

Univerzita Jana Evangelisty Purkyně
v Ústí nad Labem
Přírodovědecká fakulta



Vývoj řídicí desky pro regulaci tepelného
čerpadla

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracoval: Jiří Matoušek

Vedoucí práce: Ing. Petr Haberzettl

Studijní program: Aplikovaná informatika

Studijní obor: Informační systémy

ÚSTÍ NAD LABEM 2024

UNIVERZITA JANA EVANGELISTY PURKYNĚ V ÚSTÍ NAD LABEM
Přírodovědecká fakulta
Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Jméno a příjmení: Jiří MATOUŠEK
Osobní číslo: F20183
Studijní program: B1802 Aplikovaná informatika
Studijní obor: Informační systémy
Téma práce: Vývoj řídící desky pro regulaci tepelného čerpadla
Zadávající katedra: Katedra informatiky

Zásady pro vypracování

Cílem bakalářské práce je vyvinutí řídící desky, která bude s pomocí teplotních čidel, průtokoměru a tlakoměru schopna regulovat tepelné čerpadlo a spolu s třicestnými ventily a čerpadly i celý tepelný okruh rodinného domu.

Pracovat bude ve dvou základních režimech: "PAST" a "S použitím deskového výměníku". Jednotka bude provádět sběr dat o změnách konfigurace a celkovém běhu s odesíláním na server. Uživatelské rozhraní bude realizováno prostřednictvím dotykového displeje Nextion.

Řídící deska bude prakticky testována na akumulační nádrži s výměníkem pro přímý výpar kondenzátu s bivalentní (patrona 2 kW, 4 kW nebo 6 kW).

Osnova:

1. rešerše o aktuálních řešeních regulace
2. vysvětlení použitych pojmu
3. návrh schématu plošného spoje
4. sestavení plošného spoje
5. naprogramování a nastavení regulace
6. testování a vyhodnocení
7. získání statistických dat o celkovém běhu

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam doporučené literatury:

1. KESL, Jan. *Elektronika 1: analogová technika*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-074-1.
2. SMITH, Alan G. *Introduction to Arduino: A piece of cake!* [online]. 2011 [cit. 2022-10-18]. ISBN 1463698348. Dostupné z: <http://www.introtoarduino.com/downloads/IntroArduinoBook.pdf>
3. MONK, Simon a Duncan AMOS. *Make Your Own PCBs with EAGLE: From Schematic Designs to Finished Boards*. 2nd edition. New York: McGraw Hill TAB, 2017. ISBN 1260019195.

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Haberzettl
Katedra informatiky

Datum zadání bakalářské práce: 31. října 2022
Termín odevzdání bakalářské práce: 30. dubna 2024

L.S.

doc. RNDr. Michal Varady, Ph.D.
děkan

RNDr. Jiří Škvor, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a použil jen pramenů, které cituji a uvádím v přiloženém seznamu literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., ve znění zákona č. 81/2005 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Jana Evangelisty Purkyně v Ústí nad Labem oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladu, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

V Ústí nad Labem dne 29. dubna 2024

Podpis:

Děkuji vedoucímu práce Ing. Petru Haberzettlu
za neocenitelné rady a pomoc při tvorbě bakalářské práce.

Dále děkuji Jaroslavu Gasparikovi za praktické rady
týkající se tvorby plošného spoje a programování.

Abstrakt:

Tato práce se zaměřuje na vývoj a tvorbu řídicí desky, pro regulaci splitového tepelného čerpadla vzduch-voda, postavené na mikrokontroléru ESP32-S3. Součástí práce je návrh a realizace vlastního plošného spoje. V teoretické části je popsána základní teorie ostatních možností řízení a jednotlivých typů regulátorů spolu s vysvětlení základního principu fungování tepelného čerpadla. Dále je představen použitý hardware a popis použité technologie. Praktická část práce se skládá z elektrotechnických schémat plošného spoje, fyzického návrhu plošného spoje pro výrobu a dílčích částí kódu. Práce implementuje i další vlastní vyvinutý hardware (3D tisknutelná krabička pro montáž na DIN lištu). V poslední řadě jsou součástí práce nasbíraná data z testovacího provozu.

Klíčová slova: ESP32, PID regulace, tvorba plošného spoje, řízení tepelného čerpadla

DEVELOPMENT OF THE HEAT PUMP CONTROL BOARD

Abstract:

This thesis focuses on the development and creation of a control board for the control of a split air-to-water heat pump, based on the ESP32-S3 microcontroller. In the theoretical part, the basic theory of the other control options and the different types of controllers is described, together with an explanation of the basic principle of operation of the heat pump. Furthermore, the hardware used and a description of the technology used is presented. The practical part of the thesis consists of the electrical schematics of the PCB, the physical design of the PCB for manufacturing and the code components. The thesis also implements other self-developed hardware (3D printable box for DIN rail mounting). Lastly, the work includes data collected from test runs.

Keywords: ESP32, PID regulation, circuit board formation, heat pump control

Obsah

Úvod	11
TEORETICKÁ ČÁST	13
1. Tepelná čerpadla	15
1.1. Základní dělení	15
1.2. Princip funkce tepelného čerpadla	15
1.3. Monobloková tepelná čerpadla	16
1.4. Dělená/splitová tepelná čerpadla	16
2. Plošný spoj	17
2.1. THD součástky	17
2.2. SMD součástky	17
3. Existující možnosti řízení	19
3.1. Moduly UTI-INV	19
3.2. Kostečka CIM modul	21
3.3. Programovatelný logický automat	22
4. Regulace	23
4.1. ON/OFF regulace	23
4.2. Proporcionální regulátor	23
4.3. Proporcionálně integrační regulátor	24
4.4. Proporcionálně derivační regulátor	24
4.5. Proporcionálně integračně derivační regulátor	25
5. Použitý hardware	27
5.1. Espressif Systems	27
5.2. BPI-Leaf-S3	27
5.3. ESP32-S3	27
5.4. Vstupně-výstupní piny a převodníky	28
5.5. Napájení	28
5.6. Pokročilá periferní rozhraní	29
5.7. Nextion displej	31

6. Bluetooth	33
6.1. Bluetooth Classic	33
6.2. Bluetooth Low Energy	33
7. Sériové sběrnice RS-485, RS-422 a RS-232	37
7.1. RS-485	37
7.2. RS-232	38
7.3. Terminace a přenosová rychlosť	38
8. Modbus	39
8.1. Protokol	39
8.2. Modbus přes sériovou linku	40
PRAKTIČKÁ ČÁST	41
9. Návrh plošného spoje	43
9.1. Napájení	43
9.2. Vstupně-výstupní porty	44
9.3. SD karta	47
9.4. Zbylé obvody	47
10. Sestavení desky plošného spoje	49
10.1. Osazená deska	49
11. Vytvoření firmwaru	51
11.1. Struktura	51
11.2. Třída pro řízení stavů	52
12. Testování	53
12.1. Data z provozu	53
13. Závěr	55
A. Externí přílohy	59

Úvod

Automatizace a regulace jsou v dnešní době neoddělitelnou součástí každodenního života, což umožnuje efektivnější a pohodlnější prostředí pro život. Tato bakalářská práce se zaměřuje na segment automatizace domácích tepelných systémů, konkrétně na splitová tepelná čerpadla. Cílem je provést rešerši současných metod řízení a na základě získaných informací navrhnout a vyvinout vlastní řídicí desku pro regulaci splitového tepelného čerpadla spolu s otopnou soustavou objektu. Hlavním důvodem pro tvorbu této desky je cena již existujících možností, které přesahují několik tisíc. Součástí práce je kompletní návrh řídicí desky od elektrotechnických schémat zapojení a propojení jednotlivých součástí, přes návrh osazení a rozmístění daných prvků pro výrobu. Následovaný vytvořením vlastního firmwaru pro regulaci výkonu tepelného čerpadla v závislosti na teplotách a požadovaných hodnotách. S podporou vzdáleného dohledu, podrobným logováním a s možností servisní konfigurace z mobilní aplikace (vyvíjené mimo tuto práci) spojené s řídicí deskou přes Bluetooth. Jako hlavním uživatelským rozhraním bude sloužit rovněž mobilní aplikace, případně volitelný dotykový displej Nextion.

Teoretická část popisuje seznámení s základním principem činnosti tepelných čerpadel společně s jejich základním dělením. Obsahuje rešerši a aktuálních způsobech řízení využitelných pro automatizaci splitových tepelných čerpadel a otopné soustavy. Následně prezentuje nejčastěji používané regulátory a způsoby regulace. Dále použitý hardware a využité technologie, spolu s vysvětlením klíčových pojmu.

Praktická část popisuje návrh a přípravu podkladu pro výrobu samotného plošného spoje, spolu s vytvořením vlastního firmwaru. A to od elektrotechnických schémat, přes návrh osazení a rozmístěné součástí pro výrobu plošného spoje, až po vývoj vlastního firmwaru spolu s vyhodnocením v testovacím provozu. V neposlední řadě je součástí práce návrh vlastní 3D tisknutelné krabičky pro montáž na DIN lištu, která zajistí jednoduchou instalaci a bezpečné použití výsledného produktu.

TEORETICKÁ ČÁST

Teoretická část bakalářské práce seznamuje čtenáře s obecným principem funkce tepelného čerpadla a s existujícími možnostmi řízení splitového tepelného čerpadla vzduch-voda. Představuje použitý hardware založený na mikrokontroléru EPS32-S3 a využité technologie, jako je komunikace Modbus pře RS-485, Bluetooth a další. Dále obsahuje vysvětlení použitých regulátorů P, PI a PID. Veškeré informace zde dostupné pocházejí z citovaných zdrojů a mých vlastních znalostí a zkušeností.

1. Tepelná čerpadla

Tepelné čerpadlo je cyklicky pracující stroj, zajišťující převod tepelné energie z venkovního prostředí do vnitřních prostorů objektů. Toho je dosaženo kolujícím teplovodným médiem, za pomocí kompresoru a několika akčních členů, v uzavřeném chladícím okruhu.

Tepelná čerpadla dnes najdeme téměř všude. Od použití pro vytápění a chlazení budov, v automobilech, lednicích ...

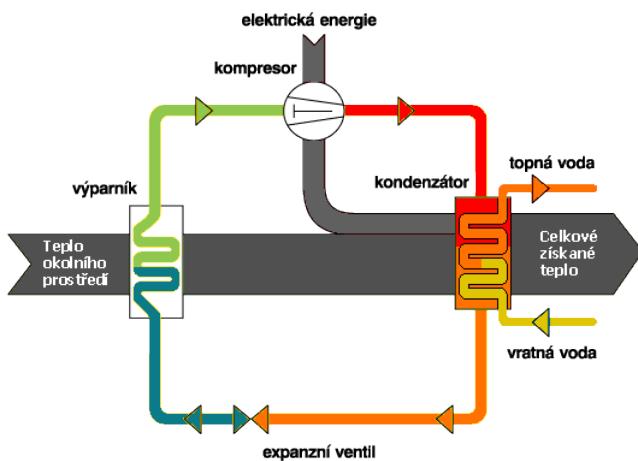
1.1. Základní dělení

Základní dělení tepelných čerpadel je dle zdroje získávání tepelné energie, tedy na zemní, vzduchová a vodní tepelná čerpadla. Jak již názvy napovídají, tak zemní tepelná čerpadla získávájí tepelnou energii ze země, to buď ze zemního kolektoru nebo vrtu, zatímco vzduchová ze vzduchu, a ta vodní z vody. Tepelná čerpadla vzduch-voda, kterých se týká vývoj řídicí desky, dělíme na dvě skupiny:

- Monobloková tepelná čerpadla - s hermeticky uzavřeným chladicím okruhem ve venkovní jednotce
- Dělená/splitová tepelná čerpadla - chladicí okruh prochází do vnitřní jednotky

1.2. Princip funkce tepelného čerpadla

Teplonosné médium proudí v kapalném stavu ke zdroji tepla. Toto médium je v rovnováze se svým okolím a při daném tlaku a teplotě nemá snahu měnit svůj stav na jiný. V místě, kde chceme získávat teplo, náhle snížíme tlak média pomocí expanzního ventilu 1.1. Pokles tlaku způsobí, že teplota vypařování média klesne pod teplotu zdroje energie a médium se vypaří. Během vypařování médium odebírá teplo z okolí a akumuluje jej v sobě. Následně je médium v plynném stavu i s naakumulovanou energií vedeno k místu, kde tuto energii chceme zužitkovat. V daném místě nyní náhle zvýšíme tlak pomocí kompresoru 1.1. Zvýšení tlaku způsobí, že teplota kondenzace média vzroste nad teplotu v zásobníku vody a médium začne kondenzovat. Při kondenzaci je teplo, které se v médiu naakumulovalo při vypaření, předáváno do vody v zásobníku. Odevzdané teplo způsobí nárůst teploty okolí a jednoduše řečeno, zahřejeme vodu, kterou pak můžeme například vytápět. [1]



Obrázek 1.1.: Schéma principu funkce tepelného čerpadla, obrázek z [2]

1.3. Monobloková tepelná čerpadla

Při označení „monoblokové tepelné čerpadlo“, se jedná o tepelná čerpadla vzduch-voda, u nichž probíhá celý cyklus chladiva uvnitř jednotky. Vstupním a výstupním médiem, do takovéto jednotky, je voda otopené soustavy. To s sebou ovšem přináší riziko zamrznutí.

