



WYDZIAŁ ELEKTRONIKI,
TELEKOMUNIKACJI
I INFORMATYKI

Imię i nazwisko studenta: Wojciech Paderewski

Nr albumu: 184823

Poziom kształcenia: Studia pierwszego stopnia

Forma studiów: stacjonarne

Kierunek studiów: Elektronika i telekomunikacja

Profil: Komputerowe systemy elektroniczne

PRACA DYPLOMOWA INŻYNIERSKA

Tytuł pracy w języku polskim: Budzik synchronizowany przez WiFi

Tytuł pracy w języku angielskim: Alarm clock synchronized via WiFi

Opiekun pracy: dr hab. inż. Paweł Wierzba

Streszczenie

Aliquam erat volutpat. Nunc eleifend leo vitae magna. In id erat non orci commodo lobortis. Proin neque massa, cursus ut, gravida ut, lobortis eget, lacus. Sed diam. Praesent fermentum tempor tellus. Nullam tempus. Mauris ac felis vel velit tristique imperdiet. Donec at pede. Etiam vel neque nec dui dignissim bibendum. Vivamus id enim. Phasellus neque orci, porta a, aliquet quis, semper a, massa. Phasellus purus. Pellentesque tristique imperdiet tortor. Nam euismod tellus id erat.

Słowa kluczowe: a, b, c

Dziedzina nauki i techniki, zgodne z wymogami OECD: nauki inżyniersko-techniczne: automatyka, elektronika, elektrotechnika i technologie kosmiczne

Abstract

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Donec hendrerit tempor tellus. Donec pretium posuere tellus. Proin quam nisl, tincidunt et, mattis eget, convallis nec, purus. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Nulla posuere. Donec vitae dolor. Nullam tristique diam non turpis. Cras placerat accumsan nulla. Nullam rutrum. Nam vestibulum accumsan nisl.

Keywords: a, b, c

Spis treści

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów	6
1 Wstęp i cel pracy	7
2 Koncepcja układu	8
2.1 Założenia projektowe	8
2.2 Wstępne obliczenia i założenia	8
2.3 Dobór mikrokontrolera	10
2.4 Dobór paska LED	10
2.5 Koncepcja zasilania	11
2.6 Koncepcja sterowania lampami nixie	12
2.7 Schemat blokowy układu	13
3 Budowa układu	14
3.1 Przetwornica 12V na 5V	14
3.1.1 Wybór układu scalonego	14
3.1.2 Założenia projektowe	14
3.1.3 Dobór komponentów	14
3.1.4 Schemat	15
3.2 Złącze DC-Plug	16
3.2.1 Dobór złącza	16
3.2.2 Opis podłączenia	16
3.2.3 Zabezpieczenia ESD	16
3.2.4 Schemat	16
3.3 Złącze USB-C do programowania	17
3.3.1 Dobór złącza	17
3.3.2 Opis podłączenia	17
3.3.3 Zabezpieczenia ESD	17
3.3.4 Schemat	17
3.4 Przetwornica 12V na HV	18
3.4.1 Wybór układu scalonego	18
3.4.2 Założenia projektowe	18
3.4.3 Dobór cewki	18
3.4.4 Dobór kondensatorów	19
3.4.5 Dobór diody	20
3.4.6 Dobór tranzystora	20
3.4.7 Ustawienie napięcia wyjściowego	21
3.4.8 Dobór rezystora ograniczającego prąd	22
3.4.9 Schemat	22
Bibliografia	23
Spis rysunków	24
Spis tabel	25

Wykaz ważniejszych oznaczeń i skrótów

1 Wstęp i cel pracy

Aliquam erat volutpat[1]. Nunc eleifend leo vitae magna. In id erat non orci commodo lobortis. Proin neque massa, cursus ut, gravida ut, lobortis eget, lacus. Sed diam. Praesent fermentum tempor tellus. Nullam tempus. Mauris ac felis vel velit tristique imperdiet. Donec at pede. Etiam vel neque nec dui dignissim bibendum. Vivamus id enim. Phasellus neque orci, porta a, aliquet quis, semper a, massa. Phasellus purus. Pellentesque tristique imperdiet tortor. Nam euismod tellus id erat.

2 Koncepcja układu

Koncepcją układu jest zaprojektowanie i wykonanie budzika opartego o lampy Nixie, który będzie synchronizował się dzięki odpytywaniu serwera NTP oraz z wykorzystaniem modułu RTC wbudowanego w mikrokontroler.

2.1 Założenia projektowe

- Funkcjonalność ustawiania godziny budzika będzie realizowana przez zewnętrzny serwer dla wygody użytkownika, który nie musi dostosowywać czasu ręcznie.
- Na wyświetlaczu Nixie będą wyświetlane godziny, minuty, sekundy.
- Od spodu obudowy będą umieszczone paski LED, które będą podświetlały obudowę i będzie można ustawić na nich animacje podczas alarmu.
- Alarm będzie sygnalizowany dźwiękiem oraz miganiem pasków LED.
- Dźwięk może być grany z głośnika wbudowanego w obudowę lub z zewnętrznego głośnika komunikującego się z serwerem przez Wi-Fi.
- Wyłączanie alarmu będzie możliwe poprzez przycisk na obudowie, aplikację mobilną lub zewnętrzny przycisk połączony z serwerem.
- W przypadku braku połączenia z serwerem, czas będzie mierzony przez RTC wbudowany w mikrokontroler.
- Programowa oraz manualna regulacja jasności wyświetlacza Nixie oraz pasków LED.

Powyższe założenia projektowe będą skutkować bardzo wszechstronnym budzikiem, który będzie miał wygląd retro, ale z nowoczesnymi funkcjonalnościami.

2.2 Wstępne obliczenia i założenia

Pierwszą rzeczą, która została wykonana to zakup lamp Nixie, które będą wykorzystane w projekcie. Przez coraz bardziej ograniczony dostęp do tych lamp, zdecydowano się na zakup lamp Z570M, które zostały zakupione w ilości 6 sztuk. Lampy te mają 10 cyfr oraz kropkę dziesiętną, która nie jest nam potrzebna, ale została przewidziana możliwość jej sterowania w razie potencjalnego zastosowania w przyszłości.

Kluczowe parametry zastosowanych lamp nixie odczytane z noty katalogowej:

- Napięcie zapłonu: 170 V
- Napięcie wygaszania: 120 V
- Napięcie pracy: 150 V
- Prąd katodowy średni: 2 mA

W celu zweryfikowania działania lamp nixie i sprawdzenia parametrów zasilania, został wykonany prototyp układu z jedną lampą nixie, wykorzystujący zasilacz impulsowy HV z regulowanym napięciem wyjściowym zakupiony w sklepie internetowym.

