

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická

Katedra teórie obvodov
Lekárska elektronika a bioinformatika



Riadiaca jednotka pre LED svetelné zdroje

Control unit for LED light sources

DIPLOMOVÁ PRÁCA

Vypracoval: Jakub Michalovič
Vedúci práce: Ing. Jan Havlík, Ph.D.
Rok: 2024

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Michalovič** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **491954**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra teorie obvodů**
Studijní program: **Lékařská elektronika a bioinformatika**
Specializace: **Lékařská technika**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Řídicí jednotka pro LED světelné zdroje

Název diplomové práce anglicky:

Control Unit for LED Lights

Pokyny pro vypracování:

Seznamte se s problematikou řízení LED světelných zdrojů a jejich aplikacemi např. pro fototerapii nebo biodynamického osvětlování. Navrhněte a realizujte řídicí jednotku světelné zdroje s jedním nebo více nezávisle řízenými LED panely a ověřte její funkčnost.

1. Seznamte se s problematikou řízení LED světelných zdrojů a s možností jejich využití v oblasti biomedicínského inženýrství (např. fototerapie nebo biodynamické osvětlovací systémy).
2. Navrhněte a realizujte řídicí jednotku pro řízení světelných zdrojů s jedním nebo více nezávisle řízenými LED panely a implementujte minimální firmware pro ověření její funkčnosti.
3. Ověřte funkčnost realizovaného zařízení.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Benedetti, F., Barbini, B., Colombo, C., & Smeraldi, E. (2007). Chronotherapeutics in a psychiatric ward. *Sleep Medicine Reviews*, 11(6), 509–522. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2007.06.004>
- [2] Cajochen, C., Freyburger, M., Basishvili, T., Garbazza, C., Rudzik, F., Renz, C., Kobayashi, K., Shirakawa, Y., Stefani, O., & Weibel, J. (2019). Effect of daylight LED on visual comfort, melatonin, mood, waking performance and sleep. *Lighting Research and Technology*, 51(7), 1044–1062. <https://doi.org/10.1177/1477153519828419>
- [3] Nussbaumer-Streit B, Forneris CA, Morgan LC, Van Noord MG, Gaynes BN, Greenblatt A, Wipplinger J, Lux LJ, Winkler D, G. G. (2019). Light therapy for preventing seasonal affective disorder. <https://doi.org/10.1002/14651858.CD011269.pub3>.
- [4] [https://cs.wikipedia.org/wiki/DALI_\(rozhraní\)](https://cs.wikipedia.org/wiki/DALI_(rozhraní))

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Jan Havlík, Ph.D. katedra teorie obvodů FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **02.02.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: _____

Platnost zadání diplomové práce: **21.09.2025**

Ing. Jan Havlík, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

doc. Ing. Radoslav Bortel, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prehlásenie

Prehlasujem, že predloženú prácu som vypracoval samostatne a uviedol som všetkú použitú literatúru a zdroje v súlade s Metodickým pokynom o dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.

V Prahe dne

.....

Jakub Michalovič

Podakovanie

Ďakujem Ing. Janovi Havlíkovi, Ph.D. za vedenie mojej diplomovej práce a za podnetné návrhy, ktoré ju obohatili.

Jakub Michalovič

Název práce:

Riadiaca jednotka pre LED svetelné zdroje

Autor: Jakub Michalovič

Studijní program: Lekárska elektronika a bioinformatika

Druh práce: Diplomová práca

Vedoucí práce: Ing. Jan Havlík, Ph.D.

Katedra teórie obvodov, FEL ČVUT v Prahe

Abstrakt: Diplomová práca je pokračovaním bakalárskej práce autora, ktorá sa zaoberala riadením LED svetelného zdroja pre fototerapiu. Táto práca sa zameriava návrhom a realizáciou ďalších vývojových verzii riadiacej jednotky s dvoma druhmi procesorov. V teoretickej časti sa zameria na štúdium a porovnanie rôznych metód modulácie signálu na riadenie jasú LED osvetlenia. V súčasnej dobe je riadenie jasú LED svetelných zdrojov neoddeliteľnou súčasťou moderných osvetľovacích systémov, ktoré sa používajú v rôznych aplikáciách od domácich osvetlení až po profesionálne osvetlenie v komerčných a priemyselných prostrediach. Jedným z kľúčových aspektov tohto riadenia je vhodná metóda modulácie signálu, ktorá ovplyvňuje efektivitu, presnosť a výkonnosť osvetlenia. Výsledkom tieto práce je pokročilá, funkčná a efektívna riadiaca jednotka pre svetelný zdroj s využitím protokolu DALI, ktorá poskytne rozšírené možnosti riadenia a konfigurácie osvetlenia.

Klíčová slova: riadenie jasú, riadiaca jednotka, ESP8266, ESP32, protokol DALI

Title:

Control unit for LED light sources

Author: Jakub Michalovič

Abstract: The thesis is a continuation of the author's bachelor thesis, which dealt with the control of LED light source for phototherapy. This thesis focuses on the design and implementation of further development versions of the controller with two kinds of processors. The theoretical part will focus on the study and comparison of different signal modulation methods to control the brightness of LED lighting. Nowadays, brightness control of LED light sources is an integral part of modern lighting systems, which are used in a variety of applications ranging from domestic lighting to professional lighting in commercial and industrial environments. One of the key aspects of this control is the appropriate signal modulation method, which affects the efficiency, accuracy and performance of the lighting. The result of this work is an advanced, functional and efficient light source control unit using the DALI protocol that will provide enhanced lighting control and configuration options.

Key words: brightness control, control unit, ESP8266, ESP32, DALI protocol

Obsah

| | |
|---|-----------|
| Zoznam obrázkov | xi |
| 1 Úvod | 1 |
| 1.1 Cieľ diplomovej práce | 2 |
| 1.2 Motivácia | 2 |
| 2 Predradníky pre LED svetelné zdroje | 3 |
| 2.1 Modulácia signálu | 4 |
| 2.1.1 PWM (Pulse-Width Modulation) | 4 |
| 2.1.2 0-10 V analógový signál | 5 |
| 2.1.3 Hybridné metódy | 5 |
| 2.2 Čo je to zbernica? | 6 |
| 2.2.1 Typy zberníc pre LED svetelné zdroje | 6 |
| 3 Hardware riadiacich jednotiek | 11 |
| 3.1 ESP8266 vs. ESP32 | 11 |
| 3.2 DALI zbernica | 14 |
| 3.3 RTC hodiny DS3231 | 15 |
| 4 Návrh riadiacich jednotiek | 17 |
| 4.1 Schémy a návrhy riadiacich jednotiek | 18 |
| 4.1.1 Riadiaca jednotka s procesorom ESP8266 | 18 |
| 4.1.2 Riadiaca jednotka s procesorom ESP32 | 25 |
| 4.2 Porovnanie | 26 |
| 5 Výroba riadiacich jednotiek | 29 |
| 5.1 Zistené chyby pri výrobe dosky s ESP8266 a ich riešenie | 29 |
| 5.2 Zistené chyby pri výrobe dosky s ESP32 a ich riešenie | 31 |
| 6 Testovanie riadiacich jednotiek | 33 |
| 6.1 Riadiaca jednotka s procesorom ESP8266 | 33 |
| 6.2 Riadiaca jednotka s procesorom ESP32 | 35 |
| Záver | 37 |
| Bibliografia | 39 |
| Prílohy | 43 |
| A Schéma riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 | 43 |
| B Návrh dosky plošného spoja s procesorom ESP8266 | 44 |
| C Náhľad verzie s procesorom ESP8266 | 45 |
| D Náhľad verzie s procesorom ESP8266 | 46 |
| E Náhľad verzie s procesorom ESP8266 | 47 |

| | | |
|---|---|----|
| F | Schéma riadiacej jednotky s procesorom ESP32 | 48 |
| G | Návrh dosky plošného spoja s procesorom ESP32 | 49 |
| H | Náhľad verzie s procesorom ESP32 | 50 |
| I | Náhľad verzie s procesorom ESP32 | 51 |
| J | Náhľad verzie s procesorom ESP32 | 52 |

Zoznam obrázkov

| | | |
|-----|--|----|
| 2.1 | Zapnutie/vypnutie LED svetelného zdroja pomocou PWM. [6] | 4 |
| 2.2 | Pripojenie svetelného zdroja pomocou analógového predradníka k DALI sieti cez bránu.[10] | 5 |
| 2.3 | DALI systém graficky. [9] | 6 |
| 2.4 | Príklad zapojenia schémy DALI/DALI 2. [17] | 7 |
| 2.5 | Príklad zapojenia schémy DMX. [20] | 8 |
| 3.1 | Komerčne predávaný procesor ESP8266 s Wifi modulom.[24] | 12 |
| 3.2 | Komerčne predávaný procesor ESP32.[25] | 13 |
| 3.3 | Základné rozdiely medzi procesormi ESP8266 a ESP32.[23], [26] | 13 |
| 3.4 | Nákres využitia aplikácie DALI zbernice so svetelnými zdrojmi. [27] | 14 |
| 3.5 | Komerčne predávaný modul RTC hodín DS3231.[28] | 16 |
| 4.1 | Schéma procesora ESP8266 zobrazujúca zapojenie GPIO pinov na periférie. | 19 |
| 4.2 | Schéma napájania procesora pomocou CH340G, ktoré umožňuje nahrávanie softvéru do mikrokontroléru. Zapojenie je prebrané z bakalárskej práce. [29] | 19 |
| 4.3 | Schéma zapojenia DALI zbernice, ktorá slúži na komunikáciu so svetelnými zdrojmi. Riešenie je prebraté z bakalárskej práce, nakoľko nebol dôvod ho meniť z hľadiska jeho spoľahlivej funkčnosti. [29] | 20 |
| 4.4 | Schéma zapojenia RTC hodín bez EEPROM pamäte. | 21 |
| 4.5 | Grafický návrh umiestnenia procesora ESP8266 s napájaním pomocou USB, vďaka ktorému konfigurujeme procesor. | 22 |
| 4.6 | Grafický návrh DALI zbernice umiestnenej na PCB doske. Poloha zbernice nie je umiestnená náhodou. Nachádza sa v ľavom hornom rohu pre ľahkú manipuláciu so svorkami pre napájanie a ovládanie LED svetelného zdroja. | 23 |
| 4.7 | Grafický návrh RTC hodín DS3231. Umiestnené sú v ľavom dolnom rohu oproti DALI zbernici. Na obrázku môžeme vidieť slot pre batérku LIR 2032 3,6V [29]. Na tomto návrhu sa už nenachádza spomínaná EEPROM pamäť. | 24 |
| 4.8 | Schéma procesora ESP32 zobrazujúca zapojenie GPIO pinov na periférie. | 25 |
| 4.9 | Grafický návrh umiestnenia procesora ESP32 s napájaním pomocou USB. | 26 |
| 5.1 | Oprava prepojenia medzi pinom GPIO0 a tranzistorom Q2 na vyrobenej testovacej doske s procesorom ESP8266. | 30 |
| 5.2 | Vymenený čip CH340G na riadiacej jednotke s procesorom ESP32. | 31 |
| 5.3 | Hlásenie chyby, ktorú nám ukazovalo Arduino IDE. | 32 |

| | | |
|-----|--|----|
| 5.4 | Oprava komunikácie s programovacím prostredím. Piny GPIO0 a GPIO2 sme pripojili na GND. | 32 |
| 6.1 | Testovanie riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 v školskom laboratóriu. | 33 |
| 6.2 | Výpis z príkazového riadka "Serial Monitor" pri testovaní dosky s procesorom ESP8266. | 34 |
| 6.3 | Ukážka príkazov z kódu. | 34 |
| 6.4 | Výpis z terminálu Arduino IDE počas testu funkcie hodín riadiacej jednotky. | 35 |
| 6.5 | Výpis z terminálu Arduino IDE počas testu funkcie DALI zbernice. | 35 |
| 6.6 | Testovanie riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 v školskom laboratóriu. | 36 |
| 6.7 | LED panely, ktoré sme využívali pri testovaní riadiacich jednotiek. | 36 |
| 8 | Schéma zapojenia riadiacej jednotky s procesorom ESP8266, ktorá je výsledkom tejto diplomovej práce. | 43 |
| 9 | Celkový návrh verzie dosky plošných spojov riadiacej jednotky s procesorom ESP8266. Rozmery dosky sú 6,5x9 cm. | 44 |
| 10 | Náhľad na hornú stranu riadiacej jednotky. | 45 |
| 11 | Náhľad na spodnú stranu riadiacej jednotky. | 46 |
| 12 | Plán osadenia súčiastok na doske s procesorom ESP8266. | 47 |
| 13 | Schéma zapojenia riadiacej jednotky s procesorom ESP32, ktorá je výsledkom tejto diplomovej práce. | 48 |
| 14 | Celkový návrh verzie dosky plošných spojov riadiacej jednotky s procesorom ESP32. Rozmery dosky sú 6,5x9 cm. | 49 |
| 15 | Náhľad na hornú stranu riadiacej jednotky. | 50 |
| 16 | Náhľad na spodnú stranu riadiacej jednotky. | 51 |
| 17 | Plán osadenia súčiastok na doske s procesorom ESP32. | 52 |

Kapitola 1

Úvod

V súčasnej dobe, v období rýchleho technologického pokroku, hrá osvetlenie kľúčovú rolu v našom každodennom živote. Návrh a implementácia inteligentných osvetľovacích systémov sa stávajú neoddeliteľnou súčasťou moderných budov, domácností ale aj predovšetkým lekárskeho prostredia v oblasti liečenia duševných chorôb. V tejto súvislosti sa značná pozornosť venuje efektívnym a úsporným riešeniam pre riadenie osvetlenia. Predradníky, ktoré regulujú prívod energie do svetelných zdrojov, predstavujú kritický prvok týchto systémov.

V prvej časti diplomovej práce sa zmeriame na rôznorodosť typov predradníkov a zberníc pre riadenie LED svetelných zdrojov. Špecificky sa zameriame na využitie protokolu Digital Addressable Lighting Interface (DALI) ako prostriedku komunikácie s predradníkmi LED. Protokol DALI je štandardizovaným a spoľahlivým spôsobom riadenia osvetlenia, ktorý ponúka vysokú flexibilitu a adresovateľnosť.

V ďalšej časti tejto diplomovej práce sa pozrieme na aktuálny stav vývoja a výsledky PCB dosky, ktorá využíva zbernicu DALI na efektívne riadenie predradníkov LED svetelných zdrojov. Vznikli dve vyhotovenie riadiacej jednotky. Prvá je pokročilejšou verziou bakalárskej práce s procesorom ESP8266. Druhá je riadená výkonejším procesorom ESP32. Budeme analyzovať existujúce technológie a postupy v návrhu a implementácii riadiacich jednotiek pre osvetlenie a identifikovať vylepšenia a optimalizácie v ďalších vývojových verziách.

Ako som spomínal vyššie, táto diplomová práca je pokračovaním bakalárskej práce spred dvoch rokov. Témou bakalárskej práce bolo sa zoznámiť s problematikou fototerapie, biokompatibilného osvetlenia a možnosťami ich využitia k podpore liečby duševných ochorení. Zároveň navrhnuť a realizovať riadiacu jednotku pre biokompatibilný LED svetelný zdroj a následne otestovať jej funkčnosť. V predošlej práci sme sa venovali aj výberu konkrétnych súčiastok a dôvodom, prečo sme ich zvolili.

1.1 Cieľ diplomovej práce

Cieľom tejto diplomovej práce je navrhnúť, realizovať a odtestovať pokročilejšiu riadiacu jednotku v dvoch vyhotoveniach pre ovládanie LED svetelných zdrojov. Prvú verziu riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 a druhá verzia s procesorom ESP32. Analyzovať a porovnať rôzne metódy modulácie signálu na riadenie LED osvetlenia, vrátane metód PWM, analógovej modulácie a hybridných prístupov. Riadiaca jednotka sa bude využívať v inteligentných interiérových lampách určených pre minimalizovanie vzniku duševných chorôb. V neposlednom rade porovnáme dve vyhotovenia riadiacej jednotky.

1.2 Motivácia

Po bakalárskej práci bolo mojou motiváciou dokončiť moju už začatú prácu. Preto je v mojom záujme pokračovať v ďalšom vývoji v rámci diplomovej práce a zároveň posunúť môj vlastný výrobok na vyššiu úroveň. Taktiež som mal možnosť si rozšíriť vedomosti v oblasti riadenia svetelných zdrojov. Som veľmi rád, že moja práca má zmysel a riadiaca jednotka sa bude používať v reálnom produkte, ktorý budú využívať ľudia okolo mňa.

Kapitola 2

Predradníky pre LED svetelné zdroje

Predradník pre LED svetelný zdroj je zariadenie, ktoré reguluje prúd a napätie dodávané do LED diód. Jeho hlavným účelom je zabezpečiť, aby LED diódy pracovali v optimálnych podmienkach. [1] Tieto predradníky môžu byť navrhnuté rôznymi spôsobmi v závislosti od požiadaviek na konkrétnu aplikáciu a typu LED. V skratke je funkcia predradníka zabezpečiť stabilný a bezpečný prúd a napätie pre LED diódy tak, aby pracovali spoľahlivo a efektívne. Predradník je zapojený medzi napájaním a jedným, či niekoľkými svetelnými zdrojmi. [2]

V minulosti sa používali predovšetkým elektromagnetické alebo magnetické predradníky (tlmivky, štartéry, atď.), v súčasnej dobe sa dáva prednosť elektronickým predradníkom. Elektronický predradník má narozdiel od magnetického nižšiu váhu, menšie rozmery, šetrí spínaný zdroj a predlžuje jeho životnosť. Spotrebuje tiež omnoho menej elektrickej energie a má tiež nižšiu produkciu odpadného tepla. Má tichší chod. Vďaka vysokofrekvenčnému napätiu poskytuje svetlo s elektronickým predradníkom kludné svetlo bez chvenia. Predovšetkým sa svetelný zdroj ihneď rozsvieti a nedôjde tak ku opozaďovaniu a nepríjemnému blikaniu. [3]

Predradníky využívajú viacero funkcií k správnej a šetrnej ovládaniu svetelných zdrojov. Tieto konkrétne funkcie zabezpečujú hlavne ochranu pred nežiadúcim fungovaním a poškodením svetelného zdroja. Jednou z najdôležitejších funkcií je regulácia prúdu. Predradníky dokážu regulovať prúd prechádzajúci LED diódami na hodnotu, ktorá zabezpečí optimálny a bezpečný chod diód, aby neboli zbytočne poškodzované a neskracovala sa ich životnosť, prípadne nezvyšovala poruchovosť. Vďaka stabilizácii napätia chránime diódy pred kolísavým napätím z elektrickej siete. Predradníky môžu byť navrhnuté aj tak, aby boli kompatibilné s konkrétnym napätím elektrickej siete. Je to z dôvodu využívania iných frekvencií a elektrických hodnôt v rôznych častiach sveta. Využívajú mechanizmy ako detekcia skratu, tepelné ochrany, napäťové ochrany a ďalšie. Tieto ochrany sa využívajú pred nežiadúcim skratom alebo prípadným preťažením. V tejto oblasti sa myslí aj na potrebu šetrenia elektrickej energie a preto predradníky disponujú aj funkciou šetrenia elektriny, napríklad pomocou regulácie jasnosti. [1], [2], [3]

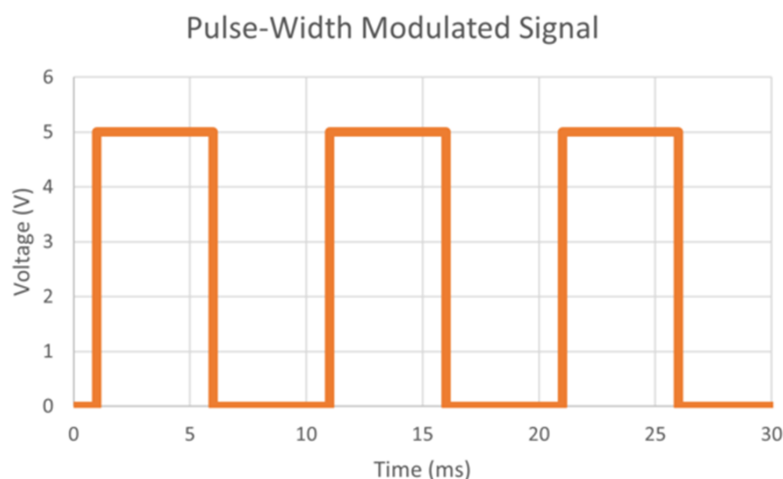
Spojením moderných predradníkov s dostatočne vyspelou zbernicou môžeme poskytovať aj adekvátnu zdravotnú starostlivosť v oblasti liečenia duševných chorôb pomocou fototerapie. Dokonca vieme zlepšiť prevenciu a to využívaním kvalitnejších svetelných zdrojov v pracovnom alebo domácom prostredí, vďaka úprave vlnovej dĺžky svetla počas dňa. Úpravou vlnovej dĺžky sa myslí napodobňovanie slnečného svetla počas celého dňa. [4]

2.1 Modulácia signálu

Predradníky využívajú viaceré metódy modulácie signálu na reguláciu jasů, intenzity a farby LED (vlnových dĺžok). V nasledujúcej časti si predstavíme typy modulácii signálu na ovládanie svetelných zdrojov.