Výhodou takového řešení je jednoduchost instalace a absence nutnosti osvědčení pro chladicí zařízení, které je nutné v případě splitových tepelných čerpadel. Konstrukce umožňuje tato čerpadla použít k venkovní i vnitřní instalaci.

1.4. Dělená/splitová tepelná čerpadla

U tepelných čerpadel označovaných jako „dělená/splitová tepelná čerpadla”, probíhá část cyklu chladiva mimo jednotku. Čás chladivového okruhu, přesněji tepelný výměník označený jako kondenzátor 1.1, je v provedení trubkového výměníku obsažen uvnitř nádrže 1.2b nebo v provedení deskového výměníku 1.2a mimo jednotku tepelného čerpadla.



(a) Deskový výměník-chladivo/voda

(b) Trubkový výměník-chladivo/voda

Obrázek 1.2.: Tepelné výměníky chladivo/voda. Obrázky z [3]

2. Plošný spoj

Plošný spoj, často označovaný zkratkou DPS (deska plošných spojů), představuje základní prvek pro sestavení elektronických obvodů. Deska je nejčastěji tvořena sklolaminátovou vrstvou, která je na jedné nebo obou stranách pokryta vrstvou mědi s následně osazenými součástkami. Pro složitější elektronické obvody je možné vytvořit DPS s několika vodivými vrstvami mědi, což umožnuje efektivnější a komplexnější propojení potřebných součástek. Elektronické součástky jsou k desce připojeny pájením pomocí cínové pájky, čímž je zajištěna jejich funkčnost v obvodu. Elektronické součástky z hlediska osazování na DPS dělíme do dvou skupin: THD a SMD.

2.1. THD součástky

THT, nebo také „Through-Hole Technology”, je označení pro technologii a způsob montáže THD elektronických součástek. Součástky jsou montovány skrze otvory v DPS s následným připájením z obou stran.

Nevýhodou a výhodou THD součástek současně jsou především jejich rozměry. V případě tvorby kompaktních zařízení, jsou rozměry součástek zápozem. V případě snahy o snažší opravitelnost zařízení, jsou rázem neocenitelnou výhodou.

2.2. SMD součástky

SMT neboli „Surface-Mounted Technology”, je způsob montáže elektronických součástek přímo na DPS. Na rozdíl od součástek montovaných pomocí technologie THT, nevyžadují SMD součástky tvorbu otvorů do DPS, jelikož jsou připájeny přímo na povrch plošného spoje.

SMD součástky se vyznačují tím, že jsou obvykle menší než jejich THT protějšky. Tím je umožněno větší nahuštění součástek v rámci DPS a následná výroba DPS je tímto rychlejší a levnější.



Obrázek 2.1.: Porovnání montáže součástek na DPS

3. Existující možnosti řízení

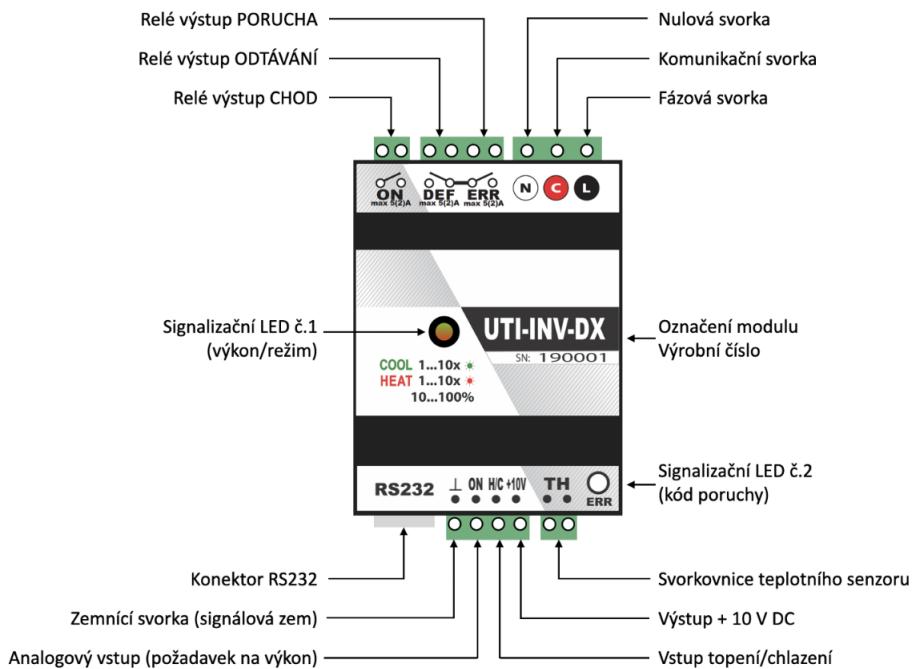
Tato kapitola pojednává již o existujících možnostech řízení jednotky splitového tepelného čerpadla, které se běžně používají v praxi. Ovšem nenabízejí všechny požadované funkce a možnosti. A pokud ano, tak nejsou vždy ekonomicky nejvhodnější.

3.1. Moduly UTI-INV

Modul UTI-INV slouží k ovládání a regulaci inverterových venkovních jednotek FUJITSU v případě použití tepelných výměníků jiných výrobců, nebo jiných konstrukcí, namísto originální vnitřní jednotky. Modul UTI-INV umožnuje návrh a konstrukci jednoduchých chladících a topících systémů na principu tepelného čerpadla, s využitím standardních inverterových venkovních jednotek FUJITSU. Modul je použitelný pro všechny modely venkovních inverterových jednotek Fujitsu, kromě multisplitových a jednotek VRF. Nastavení a aktualizace modulů se provádí přes připojení RS-232 s použitím počítačového programu UTI-TOOL. [4]

UTI-INV-DX

Modul UTI-INV-DX ovládá venkovní invertorovou jednotku pomocí analogového vstupu ON. V rozsahu přivedeného napětí od 0V do 10V. Analogový vstup slouží k nastavení požadovaného výkonu kompresoru v rozmezí 0-100%. V případě propojení svorky ON se svorkou +10V přes beznapěťový kontakt. Pracuje modul v režimu regulace ON-OFF. Nedisponuje žádnou možností vzdáleného přístupu ani možností připojení k nějakému nadřazenému systému.[3]



Obrázek 3.1.: Zapojení modulu UTI-INV-DX, obrázek z [3]

UTI-INV-U(W,R32)

Moduly UTI-INV-U(W,R32) ovládají venkovní jednotku pomocí analogového vstupu, stejně jako modul řady DX. Moduly se liší dle použité venkovní jednotky a možností připojení příslušenství. Rozšiřující moduly UTI-EXP (rozšíření vstupů) a UTI-IQCP (ovládací panel). Rovněž jako modul DX nedisponuje žádnou možností vzdáleného přístupu ani možností připojení k nějakému nadřazenému řídicímu systému. Porovnání 3.2.

UTI-INV-485

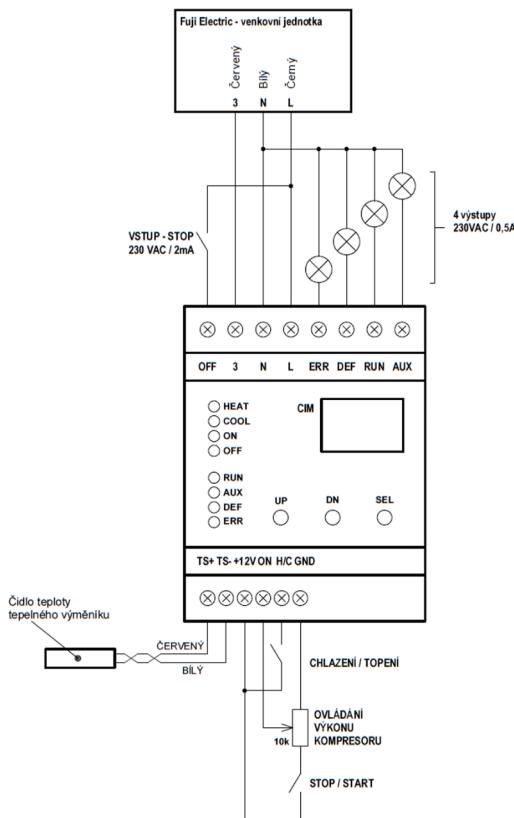
Modul UTI-INV-485 slouží k ovládání venkovní jednotky pomocí komunikačního protokolu Modbus přes třívodičovou sběrnici RS-485. Je tedy nutné připojení k nějakému nadřazenému řídicímu systému, ať už některému systému PLC nebo klidně nějakému vlastnímu řešení. [5]

				
Označení		UTI-INV-U(W,R32)	UTI-INV-DX	UTI-INV-485
Řízení (požadavek na výkon)		0-10 V DC, interní regulace	0-10 V DC	ModBus (RS485)
Sběrnice	Typ	RS232 (4 pin konektor)	RS232 (4 pin konektor)	R485 (svorkovnice)
	Nastavení	ANO (UTI-TOOL + USB kabel)	ANO (UTI-TOOL + USB kabel)	NE
	Upgrade FW	NE (pozeve ve výrobě)	ANO (UTI-TOOL + USB kabel)	ANO (UPDATER kabel + SW)
Výstupy	Výstup	230V	kontakt	NE
	Typ	Chod, porucha, error	Chod, porucha, error	
	Nastavitelné	NE	ANO (NC, NO)	
Vstupy	0 - 10 V DC	požadavek na výkon	požadavek na výkon	NE
	Kontaktní	topeni/chlazení	topeni/chlazení	
	230 V AC	útlum/sazba	NE	
LED	Výkon	ANO	ANO	NE
	Topeni/chlazení	ANO	ANO	přes ModBus
	Porucha venkovní jed.	NE	ANO	přes ModBus
Čidla	Typ	Digitální	Odpovídá	Odpovídá
	Max. počet	8	1	1
Interní regulace		ANO	NE	NE
Příslušenství		UTI-EXP, UTI-IQCP	NE	NE
Venkovní jednotky	AOYG (R410a)	UTI-INV-U	UTI-INV-DX	UTI-INV-485
	AOYG (R32)	UTI-INV-R32		
	WOYx (R410a)	UTI-INV-W		
Montáž na DIN lištu		ANO	ANO	ANO
Svorkovnice		šroubková	šroubková (vyměnitelná)	šroubková (čidlo na konektor)
Rozměry (mm)		90x67x65	90x67x65	90x35x65

Obrázek 3.2.: Porovnání modulů UTI, obrázek z [6]

3.2. Kostečka CIM modul

CIM (Control Interface Module) modul slouží pro ovládání inverterových venkovních jednotek Fuji Electric. K jeho nastavení se používá softwarový program CIM Manager. Nedisponuje žádnou možností vzdáleného přístupu, ale umožňuje připojení k nadřazenému řídicímu systému přes RS-485 nebo RS-232. Umožňuje lepší nastavení jednotlivých teploměrů a podrobnější nastavení regulace výkonu tepelného čerpadla v porovnání s UTI moduly. [7]



Obrázek 3.3.: Schéma zapojení CIM modul 1001, obrázek z [7]

3.3. Programovatelný logický automat

Programovatelný logický automat neboli PLC, je průmyslový počítač používaný nejčastěji pro nejrůznější automatizaci a regulaci průmyslových procesů. V dnešní době se s ním však můžeme setkat i v rámci automatizace rodinných domů. Nespornou výhodou PLC systémů je vysoká škálovatelnost funkcí a větší spolehlivost. Přeci jenom, se jedná o průmyslová řešení, kde je kladen větší důraz na životnost a celkovou spolehlivost systému. Mezi největší výrobce PLC patří, Siemens v oblasti průmyslu a výroby, Loxone v části celkové automatizace budov.

PLC systémy jsou rozhodně smysluplným řešením v případech, kdy je předpoklad pro řízení celé domácnosti. Jsou ovšem poněkud ekonomicky nevýhodné v případě záměru automatizace pouze jediného systému, například pro vytápění.

