

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA APLIKOVANÉ ELEKTRONIKY A TELEKOMUNIKACÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Box pro dlouhodobé teplotní testy

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2018/2019

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE
(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Václav VALENTA**
Osobní číslo: **E16N0043P**
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektronika a aplikovaná informatika**
Název tématu: **Box pro dlouhodobé teplotní testy**
Zadávací katedra: **Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací**

Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Navrhněte a realizujte řídicí jednotku pro regulaci teploty boxu pro dlouhodobé teplotní testy průmyslových počítačů.

1. Parametry řídicí jednotky: monitorování teploty uvnitř a vně boxu, regulace na nastavenou teplotu, dlouhodobý záznam vnitřní teploty, alarm v případě nedodržení nastavené teploty v určeném teplotním rozsahu, vzdálený dohled a nastavení řídicí jednotky přes WiFi. Možnost rozšíření o další přídavná teplotní čidla.
2. Pro řídicí jednotku využijte vlastností SoC ESP8266 případně ESP32.
3. Proveďte měření na vyvinutém zařízení a výsledky měření vyhodnoťte.
4. Při vývoji využívejte nástroje pro správu zdrojových kódů projektu (SVN, GIT, apod.)

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 40 - 60 stran

Forma zpracování diplomové práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp8266ex/overview>
2. <https://www.espressif.com/en/products/hardware/esp32/overview>
3. Další literatura dle konzultací a/nebo doporučení vedoucího v průběhu práce.

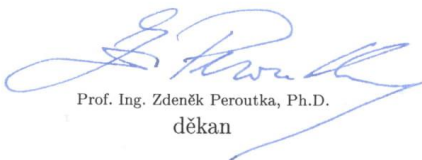
Vedoucí diplomové práce:

Doc. Ing. Martin Poupa, Ph.D.

Katedra aplikované elektroniky a telekomunikací

Datum zadání diplomové práce: 5. října 2018

Termín odevzdání diplomové práce: 30. května 2019


Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan




Doc. Dr. Ing. Vjačeslav Georgiev
vedoucí katedry

V Plzni dne 5. října 2018

Abstrakt

Tato diplomová práce se zaměřuje na možnost simulace teplotních podmínek během přepravy nebo provozu elektrických zařízení v extrémních podmínkách. Diplomová práce poskytuje přehledy základních způsobů měření teploty a její regulace, které byly aplikovány do vlastního zařízení. Cílem práce je regulace teploty v tepelném boxu na požadovanou teplotu, měření této teploty a získávání dalších doplňujících dat. Následné odesílání všech naměřených dat za pomoci Wi-Fi modulu poskytuje obsluze zařízení snadný přístup k datům z kteréhokoliv místa s připojením k internetu. Závěr práce se zabývá otestováním všech jednotlivých komponentů a provedení zkušební simulace s jejím vyhodnocením.

Klíčová slova

Arduino, ESP32, senzory teploty, PID regulace, ThingSpeak, čas vyhřátí, simulace, regulace, zdrojový kód

Abstract

This diploma thesis focuses on the possibility of simulating thermal conditions during transport or operation of the electrical devices in extreme conditions. The diploma thesis provides an overview of basic means of temperature measurement and its control which were applied into the device itself. The aim of the thesis is to control the temperature in the thermal box to the required temperature, to measure this temperature and to gain further additional data. Subsequent sending of all measured data per the Wi-Fi module provides the operator an easy access to data from any location with the Internet connection. The conclusion of the thesis deals with testing of all the individual components and performing of a trial simulation with its evaluation.

Key words

Arduino, ESP32, temperature sensors, PID controller, ThingSpeak, warm-up time, simulation, regulation, source code

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....

podpis

V Plzni dne 25.5.2019

Václav Valenta

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Martinu Poupovi, Ph.D. za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Zdeňku Kubíkovi Ph.D., zvláště za velice přínosné a užitečné rady při měření spínaných zdrojů.

Obsah

OBSAH	8
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	10
ÚVOD	11
TEORETICKÁ ČÁST	12
1 TEPELNÝ BOX	12
1.1 KLIMATICKÉ SKŘÍŇĚ.....	13
1.2 VÝHODY A NEVÝHODY VYHŘÍVANÉHO BOXU.....	13
2 NÁVRH A SIMULACE	14
2.1 PROSTŘEDÍ MATLAB.....	14
2.2 POPIS MODELU TEPELNÉHO BOXU A STRUKTURA PROGRAMU.....	14
3 MĚŘENÍ TEPLoty	23
3.1 DOTYKOVÉ MĚŘENÍ.....	24
3.1.1 <i>Kovové odporové senzory teploty</i>	24
3.1.2 <i>Polovodičové odporové senzory teploty</i>	26
3.1.3 <i>Monolitické PN senzory teploty</i>	27
3.1.4 <i>Termoelektrické články</i>	29
3.1.5 <i>Ostatní</i>	29
3.2 BEZDOTYKOVÉ MĚŘENÍ.....	30
3.2.1 <i>Tepelné detektory</i>	30
3.2.2 <i>Kvantové detektory</i>	31
3.3 FINÁLNÍ VÝBĚR SENZORU TEPLoty.....	31
4 DVOUSTAVOVÁ A PID REGULACE	32
4.1 DVOUSTAVOVÁ REGULACE.....	32
4.2 PID REGULACE.....	33
5 SOC ESP8266 A ESP32	38
5.1 ESP8266.....	38
5.2 ESP32.....	39
PRAKTICKÁ ČÁST	41
6 VLASTNÍ PŘÍPRAVEK	42
6.1 TOPNÁ TĚLESA.....	44
6.2 SPÍNÁNÍ TOPNÉHO TĚLESA.....	45
6.3 SPÍNANÉ NAPÁJECÍ ZDROJE.....	47
6.3.1 <i>Testování zakoupených zdrojů</i>	47
6.3.2 <i>Návrh vlastních spínaných zdrojů</i>	49
6.4 VÝPADEK NAPÁJENÍ.....	55
6.4.1 <i>Superkondenzátor</i>	56
6.5 SOUHRN VYBRANÝCH KOMPONENTŮ.....	57
7 NÁVRH A REALIZACE DPS	59
7.1 NÁVRH ELEKTRICKÉHO ZAPOJENÍ A DPS.....	59
7.2 VÝROBA, OSAZOVÁNÍ A TESTOVÁNÍ DPS.....	59
8 TVORBA ŘÍDÍCÍHO PROGRAMU	62

8.1	ARDUINO.....	62
8.2	TVORBA PROGRAMU V ARDUINU	62
8.3	VYUŽITÍ EXTERNÍCH KNIHOVEN	63
8.4	Hlavní program.....	63
8.5	Podprogramy	64
9	SPRÁVA ZDROJOVÝCH KÓDŮ SVN.....	69
10	MONITORING PRŮBĚHU TEPELNÝCH TESTŮ	71
10.1	THINGSPEAK X WEB SERVER.....	73
11	TESTOVÁNÍ TEPELNÉHO BOXU	74
11.1	ČAS VYHŘÁTÍ	74
11.2	ČAS VYCHLADNUTÍ	75
	ZÁVĚR.....	76
	SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ.....	78
	PŘÍLOHY	I
	PŘÍLOHA A – KÓD MATLAB	I
	PŘÍLOHA B – PID REGULACE	IV
	PŘÍLOHA C – SPÍNANÉ ZDROJE	V
	PŘÍLOHA D – TEPELNÝ BOX A DPS	IX
	PŘÍLOHA E – THINGSPEAK.....	XIII

Seznam symbolů a zkratek

<i>P</i>	Proporcionální člen
<i>I</i>	Integrační člen
<i>D</i>	Derivační člen
<i>ESP8266</i>	vývojová deska pro Arduino s WiFi modulem
<i>ESP32</i>	dvoujádrová vývojová deska pro Arduino s WiFi modulem
<i>IO</i>	integrováný obvod
<i>MCU</i>	mikropočítač
<i>I²C</i>	počítačová sériová sběrnice
<i>OLED</i> displej.....	typ displeje s technologií organických elektroluminiscenčních diod
<i>3D</i>	trojdimenzionální
<i>SoC</i>	system na čipu
<i>RAM</i>	paměť s přímým přístupem umožňující čtení i zápis
<i>ROM</i>	paměť s přímým přístupem umožňující pouze čtení
<i>DPS</i>	deska plošných spojů
<i>MATLAB</i>	interaktivní programové prostředí a skriptovací programovací jazyk

Úvod

V dnešní době je kladen větší důraz na schopnost nasazení elektrického zařízení do teplotně extrémních podmínek. Zároveň častější přeprava elektronických zařízení na delší vzdálenosti ukazuje na nové problémy s touto přepravou spojené. Dlouhé týdny ve velice rozdílných podmínkách mohou negativně ovlivňovat vlastnosti samotného přepravovaného zařízení. Velice často se jedná o přepravu z asijských zemí. Proto je třeba vědět, co se může během cesty a nasazení v extrémních podmínkách stát. Může se jednat o degradaci jednotlivých komponentů vedoucí až k celkové nefunkčnosti zařízení.

Tato diplomová práce se zabývá teplotními testy, které simulují podmínky přepravy a nasazení v podmínkách výše zmíněných. Vytvoření těchto podmínek zajišťuje tepelný box. Cílem práce je návrh, vývoj a následná kompletace vlastního zařízení pro simulaci teplotních podmínek, jejich vytvoření, regulaci a zaznamenávání pomocí dosažených znalostí z teoretické části. Následná měření ověřují schopnost zařízení udržet stanovené podmínky.

Samotnou práci je možné rozdělit do dvou hlavních částí. Jak část teoretická, tak část praktická jsou členěny do podkapitol zabývajících se řešením jednotlivých problematik. Teoretická část popisuje především výhody tepelného boxu oproti klimatické skříni, simulaci tepelného chování přípravku, způsob měření teploty, teorii regulace a možnosti výběru zařízení poskytující výpočetní výkon. Praktická část je pak zaměřena na výběr použitých komponentů. Poté se zabývá návrhem, výrobou, osazením a oživením vlastní DPS pro řízení topného výkonu, zpracování a odeslání dat ze senzorů. Tato práce se též zabývá zkušebním laboratorním měřením vyzařovaného rušení vlastního přípravku v akreditované komoře ZČU. Součástí práce je i dlouhodobé testování funkčnosti tepelného boxu. Důležitým úsekem praktické části je tvorba programu, jak pro samotné MCU, řídicí měřicí procesy, tak i nastavení způsobu ukládání a zobrazování dat posílaných obsluze zařízení Wi-Fi modulem na internet. Nezbytnou součástí v průběhu tvorby softwaru je využití správy zdrojových kódů za pomoci SVN.

TEORETICKÁ ČÁST

1 Tepelný box

Tento box se začal vyvíjet v závislosti na stále rostoucí potřebě testování elektroniky v různých klimatických podmínkách. Toto testování může simulovat jak stárnutí komponentů ve zvýšených teplotách, tak degradaci zařízení během přepravy z místa výroby do místa prodeje. Je stále častější, že vytvořený návrh elektrického zařízení je odeslán k výrobě na druhou stranu světa a následně hotový produkt odeslán do místa prodeje za pomoci lodní, letecké, vlakové nebo kamionové dopravy. Tato cesta může trvat až několik týdnů. Během této cesty jsou produkty vystaveny mnoha nepříznivým vlivům. Jedním z těchto vlivů je zvýšená teplota. Výrobky jsou přepravovány v přepravních kontejnerech. Teplota v těchto kontejnerech na přímém slunci v teplejších oblastech světa dosahuje vysokých hodnot. Především pro elektrolytické kondenzátory tyto teploty představují nepříznivé podmínky. V těchto podmínkách dochází k rychlejšímu vysychání elektrolytu a k celkové degradaci. Následkem toho dochází ke změně kapacity kondenzátorů nebo jejich úplné nefunkčnosti. Kondenzátory nejsou jedinou součástí, která zvýšenou teplotou ztrácí své výrobní hodnoty. Též i použité plasty a různé pasty ztrácí své vlastnosti. Dále u primárních baterií, často použitých v embedded systémech, dochází k vyššímu samovybíjení, stejně tak u nabitých super kondenzátorů dochází k jejich zvýšenému samovybíjení. Součtem všech změn na každém komponentu může dojít ke zkrácení životnosti zařízení nebo k úplné nefunkčnosti.

Tepelný box je schopen vyhřát testovací prostor až na teplotu 85°C. Tento limit je určen materiály použitými na výrobu tepelného boxu společně s požadavky na maximální teplotu. Při vyšší maximální teplotě by bylo vhodné použití jiných a dražších konstrukčních materiálů. Ovšem nárůst rozsahu teplot oproti ceně materiálů by byl neúměrně vysoký.

1.1 Klimatické skříně

Profesionálním řešením pro tepelné testování jsou klimatické skříně. Většina těchto skříní má i možnost chlazení pracovního prostoru oproti okolní teplotě. Proto se jedná o univerzální všestranný nástroj. Ovšem takovéto funkce navíc vyžadují k svému fungování i další komponenty, které zabírají velký prostor. Dále provoz klimatické skříně vyžaduje pravidelné odborné kontroly po určitých provozních hodinách. Z těchto důvodů vznikla potřeba vytvořit specializované zařízení, které splní všechny požadavky a zároveň bude ekonomicky mnohem výhodnější.

1.2 Výhody a nevýhody vyhřívaného boxu

Tato část je zaměřena na výhody a nevýhody tepelného boxu. První výhodou, která již vyplývá z předešlého textu, je menší pořizovací cena a nižší náklady na údržbu. Tohoto je dosaženo primárně menším počtem komponentů celého zařízení. Další výhodou jsou i menší rozměry celého zařízení v poměru k velikosti pracovního prostoru. Jelikož se v tepelném boxu nenachází žádný kompresor a s ním přítomná žádná kapalina, odpadá potřeba evidence odpracovaných hodin pro pravidelnou údržbu. V tomto konkrétním provedení se také jedná o menší provozní energetické náklady. Relativní nevýhodou se může zdát absence chlazení, ale pro potřeby vyžadovaných testů není tato funkce potřebná. Velikou výhodou je možnost připojení tepelného boxu k internetu pomocí Wi-Fi modulu obsaženého rovnou na DPS společně s MCU.

2 Návrh a simulace

2.1 Prostředí MATLAB

MATLAB je interaktivní prostředí pro vědeckotechnické výpočty, modelování, návrhy algoritmů, simulace, analýzu a prezentaci dat, měření a zpracování signálů, návrhy řídicích a komunikačních systémů. Je to nástroj, jak pro relativně pohodlnou interaktivní práci, tak pro vývoj širokého spektra aplikací.

2.2 Popis modelu tepelného boxu a Struktura programu

Prvním a zásadním krokem bylo vytvořit model tepelného boxu v prostředí MATLAB. Za pomoci tohoto modelu bylo nadále možné nasimulovat chování mnoha aspektů, které rozhodují při návrhu reálného zařízení. Díky modelu a následné simulaci bylo možné vybrat nejvhodnější celkové řešení z hlediska investovaných prostředků a výsledného přínosu. Požadovaným výstupem celé simulace a modelu bylo porovnání ztrátového tepelného výkonu, doby ohřevu a potřebného dodaného tepla v závislosti na tloušťce izolace boxu.

Nalezení vzorců, výpočtů a definic, které dokážou tento model popsat a následně vypočítat, je klíčové a zcela zásadní. V další části je popsáno, jak se došlo k vytvoření univerzální modelu a kódu v MATLABu.

Tepelný odpor R

Tepelný odpor vyjadřuje, jakou plochou konstrukce a při jakém rozdílu teplot na jejích površích dojde k přenosu 1 Wattu, čili k přenosu energie o velikosti 1 J za 1 sekundu.

Definice

R [$\text{m}^2 \cdot \text{K} / \text{W}$] tepelně izolační vlastnost vrstvy materiálu, popř. nesterjnorodé vrstvy materiálu, popř. stavební konstrukce dané tloušťky. Je-li známa hodnota součinitele tepelné vodivosti vrstvy materiálu a je-li konstantní, povrchy kolmé na směr tepelného

toku jsou vzájemně rovnoběžné (planparalelní vrstva) a vrstvou tak proudí rovnoměrný tepelný tok, je tepelný odpor definován vztahem:

$$R = \frac{d}{\lambda} \quad (2.1)$$

Kde:

d... tloušťka vrstvy; tloušťka vrstvy v konstrukci [m]

*λ... součinitel tepelné vodivosti [W/(m*K)]*

Tepelný odpor konstrukce je roven součtu tepelných odporů jednotlivých (planparalelních) vrstev, ze kterých je konstrukce složena:

$$R = \sum R_j \quad (2.2)$$

Nejvhodnější materiál, který bude tvořit izolační vrstvu, je polystyren. Tento materiál má velice dobré tepelné izolační vlastnosti (vysoký tepelný odpor). Nízká cena společně s nízkou hmotností a snadnou úpravou tvoří další významný aspekt přispívající k výběru polystyrenu jako izolačního materiálu. Z *Tab. 1* jsme si vybrali 3 tloušťky. Výběr byl dle nejčastěji prodávaných šířek. Jedná se tedy o 50mm, 75mm a 100mm. Dále jsem dohledal tepelnou vodivost plastu. Tepelná vodivost je inverzní k tepelnému odporu, takže výpočty s ní jsou obdobné výpočtům s tepelným odporem. Dalším vhodným kandidátem k zaizolování boxu je materiál pěnové sklo. Má velice nízkou tepelnou vodivost ($\lambda = 0,04[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$), ale cena je oproti polystyrenu vyšší.

Do úvahy musíme brát i materiál, z kterého je vyroben samotný box. Jedná se o plast, který má průměrnou tepelnou vodivost $0,19 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{K})$. Tloušťka materiálu je 5mm. Tento materiál bude započítán do výpočtu simulace.

Tab. 1: Tepelný odpor polystyrenu XPS

Označení	Tloušťka (mm)	Tepelný odpor $R_D[m^2KW^{-1}]$
STYRODUR 3035CS, 3	30	1
STYRODUR 3035CS, 4	40	1,25
STYRODUR 3035CS, 5	50	1,55
STYRODUR 3035CS, 6	60	1,80
STYRODUR 3035CS, 8	80	2,35
STYRODUR 3035CS, 10	100	2,80

Výpočet ztrátového (chladícího) výkonu:

- $R_{pol50} = 1,55 [m^2K/W]$
- $R_{pol100} = 2,80 [m^2K/W]$
- $R_{pol75} = 2,21 [m^2K/W]$
- $R_{plast} = d/\lambda = 0,005/0,19 = 0,0263 [m^2K/W]$

Nejprve jsou uvedeny hodnoty tepelného odporu, případně tepelné vodivosti jednotlivých materiálů pro jednotlivé šířky. Následně je potřeba sečíst všechny vrstvy materiálů v řezu. Tepelný box se skládá z plastové přepravky s vloženým polystyrenem.

$$R_{t1} = R_{plast} + R_{pol150} = 0,0263 + 1,55 = 1,576 \left[\frac{m^2 * K}{W} \right] \quad (2.2)$$

$$R_{t2} = R_{plast} + R_{pol175} = 0,0263 + 2,21 = 2,236 \left[\frac{m^2 * K}{W} \right] \quad (2.3)$$

$$R_{t3} = R_{plast} + R_{pol100} = 0,0263 + 2,80 = 2,826 \left[\frac{m^2 * K}{W} \right] \quad (2.4)$$

Následně musíme zjistit celkové rozměry boxu. Z jednotlivých rozměrů potom vypočítáme dílčí plochy stran a dále výsledný povrch.

$$\text{Rozměry} = X \times Y \times Z = 0,26\text{m} \times 0,46\text{m} \times 0,25\text{m}$$

$$S_1 = 2 * X * Y = 2 * 0,26 * 0,46 = 0,239[m^2]$$

$$S_2 = 2 * X * Z = 2 * 0,26 * 0,25 = 0,130[m^2]$$

$$S_3 = 2 * Y * Z = 2 * 0,46 * 0,25 = 0,230[m^2] \quad (2.5)$$

$$S = S_1 + S_2 + S_3 = 0,230 + 0,13 + 0,239 = 0,599[m^2] \quad (2.6)$$

Nyní je možné vypočítat ztrátový výkon. Musíme si pro vzorový příklad zvolit vnitřní a vnější teplotu. Zvolená je maximální nastavitelná vnitřní teplota, abychom zjistili maximální ztrátový výkon. Vnitřní teplota $T_{IN} = 85^\circ\text{C}$, vnější teplota $T_{OUT} = 20^\circ\text{C}$.

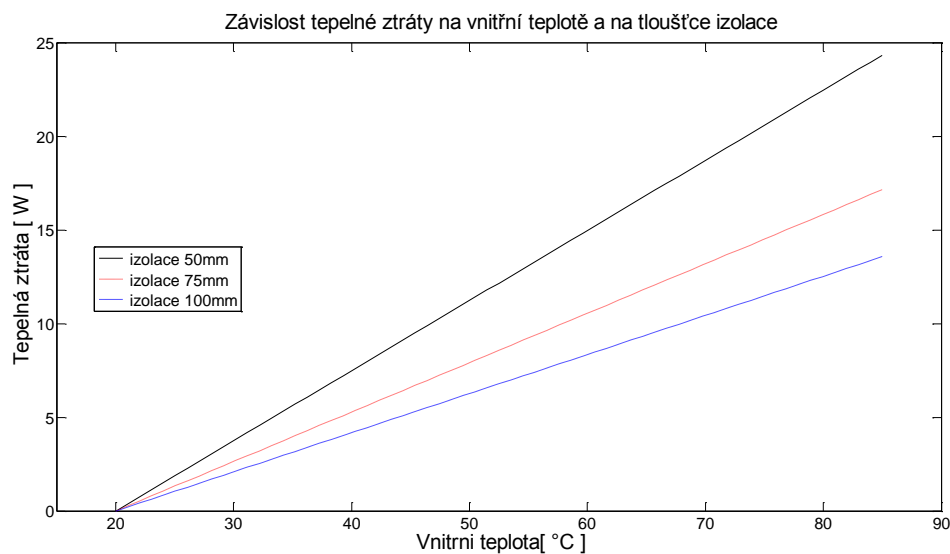
$$W_{50} = \frac{S * (T_{IN} - T_{out})}{R_{t1}} = \frac{0,599 * (85 - 20)}{1,306} = 24,328[W] \quad (2.7)$$

$$W_{75} = \frac{S * (T_{IN} - T_{out})}{R_{t2}} = \frac{0,599 * (85 - 20)}{1,946} = 17,148[W] \quad (2.8)$$

$$W_{100} = \frac{S * (T_{IN} - T_{out})}{R_{t3}} = \frac{0,599 * (85 - 20)}{2,586} = 13,568[W] \quad (2.9)$$

- W ... tepelná ztráta, kterou je potřeba vykompenzovat k udržení stálé teploty[W]
- S ... povrch tepelného boxu[m²]
- T_{OUT} ... teplota v okolí boxu[°C]
- T_{IN} ... teplota v boxu[°C]
- R_t ... tepelný odpor izolace [m²K/W]

Na udržení stálé teploty v boxu při izolaci 50mm (85°C) je potřeba dodávat tepelný výkon 24,328W. Při změně izolace na 75mm (85°C) je potřeba dodávat tepelný výkon 17,148W. Za využití nejširší izolace 100mm (85°C) je nutné dodávat tepelný výkon 13,568W. Ztráty při jiných vnitřních teplotách pro všechny tři druhy izolace znázorňuje Obr. 1.



Obr. 1: Tepelné ztráty (vlastní zdroj)

Po zjištění tepelných ztrát pro jednotlivé tloušťky polystyrenu, je na řadě výpočet potřebného tepla (Q) na ohřátí vzduchu v boxu o objemu (V) na teplotu 85°C .

Vzorec výpočtu:

$$m = \rho_{\text{vzduchu}} * V \text{ [kg]} \quad (2.10)$$

$$V = X * Y * Z = 0,26 * 0,46 * 0,25 = 0,0299 \text{ [m}^3\text{]} \quad (2.11)$$

$$Q = m * C_{\text{vzduchu}} * (T_{IN} - T_{out})$$

$$Q = (1,275 * 0,0299) * 1000 * (85 - 20)$$

$$Q = 2477.96 \text{ [J]} = 2,478 \text{ [kJ]} \quad (2.12)$$

Kde:

- ρ_{vzduchu} ... měrná hustota vzduchu ($1,275 \text{ [kg/m}^3\text{]}$)
- C_{vzduchu} ... měrná tepelná kapacita vzduchu (1000 [J/(Kg*K)])
- T_{in} ... požadovaná vnitřní teplota [$^{\circ}\text{C}$]
- T_{out} ... teplota okolního vzduchu mimo box [$^{\circ}\text{C}$]
- V ... objem vzduchu v boxu [m^3]

Teplo potřebné k ohřátí vzduchu v boxu o objemu V se rovná 2477.96 JOULE . V tomto výpočtu se neberou v potaz ztráty, které jsme si vypočítali v předchozím kroku. Proto je zapotřebí tyto tepelné ztráty [W] a teplo [J] převést na stejné jednotky. Tepelné ztráty se udávají ve W , tedy práce za čas. Můžeme tedy předpokládat, že ztrátový výkon za čas se udává ve Wh . Dále platí, že jedna Wh odpovídá energii 3600J .