2.1.1 PWM (Pulse-Width Modulation)

Táto metóda sa využíva na analógové riadenie jasů LED pomocou zmeny šírky pulzového signálu, ktorý je posielaný do LED svetelných zdrojov. Dlhšie pulzy zodpovedajú vyššiemu jasů a kratšie pulzy nižšiemu jasů. Jednoducho povedané, PWM mení čas, počas ktorého je dioda v stave “on” alebo “off”. Využíva sa v širokej škále svetelných zdrojov a technologických aplikácií, ako napríklad pri osvetľovaní miestností, v monitoroch, displejoch, pri svetelných efektoch. PWM využíva niekoľko kľúčových charakteristík. Impulzná šírka je časový interval, v ktorom je LED dioda v stave “on”. Vyššia impulzná šírka sa rovná vyššiemu jasů a nižšia impulzná šírka nižšiemu jasů. [5]



Obr. 2.1: Zapnutie/vypnutie LED svetelného zdroja pomocou PWM. [6]

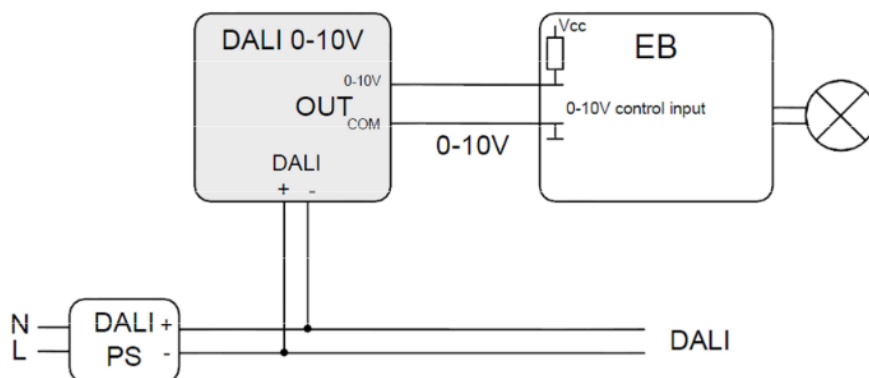
Frekvencia PWM udáva, ako rýchlo sa menia impulzy. Bežne sa používajú kmitočty v intervale od jednotiek až po stovky kHz. Lineárna riadiaca charakteristika predstavuje lineárne zmeny impulznej šírky o určitý percentuálny krok, ktoré spôsobia rovnakú percentuálnu zmenu jasů. [5]

2.1.2 0-10 V analógový signál

Jednoduchý, spoľahlivý, robustný a tradičný spôsob riadenia svetelných zdrojov, ktorý sa používa na riadenie jasov svetelných zdrojov. Vhodný pre systémy, kde nie je potrebné komplexné riadenie farieb a programovateľných scén. 0-10V analógový signál pracuje na princípe zmeny napätia medzi dvoma hodnotami: 0V a 10V. Toto napätie je použité na nastavenie jasov svetla. Pri 0V je svetlo vypnuté, zatiaľ čo pri 10V je nastavený maximálny jas. Svetelný zdroj, ktorý podporuje 0-10V riadenie, je vybavený vstupom pre prijímanie analógového signálu. [7] Tento vstup je často označovaný ako "0-10V dimming input". Ak chceme nastaviť jas svetla, pošleme na vstup svietidla určitý napätý signál medzi 0V a 10V. Napríklad, ak pošlete 5V, svetlo sa stane polovične jasné. 0-10V riadenie má lineárnu riadiacu charakteristiku, čo znamená, že zmena napätia o určitý percentuálny krok spôsobí rovnakú percentuálnu zmenu jasov. Toto umožňuje presné riadenie jasov na rôznych úrovniach. 0-10V analógové riadenie má niektoré obmedzenia. Napríklad nie je vhodné na riadenie farebných LED svetelných zdrojov, pretože nemôže riadiť farebné parametre. Tak tiež nemá funkcie, ako sú programovateľné scény alebo časovače. [8] Tento prístup sa často používa v starších nízkonákladových osvetľovacích systémoch alebo tam, kde nie je potrebná presná digitálna regulácia jasov, ako je to pri PWM alebo iných digitálnych metódach.

2.1.3 Hybridné metódy

Niektoré typy predradníkov sa môžu kombinovať s analógovou moduláciou pre optimalizáciu riadenia jasov a dosiahnutie žiadanej farebnosti a farebného podania svetla. Tieto metódy môžu byť vhodné pre špecifické aplikácie, kde je potrebné dosiahnuť špecifické vlastnosti svetelného výstupu. Ako príklad môžeme uviesť kombináciu analógového signálu (0-10V) so systémom DALI alebo KNX. Je potrebné použiť prevodník, ktorý je možné identifikovať v DALI sieti, kedy sa prevodník správa ako analógový ovládač. [8], [9]



Obr. 2.2: Pripojenie svetelného zdroja pomocou analógového predradníka k DALI sieti cez bránu.[10]

2.2 Čo je to zbernica?

Zbernica je komunikačný kanál, ktorý umožňuje prenos dát medzi elektronickými zariadeniami. Je to prostriedok, vďaka ktorému môžu zariadenia v rámci systému komunikovať. Zbernice sa používajú vo veľkom rozsahu aplikácií, od počítačových systémov po priemyselné prístroje.

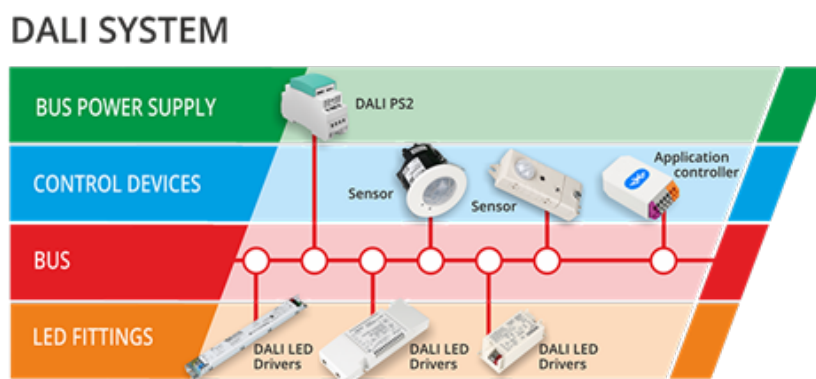
V dnešnej dobe existuje veľa rôznych typov zberníc, ktoré odlišujeme na základe svojich vlastností, protokolov komunikácie a fyzických rozhraní. Medzi najčastejšie používané zbernice patria USB, Ethernet, HDMI, SPI, I2C, CAN, RS-232 a ďalšie. Každá zbernica je vhodná pre konkrétne aplikácie.

2.2.1 Typy zberníc pre LED svetelné zdroje

Zbernice sa využívajú na reguláciu a jas a farby LED (vlnových dĺžok).

DALI (Digital Addressable Lighting Interface)

Digitálna zbernica navrhnutá na riadenie a komunikáciu s LED svetelnými zariadeniami. Umožňuje presné, flexibilné a efektívne riadenie. Digitálna povaha tejto zbernice vytvára priestor pracovať s rôznymi scenármi osvetlenia a zvyšovať energetickú úsporu. V jednoduchosti popíšem podstatu fungovania DALI. Každé LED svetlo pripojené k DALI má adresovateľné svetlá a senzory, to znamená, že každé svetlo má svoj vlastný unikátny adresačný kód (IP adresa). [11] To umožňuje individuálne riadenie a monitorovanie každého svetelného zariadenia v systéme. Pomocou digitálnej komunikácie môžeme prispôbovať nastavenia svetiel podľa potreby. Napríklad jas, farby, scény na základe rôznych situácií alebo časových rozvrhov. K DALI je možné pripojiť napr. aj senzor dymu na detekciu požiaru (automatické zvýšenie jasú sietidiel pre lepšiu viditeľnosť a evakuáciu), detekciu pohybu, meranie osvetlenia a atď. Aj keď každé svetlo je individuálne riaditeľné, systém DALI umožňuje aj centralizované riadenie. [12] To znamená, že môžete ovládať skupiny svetiel súčasne alebo nastaviť globálne parametre pre celú miestnosť alebo budovu. Systém DALI umožňuje monitorovanie stavu a výkonu svetiel a senzorov. To umožňuje detekovať poruchy, zhromažďovať údaje o spotrebe energie a iné dôležité informácie. [13]



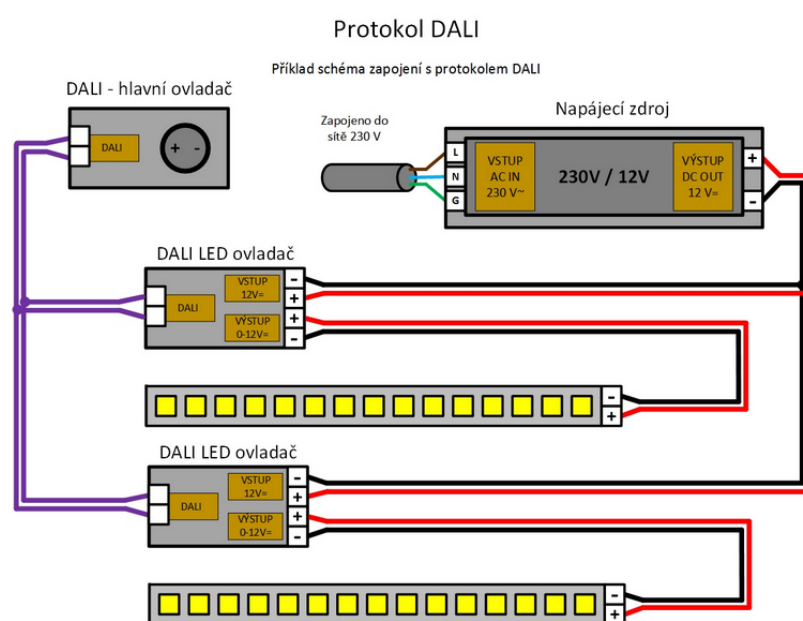
Obr. 2.3: DALI systém graficky. [9]

DALI 2

DALI-2 je digitálna zbernica, ktorá sa používa na riadenie osvetlenia. Je to pokročilá verzia pôvodného DALI, ktorá prináša niekoľko vylepšení, vrátane väčšieho počtu adries pre pripojené zariadenia a zvýšených možností komunikácie. DALI-2 môže byť integrovaná do inteligentných budovných systémov, čo umožňuje komplexné riadenie osvetlenia spolu s inými funkciami budovy. [14]

V tomto odstavci uvediem niekoľko príkladov porovnania s predchádzajúcou verziou DALI. Pôvodné DALI podporovalo iba 64 adresovateľných svetelných zdrojov. V prípade, že ste mali viac svetiel, museli ste ich zapojiť do rôznych segmentov. DALI-2 umožňuje až 64 496 adries, čo je obrovské zvýšenie a umožňuje riadiť až tisíce svietidiel z jedného zariadenia. Pôvodné DALI poskytovalo iba základné riadenie jasů, zatiaľ čo DALI-2 prináša možnosť riadiť farbu svetla a vytvárať skupiny svetiel pre lepšiu kontrolu a vytváranie rôznych osvetlených scén. DALI-2 stanovuje presné špecifikácie a požiadavky, ktoré zariadenia musia spĺňať, aby získali certifikáciu. To zabezpečuje, že všetky zariadenia označené ako "DALI-2 kompatibilné" budú interoperabilné, čo zjednodušuje inštaláciu a rozširovanie osvetlenia. Novšia verzia DALI umožňuje podrobnejšie monitorovanie stavu a výkonu svetiel a senzorov. To zahŕňa sledovanie spotreby energie, informácie o chybách a diagnostické funkcie pre jednotlivé svetelné zdroje. Systém DALI-2 umožňuje nastavenie sofistikovaných osvetlených scén a programovateľných časovačov, čo umožňuje ešte presnejšie prispôsobenie svetelných efektov podľa konkrétnych potrieb a situácií. [15]

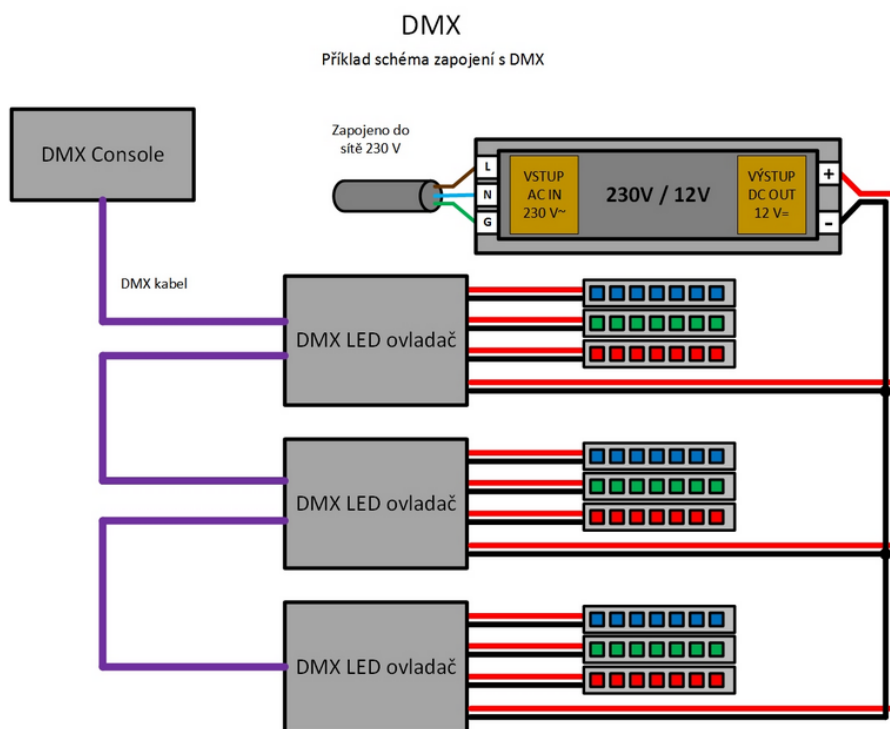
Pokročilejšia verzia DALI sa ľahko integruje s inými budovnými systémami, ako sú BMS (Building Management Systems) a HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning), čo umožňuje komplexné riadenie osvetlenia a jeho koordináciu s ďalšími aspektmi riadenia budovy. Protokol komunikácie DALI-2 zabezpečuje bezpečnú a spoľahlivú komunikáciu medzi zariadeniami. Šifrovanie a autentifikácia zariadení zvyšujú bezpečnosť komunikácie. [16]



Obr. 2.4: Príklad zapojenia schémy DALI/DALI 2. [17]

DMX (Digital Multiplex)

DMX sa používa hlavne na riadenie svetelných efektov, scénického osvetlenia a iných zariadení v rámci divadiel, koncertov, klubov a iných zábavných prostredí, ktoré sú synchronizované s hudbou (stroboskopy, dymové stroje, závesné konštrukcie a atď.). Je založený na sériovom prenose dát. To znamená, že dáta sú posielané bit po bite v rade. Prenosový protokol DMX-512 (512 je počet kanálov) používa asynchrónny prenos, kde dáta sú organizované do "rámčekov" alebo "frames" (1 rámček má 512 kanálov). Každý kanál môže byť nastavený na hodnotu od 0 do 255, čo umožňuje presné riadenie parametrov svetelných efektov, ako je jas, farba a mnoho ďalších. [18] Riadiace zariadenie (často nazývané DMX kontrolér) generuje sériu rámčekov DMX, ktoré sú posielané cez DMX kábel na pripojené zariadenia. Každý rámček obsahuje informácie o nastavení všetkých 512 kanálov. Každé zariadenie pripojené k DMX zbernici má svoju unikátnu adresu. Toto je obvykle číslo od 1 do 512, ktoré určuje, na ktorých kanáloch budú zariadenia reagovať. DMX je univerzálny štandard, čo znamená, že zariadenia od rôznych výrobcov môžu byť pripojené k rovnakej DMX zbernici a riadené spoločným riadiacim systémom. DMX môže byť náchylný na chyby v prenose dát, pretože používa asynchrónny prenos. Preto sa často používa protokol RDM (Remote Device Management), ktorý umožňuje diagnostikovať a opravovať chyby v zariadeniach pripojených k DMX zbernici. [19]



Obr. 2.5: Príklad zapojenia schémy DMX. [20]

Zigbee

Zigbee je bezdrôtová zbernica, ktorá je navrhnutá pre nízku spotrebu energie a spoľahlivú bezdrôtovú komunikáciu pre rôzne aplikácie v inteligentných domácnostiach, priemysle, a sensorových sieťach. Zigbee vyniká svojou schopnosťou vytvárať samoorganizujúce sa siete s topológiou typu mesh, čo umožňuje pripojenie množstva zariadení do spoľahlivej siete. Zigbee je populárna zbernica v inteligentných domácnostiach a priemyselných aplikáciách kvôli svojej spoľahlivej bezdrôtovej komunikácii, nízkej spotrebe energie a schopnosti tvoriť rozsiahle siete zariadení. [21]

Využíva topológiu typu mesh, kde každé zariadenie môže komunikovať s inými zariadeniami v sieti. To znamená, že zariadenia môžu slúžiť ako opakovače signálu a zabezpečiť pokrytie celého domu alebo budovy. Jedným z hlavných rysov Zigbee je jeho nízka spotreba energie. Zariadenia Zigbee môžu byť napájané batériami a fungovať roky bez potreby výmeny batérií. Toto ich robí ideálnymi pre senzorové zariadenia, inteligentné termostaty, a podobné aplikácie. Zigbee je navrhnuté so zameraním na bezpečnosť. Používa šifrovanie dát a autentifikáciu zariadení, čím zabezpečuje, že komunikácia je chránená pred neoprávneným prístupom. Využíva frekvenčné pásmo 2,4 GHz, ktoré je globálne vyhradené pre bezdrôtové komunikačné účely. Existujú tiež Zigbee implementácie pre iné frekvenčné pásma, ako napríklad 868 MHz a 915 MHz, ktoré sa používajú v závislosti na regióne. Zigbee má typicky rýchlosť prenosu dát v rozmedzí 20-250 kbitov za sekundu a dosah komunikácie vo vnútorných priestoroch sa pohybuje v rozmedzí desiatok metrov, ale s použitím topológie mesh sa dosah môže zväčšiť. [22]

Zigbee Alliance, nezisková organizácia, spravuje štandardizáciu Zigbee. Existujú rôzne profily Zigbee, ktoré špecifikujú komunikačné protokoly a rôzne triedy zariadení, čím zabezpečujú interoperabilitu medzi rôznymi zariadeniami. Zigbee je vhodné pre rôzne aplikácie, vrátane inteligentných domov, automatizácie budov, inteligentných osvetlených systémov, monitorovania zdravia a sensorových sietí. [21]

Kapitola 3

Hardware riadiacich jednotiek

V rámci tejto kapitoly sa budeme venovať vývoju a implementácii riadiacej jednotky pre inteligentný osvetľovací systém určený pre zariadenie so schopnosťou upravovať vlnovú dĺžku LED svetidla na liečbu alebo predchádzanie sezónnym afekrívny poruchám. Navrhli sme a vyvinuli dve verzie riadiacej jednotky s cieľom splniť rôzne požiadavky a potreby tejto aplikácie v oblasti osvetlenia a fototerapie. Prvá verzia je založená na vylepšenej jednotke, ktorá vychádza z nášho predchádzajúceho projektu z baklárskej práce. Táto jednotka je vybavená procesorom ESP8266 a prináša niekoľko zlepšení v elektrokompatibilite a rozmerového prispôsobenia, čo umožňuje jej jednoduchšiu integráciu do existujúceho osvetľovacieho zariadenia na trhu.

