

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.

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.

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:

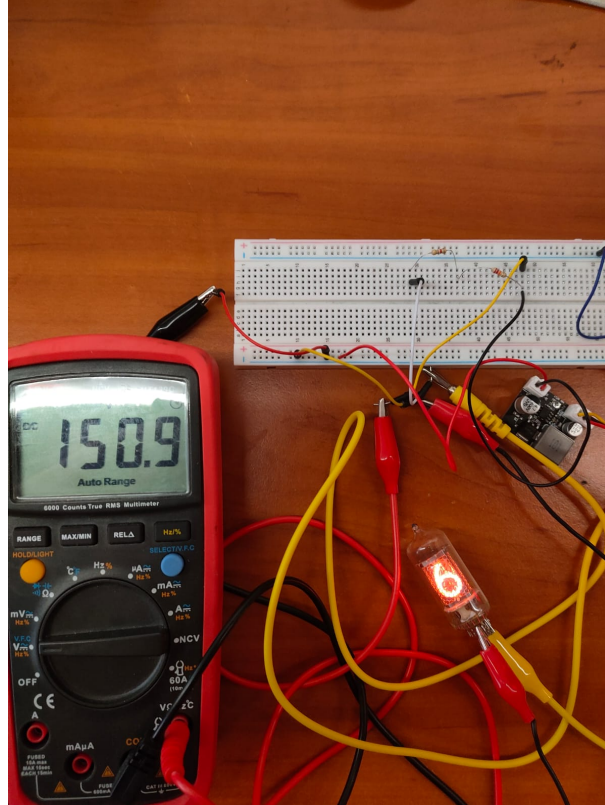
- Napięcie wejściowe: 5 – 12 V
- Napięcie wyjściowe: 150 – 220 V
- Prąd wyjściowy: 20 mA

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:

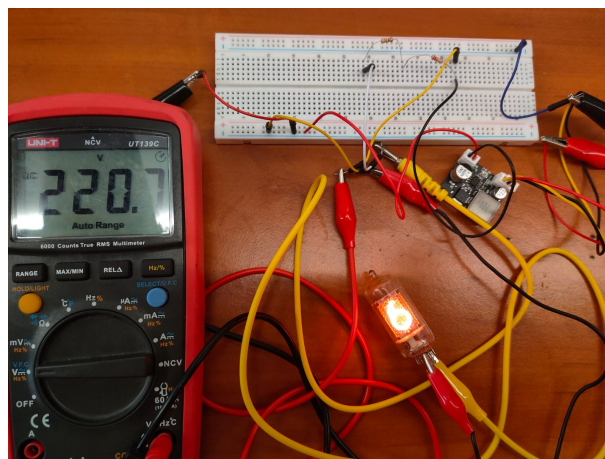
$$R = \frac{U_{\max} - U_{\text{zap}}}{I_{\text{kat}}} = \frac{220 \text{ V} - 150 \text{ V}}{2 \text{ mA}} = 35 \text{ k}\Omega \quad (1)$$

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 1: Prototyp układu z lampą nixie przy napięciu zasilania 150 V



Rysunek 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 lampka świeci słabiej, ale jest to zgodne z oczekiwaniami, natomiast przy napięciu 220 V lampka 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.
- Dobrany 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.

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.

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.

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:

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

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

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

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:

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

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

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

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

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

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

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

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.

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 zatraskiem, aby uniknąć efektu ghostingu.

W projekcie zdecydowano się na wykorzystanie rejestrów przesuwanych HV. Znalezione 32 kanałowy rejestr HV5530PG-G firmy Microchip mogące pracować z napięciem do 300 V oraz posiadające zatrask 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 zatrasku co sekundę, aby zmienić ich stan.

Koncepcja sterowania paskami LED