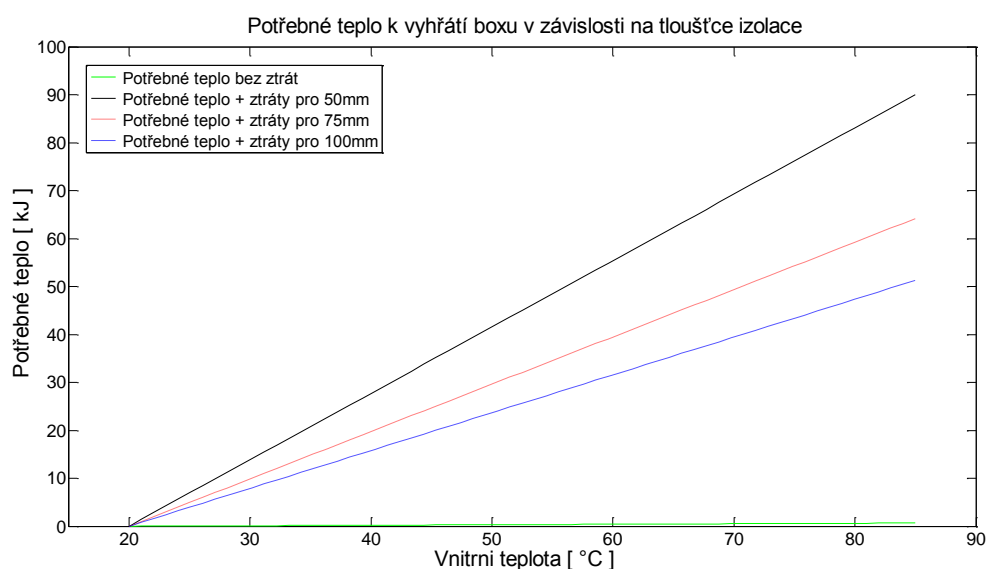
Pro výpočet celkového potřebného výkonu zdroje je zapotřebí vzít v úvahu výkon potřebný pro ohřátí vnitřního prostoru a výkon pro pokrytí tepelných ztrát. Výsledek je součtem těchto dvou parametrů.

$$\begin{aligned}
 Q_{total50}(85^{\circ}C) &= \frac{Q}{3600} + W_{50} = \frac{2477,96}{3600} + 24,328 \\
 &= 25,016 \text{ [Wh]}
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Zpětný převod na JOULE

$$Q_{total50}(85^{\circ}C) * 3600 = 90,022 \text{ [kJ]}
 \tag{2.14}$$

Potřebné dodané teplo i se započítanými ztrátami činí $Q_{total50}(85^{\circ}C) = 90,022 \text{ kJ}$ pro izolaci 50mm. Pro izolaci 75mm $Q_{total75}(85^{\circ}C) = 64,173 \text{ kJ}$ a pro izolaci 100mm $Q_{total100}(85^{\circ}C) = 51,286 \text{ kJ}$. Kompletní výsledky jsou patrné na *Obr. 2*.



Obr. 2: Potřebné teplo k vyhřátí boxu (vlastní zdroj)

K vytápění prostoru testovacího boxu bude použita vyhřívací podložka běžně používaná pro 3D tiskárny. Tato podložka má tepelný výkon $P = 110 \text{ W}$. Posledním bodem je výpočet doby, za kterou se prostor boxu ohřeje na požadovanou teplotu. Energii [kJ], kterou tato podložka za hodinu provozu vyzáří, je možno spočítat. Značím jí P_j a jedná se o energii v [kJ] spotřebovanou za hodinu provozu podložky.

$$P_j = P * 3,6 = 110 * 3,6 = 396[kJ] \quad (2.15)$$

Čas budeme vyjadřovat v minutách. Proto výpočet bude následující.

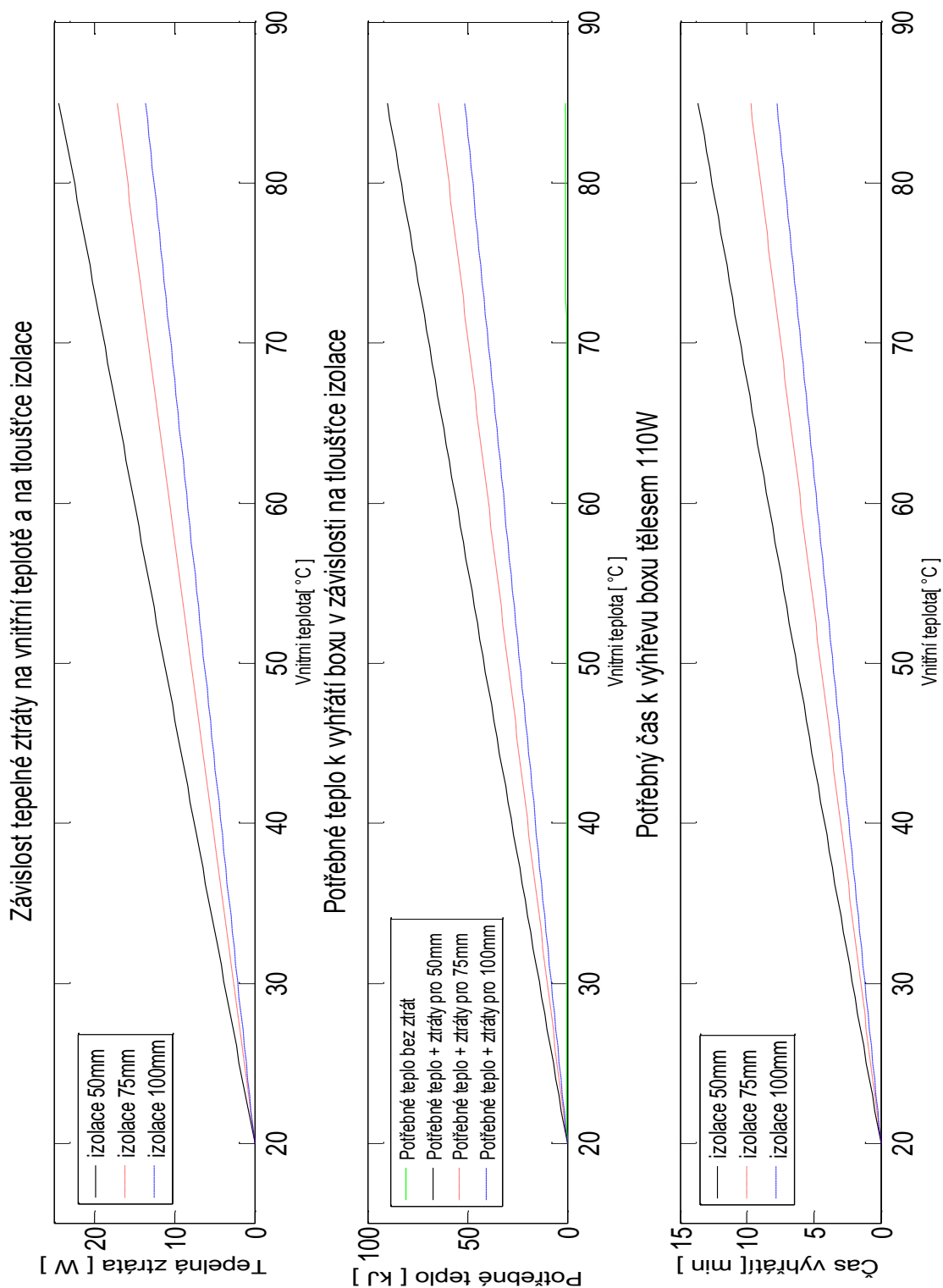
$$t_{ohrevu50} = \frac{60}{\frac{P_j}{Q_{total50}(85^\circ C)}} = \frac{60}{\frac{396}{90,022}} = 13,64[min] \approx 818s$$

$$t_{ohrevu75} = \frac{60}{\frac{P_j}{Q_{total75}(85^\circ C)}} = \frac{60}{\frac{396}{64,173}} = 9,72[min] \approx 583s$$

$$t_{ohrevu100} = \frac{60}{\frac{P_j}{Q_{total100}(85^\circ C)}} = \frac{60}{\frac{396}{51,286}} = 7,77[min] \approx 466s \quad (2.16)$$

Zjistili jsme veškeré potřebné informace: tepelné ztráty, energii potřebnou k vyhřátí prostoru, čas nutný k tomuto vyhřátí, a to v závislosti na tloušťce izolačního materiálu. Všechny tyto výpočty byly provedeny pro vybrané topné těleso, vybrané rozměry boxu a vybrané varianty izolace. Výhodou programu napsaného v MATLABu je jeho univerzálnost. Je možné libovolně měnit rozměry boxu, tloušťku izolačního materiálu popřípadě úplně změnit izolant za jiný typ. Problém nepředstavuje ani změna topného tělesa. Tímto vším můžeme dosáhnout ideálního času ohřevu, minimálních ztrát a jiných vlastností potřebných pro naši aplikaci. Kompletní kód se nachází v *Příloha A – Kód MATLAB*. Nejdůležitějším výstupem a očekávaným výsledkem je grafické znázornění všech výsledků. Z nich je velice jednoduše čitelné vše, co potřebujeme k rozhodnutí, jak bude výsledný box vypadat. Tento výstup je viditelný na *Obr. 3*.

Minimální rozměry tepelného boxu jsou dány i požadovaným objemem prostoru pro testované součástky. Ideální z hlediska požadovaného výkonu je co nejmenší objem, z hlediska stability regulované teploty zase co největší objem.



Obr. 3: Grafický výstup programu MATLAB (vlastní zdroj)

3 Měření teploty

Teplota

„Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy. Stav termodynamické rovnováhy bývá charakterizován termodynamickou teplotou, která musí být stejná pro všechny části izolované soustavy.“ [3]

„Fyzikální veličina teplota se nesmí zaměňovat za fyzikální veličinu teplo, neboť teplo je forma energie související s pohybem částic dané soustavy těles, ale není stavovou veličinou, neboť nezávisí na přítomném stavu soustavy, ale na celé minulosti vývoje této soustavy. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. Měření teploty je tedy měření nepřímé.“ [3]

Existuje několik stupnic k měření teploty - termodynamická, Celsiova (teplotní) stupnice a Fahrenheitova (teplotní) stupnice. Termodynamická stupnice s jednotkou kelvin (K). Tato stupnice je definována trojným bodem vody (led, voda a sytá pára) $T = 273,15\text{K}$. Teplota $T = 0\text{K}$ je rovna absolutní nule. Absolutní nula je minimální hodnota dosažitelná ve vesmíru s nulovou pohybovou energií částic. Celsiova stupnice je odvozena od Kelvinovy stupnice s posunem o $273,15\text{K}$. Jednotkou je stupeň Celsia ($^{\circ}\text{C}$). $T = 0\text{K} = -273,15^{\circ}\text{C}$. Fahrenheitova stupnice je používána v některých státech, převážně pak na Americkém kontinentě. Z důvodu rozmanitého množství stupnic byla roku 1927 stanovena Mezinárodní praktická teplotní stupnice. Poslední znění pochází z roku 1990 a proto má označení ITS-90. „ITS-90 je empirickou teplotní stupnicí stanovenou na 17 pevně definovaných teplotních bodech, které odpovídají rovnovážným stavům mezi fázemi vybraných látek.“ [3]

Senzor teploty

Senzor teploty tvoří vstupní prvek měřicího řetězce. Je v přímém styku s měřeným prostředím. Samotný fyzikální princip dělí senzory teploty na odporové, polovodičové s PN přechodem, termoelektrické, dilatační, optické radiační, chemické, šumové, akustické, magnetické a další.

Dále se dělí v závislosti na styku s měřeným prostředím na dotykové a bezdotykové. Dalším je dělení na aktivní senzory, které se působením teploty chovají jako zdroje el. energie, a pasivní, které musí mít pro svou správnou funkčnost externí napájení. Posledním hlavním dělením je na analogové a digitální senzory. Analogové senzory poskytují hodnoty nezpracované do digitální podoby. Digitální senzory teploty převádějí naměřenou teplotu do digitální podoby a následně ji též odesílají v digitální podobě.

V této kapitole si blíže představíme jen některé typy senzorů, a to z důvodu velkého množství principů měření a jejich provedení. Hlavním účelem je vytvoření základního přehledu a vysvětlení principů, na kterých se měření zakládá. Kompletní a podrobný přehled by byl na samostatnou práci.

3.1 Dotykové měření

Dotykové měření teploty probíhá v přímém kontaktu s měřeným prostředím (objektem). Sem patří následující senzory.

3.1.1 Kovové odporové senzory teploty

„Principem odporových kovových čidel teploty je teplotní závislost odporu kovu.“ Při malém rozsahu teplot od 0°C do 100°C lze s určitou nepřesností používat lineární vztah z rovnice (3.1).

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (3.1)$$

Kde:

- R_0 ... odpor čidla při teplotě 0°C [Ω]
- α ... teplotní součinitel odporu [-]

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100 * R_0} \quad (3.2)$$

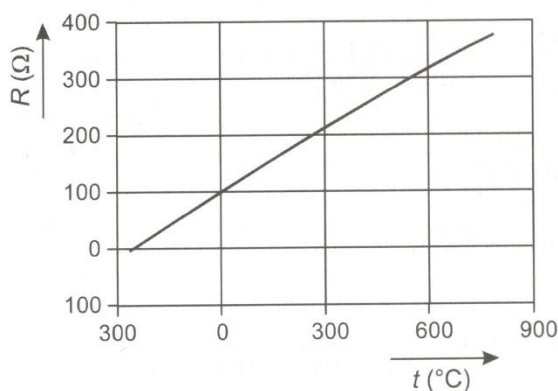
Kde:

- R_{100} ... odpor čidla při teplotě 100°C [Ω]

Mezi technologie výroby kovových snímačů teploty patří drátová technologie, tenkovrstvá technologie a tlustovrstvá technologie. Drátový měřicí odpor je tvořen stočeným platinovým drátkem. Tenkovrstvá technologie je technika napařování a iontové leptání na korundovou slídu (Al_2O_3). Ladění jmenovitého odporu je prováděno laserem. Tlustovrstvá technologie je vytvářena na keramických substrátech aditivním způsobem. Charakteristickým znakem tlustovrstvé technologie je amorfni struktura vytvořená nevakuumy depozičními metodami (nejčastěji sítotiskem), a následným výpalem při teplotě kolem 850°C . [3]

Odporové platinové snímače teploty

Velkou výhodou platinových snímačů je vysoká chemická netečnost, časová stálost a vysoký bod tání. Pro meteorologické účely jsou nároky na čistotu platinu 99,999%. Platinové snímače se v průmyslu dělí do tolerančních tříd. Třída A je určena pro rozsah teplot $-200^\circ\text{C} - +600^\circ\text{C}$ a třída B pro teploty $-200^\circ\text{C} - +850^\circ\text{C}$. Speciální jsou vysokoteplotní snímače pro snímání teplot do $+1100^\circ\text{C}$. Závislost odporu čidla na teplotě je na *Obr. 4*.



Obr. 4: Závislost R čidla Pt 100 na teplotě [3]

Základní hodnota odporu platinového čidla $R_0 = 100\Omega$, ale vyrábí se také série s hodnotami 50, 200, 500, 1000 a 2000Ω .

Odporové niklové snímače teploty

Výhodou niklových snímačů je velká citlivost, rychlá odezva a malé rozměry. Niklová čidla teploty jsou většinou vyrobená tenkovrstvou technologií. Ovšem

nevýhodou je omezený rozsah měření teploty. Oproti platině je značně nelineární. Další nevýhodou je nižší odolnost proti působení okolí. Základní hodnota odporu je $R_{100}=100\Omega$. Další vyráběné série jsou 200, 500, 1000, 2000 Ω .

Odporové měděné snímače teploty

Měděné snímače se používají v rozsahu teplot $-200^{\circ}\text{C} - +200^{\circ}\text{C}$. Lineární vztah z rovnice (3.1) lze využít v rozmezí teplot $-50^{\circ}\text{C} - +150^{\circ}\text{C}$, kde $\alpha = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$. Platina má šestinásobnou rezistivitu než měď. Dalším negativním aspektem je snadná oxidace mědi. Toto vede k málo běžné výrobě tohoto typu snímače. Využívá se při přímém měření měděného vinutí. [3]

3.1.2 Polovodičové odporové senzory teploty

Polovodičové odporové senzory využívají stejně jako kovové odporové senzory teplotní závislost odporu. U polovodičových senzorů je dominantní závislostní koncentrace nosičů náboje n na teplotě dle rovnice (3.3).[3] Polovodičové odporové senzory dělíme na negasty a pozistory.

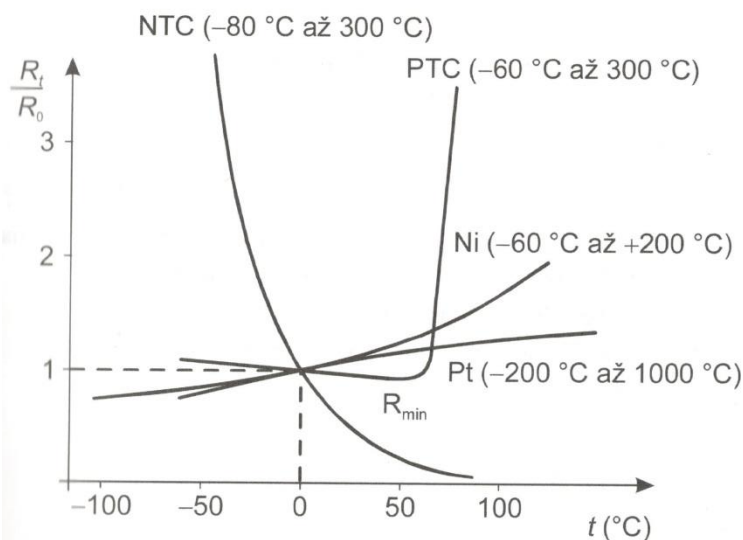
$$n = e^{\frac{\Delta E}{2kT}} \quad (3.3)$$

Kde:

- ΔE ... šíře mezery mezi energetickými hladinami

Termistor

Termistor je zhotovený z polovodičových keramických materiálů a je teplotně závislý. Výhodou termistoru je velká citlivost, jednoduchý převod na elektrické napětí nebo proud, malé rozměry a snadné přímé měření na velkou vzdálenost. Hlavní a podstatnou nevýhodou je nelineární charakteristika. Termistor je dělen v závislosti na své struktuře na amorfni nebo polykrystalický. Dále má velký záporný teplotní součinitel odporu (negastor = NTC), nebo velký kladný teplotní součinitel odporu (pozistor = PTC). Teplotní závislosti NTC a PTC jsou znázorněny na Obr. 5 společně se závislostí kovových senzorů. NTC termistory mají teplotní rozsah běžně $-50^{\circ}\text{C} - +150^{\circ}\text{C}$ až po extrémní rozsahy do $+1000^{\circ}\text{C}$.



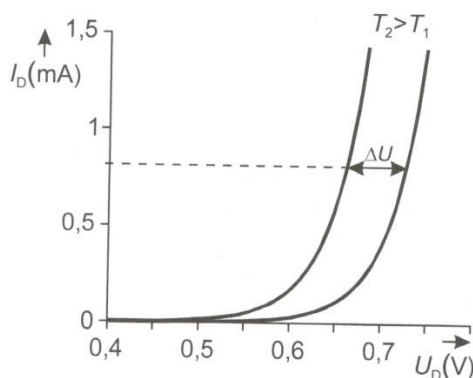
Obr. 5: Porovnání závislosti NTC a PTC s kovovými senzory (Ni,Pt) [3]

3.1.3 Monolitické PN senzory teploty

„Integrované monolitické senzory teploty jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Tyto senzory mají teplotní rozsah $-55^{\circ}\text{C} - +150^{\circ}\text{C}$.“ [3]

Diodové PN senzory teploty

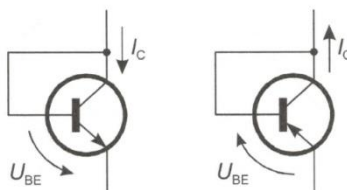
V závislosti na změně teploty se posouvá charakteristika přechodu PN diody. S rostoucí teplotou se charakteristika posouvá k napěťové nule. Tato závislost je zobrazena na *Obr. 6*.



Obr. 6: Teplotní závislost charakteristiky přechodu PN diody [3]

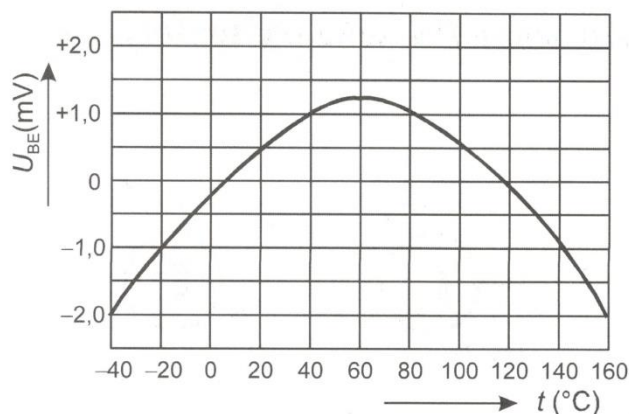
Tranzistorové PN senzory teploty

Stejný princip jako u diodových PN senzorů. To znamená, že využívá teplotní závislost napětí přechodu báze-emitor (U_{BE}) v propustném směru. V zapojení tzv. tranzistorové diody viz. *Obr. 7*. Toto zapojení není závislé ani na proudu I_C ani na vlivu termodynamické teploty.



Obr. 7: Tranzistorová dioda [3]

Nelinearita přechodu U_{BE} , která je závislá na teplotě, při průchodu proudu 1mA, je znázorněna na *Obr. 8*.



Obr. 8: Nelinearita U_{BE} v závislosti na teplotě[3]

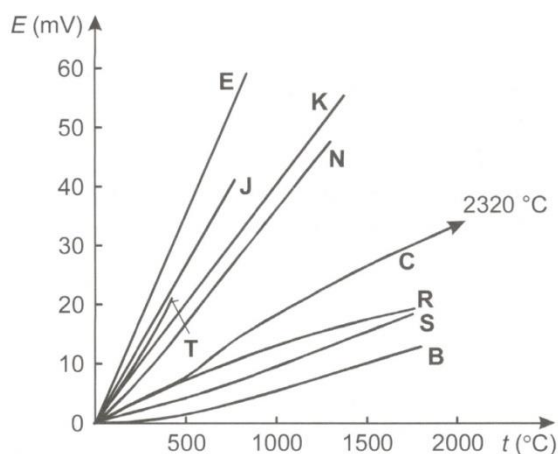
Monolitické (integrované) PN senzory teploty

„U integrovaných senzorů teploty tvoří vlastní senzor teploty a elektronický obvod jediný monolitický prvek. Nejčastěji jsou založeny na dvojici bipolárních tranzistorů napájených ze zdrojů proudu. Výhodou tohoto diferenčního uspořádání je potlačení vlivu teplotní závislosti proudu I_s a chyby způsobené oteplením polovodiče ztrátovým výkonem. Toto uspořádání se také označuje jako PTAT obvody.“[3]

3.1.4 Termoelektrické články

Seebeckův jev

„Termoelektrické články jsou založeny na Seebeckově jevu, tj. na jevu převodu tepelné energie na elektrickou. Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositele náboje větší energii, a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst.“[3] Termoelektrické napětí využívá veličiny elektromotorické napětí E [V]. Termoelektrický článek je složen ze dvou vodičů, případně dvou polovodičů. Spojováním různých materiálů vznikají typy termočlánků. Jejich charakteristiky jsou znázorněny na Obr. 9.



Obr. 9: Charakteristika termoelektrických článků[3]

3.1.5 Ostatní

Mezi ostatní typy kontaktních senzorů patří:

- *Dilatační teploměry* (založené na teplotní roztažnosti látek, kapalin a plynů)
- *Akustické teploměry* (využíváním principem je teplotní závislost šíření rychlosti zvuku)
- *Krystalové teploměry* (využívá se teplotní závislosti rezonančního kmitočtu křemenného výbrusu)
- *Optické vláknové senzory teploty* (měřená teplota moduluje optický signál, který je vysílán do optického vlákna z LED nebo laseru a detekován polovodičovou diodou.)
- *Barevné indikátory teploty* (změna barvy v závislosti na změně teploty)

3.2 Bezdotykové měření

„Bezdotykové měření teploty (také označované jako infračervená pyrometrie) je měření povrchové teploty těles na základě elektromagnetického záření vysílaného tělesem. Jedná se o záření vlnové délky 0,4 μ m - 25 μ m.“ [3]

Bezdotykové měření teploty má výhody:

- Zanedbatelně ovlivňuje měřený objekt.
- Je možné měřit rotující a pohybující se objekty.
- Možnost měření z bezpečné vzdálenosti
- Možnost měření rychlých změn teploty.