Zakupiona przetwornica HV ma następujące parametry:

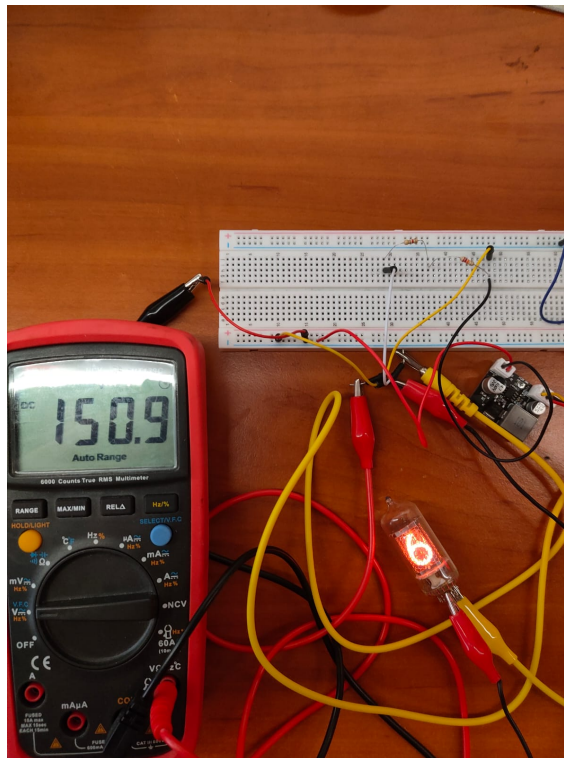
- Napięcie wejściowe: 5 – 12 V
- Napięcie wyjściowe: 150 – 220 V
- Prąd wyjściowy: 20 mA

W celu sprawdzenia działania lampy musimy najpierw dobrać rezystor ograniczający prąd katodowy. Zakładając, że napięcie zasilania wynosi maksymalnie $U_{\max} = 220 \text{ V}$, a napięcie zapłonu lampy $U_{\text{zap}} = 170 \text{ V}$, przy prądzie katodowym $I_{\text{kat}} = 2 \text{ mA}$, rezystor ograniczający prąd katodowy można obliczyć ze wzoru:

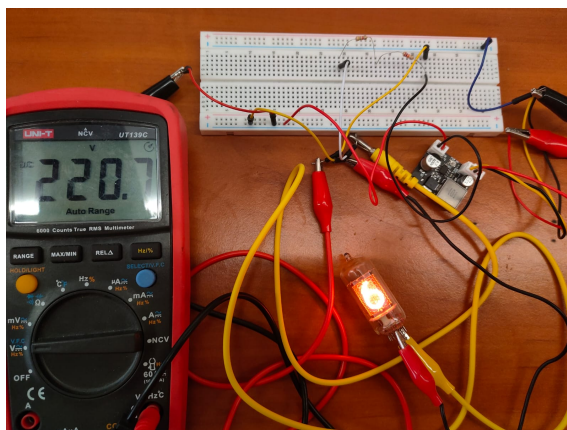
$$R = \frac{U_{\max} - U_{\text{zap}}}{I_{\text{kat}}} = \frac{220 \text{ V} - 150 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 35 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

W nocie katalogowej lampy nixie Z570M producent podaje, że zalecany rezystor ograniczający prąd katodowy powinien mieć wartość $33 \text{ k}\Omega$ dla napięcia zasilania 200 V, więc wartość $35 \text{ k}\Omega$ dla napięcia 220 V wydaje się obliczona prawidłowo, taki też rezystor ma zostać użyty w faktycznym układzie.

Zatem rezystor ograniczający prąd katodowy powinien mieć wartość około $35 \text{ k}\Omega$. Do testu użyto rezystora o wartości $22 \text{ k}\Omega$ oraz rezystora o wartości $10 \text{ k}\Omega$, połączonych szeregowo, co daje wartość $32 \text{ k}\Omega$, co jest wartością zbliżoną do obliczonej.



Rysunek 2.1: Prototyp układu z lampą nixie przy napięciu zasilania 150 V



Rysunek 2.2: Prototyp układu z lampą nixie przy napięciu zasilania 220 V

Z testów wynika, że lampy nixie działają poprawnie, a dobrany rezystor ograniczający prąd katodowy jest odpowiedni. Przy napięciu zasilania 150 V lampa świeci słabiej, ale jest to zgodne z oczekiwaniami, natomiast przy napięciu 220 V lampa świeci jasno i pojawiają się lekko niebieskie refleksy wewnątrz lampy, co jest zgodne z oczekiwaniami.

Nie sprawdzono napięcia wygaszania, ponieważ zasilacz nie pozwalał na takie napięcie, ale ustalono, że lampa nawet przy napięciu 150 V była w stanie zapłonąć i świecić poprawnie.

Z testów można wyciągnąć następujące wnioski:

- Lampy nixie działają poprawnie przy napięciu zasilania 150 V oraz 220 V.
- Dobry rezystor ograniczający prąd katodowy jest odpowiedni.
- Lampa nixie Z570M jest w stanie zapłonąć i świecić przy napięciu wygaszania 150 V.
- Zakres regulacji napięcia na zasilaczu HV powinien być większy np. 130 – 250 V, by lampa mogła być jeszcze słabiej podświetlona, może się to okazać przydatne w nocy.

2.3 Dobór mikrokontrolera

Następnie wybrano mikrokontroler, który będzie użyty w projekcie. Wybrano mikrokontroler ESP32-S3, który jest nowym mikrokontrolerem z wbudowanym modulem Wi-Fi oraz Bluetooth. Mikrokontroler ten ma wbudowany programator co pozwoli na łatwe wgrywanie oprogramowania, bez zewnętrznego programatora, a także ma wbudowany moduł RTC, co pozwoli na zachowanie czasu, pomiędzy zapytaniami do serwera NTP.

Wybrany układ ma również wystarczająco dużo pinów GPIO, by móc obsłużyć wszystkie lampy nixie, paski LED, głośnik oraz przyciski. Posiada on układ dwu rdzeniowy, co w razie potrzeby pozwoli na obsługę wielowątkowości. Zegar procesora ma częstotliwość 240 MHz, co w zupełności wystarczy do obsługi wszystkich elementów układu.

2.4 Dobór paska LED

Do budzika wybrano adresowalne paski LED WS2812B, które są bardzo popularne w projektach DIY, ponieważ są łatwe w obsłudze, mają wbudowany kontroler, który pozwala na sterowanie każdym diodą z osobna oraz są dostępne w różnych długościach i kolorach. Wybrano pasek z diodami RGB, co pozwoli na wyświetlanie wielu kolorów. Moc na metr wynosi 18 W. Pasek posiada też stopień ochrony IP65, czyli powinien być odporny na kurz oraz wilgoć.

