



Střední průmyslová škola elektrotechnická Havířov,
Makarenkova1, Havířov, CZECH REPUBLIC
Zespół szkół technicznych, Rybnicka 44, Mikołów, POLAND

TEPLOTNÍ REGULÁTOR



Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union

Student: David Zimniok
Učitel: Ing. Božena Ralbovská

Student: Wojciech Habraszka
Učitel: Marek Olsza

Čestné prohlášení

Prohlašujeme, že tato práce - "Regulátor teploty" jsme vypracovali samostatně pod vedením učitelů a použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů citovaných v práci a uvedených na konci práce.

Datum

.....

Wojciech Habraszka

Datum

.....

David Zimniok

Abstrakt

Cílem této práce je vyvinout regulátor teploty sloužící jako školní demonstrační model. V práci je popsána celá teorie regulací potřebná pro pochopení problematiky. Dále práce rozebírá různé možnosti použití diskrétních součástek jako vyhřívacích tělísek. Také obsahuje vývojové diagramy s programem pro Arduino Mega pro naprogramování tohoto regulátoru. Dokumentace samozřejmě obsahuje schémata, simulace a návrhy desek plošných spojů potřebné ke kompletnímu sestavení oživení modelu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Regulátor teploty, proporcionálně integrační regulace, proporcionální regulace, dvojstavová regulace, demonstrační model, Arduino Mega

Abstract

The temperature regulator interests this project as a demonstrating model. There is all the theory need for basic understanding of the issue. There we mentioned most of the options for the heater element. Also, there are placed diagrams with the program for Arduino Mega to program this regulator. This documentation, of course, contains schematics and simulations of switching the transistor and pictures of printed circuits boards to make a final model.

KEYWORDS

Temperature regulator, proportional integrating regulation, proportional regulation, two-point regulation, school demonstrating model, Arduino Mega

Poděkování

Chtěli bychom začít tím, že poděkujeme našim učitelům, za řízení projektu a také poděkovat panu Mgr. Dariuszovi Jendrzejekovi za pomoc s mechanickou částí projektu a také panu Ing. Ladislavu Opiolovi za pomoc v elektronické části projektu.

Obsah

1 Úvod.....	13
2 Teoretická část.....	14
2.1 Analýza trhu	14
2.2 Teplotní regulace	15
2.2.1 Dvojbodová regulace	15
2.2.2 Proporcionální regulace	17
2.2.3 Proporcionálně integrační regulace	17
2.3 Teplotní čidlo.....	18
2.4 Pulzně šířková modulace.....	18
2.5 Vyhřívací těleso	19
2.5.1 Výkonový tranzistor	19
2.5.2 Odporový drát.....	20
2.5.3 Výkonový rezistor	20
2.5.4 Skupina výkonových rezistorů	21
2.6 Tranzistor.....	23
2.7 Komůrka pro simulaci	25
2.8 Chlazení.....	26
2.9 Rotační enkóder.....	26
3 Finanční analýza	27
4 Praktická část	28
4.1 Programovací jazyk.....	28
4.2 Zdrojový kód	28
4.2.1 Main menu	28
4.2.1.1 Funkce setval	29
4.2.1.2 Menu funkce	29
4.2.2 Dvojbodová regulace – programové řešení	31
4.2.3 Proporcionální regulace – programové řešení	33
4.2.4 Proporcionálně integrační regulace – programové řešení	35
4.2.5 Interface	37
4.2.5.1 Arduino Interface	37
4.2.5.2 Nastavení sítě	38
4.2.5.3 Webový interface	38
4.2.5.4 Výstupní – měřicí soubor.....	39
4.2.5.5 Přenos měřících souborů.....	39
4.3 Hardwarové řešení.....	40
4.3.1 Mikrokontrolér.....	40
4.3.1.1 Arduino pinout	40
4.3.1.2 Konektor pro přední indikační panel	41
4.3.1.3 Konektor pro vyhřívací komůrku	41
4.3.1.4 DPS	42
4.3.1.5 Realizace	43
4.3.2 Vyhřívací a chladicí okruh.....	44
4.3.2.1 Napájecí zdroj	44
4.3.2.2 DPS pro komůrku	45
4.3.2.3 DPS	46
4.3.2.4 Realizace	47
4.3.3 Kontrolní panel.....	48
4.3.3.1 DPS	49
4.3.3.2 Realizace	50

5 Komůrka a kryt pro mikrokontrolér	51
5.1 Kryt pro mikrokontrolér	51
5.2 Komůrka	52
5.3 Kryt pro napájecí zdroj	54
6 Kontrolní měření	55
6.1 Dvojbodová regulace	55
6.2 Proporcionální regulace	56
6.3 Proporcionálně integrační regulace	57
7 Identifikace soustavy	59
7.1 Kontrola správnosti konstant	61
7.1.1 Proporcionální regulace	61
7.1.2 Proporcionálně integrační regulace	62
8 Finální model	63
8.1 Kontrolér regulátoru	63
8.2 Komůrka s vyhřívacím tělesem	64
8.3 Program regulátoru	65
9 Závěr	66
10 Reference	67
11 Seznam použitých zkratk	69
12 Seznam tabulek	71
13 Seznam obrázků	73
14 Seznam použitých výňatků ze zdrojového kódu	75
15 Přílohy	77

1 Úvod

Tento projekt vzniká v rámci spolupráce mezi polskými a českými studenty a učiteli. Naším cílem je vybudovat teplotní regulátor, který dokáže demonstrovat 3 základní typy regulací. Těmi typy jsou: dvojbodová regulace, proporcionální regulace a proporcionalně integrační regulace.

Během realizace našeho cíle budeme používat dnes populární platformu Arduino Mega. Tato platforma obsahuje procesor ATmega2560, 54 vstupně-výstupních pinů, z toho 15 je možno použít jako zdroj signálu PWM.

Rozšířením této platformy můžou být shiely. My budeme využívat 2 shiely zároveň. První bude ethernet shield, který umožní Arduinu komunikovat přes internet, nebo vytvořit například z Arduina server. Dalším shieldem je TFT LCD display, pro zobrazení informací o běhu programu. Oba shiely obsahují slot na SD kartu, včetně ovladače.

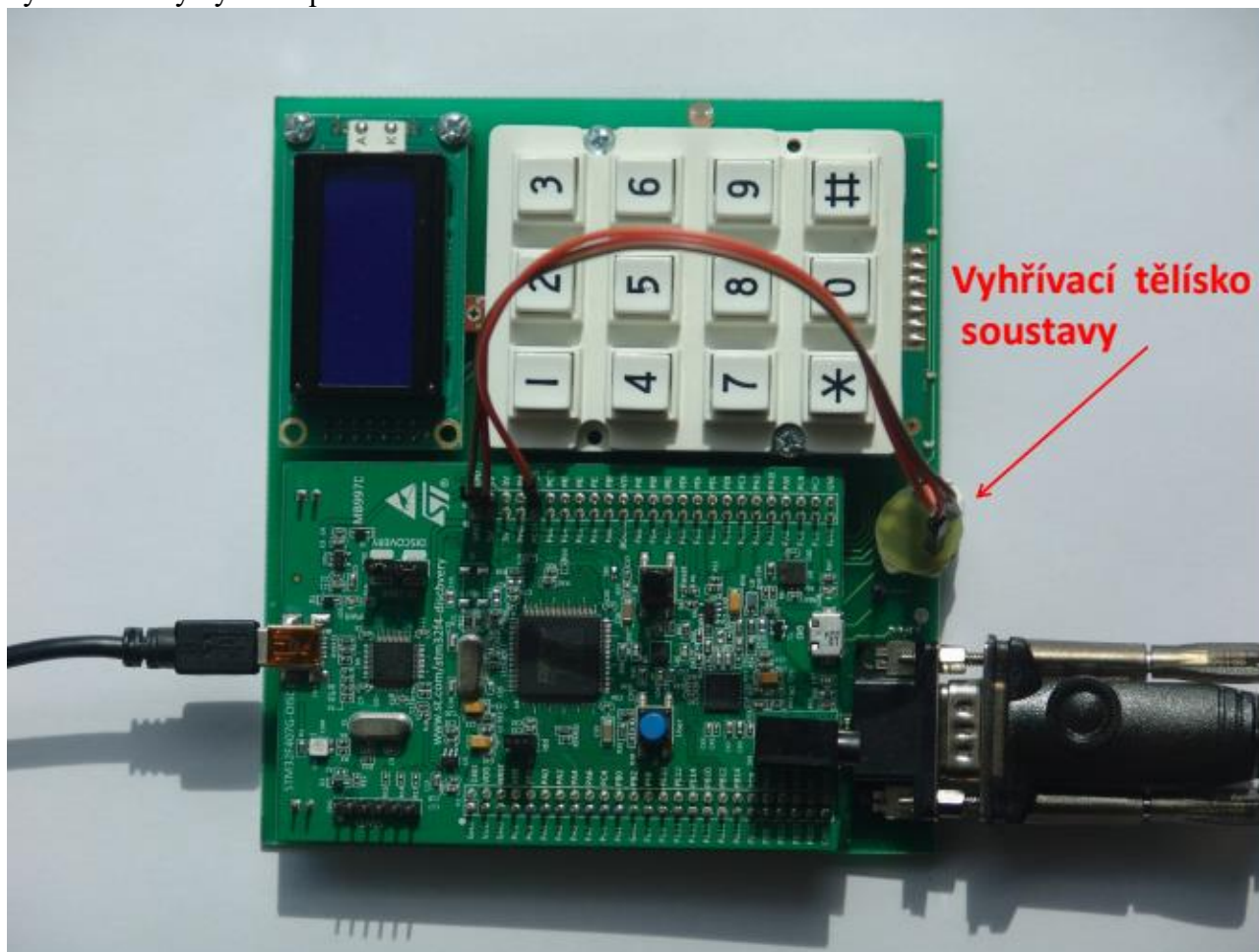
Protože tento model má mít využití jako demonstrační, jsou na něj kladeny následující požadavky: musí být malý, lehký ale také jednoduchý na obsluhu. Toto je důvod proč nepoužíváme některé velké shiely, nebo jiná rozšíření. Potřebujeme pouze některé funkce, z těch, co většinou obsahují, a nepotřebné části by nám zbytečně překážely.

2 Teoretická část

K vytvoření modelu určeného k demonstraci, musíme dbát několika zásad. Velikost, určitě je jeden z faktorů, který rozhoduje o tom, jak často bude regulátor využíván. Pokud model bude příliš velký, bude se špatně přenášet. Naopak, zase studenti na model neuvidí, a nebude je to zajímat. Dále by celý systém měly tvořit dvě části: kontrolér a také vyhřívací komůrka. Z časových důvodů (vyučovací hodina – 45 minut), regulace by měla trvat co nejkratší možnou dobu. Pokud doba bude příliš krátká, regulace bude příliš rychlá a výsledky nejasné.

2.1 Analýza trhu

Když jsme se snažili na trhu jak českém, tak i zahraničním najít podobný model, museli jsme ukončit snažení s negativním výsledkem. Nenašli jsme žádný produkt podobný této koncepci. Samozřejmě jsme našli klasické regulátory, u nich není možnost demonstrace, připojují se k funkčnímu systému. V rámci výuky se využívá na naší škole (české) model, naprogramovaný na vývojové desce s mikroprocesorem ARM. Protože se jedná o model, který by měli studenti naprogramovat během dvouhodinového cvičení a následně odladit, je u něho vysoká regulační odchylka způsobena otevřeným designem – přirozeným chlazením. Dále řešení postrádá interface pro kontrolu (pouze LCD display a COM port). Teploty dosažené touto regulací nejsou příliš vysoké – malý výkon topného tělesa.



Obrázek 1 – Školní model regulátoru

2.2 Teplotní regulace

Hlavní myšlenkou regulování teploty v místnosti je udržení konstantní teploty. Abychom dosáhli tohoto výsledku máme více typů regulací, ale tato práce popisuje pouze 3 nejzákladnější. Všechny regulace mají tyto společné proměnné:

Tabulka 1 – Seznam proměnných používaný u všech typů regulací

Název proměnné	Symbol	Výpočet
Nastavená teplota	w	Nastavena uživatelem
Naměřená teplota	y	Měřená senzorem
Regulační odchylka	e	$e=w-y$
Akční veličina	u	Závislá na typu regulace



Obrázek 2 – Blokové schéma teplotního regulátoru

2.2.1 Dvojbodová regulace

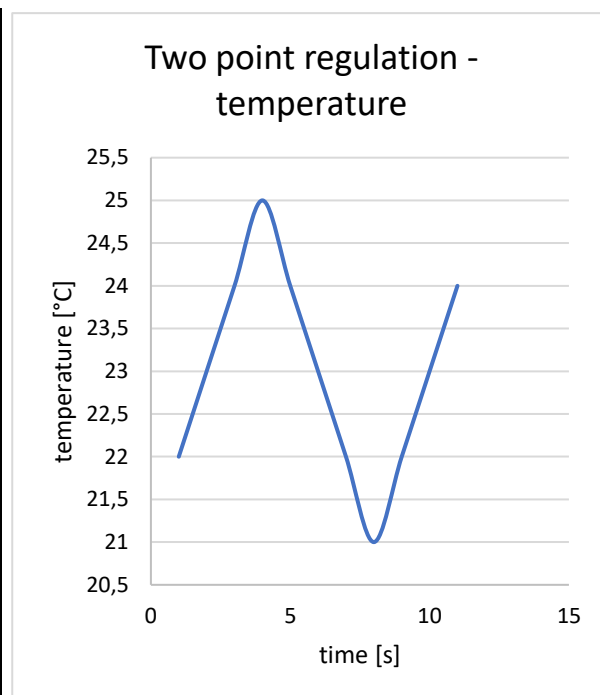
Dvojbodová (ON/OFF) regulace je nejjednodušší typ regulace. Akční veličina nabírá pouze dva stavy – zapnuto a vypnuto. Abychom mohli tuto regulaci nastavit, potřebujeme 2 proměnné – uživatelem nastavenou teplotu a hysterezi. Princip regulace je jednoduchý, pokud naměřená teplota je vyšší než nastavená teplota, vypneme topení. Topení znovu zapneme, když teplota v místnosti klesne po nastavenou teplotu minus hysterezi. Pro zjednodušení, jsme vytvořili jednoduchý graf.

Pro tento typ regulace platí:

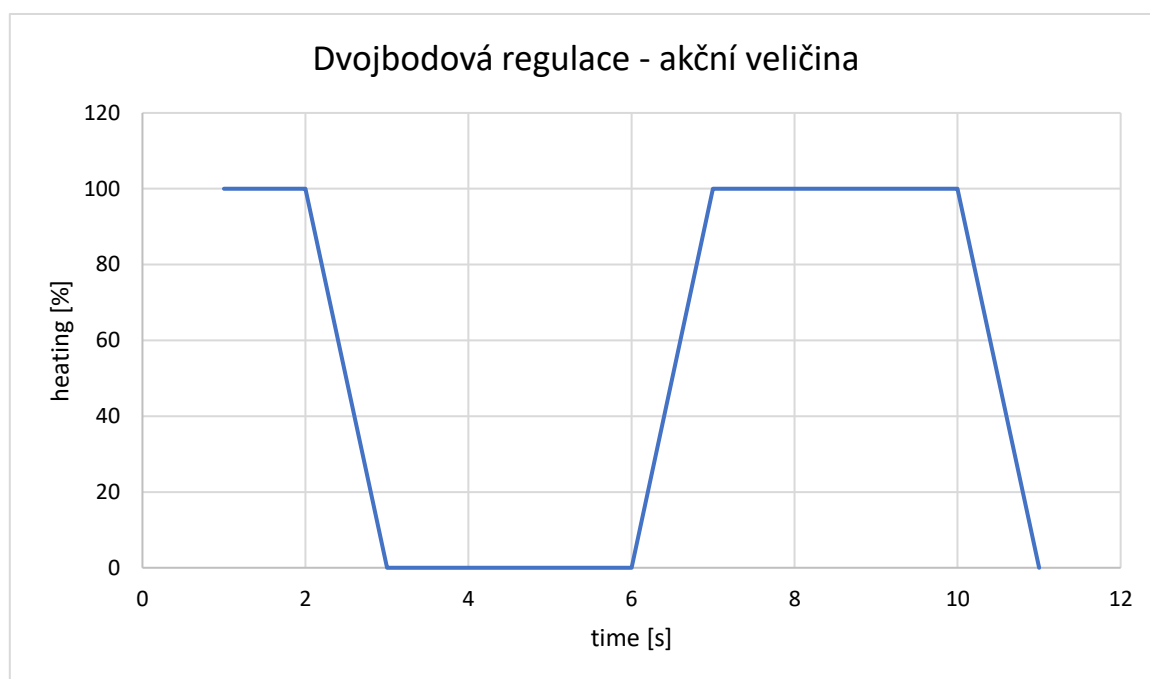
$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{když } e > 0 \\ u_{min} & \text{když } e < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Tabulka 2 – Dvojbodová regulace (teorie)

Nastavená teplota = 24 °C		Hystereze = 2 °C	
Čas [s]	Měřená teplota [°C]	Regulační odchylka [°C]	Akční veličina [%]
1	22	2	100
2	23	1	100
3	24	0	0
4	25	-1	0
5	24	0	0
6	23	1	0
7	22	2	100
8	21	3	100
9	22	2	100
10	23	1	100
11	24	0	0



Obrázek 3 – Časová závislost teploty u dvojbodové regulace (teorie)



Obrázek 5 – Časová závislost akční veličiny u dvojbodové regulace (teorie)

2.2.2 Proporcionální regulace

Proporcionální regulace (P regulace), zesiluje regulační odchylku. Protože je tento typ regulace specifický a na něm je založen i třetí typ regulace dovolíme si uvést tabulku proměnných znovu.