Bezdotykové měření teploty má i své nevýhody:

- Nejistotu měření způsobenou materiálem a emisivitou povrchu tělesa.
- Nepřesnost měření způsobenou prostředím mezi čidlem a objektem

Základní dvě skupiny detektorů tepelného záření se člení dle interakce fotonů s materiálem na tepelné a kvantové. [4]

3.2.1 Tepelné detektory

„U tepelných detektorů dochází při absorpci fotonů k oteplení citlivé části detektoru a pohlcená energie se vyhodnocuje nepřímo prostřednictvím snímačů teploty.“ [4]

- *Termoelektrické* (sériově řazené termoelektrické články)
- *Bolometrické* (detekování oteplení odporových materiálů v závislosti dopadajícího záření)
- *Pyroelektrické* (založeno na pyroelektrickém jevu, tj. změně spontánní polarizace při změně teploty)

3.2.2 Kvantové detektory

Podstatou kvantových detektorů je fyzikální jev, při kterém během interakce dopadajících fotonů dochází ke generaci párů elektron – díra. [3] Kvantové detektory jsou polovodičové detektory (Si, Ge, PbS, Te, InSb, PbSe, GaA, PbSnTe)

- *Intrinsické* (vyroben z čistého polovodiče)
- *Extrinsické* (založeny na PN přechodu z extrinsických polovodičů)

3.3 Finální výběr senzoru teploty

Ve finále byl vybrán senzor DS18B20, digitální senzor teploty s připojením One-wire (připojení po jednom vodiči). Řadí se do skupiny Monolitických (integrovaných) PN senzorů teploty viz kapitola 3.1.3 *Monolitické PN senzory teploty*. Tento digitální senzor teploty má pouze 3 piny (U_{cc} , GND a DATA). Datový pin je připojen rezistorem o hodnotě $4,7k\Omega$ k U_{cc} . Senzor posílá naměřená data přímo na vstupní pin mikrokontroleru společně se svou jedinečnou 64.bit adresou. Díky tomuto je možné identifikovat jednotlivé senzory. Na jeden vodič je možné připojit několik senzorů najednou. Počet senzorů ovlivňuje pouze čas potřebný na vyčtení teplot ze všech senzorů. Rozsah měřených teplot je $-55^{\circ}\text{C} - +125^{\circ}\text{C}$. Přesnost měření (rozlišení) lze nastavit v rozmezí 9-12bitů. Další informace o senzorech DS18B20 jsou patrné z Tab. 2. [18]

Tab. 2: Přesnost měření DS18B20

Přesnost měření [bit]	Rozlišení [$^{\circ}\text{C}$]	Čas vyčítání teploty [ms]
9	0,5	93,75
10	0,25	187,5
11	0,125	375
12	0,0625	750

4 Dvoustavová a PID regulace

Oba druhy regulace mají za úkol regulovat výstupní veličinu tak, aby se nejvíce přiblížila k požadované hodnotě a nebyla vyžadována pozornost a zásahy ze strany člověka. Každá regulace má své uplatnění. Každý z regulátorů se hodí k regulování určitých systémů více a jiných systémů méně. V následující kapitole budou rozepsány jednotlivé výhody a nevýhody dvoustavové a PID regulace. Dále budou vypsány jednotlivé okruhy jejich vhodného využití. V závěru kapitoly bude vybrána jedna z těchto regulací k praktickému použití v diplomové práci.

4.1 Dvoustavová regulace

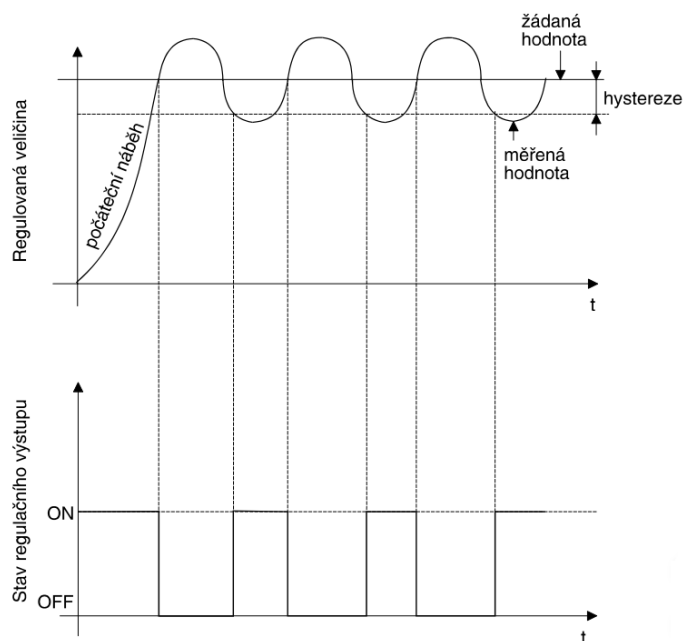
Je převážně využívána pro méně náročné aplikace. Ze samotného principu této regulace není možné dosáhnout nenulové regulační odchylky (požadovaná hodnota – skutečná hodnota). Měřená hodnota charakteristicky kmitá kolem požadované hodnoty. Regulační odchylku lze řídit za pomoci nastavení hystereze. Tato změna se ovšem projeví na intervalu spínání výkonových členů regulátoru. V případě malé hystereze může mít časté spínání nepříznivý vliv na životnost elektronických spínačů (relé, stykače, apod.). Charakteristický způsob kmitání je patrný na Obr. 10.

Výhodami jsou:

- nízké nároky na výkonové spínací prvky.
- k regulaci často dostačují i pomalejší spínací prvky (relé)
- malé nároky na výpočetní sílu regulátoru
- jednoduchá obsluha regulátoru

Nevýhodou je:

- nízká jakost regulace



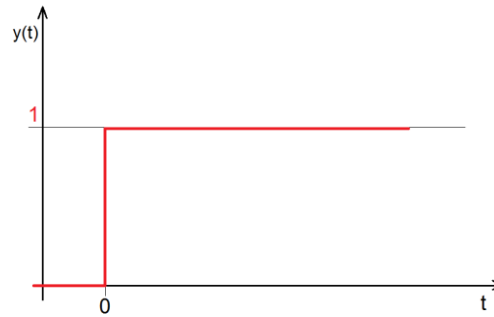
Obr. 10: Průběh dvoustavové regulace [6]

4.2 PID regulace

PID regulace umožňuje mnohem přesnější řízení procesů než dvoustavová regulace. V případě topných soustav se za pomoci PID regulace (podle charakteristiky regulované soustavy) dá dosáhnout regulační odchylky menší než 1°C . Podle charakteru výkonového spínače je výstupní hodnota plně proporcionalní nebo kvazi proporcionalní. PID regulace je založena na kombinaci třech jednotlivých členů. Jedná je o člen P, I a D.

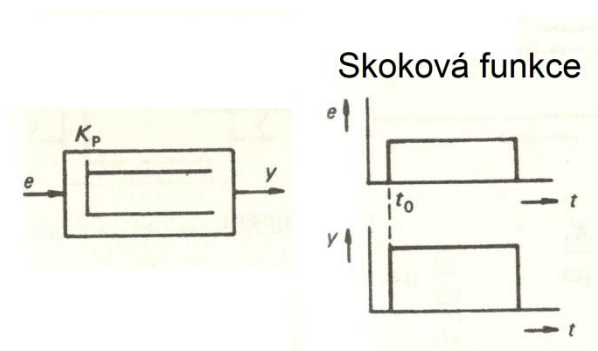
Jednotkový skok

Vstupní jednotkový skok je nespojitá funkce, která má nulovou hodnotu pro zápornou hodnotu argumentu a hodnotu rovnou jedné pro kladnou hodnotu argumentu. Často se využívá v teorii řízení a při práci se zpracováním signálu, kde slouží k reprezentaci jednorázové změny signálu. V některých literaturách se nachází pod názvem Heavisideova funkce po anglickém učenici Oliveru Heavisideovi. Funkce jednotkového skoku je zobrazena na *Obr. 11*.



Obr. 11: Jednotkový skok (vlastní zdroj)

P (proporcionální)



Obr. 12: Proporcionální blok a skoková funkce [5]

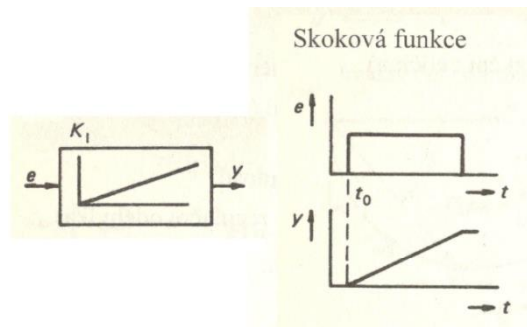
Kde:

- K_p ... konstanta úměrnosti
- e ... vstupní signál (regulační odchylka)
- y ... výstupní signál (akční veličina)

$$y = K_p * e \quad (4.1)$$

Skoková funkce z *Obr. 12* znázorňuje reakci na jednotkový skok na vstupu proporcionálního regulačního bloku. Výstup proporcionálního regulačního bloku popisuje vzorec (4.1).

I (integrační)



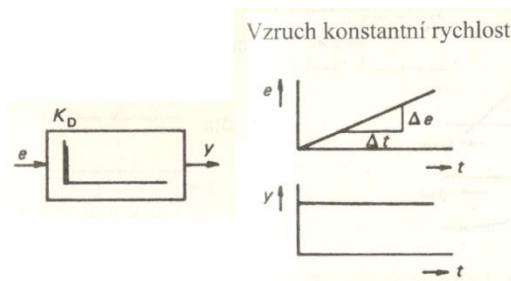
Obr. 13: Integrační blok a skoková funkce [5]

- K_I ... integrační konstanta

$$y = K_I * e * t = K_I \int e \, d_t \quad (4.2)$$

Skoková funkce z *Obr. 13* znázorňuje reakci na jednotkový skok na vstupu integračního regulačního bloku. Výstup integračního regulačního bloku popisuje vzorec (4.2).

D (derivační)



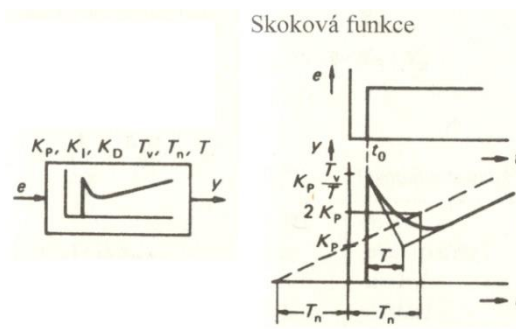
Obr. 14: Derivační blok a vzruch konstantní rychlosti [5]

- K_D ... derivační konstanta

$$y = K_D \frac{\Delta e}{\Delta t} = K_D \frac{de}{dt} \quad (4.3)$$

Vzruch konstantní rychlosti znázorňuje *Obr. 14*, jedná se o reakci na konstantní rychlost změny vstupu derivačního regulačního bloku. Výstup derivačního regulačního bloku popisuje vzorec (4.3).

PID (Proporcionálně integračně-derivační)



Obr. 15: PID blok a skoková funkce[5]

$$y = e * (K_p + K_I(t - T) - (K_p - K_I * T - \frac{K_D}{T})e^{-\frac{t-T}{T}}) \quad (4.4)$$

- T ... časová konstanta

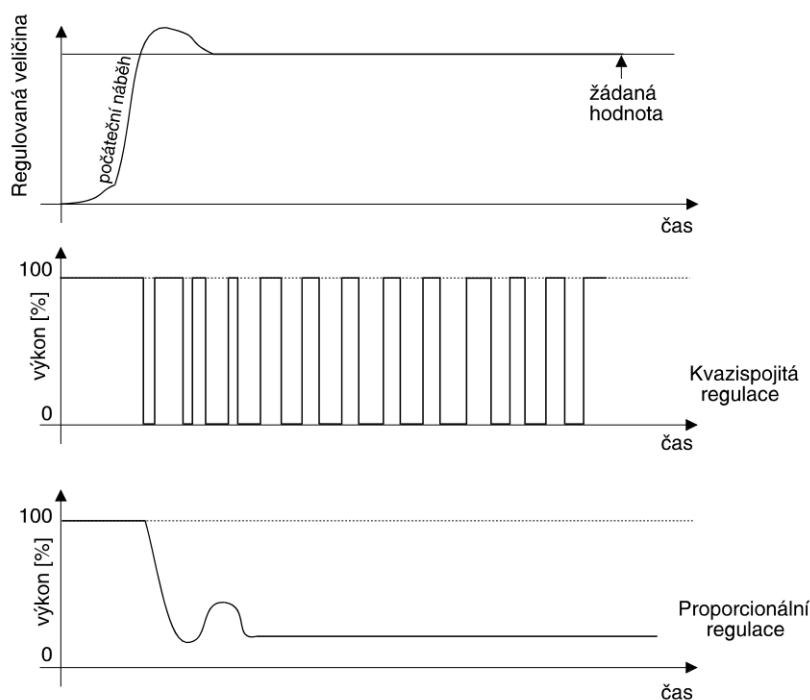
Odstranění trvalé regulační odchylky a přitom dobré dynamické vlastnosti regulačního obvodu získáme použitím všech tří složek P, I, D. Velikost každé složky lze nastavovat samostatně.

Výhodou je:

- vysoká jakost regulace, především pro soustavy s proporcionálním výstupem

Nevýhody jsou:

- velké nároky na regulátor
- větší nároky na spínací prvky (nejsou doporučeny elektromechanické spínací prvky)
- složitější nastavování a ladění regulačních parametrů



Obr. 16: Průběh PID regulace [6]

Zvětšení proporcionální složky dosáhneme zvětšením zesílení nebo zúžením pásma proporcionality. Zvětšením integrační složky dosáhneme zmenšení integrační časové konstanty. Zvětšení derivační složky dosáhneme zmenšením derivační časové konstanty. Zvýšením derivační složky zlepšíme stabilitu regulačního obvodu, kdežto integrační složka nám stabilitu zhoršuje.

Nastavení regulátorů

Pro určení, jaký regulační pochod budeme považovat za nejpříznivější (optimální), je celá řada hledisek. Ty z velké části vychází z technologických a provozních požadavků. K nastavení ideálních regulačních konstant se používají metody kritického stavu. Je to experimentálně zaměřený postup, při kterém nemusíme znát předem vlastnosti soustavy. Další je metoda výpočtová, která vychází ze znalostí dynamických a statických vlastností regulované soustavy.

V mé diplomové práci jsem zvolil metodu experimentální. Postupnou a řízenou změnou jednotlivých parametrů se dosáhlo ideálního nastavení. V průběhu optimalizace může dojít k několika typickým průběhům, které naznačují, jaké parametry jsou chybně nastaveny. Příklady chování jsou obsaženy v *Příloha B – PID Regulace Obr. 51*.

5 SoC ESP8266 a ESP32

Jedná se o integrovaný obvod, který zahrnuje veškeré části počítače. Často zahrnuje veškeré známé periferie (komponenty) společně na jednom čipu. Tyto komponenty obvykle (ne vždy) zahrnují procesorovou jednotku (CPU). Velice často se vyskytují pro svou malou spotřebu energie i v mobilní elektronice. SoC zahrnuje mikrokontrolér s pokročilými periferiemi, jako je grafická procesorová jednotka (GPU), Wi-Fi modul nebo další koprocesory. Podobně jako mikrokontrolér integruje mikroprocesor s periferními obvody a pamětí, tak SoC lze považovat za integrovaný mikrokontrolér s ještě pokročilejšími periferiemi.

5.1 ESP8266

ESP8266 je čip s 32bitovým RISCovým jádrem Xtensa LX106 firmy Tensilica, původně určený pro doplnění Wi-Fi konektivity k existujícím zařízením (mikrokontrolérům), komunikující přes sériovou linku pomocí AT příkazů. Procesor běží na 80 MHz. Obsahuje 64KBytů instrukční paměti RAM a 96KBytů datové paměti RAM. Další paměť je 64KBytů bootovací ROM. Procesor disponuje 16 GPIO pinů, I2C, ADC (10-bit), SPI a PWM. Postupem času se vytvářely inovace a nové modely, které nesloužily jen ke komunikaci. Již bylo možné programovat přímo GPIO-volně použitelné vstupně výstupní piny. Tímto krokem exponenciálně vzrostla využitelnost modulu. Od té doby existuje celá řada modulů postavených na základě s ESP8266. Nesou označení ESP-01 – ESP-XY Obr. 17. [8] [10]

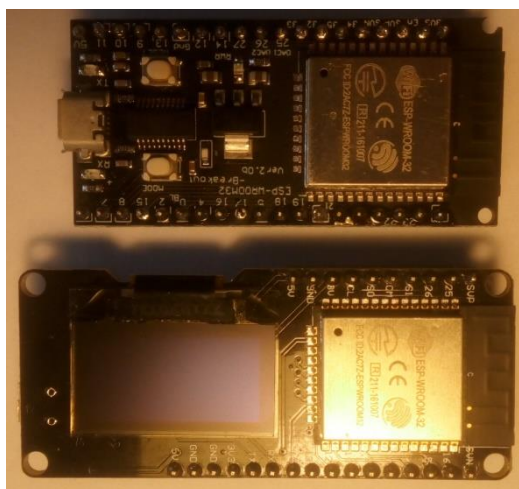


Obr. 17: Moduly ESP-01 - ESP-11 [9]

Velkou nevýhodou ESP8266 se postupem času ukázala velikost RAM, jejíž přibližnou polovinu využívá Wi-Fi modul. Z hlediska programování je též problematická obsluha tohoto Wi-Fi modulu, který pro zachování funkčnosti Wi-Fi spojení vyžaduje neustálou programovou obsluhu. Neustálé vrácení programového řízení tomuto komunikačnímu bloku může omezovat regulační část programového kódu.

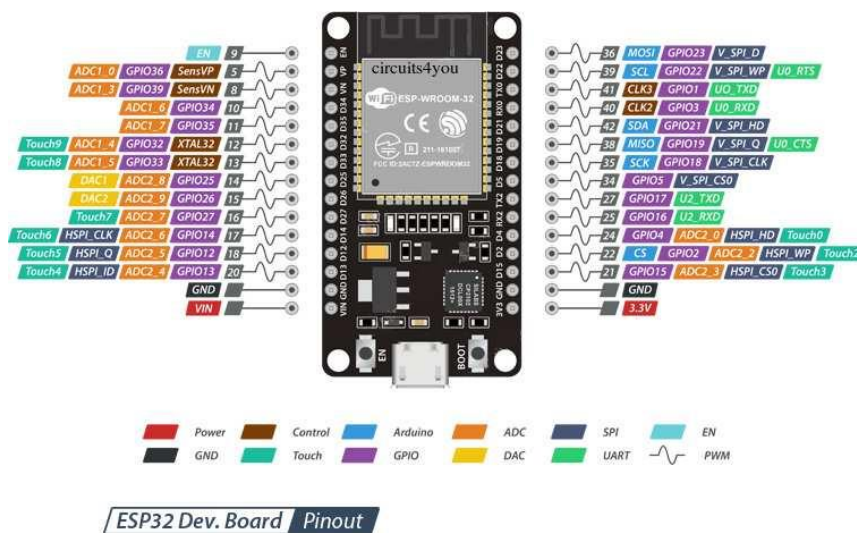
5.2 ESP32

Od roku 2016 je dostupný nástupce modelu ESP8266 pod názvem ESP32 firmy Espressif Systems. Nabízí rychlejší Wi-Fi komunikaci (až 150Mbps). Byla přidána i Bluetooth komunikace. Hlavní a nejzásadnější změnou je použití dvoujádrového procesoru, který může pracovat až na frekvenci 2x240MHz, přičemž jedno jádro je zcela k dispozici programátorovi a druhé obstarává Wi-Fi komunikaci. Přes všechna tato vylepšení je dosaženo nižšího příkonu, než u modelu ESP8266. Z původních 16 GPIO byl počet rozšířen na 36 (s přesnějšími a početnějšími ADC). RAM je rozšířena na 400kB-500kB. Z výše uvedených informací je zřejmé, že při návrhu ESP32 skutečně došlo k vyřešení všech nedostatků ESP8266. Zároveň se velmi rozšířily možnosti využití. Hodně k tomu přispěl i přidání modulu Bluetooth. Model ESP32 se vyrábí stejně jako ESP8266 v mnoha různých provedení a úpravách. Některé obsahují přímo na své DPS OLED grafický displej, jiné slot na Mikro SD karty *Obr. 18*. [9]



Obr. 18: Moduly ESP-32 (zdroj vlastní)

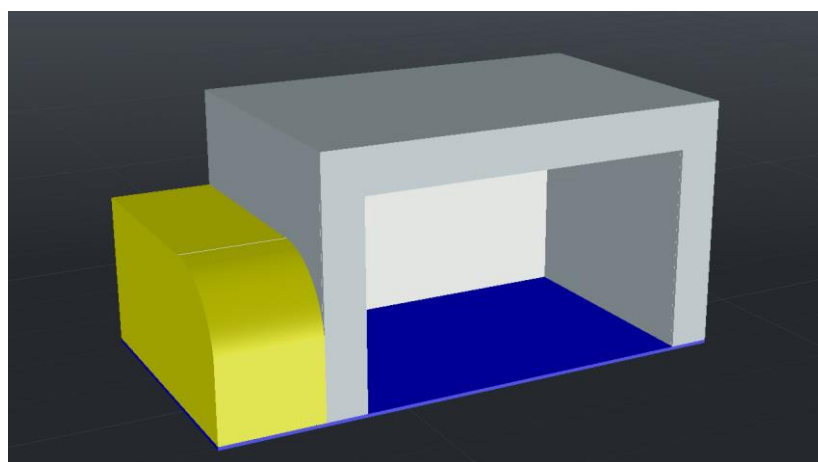
První variantou ESP32 uvažovanou k řízení byla LOLIN ESP32 od firmy WEOMOS. Tato varianta je zobrazena na *Obr. 18*. Nevýhodou tohoto modelu bylo, že nebyly vyvedeny všechny piny MCU, především komunikační vodiče I²C. Dalším důvodem pro výběr jiného modelu byla nepraktická montáž do boxu a zároveň na DPS. Proto byl nahrazen modelem ESP32 DEVKIT V1 od výrobce DOIT. Tento model má přístupné veškeré piny MCU a absence OLED displeje byla vyřešena koupí samostatného modulu OLED s komunikací přes I²C. Podrobnější specifikace jednotlivých pinů je dostupná ze zdroje [13].



Obr. 19: ESP32 DEVKIT V1 [13]

PRAKTICKÁ ČÁST

Zadání diplomové práce obsahuje také vytvoření praktického přípravku a na tomto přípravku následné provedení testování. V teoretické části jsme se zabývali principy, které nám pomohly k vytvoření samotného přípravku nebo k dobrému výběru jednotlivých komponentů. Prvotní hlavní otázkou bylo, jak by samotný tepelný box měl vypadat. Nejprve byl vytvořen 3D návrh v programu AutoCAD od společnosti Autodesk. Jednalo se o dvojitou stěnu z plexiskla s mezerou pro izolační materiál. Vedle tohoto boxu se nachází box pro výpočetní elektroniku.



Obr. 20: 3D model prvotního návrhu bez předních dvířek (vlastní zdroj)

Během konzultace s vedoucím práce bylo dosaženo shody, že bude vytvořen tepelný box s využitím již existující přepravky z ESP materiálu, která je volně dostupná na trhu. Toto rozhodnutí bylo učiněno z důvodu vyšší pořizovací ceny plexiskel odolných vůči vyšším dlouhodobým teplotám. V budoucnu je možnost zaměnit zvolené řešení výrobou vlastního boxu na míru. Jeho budoucí poptávka bude závislá na požadovaných rozměrech testovacích zařízení. V čase tvorby jsou rozměry a provedení boxu dostačující.

6 Vlastní přípravek

Tepelný box se skládá ze dvou hlavních částí. První část je uzavřený, vzduchem chlazený plastový box, který obsahuje veškerou výpočetní a výkonovou elektroniku. Druhá část je velká zateplená přepravka z ESP odolného plastu, která je převrácená dnem vzhůru. Zateplení přepravky je provedeno 50mm silným XPS polystyrenem. Obě části jsou umístěny na dřevěné překližce s další izolací XPS polystyrénu a 10mm silnou vrchní vrstvou tepelně odolné umělohmotné podložky. K této umělohmotné podložce je připevněné tepelné těleso na distančních sloupcích 15mm. Všechny tyto vrstvy tvoří základnu. Celý tento základnový set zobrazuje *Obr. 23*.

Polystyren, kterým je zateplený box, byl upraven na přesný rozměr za pomoci řezacího nástroje založeného na principu nažhaveného odporového vodiče. Vodič je napnutý do speciálně vyrobeného rámu viz *Obr. 21*. Tento rám ve spojení s distančním pravitkem umožňuje dodržet přesné rozměry desek a zároveň díky zvolenému způsobu dělení teplem dojde k zatavení řezných hran a tím k zabránění drolení materiálu. Napnutý odporový vodič je připojen svorkami k laboratornímu zdroji. Proudové omezení bylo nastaveno na 2.8A. Toto opatření je nastaveno z důvodu ochrany odporového vodiče před přehřátím a následným poškozením.