2.5 Koncepcja zasilania

Projekt sekcji zasilania został rozpoczęty od oszacowania mocy potrzebnej do zasilania całego układu. Poza lampami nixie, najbardziej obciążającym elementem będzie pasek LED oraz mikrokontroler, pozostałe elementy będą pobierały znikome ilości prądu.

Założono maksymalną długość paska LED na 30 cm. Z deklaracji producenta paska LED wynika, że moc na metr wynosi 18 W, co daje:

$$P_{LED} = 18 \text{ W m}^{-1} \cdot 0.3 \text{ m} = 5.4 \text{ W} \quad (2)$$

Następnie obliczono prąd potrzebny do zasilania paska LED przy napięciu 5 V:

$$I_{LED} = \frac{P_{LED}}{U_{LED}} = \frac{5.4 \text{ W}}{5 \text{ V}} = 1.08 \text{ A} \quad (3)$$

Następnie obliczono moc potrzebną do zasilania mikrokontrolera ESP32-S3, według producenta maksymalny pobór prądu wynosi 340 mA, co przy napięciu zasilania 3.3 V daje:

$$P_{ESP32} = 340 \text{ mA} \cdot 3.3 \text{ V} = 1.122 \text{ W} \quad (4)$$

Następnie policzono prąd pobierany przez wszystkie lampy, których jest 6 sztuk, przy prądzie katodowym 2 mA każda, co daje:

$$I_{Nixie} = 6 \cdot 2 \text{ mA} = 12 \text{ mA} \quad (5)$$

Następnie obliczono moc potrzebną do zasilania lampy nixie, przy napięciu 220 V oraz prądzie wszystkich lamp 12 mA, zakładając sprawność przetwornicy na poziomie 70 %:

$$P_{Nixie} = \frac{U_{Nixie} \cdot I_{Nixie}}{\text{Sprawność}} = \frac{220 \text{ V} \cdot 12 \text{ mA}}{0.7} = 3.43 \text{ W} \quad (6)$$

Pozostałe komponenty będą pobierały znikome ilości prądu, więc nie będą brane pod uwagę w obliczeniach. Szacunkowa moc potrzebna do zasilania całego układu wynosi:

$$P_{całkowita} = P_{LED} + P_{ESP32} + P_{Nixie} = 5.4 \text{ W} + 1.122 \text{ W} + 3.43 \text{ W} = 9.952 \text{ W} \quad (7)$$

Szacunkowa moc potrzebna do zasilania całego układu wynosi około 10 W, co powoduje problem z zasilaniem z gniazd USB w komputerze, ponieważ maksymalna moc, jaką można pobrać z gniazda USB wynosi 2.5 W, co jest zdecydowanie za mało.

Problem jest też projekt przetwornicy HV zasilanej z 5V, ponieważ przetwornica boost przy takiej aplikacji miała by bardzo wysokie wypełnienie rzędu 95 %, co prowadziło by do dużych strat mocy.

Alternatywą jest przetwornica flyback, która ma mniejsze wypełnienie i była by bardziej wydajna, ale jest bardziej skomplikowana w projektowaniu i montażu. Podczas prób projektowania takiej przetwornicy, problem okazało się znaleźć odpowiedni transformator, który miał by odpowiednie parametry, a także byłby dostępny w sklepach elektronicznych.

W związku z tymi problemami, zdecydowano się na zasilanie z zewnętrznego zasilacza 12V, który będzie zasilany z gniazda sieciowego, podłączonego do budzika za pomocą złącza DC-Plug. Do programowania mikrokontrolera będzie służyć złącze USB-C.

Ostatecznie sekcja zasilania została podzielona na kilka podsekcji:

- Przetwornica 12V na 5V do zasilania pasków LED.
- Regulowana przetwornica 12V na HV do zasilania lamp nixie.
- LDO 5V na 3.3V do zasilania mikrokontrolera.

2.6 Koncepcja sterowania lampami nixie

Kolejnym krokiem było zaprojektowanie sekcji sterowania lampami nixie, która będzie odpowiedzialna za wyświetlanie odpowiednich cyfr na lampach. Jest kilka sposobów na sterowanie lampami:

- Sterowanie bezpośrednie - każda lampka ma swoje wejście i jest sterowana osobno za pomocą tranzystora HV połączonego z mikrokontrolerem. Niestety wymagane jest wiele pinów GPIO również trzeba użyć ponad 60 tranzystorów HV, co jest bardzo kosztowne.
- Multiplexing - wszystkie lampy są podłączone do jednego drivera, który wybiera katodę i załączamy odpowiednią anodę. Wymaga to mniej pinów GPIO bo tylko 10, ale multipleksacja powoduje szybsze zużycie lamp i pojawia się efekt migotania(ghosting).
- Wykorzystanie dedykowanych driverów - istnieją specjalne układy scalone, które są przeznaczone do sterowania lampami nixie, niestety one również wymagają wielu pinów GPIO po 4 na każdą lampkę, co daje 24 wymaganych pinów GPIO.
- Rejestr przesuwany HV - najbardziej optymalne rozwiązanie, wymaga tylko 3 pinów GPIO. Rejestry HV są ciężko dostępne i dość drogie, wymagane jest też by były to rejestry z zatrzaskiem, aby uniknąć efektu ghostingu.

W projekcie zdecydowano się na wykorzystanie rejestrów przesuwanych HV. Znalaziono 32 kanałowy rejestr HV5530PG-G firmy Microchip mogący pracować z napięciem do 300 V oraz posiadający zatrzask i wyjście Open Drain.