Table 3 – Seznam použitých proměnných v proporcionální regulaci

Název proměnné	Symbol	Výpočet
Nastavená teplota	w	Nastavena uživatelem
Naměřená teplota	y	Měřená senzorem
Regulační odchylka	e	$e=w-y$
Akční veličina	u	Závislá na zesílení
Zesílení regulátoru	K	Nastavena technikem
-	u_b	$u_b=(u_{min}+u_{max})/2$

Pokud budeme zvětšovat zesílení regulátoru, regulační odchylka se bude zmenšovat. Musíme dbát na to, abychom regulátor nerozkmitali. Konstanta u_b nám dovolí vynulovat regulační odchylku. Pokud je regulační odchylka příliš velká, regulátor začne pracovat jako dvojbodový.

$$u = \begin{cases} u_{max} & \text{když } Ke + u_b > u_{max} \\ Ke & \text{když } Ke + u_b \in \langle u_{min}, u_{max} \rangle \\ u_{min} & \text{když } Ke + u_b < u_{min} \end{cases} \quad (2)$$

2.2.3 Proporcionálně integrační regulace

Proporcionálně integrační regulace (PI regulace), je kombinací proporcionální a integrační. Výhodou je, že regulační odchylka se nuluje automaticky.

$$u(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau \right] \quad (3)$$

Protože PI regulace využívá integrace, kterou aritmeticko-logická jednotka procesoru není schopna provést, musíme převést integraci do diskretní formy. Rovnice PI regulace v diskretním tvaru – rovnice číslo 4.

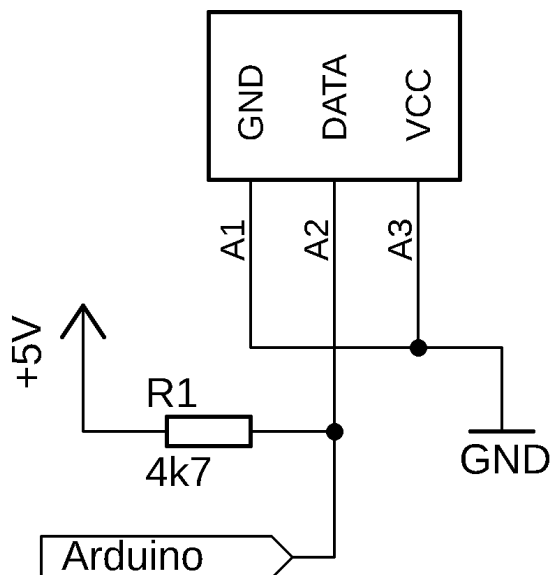
$$u = u_0 - Ke_0 + (T\tau + K)e \quad (4)$$

Tabulka 4 – Seznam přidáných proměnných pro PI regulaci

Název proměnné	Symbol	Výpočet
Minulá akční veličina	u_0	Uložení minulé hodnoty
Minulá regulační odchylka	e_0	Uložení minulé hodnoty
Integrační časová konstanta	τ	Nastavena technikem
Čas	T	Čas mezi dvěma měřeními

2.3 Teplotní čidlo

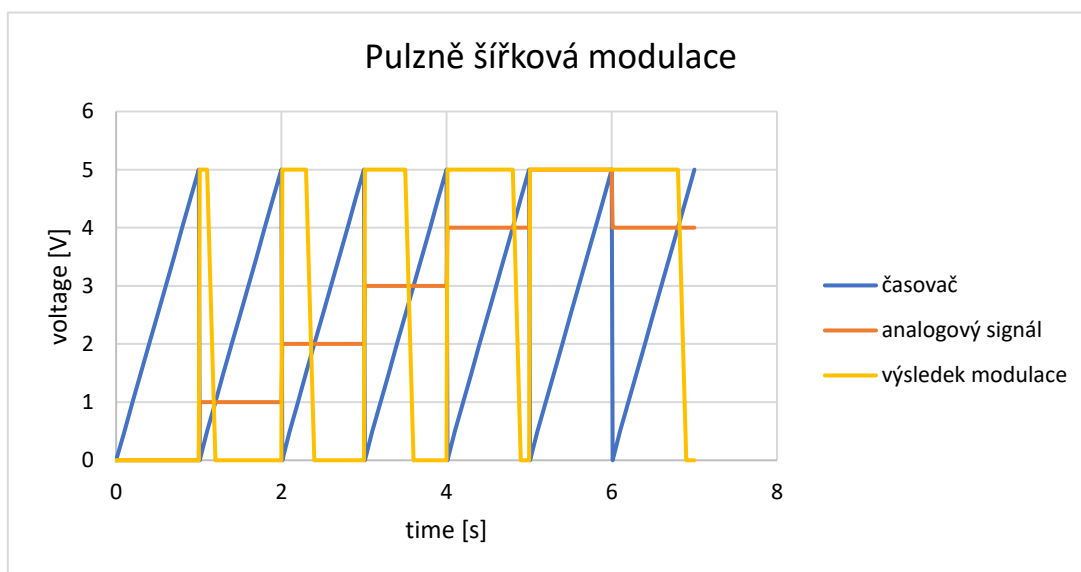
Pro měření teploty jsme z nabídky číslcových senzorů vybrali senzor DS18B20. Senzor dokáže komunikovat pouze přes 1 vodič, je napájený 5 V, a protože je číslcový, nezkrsluje měření při výkyvech nebo poklesu napájecího napětí. Při každém měření senzor vyšle na sběrnici 16 bitů. Díky tomu, senzor je velice přesný. Senzor měří od -55 °C do 125°C. Pro správnou funkci je nutné připojit pull up rezistor.



Obrázek 7 – schema zapojení senzoru DS18B20

2.4 Pulzně šířková modulace

Z angličtiny PWM (Pulse Width Modulation). Jednoduchá modulace, kde velikost napětí na vstupu modulátoru, představuje délku logické jedničky na výstupu. Arduino využívá frekvence signálu PWM 500 Hz. Časovač generuje pilový průběh, a logická jednička je tam, kde amplituda vstupního signálu je menší, jako okamžitá hodnota pilového průběhu. Pokud je hodnota na vstupu 0, signál PWM představuje logickou 0.



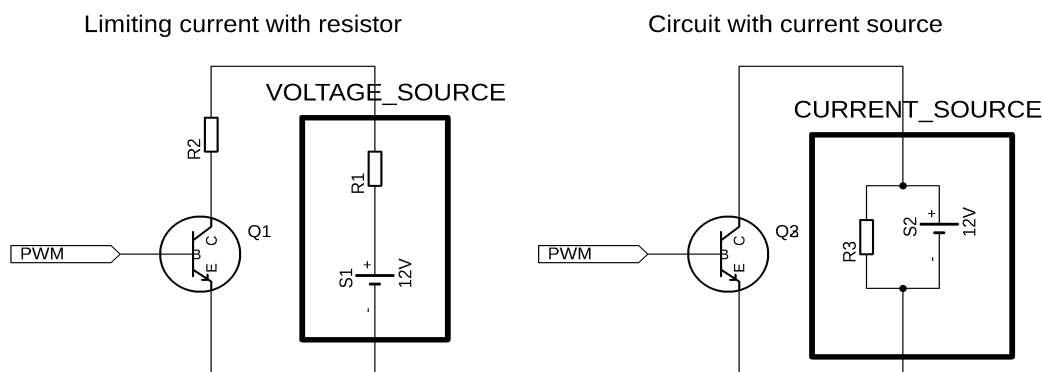
Obrázek 8 – Pulzně šířková modulace

2.5 Vyhřívací těleso

Pro rychlost testování regulátoru, by se mělo vyhřívací těleso nahřát během 5 minut na 50 °C a ideálně by při maximálním topném výkonu nahřát na 70°C. Z praxe víme, že většina elektronických součástek vytvoří teplo v závislosti na procházejícím proudu. Protože se v praxi často řeší teplo vyzářené polovodičovými součástkami, začali jsme zkoušet výkonové tranzistory. Další možností, co nás napadla, bylo použití odporu s nízkou hodnotou pro omezení proudu ze zdroje ale, také tím odporem bude procházet veliký proud. Protože je při teplotní regulaci důležité i ochlazování tělesa, po pár testech jsme našli optimální řešení – skupinu výkonových rezistorů.

2.5.1 Výkonový tranzistor

Použití výkonového tranzistoru bylo výhodné, díky jeho ohřívání, ale chlazení trvalo příliš dlouho. Další problém, který bylo nutné vyřešit, byl odebíraný proud ze zdroje. K omezení tohoto proudu jsme mohli využít nebo rezistor, ale na něm vznikne úbytek napětí, který vyvolá ohřívání rezistoru, nebo můžeme použít proudový zdroj.



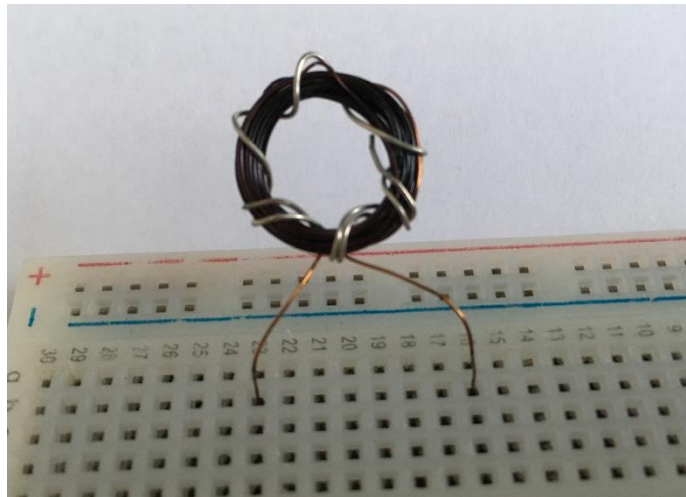
Obrázek 9 – Výkonový tranzistor jako ohříváč



Obrázek 10 – Výkonový tranzistor s chladičem

2.5.2 Odporový drát

Další možností ohřívání bylo využití odporového tělesa. Tato metoda je výhodná díky rychlosti ochlazování, ale ohřívání drátu není tak rychlé jak bychom potřebovali. Urychlit to můžeme vytvořením cívky z tohoto drátu, ale při ohřátí na vyšší teplotu, se začne nevodivý lak na drátu propalovat a tím vznikne zkrat.



Obrázek 11 – Cívka z odporového drátu

2.5.3 Výkonový rezistor

Princip použití rezistoru je velice jednoduchý. Jak víme, na každém prvku v obvodu vzniká úbytek napětí. Tento úbytek napětí způsobí ztáty, které se projeví ohříváním prvku.

Pro demonstraci jsme použili 2 rezistory:

- 15Ω , 10 W
- 6Ω , 50 W

Proud procházející rezistory jsme schopni spočítat z Ohmova zákona, pokud budeme uvažovat napájecí napětí za konstantní (12 V) – rovnice č. 5-7.

$$I = \frac{U}{R} \quad (5)$$

$$I_{15} = \frac{12}{10} = 1,2[A] \quad (6)$$

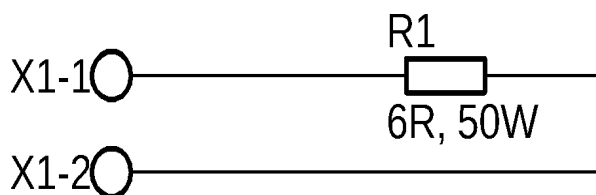
$$I_6 = \frac{12}{6} = 2[A] \quad (7)$$

Pokud známe proud jsme schopni vypočítat výkon těles – rovnice 8-10

$$P = U * I \quad (8)$$

$$P_{15} = 12 * 1,2 = 14,4[W] \quad (9)$$

$$P_6 = 12 * 2 = 24[W] \quad (10)$$



Obrázek 12 – Výkonový rezistor jako ohříváč

Z těchto výpočtů vidíme, že výkon, který se ztratí na rezistorech (vytvoří teplo), je dostatečně malý proto, abychom nepřetěžovali rezistory.

Z nabídky obchodů s elektronikou víme, že tyto výkonové rezistory jsou vyráběny pouze v keramickém pouzdru nebo přímo integrované v chladiči. Toto způsobuje dlouhou dobu nahřívání i chlazení.



Obrázek 13 – Rozdíl obalů výkonových rezistorů – oranžový 50W, bílý 5W

2.5.4 Skupina výkonových rezistorů

Hlavní myšlenkou u tohoto zapojení bylo, že při jednom rezistoru, potřebujeme čas x pro nahřátí a čas y pro vychlazení jednoho rezistoru. Ale pokud zapojíme například 4 výkonové rezistory paralelně tak, aby výsledný odpor paralelního zapojení rezistorů byl roven odporu jednoho původního rezistoru, tak čas pro chlazení se sníží, protože budeme chladit z nižší teploty.

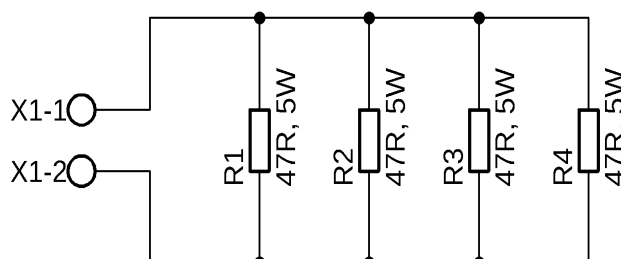
$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} \right)^{-1} = \left(\frac{4}{47} \right)^{-1} = 11,75[R] \quad (11)$$

Přes tento odpor bude procházet proud I :

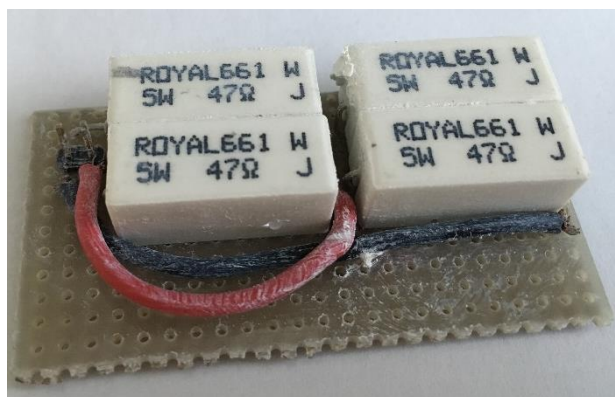
$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{11,75} \doteq 1[A] \quad (12)$$

Protože všechny rezistory mají stejnou hodnotu, proud se na nich rozloží:

$$I_1 = I_2 = I_3 = I_4 = \frac{I}{4} = \frac{1}{4} = 0,25[A] \quad (13)$$



Obrázek 14 – Schéma vyhřívacího tělesa se 4 rezistory



Obrázek 15 - 4 keramické paralelně zapojené rezistory

Tato teorie se ukázala po pár testech pravdivou, ale pořád doba chlazení byla příliš dlouhá, protože keramický obal rezistoru má vysokou tepelnou setrvačnost. Usoudili jsme, že můžeme zvýšit proud protékající tělískem a to tak, že snížíme celkový odpor tělíska.

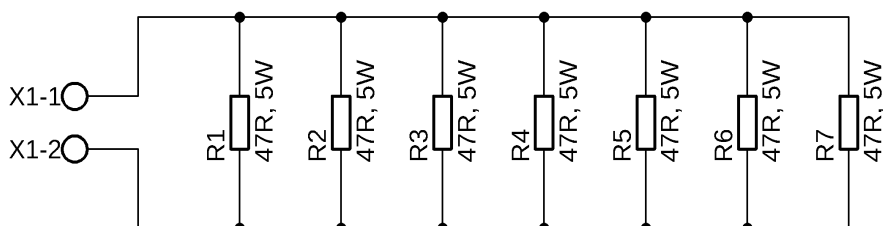
Protože jak jsme již zmiňovali výše, keramický obal má vysokou teplotní setrvačnost, zkusili jsme jiný materiál. Vybrali jsme snadno dostupné uhlíkové pouzdro. Nejdříve jsme testovali pouze na 1 rezistoru, jestli se doba chlazení a ohřívání sníží. Doba se opravdu snížila, co činí tento typ rezistoru velice efektivním.

Protože jsme chtěli zvětšit procházející proud, snížili jsme odpor paralelním zapojením 7 47Ω rezistorů dimenzovaných na 5 W.

$$R = \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} + \frac{1}{R_6} + \frac{1}{R_7} \right)^{-1} = \left(\frac{7}{47} \right)^{-1} \doteq 6,7[R] \quad (14)$$

$$I = \frac{U}{R} = \frac{12}{6,7} \doteq 1,79[A] \quad (15)$$

$$P = U * I = 12 * 1,79 \doteq 21,48[W] \quad (16)$$



Obrázek 16 – Skupina výkonových rezistorů

Po pár hardwarových testech víme, že máme topné tělísko, které se dokáže nahřát na více než 70 °C během 5 minut.