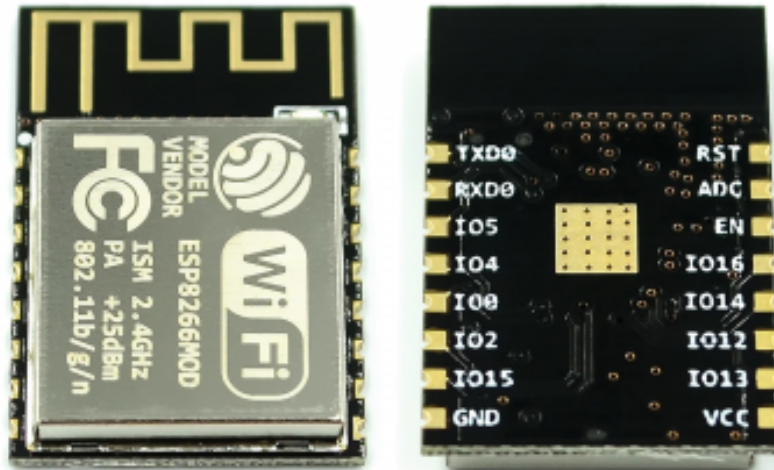
Druhá verzia riadiacej jednotky, ktorú sme tiež vyvinuli v rámci tohto projektu, je postavená na rovnakom dizajne ako prvá verzia, ale je vybavená lepším procesorom ESP32. Porovnajúc tieto dva procesory, ESP8266 a ESP32, môžeme pozorovať niekoľko významných rozdielov. Procesor ESP8266 je známy svojou nízkou spotrebou energie a cenovo dostupným riešením pre IoT (internet vecí) aplikácie. Na druhej strane, ESP32 ponúka väčšiu výpočtovú silu, viac vstupno-výstupných pinov a rozšírené funkcie, čo robí ideálnym pre náročnejšie aplikácie v oblasti osvetlenia v budúcnosti.

V tejto kapitole preskúmame návrh a implementáciu oboch verzií riadiacej jednotky, pričom sa zameriame na ich vlastnosti, výkonnosť a možnosti integrácie do existujúcich osvetľovacích systémov. Budeme tiež diskutovať o výhodách a nevýhodách jednotlivých procesorov ESP8266 a ESP32 a ich vhodnosti pre rôzne typy aplikácii v oblasti inteligentného osvetlenia.

3.1 ESP8266 vs. ESP32

Procesory ESP8266 a ESP32, ktoré tvoria srdce našich riadiacich jednotiek, sú populárne vo svete IoT a poskytujú vysokú flexibilitu a výkonnosť pre rôzne aplikácie v oblasti riadenia osvetlenia.

ESP8266, vyvinutý firmou Espressif Systems, je cenovo dostupný a energeticky efektívny procesor, ktorý sa pýši integrovaným Wifi modulom. Disponuje jedným jadrom Tensilica L106 s taktovacou frekvenciou 80 - 120 Mhz, 16 MB vnútornou Flash a 160 kB pamäťou SRAM. Z tohto procesora vyčnieva 16 GPIO (General Purpose Input/Output) pinov s výstupným prúdom 12 mA pri napätí 3,3 V. Poskytuje dostatočný výkon pre jednoduché IoT aplikácie, ako je riadenie osvetlenia, pri zachovaní nízkej spotreby energie. [23]



Obr. 3.1: Komerčne predávaný procesor ESP8266 s Wifi modulom.[24]

Na druhej strane, ESP32 je pokročilejším procesorom, ktorý prináša väčšiu výpočtovú silu a viac funkcií. Obsahuje dve jadrá Xtensa LX6 s taktovacou frekvenciou až 80 - 240 MHz, 448 kB ROM, 512 kB SRAM a integrovaný Wifi a Bluetooth modul. [23] Okrem toho má ESP32 viac GPIO pinov a rozšírené periférie, ako sú rozhranie pre sériovú komunikáciu, I2C, SPI a ďalšie, čo umožňuje pripojenie rôznych senzorov a periférií priamo k jednému zariadeniu.

V nasledujúcom odstavci sa venujeme porovnaniu týchto dvoch procesorov z niekoľkých hľadísk. ESP8266 je ideálny pre jednoduché aplikácie, kde je potrebné spoľahlivé pripojenie Wifi siete s nízkou spotrebou energie. Naopak, ESP32 ponúka väčšiu výpočtovú silu, viac periféria možností pripojenia, čo ho robí vhodným pre náročnejšie aplikácie v oblasti inteligentného osvetlenia. Vzhľadom na tieto faktory môžeme konštatovať, že ESP32 je pre naše účely vhodnejším výberom, ak budeme počítať s ďalším rozširovaním funkcií do budúcnosti. Poskytuje väčšiu výkonnosť a flexibilitu pri implementácii a integrácii do existujúcich osvetľovacích systémov.



Obr. 3.2: Komerčne predávaný procesor ESP32.[25]

| Vlastnosti | ESP8266 | ESP32 |
|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Wifi (rýchlosť up + down) | 802.11 b/g/n, HT20 (max 130 Mbit) | 802.11 b/g/n, HT40 (max 300 Mbit) |
| Bluetooth | Nie | v4.2. |
| Frekvencia | 80-120 Mhz | 80-240Mhz |
| SRAM | 160 kB | 512 KB |
| GPIO | 16 | 36 |
| SPI/I2C/I2S/UART | 2/1/2/2 | 4/2/2/2 |

Obr. 3.3: Základné rozdiely medzi procesormi ESP8266 a ESP32.[23], [26]

3.2 DALI zbernica

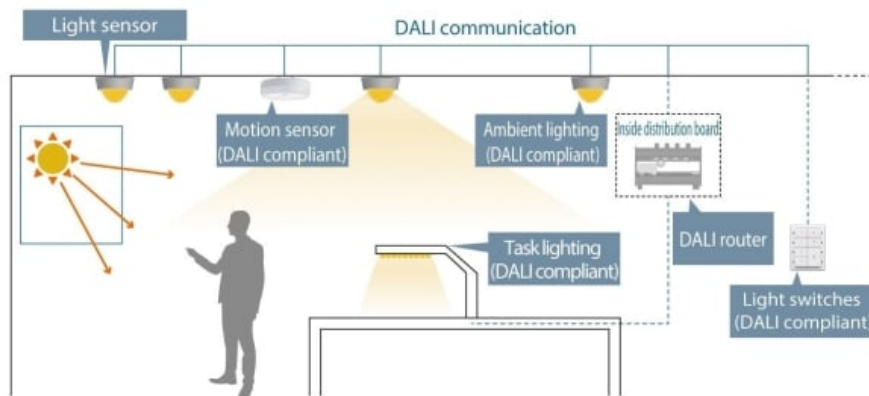
V tejto podkapitole sa budeme zaoberať technickými detailami fungovania DALI zbernice a požiadavkami na hardvér a softvér na jej použitie.

DALI (Digital Addressable Lighting Interface) je štandardizovaná zbernica určená pre riadenie osvetlenia v inteligentných osvetľovacích systémoch. Táto zbernica umožňuje komunikáciu medzi viacerými riadiacimi jednotkami a svetelnými zdrojmi, ako sú LED svetlá, svetelné panely a ďalšie.

Zbernica pracuje na princípe digitálnej komunikácie medzi riadiacou jednotkou a svetelnými zdrojmi. Každý svetelný zdroj je identifikovaný pomocou unikátnej adresy v rozsahu od 0 do 63. Riadiaca jednotka posielá príkazy a inštrukcie na zmenu jasú, stmievania, zapnutia alebo vypnutia svetelných zdrojov prostredníctvom tejto zbernice.

Pre použitie DALI potrebujeme vhodný hardvér a softvér. Hardvérové vybavenie zahŕňa fyzické rozhranie pre pripojenie riadiacej jednotky k svetelným zdrojom, ako aj konverzné obvody a prevodníky na prekladanie signálov medzi logickou úrovňou riadiaceho systému a fyzickou úrovňou zbernice.

Pre príjem signálov zo snímačov využíva 24bitové správy a vydáva 16bitové príkazy riadiacemu zariadeniu. Technológia riadenia svetla pomocou DALI zohráva kľúčovú rolu pri vytváraní udržateľných a efektívnych pracovných podmienok, čo z nej robí ideálnu voľbu pre našu riadiacu jednotku.



Obr. 3.4: Nákres využitia aplikácie DALI zbernice so svetelnými zdrojmi. [27]

Okrem toho je potrebný aj softvér, ktorý umožňuje riadenie a správu osvetlenia pomocou DALI zbernice. Tento softvér zahŕňa ovládacie rozhranie pre používateľa na nastavenie parametrov osvetlenia, ako aj riadiace algoritmy na spracovanie príkazov a inštrukcií posielaných cez zbernicu. Softvér našej riadiacej jednotky je priložený ako príloha k tejto diplomovej práci.

3.3 RTC hodiny DS3231

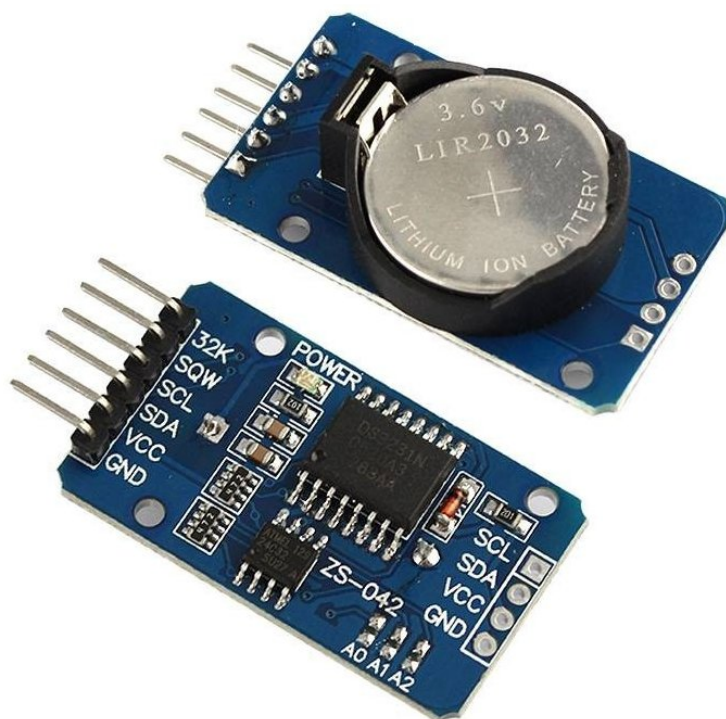
V nasledujúcej podkapitole sa pozrieme na RTC hodiny DS3231, ktoré sme integrovali do našej riadiacej jednotky. RTC (Real-Time Clock) sú presné a spoľahlivé hodiny v reálnom čase, ktoré poskytujú presné sledovanie času pre naše osvetľovacie systémy. Presné meranie času je dôležité pre správne upravovanie svetla počas dňa, aby malo, čo najpriaznivejší účinok na ľudí.

Hlavnou výhodou RTC hodín je ich vysoká presnosť a stabilita. Tieto hodiny používajú interný oscilátor s frekvenciou 32,768 kHz a s teplotnou kompenzáciou, čo zabezpečuje presné meranie času aj pri meniacich sa teplotných podmienkach. Okrem toho majú tieto hodiny integrovanú 3,6V batériu, ktorá udržiava hodnoty času aj pri výpadku napájania, čo zabezpečuje zachovanie presného času aj po reštartovaní systému. Výrobca hodín udáva napájacie napätie od 2,3V do 5,5V, čo zabezpečuje kompatibilitu s rôznymi zdrojmi napájania.

Technické špecifikácie hodín zahŕňujú presnosť merania času vo viacerých funkciách, vrátane hodín, minút, sekúnd, dátumu, mesiaca a roka. Okrem toho podporujú kalendárne funkcie, ako sú výpočty dňa v týždni a rôzne formáty dátumu.

Hodiny komunikujú pomocou I2C (Inter-Integrated Circuit) rozhrania, čo umožňuje jednoduchú a efektívnu integráciu s mikrokontrolérom alebo riadiacou jednotkou. Inter-Integrated Circuit zahŕňa 2 signálové vodiče. Jeden pre prenos dát SDA (Serial Data Line) a druhý pre riadenie komunikácie SCL (Serial Clock Line). Vďaka tejto zbernici vieme zabezpečiť efektívne využitie a ovládanie času vo všetkých osvetľovacích systémoch. Hodiny sú zároveň navrhnuté pre použitie v širokom rozsahu teplotných podmienok, s pracovným rozsahom teploty od -40°C do $+85^{\circ}\text{C}$. Tento široký rozsah umožňuje ich použitie v extrémnych prostrediach.

Tieto technické parametre sú dôležité pre správne fungovanie našej riadiacej jednotky a zabezpečujú jej spoľahlivé a presné fungovanie pri riadení osvetlenia. Ich široká kompatibilita a vysoká presnosť robia z DS3231 ideálny výber pre nás aj do budúcnosti.



Obr. 3.5: Komerčne predávaný modul RTC hodín DS3231.[28]

Kapitola 4

Návrh riadiacich jednotiek

V tejto kapitole sa budeme venovať samotným návrhom riadiacich jednotiek. Postupne predstavíme postup práce a ako sme realizovali vývoj samotných verzii. Obidve dosky plošných spojov vychádzajú z návrhu prvej verzie, ktorú sme vytvorili počas bakalárskej práce. V ďalšej časti predstavíme schémy a grafické návrhy a porovnáme ich s prvou verziou spred dvoch rokov. Následne schématicky porovnáme samotné verzie s rôznymi procesormi. Rovnako predstavíme aj porovnanie medzi grafickými návrhmi.

Na konci tejto práce môžete nájsť prílohu obsahujúcu schému a grafický návrh prvej verzie riadiacej jednotky pre LED svetelný zdroj, ktorá bola výsledkom mojej bakalárskej práce. Tieto prílohy poskytujú detailný pohľad na hardvérovú implementáciu jednotky a môžu slúžiť ako referenčný bod pre porovnanie ďalšieho vývoja a vylepšení uvedených v tejto diplomovej práci.

Pre úplnosť v úvode tejto kapitoly by sme radi ešte predstavili postup prác pri vývoji dosky plošných spojov. Riadiaca jednotka vytvorená počas bakalárskej práce bola univerzálne navrhovaná pre 3 zariadenia určené na liečbu a prevenciu pred duševnými ochoreniami. V diplomovej práci sme sa zamerali konkrétne na interiérovú lampu, ktorá upravuje vlnovú dĺžku svetla počas dňa. Touto úpravou svetla u nás doma docielime pocit, ktorý v nás evokuje pobyt na slnečnom svetle. Týmto spôsob by sme mali zabezpečiť prevenciu napríklad pred sezónnymi afektívnymi poruchami, ktorými trpí nemalá časť spoločnosti.

V prvom kroku sme upravili schému riadiacej jednotky a implementovali sme identifikované chyby z bakalárskej práce. Následne sme upravili grafický návrh riadiacej jednotky spred dvoch rokov. Prvá revízia bola rozmerovo zväčšená a doplnená o uchytávacie otvory. Zároveň bola zlepšená elektrokompatibilita riadiacej jednotky kvôli obmedzeniu signálov, ktoré by mohli rušiť signály v rámci riadiacej jednotky. Boli doplnené uzemňovacie body, ktoré prípadné nežiadúce signály zachytávajú. Blokované kondenzátory sa osadili bližšie k súčiastkám, ktoré majú chrániť. V tretej revízii sme optimalizovali vedenie elektrických vodičov na doske plošných spojov. Optimalizácia prebehla za účelom zjednodušenia výroby a zníženia rizika vzniku potencionálnych miest na vznik antén, ktoré by rušili elektrické signály potrebné pre správne fungovanie riadiacej jednotky. Pre overenie funkčnosti tohto riešenia bola táto revízia poslaná do výroby a následne otestovaná.

Vo štvrtej revízii bola odstránená hardvérová chyba, ktorá spôsobovala zlú konektivitu pri inštalácii softvéru do procesora. Chybu popisujeme v nasledujúcej kapitole. Z tohto návrhu následne vznikol návrh zapojenia dosky plošných spojov pre riadiacu jednotku s výkonejším procesorom ESP32. Následne vo finálnej piatej revízii s procesorom ESP8266 a druhej revízii s procesorom ESP32 sme ešte doladili vedenie elektronických vodičov na doske, kedy sme odstránili 90 stupňové uhly a nahradili ich za 45 stupňové, pre opätovné zlepšenie ochrany riadiacich jednotiek. Zároveň sme sa rozhodli odstrániť pamäť EEPROM, ktorej funkcia je zapisovať výstupný čas z RTC hodín DS3231. Nakoľko oba procesory disponujú dostatočne veľkou internou pamäťou, bolo toto úložisko nadbytočné. V predošlých testovacích revíziách, aj počas bakalárskej práce, nebola táto pamäť nikdy osadená. Pre potreby testovania riadiacej jednotky nehrala dôležitú úlohu.

