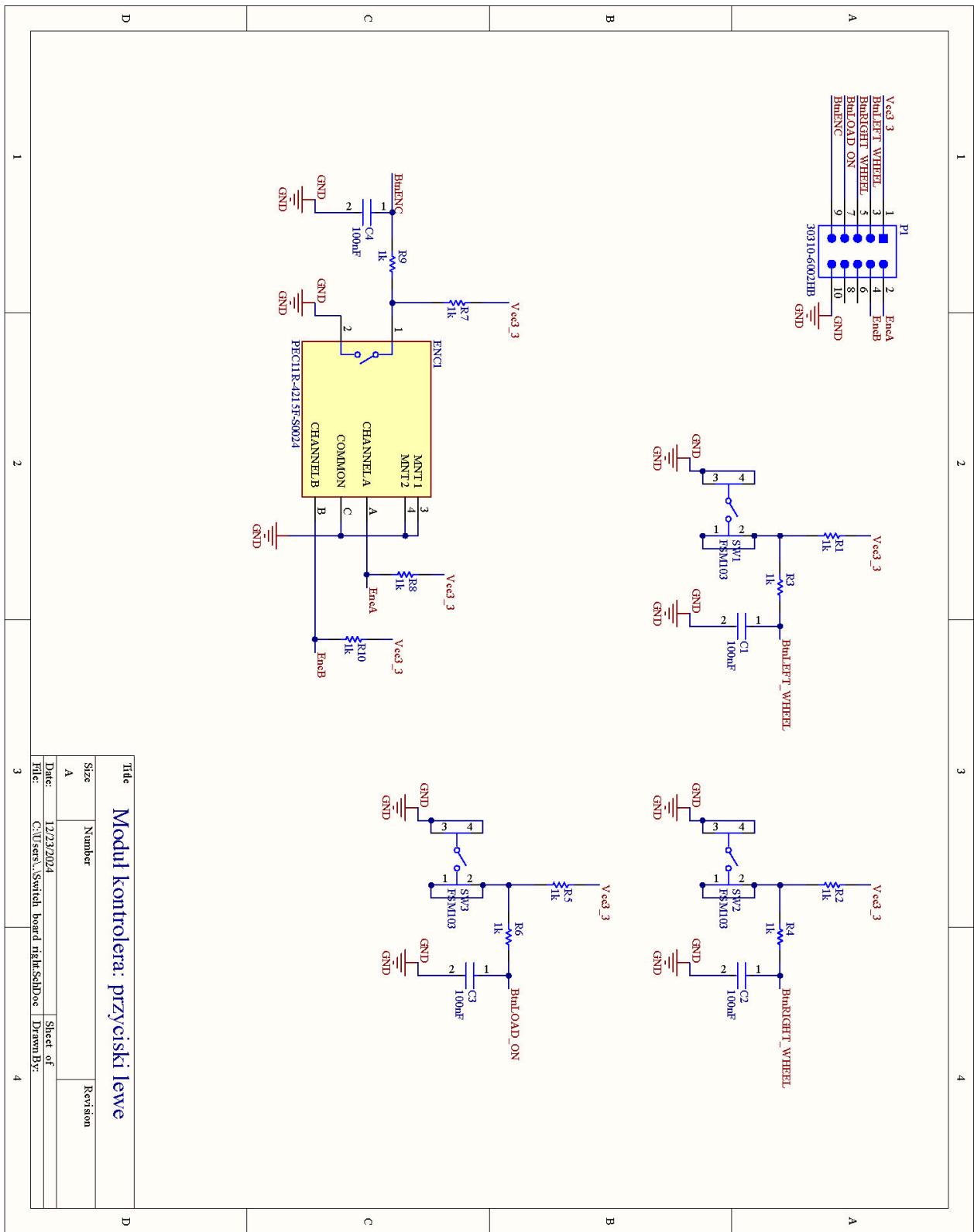
Rysunek C.13: Warstwa dolna PCB.