Obrázek 17 – První model vyhřívacího tělesa pro hardwarové testy

2.6 Tranzistor

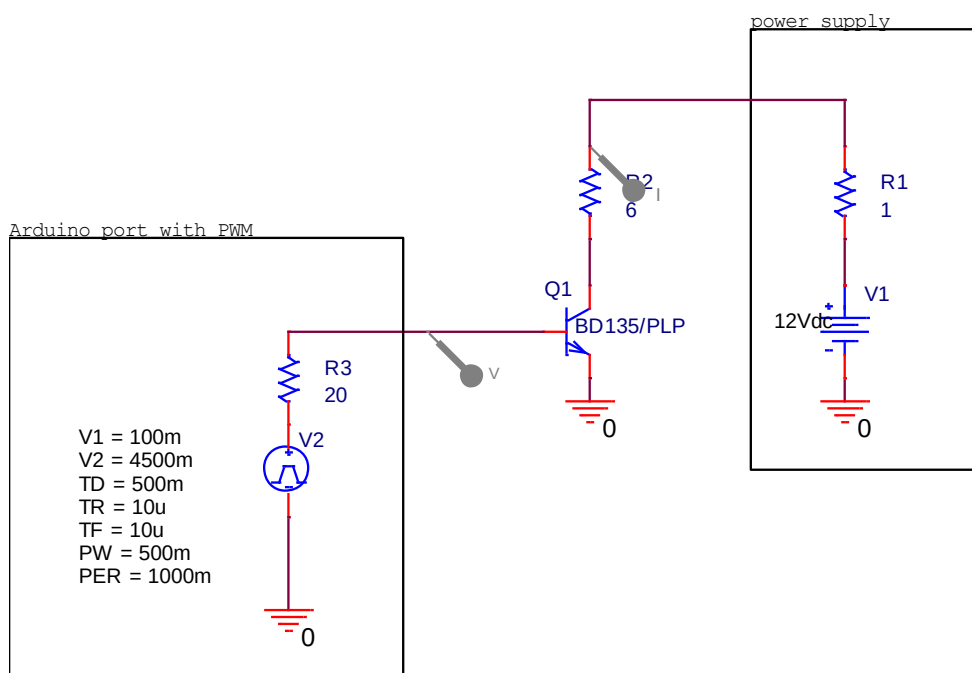
Rozhodli jsme regulovat vyhřívání pomocí signálu PWM. Protože budeme spínat velký proud musíme si vybrat mezi spínacím relé a výkonovým tranzistorem. Spínací relé má omezený počet sepnutí za minutu. Z datasheetu víme že frekvence signálu PWM vycházejícího z Arduina je přibližně 500 Hz. Pro standartní relé by tato frekvence byla problematická. Tranzistor má samozřejmě také své nevýhody, ale pro naše použití je ideální. Frekvence 500 Hz nečiní tranzistorův problém. Odpor vyhřívacího tělesa bude sloužit jako omezení proudu. Našli jsme tranzistor BD139, který má dle katalogových údajů kolektorový proud 1,5A a v pulzním režimu až 3 A.

Tabulka 5 - Parametry tranzistoru BD 139

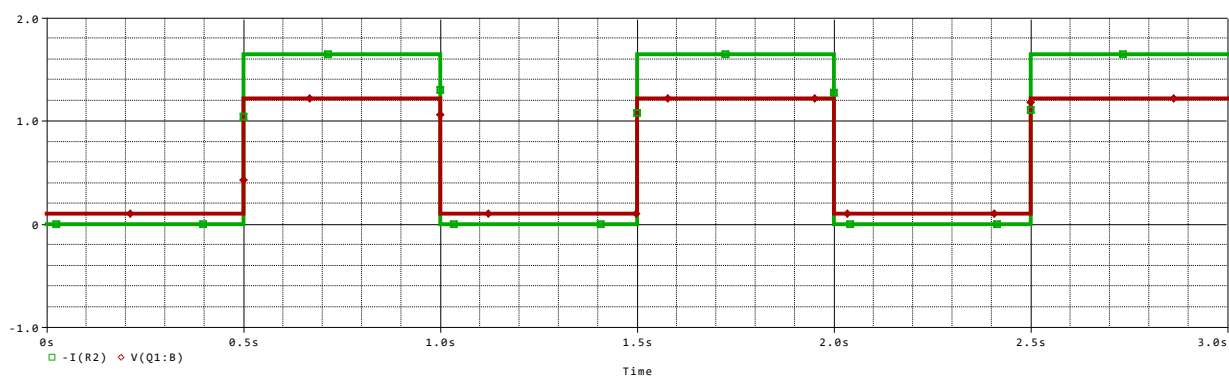
I_C	1,5A
I_{CM}	3 A
P_{TOT}	12,5W
V_{CEO}	80 V
V_{CBO}	80 V
h_{21E}	100-250

Zdroj: katalogový list, <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00001225.pdf>

Jak jsme již vypočetli v rovnici číslo 15, maximální proud procházející přes vyhřívací těleso je 1,79A. Tranzistor má v katalogovém listu uvedeno maximální proud ve spínacím režimu 3 A čili tento tranzistor je ideální jak pro spínání chladicího okruhu, tak i pro okruh vyhřívací. Odběr ventilátoru je mnohonásobně nižší než odběr topného tělesa.



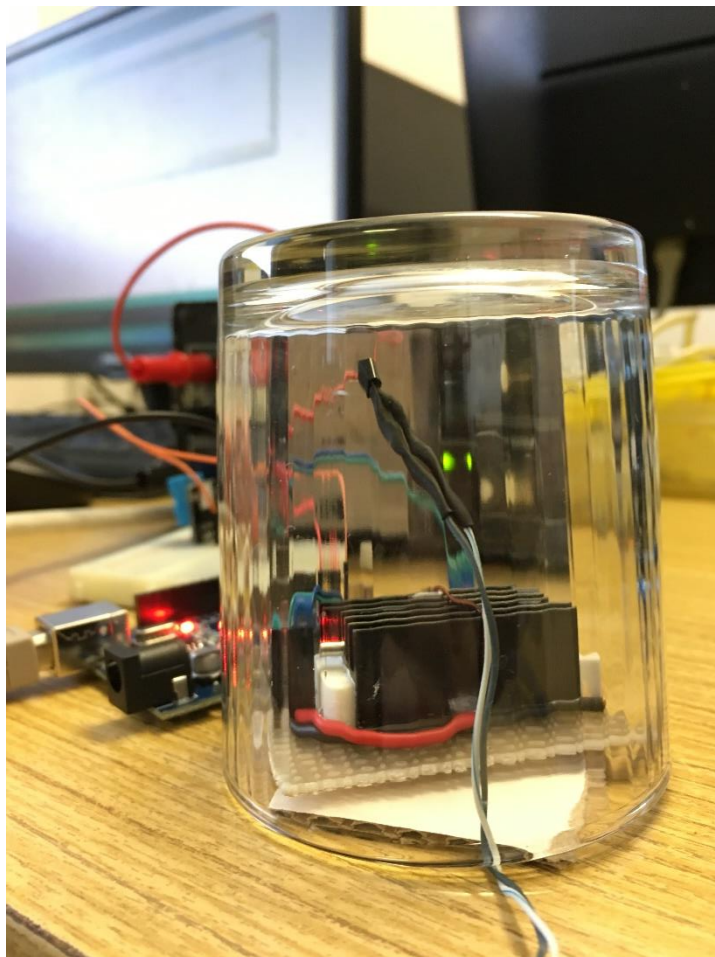
Obrázek 18 – Topné těleso se spínacím tranzistorem



Obrázek 17 – Simulace spínání tranzistoru v obvodě na obrázku číslo 17

2.7 Komůrka pro simulaci

Výsledný model bychom měli designovat tak, aby byl použitelný jako školní demonstrační pomůcka. Z toho důvodu musíme dbát na to, aby vše bylo bezpečné, a proto jsme zvolili uzavřený design. Sice regulace bude pomalejší v porovnání s otevřeným designem, kde se obvod chladí přirozeně. Po prvních hardwarových testech víme, že komůrka nesmí být menší jak 200 ml, ale také nesmí být příliš velká. V případě, že komůrka bude příliš malá regulace bude příliš rychlá, v opačném případě se bude regulační obvod sice chovat jako s přirozeným chlazením, ale po pár měřeních bude nemožné komůrku vychladit.

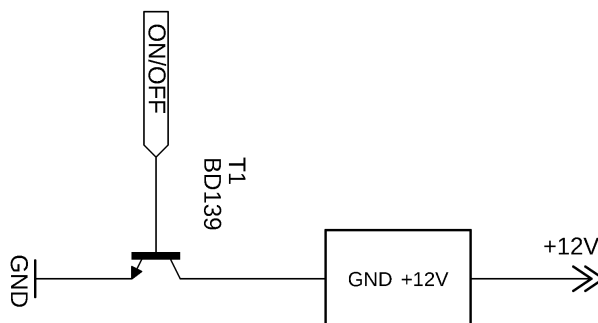


Obrázek 19 – První hardwarové testy s 4 rezistorami a chladičem, komůrka (200ml, sklo)

Z důvodu, že teplota uvnitř může snadno překročit 100 °C, musíme vybrat tepelně odolný materiál. Toto je důvod, proč jsme netiskli na 3D tiskárně (sice teplota tavení ABS je kolem 250 °C, ale již při 100 °C měkne), a vybrali jsme hotový instalační box s parametry: 85x160x80 mm (výška, šířka, hloubka), s transparentním víkem.

2.8 Chlazení

Pro zkrácení času mezi měřeními jsme do obvodu přidali ventilátor pro chlazení. Obvod je jednoduchý – 1 tranzistor, zdroj a ventilátor. Navíc jsme přidali mikroprocesorově spínanou LED diodu pro indikaci chlazení. Při zařazení chladicího okruhu, do hlavního měření, je sice měření rychlejší, ale naměřené křivky nejsou jednoznačné. Ventilátor spínáme po skončení každého měření.

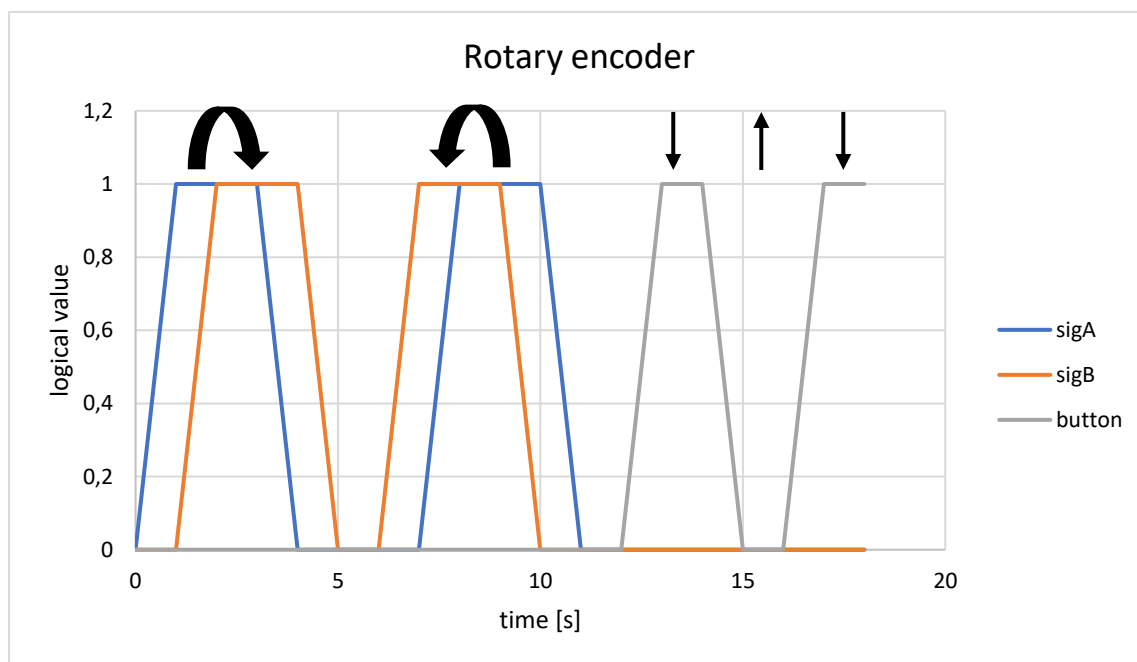


Obrázek 20 – Obvod pro chlazení

2.9 Rotační enkóder

Hlavní myšlenkou tohoto projektu je ukázat rychle a jednoduše různé typy regulací. Proto jsme zvolili rotační enkóder k ovládání celého zařízení. Dle našeho názoru je to jednodušší než zadávat požadovanou teplotu na klávesnici, nebo také dvěma tlačítky.

Pro čtení dat z rotačního enkóderu využijeme pouze 3 piny. První dva piny nám signalizují otočení doprava/doleva. Třetí pin nám signalizuje zmáčknutí tlačítka integrovaného v enkóderu. Viz obrázek 21.



Obrázek 21 – Reakce enkóderu na otáčení nebo zmáčknutí

3 Finanční analýza

Ceny byly přepočteny dle kurzu ČNB dne 5.3.2019

1 CZK = 0,039 €

1 PLN = 0,23 €

Tabulka 6 – Rozpočet					
Název dílu	Počet ks	Obchod	Kód	Cena/ks	Celkem
Arduino Mega precizní klon	1	aruino-shop.cz	1423598706	29,70 €	29,70 €
TFT display	1	laskarduino.cz	LA141016	15,30 €	15,30 €
Arduino ethernet shield	1	laskarduino.cz	LA110002	11,24 €	11,24 €
Rotační enkóder	1	gme.cz	775-029	2,70 €	2,70 €
Rezistor 47R, 5 W	7	elfax.cz	A0283T	0,24 €	1,68 €
Rezistory 330R	4	gme.cz	119-416	0,04 €	0,16 €
Zelná LED dioda	2	farnell.com	2112108	0,15 €	0,30 €
Červená LED dioda	1	farnell.com	2843622	0,22 €	0,22 €
Žlutá LED dioda	1	farnell.com	2112109	0,24 €	0,24 €
Konektor do DPS 8x2	4	elfax.cz	F07010	0,31 €	1,24 €
Konektor na kabel 8x2	4	gme.cz	800-009	0,43 €	1,72 €
Piny do DPS 18x2	1	gme.cz	832-035	0,24 €	0,24 €
Tranzistor BD139	2	farnell.com	2453823	0,33 €	0,66 €
Svorkovnice (šroubek)	2	gme.cz	841-154	0,16 €	0,32 €
Ventilátor	1	gme.cz	625-273	2,30 €	2,30 €
Napájecí zdroj 12 V, 3 A	1	farnell.com	2815984	19,50 €	19,50 €
Fotocitlivá DPS	1	farnell.com	1267744	4,77 €	4,77 €
Box pro kontrolér	1	bns-sp-z-oo.business.site	G3122	11,66 €	11,66 €
Box pro vyhřívací těleso	1	bns-sp-z-oo.business.site	G3634	16,33 €	16,33 €
Plochý kabel	2	farnell.com	301930	1,68 €	3,36 €
Napájecí kabel	1	farnell.com	1124386	7,21 €	7,21 €
DS18B20	1	farnell.com	2515553	2,34 €	2,34 €
Celková cena					s

4 Praktická část

Hardware je jednou z částí našeho projektu. I přes to jsme začali vývojem zdrojového kódu a následně s prvním testováním jednotlivých částí. Nakonec jsme sestavili kompletní projekt.

4.1 Programovací jazyk

Pro programování Arduina, jsme použili k tomu určené prostředí Arduino IDE, a s ním jazyk Wiring. Tento jednoduchý jazyk je postavený na jazyku C. Výhodou je, že pro tento jazyk je vytvořeno mnoho veřejných knihoven.

Pro náš program využijeme následující knihovny:

- OneWire.h – pro komunikaci se senzorem DS18B20
- DallasTemperature.h – pro čtení ze senzoru DS18B20
- Adafruit_GFX.h – pro vykreslování bitmap na TFT displeji
- Adafruit_TFTLCD.h – funkce pro TFT display
- SPI.h – pro komunikaci přes sběrnici SPI
- SD.h – funkce pro SD kartus
- Ethernet.h – funkce pro ethernet shield

4.2 Zdrojový kód

Kompletní program má desítky funkcí, ale chceme zde popsat ty stěžejní. V následujících částech není umístěný kompletní zdrojový kód ale pouze výňatek potřebný k pochopení problematiky. Kompletní zdrojový kód se nachází v příloze této dokumentace.

4.2.1 Main menu

Funkce pro vykreslení hlavního menu je kombinací funkcí ze základní knihovny pro TFT display a prosté práce s polem.