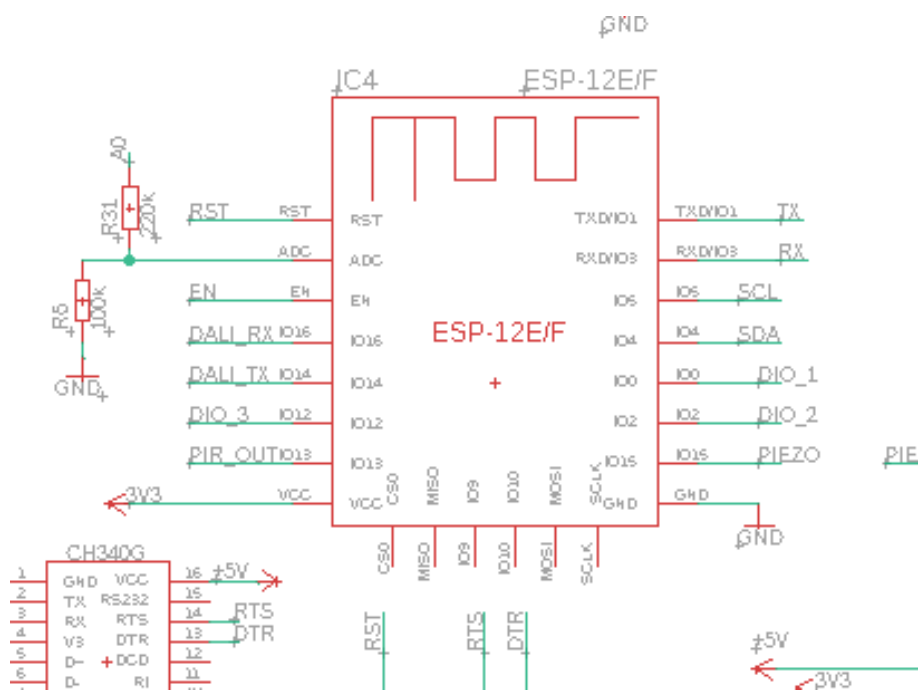
4.1 Schémy a návrhy riadiacich jednotiek

Na začiatok predstavíme schématické zapojenie oboch riadiacich jednotiek. Schémy sú kritickou súčasťou návrhu a implementácie, pretože definujú fyzické prepojenia, komponenty a spôsob, akým riadiaca jednotka interaguje so svetelnými zdrojmi a ďalšími perifériami. Obe riadiace jednotky disponujú rovnakým hardvérom, líšia sa iba použitým procesorom, ktoré zabezpečujú správne vykonávanie riadiaceho softvéru. Po predstavení schémy k danej verzii budeme pokračovať ukážkou grafických návrhov. Vysvetlíme, prečo sme umiestnili súčiastky na doske plošných spojov, tak ako sme ich umiestnili a aké z toho vyplývajú výhody. Ako referenčnú schému a grafický návrh budeme považovať novšiu dosku plošných spojov s procesorom ESP8266. Všetky vizualizácie použité v tejto kapitole sú finálnou verzou schém a návrhov po odstránení zistených nedostatkov. Nájdeným chybám a nedostatkom sa venujeme v 5. kapitole tejto diplomovej práce.

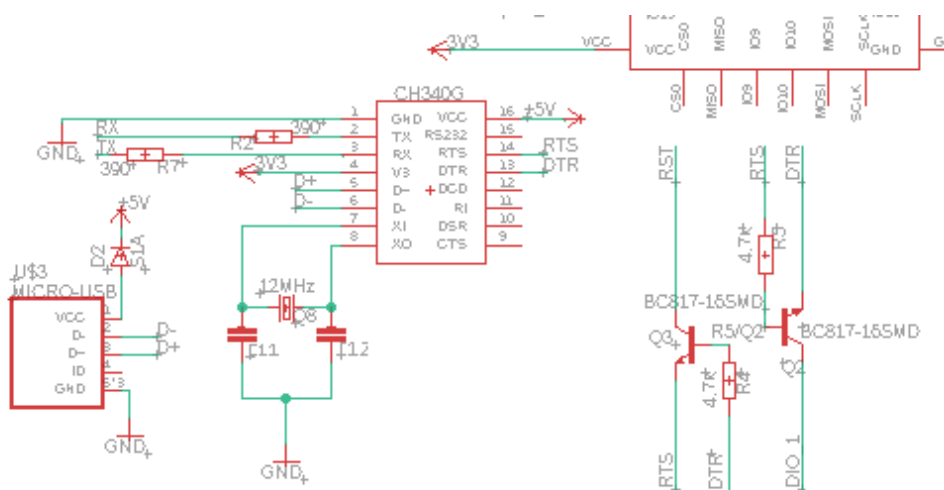
4.1.1 Riadiaca jednotka s procesorom ESP8266

Túto časť by sme radi venovali predstaveniu schémy verzie riadiacej jednotky s procesorom ESP8266. Výhody a technické parametre procesoru a ostatných použitých periférií sme popísali v predchádzajúcej kapitole. Teraz sa zameriame na naše konkrétne riešenie zapojenia, ktoré tvorí gro správneho fungovania komunikácie procesora a ostatných častí riadiacej jednotky.

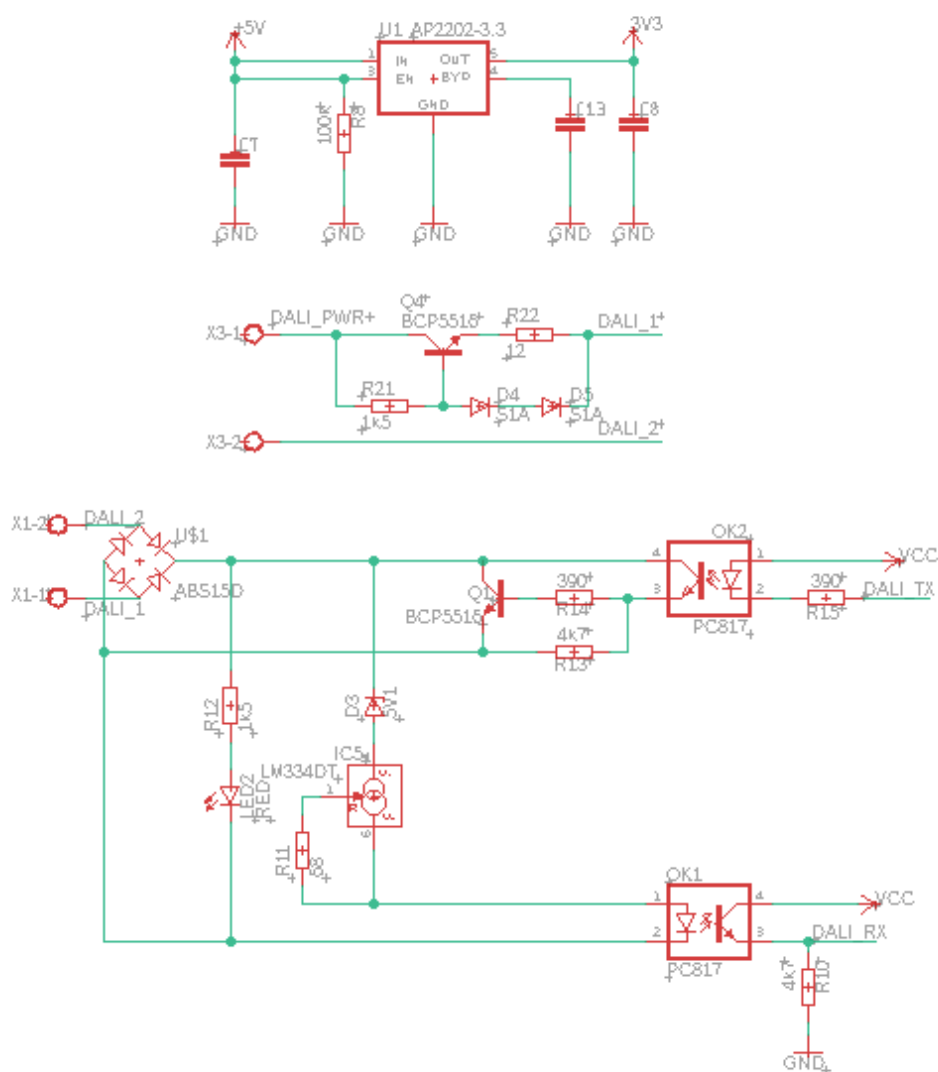
Finálna schéma pozostáva z odstránenia nadbytočných prepojení a súčiastok. Oproti iným verziám sme sa zamerali aj na vizuálnu stránku schémy. Je prehľadnejšia, lepšie čitateľná a schématické značky a súčiastky na seba lepšie nadväzujú ako v predošlých riešeniach. Celú schému dosky plošných spojov s procesorom ESP8266 môžete nájsť v prílohe.



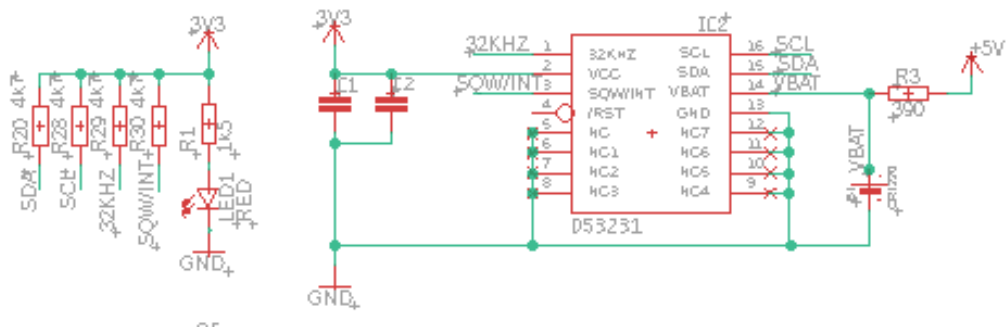
Obr. 4.1: Schéma procesora ESP8266 zobrazujúca zapojenie GPIO pinov na periférie.



Obr. 4.2: Schéma napájania procesora pomocou CH340G, ktoré umožňuje nahrávanie softvéru do mikrokontroléru. Zapojenie je prebrané z bakalárskej práce. [29]



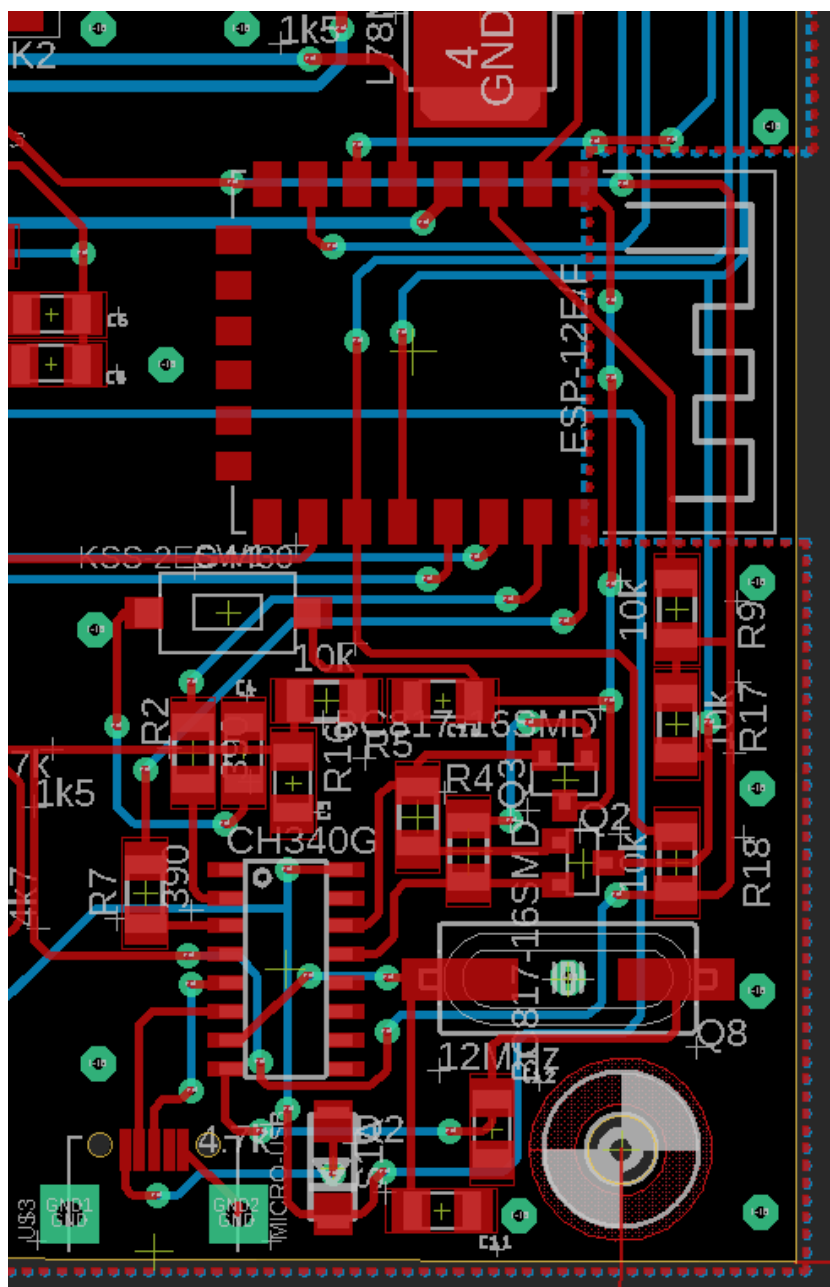
Obr. 4.3: Schéma zapojenia DALI zbernice, ktorá slúži na komunikáciu so svetelnými zdrojmi. Riešenie je prebraté z bakalárskej práce, nakoľko nebol dôvod ho meniť z hľadiska jeho spoľahlivej funkčnosti. [29]



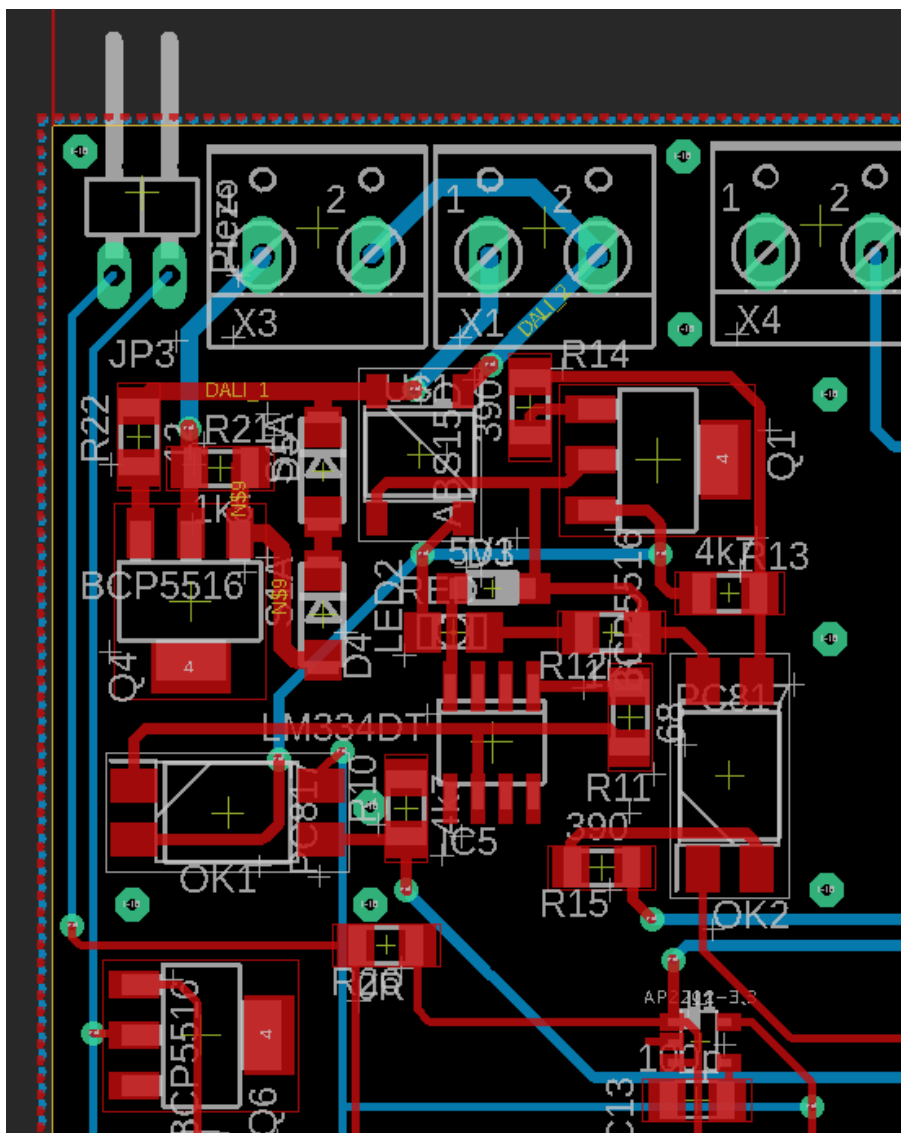
Obr. 4.4: Schéma zapojenia RTC hodín bez EEPROM pamäte.

Grafický návrh dosky plošných spojov vychádza zo schémy, ktorú sme predstavili vyššie. Skladá sa z dvoch vrstiev (modrá – spodná, červená – vrchná). Dve vrstvy sa aplikovali aj v bakalárskej práci. Vďaka viacerým vrstvám sa dajú jednoduchšie optimalizovať vodiče a zároveň šetriť rozmery samotnej dosky. Obidve vrstvy obsahujú uzemnenie, okrem priestoru pod samotnou Wifi anténou, kvôli prípadnému rušeniu signálu. V tomto návrhu sú implementované už aj diery na uchytenie v samotnom zariadení, kde sa teoreticky bude využívať. Oproti prvej verzii spred dvoch rokov sme premiestnili v rámci dosky aj výstupné piny pre dodatočné periférie. Momentálne sa nachádzajú v jednej línii so svorkami pre LED svetelný zdroj. PCB doska bola zväčšená o pár centimetrov. Bolo potrebné, aby sa na dosku všetko dostalo, ale zároveň aby doska bola prehľadná pre účel diplomovej práce. Celý návrh je priložený na konci textu v prílohách medzi ostatnými revíziami.