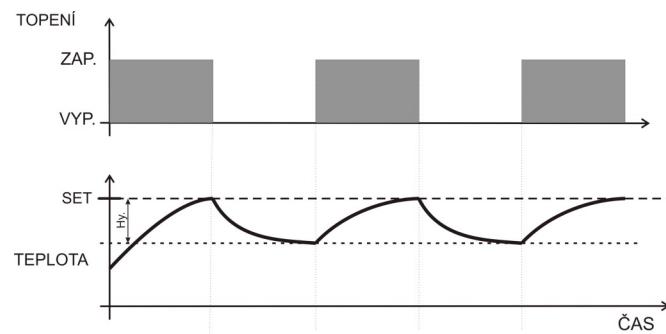
Rozšiřování systémů PLC probíhá pomocí rozšiřujících modulů, kdy každý jednotlivý modul, přidává nejčastěji jednu konkrétní funkci nebo možnost připojení periférií. Většina systémů nabízí rozšíření o možnosti jako jsou Bluetooth, sběrnice 1-Wire, RS-232 a RS-485, další spínané kontakty pře relé, rozšíření analogových a digitálních vstupů nebo výstupů a další.

4. Regulace

Regulátory dělíme na dvě základní skupiny, spojité a nespojité. Spojité regulátory jsou takové, jejichž výstupní veličina je spojitou funkcí vstupní veličiny. Spojité regulátory můžeme dále dělit na jednoduché a sdružené. Jelikož jednoduché regulátory mají každý určité omezení nebo dokonce nelze některé typy použít samostatně, tak se jednoduché regulátory sdružují.

4.1. ON/OFF regulace

On/Off regulace je základní typ regulace, též také nazývaná dvoupolohová regulace. Výkon tepelného čerpadla je v takovém případě maximální, tedy 100% a nebo nulový. Základními parametry jsou požadovaná hodnota, měřená hodnota a hystereze. Hystereze je hodnota, určující, o kolik se musí změnit naměřená hodnota, vůči hodnotě požadované, aby došlo k sepnutí.



Obrázek 4.1.: Typický průběh při On/Off regulaci, obrázek z [8]

4.2. Proporcionální regulátor

Proporcionální regulátor (regulátor P) se řadí mezi regulátory jednoduché spojité. U proporcionální regulace je výstupní veličina přímo úměrná vstupní veličině 4.1. Jedná se tedy o zesilovač. Roste-li hodnota regulované veličiny, klesá hodnota akční veličiny, a naopak. Se zvětšujícím součinitelem přenosu roste citlivos a přesnost regulace, ale snižuje se stabilita regulátoru. [9]

Matematický výraz pro výstupní veličinu P regulátoru je daný rovnicí:

$$u(t) = K_p e(t), \quad (4.1)$$

kde $u(t)$ je výstup regulátoru, K_p je proporcionální zesílení, $e(t)$ je regulační odchylka v čase t .

4.3. Proporcionálně integrační regulátor

Regulátor typu P má sice jednoduchou konstrukci a v případě správného nastavení je stabilní, ale bohužel trpí zásadním nedostatkem. Vykazuje trvalou regulační odchylku. Pro vyřešení tohoto nedostatku se k regulátoru P přidává regulátor integrační (regulátor I), který není jinak samostatně aplikovatelný.

U samostatného integračního regulátoru je výstupní veličina úměrná integrálu vstupní veličiny. Výstupní veličina se mění rychlostí úměrnou velikosti regulační odchylky.

Spojením regulátoru P a I dostáváme proporcionálně integrační regulátor (regulátor PI), který v sobě spojuje výhody rychlé odezvy na změny regulační odchylky, s možností regulovat statické soustavy s nulovou regulační odchylkou. [9]

Matematický výraz pro výstupní veličinu PI regulátoru je daný rovnicí:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (4.2)$$

kde $u(t)$ je výstup regulátoru, K_p je proporcionální zesílení, $e(t)$ je regulační odchylka v čase t , K_i je integrační zesílení, a $\int_0^t e(\tau) d\tau$ je integrál regulační odchylky přes čas.

4.4. Proporcionálně derivační regulátor

Samotný derivační regulátor (regulátor D) je stejně jako regulátor I samostatně neaplikovatelný. Tento typ regulátoru je takový, kdy výstupní veličina je přímo úměrná derivaci vstupní veličiny. Regulátor D zrychluje regulační děj. Jeho nevýhodou je, že reaguje na šum. [9]

Matematický výraz pro výstupní veličinu PD regulátoru je daný rovnicí:

$$u(t) = K_p e(t) + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.3)$$

kde $u(t)$ je výstup regulátoru, K_p je proporcionální zesílení, $e(t)$ je regulační odchylka v čase t , K_d je derivační zesílení, a $\frac{de(t)}{dt}$ je derivace regulační odchylky v čase.

4.5. Proporcionálně integračně derivační regulátor

PID regulátory obsahují všechny tři složky, tedy proporcionální, integrační a derivační. Regulátor typu PID se svou reakcí nejvíce přibližuje lidské reakci na poruchový impuls. [9]

Matematický výraz pro výstupní veličinu PID regulátoru je daný rovnicí:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4.4)$$

kde $u(t)$ je výstup regulátoru, K_p je proporcionální zesílení, $e(t)$ je regulační odchylka v čase t , K_i je integrační zesílení, $\int_0^t e(\tau) d\tau$ je integrál regulační odchylky přes čas, K_d je derivační zesílení, a $\frac{de(t)}{dt}$ je derivace regulační odchylky v čase. Rovnice převzata z [10].

5. Použitý hardware

Tato kapitola bakalářské práce pojednává o konkrétním použití hardware, který byl pořízen již jako hotový produkt. Jedná se o desku BPI-Leaf-S3 s mikrokontrolérem ESP32-S3 a displejem Nextion.

5.1. Espressif Systems

Espressif Systems, která má svou pobočku i v České republice, je významnou veřejně obchodovanou polovodičovou společností stojící za vývojem celosvětově populárních čipů ESP a modulů pro bezdrátovou komunikaci. Veškerý vývoj platformy ESP je zcela open-source. Espressif také aktivně pracuje na softwarových řešeních, SDK a API, které usnadňují vývoj aplikací využívajících jejich technologie. [11]

5.2. BPI-Leaf-S3

Banana Pi je projekt open source hardware vedený společností Guangdong Bipai Technology a podporovaný tchajwanskou společností Hon Hai Technology, více známou jako Foxconn. Jedním z produktů této společnosti je i řada desek BPI-Leaf-S3, které jsou určeny pro IoT. Tato řada desek je osazena mikrokontrolérem ESP32-S3, elektronikou potřebnou pro správnou funkčnost mikrokontroléru, rozhraním pro USB komunikaci, Neopixel LED diodou a možností připojení externí 3.7V lithiové baterie. [12]

5.3. ESP32-S3

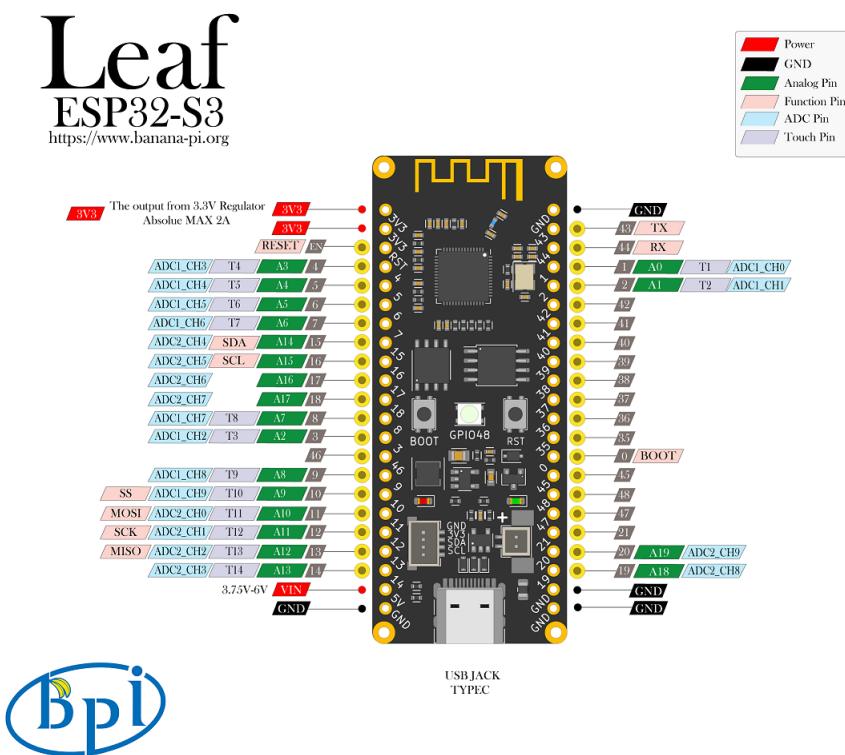
ESP32-S3 je nízkopříkonový čip (SoC) s integrovanou 2,4 GHz Wi-Fi (802.11 b/g/n) s 40MHz šířkou pásma a Bluetooth® Low Energy a Classic ve verzi 5. Skládá se z vysoce výkonného dvoujádrového mikroprocesoru (Xtensa® 32-bit LX7) s frekvencí 240MHz a koprocesoru ULP s nízkou spotřebou. Koprocesor ULP je užitečný při běhu pouze z baterie, kdy při uspání čipu do hlubokého spánku klesne spořeba na 10uA.

Mezi klíčové funkce ESP32-S3 patří hardwarová podpora kryptografické akcelerace. Podporovány jsou Secure boot, šifrování obsahu paměti flash, AES-128/256, RSA, Hash, HMAC a digitální podpis.

Pokročilá periferní rozhraní, která jsou nám k dispozici jsou například, SPI, I2C, I2S, RMT, UART, TWAI, PWM, USB Serial a nebo časovače a dvanáctibitové analogově digitální převodníky. [13]

5.4. Vstupně-výstupní piny a převodníky

Vstupně-výstupní piny mikrokontroléru slouží pro ovládání a čtení periferií. ESP32-S3 disponuje 36 programovatelnými GPIO piny. Tyto piny jsou na obrázku 5.1 označeny čísly v rozmezí od 0 do 48 včetně. Jednotlivé piny lze adresovat a softwarově nastavit jako vstup nebo výstup. ESP32 obecně pracuje s napěťovou úrovní 3,3V, tedy logická 0 odpovídá 0V a logická 1 se projeví jako 3,3V. To samozřejmě platí při využití pinů jako digitálních. Některé piny je možné využít pouze jako digitální jiné i jako analogové díky dvoum dvanáctibitovým analogově-digitálním převodníkům s podporou až 20 kanálů. Na těchto pinech je pak možné číst hodnotu elektrického napětí od 0 do 3,3 voltů. Na obrázku jsou tyto piny označeny zeleně s označením A1 až A19. [12]



Obrázek 5.1.: Náčrt hardwaru BPI-Leaf-S3, obrázek z [12]

5.5. Napájení

Desku BPI-Leaf-S3 lze napájet pomocí USB-C konektoru, z 3,7V lithiové baterie a externím napájení přes napěťový regulátor. USB napájení přijímá stabilní napětí 5V. V případě využití napájení z baterie, je na desce vyveden konektor pro možnost připojení 3,7V lithiové baterie. Externí napájení přes napěťový regulátor umožňuje rozsah napájecího napětí od 3,75V do 6V. Pro tento účel je

určený pin V_{in} , který lze vidět na obrázku 5.1. V případě připojené baterie a současného napájení z externího zdroje nebo přes USB-C konektor, dochází k nabíjení baterie.

Zároveň jsou na desce umístěny dva piny 3V3 (3.3V), ze kterých lze napájet externí komponenty. Maximální proudové zatížení při využití napájení přes tyto piny je 2A. [12]

5.6. Pokročilá periferní rozhraní

1-Wire

1-Wire je drátová poloduplexní sériová sběrnice navržená společností Dallas Semiconductor, která poskytuje nízkorychlostní (16,3 kbit/s) datovou komunikaci a napájecí napětí přes jeden vodič. Například teplotní čidla DS18B20 použitá dále v práci využívají této sběrnice. Jelikož každé 1-Wire zařízení má unikátní ID adresu. Lze připojit více teploměrů k jednomu vstupu. Tato vlastnost je také ideální pro čipy určené k přístupu pro otevřání zámků, zakódování alarmů a autorizaci přístupu.

Inter-Integrated Circuit (I^2C)

I^2C je synchronní sériová komunikační sběrnice, široce používaná v komunikaci periférních obvodů s mikrokontrolérem, na krátkou vzdálenost v rámci jednoho plošného spoje. Nejčastěji bývá využívána v rámci levných zařízení, jelikož není potřeba platit žádné licenční poplatky. Výhodou sběrnice je možnost ovládání více kontroléru pomocí pouze dvou komunikačních linek. Často je sběrnice využívána, například k čtení hardwarových monitorů, senzorů, ovládání akčních členů a malých displejů.