4.2.1.1 Funkce setval

Funkce komunikující s rotačním enkóderem a odečítající hodnoty.

```
float setval(float value, float mn, float mx, float inc){
    s = digitalRead(enc_a);           //čti hodnotu z sigA
    if ((e_l == LOW) && (s == HIGH)) { /*testování - je sigA_last roven 0 a sigA
    roven 1 - vylučuje vícekrát odečtení/přičtení při jednom pulzu*/
        if (digitalRead(enc_b) == LOW) { //testování pokud sigB rovno 0 odečti
            value=value-inc;
        }
        else {
            value=value+inc;           //jinak přičti
        }
        if(value<mn) value=mn;         //limitace maxima
        if(value>mx) value=mx;         //limitace minima
    }
    e_l = s;                           //ulož sigA do globální proměnné
    return value;                       //návratová hodnota - po operaci
}
```

Zdrojový kód 1 - setval (float value, float mn, float mx, float inc) funkce

4.2.1.2 Menu funkce

Pro práci s hlavní nabídkou jsme vytvořili 2 funkce. První funkce pouze vytiskne menu bez možnosti výběru a posunu. U druhé – kombinace funkcí – je možno vybrat položku z menu a následně v návazném programu na základě návratové hodnoty odkázat na další funkci.

```
void menu(int pos, String val [6], int pos1, float val1, int pos2, float val2,
int pos3, float val3, int pos_o){
    int i=0;
    int place [6] = {64,112,160,208,256};           //x pozice(řádky)
    lcd.setTextColor(white);
    lcd.setTextSize(4);
    if(pos_o!=pos){                                 /*pokud ještě nebylo vytištěné
    pro tuto pozici*/
        for(i=0;i<5;i++){
            if(pos==i){                             //pokud i==aktuální pozici vykresli bílý obdelník
                lcd.fillRect(0,place[i]-8,480,48,white);
                lcd.setTextColor(black);              //nastav kontrastní barvu textu
            }
            else{
                if(pos_o==i){                         //pokud i==minula aktuální překryj černou
                    lcd.fillRect(0,place[i]-8,480,48,black);
                }
                lcd.setTextColor(white);              // nastav kontrastní barvu textu
            }
            lcd.setCursor(1,place[i]);                //nastav kurzor
            lcd.print(val[i]);                        //výpis text ze stringu val
            if(pos1==i){                             //pozice pro val1 ==i; zakázání pos1>=5
                lcd.setCursor(310,place[i]);
                lcd.print(val1);                      //tiskni val1
            }
            if(pos2==i){                             //pozice pro val2 ==i; zakázání pos2>=5
                lcd.setCursor(310,place[i]);
            }
        }
    }
}
```

```

        lcd.print(val2);                                //tiskni val2
    }
    if(pos3==i){    //pozice pro val3 ==i; zakázání pos3>=5
        lcd.setCursor(310,place[i]);
        lcd.print(val3);                                //tiskni val3
    }
}
}
}

```

Zdrojový kód 2 – Funkce pro vykreslení menu

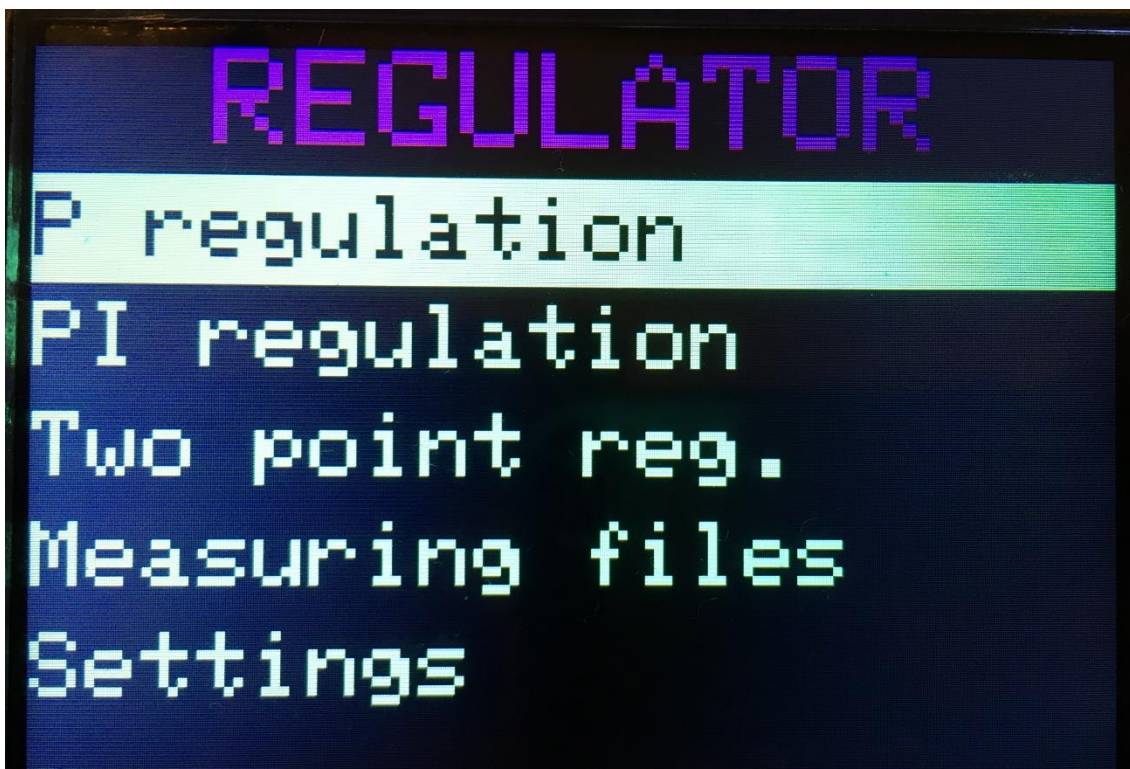
Kombinace funkce menu a setval:

```

int menu_w_s(int pos, String val [6], int pos1, float val1, int pos2, float
val2, int pos3, float val3){
    int pos_o=150;                                //nastav pos_o>5 pro aktivaci funkce
    while(1){
        menu(pos, val, pos1, val1, pos2, val2, pos3, val3, pos_o); //vykresli menu
        pos_o=pos;
        pos=setval(pos,0,4,1);                    //změna pozice v menu
        if(digitalRead(conf)==0) break;           //přerušeni výběru tlačítkem
    }
    return pos;                                    //návrat pozice v menu pro další použití
}

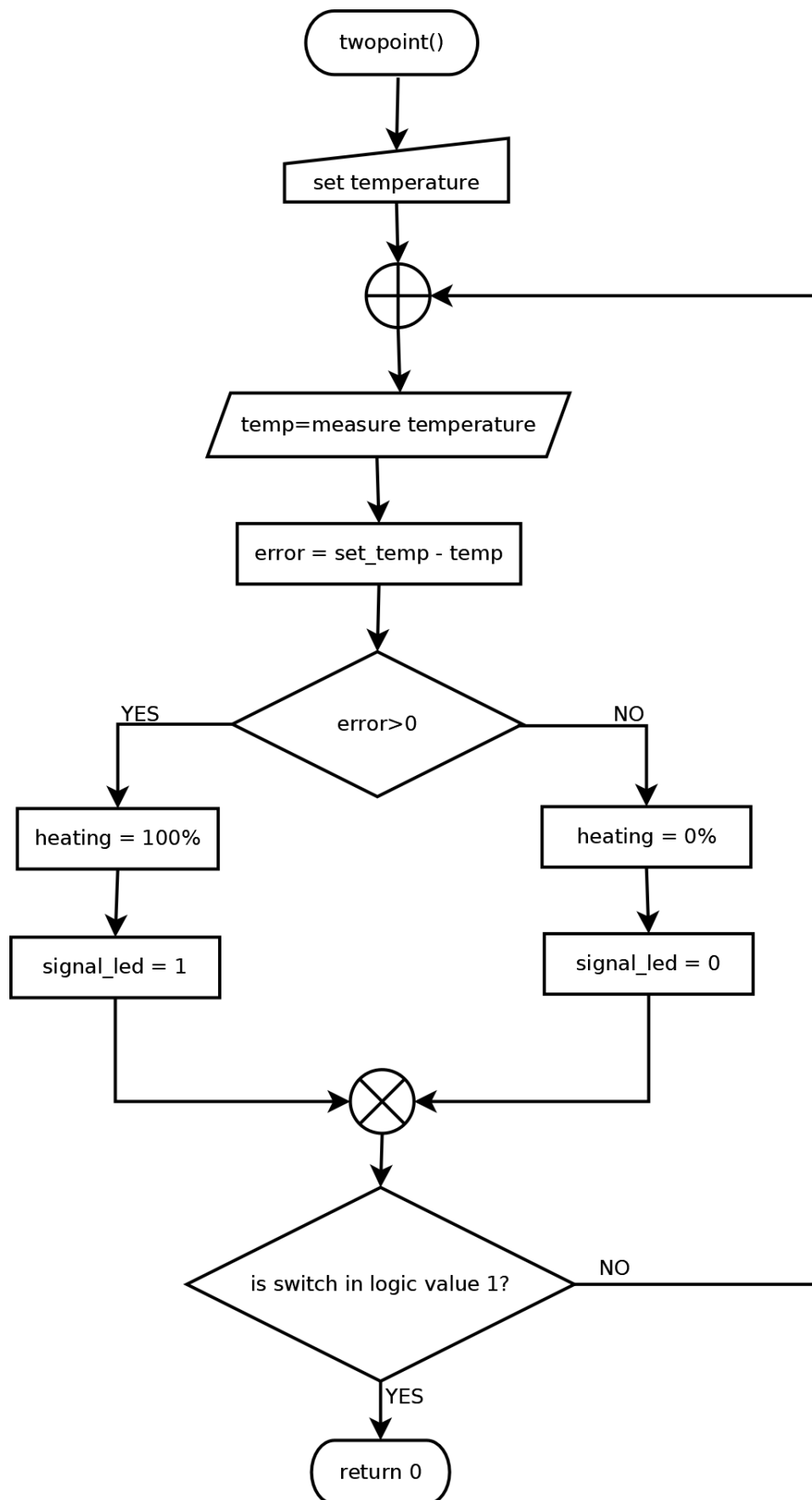
```

Zdrojový kód 3 – Vykreslení menu včetně pohybu v něm



Obrázek 22 – Hlavní menu vykreslené na TFT displeji

4.2.2 Dvojbodová regulace – programové řešení



Obrázek 23 – Vývojový diagram vysvětlující logiku dvojbodové regulace

Tato funkce používá mnoho dalších funkcí, ale zde jsou uvedeny spíše výpočty pro pochopení problematiky.

```
while(digitalRead(conf)==1){
    temperature=measure();           //změř teplotu
    e=set-temperature;               //vypočítej regulační odchylku
    x=set-konst;                     //vypočti minimální teplotu
    if(temperature<x) action=255;    //pokud je teplota menší jak set
    if(temperature>set) action=0;    //pokud je teplota menší jak set
    if(temperature_o!=temperature){

        /*přepis dat na TFT displeji*/

        temperature_o=temperature;
        analogWrite(heat, action);   //vyšli PWM akční veličinu
        if(action>0) digitalWrite(led_h, 1); //nastav stav LED diodou
        else digitalWrite(led_h, 0);

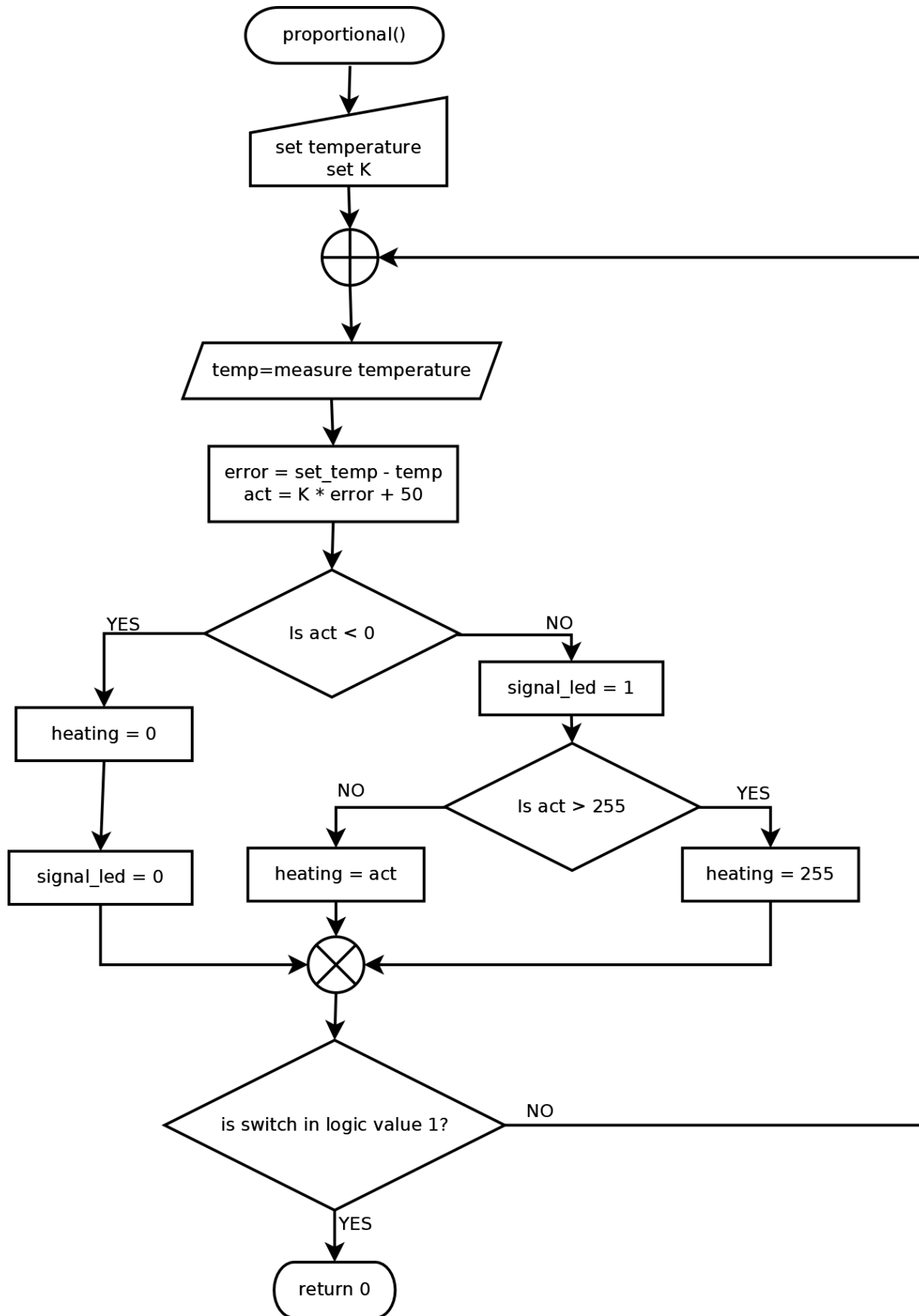
        /*ukládání dat to dočasných souborů*/

    }
    web("TWO POINT REGULATION", konst, 0, set, 3); //otevři web server
    for(i=0; i<20; i++){             //aktivní čekání na ukončení
        if(digitalRead(conf)==0){     //pokud je ukončeno
            digitalWrite(led_h, 0);   //vypni LED diodu
            analogWrite(heat, 0);     //vypni ohřívání
            break;
        }
        delay(250);
    }
}

//tvorba měřicích souborů
createoutputfile(newfilename(), "TWO POINT REG", set, konst, 0, 0, 3);
```

Zdrojový kód 4 – Dvojbodová regulace (zkráceno)

4.2.3 Proporcionální regulace – programové řešení



Obrázek 24 - Vývojový diagram vysvětlující logiku proporcionální regulace

Tato funkce používá mnoho dalších funkcí, ale zde jsou uvedeny spíše výpočty pro pochopení problematiky.

```
while(digitalRead(conf)==1){
    temperature=measure();           //změř teplotu
    e=set-temperature;               //vypočti regulační odchylku
    act=konst*e;                     //výpočet akční veličiny
    action=(int)act+50;               //přičti ub (50 - z HW testů)
    if(action>255) action=255;       //limitace
    if(action<0) action=0;
    if(temperature_o!=temperature){

        /*přepis dat na TFT displeji*/

        temperature_o=temperature;
        analogWrite(heat, action);   //vyšli PWM akční veličinu
        if(action>0) digitalWrite(led_h, 1); //nastav stav LED diodou
        else digitalWrite(led_h,0);

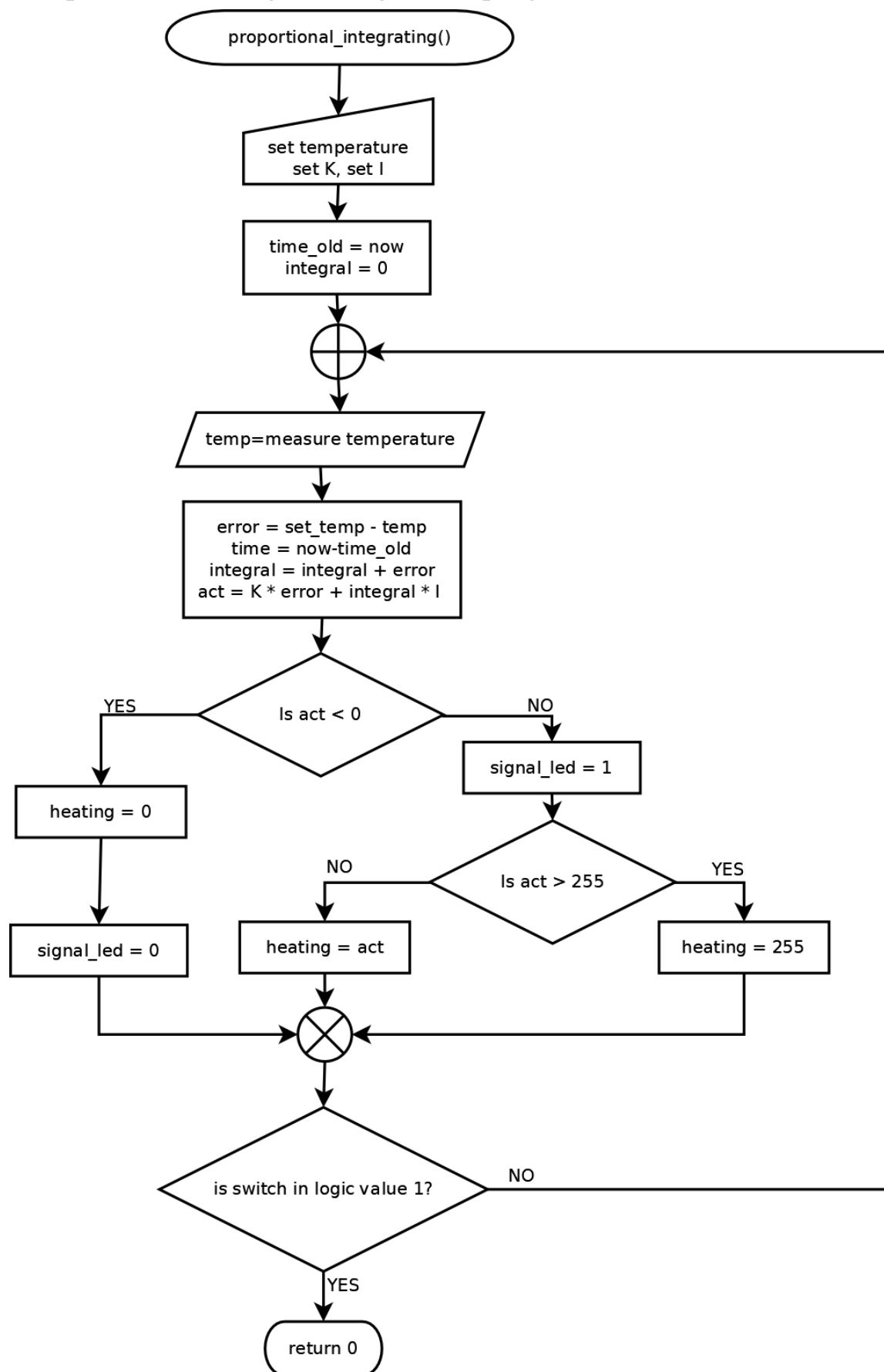
        /*ukládání dat to dočasných souborů*/

    }
    web("P REGULATION",konst,0,set,1);//otevři web server
    for(i=0; i<20; i++){             //aktivní čekání na ukončení
        if(digitalRead(conf)==0){    //pokud je ukončeno
            digitalWrite(led_h, 0);  //vypni LED diodu
            analogWrite(heat, 0);     //vypni ohřívání
            break;
        }
        delay(250);
    }
}

//tvorba měřících souborů
createoutputfile(newfilename(), "P regulation", set, konst, 0, 24, 1);
```