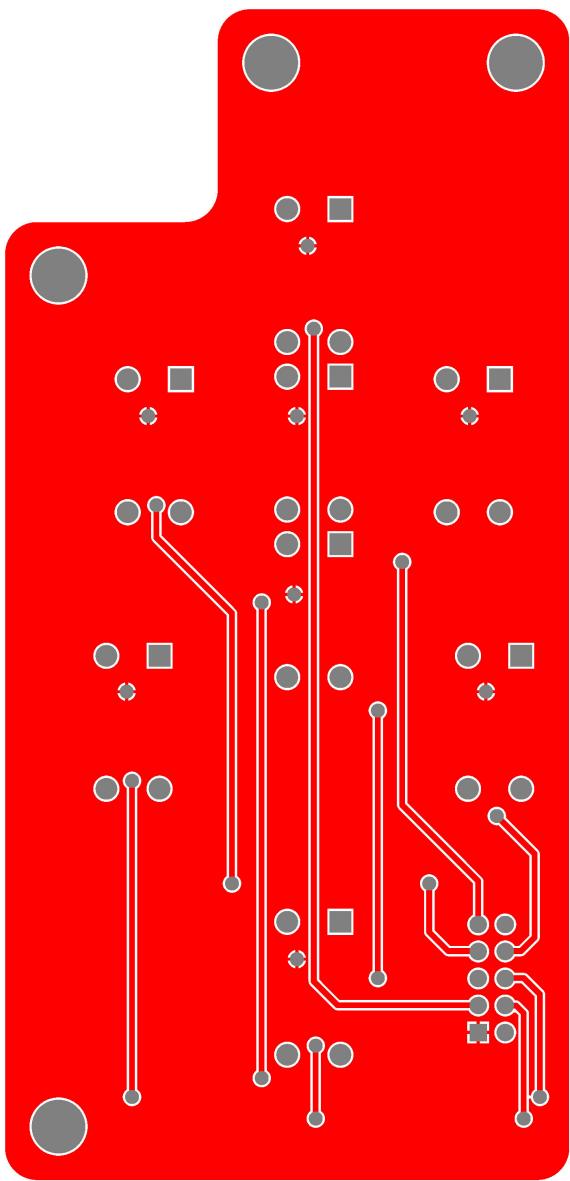
Rysunek D.1: Warstwy opisowe PCB.



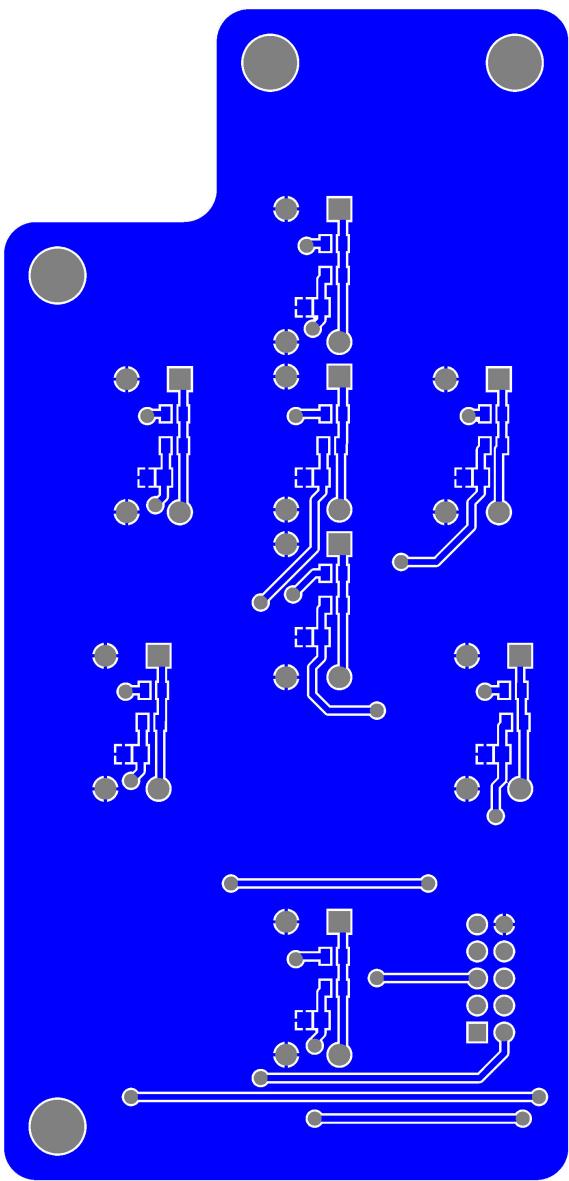
Rysunek D.2: Schemat panelu lewego.



Rysunek D.3: Schemat panelu prawego.