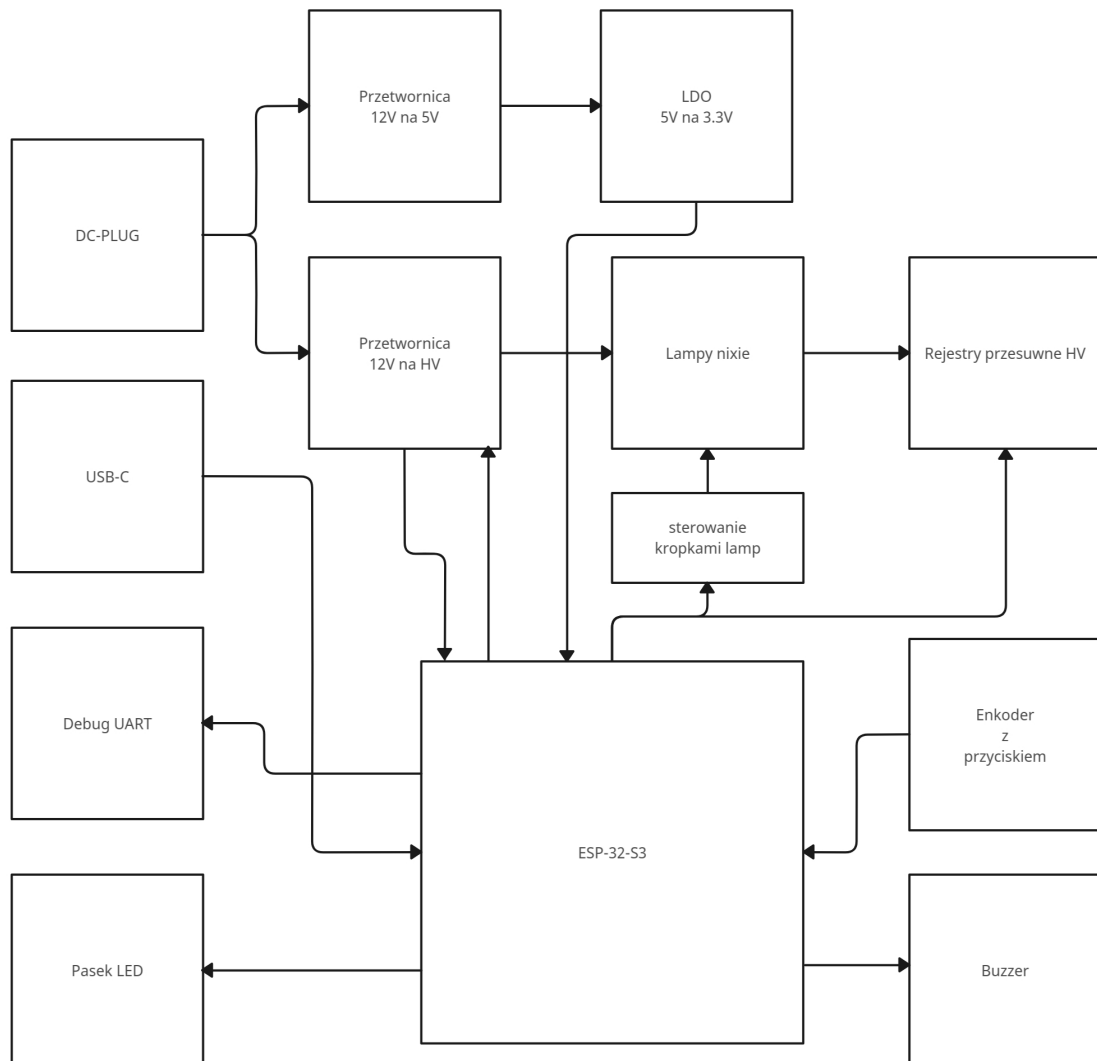
Rodzaj wyjścia open drain jest bardzo istotny, ponieważ na wyjściu znajduje się stan wysokiej impedancji, co nie powoduje zwierania wszystkich wyjść do masy. W przypadku wyjścia push-pull, stan wysoki jak i niski powodował by zapalenie się wszystkich lamp, ponieważ spadek napięcia na lampach nawet w stanie wysokim byłby na tyle duży, że lampy były by w stanie zapłonąć.

Do sterowania 6 lampami potrzebne są 2 rejestry HV5530PG-G, co daje 64 kanały, co pozwoli na sterowanie 6 lampami nixie oraz 2 neonówkami, które służą jako separator między godzinami, minutami i sekundami. Do sterowania kropkami dziesiętnymi, wykorzystano tranzystory HV połączone z mikrokontrolerem.

Sterowanie lampami z wykorzystaniem rejestru jest proste, wymaga wgrania do rejestru 64 bitów, które odpowiadają za stan lamp oraz przełączanie zatrzasku co sekundę, aby zmienić ich stan.

2.7 Schemat blokowy układu

Na rysunku 2.3 przedstawiono schemat blokowy układu, który pokazuje jak poszczególne sekcje układu są ze sobą połączone.



Rysunek 2.3: Schemat blokowy układu

3 Budowa układu

3.1 Przetwornica 12V na 5V

3.1.1 Wybór układu scalonego

Zdecydowano się na układ TPS563219ADDFR produkcji Texas Instruments, który jest przetwornicą impulsową z wbudowanym tranzystorem mocy oraz zapewniającym prąd wyjściowy do 3A przy napięciu wyjściowym do 7V. Układ jest też w obudowie na tyle dużej, by móc go polutować ręcznie.

Układ posiada soft-start oraz wyjście power good (potwierdzające start przetwornicy), co nie jest potrzebne w tym zastosowaniu, tak samo nie jest to najmniejszy układ, ale zapewnia to łatwość montażu co jest ważne w tym przypadku.

3.1.2 Założenia projektowe

- Napięcie wejściowe: 12V
- Napięcie wyjściowe: 5V
- Prąd wyjściowy: 2A
- 50mV tętnienia napięcia wyjściowego

3.1.3 Dobór komponentów

Dobór komponentów wykonano na podstawie sugerowanych wartości z noty katalogowej układu TPS563219ADDFR.

Table 4. TPS563219A Recommended Component Values

Output Voltage (V)	R2 (k Ω)	R3 (k Ω)	L1 (μ H)			C6 + C7 + C8 (μ F)
			MIN	TYP	MAX	
1	3.09	10.0	1.0	1.5	4.7	20 - 68
1.05	3.74	10.0	1.0	1.5	4.7	20 - 68
1.2	5.76	10.0	1.0	1.5	4.7	20 - 68
1.5	9.53	10.0	1.0	1.5	4.7	20 - 68
1.8	13.7	10.0	1.5	2.2	4.7	20 - 68
2.5	22.6	10.0	1.5	2.2	4.7	20 - 68
3.3	33.2	10.0	1.5	2.2	4.7	20 - 68
5	54.9	10.0	2.2	3.3	4.7	20 - 68
6.5	75	10.0	2.2	3.3	4.7	20 - 68

Rysunek 3.1: Tabela doboru komponentów z noty katalogowej

Na podstawie tabeli dobrano następujące wartości komponentów:

- C1: 22 μ F 10V
- C29: 22 μ F 10V
- L1: 2.2 μ H 9.2A 14.5m Ω
- R1: 56k Ω
- R2: 10k Ω