Zdrojový kód 5 – Proporcionální regulace (zkráceno)

4.2.4 Proporcionálně integrační regulace – programové řešení



Obrázek 25 - Vývojový diagram vysvětlující logiku proporcionálně integrační regulace

Tato funkce používá mnoho dalších funkcí, ale zde jsou uvedeny spíše výpočty pro pochopení problematiky.

```
T_o=millis()/1000; //čas startu měření
while(digitalRead(conf)==1){
    temperature=measure(); //změř teplotu
    e=set-temperature; //vypočti regulační odchylku
    Tm=millis()/1000; //vypočti aktuální čas
    T=Tm-T_o; //vypočti čas mezi 2 měřeními
    integral=integral+e; //vypočti časově integrační konstantu
    act=konst*e+integral*konst1; //vypočti akční veličinu
    action=(int)act; //převeď akční veličinu na celé číslo
    if(action>255) action=255; //limiace
    if(action<0) action=0;
    if(temperature_o!=temperature){

        /*přepis dat na TFT displeji*/

        temperature_o=temperature;
        analogWrite(heat, action); //vyšli PWM akční veličinu
        if(action>0) digitalWrite(led_h, 1); //nastav stav LED diodou
        else digitalWrite(led_h, 0);
        T_o=T; //ulož čas posledního měření

        /*ukládání dat to dočasných souborů*/

    }
    web("PI REGULATION",konst,konst1,set,2); //otevři web server
    for(i=0; i<20; i++){ //aktivní čekání na ukončení
        if(digitalRead(conf)==0){ //pokud je ukončeno
            digitalWrite(led_h, 0); //vypni LED diodu
            analogWrite(heat, 0); //vypni ohřívání
            break;
        }
        delay(250);
    }
}

//tvorba měřicích souborů
createoutputfile(newfilename(), "PI regulation", set, konst, konst1, 8, 2);
```

Zdrojový kód 6 - Proporcionálně integrační regulace (zkráceno)

4.2.5 Interface

Protože celý model má být využitelný jako model pro demonstraci regulací, vytvořili jsme webový interface pro sledování měření v reálném čase, a rozhraní na Arduino (TFT displej a enkóder) pro ovládání regulací. Pro rychlou vizuální kontrolu stavu jsou na hlavním panelu umístěné 4 LED diody.

Tabulka 7 – Piny pro signalizaci stavu na hlavním panelu

Funkce	Port	Barva
Zapnutí	29	Zelená
Zapnutí ventilátoru	31	Žlutá
Zapnutí ohřívání	33	Červená
Přídavný PIN	35	Neosazeno
Externí napájení zapnuto	Hardwarové řešení	Zelená

4.2.5.1 Arduino Interface

Interface vytvořený pro Arduino je jednoduché menu, kde si uživatel rotačním enkóderem volí, typ regulace a její parametry. Dále je možno nastavit parametry sítě. Vše je zobrazeno na TFT display.

Pro vylepšení vzhledu jsme vytvořili bitmapu s našimi logy, kterou vykreslujeme po zapnutí Arduina.



Obrázek 26 – Bitmapa s logy

4.2.5.2 Nastavení sítě

Z důvodu praktičnosti jsme vytvořili webový interface. Ke správné funkci je nutné nastavit statické IP adresy. Nastavujeme: IP adresu, masku sítě, výchozí bránu a DNS server. Všechny nastavená data jsou uložena v konfiguračním souboru nazvaném config.txt je nutné, aby ten soubor byl v hlavním adresáři SD karty.

193.168.1.20. 255.255.255.0. 192.168.1.255. 8.8.8.8.

Soubor 1 - Soubor config.txt

Adresy v konfiguračním souboru mají předem stanovené pořadí:

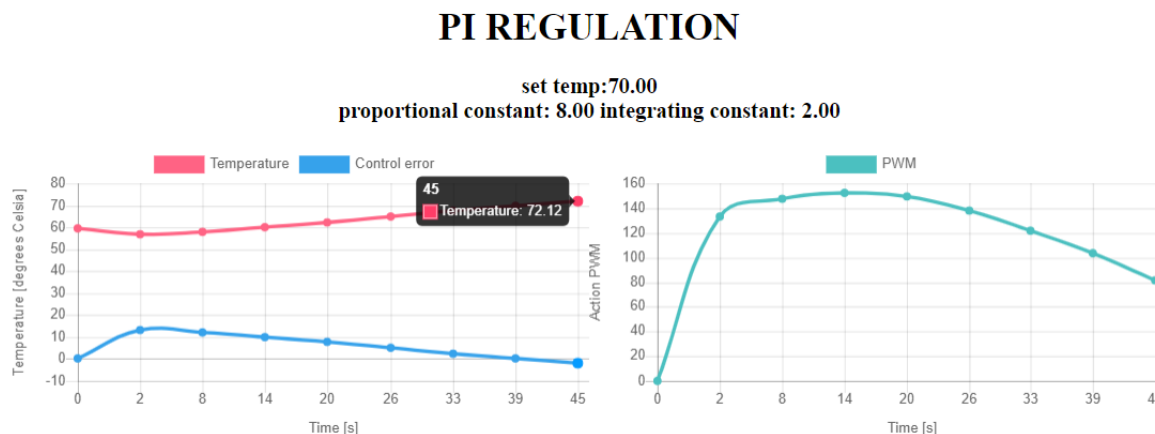
- IP adresa
- Maska sítě
- Výchozí brána
- IP adresa DNS serveru

Z důvodu, že každý operační systém používá jiné ukončení řádku, my jsme zvolili v našem programu tečku. To znamená, že každý řádek musí být ukončený tečkou.

4.2.5.3 Webový interface

Pro zjednodušení měření, na webovém rozhraní jsou po dobu měření zobrazovány grafy. Na těchto grafech je možno zobrazit pouze: akční veličinu, aktuální teplotu a měřící odchylku.

Pro vykreslování grafů využíváme open source nástroj nazvaný chart.js. Více o tomto nástroji na oficiálním webu www.chartjs.org



Obrázek 27 - Web interface během měření

Toto řešení je sice velice jednoduché, ale soubor obsahující potřebné skripty pro vykreslení grafu a je celkem obsáhlý a proto, není možné ho vysílat z Arduino serveru, Z tohoto důvodu je nutné po dobu zobrazování grafů na počítači mít tento počítač připojený k internetu.

4.2.5.4 Výstupní – měřící soubor

Po ukončení každého měření je vytvořen programem automaticky měřící soubor. Tento soubor obsahuje: čas od začátku měření, akční veličinu, regulační odchylku a naměřenou teplotu. Název souboru je přiřazen automaticky – pořadové číslo měření.

```
PI regulation
Set temperature: 70.00 Proportional constant: 8.00 Integral constant: 2.00
| time | actuating variable | control error | measured temperature |
| 0.00 | 0.00 | 0.00 | 23.50 |
| 2.00 | 255.00 | 46.44 | 23.56 |
| 8.00 | 255.00 | 44.81 | 25.19 |
```

Soubor 2 – Příklad měřícího souboru

4.2.5.5 Přenos měřících souborů

Nástroj pro přenos souborů generovaných po každém měření je skvělý, zvláště pokud chceme měření dokumentovat. Přes jednoduchou HTML stránku jdou data zkopírovat, a jednoduše vložit do excelu, nebo jiného tabulkového procesoru.

MEASURING FILE 0041.TXT

PI regulation

Set temperature: 70,00 Proportional constant: 8,00 Integral constant: 2,00

time	measured temperature	control error	actuating variable
0,00	0,00	0,00	23,37
2,00	255,00	46,63	23,37
8,00	255,00	45,00	25,00
14,00	255,00	40,38	29,62

[GO BACK](#)

Obrázek 28 – Data z měřícího souboru na HTML stránce

Při přenosu souborů se můžeme vyhnout nabídce všech souborů a přistoupit k němu přímo zadáním jeho názvu za IP adresu regulátoru.

`http://XXX.XXX.XXX.XXX/?YYYY.TXT`

v této adrese X jsou čísla IP adresy, Y je číslo měřícího souboru – dozvíme se po každém měření.

4.3 Hardwarové řešení

Tato část celá vychází z teoretického rozboru. Po výběru senzorů a návrhu vyhřívacího tělesa a základních obvodů. Pro přehlednost jsme se rozhodli vytvořit desky plošných spojů (DPS). Pro tvorbu těchto desek jsme využili fotorezistivní lak na desce s měděnou folií, který po osvětlení UV zářením (vodivé cesty jsou zakryty vytištěnou folií), je vyvolán v roztoku vody a hydroxidu sodného a následně vyleptán v roztoku 30% peroxidu vodíku, vody a 30% kyseliny chlorovodíkové.

Rozhodli jsme se vytvořit dohromady 4 DPS:

- DPS jako výstup z mikrokontroléru
- DPS pro LED diody a pro připojení rotačního enkóderu
- DPS pro elektroniku potřebnou pro vyhřívací i chladicí okruh
- DPS pro vyhřívací těleso

4.3.1 Mikrokontrolér

Pro řízení všech regulací jsme vybrali mikrokontrolér Arduino Mega. Z důvodů, že tento výrobek je primárně určen k výuce a rozvíjení dovedností, není zde možnost připojit vývojovou desku přímo k hotovému modelu. Proto jsme se rozhodli vytvořit DPS, která kopíruje výstupy Arduina, čili stačí ho nasunout na DPS. Dále je to hlavní propojení mezi všemi ostatními deskami, proto jsme se rozhodli, že zde bude přivedeno externí napájení 12V.

4.3.1.1 Arduino pinout

Výstupy Arduina, piny 22-53, protože ostatní piny jsou obsazeny shieldy. Záložní piny slouží pro případ poškození vodivé cesty například přetížením (spíše pro testování).

Tabulka 8 - Arduino Mega pinout (piny 22- 53)

Teplotní senzor	5V	5V	enkóder – tlačítko enkóder – sigA enkóder – sigB LED – napájení LED – větrák LED – vyhřívání LED – přídavný pin záložní pin 37 záložní pin 39 záložní pin 41 záložní pin 43
	22	23	
	24	25	
	26	27	
	28	29	
	30	31	
	32	33	
	34	35	
	36	37	
	38	39	
větrák - PWM vyhřívací těleso - PWM	40	41	záložní pin 49 záložní pin 51 záložní pin 53
	42	43	
	44	45	
	46	47	
	48	49	
	50	51	
	52	53	
	GND	GND	

4.3.1.2 Konektor pro přední indikační panel

Propojení mezi mikrokontrolérem a DPS s LED diodami a rotačním enkóderem. Na obou stranách plochého kabelu je konektor zapojený stejně.

Tabulka 9 – Konektor pro přední indikační panel

5V	1	2	GND
enkóder – tlačítko	3	4	GND
enkóder – sigA	5	6	GND
enkóder – sigB	7	8	GND
LED – napájení	9	10	záložní pin 43
LED – větrák	11	12	záložní pin 41
LED – vyhřívací těleso	13	14	záložní pin 39
LED – přídatný pin	15	16	záložní pin 37

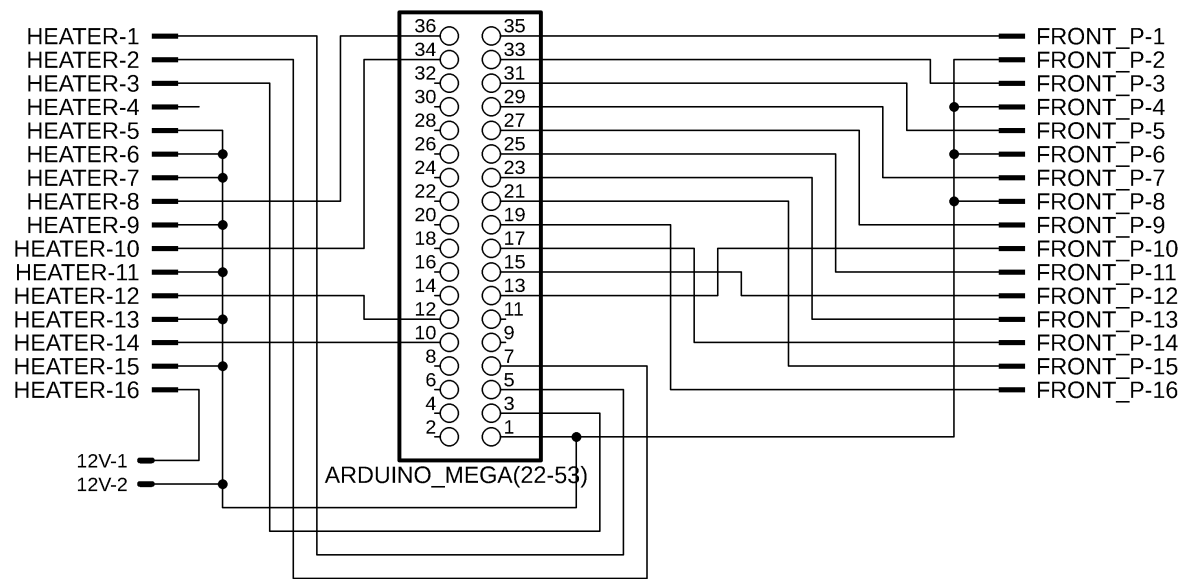
4.3.1.3 Konektor pro vyhřívací komůrku

Propojení mezi mikrokontrolérem a DPS s vyhřívacím tělesem a chladícím okruhem. Na obou stranách plochého kabelu je konektor zapojený stejně.

Tabulka 10 – Konektor pro vyhřívací komůrku

záložní pin 51	1	2	záložní pin 49
záložní pin 53	3	4	
GND	5	6	GND
GND	7	8	5V
GND	9	10	teplotní senzor
GND	11	12	větrák
GND	13	14	vyhřívací těleso
GND	15	16	12V – napájecí zdroj

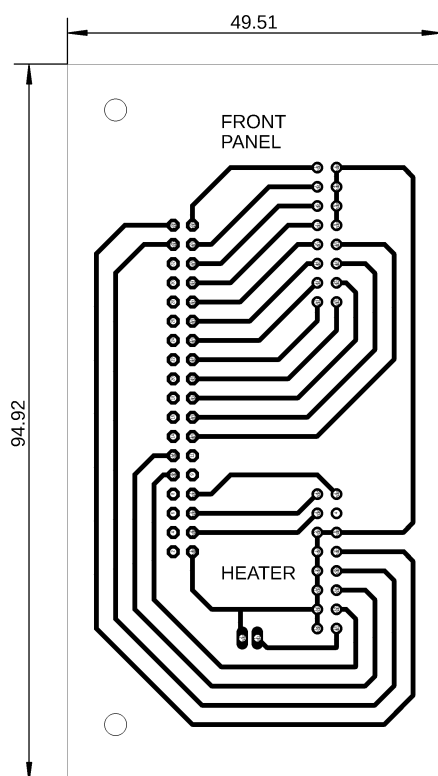
4.3.1.4 DPS



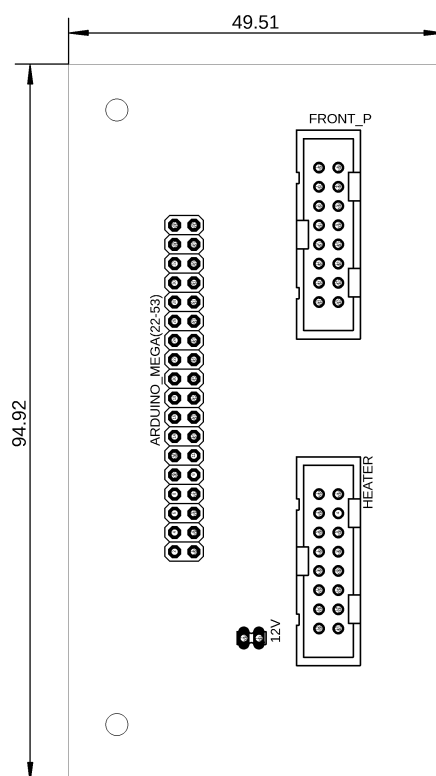
Obrázek 29 – Schéma propojení mikrokontroléru a jednotlivých DPS

Tabulka 11 – Seznam součástek pro DPS mikrokontroléru

Součástka	Hodnota	Typ	Poznámky
FRONT_P	-	Konektor 8x2	
HEATER	-	Konektor 8x2	
ARDUINO_MEGA(22-53)	-	Pinhead 18x2	Výstup z Arduina