Inter-Integrated Circuit Sound (I^2S)

I^2S je také synchronní sériová komunikační sběrnice a protokol, který se obvykle používá pro přenos audio signálu. ESP32-S3 obsahuje dvě rozhraní, které lze konfigurovat na jakémkoli GPIO pinu, a to jako vstup i výstup. Řadič pro I^2S může tedy pracovat jako vysílač a přijímač.

Sériové periferní rozhraní (SPI)

Sběrnice SPI je běžně používaná k odesílání dat mezi mikrokontroléry a drobnými periferními zařízeními, jako jsou senzory, SD karty nebo třeba posuvné registry. Jedná se o synchronní datovou sběrnici, tedy že používá samostatné datové linky označené PICO (Peripheral In / Controller Out, dříve MOSI) a POCL (Peripheral Out / Controller In, dříve MISO) pro přenos dat, spolu s hodinovým signálem na lince SCK. Hodinový signál slouží pro synchronizaci. Linka CS (Chip Select, dříve SS) sděluje perifernímu zařízení, zda má přijímat/odesílat data a používá se také v případě, že je

přítomno více periferních zařízení k výběru toho, se kterým chceme hovořit. Linka CS je normálně držena na logické 1, což odpojuje periferii od sběrnice SPI. Těsně před odesláním dat do periferie je linka snížena na logickou 0, čímž se periferie aktivuje. Když skončíme s používáním periferie, linka je opět 1.

Two-Wire Automotive Interface (TWAI)

Jedná se o dvouvodičovou sériovou komunikaci v reálném čase používanou především v automobilovém průmyslu. ESP32 obsahuje jeden řadič TWAI, který je možné nakonfigurovat pro komunikaci s externím vysílačem.

Protokol TWAI je asynchronní komunikační protokol, pro komunikaci více vysílačů, s podporou detekce chyb a prioritizací zpráv. [13]

Remote Control Transceiver (RMT)

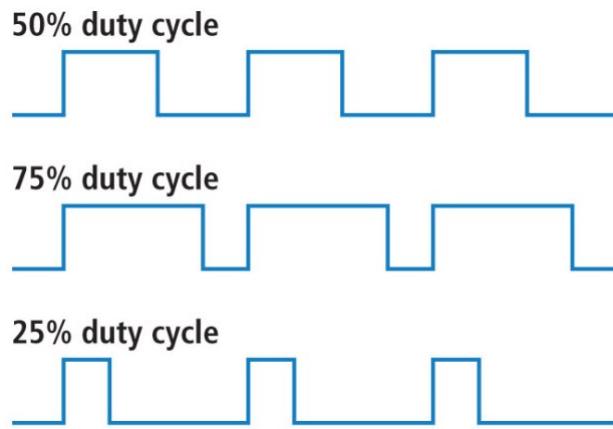
Podpora periferních zařízení RMT umožňuje práci s infračervenými signály na libovolných IR protokolech. Mikrokontrolér, tak může pracovat jako přijímač i vysílač. RMT modul na ESP32 má osm nezávislých kanálů, které mohou být konfigurovány buď pro vysílání, nebo příjem. Každý kanál má vlastní FIFO paměť, která umožňuje efektivní zpracování dat, bez potřeby neustálého zásahu procesoru. Tato vlastnost umožňuje ESP32 efektivně komunikovat s velkým množstvím periferií, aniž by byl procesor zatížen. Nejmenší datová jednotka přenášená v rámci se nazývá symbol RMT. [13]

Pulzně šířková modulace (PWM)

Pulzně šířková modulace neboli PWM je způsob diskrétní modulace analogového signálu. Tato technika se používá například k řízení motorů, světel a všude tam, kde je potřeba řízení výkonu. Princip funkce PWM spočívá ve změně šířky pulzu v rámci signálu s pevně danou frekvencí. Tím je dosaženo ovládání množství energie dodané k zátěži, bez nutnosti změny napětí.

Při vyšší šířce pulzu je cyklus delší a zátež obdrží více energie. V případě zmenšování šířky pulzu je cyklus kratší a zátež obdrží energie méně viz obrázek 5.2.

Hlavním důvodem využití PWM je efektivita, která je vyšší než například u řízení změnou odporu. Další výhodou je vysoká přesnost a možnost přesného nastavení požadovaného výkonu.

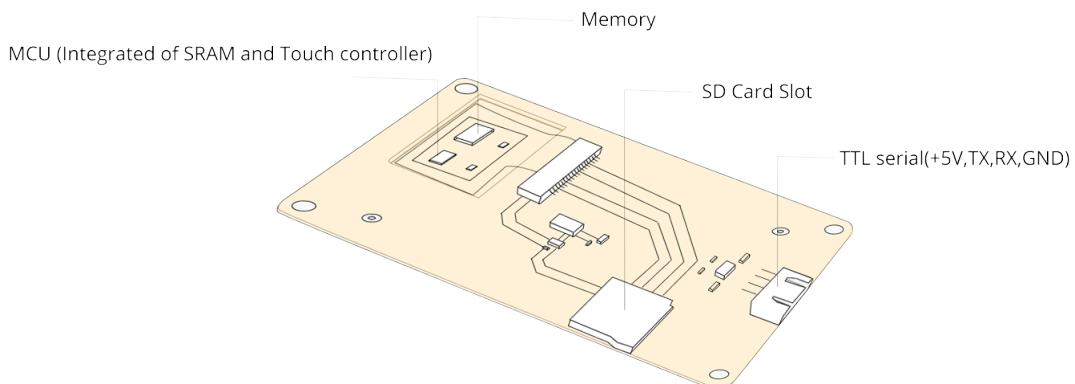


Obrázek 5.2.: Příklady 50%, 75% a 25% pracovního cyklu, obrázek z [14]

5.7. Nextion displej

Nextion dotykové displeje disponují vestavěným procesorem s vlastní pamětí, připojené periferní MCU se tedy nemusí zaobírat zobrazováním displeje. Displej Nextion se připojuje k perifernímu MCU prostřednictvím 3,3V/5V TTL sériové linky. Poskytuje oznámení o událostech, na které může periferní MCU reagovat. Zároveň snadno aktualizuje průběh a stav zpět na displeji, pomocí jednoduchých textových instrukcí ASCII.

Rozlišení displeje je odlišné dle použité řady displeje. Maximálně však dosahuje rozlišení 1024x600px. [15]



Obrázek 5.3.: Zadní strana Nextion displeje, obrázek z [15]

Na obrázku 5.3 je možné vidět slot pro SD kartu, který je možné využít především pro přehrání firmwaru nebo pro uložení zobrazovaných obrázků a ikon.

Veškeré nastavování a programování Nextion displeje probíhá přes softwarový program Nextion editor.¹

¹Původním záměrem, bylo využití Nextion displeje jako hlavního prvku pro uživatelské rozhraní. A to hlavně z důvodu snadné implementace a nastavení. Ovšem v průběhu vývoje bylo usneseno, že zůstane pouze volitelnou možností. Jako hlavní prvek pro interakci uživatelů s řídicí deskou bude sloužit mobilní aplikace.

6. Bluetooth

Bluetooth je standard bezdrátové technologie, pro přenos dat na krátké vzdálenosti. O dodržování standardu a ochranu ochranné známky se stará skupina Bluetooth Special Interest Group (SIG). V posledních verzích se dělí na dvě hlavní skupiny: Bluetooth Classic a Bluetooth Low Energy.

6.1. Bluetooth Classic

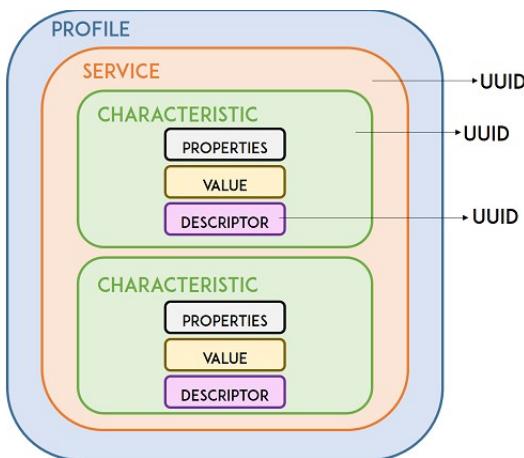
Bluetooth Classic pracuje v nelicencovaném pásmu 2,4 GHz v rozsahu 2400 MHz až 2480 MHz, které je rozděleno do 79 kanálů, každý s odstupem 1 MHz. Podporuje komunikaci mezi zařízeními typu point-to-point a používá se především k bezdrátovému přenosu zvuku. Bluetooth Classic se tak stala standardním rádiovým protokolem pro bezdrátové reproduktory a sluchátka. Také umožňuje využití pro přenos dat, včetně mobilního tisku. [16]

6.2. Bluetooth Low Energy

Bluetooth Low Energy (BLE) pracuje, stejně jako Bluetooth Classic, v nelicencovaném pásmu 2,4 GHz v rozsahu 2400 MHz až 2480 MHz, které je rozděleno do 40 kanálů, každý s odstupem 2 MHz. Z 40 kanálů je 37 určeno jako „data channels“ a 3 jako „advertising channels“. [16] Způsob využití kanálů je definován linkovou vrstvou a architekturou přenosu dat. BLE se od Bluetooth Classic liší především v energetické optimalizaci. Po většinu času je BLE v režimu spánku a k jeho aktivaci dochází až v momentě připojení. Tímto způsobem lze spotřebu snížit až 100x v porovnání s Bluetooth Classic, které je aktivní neustále. Z hlediska podporovaných typů připojení, je možné připojení point-to-point, broadcast a sítě mesh. [17] Mesh síť umožňuje každému připojenému zařízení stát se routerem, pokud je toho zařízení schopné a prodloužit tím tak dosah své sítě. [16]

Generic Attributes (GATT)

GATT definuje hierarchickou datovou strukturu, jakým způsobem dvě zařízení pomocí BLE odesílají a přijímají standardní zprávy. [17]



Obrázek 6.1.: Hierarchická datová struktura GATT, obrázek z [17]

Služba BLE

Nejvyšší úrovní v hierarchii je profil, který se může skládat z více služeb. Každá služba obsahuje alespoň jednu charakteristiku nebo odkazuje na jiné služby. Služba zjednodušeně obsahuje seznam informací, například hodnoty ze senzorů. [17]

Charakteristika BLE

Služba vždy určuje charakteristiku, kde jsou obsažená skutečná data. Charakteristika obsahuje vždy dva atributy: deklaraci dané charakteristiky a hodnotu. Za hodnotou charakteristiky mohou následovat deskriptory, které dále rozšiřují metadata obsažená v deklaraci. Vlastnosti popisují, jak může být charakteristická hodnota ovlivněna. [17] V zásadě obsahuje operace a postupy, které lze použít s charakteristikou:

- Broadcast (Přenos)
- Read (Čtení)
- Write without response (Zápis bez odezvy)
- Write (Zápis)
- Notify (Oznámení)
- Indicate (Označení)
- Authenticated Signed Writes (Ověřený zápis)
- Extended Properties (Rozšířené vlastnosti)

V případě, že server zapíše data do charakteristiky, tak se nijak nekontroluje, zda si je klient již přečetl. Server může tedy přepsat původní data dříve, než si je klient přebere.

Universally Unique Identifier

Každá služba, charakteristika a deskriptor mají UUID (Universally Unique Identifier). UUID je jedinečné 128bitové (16 bajtové) číslo. Existují zkrácené UUID (16bitové) pro všechny typy, služby a profily specifikované v SIG, pro vlastní služby je nutné UUDI náhodně vygenerovat v rozsahu 128bitů. [17]

7. Sériové sběrnice RS-485, RS-422 a RS-232

7.1. RS-485

RS-485 je standard představený v roce 1983, definující elektrické charakteristiky vysílačů a příjimačů pro použití v sériových komunikačních systémech. Jedná se o nejjednodušší způsob komunikačního spojení s jednotlivými zařízeními.

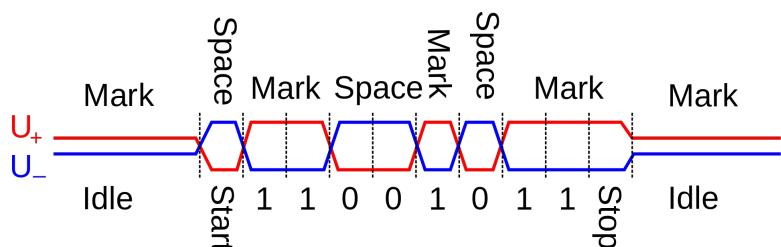
V základu se při použití RS-485 využívá dvou vodičů s označením A a B určených pro přenos dat s případným vodičem třetím s označením G pro pozemní referenci. Přenos je v takovém případě poloduplexní a je potřeba řízení přenosu dat. V případě čtyrvodičové verze je přenos plně duplexní a odpadá řízení přenosu.