Obr. 21: Úprava polystyrenu pomocí odporového drátu (zdroj vlastní)

Výsledné zateplení zobrazuje *Obr. 22*. Následně proběhl první test vyhřívání boxu bez regulace (plný výkon). Po vyhřátí se měřil čas chladnutí. Časy chladnutí jsou zapsány v *Tab. 5*.



Obr. 22: Zateplení tepelného boxu (zdroj vlastní)



Obr. 23: Základna přípravku (zdroj vlastní)

6.1 Topná tělesa

Tepelný box má být vyhříván na vysoké teploty, až 85°C. Je potřeba vybrat vhodný vyhřívací prvek. Existuje mnoho druhů těles, která transformují elektrickou energii na energii tepelnou. Všechna z níže uvedených jsou postavena na průchodu proudu odporovým prvkem. Nejpoužívanějšími jsou topné kabely, spirály, patrony, ohebné folie a DPS podložky.

Topné kabely jsou vhodné k temperování teploty potrubí, ochraně proti zamrznutí tekutin v nádobách a k podobným účelům. Nejlepší aplikace je po obvodu vyhřívaného objektu. Tato aplikace není vhodná pro tepelný box. Další nevýhodou pro toto použití je relativně malý výkon na jednotku délky (max. 10ky W/m).

Dalším prvkem jsou topné spirály. Jedná se též o nevhodný způsob z hlediska prostorové náročnosti. Dostatečně výkonné spirály by zabíraly neúměrně velký prostor.

Existují i topné patrony. Tyto patrony jsou ovšem určeny pro ohřev tekutin a pro přímý styk s touto kapalinou. Účelem diplomové práce je ohřev prostoru bez tekutin, a tak patrony nejsou vhodné.

Ohebné topné silikonové folie jsou velice praktické při kontaktním ohřívání nepravidelného nebo zaobleného povrchu. Také by bylo možné jejich využití pro vytápění boxu. Ovšem jejich konstrukce není samonosná a je nutná jejich aplikace na pevnou konstrukci. Lepení takto velkého tepelného výkonu přímo na umělohmotnou podložku nebylo vhodným řešením. Byla by nezbytná montáž na dobře tepelně vodivou a nehořlavou konstrukci.

Vybraným a aplikovaným produktem se stala DPS vyhřívací podložka. Jedná se o stejné provedení s ohebnou folií, ale s rozdílem použitého podkladového materiálu. Konstrukce této podložky je vhodná k montáži na distanční sloupky, tím je zabráněno přímému kontaktu s konstrukcí. Tyto vyhřívací podložky se využívají k aplikaci v 3D tiskárnách. Toto topné těleso je vyfoceno na *Obr. 23*. Rozměry podložky jsou 215x215mm. Je konstruována tak, že umožňuje dvojí zapojení a to, jak pro 12V, tak

pro 24V. Odpor 24V zapojení se rovná 4,4Ω. Z toho vyplývá maximální protékající proud a maximální výkon podložky podle rovnice (6.1). Maximální výkon je 130W, ale z důvodu slabého napájecího zdroje není tohoto výkonu možné dosáhnout. Maximální výkon je 110W.

$$I_{max} = \frac{U}{R} = \frac{24}{4,4} = 5,454[A]$$

$$P_{max} = U * I = 24 * 5,454 = 130,8[W] \quad (6.1)$$

6.2 Spínání topného tělesa

V této kapitole se zaměřím na výběr spínacího výkonového prvku. Tento prvek bude spínat topné těleso. V kapitole 4 *Dvoustavová a PID regulace* jsou uvedeny možnosti regulace, které zde následně posuzuji z hlediska vhodnosti jejich nasazení pro tento konkrétní účel.

První a nejsnazší variantou je spínání pomocí relé. Toto spínání je vhodné pro dvoustavovou regulaci s vhodně zvolenou hysterezí. To znamená, že není příliš malá a relé nemusí tak často spínat. Každé relé má svůj počet sepnutí. Další výhodou při použití relé a dvoustavové regulace je možnost využití MCU s menší výpočetní kapacitou. Vzhledem k charakteristice našeho systému (tepelný box) by toto řešení bylo dostačující.

Druhou variantou je využití polovodičového spínače. Jako nejvhodnější, vzhledem ke spínacímu výkonu, je HEXFET výkonový MOSFET s malým R_{ON} . Jedná se o odpor v sepnutém stavu. Od této hodnoty se odvíjí ztrátový výkon vyzářený ve formě tepla. MOSFET se dá bez problémů spínat pomocí kvazispojité PID regulace. Polovodič není ani omezen počtem cyklů sepnutí. Díky této vlastnosti se může dosáhnout přesnější regulace teploty v boxu. Jedinou nevýhodou je potřeba větší výpočetní kapacity než pro dvoustavovou regulaci. Vzhledem k přepočtu jednou za 10s, viz kapitola 8.4 *Hlavní program*, není kladen velký nárok na parametry MCU.

Výkonový MOSFET (IRF3205)

Jako spínací prvek byl vybrán HEXFET (výkonový MOSFET) IRF3205. Základní parametry jsou v *Tab. 3*.

Tab. 3: Parametry IRF3205

R_{ON}	Odpor sepnutého tranzistoru ($U_{GS}=10V$, $I_D=62A$)	8	[m Ω]
U_{DS}	Maximální napětí v propustném směru	55	[V]
$I_{D(max)}$	Maximální protékající proud s chladičem	110	[A]

Již zmiňovaným hlavním parametrem je malý R_{ON} . Tento deklarovaný odpor je za určitých podmínek. Při měření hotového přípravku byl vypočítán odpor 18m Ω ($U_{GS}=8,5V$, $I_D=5A$). Tudíž ztrátový výkon P_d na tranzistoru v plně otevřeném stavu činí 0,45W viz (6.2).

$$P_d = R * I^2 = 0,018 * 5^2 = 0,45 [W] \quad (6.2)$$

Dalším faktorem, který způsobuje tepelné ztráty na tranzistoru, je spínání. Tranzistor IRF3205 je ovládán signálem PWM. Při každém sepnutí dochází ke ztrátám. Čím častěji spíná, tím jsou ztráty větší. Proto byla zvolena frekvence PWM pouhých 50Hz. Ani frekvence PWM v řádech stovek Hz by neměla kritické následky na ztrátový výkon. [15] [16]

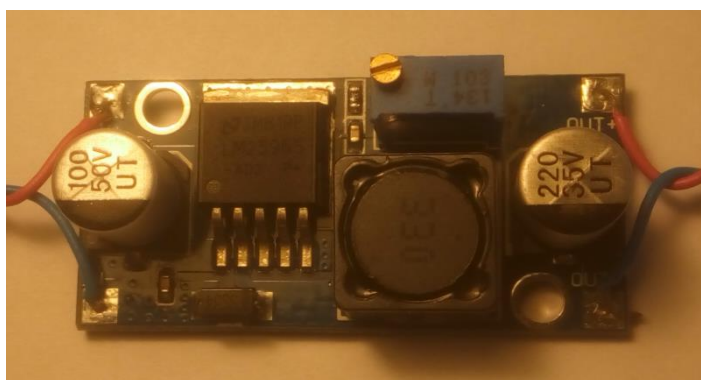
6.3 Spínané napájecí zdroje

Spínané zdroje byly vybrány k napájení elektroniky diplomové práce z důvodu své vysoké účinnosti a malé výkonové ztráty. Nevýhodou spínaných zdrojů je možné rušení. Proto je velice důležitý jejich návrh.

6.3.1 Testování zakoupených zdrojů

Během testování zařízení na nepájivém poli byly k napájení zařízení, která požadují +5V a +12V, použity zakoupené spínané zdroje DC-DC (buck) step-down. Na výběr byly dva možné zdroje. Zdroje se převážně lišily pouze v maximálním výstupním napětí (U_{out}) a výstupním proudem (I_{out}). Jedná se o zdroj postavený na integrovaném obvodu LM2596S, dále označován jen LM2596S, a zdroj postavený na integrovaném obvodu IO XL4015.

1. Zdroj (LM2596S)

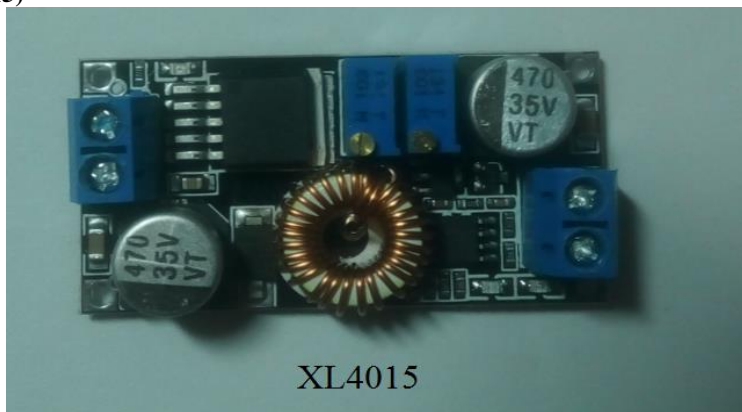


Obr. 24: Step-Down Spínaný Zdroj LM2596S (vlastní zdroj)

Parametry: (testováno)

- Vstupní napětí: 3 – 40V (24V)
- Výstupní napětí: 1.5 – 35V (5,7V)
- Výstupní proud: trvale max. 3A (0.32A)
- Spínací frekvence: 150kHz

2. Zdroj (XL4015)

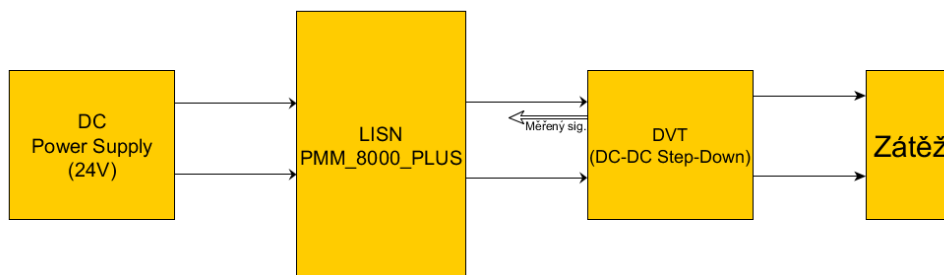


Obr. 25: Step-Down Spínaný Zdroj XL4015 (vlastní zdroj)

Parametry: (testováno)

- Vstupní napětí: 8 – 36V (24V)
- Výstupní napětí: 1.25 – 32V (5,7V)
- Výstupní proud: trvale max. 5A (0,32A)
- Spínací frekvence: 180kHz

V prvotním návrhu se s těmito zdroji počítalo i ve finálním řešení. Tyto zdroje prošly i měřením v univerzitní EMC komoře v rámci seminární práce k předmětu KAE/EMK (Elektromagnetická kompatibilita). Během měření byl kladen důraz na měření rušení po vedení. Měření rušení po vedení proběhla na přívodním napájení (=24V). Tato detekce rušení je důležitá z důvodu odhalení možného ovlivnění napájecího napětí nebo funkčnosti napájených zařízení. Také je nezbytné dodržení norem ČSN. Normy musí být splněny v případě, že má být přístroj uveden na trh. V této diplomové práci jsou normy dobrým měřítkem pro porovnání jednotlivých hodnot rušení a ukazatelem kvality daného zdroje z hlediska EMC. Měření proběhlo na dvou rozdílných zdrojích. Tyto zdroje by měly napájet výpočetní elektroniku, ventilátor a případně poskytovat vhodné napětí a proudy pro nabíjení superkondenzátoru (1,5F). Blokové schéma měření je viditelné na *Obr. 26*. Reálné zapojení je poté viditelné na *Obr. 27*.



Obr. 26: Blokové Schéma měření rušení po vedení (vlastní zdroj)

K měření bylo použito zařízení PMM 8000PLUS se zapojenou umělou sítí. Data se následně přenášela do PC. Ve specializovaném SW se ukládala a zobrazovala v podobě grafů s viditelnou a nastavitelnou mezí (dle příslušné ČSN). Všechny testované zdroje by se neměly používat bez minimální úpravy, jakou může být přidání vstupního kondenzátoru CX na vstup. Bez tohoto opatření zdroje nesplňují požadavky normy (ČSN EN 55011). Výsledné měření viz *Obr. 30* a *Obr. 31*

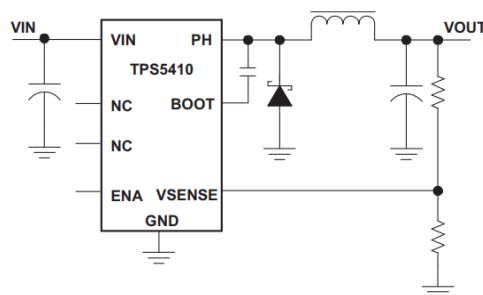


Obr. 27 : Měření rušení po vedení 150kHz - 30MHz (zdroj vlastní)

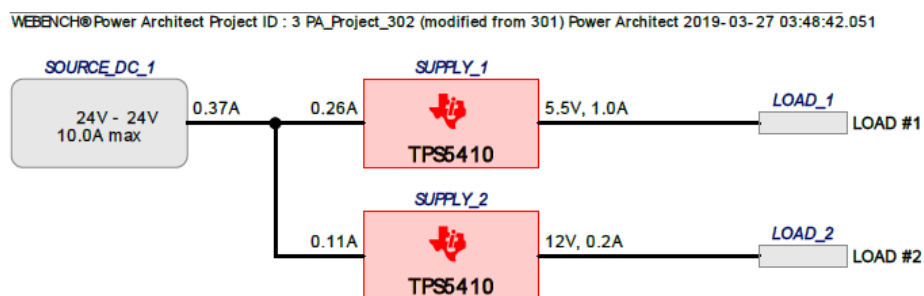
6.3.2 Návrh vlastních spínaných zdrojů

Po konzultaci a důkladné diskuzi s vedoucím práce bylo rozhodnuto o vlastním návrhu spínaných zdrojů přímo na DPS. Hlavním důvodem k tomuto kroku bylo překročení norem (ČSN EN 55011) zakoupenými zdroji. Po domluvě jsme se rozhodli, že tento návrh nebudeme dělat celý od základu. Pro návrh byl použit WEBENCH[®] Power Architect od výrobce Texas Instruments. Přimo na stránkách výrobce Texas Instruments je možné si navrhovat spínaný zdroj s využitím součástek přímo z kolekce Texas Instruments. I přes možnost navrhovat zdroje s pomocí Power Architect bylo nezbytné prostudovat veškeré možnosti návrhu spínaných zdrojů. K tomuto studiu byl využitý zdroj [7] (*KREJČÍŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče*). Byl vybrán princip měniče s cívkami, konkrétně pro naše účely v zapojení snižující měnič (buck) step down. WEBENCH[®] Power Architect nabídl celou řadu zapojení založených na tomto principu. S ohledem na množství celkových součástek, výslednou cenu a celkovou plochu bylo vybráno zapojení pro oba zdroje s IO TPS5410. Tento integrovaný obvod nahrazuje spínací prvek v teoretických schématech zapojení. Rozmezí vstupního napětí TPS5410 je 5,5V-36V. maximální trvalý proud $I_{\max} = 1A$. [2]

Na DPS byly navrženy dva zdroje. První (+5,5V), pro napájení logických obvodů a druhý (+12V) pro napájení ventilátoru k rovnoměrné distribuci tepla po boxu. Při následném zadání maximálního a průměrného proudového zatížení nám generátor vytvořil ideální zapojení s hodnotami přídavných součástek. Vygenerované blokové schéma je patrné na *Obr. 29*. S ohledem na množství součástek, výslednou cenu a celkovou plochou jsem vybral zapojení pro oba zdroje s IO TPS5410. Rozmezí vstupního napětí TPS5410 je 5,5V-36V. maximální trvalý proud $I_{\max}= 1A$. Spínací frekvence je 500kHz. Doporučené zapojení od výrobce je znázorněno na *Obr. 28*. [2]



Obr. 28: Zapojení TPS5410 [2]



Obr. 29: Vygenerované blokové schéma měničů. [1]

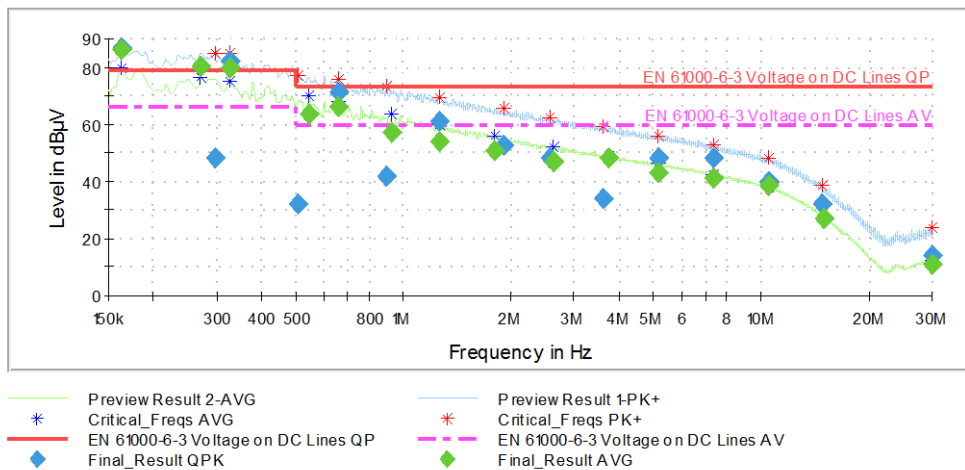
Tab. 4: Parametry napájecích zdrojů

Název	IO	U_{out}	I_{out}	Efektivita	Zvlnění U_{out}
Supply_1	TPS5410	5,5V	1,0A	87,3%	10%
Supply_2	TPS5410	12V	0,2A	89%	10%

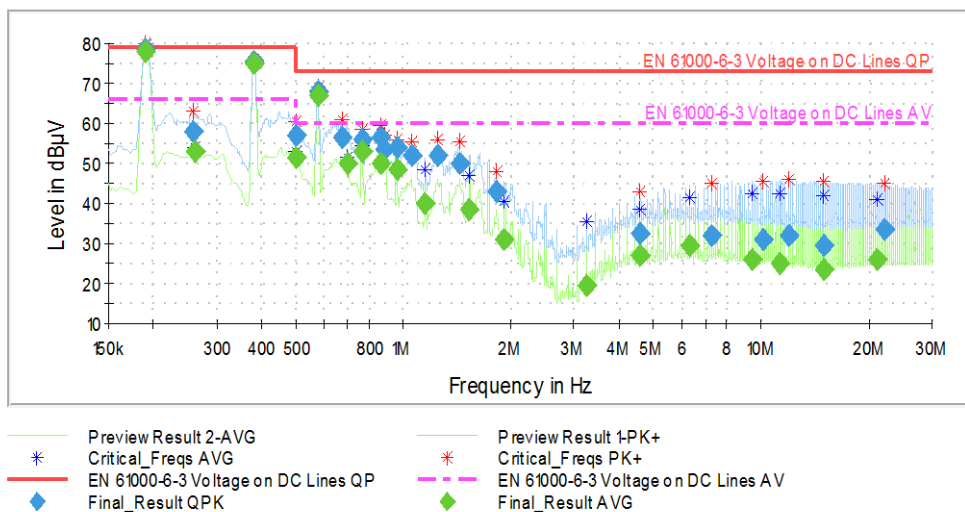
Celé a kompletní zapojení zdrojů, s hodnotami všech součástek, je dostupné v elektrickém schématu v kapitole 7.1 *Návrh elektrického zapojení a DPS*.

Stejně jako v předchozí kapitole bylo i s vlastním zdrojem provedeno měření rušení po vedení. Byl použit stejný postup. Zdroje byly zatíženy totožnou zátěží jako zdroje zakoupené. Požadavek na stejné zatížení je klíčový pro porovnávání výstupních dat, aby toto porovnávání bylo relevantní. 12V zdroj byl zatížen 47 Ω rezistorem, což je $I_{out}=0,26A$. Zdroj s výstupním napětím 5,7V byl připojen na rezistor 18 Ω a to odpovídá $I_{out}=0,32A$. Výsledné měření prokázalo, že měřené rušení po vedení je značně nižší, než u zakoupených zdrojů XL4015 a LM2596S. Zlepšení u všech zdrojů by mohlo být dosaženo použitím dodatečných filtrů.

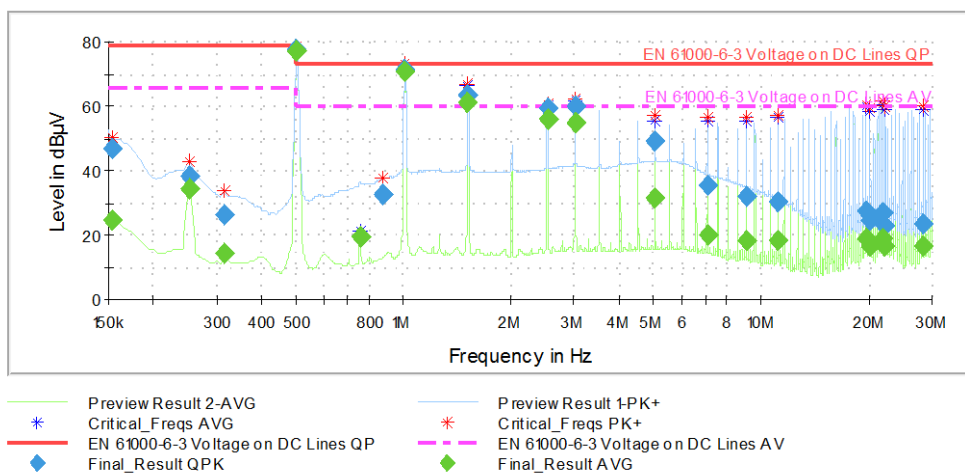
Nejvyšší naměřené hodnoty jsou ve frekvencích spínání zdrojů a v jejich násobcích. Nejlepšího výsledku dosáhl 12V zdroj. Normu překročil pouze ve frekvenci spínání. Měření nám také odhalilo důvod zarušení OLED displeje. Zdrojem rušení jsou samotné zdroje spínající na frekvenci 500kHz a komunikace I²C probíhá na blízké frekvenci 400kHz. Částečným řešením je změna frekvence komunikace v knihovně I²C na 100kHz, nebo při návrhu další verze DPS zapojení lepší filtrace.