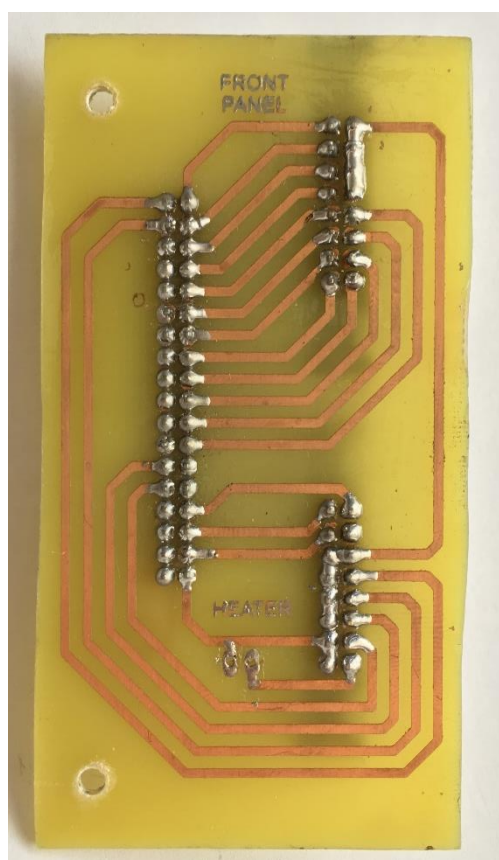


Obrázek 31 – DPS mikrokontroléru
(měřítko 1:1)

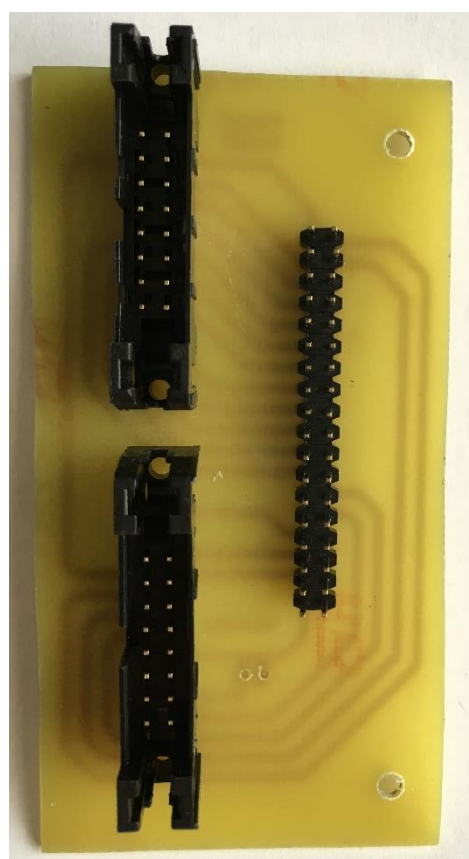


Obrázek 30 – DPS mikrokontroléru
(osazovací plán)

4.3.1.5 Realizace



Obrázek 32 – DPS mikrokontroléru
(vrchní strana)



Obrázek 33 – DPS mikrokontroléru
(strana součástek)

4.3.2 Vyhřívací a chladicí okruh

Ke spínání zátěže (vyhřívání, chlazení) používáme tranzistory, potřebujeme také externí zdroj a teploměr. Celé toto zapojení jsme schopni realizovat na univerzálním plošném spoji, ale i zde jsme tvořili vlastní, protože připojení konektorů by nebylo na univerzální DPS možné.

4.3.2.1 Napájecí zdroj

Od demonstračního modelu očekáváme nízkou hmotnost, aby se dal jednoduše přenést. Použití klasického zdroje napětí by bylo v tomto ohledu problematické. Proto abychom snížili váhu na minimum jsme mohli umístit pouze konektory pro připojení jakéhokoli zdroje, ale toto je také celkem nevýhodné. Z toho důvodu jsme použili spínaný zdroj Mean Well LRS-35-12.

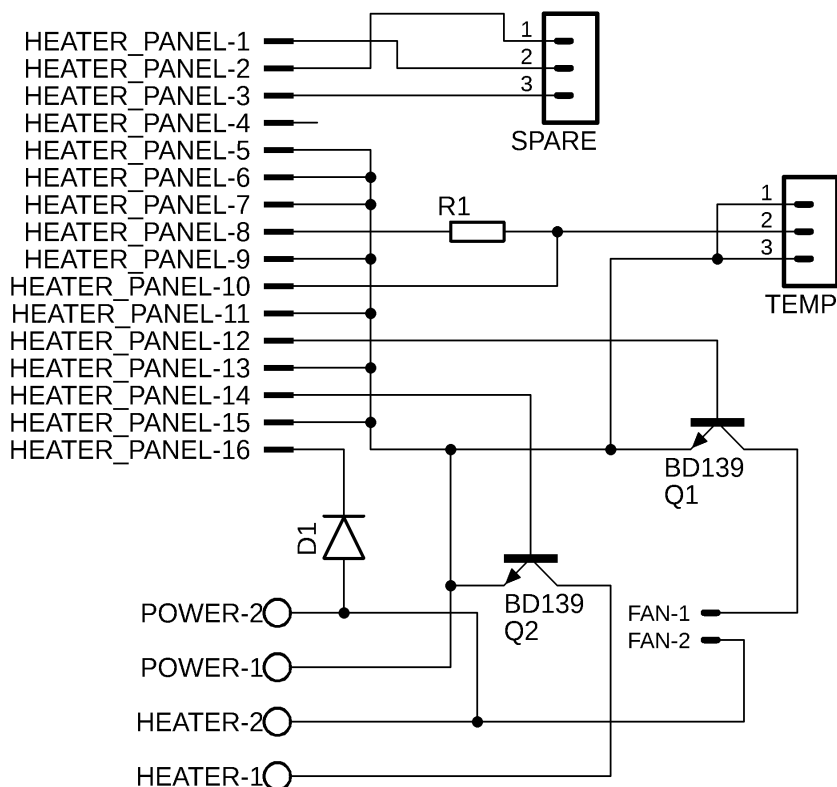
Tabulka 12 - LRS-35-12

Minimální napájecí ST napětí	85V
Maximální napájecí ST napětí	264V
Výstupní SS napětí	12V SS
Výstupní proud	3A
Maximální výkon na výstupu	36W

Zdroj: oficiální datasheet,

http://www.farnell.com/datasheets/2547981.pdf?_ga=2.189240107.1092266099.1551970860-455427088.1537292678

4.3.2.2 DPS pro komůrku

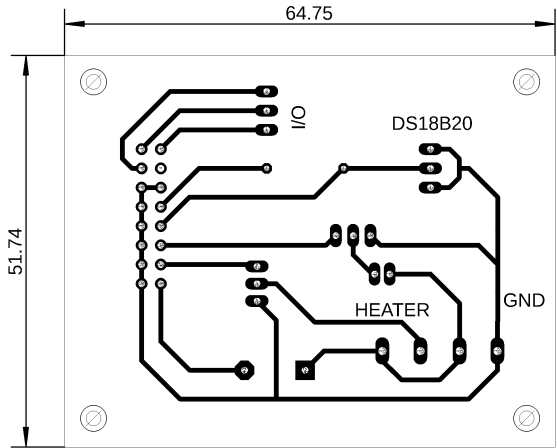


Obrázek 34 – Schéma propojení DPS pro komůrku

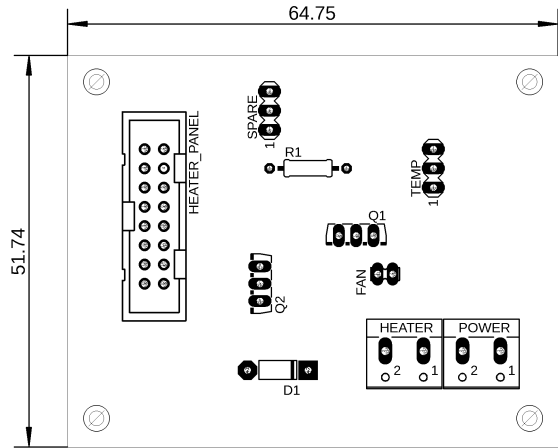
Tabulka 13 – Seznam součástek pro DPS pro komůrku

Součástka	Hodnota	Typ	Poznámky
HEATER_PANEL	-	Konektor 8x2	
POWER	-	Svorkovnice	Pro napájecí zdroj
HEATER	-	Svorkovnice	Pro vyhřívací těleso
FAN	-	Pinhead 2x1	Pro ventilátor
SPARE	-	Pinhead 3x1	Pro záložní piny
TEMP	-	Pinhead 3x1	Pro DS18B20
Q1	-	BD139	Pro ventilátor
Q2	-	BD139	Pro vyhřívací těleso
D1	-	-	Možná ochrana
R1	4k7	Rezistor	Pro DS18B20

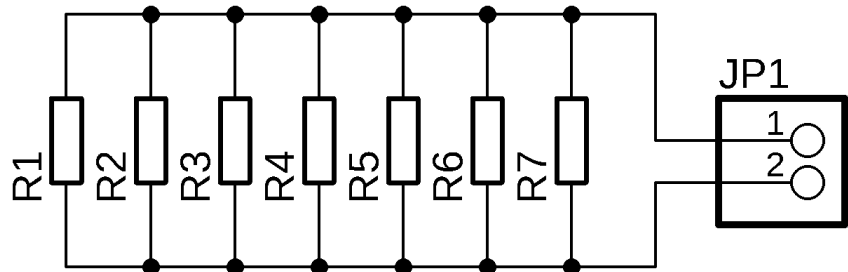
4.3.2.3 DPS



Obrázek 37 – DPS pro komůrku (měřítko 1:1)



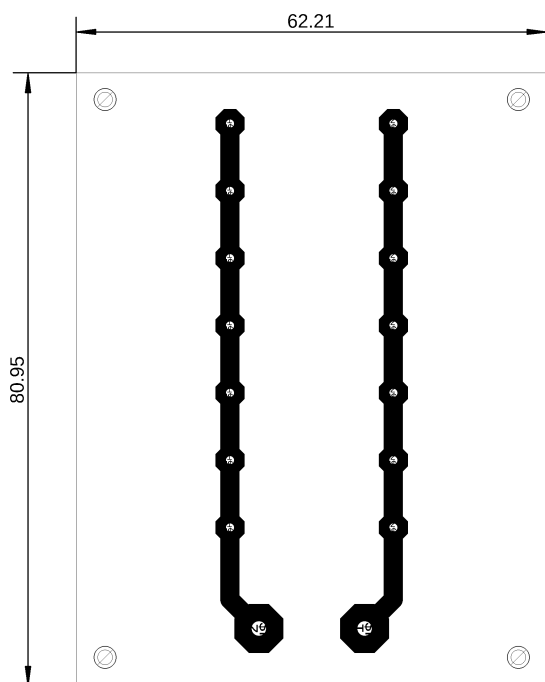
Obrázek 36 – DPS pro komůrku (osazovací plan)



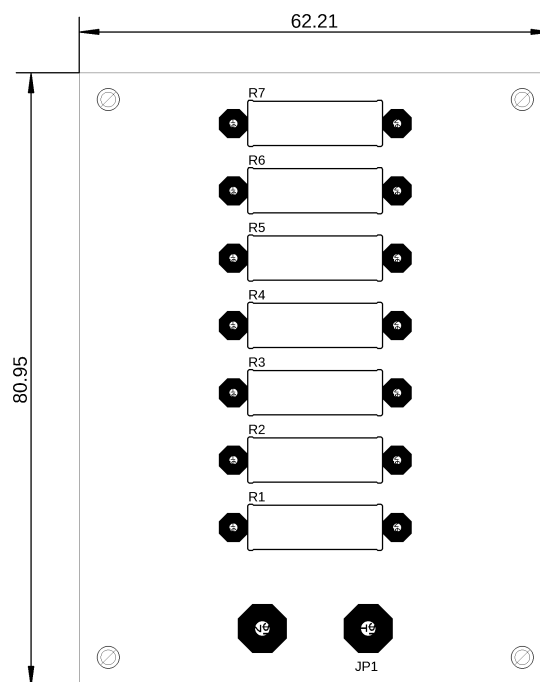
Obrázek 35 – Schéma propojení DPS pro vyhřívací těleso

Tabulka 14 – Seznam součástek pro DPS pro vyhřívací těleso

Součástka	Hodnota	Typ	Poznámky
R1-R7	47R, 5W	rezistor	Uhlíkové pouzdro
JP1	-	-	Pouze pájecí bod

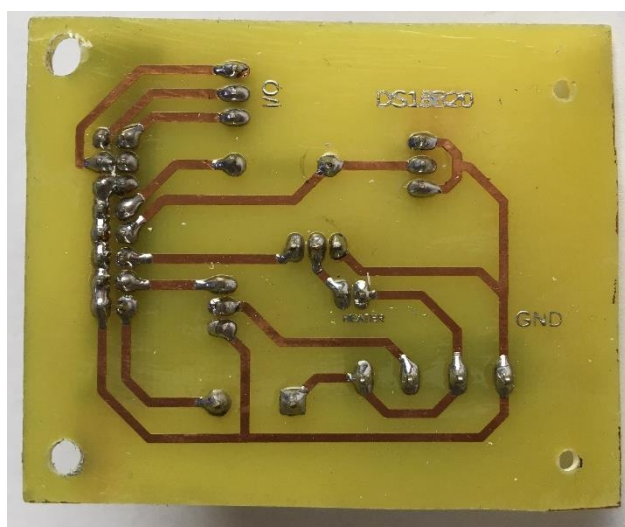


Obrázek 38 - DPS pro vyhřívací těleso
(měřítko 1:1)

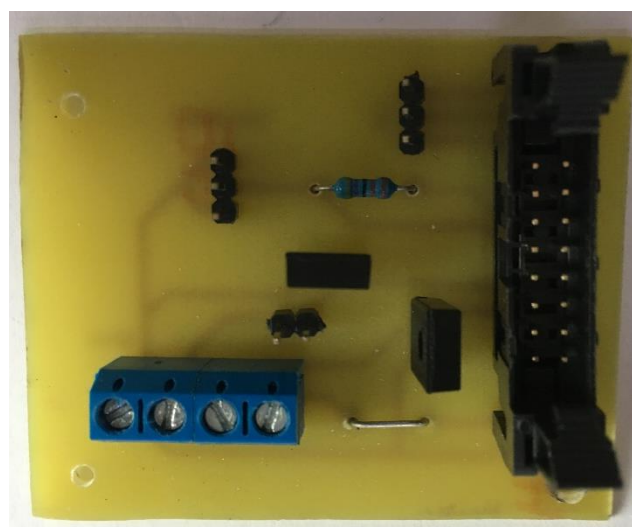


Obrázek 39 - DPS pro vyhřívací těleso
(osazovací plan)

4.3.2.4 Realizace



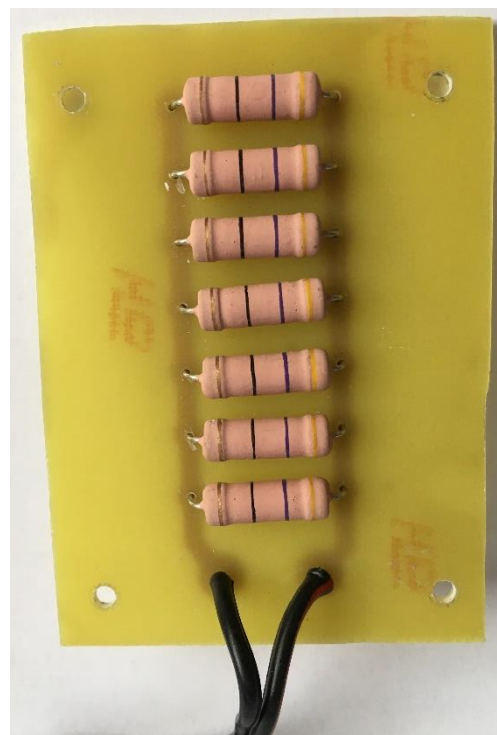
Obrázek 40 – DPS pro komůrku (vrchní strana)



Obrázek 41 – DPS pro komůrku (strana součástek)



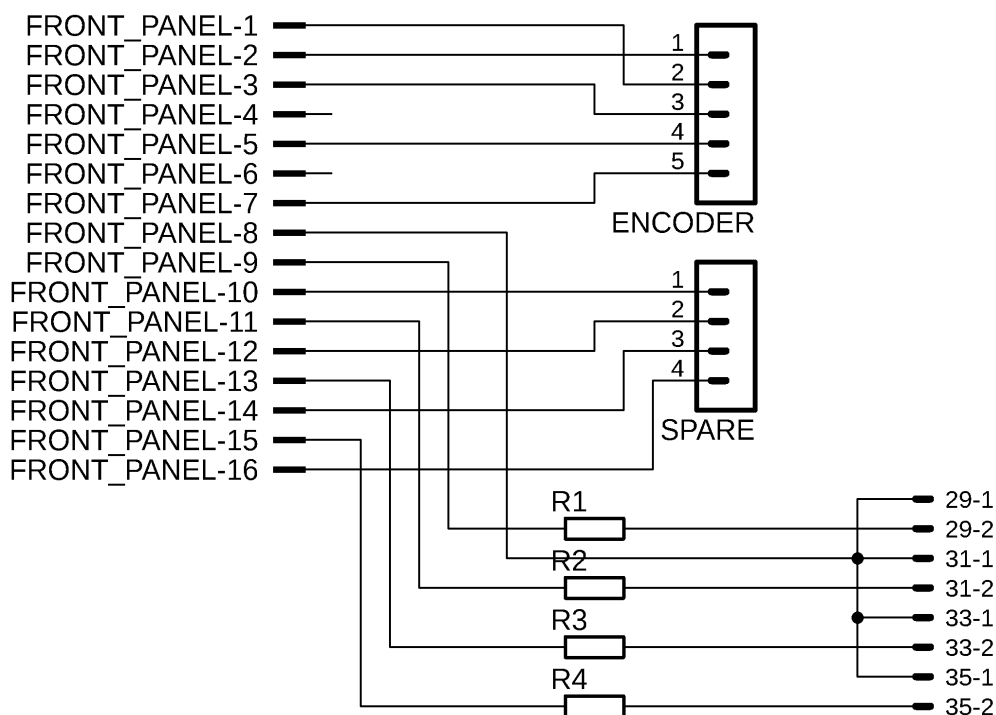
Obrázek 42 - DPS pro vyhřívací těleso
(vrchní strana)



Obrázek 43 - DPS pro vyhřívací těleso
(strana součástek)

4.3.3 Kontrolní panel

Přední, kontrolní panel má za úkol oddělit LED diody od Arduino a také dovolit rozmístit diody a enkóder po čelním panelu.