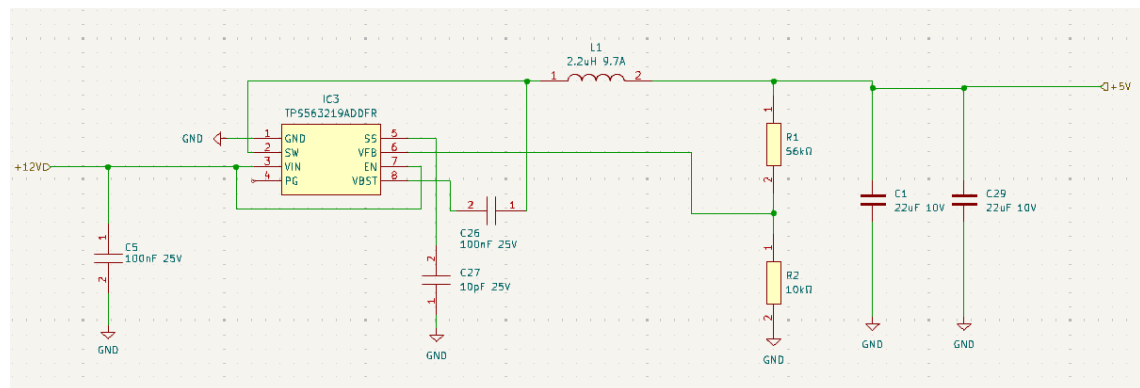
Kondensator podpięty pod pin SS(soft start) oraz kondensator podpięty pod pin VBST, został skopiowany z układu z noty katalogowej, gdyż nie jest to krytyczny element i nie ma potrzeby doboru wartości pod kątem zastosowania w zegarze.

Zdecydowano się na użycie kondensatorów ceramicznych, gdyż są one mniejsze i mają lepszy ESR niż elektrolityczne, co ma znaczenie przy przetwornicach impulsowych, gdzie mamy wyższe częstotliwości przełączania, więc ESR kondensatora ma większe znaczenie, przy zbyt dużym ESR kondensatora, może on się nagrzewać, co prowadzi do jego uszkodzenia. Kondensatory ceramiczne natomiast cechują się tak małym ESR, że producent nie podaje tej wartości w notach katalogowych, gdyż jest ona zbyt mała by miała znaczenie.

Cewka dobrano biorąc pod uwagę jest stosunek oporu do ceny, zdecydowano się na cewkę o oporze $14.5\text{m}\Omega$, gdyż jest to najniższa wartość jako udało się znaleźć w sklepach elektronicznych w sensownej cenie i dość małej obudowie.

Dodano również kondensator filtrujący 100nF na pinie VCC, by zredukować szumy z linii zasilania.

3.1.4 Schemat



Rysunek 3.2: Schemat złącza DC-Plug

3.2 Złącze DC-Plug

3.2.1 Dobór złącza

W doborze złącza kluczowe była jego wielkość oraz prąd, który jest w stanie przewodzić. Teoretyczna moc układu to 10W, co przy napięciu 12V daje prąd 0.83A. Złącze musi być w stanie przewodzić prąd 1A, by zapewnić bezpieczeństwo.

Wybrano złącze firmy same sky o symbolu PJ-094H-SMT-TR o styku 0.65x2.35mm, które jest w stanie przewodzić prąd 2.5A, czyli więcej niż wystarczająco. Złącze jest bardzo niskie, jego wysokość to 3.5mm, co pozwala na zminimalizowanie wysokości zegara.

3.2.2 Opis podłączenia

Jako kondensatory filtrujące wykorzystano, 2 kondensatory o pojemności 100uF w celu zminimalizowania zakłóceń niskich częstotliwości, oraz 1 kondensator o pojemności 100nF w celu zminimalizowania zakłóceń wysokich częstotliwości.

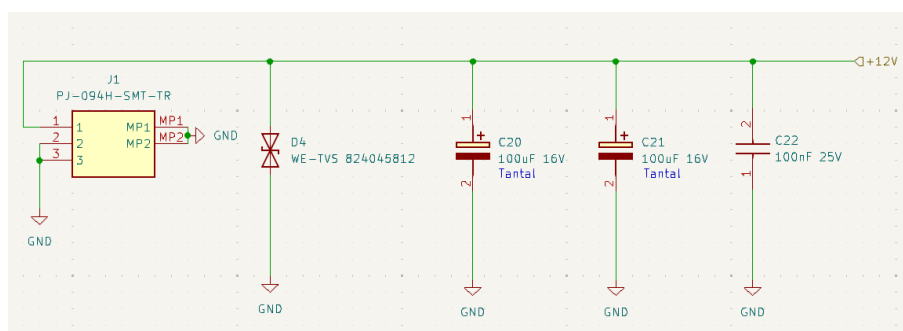
Kondensatory 100uF są kondensatorami tantalowymi, a kondensator 100nF jest kondensatorem ceramicznym. Wykorzystano te rodzaje kondensatorów, ponieważ są to kondensatory o długiej żywotności, a także są to kondensatory o małych rozmiarach w przeciwieństwie do kondensatorów elektrolitycznych.

3.2.3 Zabezpieczenia ESD

W celu zabezpieczenia linii przed przepięciami, wykorzystano diodę TVS firmy Wurth Elektronik o symbolu 824045812. Dioda ta jest diodą TVS o napięciu przebicia 13.3V, oraz napięciu stabilizacji 15V. Dioda musi mieć jak najmniejsze napięcie przebicia, by skok napięcia nie uszkodził rejestrów przesuwanych HV, które są wrażliwe na napięcia powyżej 13.2V.

Dioda ta została wybrana gdyż nie udało się znaleźć diody TVS o napięciu stabilizacji 13V. Transil ma również dużą pojemność, co powoduje, że nie jest ona zalecana do zastosowań z wysokimi częstotliwościami, jednak w tym przypadku nie jest to problemem, gdyż jest to tylko złącze zasilania o stałym napięciu.

3.2.4 Schemat



Rysunek 3.3: Schemat złącza DC-Plug

3.3 Złącze USB-C do programowania

3.3.1 Dobór złącza

Złącze usb musi posiadać przynajmniej 12 pinów, ponieważ dopiero w takim układzie jest na złączu są linie D+ i D-, czyli linie danych. Wybrano złącze 16 pinowe, ponieważ takie było dostępne w sklepie.

3.3.2 Opis podłączenia

Złącze USB-C będzie podłączone bezpośrednio do ESP32-S3, ponieważ posiada on wbudowany programator. By ustawić napięcie komunikacji USB-C na 3.3V, zastosowano rezystory podciągające R1 i R2 o wartości 5.1kΩ. Do podłączenia wykorzystano parę różnicową by połączyć linie D+ i D- z ESP32-S3, w celu zminimalizowania zakłóceń CMN (Common Mode Noise).