Maximální délka sběrnice je 1200m a počet připojených zařízení na jedné sběrnici je omezený v závislosti na použité technologii. Většinou jde minimálně o 32 připojených zařízení s možností přijímat a vysílat, maximálně pak 256 zařízení [18]. Na obou koncích vedení by měl v ideálním případě být terminační rezistor mezi vodiči A a B.

V rámci standardu RS-485 nejsou určeny žádné specifické konektory nebo vývody. Stejně tak ani protokol pro komunikaci.

Průběh signálu

Přenos dat na RS-485 probíhá přivedením napětí na vodič A, dle toho zda se má přenášet logická 1 nebo 0. Na vodič B se vždy přivede druhá hodnota. Důvod tohoto řešení je větší odolnost vůči rušení. Na straně přijímače se naměřené hodnoty porovnají a pokud je na vodiči A vyšší hodnota než na B, tak se jedná o logickou 1. V opačném případě o logickou 0. [19]



Obrázek 7.1.: Ukázka průběhu signálu při odesílání znaku 0xD3 po sběrnici RS422/485, obrázek z [20]

Porovnání RS-485 a RS-422

Zatímco elektrický princip přenosu dat je stejný, tak existuje několik rozdílů a nelze tyto sběrnice zaměňovat. Prvním hlavním rozdílem je, že RS-422 je určena pro point-to-point komunikaci s maximálním možností připojení deseti přijímačů na jeden vysílač. Zatímco RS-485 je určena pro vícebodovou komunikaci, kde může být každé zařízení přijímačem i vysílačem. Druhým podstatným rozdílem je maximální počet připojených zařízení, který je u RS-422 již zmíněných deset na jeden vysílač. A v případě RS-485 v závislosti na použité technologii 32 až 256 zařízení. [21]

7.2. RS-232

Princip přenosu dat u RS-232 je odlišný. Signály u RS-232 jsou reprezentovány napěťovými úrovněmi vůči referenční zemi, typicky $-12V$ a $+12V$. Komunikace je tedy vždy minimálně třívodičová. Dva vodiče pro přenos dat (Rx a Tx) s vodičem zemnícím. Dále ještě obsahuje vodiče pro řízení přenosu dat, které ovšem nejsou vyžadovány vždy u všech zařízení.

Nevýhodou RS-232 je omezení komunikační vzdálenosti pouze do 15 metrů a nemožnost větvení. Nutnos připojení zemnícího vodiče rovněž přináší problémy především v průmyslových prostředích, kde může docházet k problémům se zemními smyčkami. Řešením je galvanické oddělení linek. [22]

7.3. Terminace a přenosová rychlosť

Podstatnou částí je terminace sběrnic a to především při delších vzdálenostech vedení sběrnic. Hlavní důvod pro terminaci je eliminace odrazů na konci vedení. V případě RS-422 stačí 100Ω terminační rezistor na konci sběrnice. V případě připojení více přijímačů je možné přesnou hodnotu terminačního odporu spočítat, dle vstupních impedancí přijímačů.

U RS-485 je potřeba umístění 120Ω terminačních rezistorů na oba konce sběrnice. Jelikož každé zařízení může být vysílačem i přijímačem. Terminační rezistory jsou častokrát součástí koncových zařízení. V případě nedostatečného nebo žádného terminačního zakončení může dojít k nejrůznějším problémům.

Přenosová rychlosť na krátkých vzdálenostech je dána především výstupními rychlosťmi vysílače. S větší vzdáleností je potřeba již brát v úvahu ztráty způsobené kapacitou a odporem vedení. Předpokládanou přenosovou rychlosťí u RS-485 je 10Mbit/s. [21]

8. Modbus

Modbus je komunikační protokol pracující na aplikační vrstvě modelu ISO/OSI a poskytuje komunikaci klient/server. Dnes se jedná o standardní komunikační protokol v průmyslovém prostředí. Modbus je možné využít na různých sítích a sběrnicích, včetně Ethernetu TCP/IP a sériového přenosu RS-232, RS-422 a RS-485.

8.1. Protokol

Přenášený paket neobsahuje žádný úvodní ani koncový znak pro detekci začátku a konce daného paketu. Konec paketu se detekuje podle odmlky ve vysílání na dobu 1.5 až 2 vysílané bajty. Délka odmlky tedy záleží na nastavené přenosové rychlosti. [23]

Adresa zařízení	Kod funkce	Data	CRC
-----------------	------------	------	-----

Tabulka 8.1.: Skladba paketu Modbus, tabulka převzata z [23]

Přenos dat

Komunikace s klientským zařízením probíhá pomocí čtení a zápisu hodnot registrů. Tyto hodnoty jsou rozděleny do čtyř skupin, kdy v každé je 9999 hodnot registrů. [23]

Číslo registru	Adresa (Hex)	Přístup	Název	Typ
1-9999	0000-270E	čtení/zápis	diskrétní výstup(y)	DO
10001-19999	0000-270E	čtení	diskrétní vstup(y)	DI
30001-39999	0000-270E	čtení	analogové výstup(y)	AO
40001-49999	0000-270E	čtení/zápis	analogové vstup(y)	AI

Tabulka 8.2.: Skupiny registrů, tabulka převzata z [23]

Při přenosu dat je vždy nejprve přenášen nejvyšší bajt a nejnižší bajt jako poslední.

Praktická ukázka Modbus komunikace řídicí desky s CIM modulem, je prezentována viz externí přílohy *modbus_kom.jpg*.

Adresace zařízení

- adresa 0 – broadcast – zpráva je určena všem zařízením, ale žádné na ní neodpovídá
- adresy 1 až 247 – unicast – po přijetí a zpracování požadavku vyšle slave odpověď
- adresy 248 až 255 jsou vyhrazené

8.2. Modbus přes sériovou linku

Pro komunikaci po sériové sběrnici se používá Modbus Serial Line Protocol, který definuje linkovou vrstvu ISO/OSI modelu. Na fyzické vrstvě se využívá standardu sériového rozhraní RS-232, RS-422 nebo RS-485. Modbus Serial Line protokol poskytuje komunikaci typu klient/server. Tedy na linku může být připojen vždy jen jedna řídicí jednotka a až 247 účastnických jednotek. [24] Linková vrstva popisuje mimo komunikace klient/server i tzv. přenosový mód:

RTU mód

Každá zpráva má 11 bitů, z nichž 8 bitů jsou datové. Komunikace může probíhat s paritou nebo bez ní. V druhém případě je paritní bit nahrazen stop bitem. V tomto módu se používá kontrolní součet CRC (Cyclical Redundancy Check) pro kontrolu chyb. [24]

Start	1	2	3	4	5	6	7	8	Par	Stop
-------	---	---	---	---	---	---	---	---	-----	------

Tabulka 8.3.: Bitová reprezentace RTU módu, tabulka z [24]

Výhoda RTU módu spočívá v lepší datové propustnosti při stejném baud rate ve srovnání s ASCII módem. Zprávy jsou vysílány v kontinuálním režimu. [24]

ASCII mód

Každá zpráva obsahuje 8 datových bitů a může být přenášena s paritou nebo bez ní. Pak je opět paritní bit nahrazen stop bitem, stejně jako u předchozího RTU. Pro kontrolu chyb se zde využívá LRC (Longitudinal Redundancy Check). [24]

Start	1	2	3	4	5	6	7	Par	Stop
-------	---	---	---	---	---	---	---	-----	------

Tabulka 8.4.: Bitová reprezentace ASCII módu, tabulka z [24]

Výhodou tohoto módu je možnost použít až sekundového časového intervalu mezi vysláním jednotlivých znaků aniž by došlo k chybě přenosu. [24]

PRAKTICKÁ ČÁST

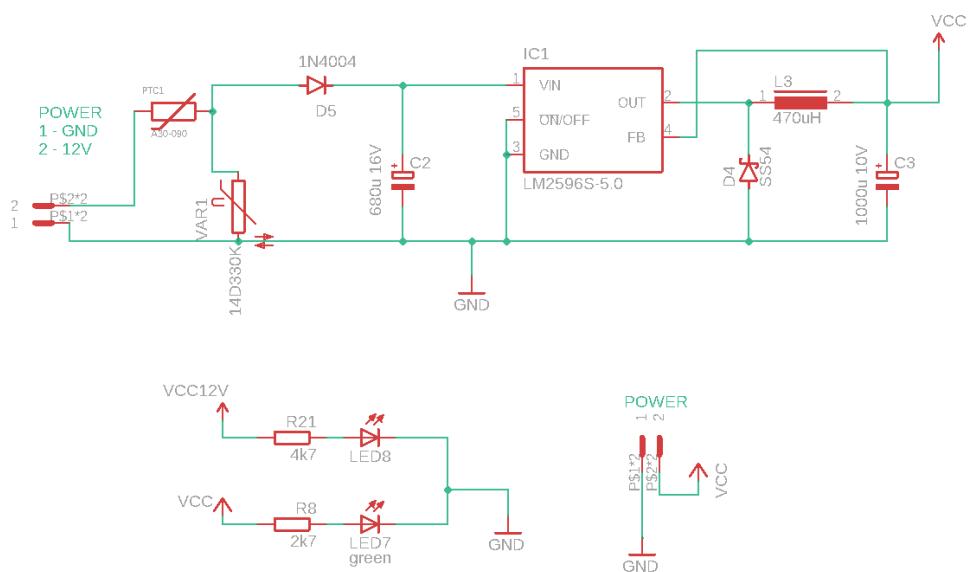
Praktická část bakalářské práce se zabývá návrhem plošného spoje od elektrotechnických schémat zapojení, přes návrh osazení plošného spoje nutného pro výrobu, až po samotné osazení. Popisuje vývoj a funkce vlastního firmwaru. V rámci práce je prezentován jen dílčí část firmwaru. Nakonec prezentuje data a vyhodnocení testovacího provozu. V externích přílohách lze pak nalézt i model vlastní 3D tisknutelné karabičky pro montáž na DIN lištu.

9. Návrh plošného spoje

V této kapitole se budu zabývat návrhem plošného spoje od schémat až po ucelenou a osazenou desku. Kompletní návrh plošného spoje jsem realizoval pomocí softwaru Eagle od společnosti Autodesk.

9.1. Napájení

Napájecí část řídicí desky je tvořena vstupním konektorem pro přivedení stejnosměrného napájení o napětí 12V. Pro zajištění ochrany jsou implementovány základní bezpečnostní prvky: vratná pojistka pro ochranu před přetížením proudem, varistor pro ochranu před přepětím a dioda, která chrání před nesprávným zapojením napájení obrácením polarity.



Obrázek 9.1.: Schema napájecí části řídicí desky.

Obvod následně obsahuje napěťový regulátor pro snížení napětí na požadovanou úroveň 5V. Na vstupu i výstupu napěťového regulátoru jsou vyhlazovací kondenzátory.

Vizuální indikace napětí na každé napěťové lince je realizována LED diodami.

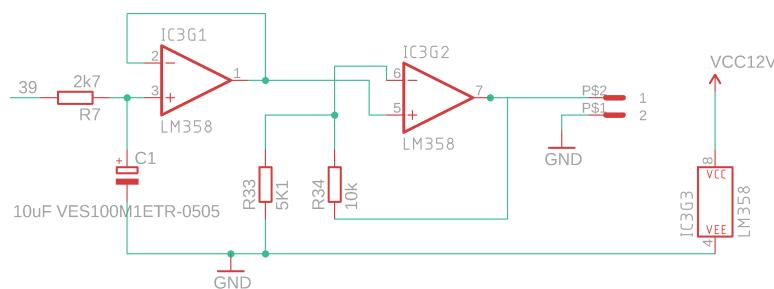
V neposlední řadě je napájecí část osazena i výstupním konektorem pro možnost napájení externích komponent pracujících na napětí 5V.

9.2. Vstupně-výstupní porty

Deska je osazena celkem čtyřmi digitálními vstupy přes optočleny. Jedním výstupem 0-10V určeného pro nastavení výkonu venkovní jednotky tepelného čerpadla, vstupu určeného pro komunikaci Modbus přes RS-485 a třemi spínanými kontakty pomocí elektromagnetických relé.

Výstup 0-10V

Vstupní signál PWM na vstupu převedeme z rozsahu 0% až 100% na napětí 0V až 10V pro nastavení výkonu kompresoru venkovní jednotky tepelného čerpadla. Minimální výkon kompresoru venkovních jednotek je ovšem omezen na 30% z důvodu správného fungování stroje. První stupeň nastavitelného výkonu musí být tedy vždy minimálně 30%, a až následně bude možné výkon plynule zveda do 100%.