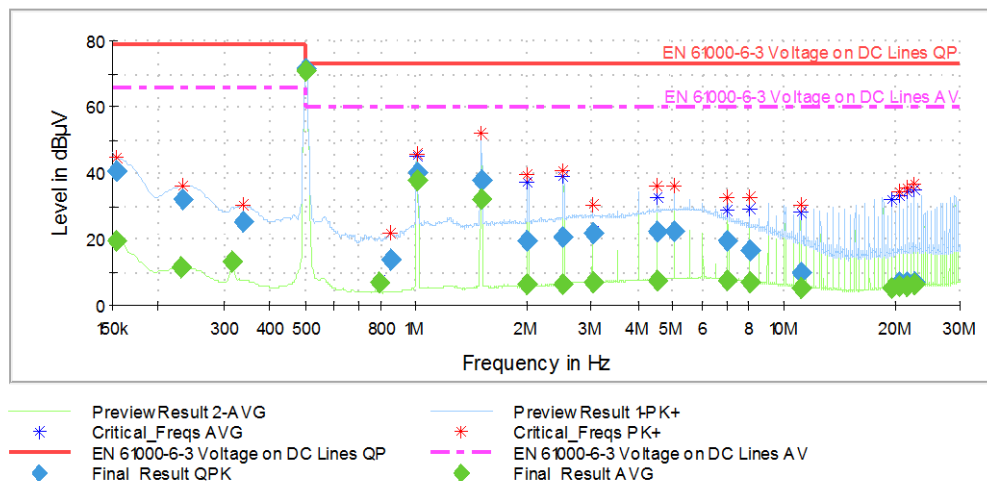
Obr. 30: Rušení po vedení zdroje LM2596S



Obr. 31: Rušení po vedení zdroje XL4015



Obr. 32: Rušení po vedení vlastního zdroje 5,7V, první verze zařízení (V1)

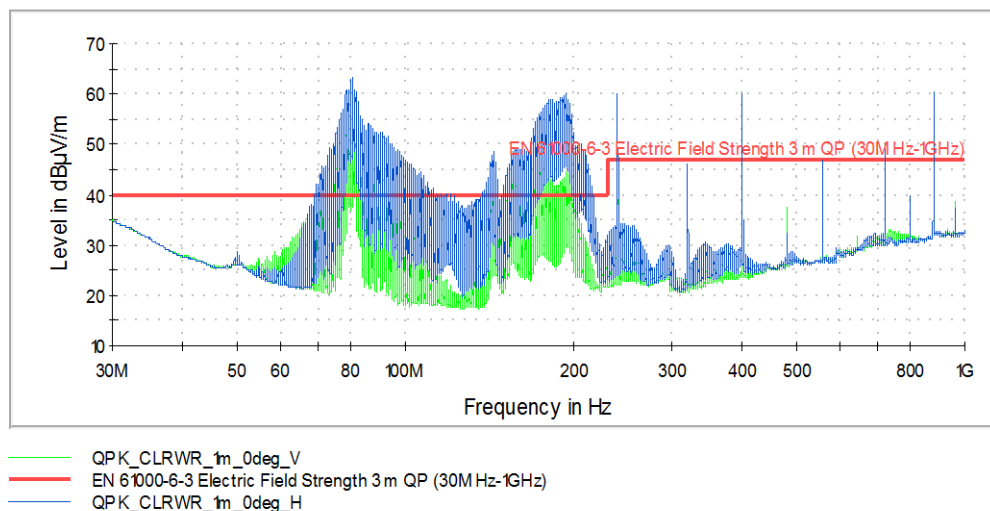


Obr. 33: Rušení po vedení vlastního zdroje 12V, první verze zařízení (V1)

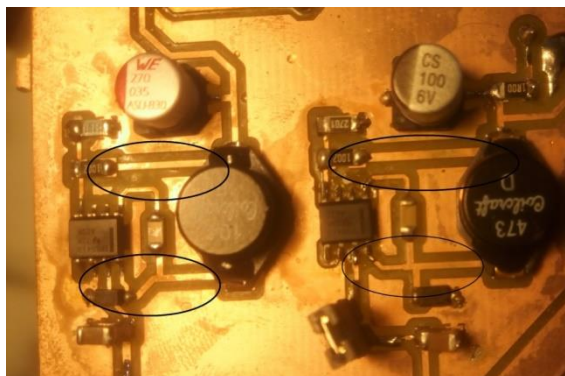
Následně se provedlo druhé měření detekující rušení vzduchem. Toto měření proběhlo pouze na vlastních zdrojích. Samotné měření probíhalo v univerzitní certifikované EMC komoře. Měření ve frekvenčním pásmu od 30MHz do 1GHz. Měření probíhalo za plného provozu zařízení. Tudíž místo rezistorové zátěže byla připojena elektronika ve finální konfiguraci. Celé zařízení bylo napájeno 24V akumulátorem. Tento způsob napájení je nejvhodnější při měření z důvodu minimálního ovlivňování výsledku vlastním rušením. Měření bylo prováděno ve vzdálenosti 1m ve vertikální a následně v horizontální poloze. Výsledek měření je na *Obr. 34*. Zelenou barvou je viditelné rušení měřené vertikálně a modře měřené horizontálně.

Na frekvenci 240MHz a na jejích násobcích je patrné rušení MCU, které má stejnou taktovací frekvenci. Široká frekvenční pásma rušení v okolí 80MHz a 180MHz jsou značně nepříjemná a nežádoucí. Dedukcí a po dlouhé úvaze byl vytvořen závěr, že toto rušení je způsobeno spínanými zdroji na DPS. Především velkým rozptylem součástek zdrojů po DPS. Dále jsou tyto velké vzdálenosti propojeny relativně tenkým a dlouhým vodičem, tím se vytváří značný prostor pro vyzařování rušení viz *Obr. 35*. Tuto dedukci potvrdilo podrobné hledání zdroje záření měřením (*Obr. 56*). Podrobná data z měření s přesnými hodnotami rušení na daných frekvencích je možné nalézt na připojeném CD.

Ze samotných detekovaných chyb vyplývá řešení, jak omezit rušení. Při budoucí tvorbě další verze DPS musí být kladen důraz na co nejmenší rozestup součástek zdroje od sebe a vytvoření co nejširších vodivých cest mezi piny.



Obr. 34: Měření vyzařování zařízení (verze 1) (zdroj vlastní)



Obr. 35: Dlouhé vedení na DPS (verze 1) je zdrojem rušení (zdroj vlastní)

Následně po odměření všech parametrů a zjištění výše zmíněných problémů byla osazena druhá verze DPS. Návrh druhé verze byl navržen k eliminaci problémů verze předešlé. Z oblasti spínaných zdrojů se součástky nachází blíže u sebe a při pájení se některé součástky napájely mimo určené pájecí plochy, aby se nacházely ještě blíže (Obr. 64 a Obr. 65).

Po kompletaci a spuštění se projevíly značné rozdíly oproti verzi 1. Rušení OLED displeje zcela vymizelo. Hodnota rušení na frekvenci 80 MHz je minimální proti původním hodnotám. Rušení projevující se na frekvenci 180 MHz se pouze snížilo.

Výsledné měření verze druhé a vzájemné porovnání s první verzí se nahází v příloze. Podrobná naměřená data jsou přiložena na CD. Dedukce a odhad umístění zdroje rušení byly správné a snaha o nápravu úspěšná.

6.4 Výpadek napájení

Při definování funkce tepelného boxu byl vyzdvihnut možný výskyt problému během dlouhodobého testu. Test může běžet až několik desítek dnů. Během této doby narůstá malá, ale i tak možná pravděpodobnost výpadku napájení. V případě absence jakéhokoliv náhradního zdroje napájení byl aktuální stav ztracen a o možné chybě během testu by se nemusela obsluha dozvědět. Z tohoto důvodu vzniklo několik variant řešení, jak tomuto problému předejít.

První variantou bylo pořízení autoakumulátoru, který by zajišťoval jak napájení výpočetní elektroniky, tak silové části, která zajišťuje samotný výhřev boxu. Pro tuto variantu by bylo nutné provést výpočet potřebné kapacity akumulátoru na definovanou dobu provozu. Vzhledem k vysoké počáteční investici byla tato varianta zamítnuta.

Druhá varianta obsahovala dva kusy Li-ion akumulátorů 18650 v sériovém zapojení. Celkové napětí činí 7,4V. Každý článek má deklarovanou kapacitu 3000mAh. Tato varianta by dále obsahovala nabíjecí a ochranný obvod vytvořený na DPS. Tato varianta by pouze napájela výpočetní elektroniku. Zaznamenávala by chladnutí boxu během výpadku a po zpětném naběhnutí by se akumulátory opět nabíjely. Tato varianta je dobrým návrhem pro budoucí vylepšení tepelného boxu.

Třetí variantou je použití superkondenzátoru. Tento superkondenzátor má zajistit dostatek energie k uložení aktuálních dat a nastavení chybové proměnné. Po zpětném naběhnutí napájení jsou načteny veškeré předcházející proměnné. Podle poklesu teploty v boxu během výpadku je rozhodnuto, zda bude test pokračovat, nebo bude resetován. Tato varianta je hardwarově nejsnadněji proveditelná.

6.4.1 Superkondenzátor

Superkondenzátor je zařízení schopné rychle akumulovat a poté odevzdat velké množství elektrické energie. Při opakovaném nabíjení a vybíjení vysokými proudy netrpí negativními vlastnostmi, jako zahřívání či zmenšování jeho životnosti. Může pracovat za nízkých provozních teplot a nedochází k paměťovému efektu. Hlavní využití je v trakčním odvětví nebo k zálohování menších elektrotechnických zařízení. V superkondenzátoru se energie uchovává ve formě elektrostatické energie, a tak má blízko ke "klasickým" kondenzátorům.

„Kondenzátor jako elektronickou součástku lze vyrobit mnoha různými technologiemi.“ [11]

Superkondenzátor dosahuje běžné kapacity v rozsahu jednotek až tisíců Faradů. Nevýhodou pro trakční využití superkondenzátorů může být nízké napětí (v řádech voltů). Před samotným výpočtem kapacity musíme znát několik proměnných, které následně dosadíme do rovnice (6.3). Především se jedná o odebíraný proud (I_d) veškerou elektronikou při plném provozu. Dále potřebný čas k provedení potřebné akce. Za pomoci vložených časovačů do programu byl zjištěn čas zápisu na SD kartu, který je 23ms. Zvolený čas v rovnici je záměrně o několik řádů větší, a to z důvodu rezervy, pro případ volby jiného druhu zálohy dat. Výsledná potřebná kapacita je 0,833F. Vzhledem k dostupnému superkondenzátoru 1,5F je nyní osazen na DPS tento.

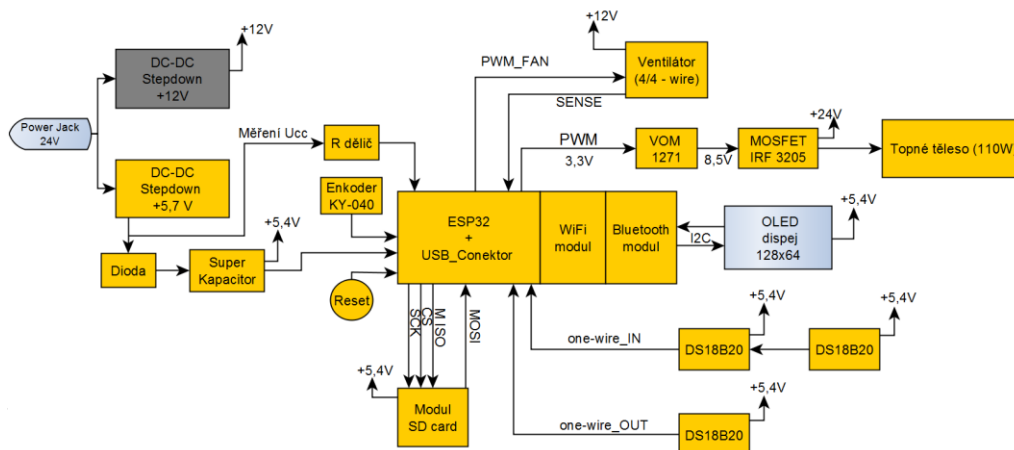
$$C = \frac{I_d * t_d}{U_{cc} - U_{cc(\min)}} = \frac{0,2 * 5}{5,5 - 4,3} = \frac{1}{1,2} = 0,833F \quad (6.3)$$

Kde:

- I_d ... odebíraný proud [A]
- t_d ... požadovaný čas provozu [s]
- U_{cc} ... napájecí napětí [V]
- $U_{cc(\min)}$... minimální provozní napětí [V]

6.5 Souhrn vybraných komponentů

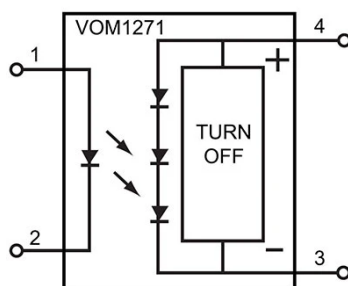
Před samotným návrhem DPS bylo vytvořeno blokové schéma a jeho funkčnost ověřena na nepájivém poli. Blokové schéma na *Obr. 36* zobrazuje všechny použité komponenty.



Obr. 36: Blokové schéma zapojení (zdroj vlastní)

Finálním výběrem zdrojů jsou spínané zdroje postavené na IO TPS5410. Zdroj s výstupním napětím 12V napájí ventilátor distribuující teplo po tepelném boxu. Ventilátor je možné regulovat za pomoci PWM a zároveň snímat jeho reálné otáčky. Tím lze včas detekovat jeho poruchu. Zdroj poskytující napětí 5,7V napájí výpočetní elektroniku a poskytuje proud pro nabíjení superkondenzátoru. Odporový dělič poskytuje úpravu vstupního napětí na rozmezí, které je vstupní pin ESP32 schopen měřit (0-3,3V). Na ovládání OLED displeje je použit N-kodér s integrovaným tlačítkem na hřídeli. Tento N-kodér nahrazuje běžně používaná tlačítka. Modul pro SD kartu komunikuje s MCU a zapisuje se na SD kartu naměřená data. Vybrané senzory DS18B20 umožňují připojení mnoha senzorů pouze po jednom vodiči. Zobrazování aktuálních a zadaných dat umožňuje grafický OLED displej s rozměry 128x64 pixelů.

Jako hlavní spínací prvek byl vybrán MOSFET IRF3205 s nízkým odporem v sepnutém stavu R_{on} . Tento MOSFET je spínán obvodem VOM1271. VOM1271 generuje signál o amplitudě 8,5V z PWM signálu o amplitudě 3,3V. Tento obvod zároveň galvanicky odděluje vstup s výstupem. Vnitřní zapojení je znázorněno na *Obr. 37*.



Obr. 37: Vnitřní struktura VOM1271 [12]

Topným tělesem tepelného boxu je DPS vyhřívací podložka s využitým výkonem 110W(Obr. 23).

Nejdůležitějším komponentem celého blokového schématu je SoC ESP32, které poskytuje výpočetní výkon k provádění softwaru a zároveň zajišťuje Wi-Fi komunikaci prostřednictvím integrovaného Wi-Fi modulu. Více o použitém ESP32 viz kapitola 5.2 *ESP32*.

7 Návrh a realizace DPS

Elektrické zapojení a tvorba DPS byla tvořena v programu Autodesk EAGLE ve verzi 9.4.0. Jedná se o software určený k návrhům plošných spojů PCB.

7.1 Návrh elektrického zapojení a DPS

K návrhu elektrického schéma byly použity standardní knihovny součástek integrované již v programu EAGLE. Chybějící komponenty byly staženy ze stránek výrobce nebo prodejce. Patice k modulu ESP32-DevKit V1 byla vytvořena samostatně podle schématu zapojení, důvodem byla nekompatibilita pinů se staženým modelem.

Nejprve jsem sestavil vlastní elektrické schéma dostupné na *Obr. 39*. To jsem vytvořil postupným rozkreslením a propojením jednotlivých bloků z *Obr. 36* na úrovni elektronických součástek. Po dokončení kompletního návrhu elektrického zapojení následoval návrh DPS, při kterém jsem kromě rad vedoucího práce získal cenné informace z knihy *Návrh a konstrukce DPS* [14].

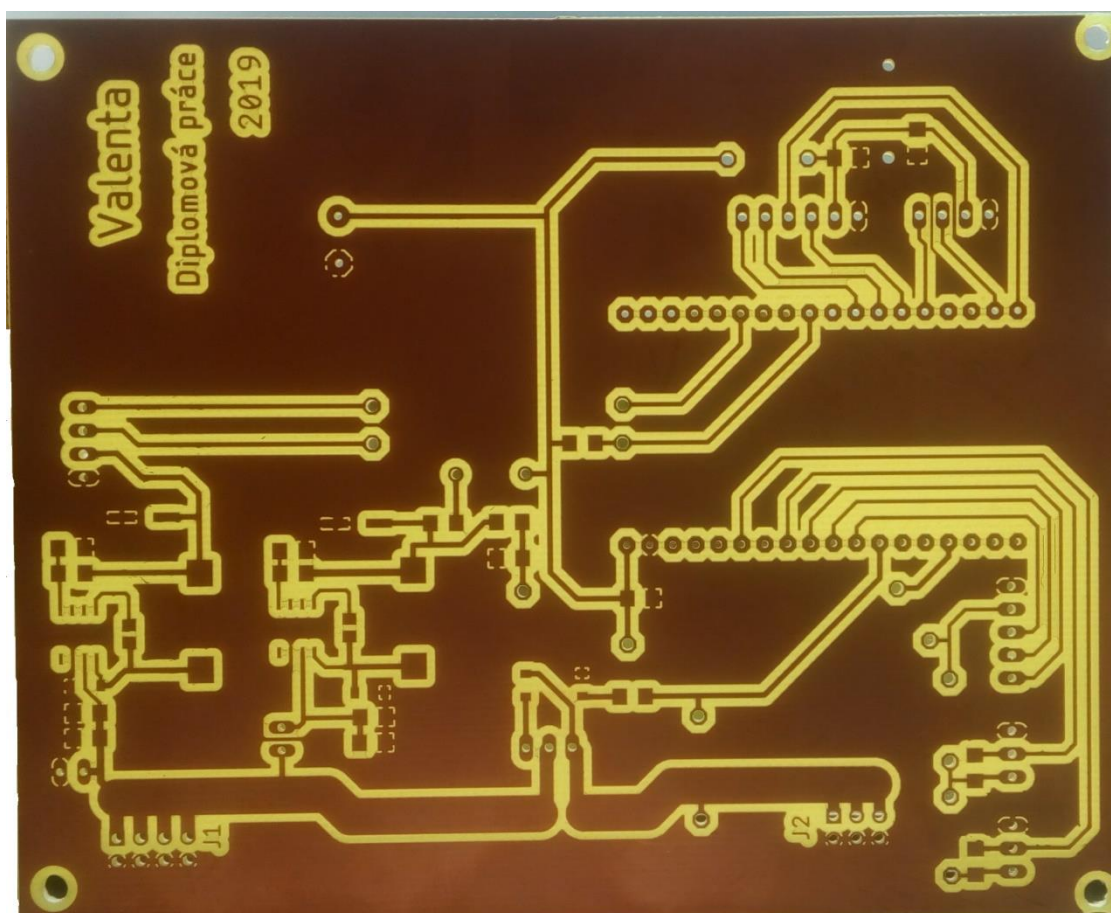
Na DPS je z důvodu procházejícího velkého proudu v konektorech J1 a J2 použito více pinů na kladný i záporný vodič napájení. Maximální proud jednoho pinu činí 2A. Po realizaci a otestování první verze DPS byl přidán jumper před zdroj 5,7V pro možnost připojit USB konektor k PC a napájet elektroniku pomocí USB. Během návrhu DPS bylo zapotřebí brát zřetel na umístění výkonového MOSFETu. Je umístěn ke kraji DPS s prostorem na montáž pasivního chladiče k odvodu ztrátového tepla. Shottkyho dioda D1 zabraňuje při odpojení zdroje průtoku proudu směrem ze superkondenzátoru do tohoto zdroje. Rezistor R1 omezuje maximální nabíjecí proud do superkondenzátoru po zapnutí napájení.

Při návrhu byly vybrány součástky v provedení 1205. S vybranou velikostí je pohodlnější manipulace bez specializovaných podmínek.

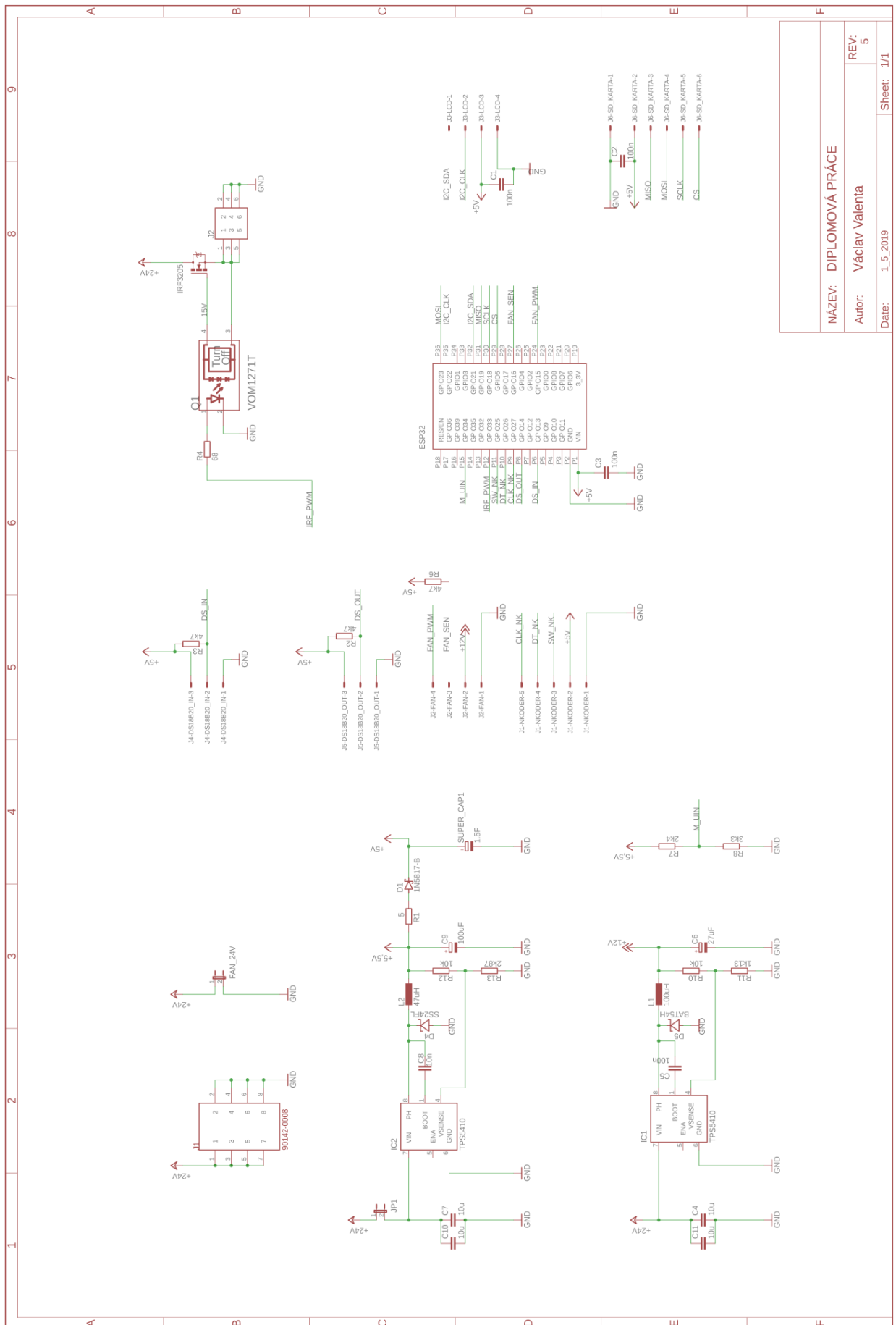
7.2 Výroba, osazování a testování DPS

Při výrobě a osazení první verze DPS se vyskytlo několik chyb, které bylo zapotřebí vyřešit v návrhu druhé verze. Musel být zvolen jiný pin pro měření

napájecího napětí. Původní pin je bootovacím pinem. Ty jsou určeny, při startu zařízení, k nastavení režimu provozu. Například při nastavení hodnoty pinu GPIO0 na hodnotu U_{cc} je ESP32 v běžném režimu. Ovšem při nastavení hodnoty na GND je spuštěn ROM sériový bootloader. Dále byl přidán konektor pro připojení ventilátoru k chlazení elektroniky. Posledním vylepšením bylo přidání měřících pinů na měření průběhů signálů pro snadné měření. Po výrobě druhé verze byla DPS opticky zkontrolována za pomoci mikroskopu s rozhraním USB. Více obrázků z osazování, testování a měření v Příloha D – Tepelný box a DPS.



Obr. 38: Vyrobená DPS verze 2 (zdroj vlastní)



Obr. 39: Schéma zapojení DPS (zdroj vlastní)

8 Tvorba řídicího programu

Software pro ovládání ESP32 je možné programovat v několika programovacích prostředích. Ať už se jedná o MicroPython, Atom text Editorem s PlatformIO IDE, nebo Arduino IDE. Zvolena byla varianta Arduino IDE z důvodu největších předchozích zkušeností s tímto prostředím.

8.1 Arduino

Arduino IDE (integrated development enviroment = integrované vývojové prostředí) je napsáno v jazyce Java. Jedná se o software vzniklý z výukového prostředí Processing. To bylo mírně upraveno, byly přidány určité funkce a v neposlední řadě podpora jazyka Wiring. Wiring je programovací jazyk vytvořený pro programování mikrokontroléru bez specifických znalostí hardwaru. V současné době je nejznámější jako součást open-source právě platforma Arduino. Tento jazyk je založen na jazyce C++. Před samotným programováním je potřeba nastavit jaká vývojová DPS a s jakým nastavením se bude programovat MCU.

8.2 Tvorba programu v Arduinu

Před samotným psaním kódu je potřeba zvolit, jaký druh vývojové desky případně MCU použijeme. Po nastavení několika doplňujících parametrů nám Arduino automaticky inicializuje potřebné registry a časovače v MCU. Tímto je uživatel ušetřen práce, zároveň ale nemá přímou kontrolu nad jednotlivými úseky nastavování.

Program tvořený v Arduinu se skládá z několika bloků. V první části je nutné importovat využívané knihovny pomocí příkazu `#include`. Dále se v této části deklarují globální proměnné například typu `int`, `float`, `long` nebo `boolean`. Pomocí direktivy `#define` můžeme definovat tzv. symbolické konstanty. Jde v podstatě o pojmenování hodnot, které se v průběhu programu nemění.

V další části nalezneme blok (funkci) `void setup() { }`. Mezi složené závorky se v tomto bloku píše kód, který se provede pouze jednou na začátku programu. To znamená buď po připojení napájení, zmáčknutí tlačítka restart, nebo po přehrání kódu. Nejčastěji se zde objevují inicializace komunikací, nastavování parametrů pro

zobrazování na LCD, nastavení sleep módu, nastavení PWM, přihlášení na zadanou Wi-Fi síť a definování vstupních a výstupních pinů. Hlavním blokem (funkcí) je `void loop(){ }`, do složených závorek se zapisuje kód, který se bude opakovat neustále až do odpojení napájení. Tyto dvě části musí být v programu **VŽDY** – i když neobsahují žádné příkazy.