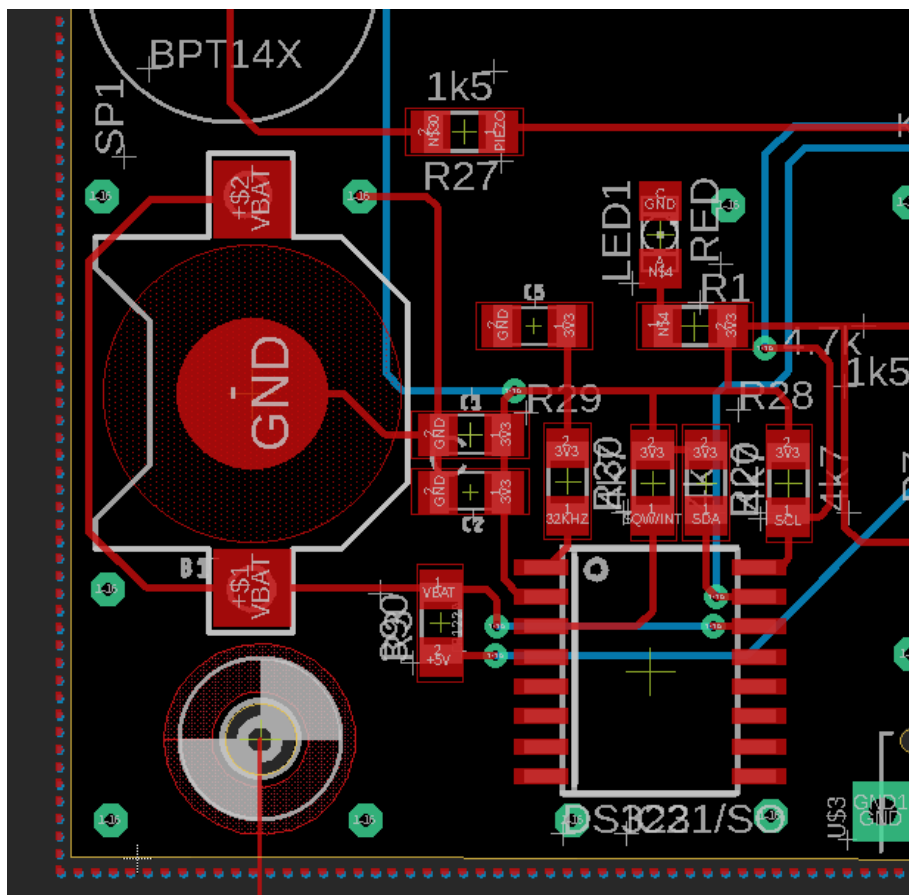
Ako som spomínal vyššie o zachovaní schémy samotných modulov, rovnako sme zachovali aj ich grafický návrh a približné rozloženie. Následne po odstránení niekoľkých chybových hlások z prostredia EAGLE sme dali dosku do výroby. Následovalo testovanie, ale to si predstavíme v ďalšej kapitole.



Obr. 4.5: Grafický návrh umiestnenia procesora ESP8266 s napájaním pomocou USB, vďaka ktorému konfiguruje procesor.



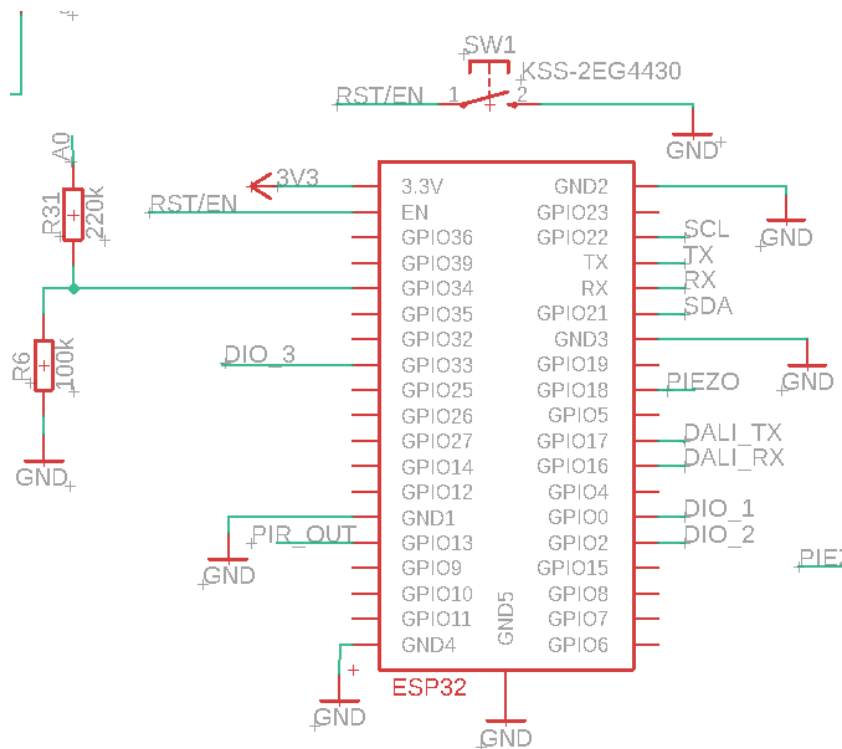
Obr. 4.6: Grafický návrh DALI zbernice umiestnenej na PCB doske. Poloha zbernice nie je umiestnená náhodou. Nachádza sa v ľavom hornom rohu pre ľahkú manipuláciu so svorkami pre napájanie a ovládanie LED svetelného zdroja.



Obr. 4.7: Grafický návrh RTC hodín DS3231. Umiestnené sú v ľavom dolnom rohu oproti DALI zbernici. Na obrázku môžeme vidieť slot pre baterku LIR 2032 3,6V [29]. Na tomto návrhu sa už nenachádza spomínaná EEPROM pamäť.

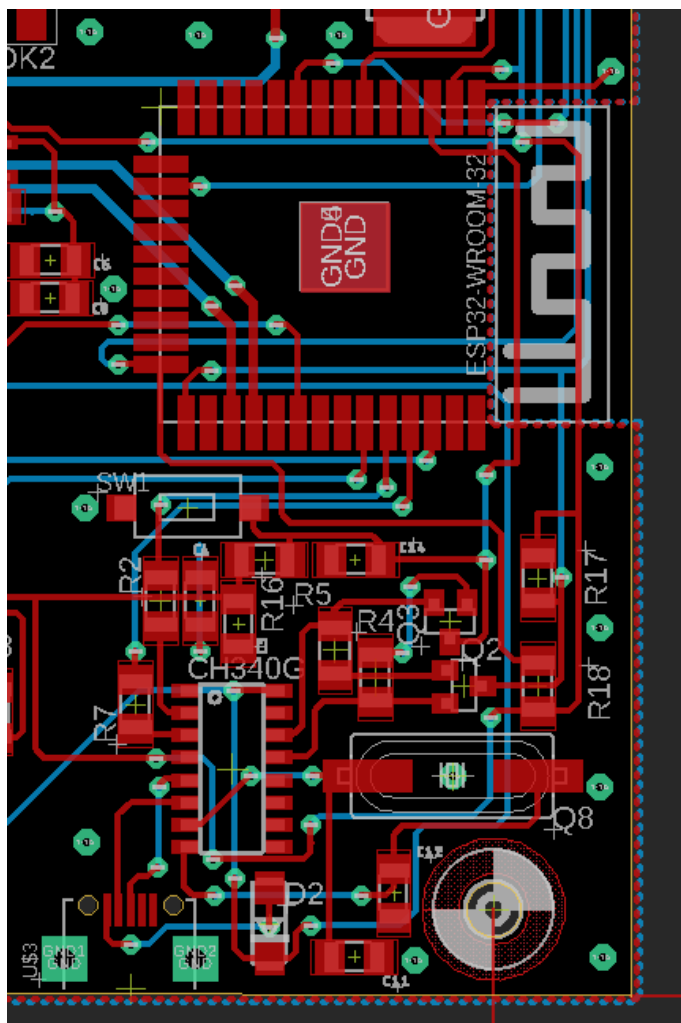
4.1.2 Riadiaca jednotka s procesorom ESP32

V tejto podkapitole sa zameriame na analýzu schémy druhej riadiacej jednotky, ktorá predstavuje iteráciu pôvodného návrhu so zmenou v použítom mikrokontroléri. Ako som spomínal vyššie, v druhej verzii, sme použili procesor ESP32. Zvyšok schémy zostal zachovaný. V rámci tohto návrhu bol potrebný iba správny výber GPIO pinov na procesore pre zachovanie správnej funkčnosti riadiacej jednotky.



Obr. 4.8: Schéma procesora ESP32 zobrazujúca zapojenie GPIO pinov na periférie.

PCB doska s procesorom ESP32 vychádza z revízie v4 s procesorom ESP8266. V prvom rade došlo k výmene procesora. Nakoľko je ESP32 rozmerovo väčší ako ESP8266, museli sme si na doske vytvoriť priestor. Podarilo sa nám poposúvať zvyšné súčastky tak, že nemuselo prísť k zväčšeniu rozmerov samotnej dosky a zároveň sme zachovali aj štandard, ktorý sme si nastavili. Následne sme sa zamerali na napojenie periférií s procesorom pomocou správnych pinov, nakoľko ESP32 má GPIO piny inak ako ESP8266. Z toho vyplývala menšia optimalizácia vodičov v okolí procesora. Celý návrh riadiacej jednotky s procesorom ESP32 je priložený na konci diplomovej práce v prílohách.



Obr. 4.9: Grafický návrh umiestnenia procesora ESP32 s napájaním pomocou USB.

4.2 Porovnanie

V tejto podkapitole sa budeme zaoberať porovnávaním schém a grafických návrhov dvoch radiacich jednotiek, pričom jediný rozdiel medzi nimi spočíva v použití procesora. Konkrétne sa jedná o zmenu procesora z ESP8266 na ESP32. Aj keď sa vzhľadom na zachovanie ostatných komponentov schémy nezmenili, zmena procesora môže mať významný vplyv na funkcionality a výkonnosť radiacich jednotiek. V tejto analýze preskúmame, aký je rozdiel medzi použitými výstupnými GPIO pinmi medzi procesormi.

Napájanie pomocou CH640G je rovnaké u oboch jednotiek. Ako som spomenul vyššie, rozdiel je iba v použití GPIO pinov pre zachovanie rovnakej funkčnosti radiacich jednotiek. Nakoľko má ESP32 viac pinov ako ESP8266, v niektorých aspektoch sa líšia. GPIO piny s rovnakým číslovaním nemusia mať rovnaké funkcie a vlastnosti. Uvedieme zopár príkladov. Signál DIO3 je na PCB s procesorom ESP8266 zapojený na GPIO12, avšak tento pin je na procesore ESP32 pri bootovaní nastavený ako HIGH, čo je nežiadúce, nakoľko je to výstupný signál. Pre výstupný signál sú vhodné piny GPIO4, GPIO13, GPIO16 až GPIO33 alebo GPIO34 až GPIO39. [30]

Zároveň podstatným rozdielom medzi procesormi sú piny EN a RST. ESP8266 ich má ako dva samostatné. ESP32 ich má spojené v jednom pine. Nakoľko na doske plošných spojov s ESP8266 sme na každom pine použili odpor $10\text{k}\Omega$, pri ESP32 sme jeden odstránili. Obidva odpory by boli paralelne a tým by vznikol odpor $5\text{k}\Omega$ nie žiadúcich $10\text{k}\Omega$. Viac zmien v rámci schém a návrhov riadiacich jednotiek sme robiť nemuseli.

Kapitola 5

Výroba riadiacich jednotiek

Na základe grafických návrhov sme následne vyrobili 2 revízie dosiek. V tejto kapitole predstavíme postup našej práce a následne sa budeme venovať aj zisteným chybám a ich riešeniu. Dosky plošných spojov sme dali vždy vyrobiť vo väčšom počte kusov. Z výroby prišla neosadená doska, ktorú sme následne ručne osadili. Osádzanie súčiastok spočívalo v aplikovaní špeciálnej pájkovacej pasty pomocou šablóny. Šablóna zabezpečí rozotretie rovnakej vrstvy pasty na všetky vodivé plochy dosky. Použitie šablóny bolo veľmi dobré rozhodnutie a zjednodušenie oproti manuálnemu nanášaniu pasty pri výrobe riadiacej jednotky v rámci bakalárskej práce. Následne sme osádzali súčiastky pomocou pinzety a osadenú dosku sme zahriali pre rovnomerné zatavenie pasty.

Prvá revízia PCB dosky bola vyrobená s procesorom ESP8266. Po úpravách v revízii v1, v2 a v3 sme sa rozhodli poslednú dať do výroby. Dosky sme dali do výroby vždy až vtedy, keď program EAGLE nevidoval žiadne chyby, ako napríklad, chýbajúce prepojenia alebo nedostatok miesta medzi súčiastkami.

Následne po odstránení zistených chýb na oživenej prvej vyrobenej doske, sme z verzie v4 s procesorom ESP8266 navrhli PCB dosku s procesorom ESP32. Výrobný postup bol rovnaký ako popisujeme vyššie.

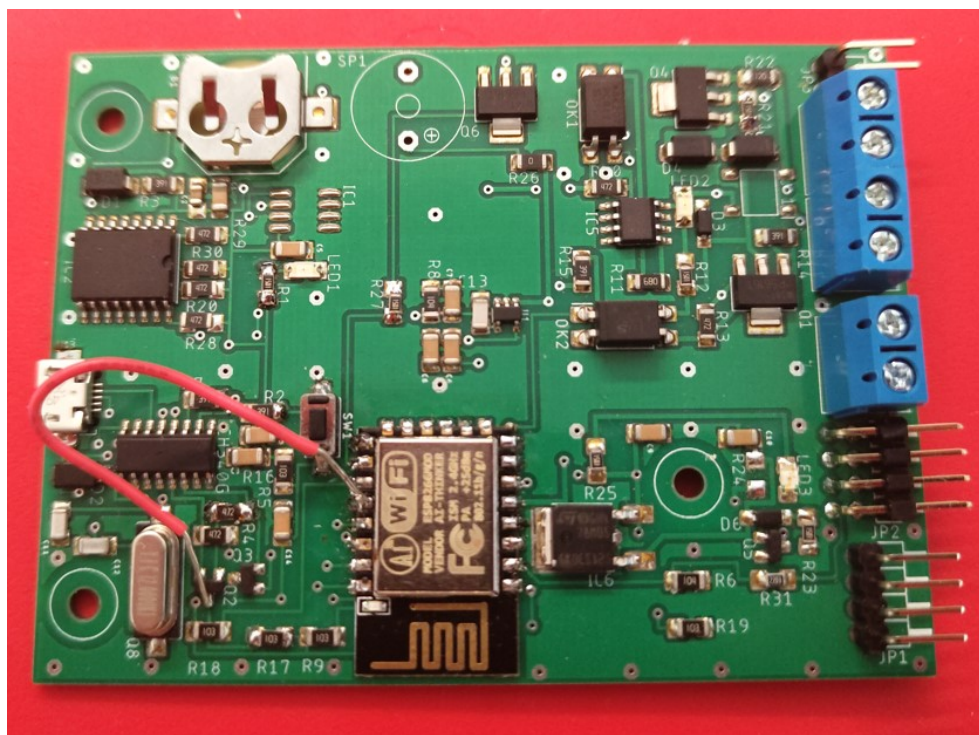
5.1 Zistené chyby pri výrobe dosky s ESP8266 a ich riešenie

Pri výrobe samotných PCB dosiek sme narazili na chyby, ktoré bránili správne fungovaniu riadiacej jednotky. Prvú závažnú chybu sme objavili pri výrobe dosky plošných spojov s procesorom ESP8266. Pri nahrávaní softvéru do procesoru sme mali problém s komunikáciou medzi počítačom a riadiacou jednotkou. Programovacie prostredie sa nevedelo spojiť s procesorom. Analýzou schémy zapojenia sme zistili, že chýba prepojenie medzi pinom procesora GPIO0 a tranzistorom Q2. Jednalo sa o preklep v schéme a v grafickom návrhu, kde neboli tieto časti zapojenia pomenované rovnako. Táto závada sa dala odstrániť ešte dvoma spôsobmi. V niektorých prípadoch stačilo stlačiť resetovacie tlačítko procesora avšak to nebolo veľmi spoľahlivé riešenie.

Druhý spôsob spočíval v pripojení pinu GPIO0 na GND a do kódu vo funkcii “setup” dopísať tieto príkazy:

```
pinMode(0, OUTPUT); digitalWrite(0, LOW);
```

Tým nastavíme pin na výstup a skoro nulovú hodnotu. Vtedy sa procesor sám prepne do “Boot” režimu. Na vyrobenej doske sme toto prepojenie doplnili manuálne a následne v schéme a v návrhu sme ho opravili. Na doske plošných spojov s procesorom ESP32 je už toto prepojenie správne od výroby.

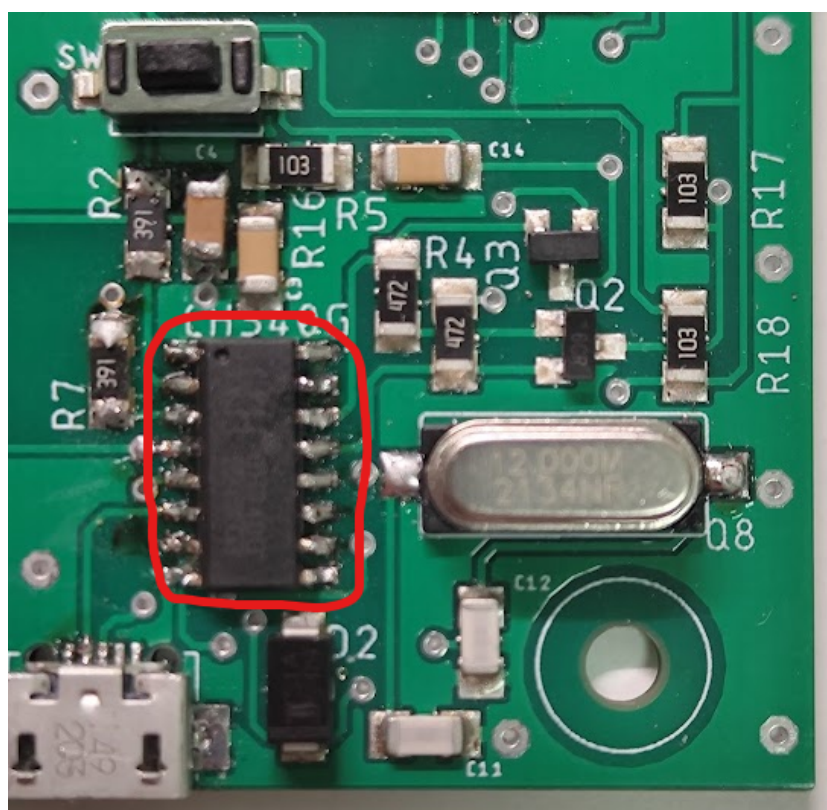


Obr. 5.1: Oprava prepojenia medzi pinom GPIO0 a tranzistorom Q2 na vyrobenej testovacej doske s procesorom ESP8266.

Poslednou zistenou závadou na riadiacej jednotke s procesorom ESP8266 sa týkal usmerňovača na DALI zbernici. Pri výrobe sme ho osadili opačne a tým sme nenamerali príslušné napätie pomocou multimetra. Po otočení usmerňovača vykazuje DALI zbernica správnu činnosť.