3.3.3 Zabezpieczenia ESD

W celu zabezpieczenia linii przed przepięciami, zastosowano diody TVS PUSB3AB4Z firmy Nexperia. Diody te mają wystarczająco duże opakowanie by dało się je zlutować ręcznie, napięciem roboczym jest 3.3V, a napięcie stabilizacji wynosi 5V.

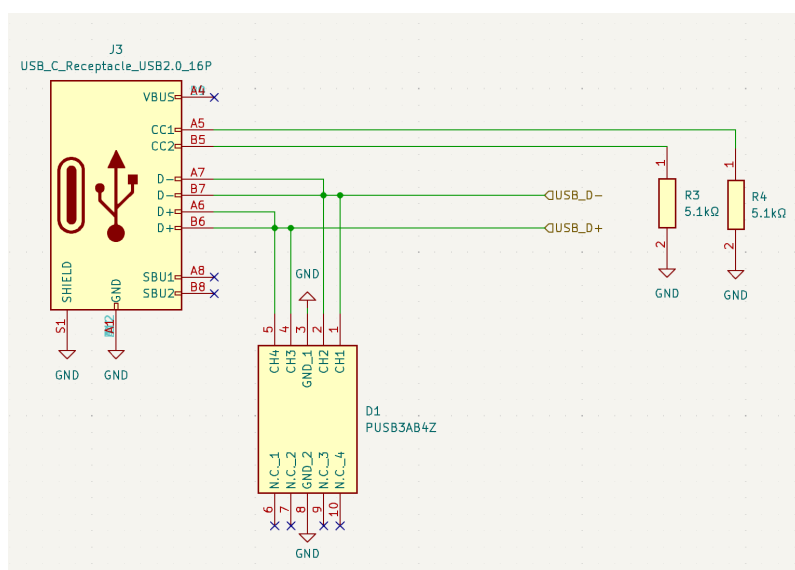
Mimo że jest to napięcie wyższe niż napięcie zasilania ESP32-S3, to nie powinno to stanowić problemu, ponieważ napięcie to pojawi się na krótki czas, a sam esp32-s3 ma również wbudowane zabezpieczenia przed przepięciami.

Wewnętrzne zabezpieczenia według noty katalogowej ESP32-S3:

- Test Standard JS-001; HBM (Human Body Mode) ± 2000 V
- Test Standard JS-002; CDM (Charged Device Model) ± 1000 V

Wynika z tego, że złącze USB-C w dość dobry sposób jest zabezpieczone przed przepięciami.

3.3.4 Schemat



Rysunek 3.4: Schemat złącza USB-C do programowania

3.4 Przetwornica 12V na HV

3.4.1 Wybór układu scalonego

Wybrano układ LM3488 produkcji Texas Instruments, który jest układem przeznaczonym do budowy przetwornicy typu Boost oraz Flyback. Jest to układ high efficiency, co jest powodem dla którego został wybrany.

3.4.2 Założenia projektowe

- Napięcie wejściowe: 12V
- Napięcie wyjściowe: 130-220V
- Prąd wyjściowy: 20mA
- 0.1V tętnienia napięcia wyjściowego
- Częstotliwość przełączania: 400kHz

Jako początkowe założenie przyjęto częstotliwość przełączania 400kHz zgodnie z domyślną wartością w nocie katalogowej układu, ale możliwe jest zwiększanie częstotliwości do 1MHz, co pozwala na zmniejszenie rozmiarów cewki oraz kondensatorów, natomiast może to pogorszyć sprawność układu, ponieważ według noty katalogowej wraz ze wzrostem częstotliwości spada wzmocnienie układu, co przekłada się na mniejszą sprawność.

3.4.3 Dobór cewki

Oszacowano wartość prądu cewki na podstawie założonego prądu wyjściowego:

$$I_l = \frac{V_{out} \cdot I_{out}}{V_{in}} = \frac{220 \cdot 0.02}{12} \approx 0.36A \quad (8)$$

Dodatkowe 30% prądu wyjściowego zostało dodane jako tętnienia prądu, co pozwala oszacować wartość maksymalnego prądu cewki:

$$I_{peak} = (1 + 0.3) \cdot I_l = 1.3 \cdot 0.36 \approx 0.468A \quad (9)$$

Wynika z tego, że potrzebna jest cewka o prądzie przewodzenia większym niż 0.5A.

Obliczono wypełnienie PWM, na podstawie wzoru:

$$D_{220} = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} = \frac{220 - 12}{220} \approx 0.945 \quad (10)$$

$$D_{130} = \frac{V_{out} - V_{in}}{V_{out}} = \frac{130 - 12}{130} \approx 0.908 \quad (11)$$

Zgodnie z notą katalogową układu LM3488, cewka powinna mieć wartość określaną wzorem:

$$L > \frac{D(1 - D)V_{in}}{2f_{sw}I_{out}} \quad (12)$$

Według dokumentacji I_{out} podczas obliczeń powinno stanowić 30% minimalnej wartości prądu wyjściowego:

$$I_{out} = 0.3 \cdot 20mA = 6mA \quad (13)$$

Dla napięcia wyjściowego 220V oraz napięcia wejściowego 12V oraz częstotliwości 400kHz otrzymano wartość cewki:

$$L_{220} > \frac{0.945 \cdot (1 - 0.945) \cdot 12}{2 \cdot 400000 \cdot 0.006} \approx 128.9\mu\text{H} \quad (14)$$

Natomiast dla napięcia wyjściowego 130V oraz napięcia wejściowego 12V oraz częstotliwości 400kHz otrzymano wartość cewki:

$$L_{130} > \frac{0.908 \cdot (1 - 0.908) \cdot 12}{2 \cdot 400000 \cdot 0.006} \approx 209.5\mu\text{H} \quad (15)$$

Napotkano problem z doбором cewki, ponieważ nie udało się znaleźć w sklepie cewki o wartości powyżej 200μH w rozsądnej cenie i odpowiednich rozmiarach. Dlatego zdecydowano się na zastosowanie cewki o wartości 180μH, która jest najbliższą wartością dostępną w sklepie. Wartość graniczna prądu cewki wynosi 0.9A, co jest wystarczającym zapasem prądowym.