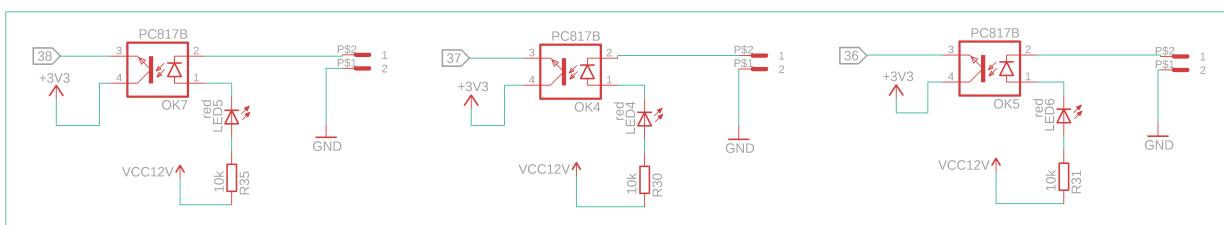


Obrázek 9.2.: Schéma zapojení integračního zesilovače LM358 pro výstup 0-10V.

V tomto schématu 9.2 můžeme také poprvé vidět jednu fyzickou součástku rozdělenou do několika bloků. Tento způsob rozdělení se používá především z důvodu přehlednosti schématu.

Digitání vstupy přes optočleny

Optočlen je součástka obsahující na světlo citlivou polovodičovou součástku, nejčastěji fototransistor a infračervenou led diodu. Ty jsou uzavřeny v rámci jednoho pouzdra. Běžné využití této součástky je pro galvanické oddělení dvou elektrických obvodů. Galvanické oddělení znamená, že dané dva obvody nejsou elektricky spojeny, ale stále jsou schopé si předávat potřebou informaci.



Obrázek 9.3.: Schéma digitálních vstupů přes optočleny.

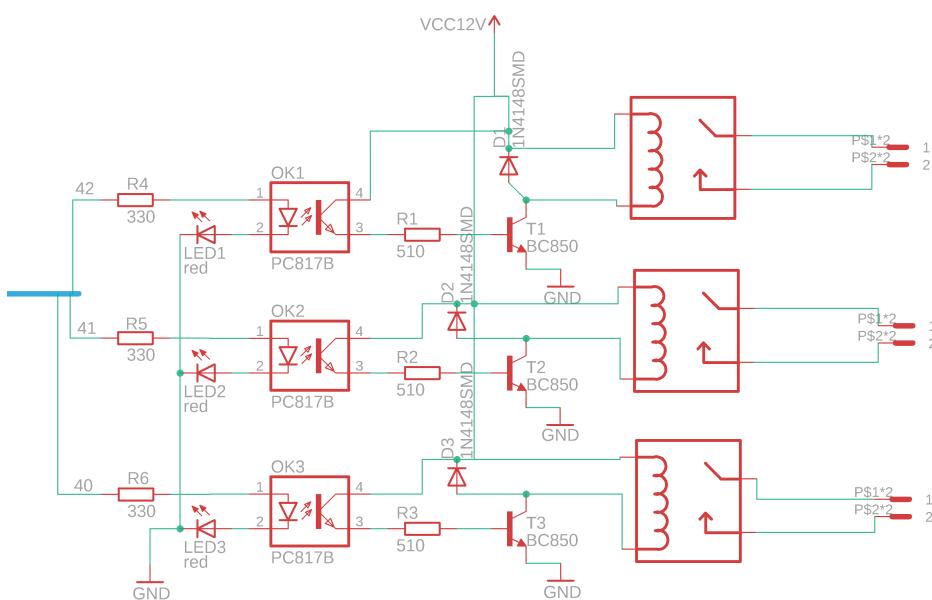
V mém případě 9.3 jsou optočleny využity pro oddělení 3,3V linky procházející pře fototranzistor a následnému snímání na digitálních vstupech, pro určení zda je tranzistor otevřený či zavřený. A 12V linky, která spolu s zemí označenou tradičně GND, ústí na pinech konektoru. Při spojení tedy těchto dvou pinů dojde k uzavření obvodu, a tedy rozsvícení infračervené led diody se současným otevřením fototranzistoru.

Externím zařízením tedy stačí pouze spínat tyto dva piny na konektoru. Takto lze z externích zařízení bezpečně předávat pulzy na digitální vstupy mikrokontroléru. Jedinou podmínkou pro externí zařízení je spínání pomocí součástky, která je dimenzována na napětí 12V a pár miliampér protekajícího proudu.

Spínané kontakty

Spínané kontakty přes elektromagnetické relé jsou především určeny pro spínaní zařízení na 230V střídavého napětí. V mém případě využívané na spínaní oběhových čerpadel, třícestného ventilu a směšovaného ventilu.

Výhodou je snadné sepnutí zařízení na střídavé napětí 230V a cena takového běžného relé. Ovšem nevýhodou je opakování vnitřních kontaktů relé při spínání a rozepínání obvodu. Řešením tohoto nešvaru jsou polovodičové relé, anglicky Solid State Relay (SSR), které spolu s tím umožňují i vyšší rychlosť přepínání a neobashují mechanické části. Ovšem i ty mají své nevýhody, počínaje vyšším úbytkem napětí a s tím spojenou nutností SSR relé chladit až po vyšší cenovku v porovnání s elektromagnetickými.

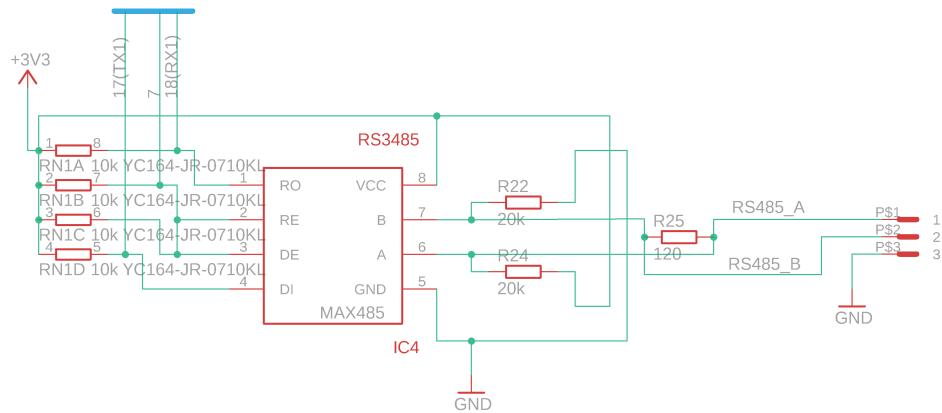


Obrázek 9.4.: Schéma zapojení spínaných kontaktů přes relé.

V obvodu 9.4 pro každé jednotlivé elektromagnetické relé si můžeme povšimnout opětovného využití optočlenů pro galvanické oddělení spínané a spínací části.

RS-485

Jelikož mikrokontroléry ESP pracují s napěťovou úrovní 3,3V je zde 9.5 použitý čip MAX3485. Ten je určený přímo pro napěťovou úroveň 3,3V a není potřeba použití žádného převodníku napěťových úrovní.

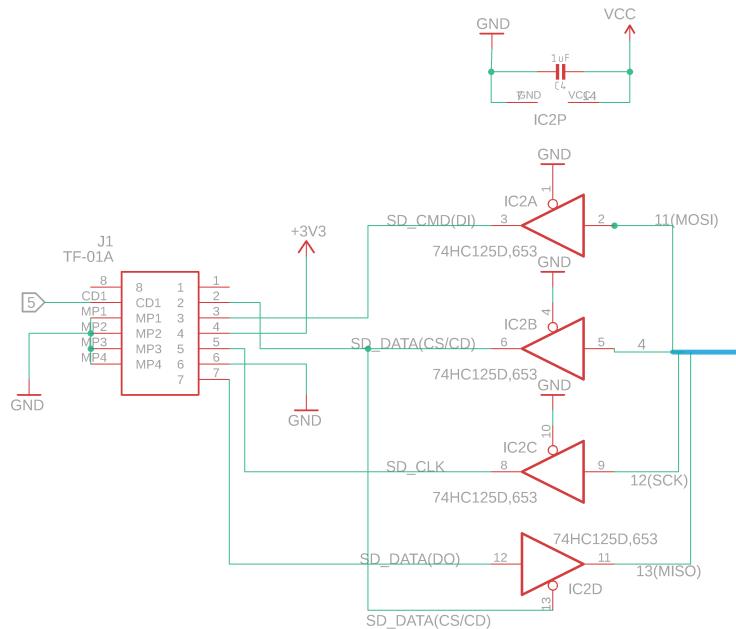


Obrázek 9.5.: Schéma zapojení komunikační části pro RS-485.

Jak je možné si všimnout ze schématu 9.5. Jedná se o dvouvodičovou sběrnici RS-485 s vodičem třetím, často označovaným písmenkem "G". Sloužícím jako pozemní reference při použití především na delší vzdálenosti. Na komunikaci v krátké vzdálenosti v nezarušeném prostředí, není nutné připojení třetího vodiče.

9.3. SD karta

Nedílnou součástí je SD karta, která slouží pro ukládání logovacích souborů, konfigurací a firmwaru.



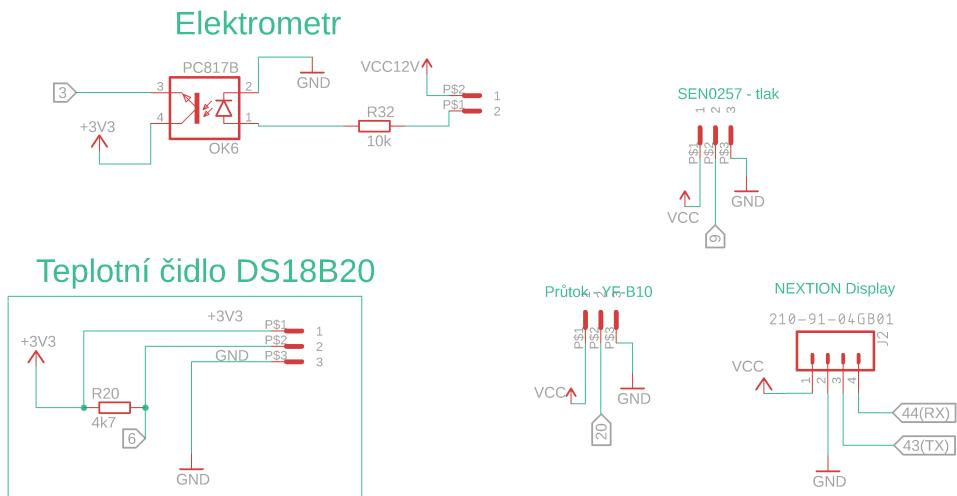
Obrázek 9.6.: Schéma zapojení části pro SD kartu.

V levé části schématu 9.6 je vyobrazen blok pro fyzický slot SD karty. Zbylé bloky jsou opět rozdělení jedné fyzické součástky a to integrovaného obvodu s označením 74HC125D.653. Jedná se o čtyřkanálový bufer/line driver s třístavovými výstupy. Třístavové výstupy znamenají, že kromě běžných logických stavů "1" a "0" mohou být výstupy také ve stavu vysoké impedance. Tento stav umožňuje výstupům „odpojit“ se od sběrnice, což zabrání konfliktům mezi více obvody připojenými k téže sběrnici.

9.4. Zbylé obvody

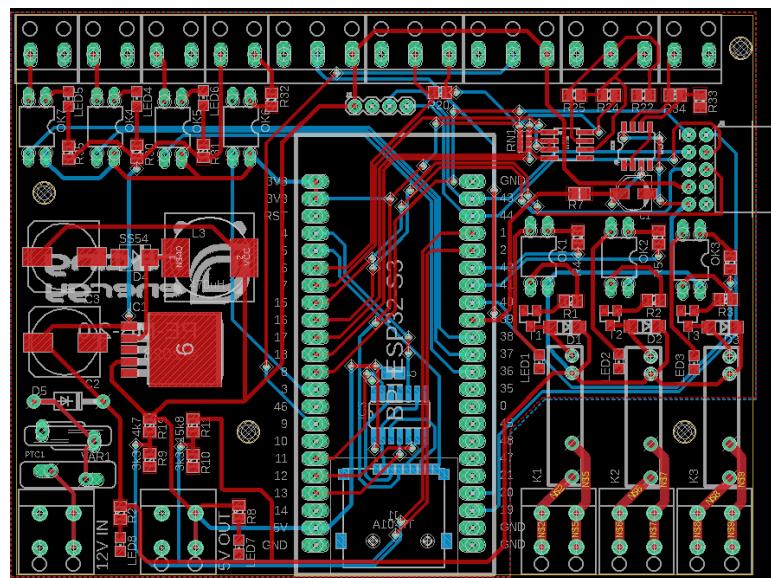
Mezi zbylé obovdy patří připojení konektoru pro Nextion displej, konektory senzorů tlaku a průtoku s výstupem pro připojení teplotních čidel DS18B20. Nesmí také opomenout zapojení slotu pro desku BPI-Leaf-S3 5.1 s konektorem pro rozšiřující moduly. V poslední řadě čtvrtý digitální vstup přes optočlen, určený specificky pro snímání pulzů z elektroměru pro účely měření spotřeby.