5.2 Zistené chyby pri výrobe dosky s ESP32 a ich riešenie

Po osadení dosky SMD súčiastkami sme testovali pripojenie riadiacej jednotky k počítaču. Očakávali sme, že počítač rozpozná CH340G. Avšak “Device Manager” nevedel spoznať pripojené zariadenie. Prvý krok analýzy bola kontrola spojov, či sa niekde nenachádza studený spoj alebo prerušenie vodičov. Túto možnosť sme vylúčili. Následne sme zamerali na softvérovú časť. Vyskúšali sme správnosť ovládača pre CH340G, ktorý bol taktiež v poriadku. V neposlednom rade sme premerali napätia na pinoch integrovaného obvodu čipu. Namerané hodnoty sme porovnali s datasheetom. Zistili sme, že na pine 7 a 8 sme namerali nevyhovujúce hodnoty. Na základe toho sme sa rozhodli, že čip CH340G vymeníme za nový. Po výmene počítač rozoznal pripojené zariadenie a “Device Manager” vypísal pripojenie integrovaného obvodu CH340G na porte “COM9”.



Obr. 5.2: Vymenený čip CH340G na riadiacej jednotke s procesorom ESP32.

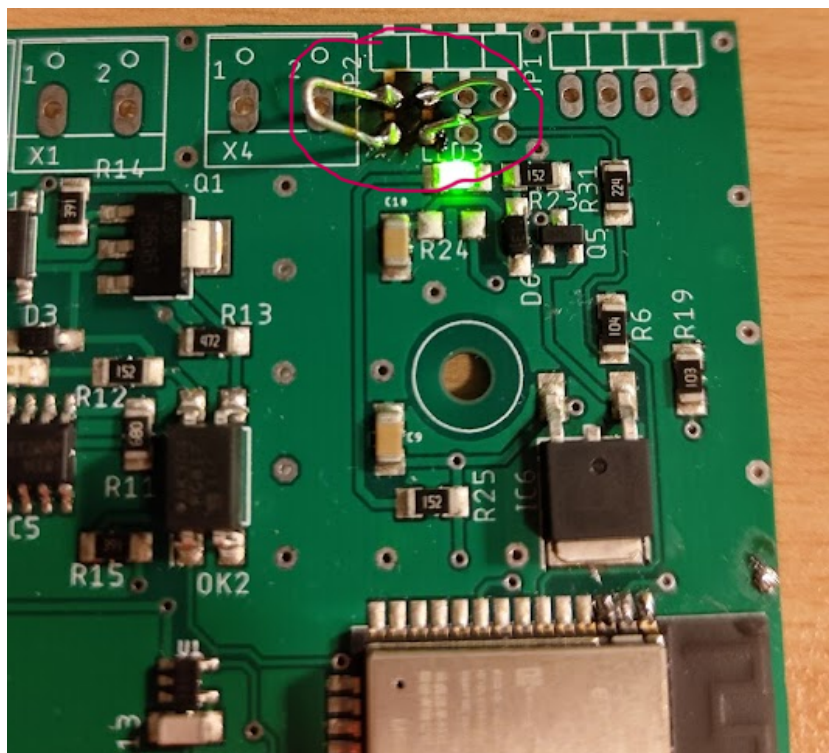
Ďalšie kroky smerovali k nahratiu programu do procesora. Aj v tejto časti vývoja dosky plošných spojov s procesorom ESP32, sme narazili na komplikácie. V termináli Arduino IDE sa nám zobrazila chyba zle detekovaného “Boot mode”. Po hlbšej analýze sme zistili, že pri kupovaných “dev kitch” s procesorom ESP32 sa nachádzajú aj “Boot” a “EN” tlačítka. Pomocou nich prepne procesor do tzv. “Download mode”. Avšak takéto tlačítka sa nenachádzajú na našej riadiacej jednotke. Preto bolo potrebné ich funkcionality nasimulovať. “Boot” tlačítko sa nachádza na pine GPIO0 a nasimulujeme ho pripojením tohto pinu na GND, aby sme získali hodnotu logickej nuly.

```
Sketch uses 286737 bytes (21%) of program storage space. Maximum is 1310720 bytes.
Global variables use 21824 bytes (6%) of dynamic memory, leaving 305856 bytes for local variables. Maximum is 327680 bytes.
esptool.py v4.5.1
Serial port COM10
Connecting.....

A fatal error occurred: Failed to connect to ESP32: Wrong boot mode detected (0xb)! The chip needs to be in download mode.
For troubleshooting steps visit: https://docs.espressif.com/projects/esptool/en/latest/troubleshooting.html
Failed uploading: uploading error: exit status 2
```

Obr. 5.3: Hlásenie chyby, ktorú nám ukazovalo Arduino IDE.

Ak je toto riešenie nedostačujúce, pin GPIO2 tiež musí byť na nízkej úrovni. To sme dosiahli rovnakým riešením ako pri GPIO0, pripojením na GND. [31], [32] V konečnom dôsledku je tlačítko “EN” nedôležité. Po tom, ako sa nám podarilo zfunkčniť aj druhú dosku s procesorom ESP32 sme sa mohli zamerať na samotný testing.



Obr. 5.4: Oprava komunikácie s programovacím prostredím. Piny GPIO0 a GPIO2 sme pripojili na GND.

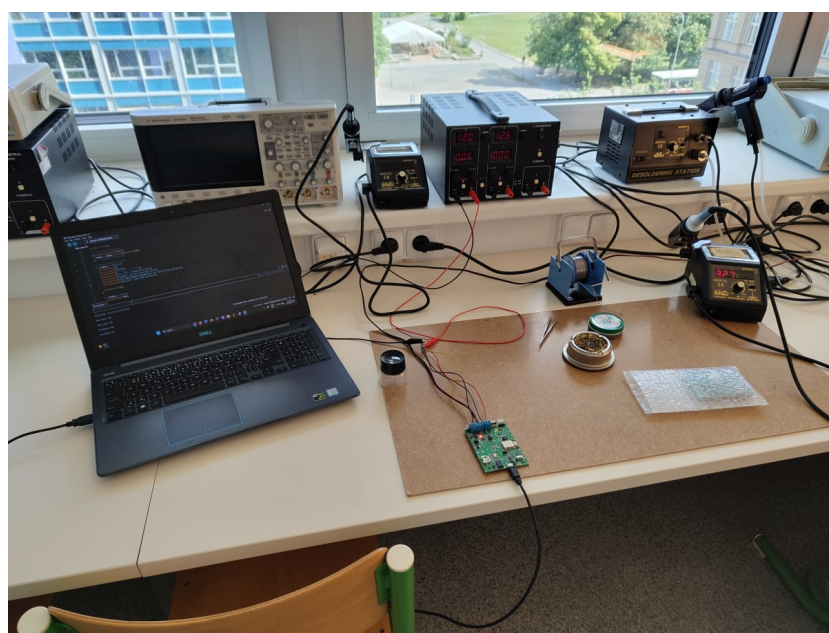
Kapitola 6

Testovanie riadiacich jednotiek

Po odstránení všetkých zistených závad pri výrobe sme prešli k testovaniu riadiacich jednotiek pomocou LED panelov s DALI prevodníkmi. Testovanie prebiehalo v školskom laboratóriu, ktoré bolo vybavené všetkými potrebnými prístrojmi a nástrojmi na vykonanie dôkladných skúšok. Program na testovanie verzie s procesorom ESP8266 sme prebrali z bakalárskej práce. Tento program poskytoval robustné a spoľahlivé základy pre naše testovanie. Postup testovania podrobne popíšeme bližšie v nasledujúcich podkapitolách.

6.1 Riadiaca jednotka s procesorom ESP8266

Po nahraní programu do procesora sme pripojili napájanie a komunikačnú linku k zbernici, ako aj napájanie pre samotný procesor. Testovaním sme overovali funkčnosť a komunikáciu s mikrokontrolérom. Zbernica pracuje s napätím 12V, ktoré sme generovali pomocou laboratórneho zdroja. Príkazy pre zbernicu sme zadávali pomocou “Serial Monitor” v programovacom prostredí Arduino IDE.



Obr. 6.1: Testovanie riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 v školskom laboratóriu.

```
Broadcast Off

Broadcast On

set_time 15:37:00 13/05/2024
Date/Time: 15:37:00 13/05/2024

Date/Time: 15:37:12 13/05/2024

Max Level 128

Max Level 254

Broadcast Off

Broadcast On
```

Obr. 6.2: Výpis z príkazového riadka "Serial Monitor" pri testovaní dosky s procesorom ESP8266.

Riadiaca jednotka spoľahlivo zapínala, vypínala a stlmovala intenzitu svetla LED panelov. Počas testovania sa neprejavili žiadne nestability, čo potvrdilo správnu funkčnosť systému. Testovanie prebiehalo v niekoľkých fázach, počas ktorých sme postupne overovali jednotlivé funkcie a parametre riadiacej jednotky. Príkazy na testovanie sme vykonávali v nasledujúcom poradí. Najprv sme vyskúšali LED panely vypnúť a zapnúť pomocou "on/off". Ako druhý príkaz sme vyskúšali "set_time", pomocou ktorého nastavíme dátum a čas. Na to priamo nadväzuje príkaz "show_time" na vypísovanie aktuálny čas a dátum. Ako posledný príkaz sme otestovali "maxDDD", kde "DDD" je hodnota od 1 do 254 a vyjadruje level intezity svetla.

Testovanie prebiehalo hladko a všetky funkcie riadiacej jednotky pracovali podľa očakávaní. Pre každý testovací krok sme zaznamenávali výsledky a potvrdzovali, že systém reaguje správne na všetky zadané príkazy. Celý proces sme niekoľkokrát opakovali, aby sme zaistili konzistentnosť a spoľahlivosť výsledkov.

```
// handle string from serial
if (comMsg == "help") {
  Serial.println();
  Serial.println("Help");
  Serial.println("-----");
  Serial.println("on / off : broadcast on/off");
  Serial.println("maxDDD : set max level DDD (dec)");
  Serial.println("set_time·HH:MM:SS·DD/MM/YYYY: set correct time and date");
  Serial.println("show_time : show time and date");
```

Obr. 6.3: Ukážka príkazov z kódu.

6.2 Riadiaca jednotka s procesorom ESP32

Rovanké testovanie sme zopakovali aj pre riadiacu jednotku s procesorom ESP32. Najprv sme vyskúšali nastaviť a zobrazíť čas a dátum. Neskôr sme pripojili k jednotke aj LED svetelné panely. Všetky testy prebehli bez problémov a jednotka fungovala podľa očakávania.

Riadiaca jednotka s procesorom ESP32 preukázala rovnakú úroveň spoľahlivosti a funkčnosti ako jednotka s ESP8266. Opakované testy potvrdili, že systém dokáže efektívne riadiť LED svetelné panely a reagovať na všetky zadané príkazy bez akýchkoľvek problémov.

```
Help
-----
on / off : broadcast on/off
maxDDD : set max level DDD (dec)
set_time HH:MM:SS DD/MM/YYYY: set correct time and date
show_time : show time and date

set_time 23:57:00 18/05/2024
Date/Time: 23:57:00 18/05/2024

Date/Time: 23:57:07 18/05/2024
```

Obr. 6.4: Výpis z terminálu Arduino IDE počas testu funkcie hodín riadiacej jednotky.

```
Broadcast Off

Broadcast On

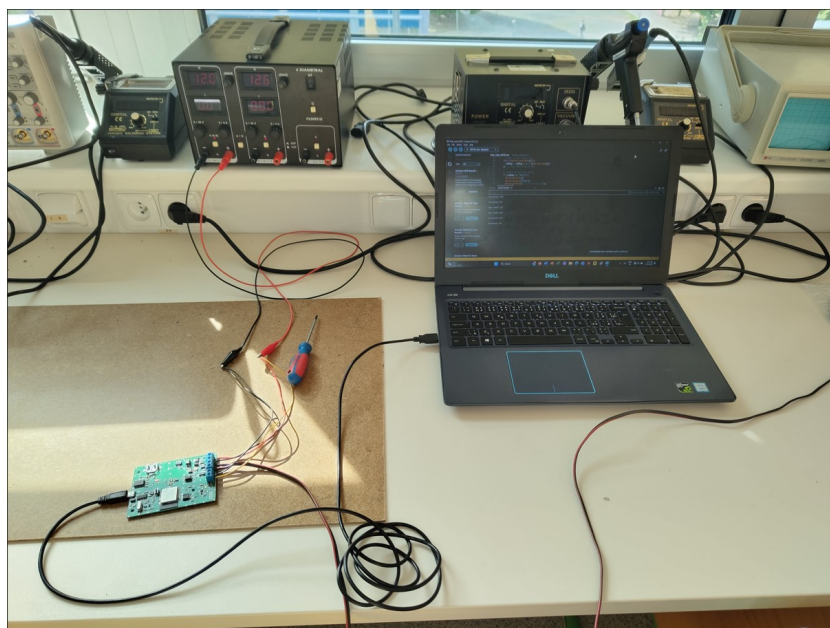
Max Level 125

Max Level 254

Broadcast Off

Broadcast On
```

Obr. 6.5: Výpis z terminálu Arduino IDE počas testu funkcie DALI zbernice.



Obr. 6.6: Testovanie riadiacej jednotky s procesorom ESP8266 v školskom laboratóriu.



Obr. 6.7: LED panely, ktoré sme využívali pri testovaní riadiacich jednotiek.

Záver

Táto diplomová práca predstavuje komplexný pohľad na návrh a implementáciu riadiacich jednotiek pre LED svetelné zdroje s využitím DALI zbernice. Práca nadväzuje na výsledky mojej bakalárskej práce, kde boli položené základy pre vývoj riadiacej jednotky pre LED svetelné zdroje.

V priebehu tejto práce sme detailne preskúmali a porovnali rôzne riadiace jednotky využívajúce procesory ESP8266 a ESP32. Porovnanie týchto dvoch procesorov ukázalo, že procesor ESP32 ponúka vyššiu výpočtovú silu, väčšiu pamäťovú kapacitu a širšie možnosti komunikácie. Poznatky zistené počas tejto diplomovej práce, ale aj bakalárskej práce, sa prejavili aj vo vylepšených schémach a grafických návrhoch v programe Eagle, kde sme optimalizovali rozmery a elektrokompatibilitu tak, aby vyhovovali konkrétnym požiadavkám aplikácie. Zároveň, aby riadiace jednotky pracovali spoľahlivo a efektívne.

Práca tiež detailne opisuje rôzne typy predradníkov a zberníc používané na riadenie svetelných zdrojov, ako sú DALI, DALI-2, DMX, 0-10V a ďalšie, pričom sa zameriava na ich technické špecifikácie, výhody a nevýhody. Hlbšie sme sa venovali hlavne zbernici DALI, ktorá je kľúčovým prvkom našich riadiacich jednotiek. V budúcnosti by stálo za zamyslenie použiť novšiu verziu zbernice DALI-2, ako vylepšenie pôvodnej riadiacej jednotky. Prináša interoperabilitu, zvýšenú flexibilitu a podporu pre nový typ zariadení, čo prispieva k robustnejšiemu a spoľahlivejšiemu systému riadenia osvetlenia.

Proces návrhu a realizácie riadiacich jednotiek bol rozdelený do niekoľkých fáz, pričom sme sa zamerali na vylepšenie pôvodnej verzie s procesorom ESP8266 a vytvorenie novej verzie s procesorom ESP32. Tento postup umožnil optimalizáciu dizajnu a zabezpečil, že finálne verzie riadiacich dosiek spĺňajú všetky technické a funkčné požiadavky.

Následne boli obe riadiace jednotky otestované s pozitívnym výsledkom. Počas vytvárania návrhov a samotnom vývoji, sme našli ďalšie nedostatky, ktoré by sme odporúčali do budúcnosti riešiť. Najviac priestoru na vylepšenie je pri riadiacej jednotke s procesorom ESP32. Určite odporúčame sa zamyslieť na dorobení tlačítok pre zapnutie "Boot" režimu. Z praktického hľadiska stále pripájať vybrané piny na GND je z dlhodobého hľadiska neudržateľné. Riadiaca jednotka s procesorom ESP8266 je prakticky vo finálnom stave.

Naše výsledky poukazujú na potenciál ďalšieho vývoja takejto riadiacej jednotky pre LED svetelný zdroj. Či už by sa to týkalo vylepšenia existujúceho hardvéru alebo potencionálneho rozširovania funkcií riadiacej jednotky.

Bibliografia

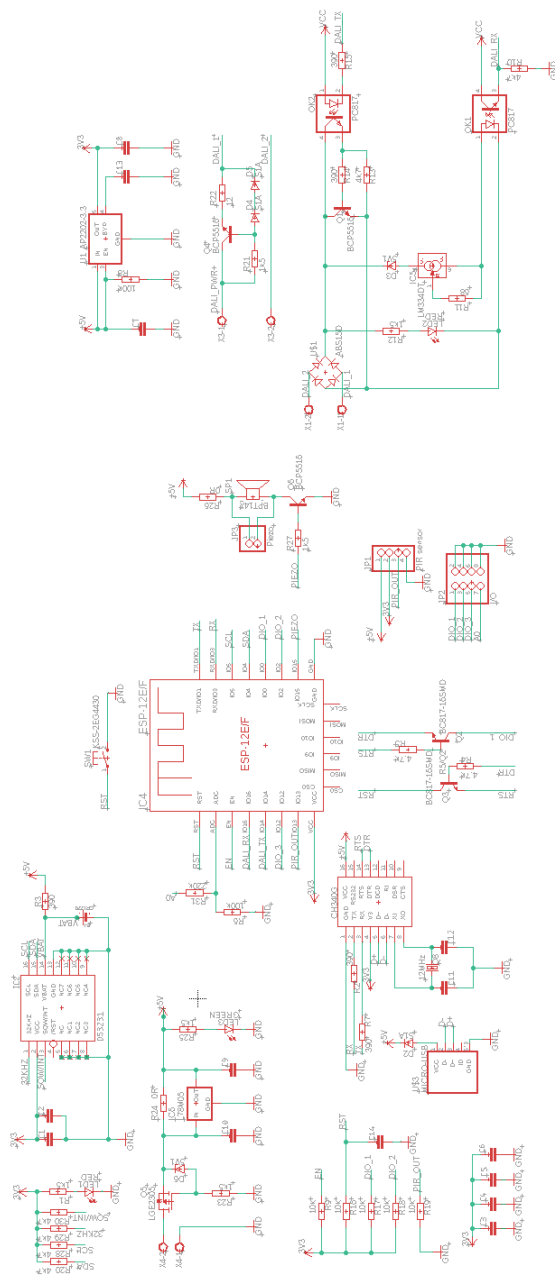
1. WAN, Martin. A Complete Guide to LED Drivers. *Linkedin*. 2024. Dostupné tiež z: <https://www.linkedin.com/pulse/complete-guide-led-drivers-martin-wan-tr51c/>.
2. Předřadná zařízení pro světelné zdroje. *Esvit.cz*. 2016. Dostupné tiež z: <https://www.esvit.cz/predradna-zarizeni-pro-svetelne-zdroje>.
3. DILOUIE, C. Introducing the LED driver. 2004, roč. 103. Dostupné tiež z: https://www.researchgate.net/publication/294514564_Introducing_the_LED_driver.
4. CAJOCHEN, C; FREYBURGER, M; BASISHVILI, T; GARBAZZA, C; RUDZIK, F; RENZ, C; KOBAYASHI, K; SHIRAKAWA, Y; STEFANI, O; WEIBEL, J. Effect of daylight LED on visual comfort, melatonin, mood, waking performance and sleep. *Lighting Research and Technology*. 2019, roč. 51, č. 7, s. 1044–1062. Dostupné z DOI: 10.1177/1477153519828419.
5. BARR, Michael. Introduction to Pulse Width Modulation (PWM). *Barr Group*. 2001. Dostupné tiež z: <https://barrgroup.com/blog/introduction-pulse-width-modulation-pwm>.
6. DOUGHERTY, J. *How to Measure Pulse-Width Modulated LED Sources*. 2021. Dostupné tiež z: <https://www.radiantvisionsystems.com/blog/how-measure-pulse-width-modulated-led-sources>.
7. WAN, Martin. Nejlepší průvodce stmíváním 0-10V. *Ledyi Lighting*. 2023. Dostupné tiež z: <https://www.ledyilighting.com/cs/the-ultimate-guide-to-0-10v-dimming/>.
8. NEPIVODA, Tomáš. Efektivita inteligentních osvětlovacích soustav. *ČVUT v Praze, Diplomová práce*. 2018, s. 72. Dostupné tiež z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/76545>.
9. LIGHTING, NVC. *What is DALI?* [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.nvcuk.com/technical-support/view/what-is-dali-8>.
10. ELEKTRONIK, Lunatone Industrielle. *DALI to 0-10V Interface Datasheet*. 2015. Dostupné tiež z: https://www.lunatone.com/wp-content/uploads/2018/03/86458508-AN_DALI_0-10V_AN_EN_D0005.pdf.
11. What is Dali lighting control? *Leap*. 2021. Dostupné tiež z: <https://leapinfosys.com/daylight-harvesting-why-high-tech-lighting-controls-are-good-for-business/>.
12. The DALI guide. *Artistic Licence*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.artisticlicence.com/WebSiteMaster/User%20Guides/the%20dali%20guide.pdf>.