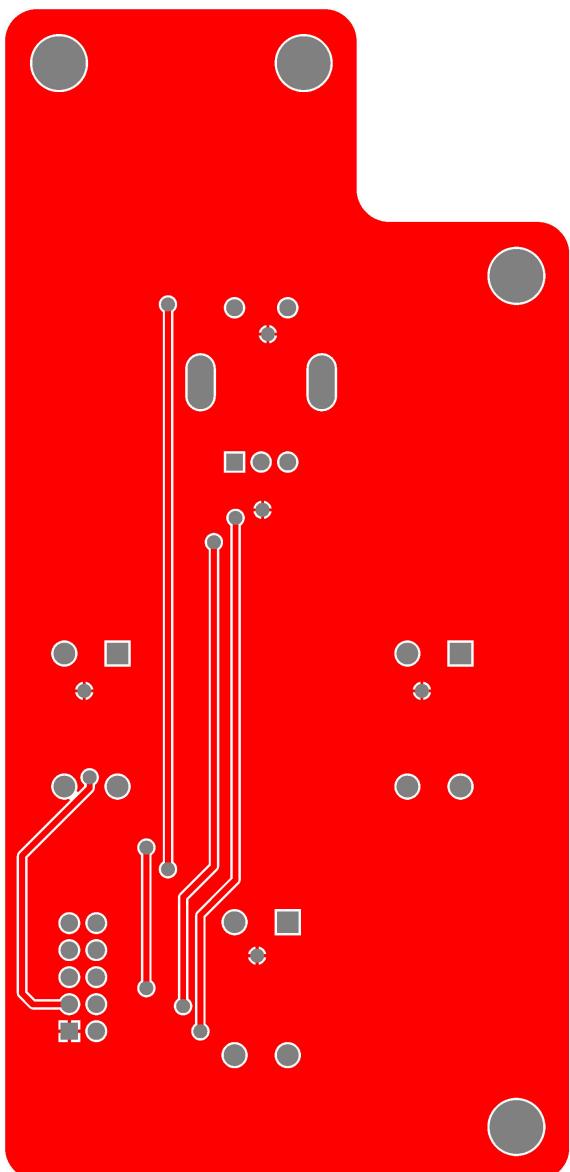


(a) Warstwa górska

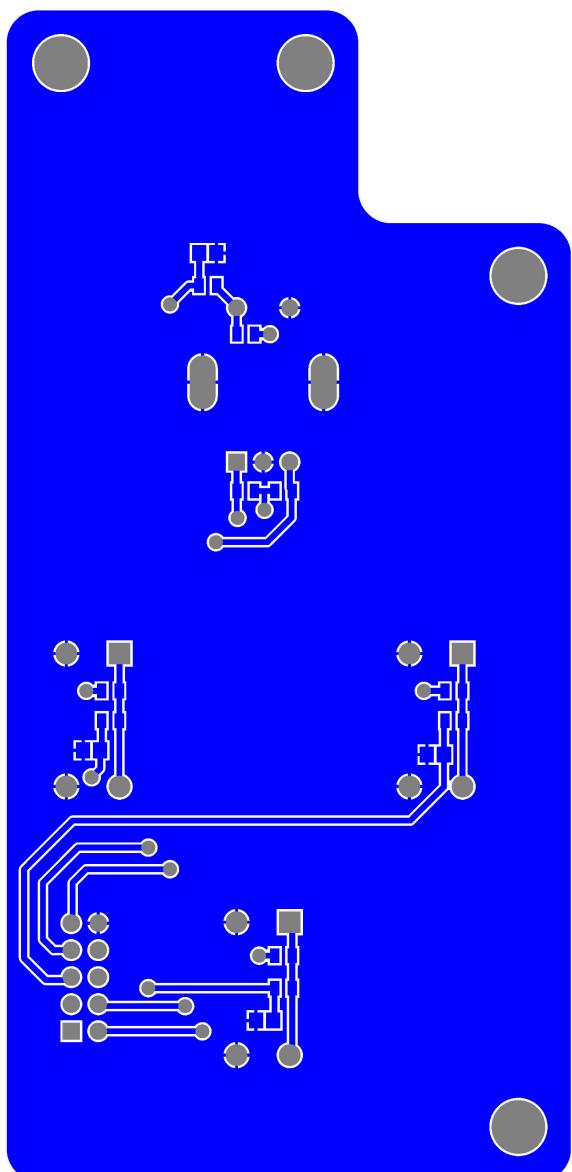


(b) Warstwa dolna.

Rysunek D.4: Panel lewy PCB.



(a) Warstwa górska



(b) Warstwa dolna.

Rysunek D.5: Panel prawy PCB.