Zapojení vstupu pro elektroměr je trochu odlišné od předchozích tří schémat. Jednak absencí indikační LED diody, tak na pinu konektoru je přivedena přímo napájecí linka 12V bez rezistoru v sérii. Výstup přes tento jeden pin je tedy omezen až výkonem zdroje. Omezující rezistor je na druhém pinu před vstupem do optočlenu.



10. Sestavení desky plošného spoje

Poslední fází vývoje desky plošného spoje, před odesláním do výroby, je výsledné rozmístění veškerých součástek. Pro snazší orientaci a umístění součástek, má každá součástka svůj obrys, který je natisknutý i na konečném produktu. Současně je potřeba rozvrhnutí montážních a dalších otvorů, které v desce budou potřeba.

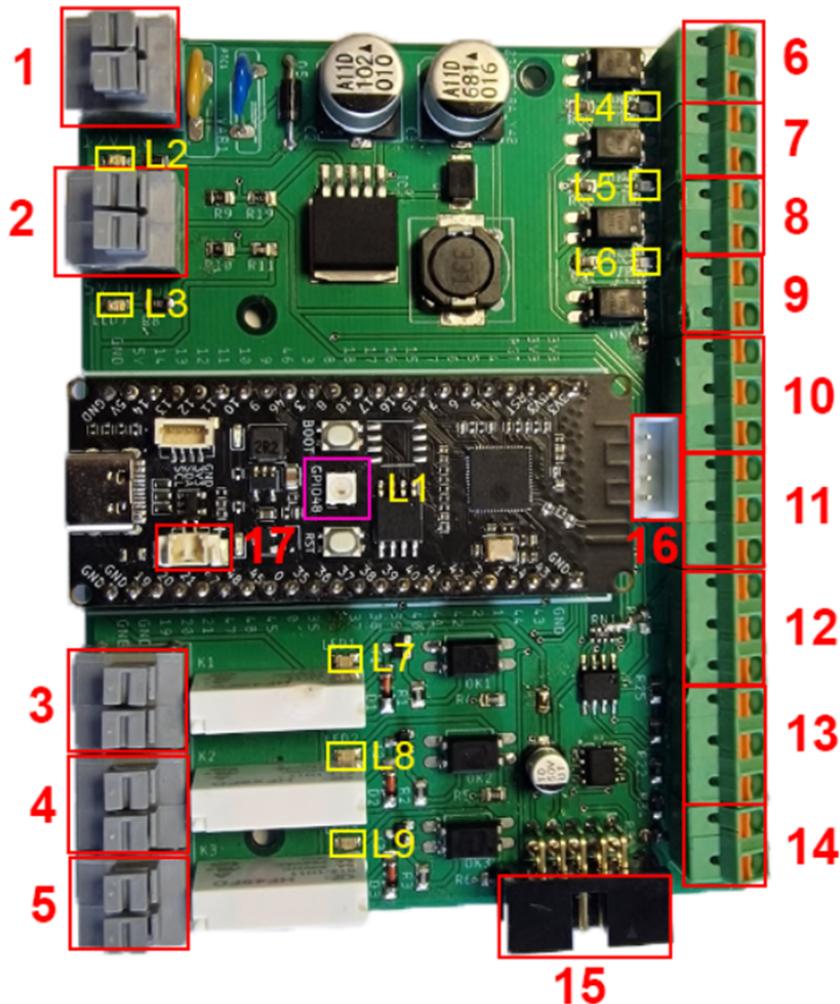


Obrázek 10.1.: Výsledné rozmístění součástek na desce plošného spoje.

Standardní bývá rozmístění součástek, dle jejich umístění v rámci schématu. Součástky související s napájením jsou na desce v jednom určeném místě a tvoří napájecí část desky. Stejně tak v součástky související s relátky nebo digitálními vstupy přes optočleny jsou umístěny ve své blízkosti v dalších částech. Tím obecně získávají desky pločných spojů větší přehlednost a jistou vizuální kulturu.

10.1. Osazená deska

1. Napájecí vstup 12V
2. Výstup napětí 5V (max 1A)
3. Spínaný kontakt relé 1
4. Spínaný kontakt relé 2
5. Spínaný kontakt relé 3
6. Bezpotenciálový kontakt vstup



Obrázek 10.2.: Osazená deska s vyznačenými vstupy, výstupy a LED diodami.

- | | |
|---|--|
| 7. Bezpotenciálový kontakt vstup | L2. Dioda 12V vstup |
| 8. Bezpotenciálový kontakt vstup | L3. Dioda 5V |
| 9. Elektroměr – pulzní měření | L4. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
VSTUPU 6 |
| 10. Průtokoměr 5V | L5. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
VSTUPU 7 |
| 11. Teploměry DS18B20 3,3V | L6. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
VSTUPU 8 |
| 12. Senzor tlaku DFRobot SEN0257 | L7. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
RELE 1 |
| 13. RS-485 | L8. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
RELE 2 |
| 14. 0-10V Výstup | L9. Signalizační LED dioda sepnutého stavu
RELE 3 |
| 15. Extend port | |
| 16. Port pro připojení Nextion displeje | |
| 17. Baterie Lithium 3,7V | |
| L1. Stavová RGB dioda řízená | |

11. Vytvoření firmwaru

Pro programování bylo využito vývojové prostředí Visual Studio Code s rozšířením PlatformIO. Použité programovací jazyky zahrnují Wiring, který je založen na C++, a samotné C++. Pro programování s využitím Wiring a C++, jsem se rozhod z důvodu znalosti Wiring jazyka z předchozích menších projektů.¹

11.1. Struktura

Pro efektivní a spolehlivý provoz více jádrových procesů je důležité správné časování jednotlivých úloh. K tomu slouží RTOS (Real-Time Operating System), který zajišťuje spouštění jednotlivých úloh. Na základě jejich nastavené důležitosti a aktuálních volných hardwarových prostředcích rozhodne, který proces bude ve stavu běhu.

Program je tedy rozdělen do čtyř jednotlivých samostatných vláken. Vždy dvě jsou přiřazeny jednomu fyzickému jádru procesoru. Díky tomu je zajištěna vyšší spolehlivost a efektivní využití celého potenciálu mikrokontroléru.

Každé jednotlivé vlákno má specificky určený účel. Jedno z vláken obsluhuje pulzování stavové led a řízení jednotlivých stavů. Druhé obsluhuje SD kartu a stará se o zapisování logů do jednotlivých souborů. Třetí vlákno obsluhuje řízení tepelného čerpadla a pomocné funkce. Buď za využití výstupu 0-10V nebo přes Modbus komunikaci. Na posledním vlákně běží veškerá WiFi a Bluetooth komunikace.

Každá třída a její příslušné metody jsou pro přehlednost rozděleny do vlastních souborů ze samostatně vytvořenými hlavičkovými soubory.

¹V průběhu programování tohoto projektu jsem narazil na několik nedostatků a problémů spojených s použitím programovacího jazyka Wiring. Lepší volbou by pravděpodobně bylo celý projekt realizovat za využití ESP-IDF frameworku, který je psán v programovacím jazyce C a je vyvíjený firmou Espressif pro ESP. Jelikož jsem s ESP-IDF neměl žádné zkušenosti, zvolil jsem na počátku práce Wiring.

11.2. Třída pro řízení stavů

Dílčí část zdrojového kódu, včetně interních pomocných funkcí doplněných o komentáře, je dostupná na úložišti GitHub, viz kapitola A. Externí přílohy.²

Uvedená třída StatusLed je určená pro řízení stavů identifikační LED diody Neopixel, která je součástí desky BPI-Leaf-S3 5.1.

Pro řízení stavů je využita fronta s pevně danými váhamy jednotlivých stavů. Ty jsou definovány v příslušném hlavičkovém souboru viz externí přílohy StatusLed.h.

Třída StatusLed viz externí přílohy StatusLed.cpp.

V kódu je možné vidět použití mutexu, semaforu a fronty. To jsou klíčové prvky ve více vláknovém programování, které jsou používané v celém kódu. Za využití mutexu lze uzamknout určité části kódu, které jsou tímto označeny jako kritické a nelze je přerušovat.

Semafor je signalizační mechanismus, ve kterém je úloha ve stavu čekání a když jedna úloha dokončí svou práci, zobrazí příznak nebo zvýší příznak o 1 a tento příznak pak obdrží jiná úloha, čímž dává najevo, že nyní může provést svou práci. Když druhá úloha dokončí svou práci, pak se příznak sníží o 1. [25]

Fronta je datová struktura, která pojme konečný počet prvků pevné velikosti a pracuje ve schématu FIFO (First-in First-out). Fronty zajišťují komunikační mechanismus mezi úlohami, mezi úlohami a přerušenými a mezi přerušenými samotnými. [26]

Hlavními metodami třídy jsou *addStatus*, *removeStatus* a *updateLed*. Tedy metody pro přidání a odebrání stavů z fronty. Dále je potřebná metoda zobrazující aktuální stav, kterou je *updateLed*.

Jako poslední jsou součástí třídy pomocné metody *isStatusInQueue*, *getHighestPriorityStatus*, *blinkLedCounted* a *blinkLed*. Ty slouží, jak už názvy napovídají, k zjištění zda se stav již ve frontě nachází, získání stavu s nejvyšší prioritou, pulzování LED diody v určeném počtu a konstatnímu pulzování.

²Jelikož se nejedná o open-source projekt, ale o skutečný produkt používaný firmou RacingEnergy s.r.o., tak v rámci práce není zpřístupněný celý zdrojový kód.

12. Testování

V testovacím provozu byla deska použita jako nadřazený systém pro řízení, ve spojení s modulem CIM. Spojení s modulem bylo realizováno přes RS-485 a Modbus komunikaci v režimu RTU. Tím byl zajištěn vzdálený dohled, možnost snadnějšího a rychlejšího servisního zásahu. Vzdálený dohled rovněž umožňuje včasné odhalení vznikajících problémů a tím i předcházení kompletního selhání topného systému objektu.

Řídicí desku lze vnímat i jako shield pro desku BPI-Leaf-S3 5.1. Využití desky není ani zdaleka omezeno pouze na řízení tepelných čerpadel. Možnosti použití jsou pouze otázkou příslušného firmwaru a hardwarových funkcí. V rámci testování jednotlivých funkcí byla deska například využita pro spínání světel, dle pokynů přijímaných přes Modbus od nadřazeného řídicího systému PLC Loxone.

Díky možnosti přístupu ke spotovým cenám elektrické energie a propojením se střídačem FVE, lze ještě více zefektivnit využití přebytků. Ty jsou především využity pro nahřátí akumulační nádrže na vyšší teplotu, než je běžně dosahováno pouze za využití tepelného čerpadla. Vyšší teploty je dosaženo bivalentním zdrojem (patrona 2kW, 4kW a 6kW).