W celu osiągnięcia założonego zakresu napięcia wyjściowego z użyciem wybranej cewki, zdecydowano się na zwiększanie częstotliwości przełączania do 500kHz. Obliczono wartość cewki dla napięcia wyjściowego 130V oraz napięcia wejściowego 12V oraz częstotliwości 500kHz:

$$L_{220} > \frac{0.945 \cdot (1 - 0.945) \cdot 12}{2 \cdot 500000 \cdot 0.006} \approx 103.1\mu\text{H} \quad (16)$$

$$L_{130} > \frac{0.908 \cdot (1 - 0.908) \cdot 12}{2 \cdot 500000 \cdot 0.006} \approx 167.6\mu\text{H} \quad (17)$$

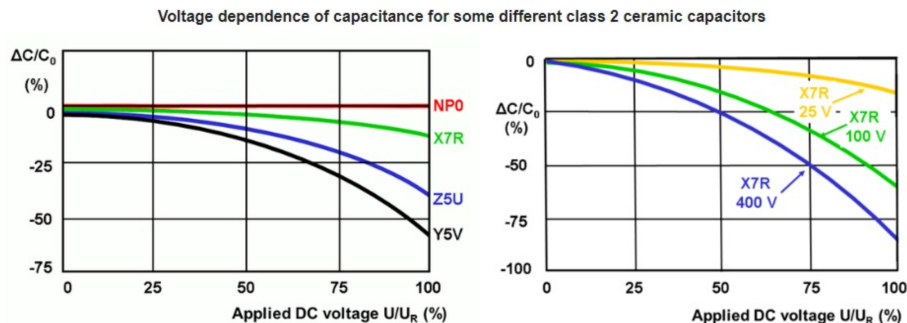
Z obliczeń wynika, że zwiększanie częstotliwości pozwala na zmniejszenie wartości cewki, co pozwala na zastosowanie cewki o wartości 180μH.

3.4.4 Dobór kondensatorów

Według zaleceń z noty katalogowej w przetwornicy powinny być zastosowane kondensatory o jak najniższym ESR, dlatego odrzucono kondensatory elektrolityczne na rzecz kondensatorów ceramicznych, które mają bardzo niski ESR, tak mały że producent nie podaje tej wartości w notach katalogowych, gdyż jest ona zbyt mała by miała znaczenie.

Jednak problem jest znalezienie kondensatorów ceramicznych dla wysokich napięć, mimo tego został znaleziony kondensator ceramiczny o wartości 2.2μF i napięciu pracy do 250V.

W obliczeniach należy uwzględnić spadek pojemności kondensatora wraz ze wzrostem napięcia. Wartości spadku pojemności dla kondensatora ceramicznego odczytano z następującego wykresu:



Rysunek 3.5: Spadek pojemności kondensatora ceramicznego wraz ze wzrostem napięcia

Wybrany kondensator jest klasy 2, wykonany z materiału X7R, co oznacza, że jego pojemność spadnie w przybliżeniu o 30% dla napięcia 220V. Zdecydowano się na zastosowanie 2 kondensatorów

o wartości $2.2\mu\text{F}$ połączonych równolegle w celu zminimalizowania tętnień napięcia wyjściowego. Ostatecznie pojemność oszacowana na:

$$C_{220} = 2 \cdot (1 - 0.3) \cdot 2.2\mu\text{F} = 3.08\mu\text{F} \quad (18)$$

Obliczono tętnienia dla dobranych wartości kondensatorów:

$$\Delta V_{220} = \frac{V_{out}}{2 \cdot \frac{V_{out}}{I_{out}} \cdot C} \cdot \frac{D}{f_{sw}} = \frac{220}{2 \cdot \frac{220}{0.02} \cdot 3.08\mu\text{F}} \cdot \frac{0.945}{500000} \approx 6.1\text{mV} \quad (19)$$

$$\Delta V_{130} = \frac{V_{out}}{2 \cdot \frac{V_{out}}{I_{out}} \cdot C} \cdot \frac{D}{f_{sw}} = \frac{130}{2 \cdot \frac{130}{0.02} \cdot 3.08\mu\text{F}} \cdot \frac{0.908}{500000} \approx 5.89\text{mV} \quad (20)$$

Wartości tętnień jest mniejsza niż założone 0.1V , co oznacza, że dobrano odpowiednie wartości kondensatorów.

3.4.5 Dobór diody

Oszacowano prąd diody na podstawie wzoru z noty katalogowej:

$$I_d = \frac{I_{out}}{1 - D} + \Delta I_{out} = \frac{0.02}{1 - 0.945} + 0.006 \approx 0.37\text{A} \quad (21)$$

Dioda powinna mieć prąd przewodzenia większy niż 0.4A oraz być szybką diodą shottky'ego, by zminimalizować straty w układzie.

Zdecydowano się na zastosowanie diody ES1G firmy Onsemi, która jest diodą super szybką, o prądzie przewodzenia 1A , co jest wystarczające dla tego zastosowania. Dioda ta ma maksymalne napięcie wsteczne 400V , co jest wystarczające.

3.4.6 Dobór tranzystora

Można założyć że prąd tranzystora to prąd cewki, czyli 0.468A . Zgodnie z noty katalogowej tranzystor powinien mieć następujące parametry:

- Napięcie minimalnie drain-source: 250V
- Jak najmniejszy $R_{DS(on)}$
- Prąd przewodzenia większy niż 0.5A
- Niskie napięcie progowe V_{TH}
- Jak najmniejszy ładunek bramki
- Wymaganego prąd bramki mniejszego niż 1A

Zdecydowano się na zastosowanie tranzystora N-Channel MOSFET TPH5200FNH firmy Toshiba, który ma następujące parametry:

- Napięcie drain-source: 250V
- $R_{DS(on)}$: 44m Ω
- Prąd przewodzenia: 26A
- Napięcie progowe: 2V
- Ładunek bramki: 22nC
- Rozpraszana moc: 2.5W

Prąd potrzebny na załączenie tranzystora można obliczyć na podstawie wzoru:

$$I_g = Q_g \cdot f_{sw} = 22\text{nC} \cdot 500000 = 11\text{mA} \quad (22)$$

Tranzystor ten spełnia wszystkie założenia, a także ma bardzo niskie $R_{DS(on)}$, co pozwala na zminimalizowanie strat w układzie.

Moc wydzielana na tranzystorze można obliczyć na podstawie wzoru:

$$P_{mos} = I_l^2 \cdot R_{DS(on)} = 0.468^2 \cdot 0.044 \approx 0.01\text{W} \quad (23)$$

Moc jest bardzo niska, co oznacza, że tranzystor nie będzie się nagrzewał, a także nie będzie wymagał radiatora.