13. VOŽECH, Martin. Instalace řídicích systému osvětlovacích soustav. *ČVUT v Praze, Diplomová práce*. 2014, s. 70. Dostupné tiež z: <https://intranet.fel.cvut.cz/cz/education/prace/00075.pdf>.
14. VYORAL, Kuba. Regulace osvětlení pomocí DALI a DALI-2. *Lampax*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.lampax.cz/news/regulace-osvetleni-pomoci-dali-a-dali-2>.
15. SMITH, John; JOHNSON, Mary. DALI-2: A Modern Standard for Lighting Control. *Journal of Lighting Technology*. 2020, s. 45–60.
16. ZENCONTROL. *What is Possible with DALI Lighting Control?* 2023. Dostupné tiež z: <https://www.linkedin.com/pulse/what-possible-dali-lighting-control-zencontrol-nz-limited>.
17. LUXIFER. *Co je DALI a k čemu se používá?* [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.lxf.cz/dali/>.
18. SCHILHAB, Jan. DMX pult pro řízení pódiového osvětlení. *VUT v Brně, Bakalárska práca*. 2022, s. 72. Dostupné tiež z: <https://dspace.vut.cz/server/api/core/bitstreams/3c64562e-eb0a-461a-b158-3060db433520/content>.
19. SCHILLER, Brad. The Automated Lighting Programmer's Handbook. *Focal Press*. 2010. Dostupné tiež z: https://api.pageplace.de/preview/DT0400.9781000473070_A41880545/preview-9781000473070_A41880545.pdf.
20. LUXIFER. *Co je DMX?* [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.lxf.cz/dmx/>.
21. ZigBee Specification FAQ. *ZigBee Alliance*. 2015. Dostupné tiež z: <https://zigbeealliance.org/wp-content/uploads/2019/11/docs-05-3474-21-0csg-zigbee-specification.pdf>.
22. ZigBee Pro. *ZigBee Alliance*. 2019.
23. BLOG. *Základní rozdíly čipů Espressif ESP8266 vs ESP32*. 2019. Dostupné tiež z: <https://blog.vyoralek.cz/iot/zakladni-rozdily-cipu-espressif-esp8266-vs-esp32/>.
24. SITES, Buy. *ESP8266 ESP-12 – Getting started – Home Automation for Dummies*. [B.r.]. Dostupné tiež z: https://sellugsk.live/product_details/57493.html.
25. ROBOTS. *ESP32-WROOM-32 WiFi and BLE IoT Wireless Module Chip 4Mbit Flash*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://robots.co.in/esp32-wroom-32-wifi-ble-iot-wireless-module-chip-4mbit-flash.html>.
26. VYORÁLEK, Jiří. *Základní rozdíly čipů Espressif ESP8266 vs ESP32*. 2019. Dostupné tiež z: <https://blog.vyoralek.cz/iot/zakladni-rozdily-cipu-espressif-esp8266-vs-esp32/>.
27. RENESAS. *Overview of DALI Communication*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.renesas.com/us/en/key-technologies/dali-solutions>.
28. LASKAKIT. *RTC Hodiny reálného času DS3231 AT24C32*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://www.laskakit.cz/arduino-rtc-hodiny-realneho-casu-ds3231-at24c32/>.
29. MICHALOVIČ, Jakub. Riadiaca jednotka svetelného zdroja pre fototerapiu. 2022. Dostupné tiež z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/100858>.

30. *ESP32 Pinout Reference: Which GPIO pins should you use?* [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-pinout-reference-gpios/>.
31. ESPRESSIF. *Troubleshooting*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://docs.espressif.com/projects/esptool/en/latest/esp32/troubleshooting.html>.
32. ESPRESSIF. *Boot Mode Selection*. [B.r.]. Dostupné tiež z: <https://docs.espressif.com/projects/esptool/en/latest/esp32/advanced-topics/boot-mode-selection.html#manual-bootloader>.

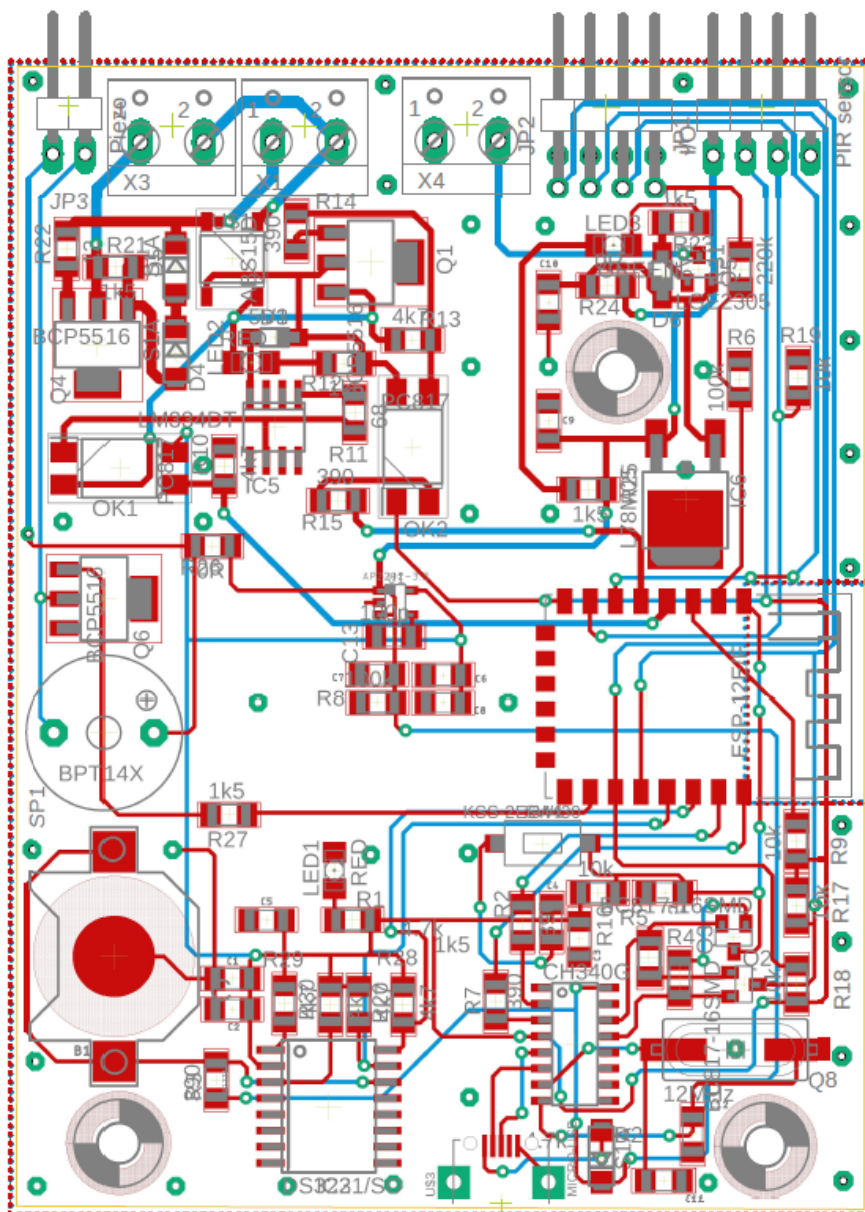
Prílohy

A Schéma riadiacej jednotky s procesorom ESP8266



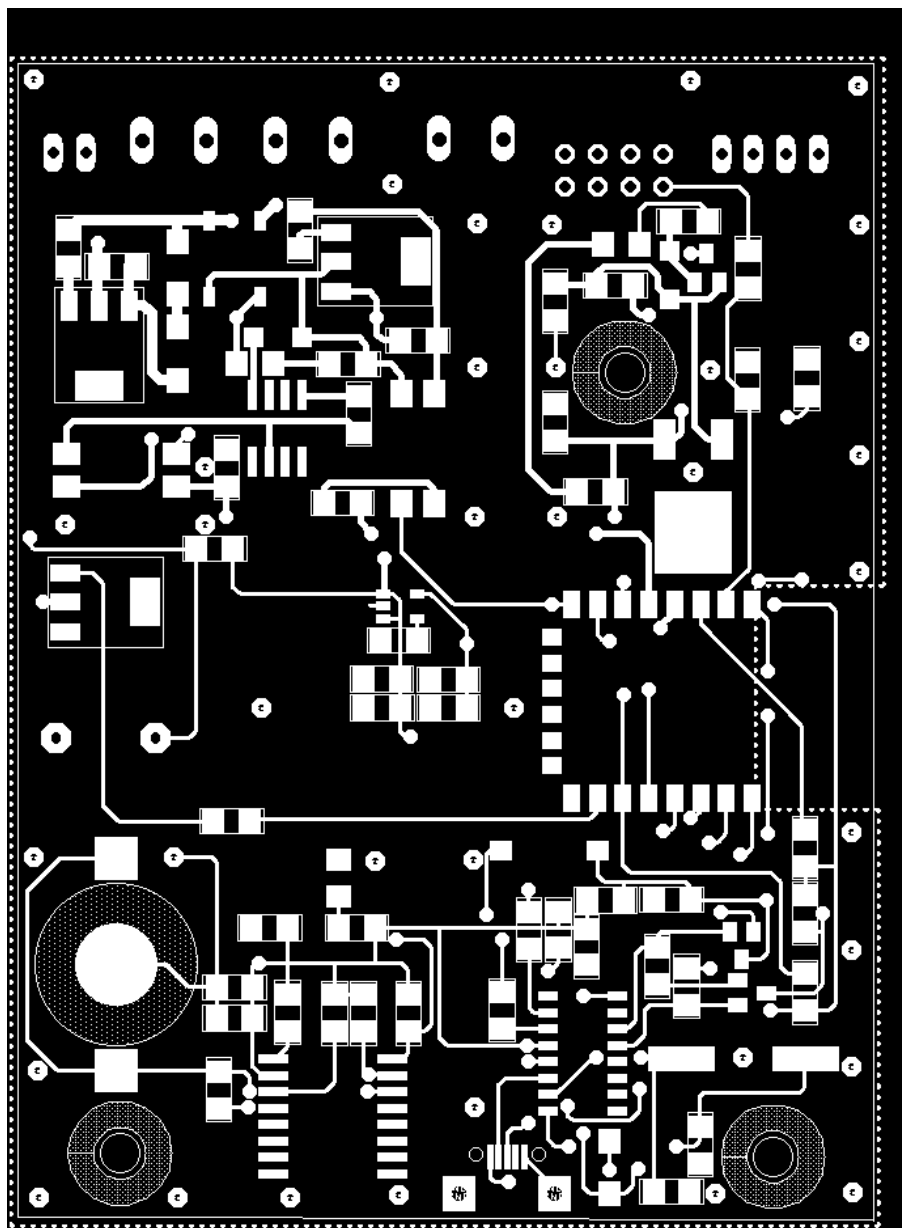
Obr. 8: Schéma zapojenia riadiacej jednotky s procesorom ESP8266, ktorá je výsledkom tejto diplomovej práce.

B Návrh dosky plošného spoja s procesorom ESP8266



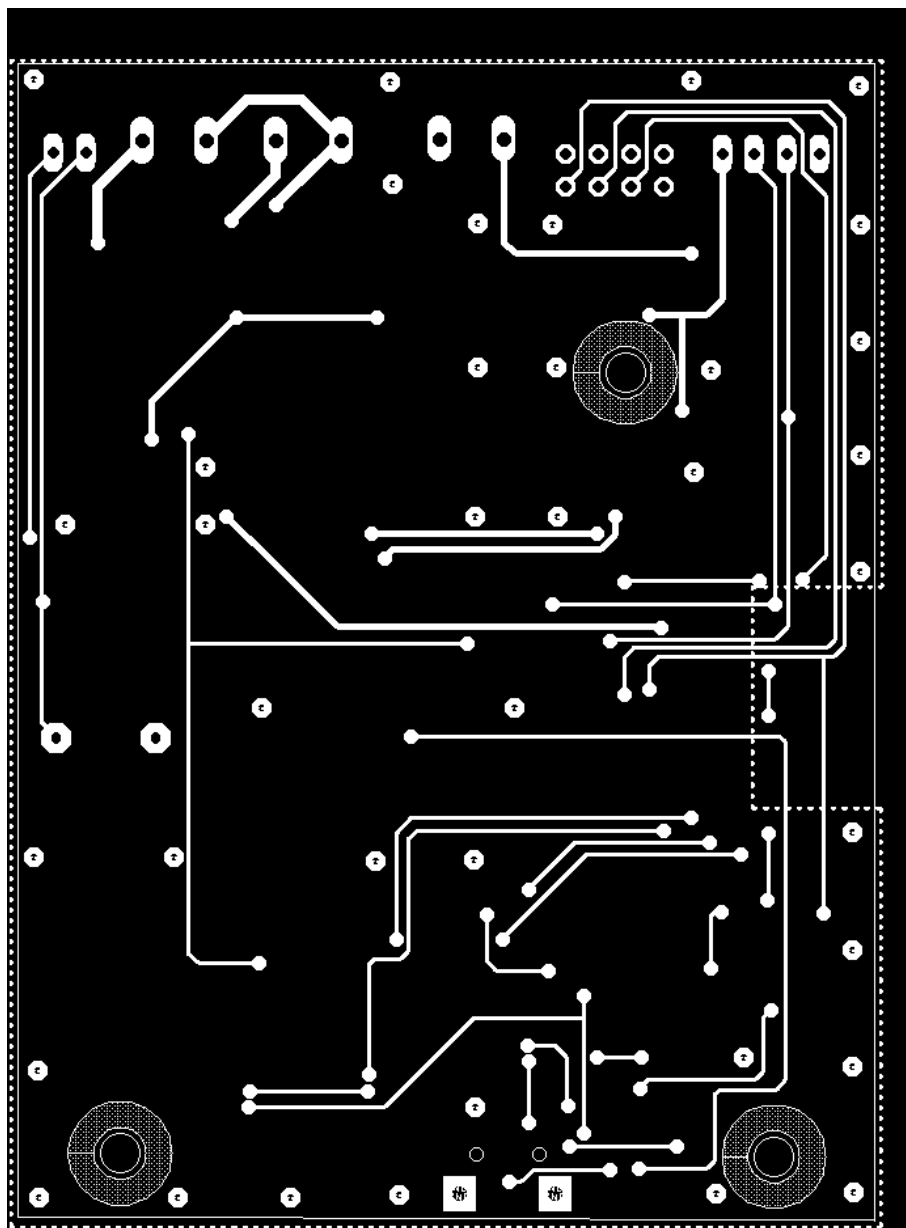
Obr. 9: Celkový návrh verzie dosky plošných spojov riadiacej jednotky s procesorom ESP8266. Rozmery dosky sú 6,5x9 cm.

C Náhľad verzie s procesorom ESP8266



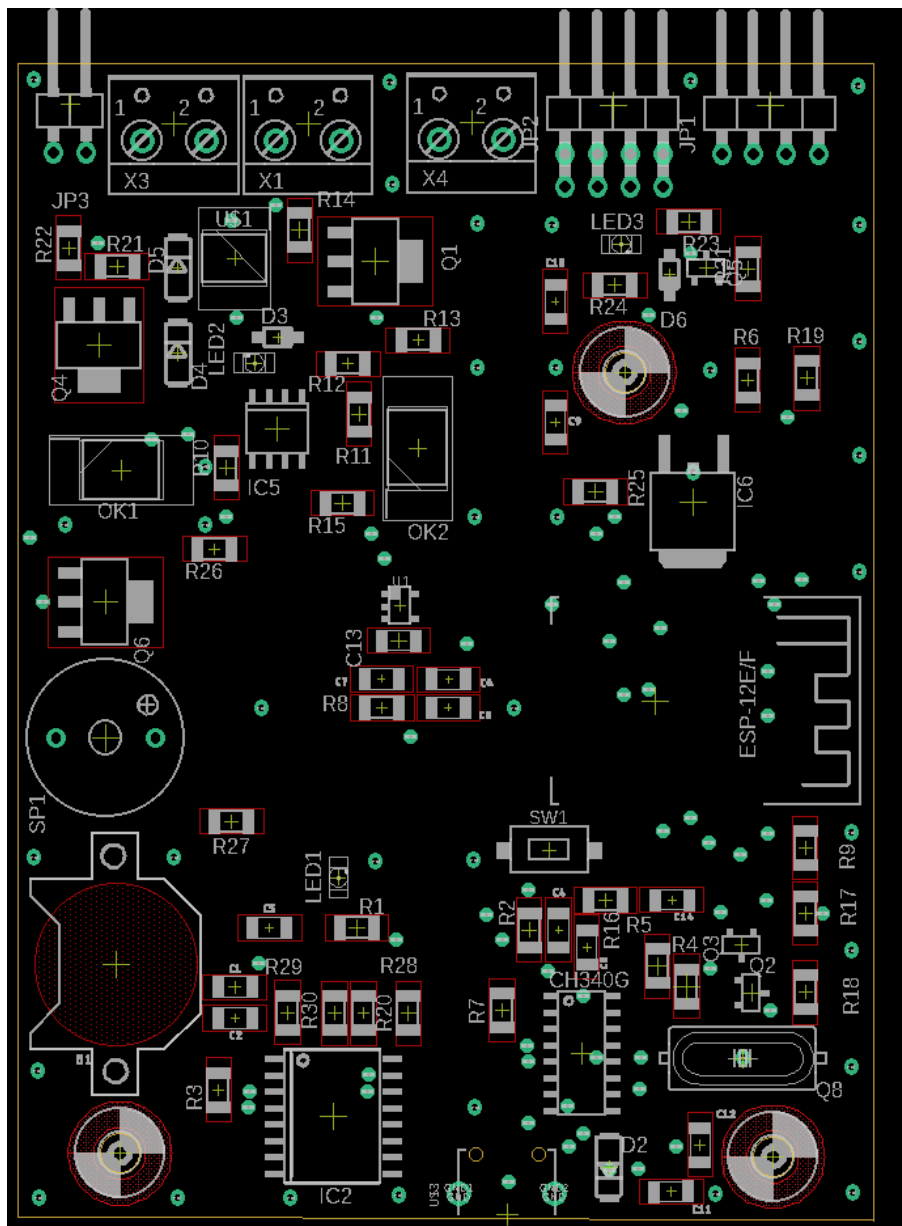
Obr. 10: Náhľad na hornú stranu riadiacej jednotky.