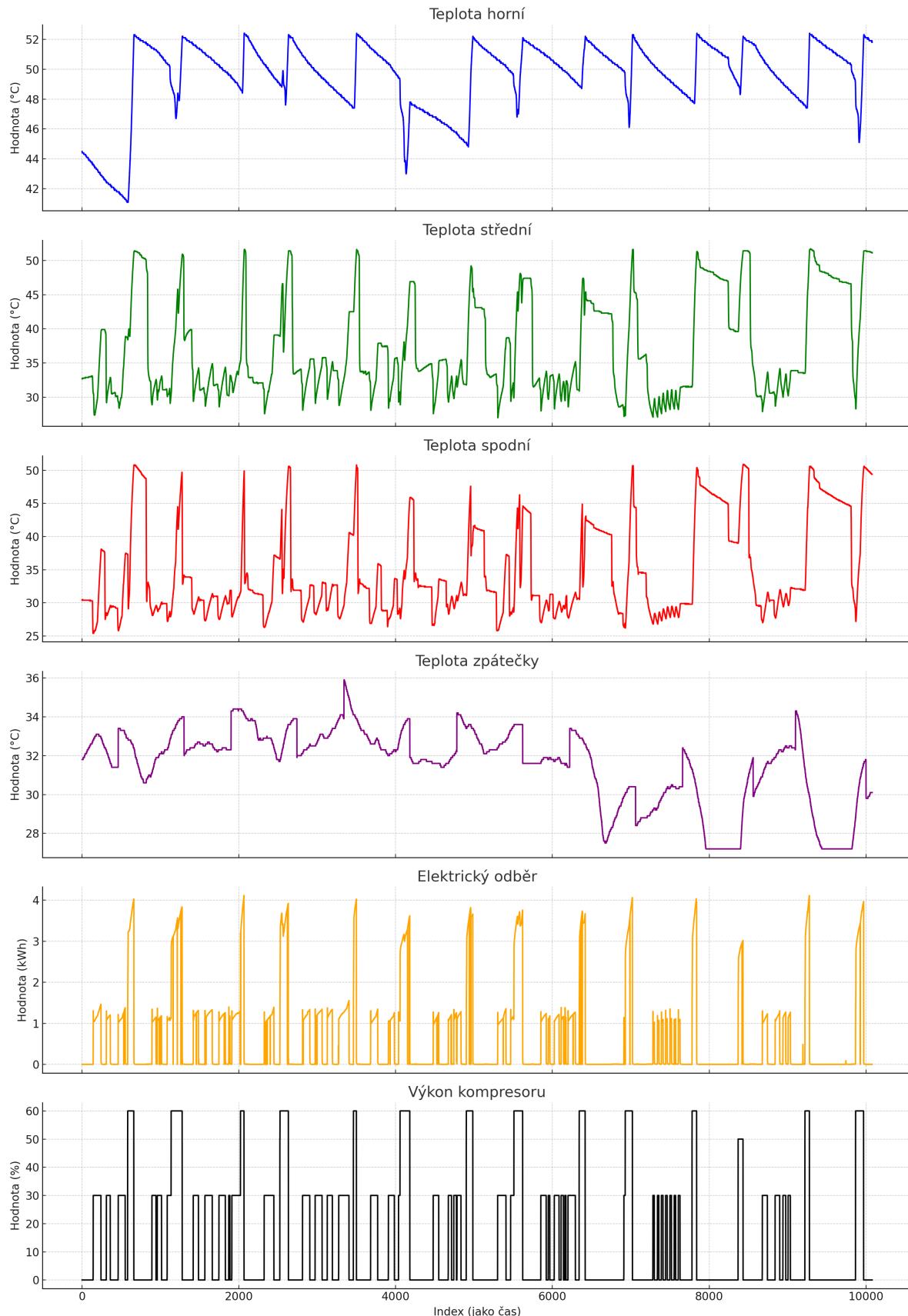
Firmware je stále ve vývoji a z toho důvodu ještě není zajištěna 100% stabilita a spolehlivost. Po odladění a dlouhodobém testování bude CIM modul plně nahrazen touto řídicí deskou, jelikož již nebude potřeba záložního řídicího systému.

12.1. Data z provozu

V následujících grafech můžeme vidět data z týdenního provozu tepelného čerpadla. Jedná se o záznam tří teplot akumulační nádrže PAST (Předávací Akumulační Stanice Tepla) v různých úrovních, teploty zpátečky chladivového okruhu, spotřeby elektrické energie a nastaveného výkonu kompresoru.

Údaj spotřeby elektrické energie, je mimo jiné důležitou zpětnou vazbou, pro ověření zda skutečně došlo k nastavení výkonu kompresoru na požadovanou úroveň. Také slouží k ověření stavu kompresoru. V případě poškozeného kompresoru bude spotřeba vyšší než standardně nebo téměř nulová pokud již bude nefunkční.

Z dat je patrné, že v testovaném období dostačoval pouze 60% výkon kompresoru pro dosažení požadované teploty v akumulační nádrži. Změna výkonu kompresoru se rovněž projevila na odběru elektrické energie a po dosažení požadované teploty došlo k jeho zastavení.



Obrázek 12.1.: Data z týdenního testovacího provozu.

13. Závěr

Bakalářská práce se věnovala vlastnímu vývoji řídicí desky pro ovládání venkovní jednotky splitového tepelného čerpadla. To především za účelem získání konkurenční výhody zadávající firmě a poskytnutí větší funkcionality a možností stávajícím, ale i novým zákazníkům.

V teoretické části byla popsána základní teorie o dělení a principu jak pracují tepelná čerpadla, spolu s základním dělením součástek montovaných na plošné spoje. Následovány kapitolou věnující se aktuálním možnostem řízení tepelných čerpadel, které jsou dnes zadávající firmou běžně používány, ale v následujících měsících bude docházet k postupnému nahrazování modulů CIM a UTI touto řídicí deskou. Dále byla pozornost věnována nejběžnějším typům regulátorů, jako jsou regulátor ON/OFF a regulátory P, PI, PD a PID, kde byly popsány jednotlivé rozdíly a uvedeny příslušné matematické rovnice. V následujících kapitolách byla popisována především veškerá využitá technologie, a to jak v rámci samotného hardwaru, tak ale i použitá v rámci firmwaru. Jednalo se hlavně o jednotlivé hardwarové funkce a technologie integrované již v použitém mikrokontroléru ESP32-S3 a desce BPI-Leaf-S3.

V rámci vývoje proběhla změna hlavního uživatelského rozhraní, z dotykového displeje Nextion na spojení řídicí desky s mobilní aplikací. Ovládání pomocí mobilní aplikace pokládám v dnešní době za rozumnější a běžnější řešení. A to jak pro obsluhování zákazníky, tak i pro servisní úkony. Osazení displeje je stále možné, ovšem z důvodu snížení nákladu je pouze volitelnou možností. V porovnání s ostatními řídicími systémy, které žádné displejové ani mobilní uživatelské rozhraní neumožňují, případně pouze ve stylu segmentových nebo dvourádkových displejů, je Nextion displej a možnost propojení s mobilní aplikací značným vylepšením.

Praktická část práce obsahovala navrhnutí schéma zapojení desky plošného spoje s vytvořením modelu rozmístění jednotlivých komponent a montážních otvorů. Bylo nezbytné tyto návrhy vytvořit, jelikož slouží jako podklady pro výrobu plošného spoje. V jednotlivých podkapitolách jsou odděleně popsány samostatné bloky plošného spoje. Vždy je uvedené i schéma zapojení daného bloku. Posledním krokem bylo vytvoření firmwaru, který bude ovládat příslušný hardware dle zadaných pokynů.

V neposlední řadě byly uvedeny nejdůležitější hodnoty sledované v týdenním testovacím provozu, které jsou prezentovány pomocí jednotlivých grafů.

Celý projekt řídicí desky zůstává ve vývoji a bude i nadále vylepšován a rozšiřován. Především o další moduly a funkce, například o bezdrátový termostat nebo rozšiřující modul spínaných kontaktů. Spolu s tím bude pokračovat i již započatý vývoj mobilní aplikace na platformě Android, následovaný vývojem pro zařízení na platformě iOS.

Seznam použitých zdrojů

1. *Jak funguje tepelné čerpadlo* [online]. Viessmann, spol. s r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.viessmann.cz/cs/rady-a-tipy/typy-a-navody/jak-funguje-tepelne-cerpadlo.html>.
2. *Princip funkce tepelného čerpadla* [online]. EKOVY [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <http://www.ekovy.eu/jak-funguje-tepelne-cerpadlo.htm>.
3. *INSTALAČNÍ MANUÁL* [online]. IMPROMAT KLIMA spol. s r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.impromat-klima.cz/repository/file/UTI-INV-DX-CZ-V2.pdf>.
4. *Moduly řady UTI-INV* [online]. IMPROMAT KLIMA spol. s r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.impromat-klima.cz/produkty/44/>.
5. *INSTALAČNÍ MANUÁL* [online]. IMPROMAT KLIMA spol. s r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.impromat-klima.cz/repository/file/navody2019/UTI-INV-485.pdf>.
6. *UTI porovnání* [online]. IMPROMAT KLIMA spol. s r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.impromat-klima.cz/repository/file/UTI-porovnani.pdf>.
7. *Instalační manuál* [online]. Kostečka Group spol. s r.o. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: http://tech.kostecka.eu/ManualPDF/TC_FUJI_Kaiteki/IM_TC_CIM_FW_V4.1.3_CIM_Manager_V6.10.2.pdf.
8. *Základy teorie ON/OFF a PID regulace* [online]. Logitron s.r.o. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>.
9. MIEKISCH, Ing. Jiří. *Spojité regulátory* [online]. 2012. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/AUT_IV/VY_32_INOVACE_E-15-18.pdf.
10. *Proportional–integral–derivative controller* [online]. Wikimedia Foundation, Inc. [cit. 2024-04-10]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Proportional%E2%80%93integral%E2%80%93derivative_controller.
11. *About Espressif* [online]. Espressif Systems Co., Ltd. [cit. 2024-03-01]. Dostupné z: <https://www.espressif.com/en/company/about-espressif>.
12. *Banana Pi wiki* [online]. BANANA PI TEAM, 2023-11 [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: <https://wiki.banana-pi.org/BPI-Leaf-S3>.

13. *ESP32-S3 Series Datasheet* [online]. Espressif Systems Co., Ltd., 2023. Ver. 1.8 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32-s3_datasheet_en.pdf.
14. *Pulse Width Modulation* [online]. SparkFun Electronics ® [cit. 2024-04-20]. Dostupné z: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/pulse-width-modulation/all>.
15. *EXTION INTRODUCTION* [online]. ITEAD STUDIO [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://nextion.tech/>.
16. *Bluetooth Technology Overview* [online]. Bluetooth SIG, Inc. [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/tech-overview/>.
17. *Getting Started with ESP32 Bluetooth Low Energy (BLE) on Arduino IDE* [online]. RandomNerd-Tutorials.com [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-bluetooth-low-energy-ble-arduino-ide/>.
18. *RS-485 Reference Guide* [online]. Texas Instruments Incorporated, 2014 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20180517101401/http://www.ti.com/lit/slyt484a/slyt484a.pdf>.
19. METEOPRESS. *Jak funguje Modbus a RS-485* [online]. Nitemedia s.r.o., 2021-09-27 [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://www.abclinuxu.cz/blog/jenda/2021/9/jak-funguje-modbus-a-rs-485>.
20. *RS-485* [online]. Wikimedia Foundation, Inc., 2024-03 [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/RS-485>.
21. VALTER, Jaroslav. *Co je RS422 RS485 a srovnání s RS232* [online]. 2003-11-15. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://jvalter.cz/co-je-rs422-rs485-srovnani-rs232>.
22. VALTER, Jaroslav. *Přenos dat po linkách RS485 a RS422* [online]. 2003-10-15. [cit. 2024-04-15]. Dostupné z: <https://jvalter.cz/prenos-dat-po-linkach-rs485-rs422>.
23. NOVÁK, Petr. *ModBus-Protokol* [online]. 2021-05-06. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: [https://cyber.felk.cvut.cz/novakpe/Information/CommunProtocols/ModBus%20\(2021-05-06\).pdf](https://cyber.felk.cvut.cz/novakpe/Information/CommunProtocols/ModBus%20(2021-05-06).pdf).
24. VOJÁČEK, Antonín. *MODBUS* [online]. 2004-07. [cit. 2024-03-10]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2004070701>.
25. JAIN, Rishabh. *Arduino FreeRTOS Tutorial 3- Using Semaphore and Mutex in FreeRTOS with Arduino* [online]. CircuitDigest, 2020-04-09 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-freertos-tutorial-using-semaphore-and-mutex-in-freertos-with-arduino>.
26. JAIN, Rishabh. *Arduino FreeRTOS Tutorial 2- Using Queues in Arduino FreeRTOS* [online]. CircuitDigest, 2020-04-06 [cit. 2024-04-25]. Dostupné z: <https://circuitdigest.com/microcontroller-projects/arduino-freertos-tutorial-using-queues-in-arduino-freertos>.

A. Externí přílohy

Externí přílohy bakalářské práce jsou umístěny na:

https://github.com/MatousekJiri/bakalarska_prace_UJEP.

Na úložišti GitHub naleznete:

- **elektronickou verzi bakalářské práce**
- **modely jednotlivých částí 3D tisknutelné krabičky pro montáž na DIN lištu**
- **kompletní schéma zapojení součástek**
- **rozvržení desky plošného spoje**
- **dílčí část firmwaru - třída obsluhující řízení stavů**

Struktura GitHub repozitáře:

BP_JiriMatousek.pdf	bakalářská práce v PDF
ESP_RE_DIN.stl	model celého vrchního dílu krabičky jako jednoho kusu
ESP_RE_DIN_Bot.stl	model spodní části krabičky
ESP_RE_DIN_cast1_top.stl	model první části vrchního dílu krabičky
ESP_RE_DIN_cast2_mid_popisky.stl	model druhé části vrchního dílu krabičky s popisky
ESP_RE_DIN_cast3_bot_popisky.stl	model třetí části vrchního dílu krabičky s popisky
RE_MB2.1.brd	rozvržení desky plošného spoje
RE_MB2.1.sch	schéma desky plošného spoje
StatusLed.cpp	třída obsluhující řízení stavů
StatusLed.h	hlavičkový soubor pro třídu StatusLed
modbus_kom.jpg	fotografie komunikace Modbus zachycené osciloskopem