3.4.7 Ustawienie napięcia wyjściowego

Napięcie wyjściowe będzie regulowane, dlatego zdecydowano się na zastosowanie potencjometru cyfrowego włączonego w obwód sprzężenia zwrotnego. Potencjometr cyfrowy będzie się komunikował z mikrokontrolerem za pomocą magistrali I2C, co pozwoli na zdalne ustawianie napięcia wyjściowego, by regulować jasność lamp.

Wybrano potencjometr cyfrowy MCP4018T-103E/LT firmy Microchip, który ma 128 poziomów ustawień, co pozwala na dokładne ustawienie napięcia wyjściowego, wybrano wartość 10k Ω , co pozwala na uzyskanie odpowiedniego zakresu ustawień napięcia wyjściowego.

Zgodnie z notą katalogową napięcie na pinie FB powinno wynosić 1.26V, napięcie to oznacza, że napięcie wyjściowe jest odpowiednie. Po przetestowaniu kilku kombinacji zdecydowano się na zastosowanie następujących rezystorów:

- $R_{fb1} = 2.49\text{M}\Omega$
- $R_{fb2} = 14.39\text{k}\Omega$

Obliczone napięcie na wyjściu dla potencjometru z nastawą 10k Ω :

$$V_{out} = 1.26 \cdot \left(1 + \frac{R_{fb1}}{R_{fb2} + R_{pot}}\right) = 1.26 \cdot \left(1 + \frac{2.49\text{M}\Omega}{14.39\text{k}\Omega + 10\text{k}\Omega}\right) \approx 130.4\text{V} \quad (24)$$

Obliczone napięcie na wyjściu dla potencjometru z nastawą 0 Ω :

$$V_{out} = 1.26 \cdot \left(1 + \frac{R_{fb1}}{R_{fb2} + R_{pot}}\right) = 1.26 \cdot \left(1 + \frac{2.49\text{M}\Omega}{14.39\text{k}\Omega}\right) \approx 220.6\text{V} \quad (25)$$

Uzyskano zakres napięcia wyjściowego od 130.4V do 220.6V, co jest zgodne z założeniami projektowymi.

3.4.8 Dobór rezystora ograniczającego prąd

Układ ma możliwość ustawienia limitu prądu jaki będzie płynąć przez tranzystor, co jest dodatkowym zabezpieczeniem przed uszkodzeniem tranzystora.

Najpierw obliczono wartość limitu szczytowego prądu przełączania zgodnie z notą katalogową:

$$I_{SW_{limit}} = \left(\frac{I_{out}}{1-D} + \frac{D \cdot V_{in}}{2 \cdot f_{sw} \cdot L} \right) = \left(\frac{0.02}{1-0.945} + \frac{0.945 \cdot 12}{2 \cdot 500000 \cdot 180\mu H} \right) \approx 0.426A \quad (26)$$

Następnie obliczono wartość rezystora ograniczającego prąd zgodnie z notą katalogową:

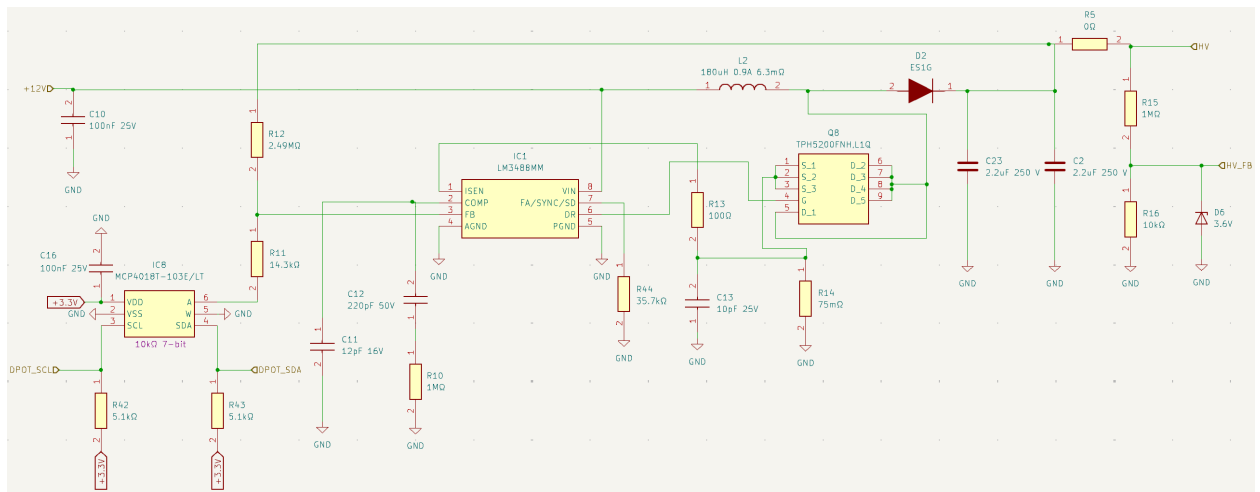
$$R_{sense} = \frac{V_{SENSE} - (D \cdot V_{SENSE} \cdot V_{SL-ratio})}{I_{SW_{limit}}} = \frac{156mV - (0.945 \cdot 156mV \cdot 0.49)}{0.426} \approx 74m\Omega \quad (27)$$

Następnie sprawdzono warunek na maksymalną wartość rezystora ograniczającego prąd:

$$R_{sense} < \frac{2 \cdot V_{SL} \cdot f_{sw} \cdot L}{V_{out} - (2 \cdot V_{IN})} = \frac{2 \cdot 92mV \cdot 500000 \cdot 180\mu H}{220 - (2 \cdot 12)} \approx 84m\Omega \quad (28)$$

Zdecydowano się na zastosowanie rezystora o wartości 75mΩ, który spełnia wszystkie założenia. Został również dodany kondensator o wartości 10pF w celu zminimalizowania tętnień napięcia na rezystorze, oraz rezystor kompensujący 100Ω.

3.4.9 Schemat



Rysunek 3.6: Schemat przetwornicy 12V na HV

Bibliografia

- [1] *ISM330DHCX*. DS13012. Rev. 7. STMicroelectronics. List. 2020. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/ism330dhcx.pdf>.

Spis rysunków

2.1	Prototyp układu z lampą nixie przy napięciu zasilania 150 V	9
2.2	Prototyp układu z lampą nixie przy napięciu zasilania 220 V	10
2.3	Schemat blokowy układu	13
3.1	Tabela doboru komponentów z noty katalogowej	14
3.2	Schemat złącza DC-Plug	15
3.3	Schemat złącza DC-Plug	16
3.4	Schemat złącza USB-C do programowania	17
3.5	Spadek pojemności kondensatora ceramicznego wraz ze wzrostem napięcia	19
3.6	Schemat przetwornicy 12V na HV	22

Spis tablic