D Náhľad verzie s procesorom ESP8266



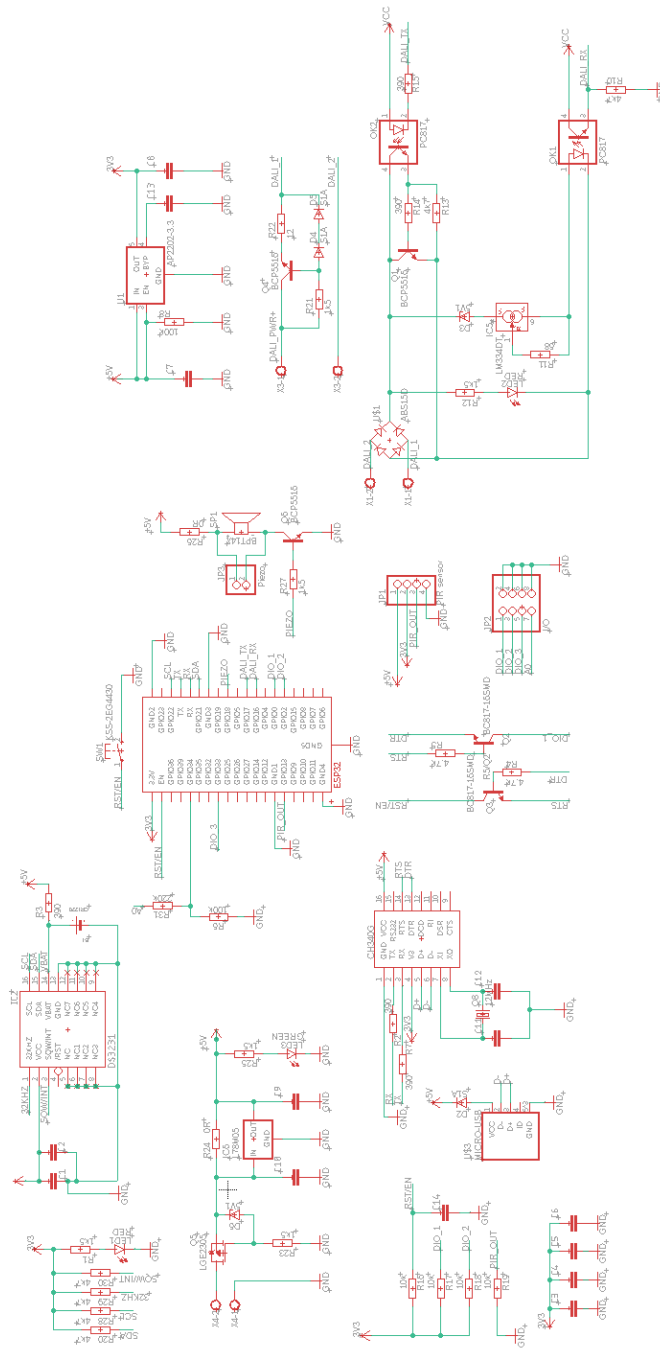
Obr. 11: Náhľad na spodnú stranu riadiacej jednotky.

E Náhľad verzie s procesorom ESP8266



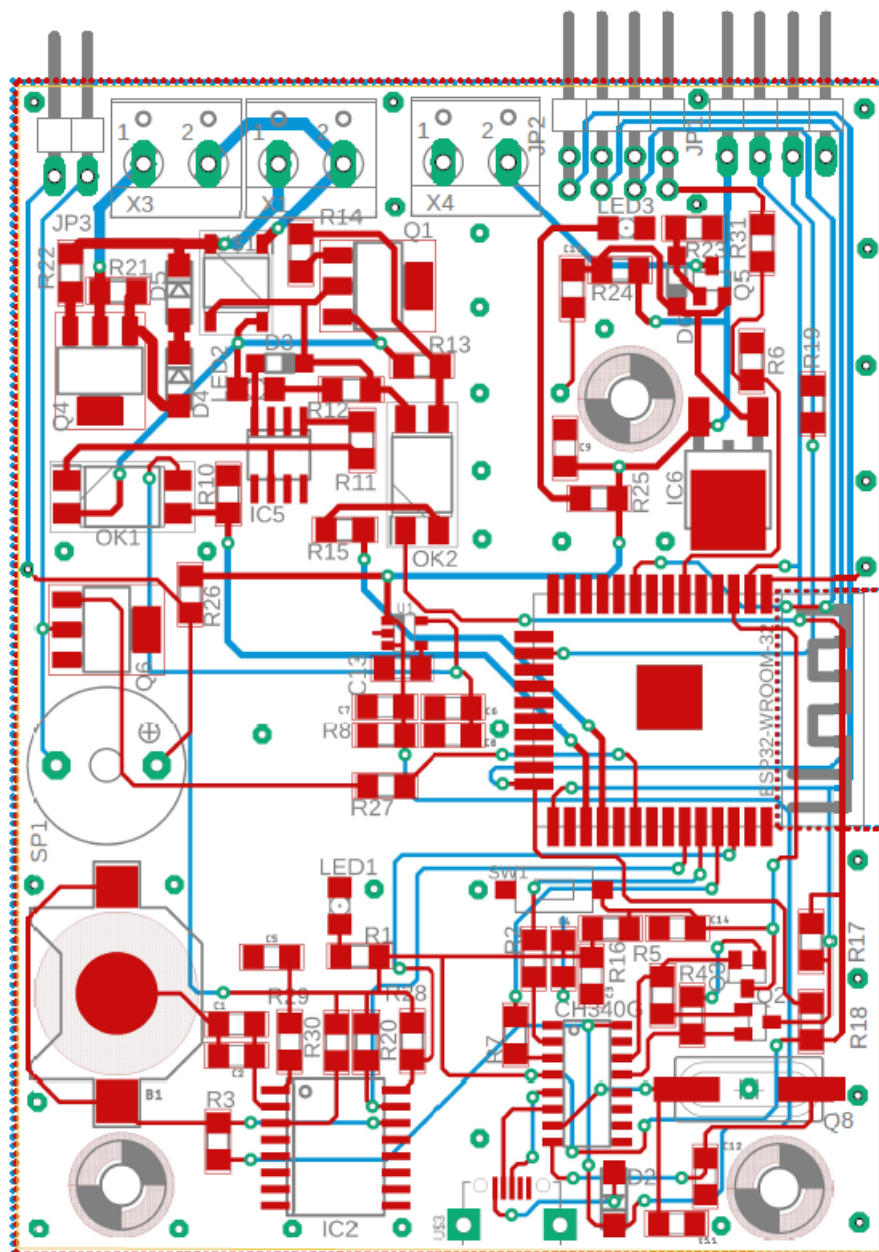
Obr. 12: Plán osadenia súčiastok na doske s procesorom ESP8266.

F Schéma riadiacej jednotky s procesorom ESP32



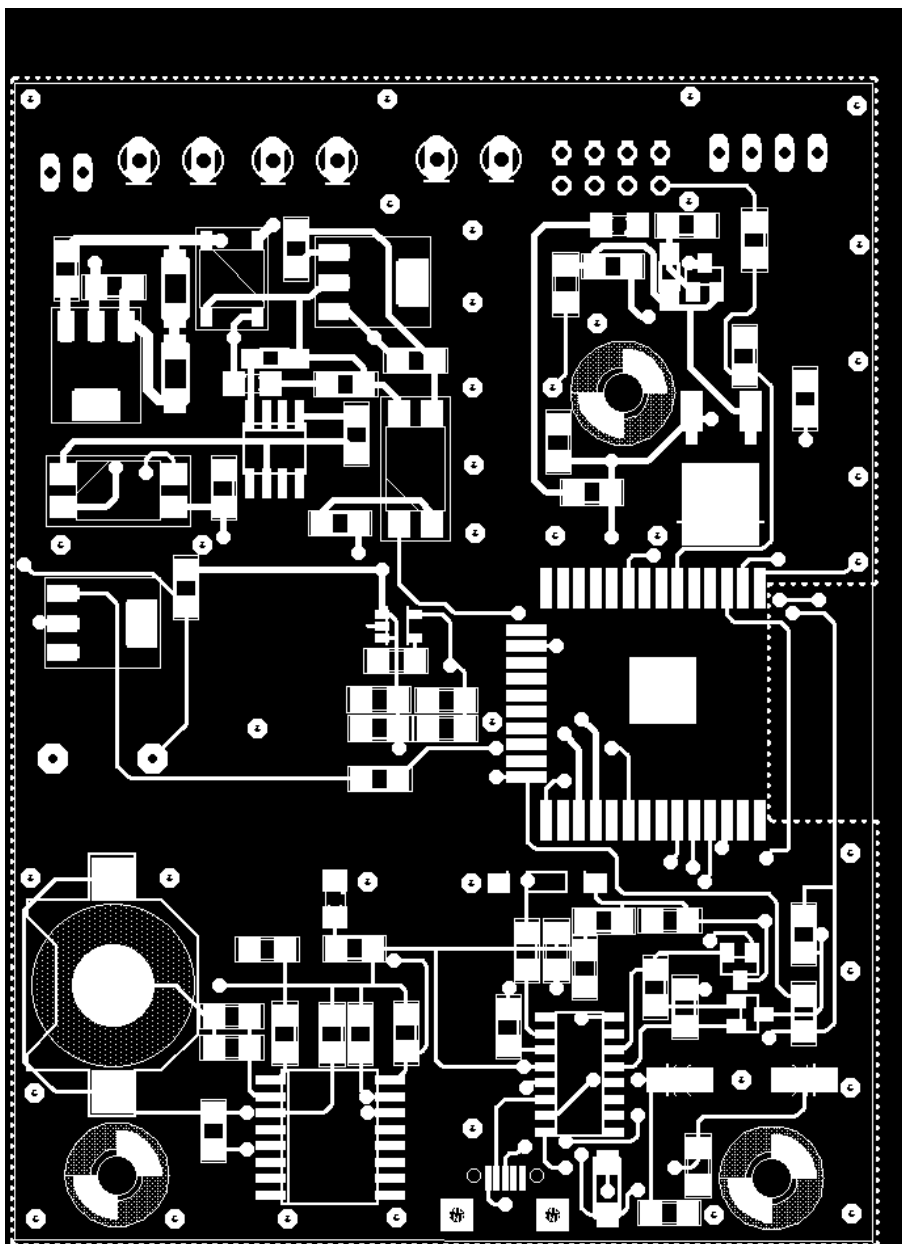
Obr. 13: Schéma zapojenia riadiacej jednotky s procesorom ESP32, ktorá je výsledkom tejto diplomovej práce.

G Návrh dosky plošného spoja s procesorom ESP32



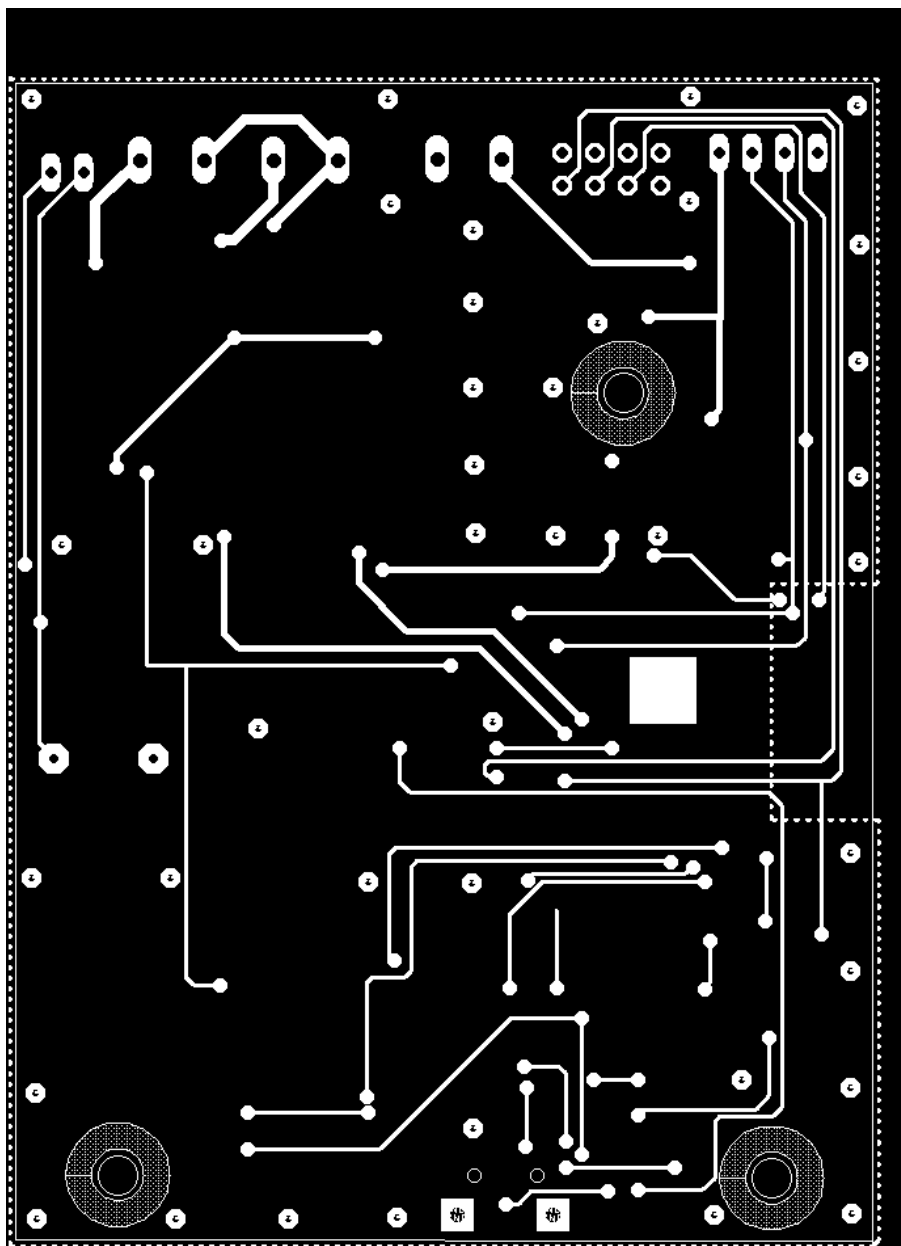
Obr. 14: Celkový návrh verzie dosky plošných spojov riadiacej jednotky s procesorom ESP32. Rozmery dosky sú 6,5x9 cm.

H Náhľad verzie s procesorom ESP32



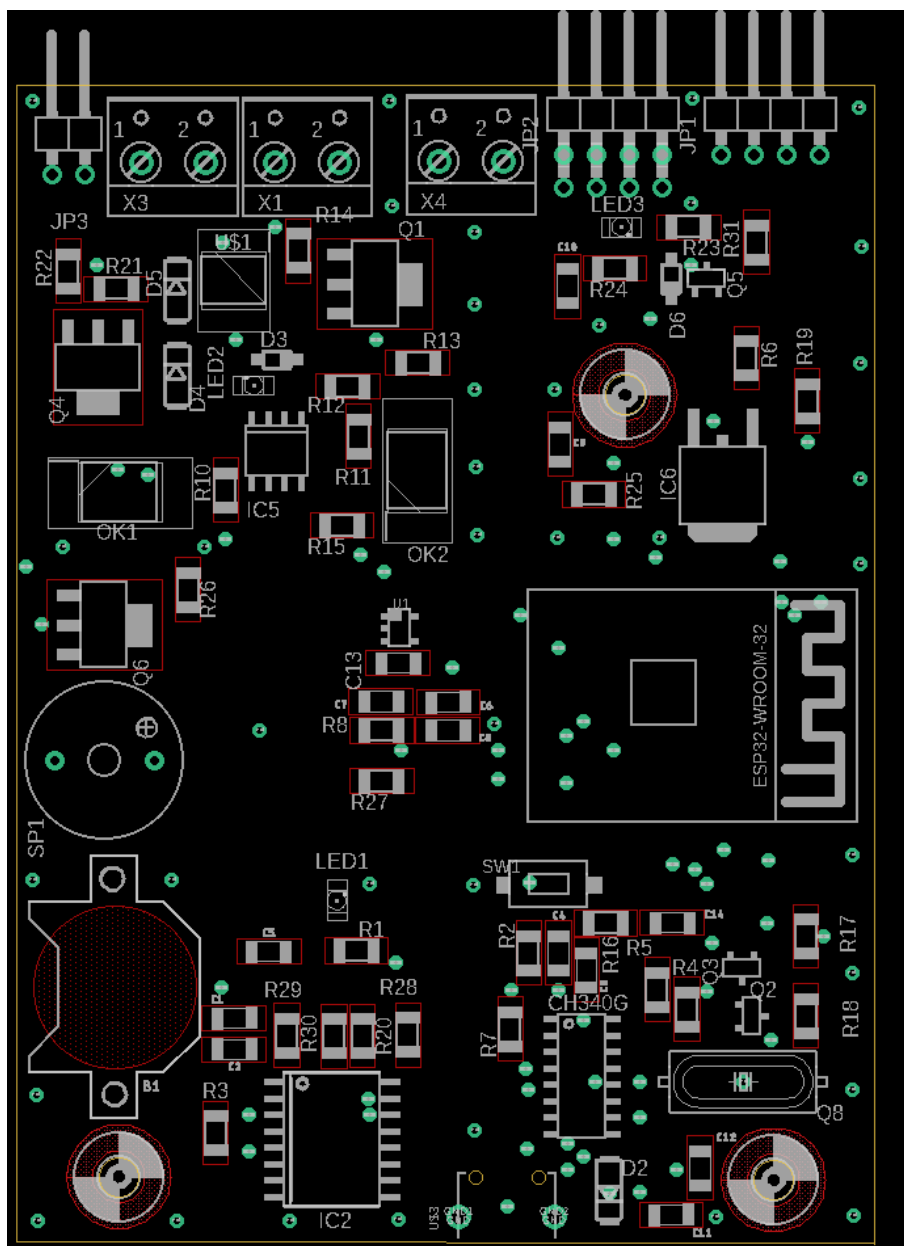
Obr. 15: Náhľad na hornú stranu riadiacej jednotky.

I Náhľad verzie s procesorom ESP32



Obr. 16: Náhľad na spodnú stranu riadiacej jednotky.

J Náhľad verzie s procesorom ESP32



Obr. 17: Plán osadenia súčiastok na doske s procesorom ESP32.