Nejčastěji se po bloku `loop` nacházejí podprogramy. V této části se definují a ve funkci `loop` se volají. Podprogramy se definují stejným způsobem jako bloky `setup` a `loop`. `Void podprogram() {samotný kód podprogramu}`.

8.3 Využití externích knihoven

Při tvorbě programu za pomoci Arduina se velice často využívají externí nebo vlastní vytvořené knihovny. Knihovny jsou nespornou výhodou při programování především pro méně znalé programátory nebo při tvorbě rozsáhlejších programů. V diplomové práci jsou například využité knihovny přímo od tvůrců Thingspeaku nebo od TexasInstruments pro komunikaci s DS18B20.

Již zmiňovaná velká výhoda usnadnění práce může znamenat i problémy během programování. Především při používání neověřených a neodzkoušených knihoven může docházet k nežádoucím akcím či chybám. Další nevýhodou je více robustní a obecné řešení, které zabírá jak více paměťového místa, tak výpočetního výkonu. Ovšem při velikosti dnešních standardních pamětí a běžného rozsahu programu není tento fakt kritický.

8.4 Hlavní program

Hlavní program je psán v bloku `loop`. V nekonečné smyčce vykonává instrukce. Jeho hlavním úkolem v diplomové práci je několikanásobné měření vstupního napětí a poté vytvoření průměru z měření. Toto měření musí být prováděno co nejčastěji, aby byl výpadek detekován co nejdříve. Při detekci poklesu napětí pod zvolenou úroveň je spuštěn podprogram (`SD_karta`) a dále vypsáno upozornění o výpadku na OLED displej. Superkondenzátor poskytuje dostatek energie OLED displeji k zobrazování posledního textu ještě několik minut po výpadku napájení a vypnutí ESP32. Následně

hlavní program kontroluje, zda nebylo s N-kodérem pootočeno. Tyto úkony plní neustále při průchodu smyčkou bez podmínek.

Následně jsou zde podmíněné části kódu. Do této skupiny patří čtyři časovače hlídající uplynulý čas. Každý z nich je nastavený na jiné časování. Po uplynutí času časovače se změní hodnota pomocné proměnné. Nikdy se samotné úkony neplní v časovači, aby se nezpožďoval tímto vykonáváním. Akce související s každým časovačem se vykonávají po detekci změny proměnné z časovače.

Dále se zde nachází podmínky pro změnu zadané teploty podle aktuální fáze testu. Přenastavení PWM hodnoty, jak ventilátoru, tak vyhřívání se neprovádí při každém cyklu, ale pouze při výpočtu rozdílné hodnoty, než je hodnota stávající. Jako poslední se zde nachází podmínka pro ukončení testu a zobrazení finální obrazovky.

8.5 Podprogramy

Pro větší přehlednost jsou podprogramy rozděleny do dvou skupin. Jedna skupina se nazývá podprogramy funkční a druhá podprogramy zobrazovací. Rozdělení je založeno na tom, zda podprogram provádí výpočty, zápis dat, odesílání dat a podobné nebo zda pouze vypisuje data na obrazovku.

Podprogramy funkční

PosliThingSpeak: je jedním z nejdůležitějších podprogramů, který odesílá naměřená data pomocí Wi-Fi při použití externí knihovny. Zároveň vrací informaci o tom, zda bylo odeslání dat úspěšné. Více o Thingspeaku viz kapitola 10.

MereniTeploty_IN: tento podprogram automaticky přečte naměřené teploty ze všech připojených vnitřních senzorů. Zkontroluje přijatá data a pro senzory s chybovou hláškou nastaví nulovou hodnotu a dále s nimi nepočítá. Ze všech hodnot vybere tu největší a nejmenší pro výpočet maximálního rozdílu teplot uvnitř boxu. Tento rozdíl následně určuje rychlost otáčení vnitřního ventilátoru. Zároveň spočítá průměrnou vnitřní teplotu. Pro nulový počet připojených senzorů nastaví výstupní

PWM vyhřívání na nulu a vypíše chybovou hlášku po sériové komunikaci. Výpočty se automaticky nastavují na aktuální počet senzorů připojených po resetu zařízení. Proto není vyžadována žádná obsluha, či změna kódu při úpravě počtu senzorů.

`MereniTeploty_OUT`: funkce je totožná s podprogramem `MereniTeploty_IN`. Rozdíl je pouze v měření teploty vně tepelného boxu a ne uvnitř.

`Vypocet_PID`: jedná se o podprogram určený k výpočtům hodnoty PID, která dále nastavuje výstupní PWM hodnotu. Z důvodu komplexnosti a složitosti kódu je podprogram podrobně popsán a okomentován přímo v programu. Funguje ovšem na rozdíl teploty požadované a teploty naměřené v závislosti rychlosti změny teploty naměřené. Postupně jsou vypočítány všechny dílčí části PID regulátoru `PID_p`, `PID_i` a `PID_d`. Tyto jednotlivé části jsou na samém konci sečteny a vzniká tak výsledná hodnota PID regulátoru.

`Otacky_FAN`: podprogram obsluhující vnitřní ventilátor. Hlídáním přerušení na vstupu, kam je připojený vodič z ventilátoru (`FAN_SEN`), detekuje počet přerušení za určitý čas. Počty přerušení je schopen přepočítat na otáčky za minutu. Počet přerušení roste s otáčkami ventilátoru. Dále je implementována ochrana. V případě rozdílu teplot vnitřních senzorů je roztočen ventilátor na definované otáčky za pomoci PWM. Jeli tato hodnota PWM nenulová, ale otáčky ventilátoru nejsou detekovány, je nastavena poruchová proměnná ventilátoru do hodnoty `true`. Následně se na Thingspeaku zobrazí chybová kontrolka upozorňující na potenciální poruchu ventilátoru.

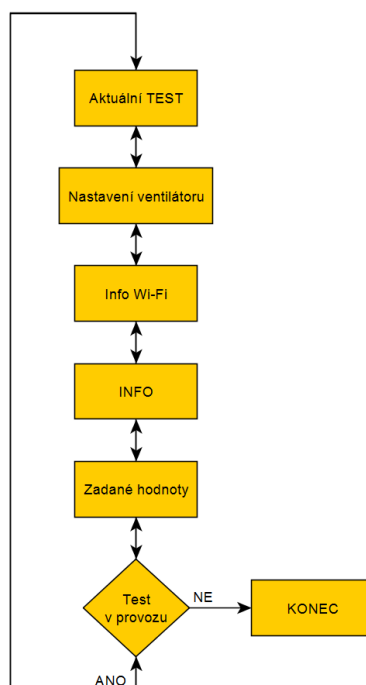
`SD_karta`: část kódu zapisující na SD kartu aktuální čas a chybovou hlášku v případě detekce poklesu napájecího napětí.

`ObsluhaWiFi`: podprogram je prováděn v případě, že v bloku `setup()` se nepodaří opakovaně desetkrát po sobě nalézt síť nebo se připojit k zadané Wi-Fi síti. Ve zvoleném intervalu je zkontrolován status připojení a v případě, že modul není připojen, pokusí se k síti připojit. Po deseti neúspěšných pokusech se ukončí a znovu se spustí po již zmíněném čase. Je-li ovšem Wi-Fi připojena, podprogram se nevykonává. Pro případ, že je po resetu zařízení Wi-Fi nedostupná, nastaví se

požadované teploty a časy na základní hodnotu nastavenou při programování kódu. Pro zvolení připojovací Wi-Fi a jejího hesla slouží přiložený soubor secrets.h. V tomto souboru si uživatel nastaví veškerá potřebná data k přihlášení k síti.

Podprogramy zobrazovací

Za pomoci N-kodéru se dá postupně projíždět všemi obrazovkami menu. Každá obrazovka má svůj informativní účel a dokonce obrazovka s informacemi o vnitřním ventilátoru poskytuje nastavení jeho vypnutí nebo zapnutí. Procházení menu probíhá ve smyčce, jedním i druhým směrem listování viz *Obr. 40*.



Obr. 40: Diagram procházení v hlavním menu OLED (zdroj vlastní)

Zobraz_AkTest: zobrazuje na obrazovce aktuální fázi testu. Dále aktuální průměrnou teplotu uvnitř i vně boxu. Zobrazuje se nastavená celková délka testu v hodinách a také aktuální probíhající hodina.



Obr. 41: Obrazovka Aktuální hodnota (zdroj vlastní)

FAN_ON_OFF: zajišťuje zobrazení aktuálního stavu ventilátoru a informaci, s jakou hodnotou PWM v rozmezí 0-255 (0 - 100%) je ventilátor spínán. Případným stlačením N-kodéru je možné ventilátor vypnout nebo zase zapnout. Jedná se o možnost volby pro obsluhu.



Obr. 42: Obrazovka nastavení ventilátoru (zdroj vlastní)

WIFI_stat: obrazovka zobrazuje Wi-Fi síť, ke které je nastaveno připojování. Doplněn je i aktuální stav připojení, jako připojeno, odpojeno, síť nenalezena a stav neznámý.



Obr. 43: Obrazovka info Wi-Fi (zdroj vlastní)

Info: je určeno k zobrazení počtu připojených vnitřních i vnějších senzorů. Zároveň se zobrazí i naměřená hodnota napájecího napětí ve voltech. Další zobrazenou hodnotou je hodnota PWM spínající výkonový MOSFET v procentech.



Obr. 44: Obrazovka INFO (zdroj vlastní)

Zobraz_Nastaveni: slouží k přehledu nastavených hodnot na Thingspeak nebo při nepřipojení k Wi-Fi zobrazení základních hodnot.



Obr. 45: Obrazovka Zadané hodnoty (zdroj vlastní)

Konec(): je doplňující podprogram pro zobrazení finálních hodnot po dokončení běhu testu. Společně s tímto zobrazením ukončovací obrazovky se ESP32 nastaví do spánkového režimu, aby se jeho proudový odběr minimalizoval.

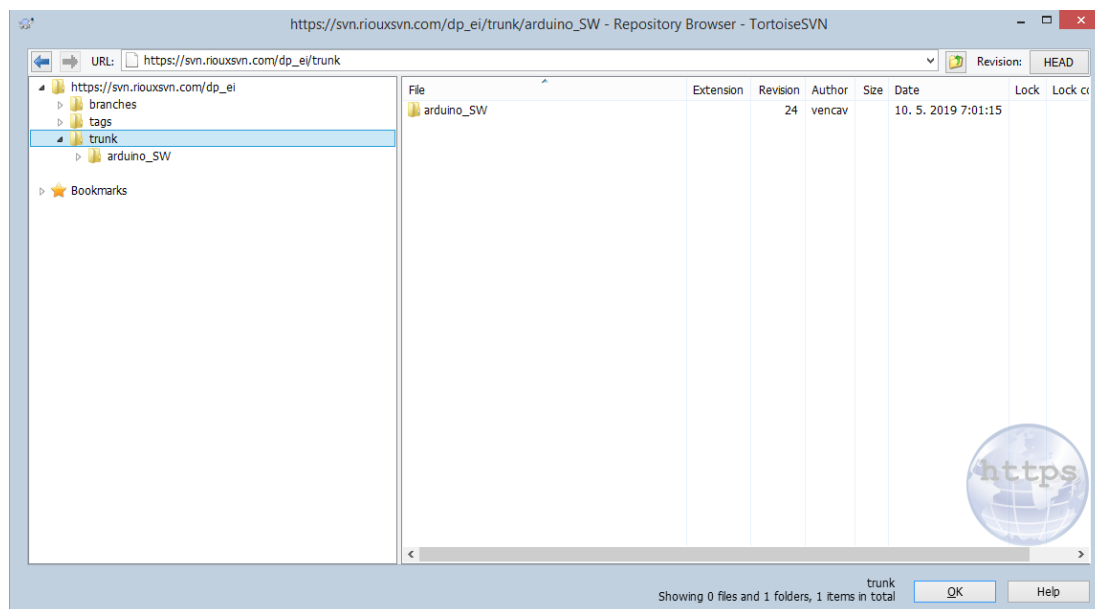


Obr. 46: Obrazovka Konec testu (zdroj vlastní)

V této kapitole byly velice stručně popsány jednotlivé podprogramy a jejich základní účel. Podrobné informace o jednotlivých funkcích a částech kódu jsou dostupné přímo v programu ve formě komentářů. Každá jednotlivá funkce je podrobněji popsána a je vysvětlen její účel.

9 Správa zdrojových kódů SVN

V průběhu programování řídicího programu byl využíván pro správu kódu SVN. SVN je nástrojem, který umožňuje správu verzí zdrojových kódů v průběhu vývoje programů nebo aplikací. Primárně tak umožňuje spolupracovat několika lidem (týmu) na jednom projektu. Veškeré provedené změny jsou zde jasně viditelné i s poznámkou, kým a kdy byla změna provedena. Tento nástroj je vyvíjen firmou CollabNet, Inc. a je šířen pod licenci, která umožňuje jeho bezplatné komerční použití, k dispozici jsou zdrojové kódy. Předchůdcem SVN a inspirací pro jeho vznik je CVS. SVN je však mnohem flexibilnější a jeho používání je snazší. Skládá se ze dvou hlavních částí – klientské část a serverové. Klientská část přímo poskytuje nástroje pro práci s verzemi v pracovním adresáři a zajišťuje komunikaci se serverovou částí. Serverová část se zabývá centrálním úložištěm. K úložišti je možné přistupovat různými způsoby (lokálně, přes nativní protokol svn://, DAV). Klientských nástrojů existuje celá řada. Od příkazové řádky, přes webové rozhraní až po nástroje integrované do GUI operačního systému. Během tvorby této diplomové práce byl využíván GUI klient pro SVN „TortoiseSVN“. Rozhraní tohoto klienta je patrné na *Obr. 47*.

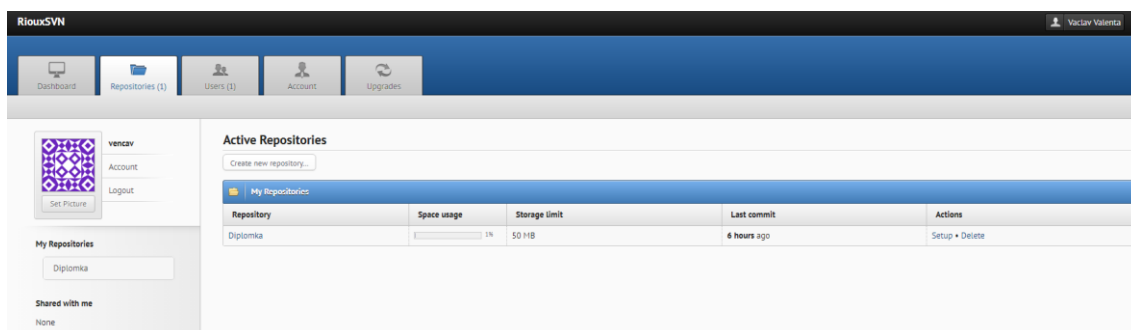


Obr. 47: SVN klient TortoiseSVN (zdroj vlastní)

Pro serverovou část byl využitý zdarma dostupný účet na webových stránkách [www. RiouxSVN.com](http://www.RiouxSVN.com). V uživatelské verzi, která je dostupná zcela zdarma, je možné nahrát celkový objem dat až 50MB. Tento objem dat je velmi dostačující. Vzhled

rozhraní serverové části je na *Obr. 48*. Veškeré záznamy o provedené změně se s příloženým komentářem odesílají na zvolené emaily všech uživatelů. Díky tomu je každý člen projektu o všem informován.

SVN správa kódů má tedy hlavní výhody ve sdílení kódu s ostatními členy týmu, v přehledné historii provedených změn, v přístupu ke kódu na jakémkoliv zařízení a v zálohování samotného kódu kýmkoliv z týmu. V průběhu vypracovávání diplomové práce bylo zapotřebí nucené reinstalace operačního systému se ztrátou dat na využívaném notebooku. Reinstalace byla způsobena špatnou aktualizací systému. Díky využívání SVN nebyla však ztracena žádná data z průběhu programování.



Obr. 48: SVN server, webové rozhraní (zdroj vlastní)

10 Monitoring průběhu tepelných testů

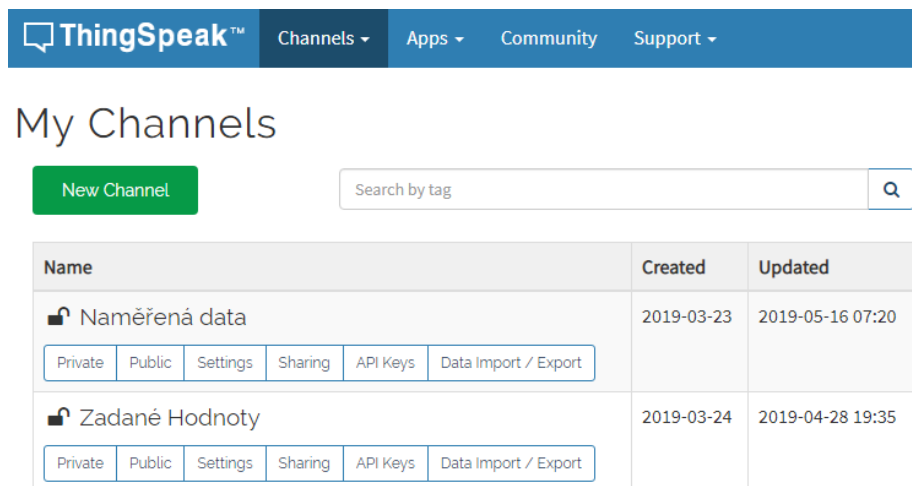
ThingSpeak je analytická služba pro IoT (internet věcí), která umožňuje agregovat, zobrazovat a analyzovat aktuální datový tok v prostředí cloudu. Data z koncových zařízení je možné posílat přímo na platformu ThingSpeak, aktuální data zde okamžitě vizualizovat a zasílat upozornění pomocí webových služeb jako je Twitter a Twilio.

Platforma ThingSpeak poskytuje také funkce k zpracování dat z programu MATLAB. Uživatelé zde mohou psát a spouštět programy v jazyce MATLAB, pomocí nich pak zpracovávat, vizualizovat a analyzovat sbíraná data. ThingSpeak tak umožňuje návrh prototypů IoT systémů bez nutnosti zřizovat vlastní serverovou architekturu nebo programovat webový software.

Platforma ThingSpeak poskytuje jak placené verze, tak verze účtů zdarma. Jednotlivé předplatné verze se liší možnostmi využití a rozsahu jednotlivých služeb. Verze zdarma (free), která byla v rámci diplomové práce využita, obsahuje možnost posílání až 3 milionů zpráv za rok (8200/den). Dále je zde časové omezení na interval posílání dat na 15 sekund. Posílání dat v kratším časovém intervalu není možné. Počet kanálů je omezen na 4. Každý kanál může obsahovat až 8 polí. To znamená, že ve volně přístupné verzi je možné odesílat a ukládat až 32 proměnných.

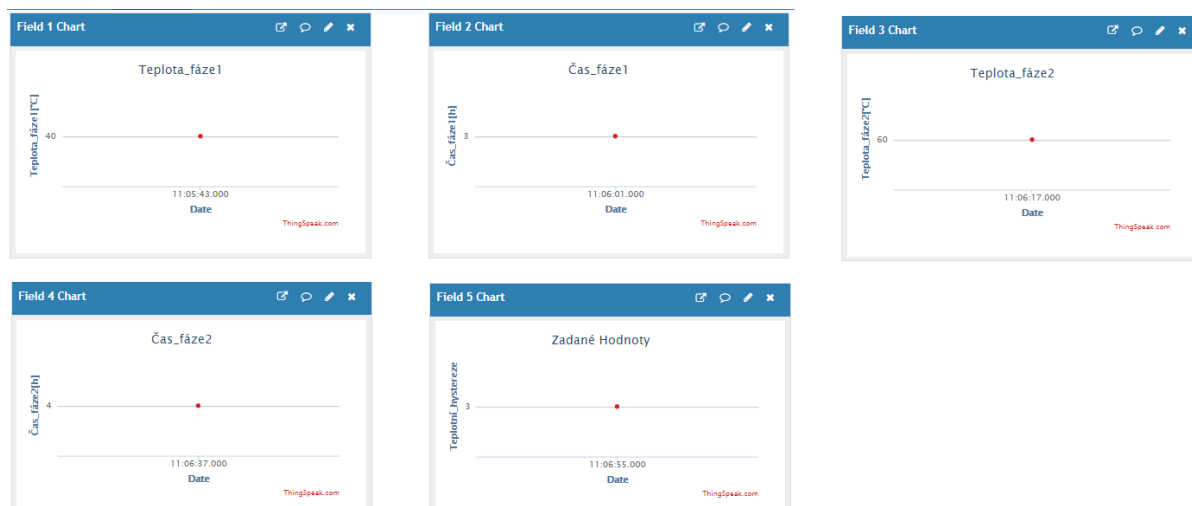
ThingSpeak byl využit pro odesílání a zobrazování naměřené průměrné teploty v tepelném boxu, naměřené průměrné teploty mimo tepelný box, hodnoty PWM vnitřního ventilátoru, indikace poruchy ventilátoru, PWM hodnoty výkonového MOSFETu, indikace běhu testu a zobrazování alarmu při výchylce naměřené teploty mimo zvolenou hysterezi kolem zadané teploty. Jednotlivá grafická zobrazení lze zvolit dle potřeby. Jedná se o možnost zobrazovat data v grafech, budíkovém zobrazovači nebo barevném indikátoru, který se aktivuje při splnění specifické podmínky. Všechny tyto hodnoty se posílají a zobrazují na 1. kanálu pojmenovaném *Naměřená data (Obr. 70 a Obr. 71)*. Z obrázků jsou patrné všechna naměřená data a indikátory zobrazující informační hodnoty. Jedním z bodů zadání je upozornění (alarm) aktivní při výskytu vnitřní teploty mimo toleranční pásmo okolo hodnoty zadané. Při testu zobrazeném na obrázku *Obr. 70* byl alarm aktivní pouze při náběhu

teplot. Stabilní regulace se po ustálení pohybovala ve zvolené hysterezi $\pm 3^\circ\text{C}$. Druhý kanál pojmenovaný *Zadané Hodnoty* slouží k nastavení požadovaných hodnot na měření (Obr. 49).



Obr. 49: ThingSpeak využívané kanály (zdroj vlastní)

Zadávání hodnot se provádí v kanálu *Zadané Hodnoty* (Obr. 50), konkrétně v záložce API Key (Obr. 69). Odkazem určeným k aktualizaci hodnot pole (Update a channel Feed) kopírovaným ve webovém prohlížeči nastavíme hodnoty pro každé pole. Test může probíhat až ve dvou fázích. Každá z fází může mít nastavenou rozdílnou teplotu a čas.



Obr. 50: ThingSpeak Zadané Hodnoty (zdroj vlastní)

10.1 ThingSpeak X Web server

Základní a významnou výhodou ThingSpeaku oproti vlastnímu Web serveru je významné ušetření výpočtového výkonu. ThingSpeak nabízí své vlastní knihovny importovatelné do Arduina. Knihovny jsou vytvořené přímo vývojáři ThingSpeaku. Hodnoty se odesílají pouze jedním příkazem, i čtení je stejně jednoduché.

Vlastní webový server vyžaduje poměrně vysoký výpočetní výkon. Výkon je potřebný jak k vykreslování webu, tak k obsluze požadavků.

11 Testování tepelného boxu

Poslední kapitola se zaměřuje na samotné testování zhotoveného přípravku. Toto testování by mělo ověřit, zda funkčnost zařízení je bez zásadních chyb. Případné zjištěné problémy je nutné odstranit, nebo zjistit příčinu problému a navrhnout řešení, která je minimalizují. Součástí testu funkčnosti je test vyhřátí, který měří skutečný čas výhřevu na požadovanou teplotu a poté ho porovnává s vypočítaným časem ze simulace v kapitole 2 *Návrh a simulace*. Druhý následující test se zabývá dobou chladnutí vnitřního prostoru tepelného boxu. Toto měření může být důležité při výpadku napájení. Díky naměřeným hodnotám bude známo, jak dlouhá doba výpadku napájení je akceptovatelná a od kterého času je předešlé měření již znehodnoceno.

11.1 Čas vyhřátí

Měření doby výhřevu bylo provedeno na již kompletním přípravku. První měření bylo provedeno vyhříváním topné podložky na plný výkon bez regulace. Čas byl měřen od zapnutí výhřevu po dosažení teploty 80°C. Počáteční okolní teplota byla 22°C. Vypočítaný čas výhřevu dle simulace je roven 12minutám a 34sekundám. Reálný naměřený čas byl 13minut a 15 sekund. Delší reálný čas odlišný od času vypočítaného může být způsoben drobnými nepřesnostmi v provedení izolace a nedokonalým doléháním celého boxu na podložku. Rozdíl 41sekund není tak zásadní, aby musel být řešen.