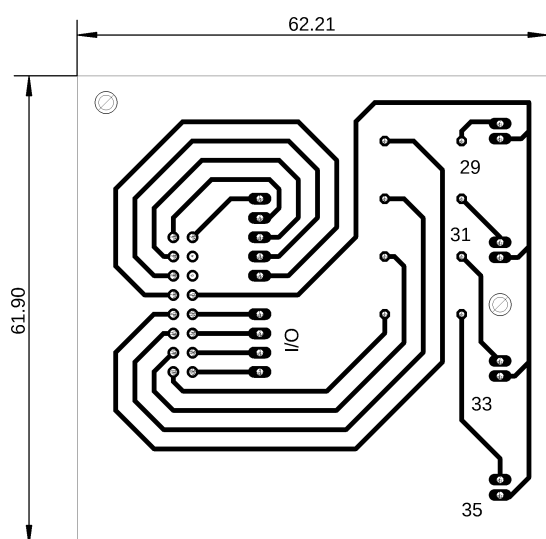


Obrázek 44 – Schéma propojení DPS kontrolního panelu

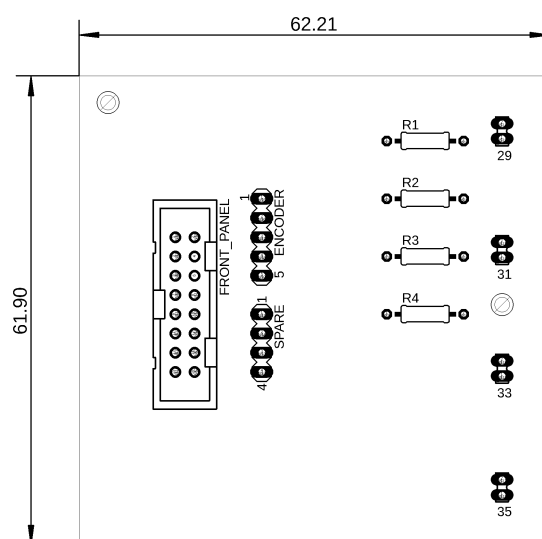
Tabulka 15 – Seznam součástek pro DPS pro kontrolní panel

Součástka	Hodnota	Typ	Poznámky
FRONT_PANEL	-	Konektor 8x2	
ENCODER	-	Pinhead 5x1	Pro rotační enkóder
SPARE	-	Pinhead 3x1	Pro záložní piny
R1-R4	330R	rezistor	Pro LED diody
29	-	Pinhead 2x1	Pro LED diodu
31	-	Pinhead 2x1	Pro LED diodu
33	-	Pinhead 2x1	Pro LED diodu
35	-	Pinhead 2x1	Pro LED diodu

4.3.3.1 DPS

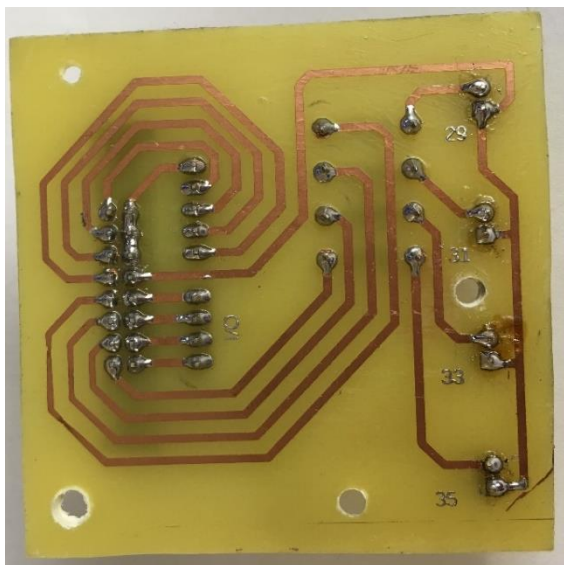


**Obrázek 46 – DPS pro kontrolní panel
(měřítko 1:1)**

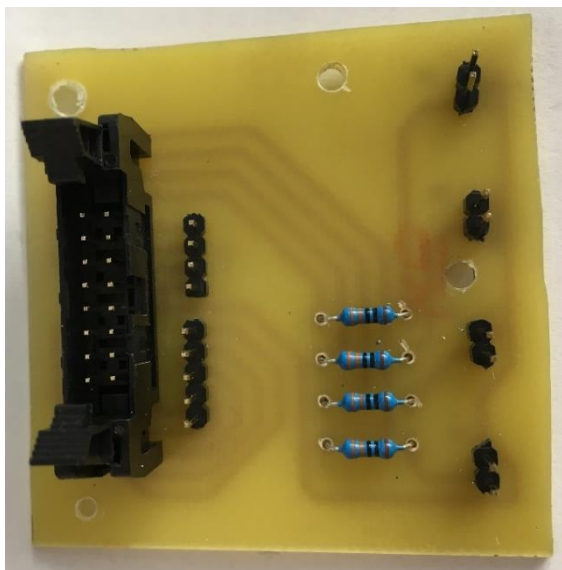


**Obrázek 45 – DPS pro kontrolní panel
(osazovací plan)**

4.3.3.2 Realizace



Obrázek 48 – DPS pro kontrolní panel
(vrchní strana)



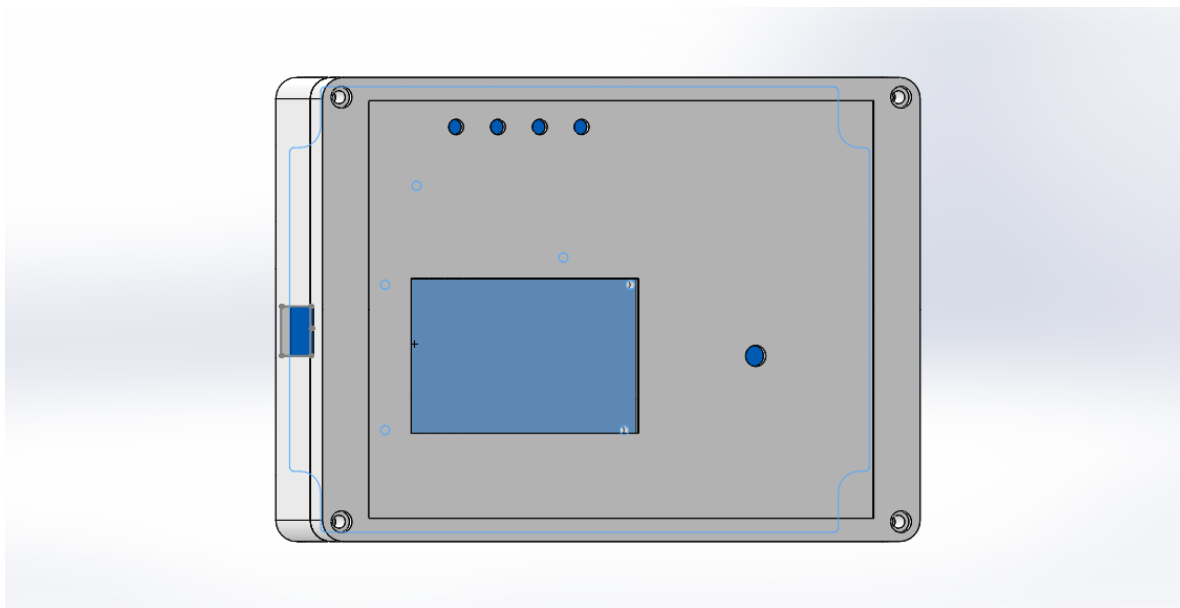
Obrázek 47 – DPS pro kontrolní panel
(strana součástek)

5 Komůrka a kryt pro mikrokontrolér

Pro kladnou prezentaci našeho modelu a také pro prodloužení životnosti použitých součástí jsme se rozhodli všechno uložit do boxů.

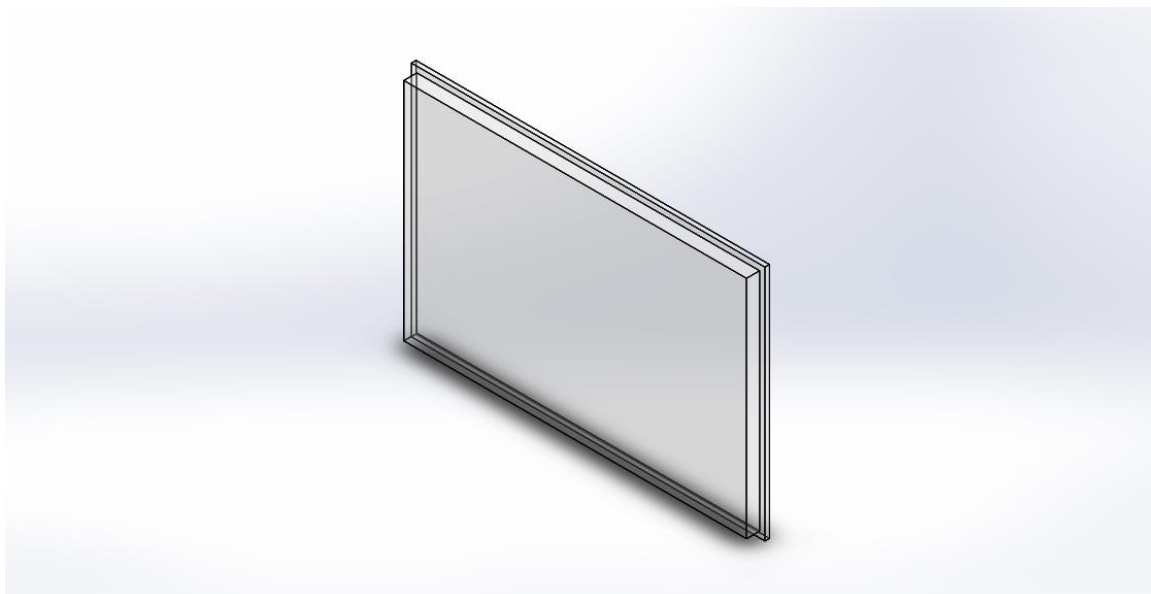
5.1 Kryt pro mikrokontrolér

Tento obal byl nejsložitější na výrobu. Bylo nutné vyříznout díru pro display. Toto by bylo nemožné bez CNC. Proto jsme si vytvořili model, ze kterého pak počítač vygeneroval G code, a následně jsme vyfrézovali přesný otvor.

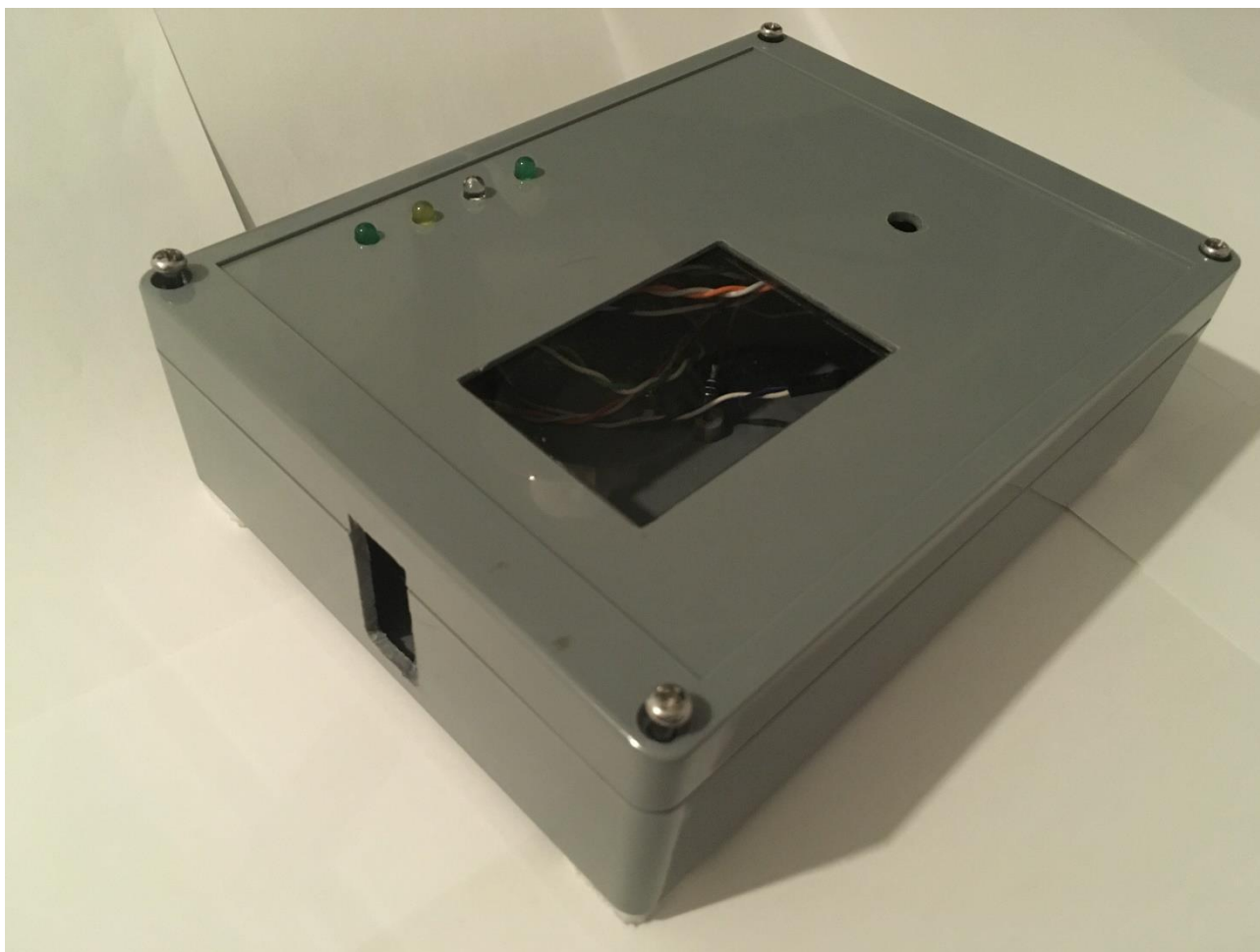


Obrázek 49 - SOLIDWORKS model krytu mikrokontroléru

Navrhli jsme také model skla pro ochranu displeje. Toto ochranné sklo je vyřezáno z plexi skla.