Další test probíhal již se zapojenou regulací PID. Čas vyhřívání s regulací je 19minut a 32 sekund. Tento čas je delší, ale teplota je stabilnější a řízena regulátorem. Přesnější a názornější zobrazení hodnot teploty během vyhřívání s regulací je dostupné v *Příloha E – ThingSpeak*.

Test na *Obr. 70* probíhal 7h ve dvou fázích. První fáze trvající tři hodiny vyhřívala box na teplotu 40°C a druhá fáze trvající čtyři hodiny na teplotu 60°C. počáteční teplota byla 24°C. vyhřátí na zadanou teplotu první fáze trvalo 9 minut. Po uplynutí času tři hodiny zvýšil box teplotu o 20°C, tento ohřev trval 10 minut.

Překmit při změně zadané teploty nepřesáhnul $2,5^{\circ}\text{C}$. a rozkmit (odchylka) regulace v ustáleném stavu se pohyboval mezi $0,25 - 0,5^{\circ}\text{C}$. Výhodou Thingspeaku je možnost stáhnout naměřená data ve formátu .csv (excel). Sedmé pole na *Obr. 70* zobrazuje hodnotu PWM, s kterou je výkonový MOSFET spínán. Při maximální hodnotě 100% je protékající proud vyhřívací podložky roven $I=4,6\text{A}$. Známe-li hodnotu PWM při udržování teploty, dá se dopočítat potřebný udržovací proud. Udržující proud při teplotě 40°C je $I_{40}= 0,54\text{A}$ (11,7%) a při teplotě 60°C je $I_{60}= 1,08\text{A}$ (23,48%).

11.2 Čas vychladnutí

Po vyhřátí tepelného boxu na maximální teplotu (85°C) bylo otestováno postupné vychladnutí. Po dosažení této maximální teploty bylo vypnuto vyhřívání a za pomoci měření teploty sledována rychlost chladnutí. V tabulce *Tab. 5* je přehled časů a teplot během chladnutí boxu. Okolní teplota měla hodnotu 20°C . Z tabulky vyplývá, že chladnutí boxu s vyšším rozdílem vůči teplotě okolí je rychlejší. Tento fakt je dán vyššími ztrátami při vyšších teplotách. Toto tvrzení podporuje i výsledek výpočtů v programu MATLAB viz *Obr. 1*.

Tab. 5: Čas chladnutí tepelného boxu

Počáteční teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Konečná teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Čas chladnutí
85	73	5min 40s
85	63	9min 15s
85	53	15min 35s
85	43	23min 45s
85	33	36min 30s
85	20 (teplota okolí)	1h 3min

Závěr

Cílem této diplomové práce byl komplexní pohled na problematiku možnosti simulovat tepelné podmínky během přepravy a nasazení elektrických zařízení v extrémních podmínkách. V návaznosti na teoretickou přípravu v oblastech měření teploty a regulace byl proveden návrh a následná výroba funkčního tepelného boxu, který byl testován v navazujících měřeních. Základním požadavkem na zařízení byla dlouhodobá regulace teplotních testů.

V první části práce byla vytvořena rešerše jednotlivých způsobů měření teploty a její účinné regulace. Následně došlo k vytvoření simulace tepelného boxu v programu MATLAB pro porovnání tepelných vlastností boxu, při použití rozdílného zateplení a použití různých vyhřívacích prvků. Na základě rešerše byly vybrány konkrétní senzory teploty, způsob regulace a výpočetní prostředek, které byly následně aplikovány na výrobu konkrétního přípravku. Byly vybrány digitální senzory teploty komunikující s MCU po jednom vodiči (one-wire komunikace). Pro regulaci teploty byla vybrána kvazispojitá PID regulace a to s ohledem na dostačující výpočetní výkon použitého ESP32 a na polovodičový spínací prvek (výkonový MOSFET). PID regulace umožňuje přesnější regulaci s menším tepelným rozptylem než regulace dvoustavová.

Naměřená data jsou zasílána za pomoci Wi-Fi modulu přímo na platformu Thingspeak, kde jsou online zobrazována a ukládána. Dále je poskytnuta možnost stažení těchto dat do vlastního PC ve formátu .csv. Odesílaná data obsahují naměřenou průměrnou teplotu ze všech vnitřních senzorů boxu, průměrnou vnější teplotu, procentuální hodnotu otáček vnitřního ventilátoru a nastavený výkon tepelné podložky v procentech. Dále data obsahují indikátor výskytu aktuální teploty mimo zvolenou hysterezi (alarm), indikátor průběhu testu bez potíží a indikátor upozorňující obsluhu na možné poškození vnitřního ventilátoru.

Napájení elektroniky zajišťují dva zdroje vyvinuté pro potřeby vytvořeného systému. Zdroje z napájecího napětí 24V poskytují napětí 12V a 5,7V. Pro případ výpadku energie v průběhu dlouhodobého testu byla DPS osazena superkondenzátorem, který zajišťuje dostatek energie pro uložení chybové zprávy na

SD kartu. Obsluha je tak schopna detekovat, zda v průběhu testování došlo k přerušení napájení.

V budoucnu by bylo možné připojení SD karty více využívat. Jedním ze způsobů je načítání přihlašovacích údajů k Wi-Fi síti. Tím by odpadala nutnost přeprogramování při změně sítě. Dalším rozšířením by mohlo být ukládání naměřených dat přímo na SD kartu při výpadku Wi-Fi sítě. A ještě můžeš doplnit, že by se SD karta dala použít pro uložení vstupních dat pro nastavení průběhu testu, např. ve formě dvojic údajů o teplotě a době, po kterou zařízení na této teplotě setrvá.

Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] [online]. Dostupné z: <http://webench.ti.com/power-designer/>
- [2][online] Dokumentace (Datasheet) TPS5410.pdf Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tps5410.pdf>, <http://www.ti.com/product/TPS5410>
- [3] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [4] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-180-2.
- [5] DIETMEIER, Ulrich. Vzorce pro elektroniku. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-53-8.
- [6] VALTER, Jaroslav. Regulace od Jardy: Plynulá regulace PID [online]. 29 června 2006 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://valter.byl.cz/plynula-regulace-pid>
- [7] KREJČIŘÍK, Alexandr. DC/DC měniče. Praha: BEN, 2001. ISBN 80-7300-045-8.
- [8] Home esp8266/esp8266-wiki Wiki GitHub. The world's leading software development platform · GitHub [online]. Copyright © 2019 [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: <https://github.com/esp8266/esp8266-wiki/wiki>
- [9] ESP32 je tu. Co přinese nástupce ESP8266? - Root.cz. Root.cz - informace nejen ze světa Linuxu [online]. Copyright © 1998 [cit. 11.05.2019]. Dostupné z: <https://www.root.cz/clanky/esp32-je-tu-co-prinese-nastupce-esp8266/>
- [10] Espressif Systems - Wi-Fi and Bluetooth chipsets and solutions [online]. Copyright © [cit. 12.05.2019]. Dostupné z: https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/0a-esp8266ex_datasheet_en.pdf
- [11] automatizace.hw.cz: Superkondenzátor - princip, vlastnosti, použití [cit. 12.05.2019]. Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/view.php?cisloclanku=2006122601>
- [12] Vishay - VOM1271 - Photovoltaic MOSFET Driver with Integrated Fast Turn-Off, Solid-State Relay. Vishay - manufacturer of discrete semiconductors and passive components [online]. Dostupné z: <http://www.vishay.com/ppg?83469>
- [13] ESP32 DevKit ESP32-WROOM GPIO Pinout | Circuits4you.com. Circuits4you.com | Arduino interfacing, circuits tutorials with code and ebooks, Step by step guides for all sensor modules used for arduino. Programming tips and tricks. [online]. Dostupné z: <https://circuits4you.com/2018/12/31/esp32-devkit-esp32-wroom-gpio-pinout/>
- [14] ZÁHLAVA, Vít. Návrh a konstrukce desek plošných spojů: principy a pravidla praktického návrhu. Praha: BEN - technická literatura, 2010. ISBN 978-80-7300-266-4.

- [15] BRTNÍK, Bohumil a David MATOUŠEK. Elektronické prvky. Praha: BEN - technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-426-2.
- [16] STENGL, Jens Peer a Jenö TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-54-6.
- [17] KOVÁČ, Dobroslav, Irena KOVÁČOVÁ a Ján KAŇUCH. EMC z hlediska teorie a aplikace. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-202-7.
- [18] Dokumentace (Datasheet) DS18B20.pdf Dostupné z:
<https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20-PAR.pdf>
- [19] STENGL, Jens Peer a Jenö TIHANYI. Výkonové tranzistory MOSFET. Praha: BEN - technická literatura, 1999. ISBN 80-86056-54-6.
- [20] FROHN, Manfred. Elektronika: polovodičové součástky a základní zapojení. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-123-3.

Přílohy

Příloha A – Kód MATLAB

```

% Definování tepelého odporu v závislosti na tloušťce polystyrénu
%Hodnoty pro polystyren XPS
Rpol50 = 1.55;
Rpol75 = 2.21;
Rpol10 = 2.80;

%Hodnoty pro polystyren ESP
%Rpol50 = 1.28;
%Rpol75 = 1.92;
%Rpol10 = 2.56;

% Tepelný odpor plexiskla
Rplast=0.0263;

%Výpočet telepného odporu obou vrstev dohromady
Rt1=Rplast+Rpol50;
Rt2=Rplast+Rpol75;
Rt3=Rplast+Rpol10;

% Definování vnitřních rozměrů boxu
X=0.26;
Y=0.46;
Z= 0.25;

% Výpočet jednotlivých ploch a celkové plochy boxu
S1= 2*X*Y;
S2=2*X*Z;
S3=2*Y*Z;
S=S1+S2+S3;

% Definování vnější teploty a rozsahu vnitřní
Tout = 20;
Teplota = [20:85];

% Celkový objem boxu
V=X*Y*Z;

%Hustota vzduchu
pvzduch=1.275; % [kg/m3]

%Měrná tepelná kapacita vzduchu
cvzduch=1000; % [J/(Kg * K)]

m=pvzduch*V;

Q      = []; % Teplo potřebné k ohřátí vzduchu o objemu V, v [J]
QtoWh  = []; % Teplo převedené na Wh 1Wh = 3600J
Q50total = []; % Celkové potřebné teplo k výhřevu boxu s polystyrenem 5cm
Q75total = []; % Celkové potřebné teplo k výhřevu boxu s polystyrenem 7,5cm
Q100total = []; % Celkové potřebné teplo k výhřevu boxu s polystyrenem 10cm
P= 110; % Výkon topné podložky 130W, ale zdroj dodává menší výkon
Pj = P*3.600; % Převed topného výkonu na kJ, 1Wh -> 3600J, 1Wh -> 3.6kJ
W50 = []; % Tepelné ztráty boxu pro tloušťku polystyrenu 5cm
W75 = []; % Tepelné ztráty boxu pro tloušťku polystyrenu 7,5cm
W100 = []; % Tepelné ztráty boxu pro tloušťku polystyrenu 10cm

```



```

t_ohrevu50 = [];
t_ohrevu75 = [];
t_ohrevu100 = [];

x1 = linspace(20,85,65);

for i = 1:65
    %Teplota potřebná k ohřátí [J (JOULE)] Výpočet bez ztrát
    Q(i) = m*cvzduch*(Teplota(i)-Tout);
    % Toto teplo se převede na Wh 1J = 0.0002777777Wh 1Wh = 3600J
    QtoWh(i) = Q(i) /3600 ;
    disp(i)
end

% Tepelná ztrata pro jednotlivé teploty pro izolaci 5cm
for i = 1:65
    W50(i) = (S*(Teplota(i)-Tout))/Rt1;
    %Tento ztrátový výkon (W50(i)) za hodinu odpovídá Wh
    Q50total(i) = QtoWh(i) + W50(i); % Ted máme celkový potřebný výkon ve Wh
    Q50total(i) = Q50total(i) *3.600; % Potřebný výkon převedený na kJ
    t_ohrevu50(i) = 60/(Pj/Q50total(i)); % Čas potřebný k ohřevu s deskou 80W v min
    disp(i)
end

% Tepelná ztrata pro jednotlivé teploty pro izolaci 7.5cm
for i = 1:65
    W75(i) = (S*(Teplota(i)-Tout))/Rt2;
    Q75total(i) = QtoWh(i) + W75(i); % Ted máme celkový potřebný výkon ve Wh
    Q75total(i) = Q75total(i) *3.600; % Potřebný výkon převedený na kJ
    t_ohrevu75(i) = 60/(Pj/Q75total(i)); % Čas potřebný k ohřevu s odporovou deskou v min
    disp(i)
end

% Tepelná ztrata pro jednotlivé teploty pro izolaci 10cm
for i = 1:65
    W100(i) = (S*(Teplota(i)-Tout))/Rt3;
    Q100total(i) = QtoWh(i) + W100(i); % Ted máme celkový potřebný výkon ve Wh
    Q100total(i) = Q100total(i) *3.600; % Potřebný výkon převedený na kJ
    t_ohrevu100(i) = 60/(Pj/Q100total(i)); % Čas potřebný k ohřevu s odporovou deskou v min
    disp(i)
end

subplot(3,1,1);
    %subplot();
plot(x1, W50,'k-');
hold on
plot(x1,W75,'r-');
hold on
plot(x1,W100,'b-');
title('\fontsize{20} Závislost tepelné ztráty na vnitřní teplotě a na tloušťce izolace');
    %title('\fontsize{26} Závislost tepelné ztráty na vnitřní teplotě a na tloušťce izolace');
axis([15,90,0,25])
xlabel('\fontsize{14} Vnitřní teplota [ °C ]');
ylabel('\fontsize{18} Tepelná ztráta [ W ]');
    %xlabel('\fontsize{26} Vnitřní teplota [ °C ]');
    %ylabel('\fontsize{26} Tepelná ztráta [ W ]');
legend('\fontsize{16} izolace 50mm', '\fontsize{16} izolace 75mm', '\fontsize{16} izolace 100mm');
    %legend('\fontsize{20} izolace 50mm', '\fontsize{20} izolace 75mm', '\fontsize{20} izolace 100mm');

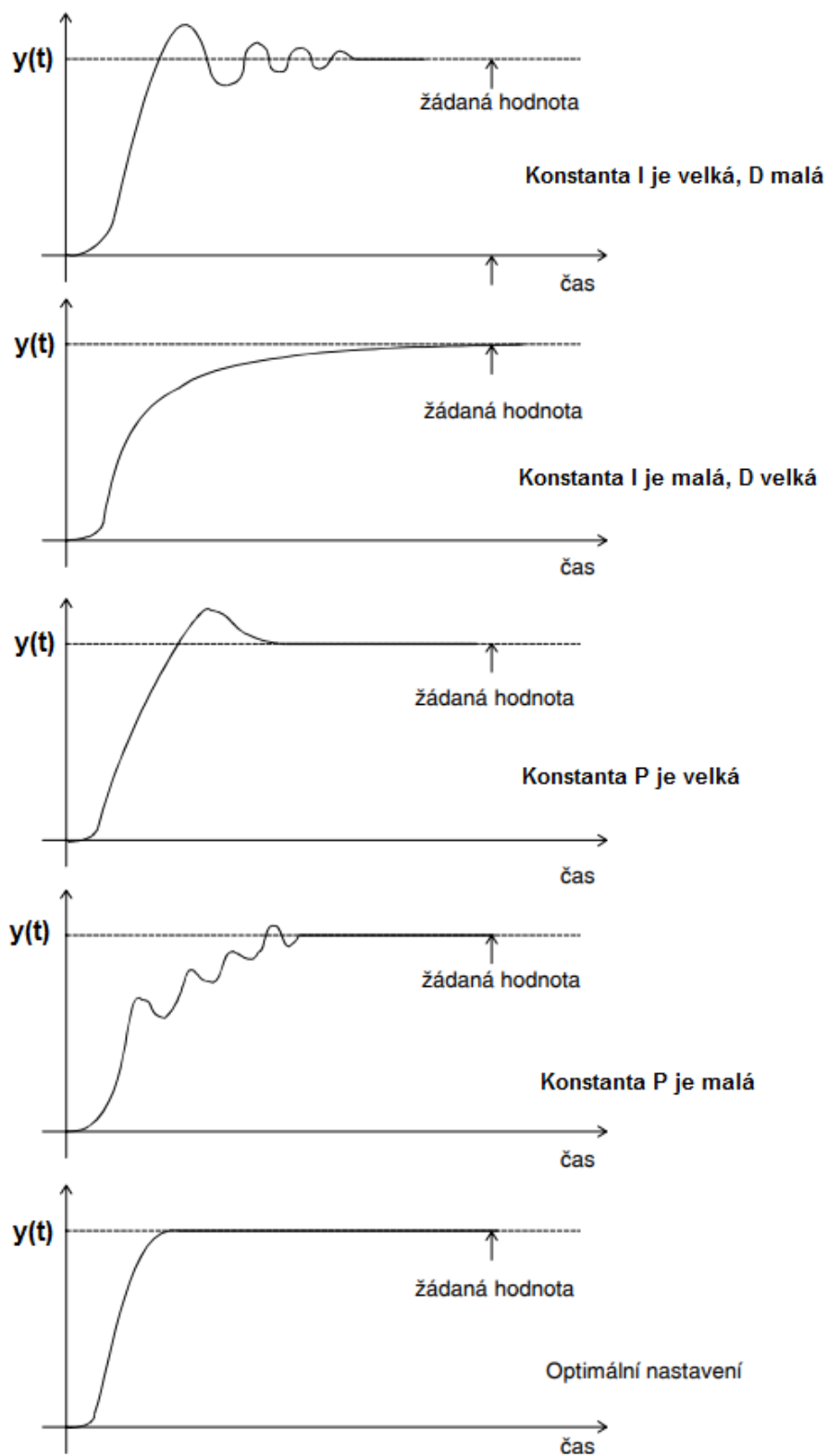
```

```
x = rand(10,10);
y = rand(10,10);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',20)

subplot(3,1,2);
%subplot();
plot(x1, QtoWh,'g-');
hold on
plot(x1,Q50total,'k-');
hold on
plot(x1,Q75total,'r:');
hold on
plot(x1,Q100total,'b-.');
axis([15,90,0,100])
title('\fontsize{20} Potřebné teplo k vyhřátí boxu v závislosti na tloušťce izolace');
% title('\fontsize{26} Potřebné teplo k vyhřátí boxu v závislosti na tloušťce izolace');
xlabel('\fontsize{14} Vnitřní teplota [ °C ]');
ylabel('\fontsize{18} Potřebné teplo [ kJ ]');
% xlabel('\fontsize{26} Vnitřní teplota [ °C ]');
% ylabel('\fontsize{26} Potřebné teplo [ kJ ]');
legend('\fontsize{14} Potřebné teplo bez ztrát', '\fontsize{14} Potřebné teplo + ztráty pro
50mm', '\fontsize{14} Potřebné teplo + ztráty pro 75mm', '\fontsize{14} Potřebné teplo + ztráty pro 100mm');
% legend('\fontsize{20} Potřebné teplo bez ztrát', '\fontsize{20} Potřebné teplo + ztráty pro
50mm', '\fontsize{20} Potřebné teplo + ztráty pro 75mm', '\fontsize{20} Potřebné teplo + ztráty pro 100mm');
x = rand(10,10);
y = rand(10,10);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',20)

subplot(3,1,3);
plot(x1, t_ohrevu50,'k-');
hold on
plot(x1, t_ohrevu75,'r:');
hold on
plot(x1, t_ohrevu100,'b-.');
axis([15,90,0,15])
title('\fontsize{20} Potřebný čas k výhřevu boxu tělesem 110W ');
xlabel('\fontsize{14} Vnitřní teplota [ °C ]');
ylabel('\fontsize{18} Čas vyhřátí [ min ]');
legend('\fontsize{16} izolace 50mm', '\fontsize{16} izolace 75mm', '\fontsize{16} izolace 100mm');
x = rand(10,10);
y = rand(10,10);
plot(x,y);
set(gca,'FontSize',20)
```

Příloha B – PID Regulace

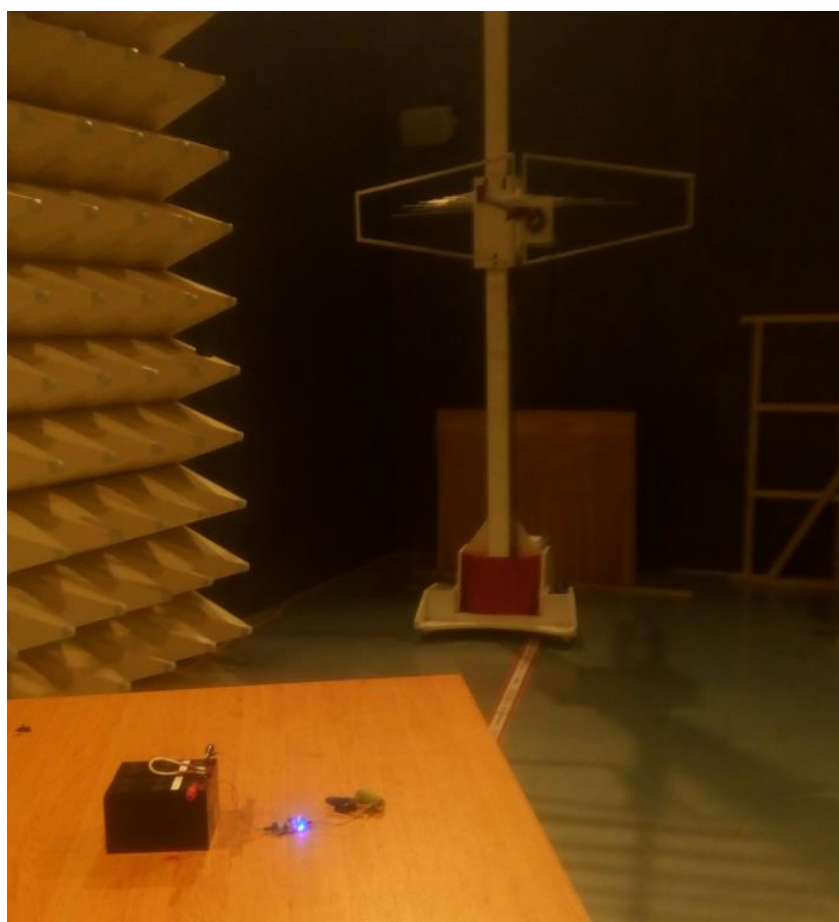


Obr. 51: Příklady chování soustavy při ladění konstant

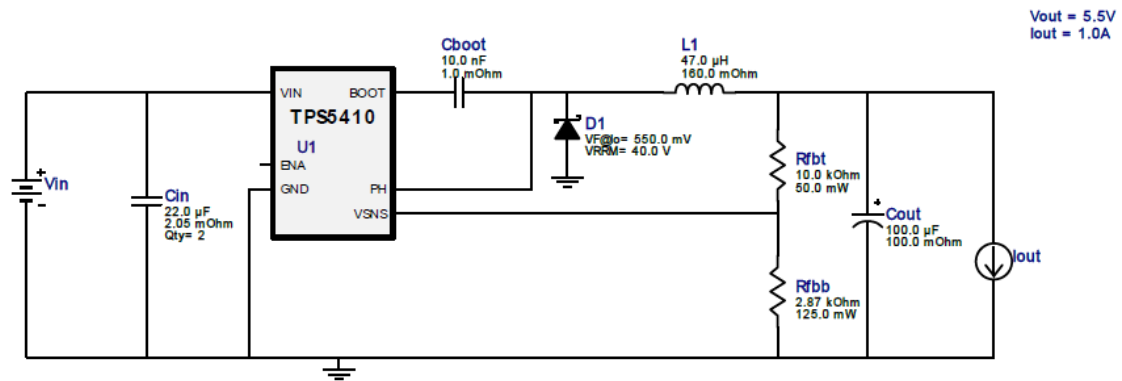
Příloha C – Spínané zdroje



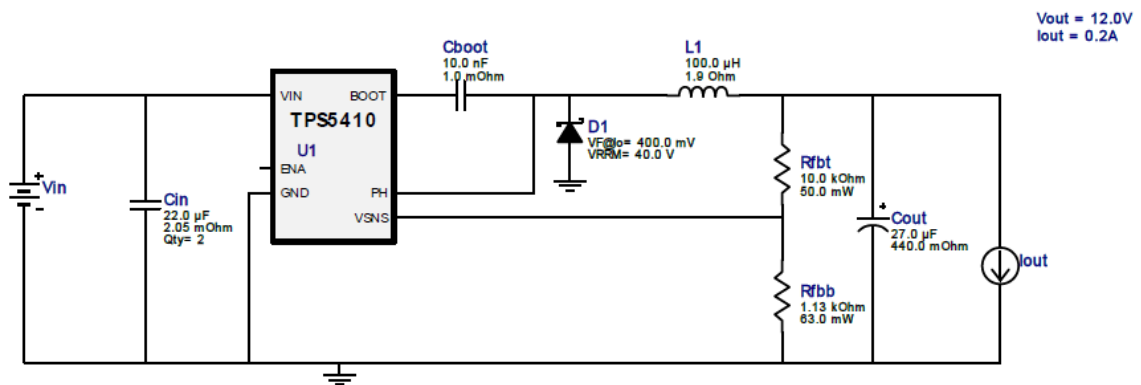
Obr. 52: Měření (LM2596S) (vlastní zdroj)



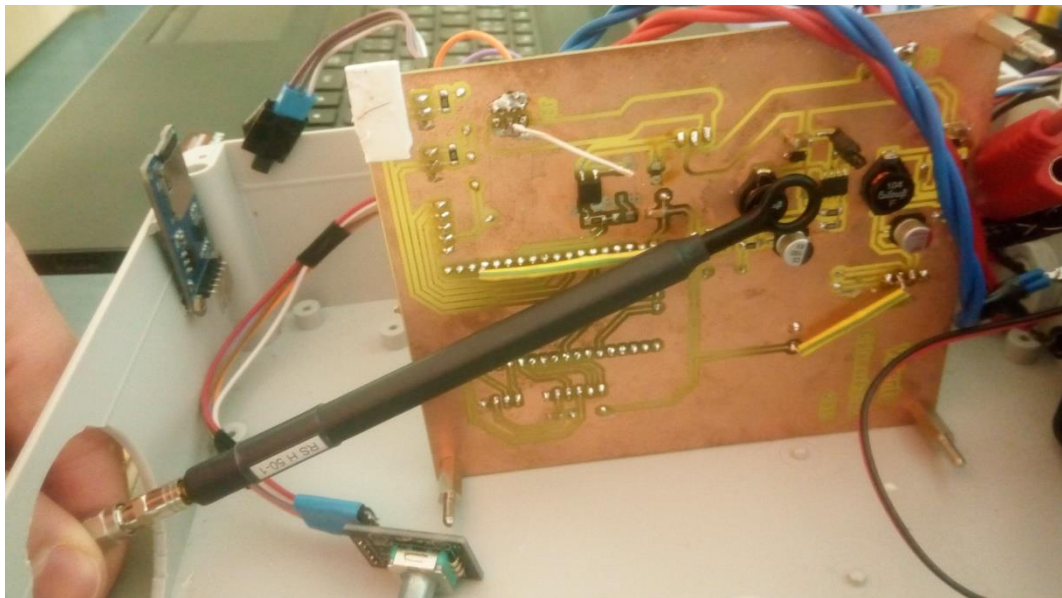
Obr. 53: Měření v EMC komoře (vlastní zdroj)



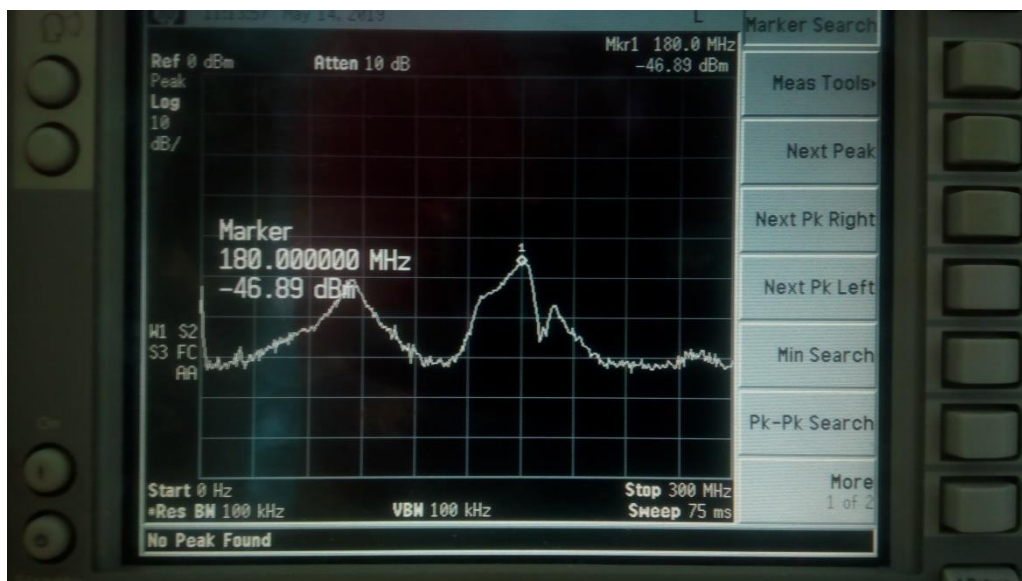
Obr. 54: Zapojení zdroje 5,5V



Obr. 55: Zapojení zdroje 12V



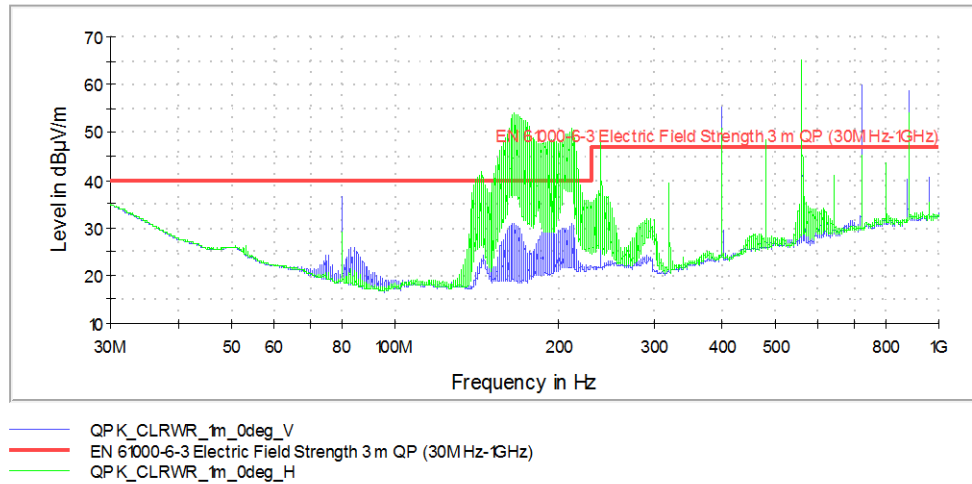
Obr. 56: Hledání zdroje rušení na DPS (verze 1) (zdroj vlastní)



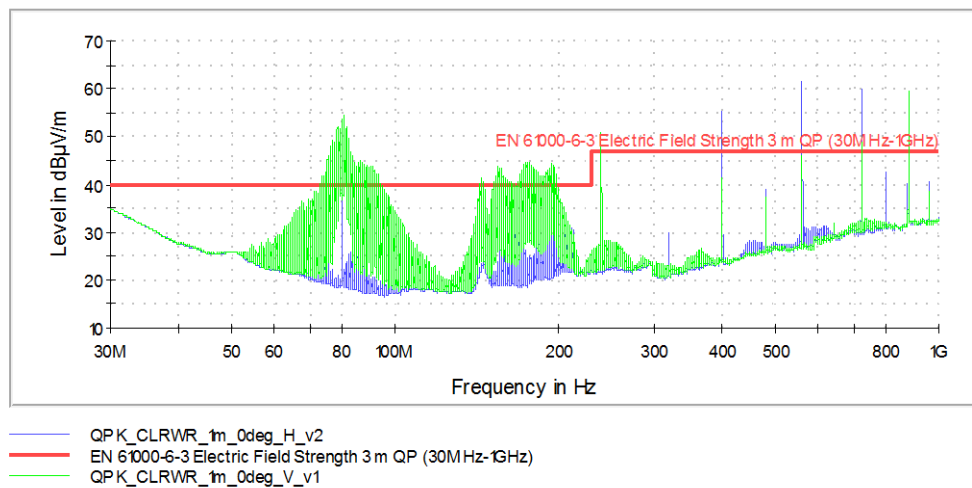
Obr. 57: Detekované rušení zdrojů na DPS (verze 1) (zdroj vlastní)



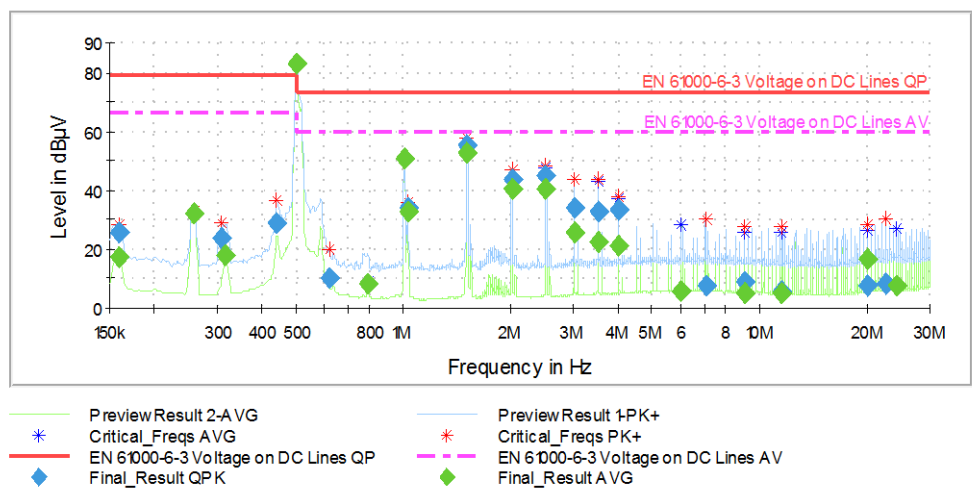
Obr. 58: Umělá síť pro měření rušení po vedení (zdroj vlastní)



Obr. 59: Měření horizontálního a vertikálního vyzařování druhé verze zařízení (V2)

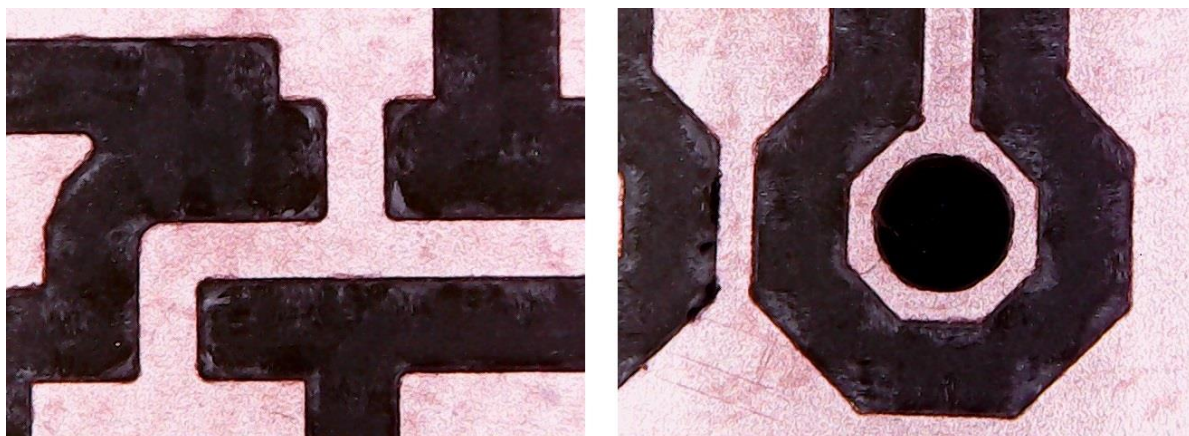


Obr. 60: Porovnání vyzařovaného vertikálního rušení V1 a V2

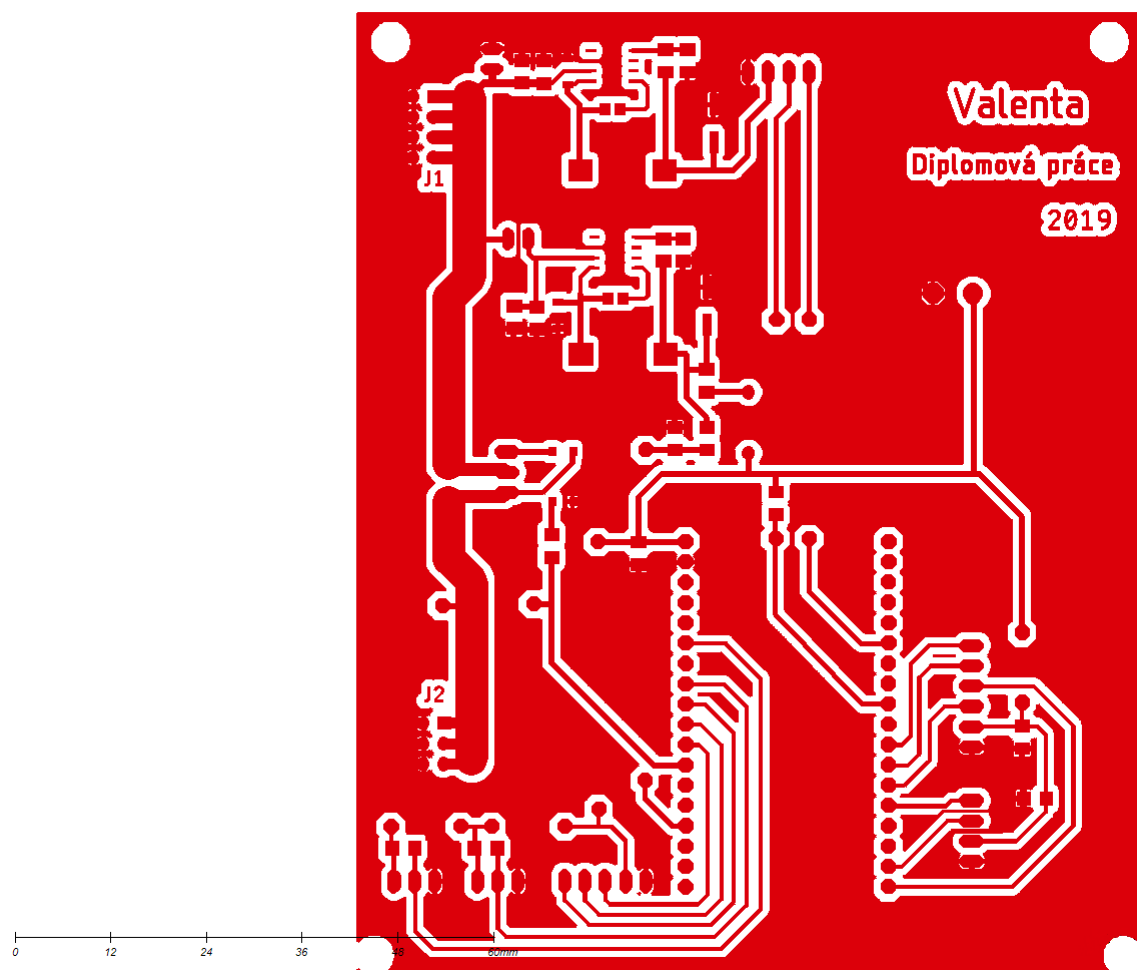


Obr. 61: Rušení zařízení po vedení, verze druhá (V2)

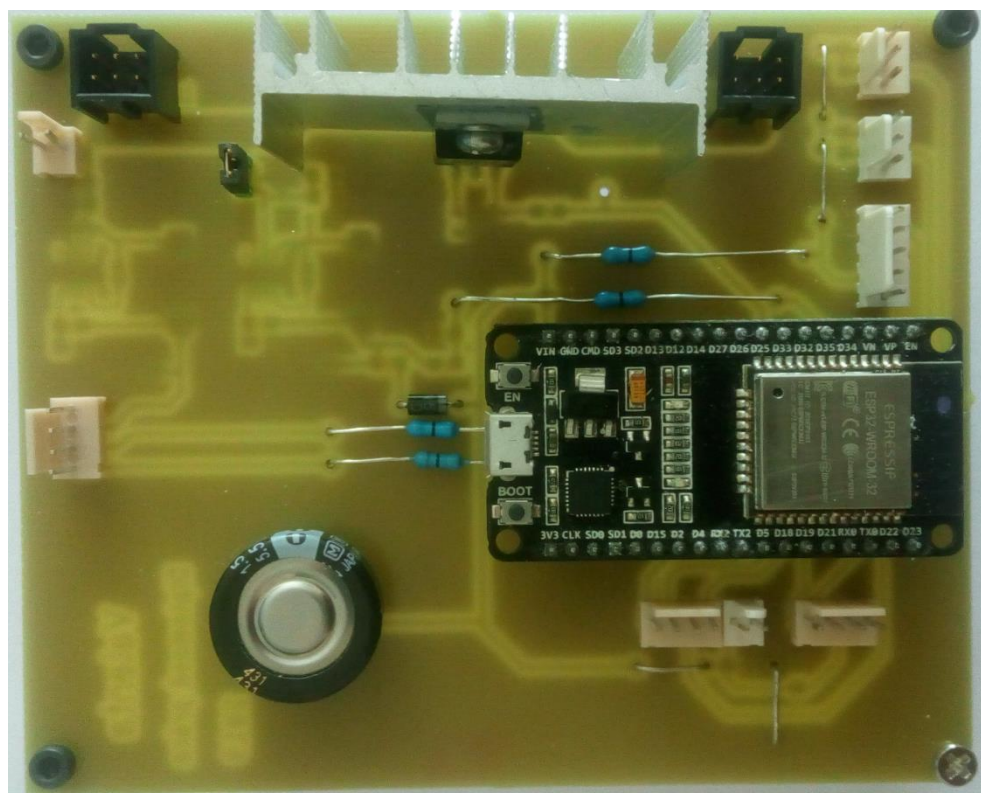
Příloha D – Tepelný box a DPS



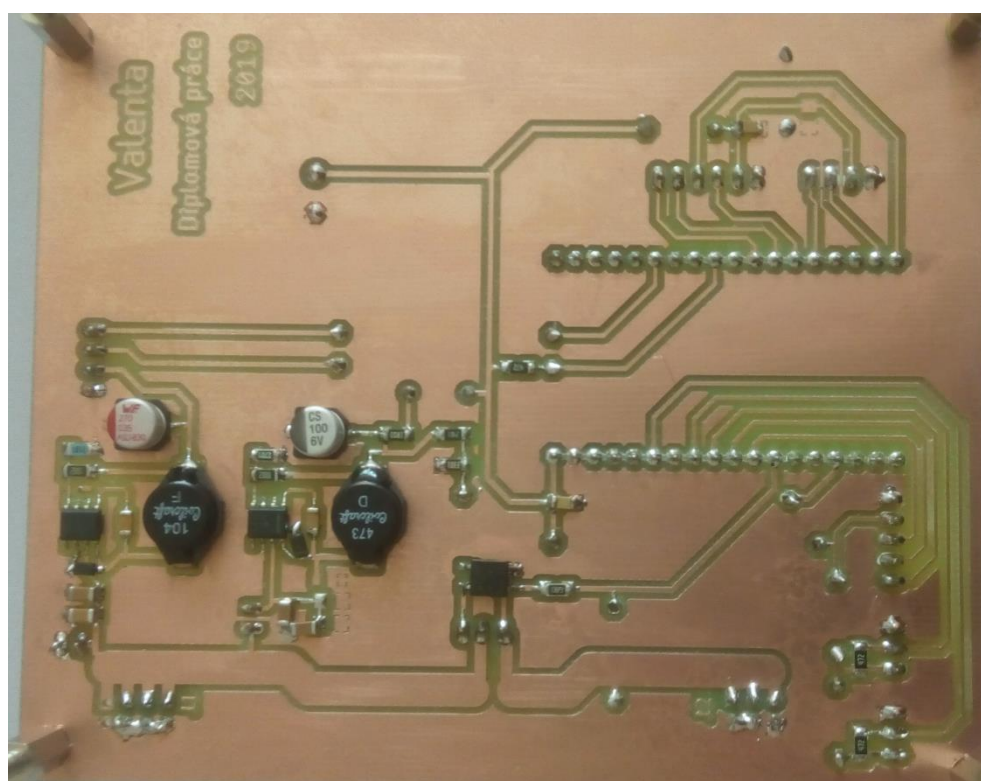
Obr. 62: Optická kontrola DPS mikroskopem (vlastní zdroj)



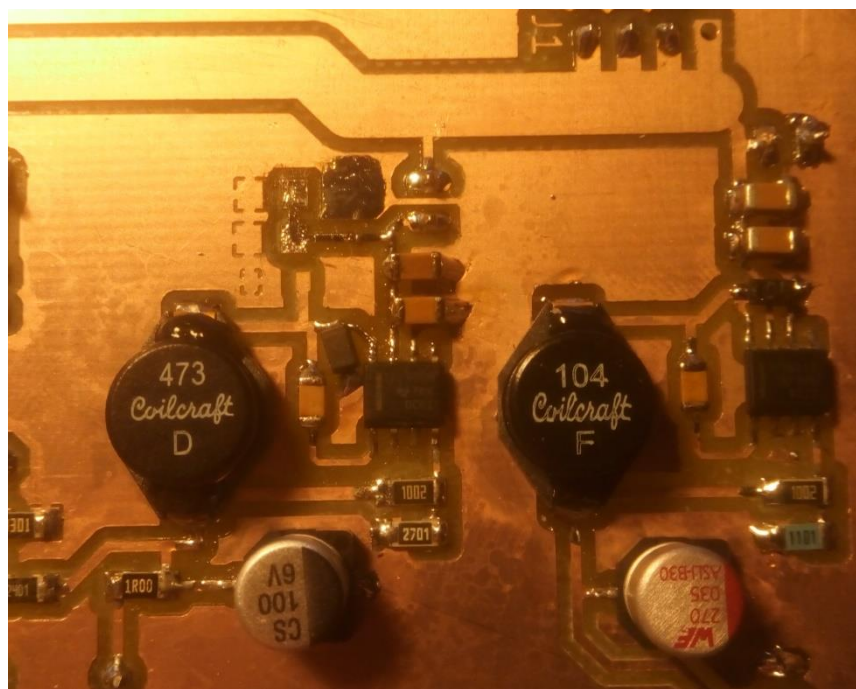
Obr. 63: Gerber DPS verze 2 (návrh V5) (zdroj vlastní)



Obr. 64: Osazení DPS verze 2 (BOT) (zdroj vlastní)



Obr. 65: Osazení DPS verze 2 (TOP) (zdroj vlastní)



Obr. 66: Spínané zdroje DPS verze 2 (zdroj vlastní)



Obr. 67: Provedení tepelného boxu (zdroj vlastní)



Obr. 68: Provedení tepelného boxu 2 (zdroj vlastní)

Příloha E – ThingSpeak

Zadané Hodnoty

Channel ID: 739387
 Author: vencav
 Access: Public

Private View Public View Channel Settings Sharing API Keys Data Import / Export

Write API Key

Key H4L909BX4LJ1EK7X

Generate New Write API Key

Read API Keys

Key SVTZJEFKDIGV1157

Note

Save Note Delete API Key

Generate New Read API Key

Help

API keys enable you to write data to a channel or read data from a private channel. API keys are auto-generated when you create a new channel.

API Keys Settings

- **Write API Key:** Use this key to write data to a channel. If you feel your key has been compromised, click **Generate New Write API Key**.
- **Read API Keys:** Use this key to allow other people to view your private channel feeds and charts. Click **Generate New Read API Key** to generate an additional read key for the channel.
- **Note:** Use this field to enter information about channel read keys. For example, add notes to keep track of users with access to your channel.

API Requests

Update a Channel Feed

GET https://api.thingspeak.com/update?api_key=H4L909BX4LJ1EK7X&field1

Get a Channel Feed

GET <https://api.thingspeak.com/channels/739387/feeds.json?results=2>

Get a Channel Field

GET <https://api.thingspeak.com/channels/739387/fields/1.json?results>

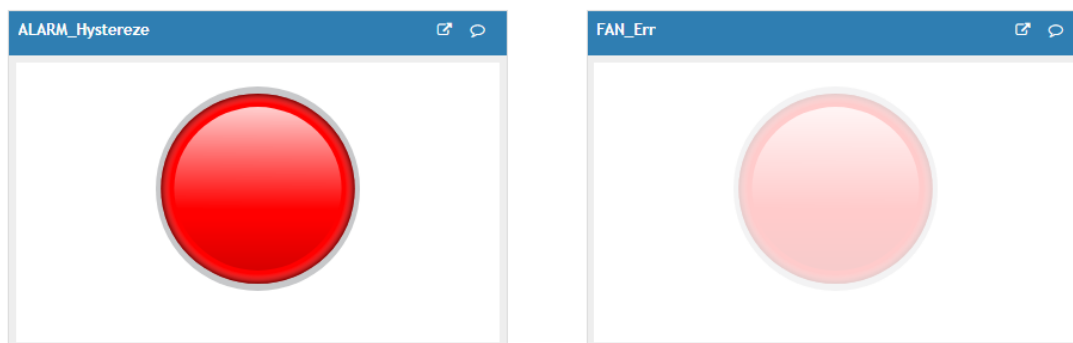
Get Channel Status Updates

GET <https://api.thingspeak.com/channels/739387/status.json>

Obr. 69: ThingSpeak Update a channel Feed (zdroj vlastní)



Obr. 70: Naměřená data ThingSpeak (zdroj vlastní)



Obr. 71: Indikátor teploty nacházející se mimo nastavenou hysterezi (Alarm) (zdroj vlastní)