Obrázek 50 - SOLIDWORKS model ochranného skla

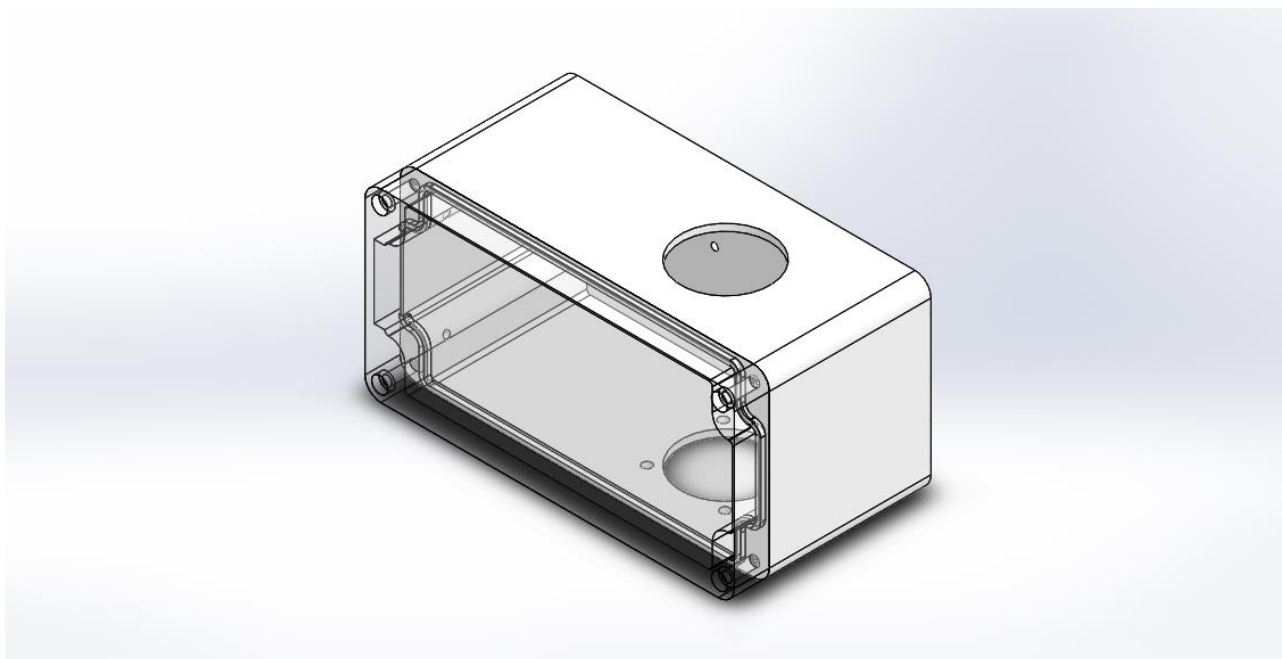


Obrázek 51 – Finální model krytu pro mikrokontrolér (včetně přilepených LED diod a ochranného skla)

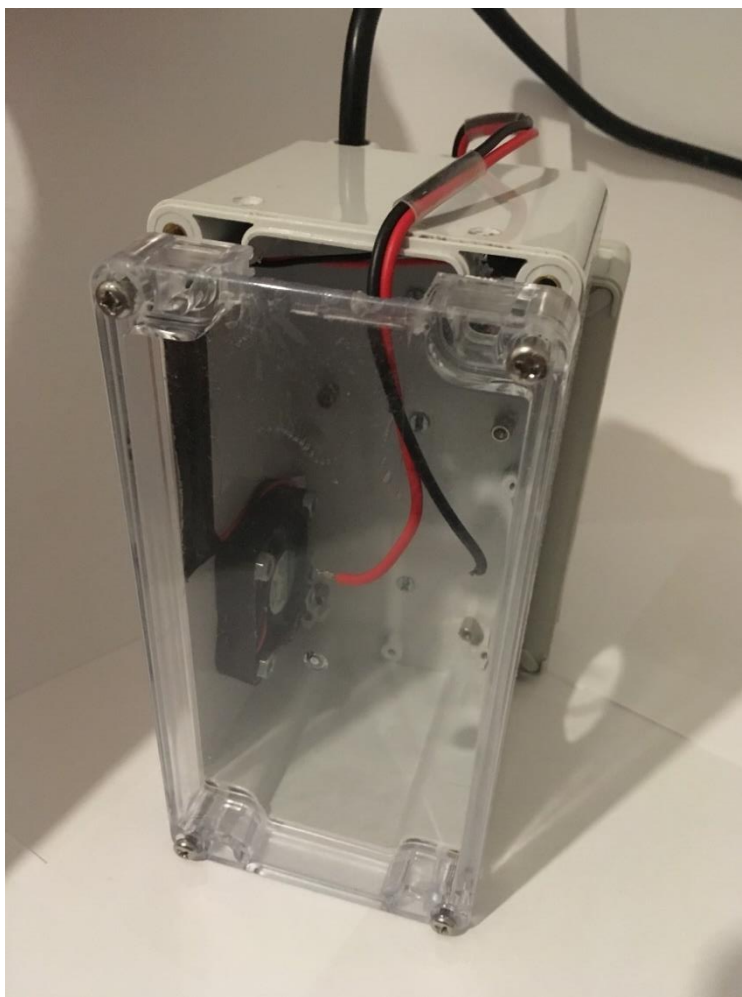
5.2 Komůrka

Návrh komůrky byl pro nás nejdůležitější. Bylo zapotřebí ji navrhnout tak, aby vyhřívací těleso nezpůsobovalo přehřívání tranzistorů. Dále musíme komůrku navrhnout tak, aby ochlazování tělesa bylo efektivní, čili ventilátor a chladicí otvory musí být co nejbližší vyhřívacího tělesa. Dále by větrací otvory měly být dva naproti sobě.

Další otvor musí být je pro plochý kabel propojující mikrokontrolér.



Obrázek 53 - SOLIDWORKS model komůrky



Obrázek 52 – Finální model komůrky včetně již instalovaného napájecího zdroje

5.3 Kryt pro napájecí zdroj

Tento box má jediný úkol a to ochránit uživatele od života nebezpečných živých částí zdroje. Tento kryt je přišroubovaný zezadu ke komůrce. K vyvedení vodičů jsme použili předem připravené průchodky.



Obrázek 55 – Boční pohled na komůrku se zdrojem



Obrázek 54 – Zadní pohled na komůrku se zdrojem

6 Kontrolní měření

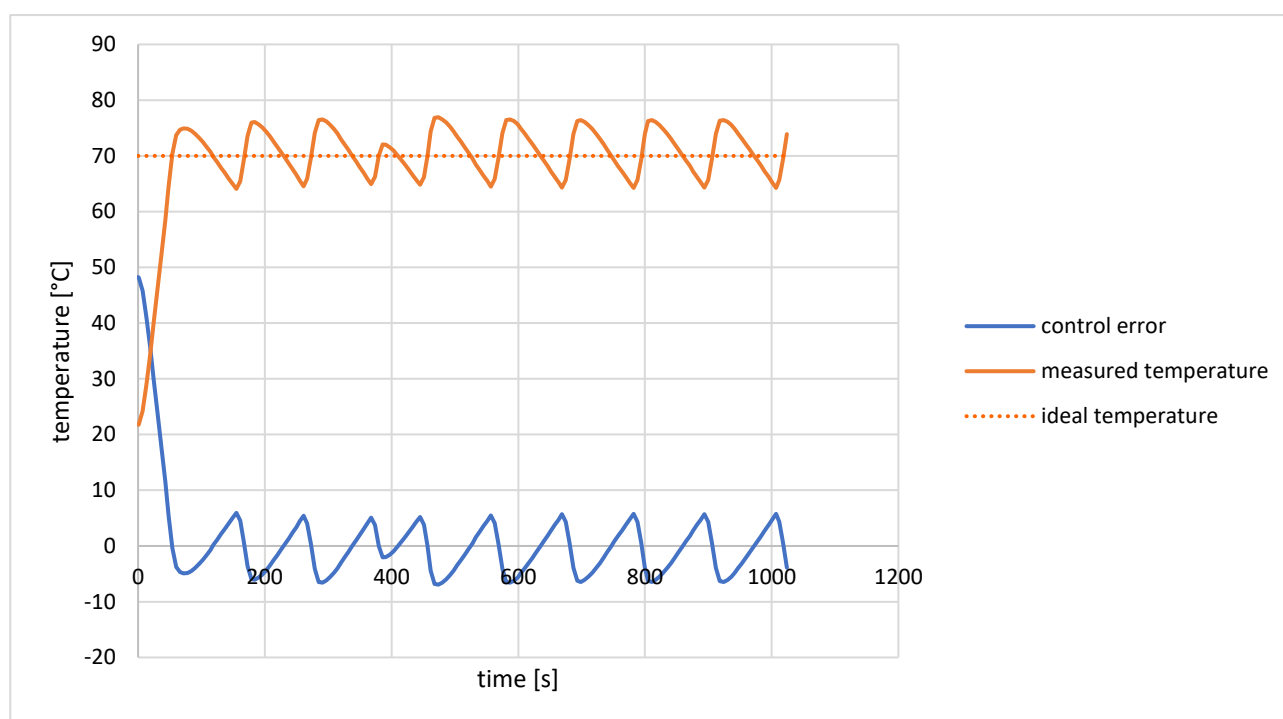
Tato kontrolní měření byla provedena pouze pro zjištění, zda-li regulátor pracuje správně. Byly to první hardwarové testy modelu. Po provedení těchto testů jsme schopni vytvořit finální model.

6.1 Dvojbodová regulace

Pro kontrolu správnosti algoritmu jsme provedli toto měření s následujícími parametry:

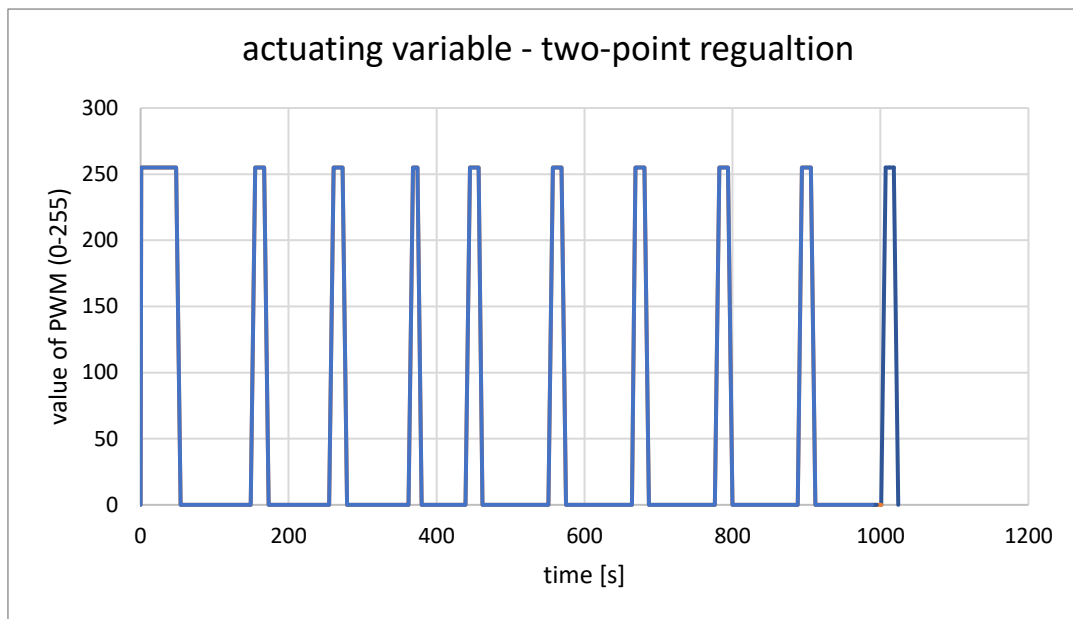
Tabulka 16 – Parametry použité pro HW test dvojbodové regulace

Hystereze	5°C
Nastavená teplota	70°C



Obrázek 56 - HW test, dvojbodová regulace (teplota, regulační odchylka)

Z výsledku vidíme, že dosažení konstantní teploty je obtížné. Výsledná teplota osciluje mezi 65°C a 74°C.



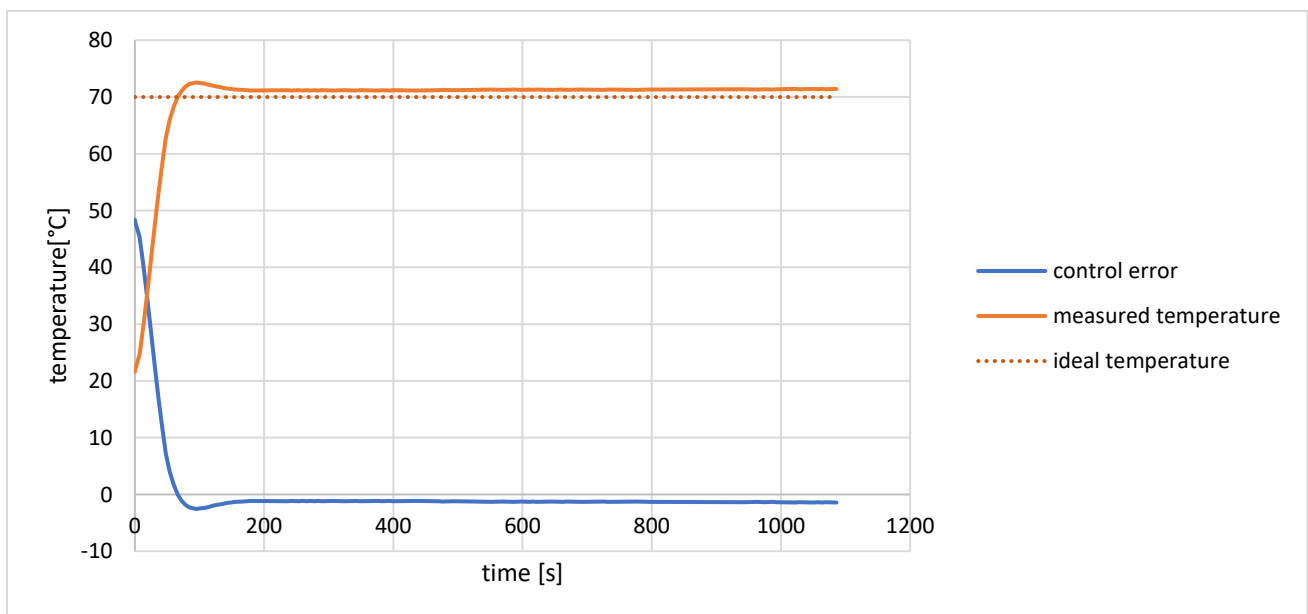
Obrázek 57 - HW test, dvojbodová regulace (akční veličina)

6.2 Proporcionální regulace

Pro kontrolu správnosti algoritmu jsme provedli toto měření s následujícími parametry:

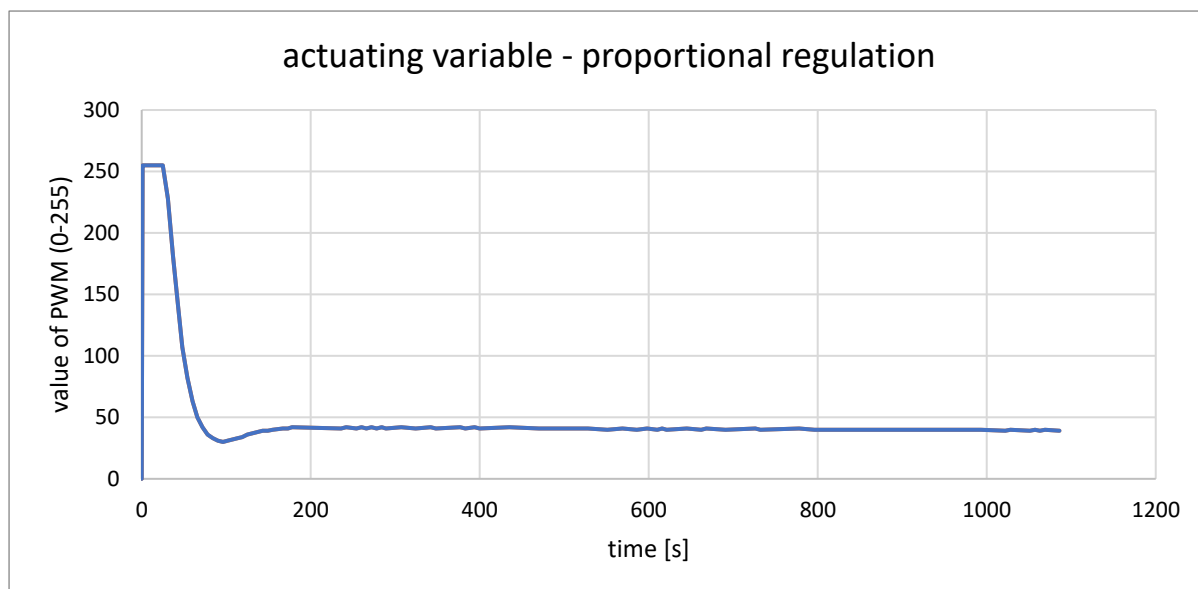
Tabulka 17 - Parametry použité pro HW test P regulace

Zesílení regulátoru	8
Nastavená teplota	70°C



Obrázek 58 - HW test, P regulace (teplota, regulační odchylka)

Na grafu vidíme posun výsledné teploty. Tento posun může být způsoben více faktory například: špatně zvoleným u_b , nebo také špatně nastaveným zesílením regulátoru.



Obrázek 59 - HW test, P regulace (akční veličina)

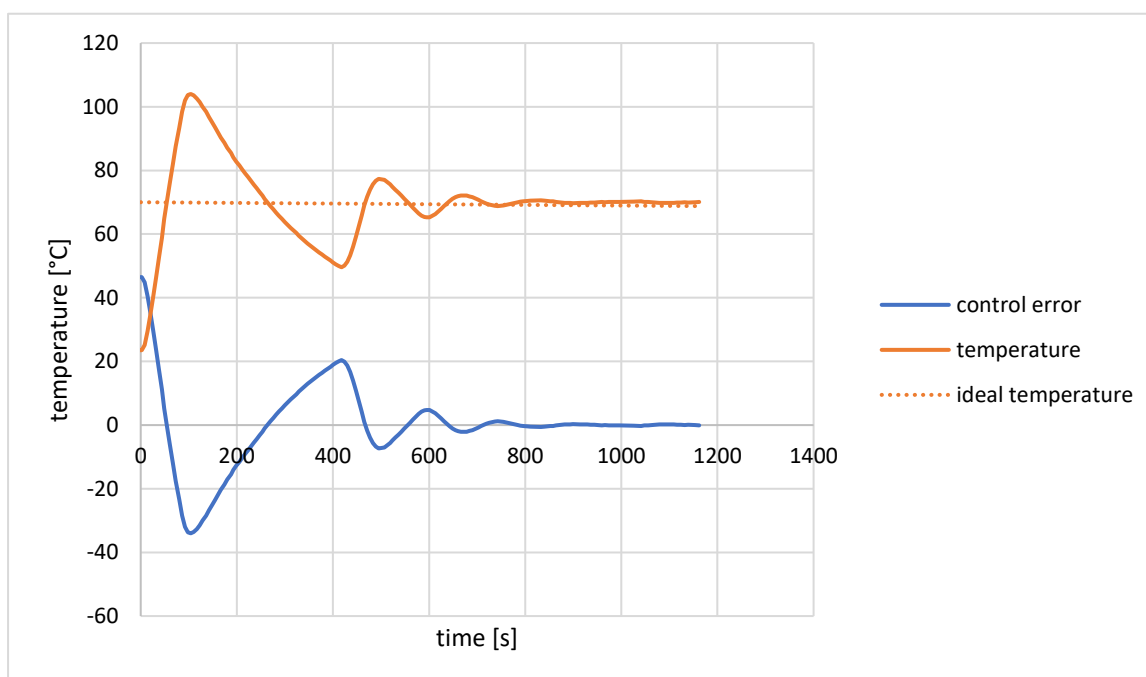
Z tohoto grafu zase vidíme nastavení u_b . Znamená to, že i při dosažení požadované teploty je na vyhřívací těleso vysílané řídicí napětí, čili regulátor udržuje teplotu.

6.3 Proporcionálně integrační regulace

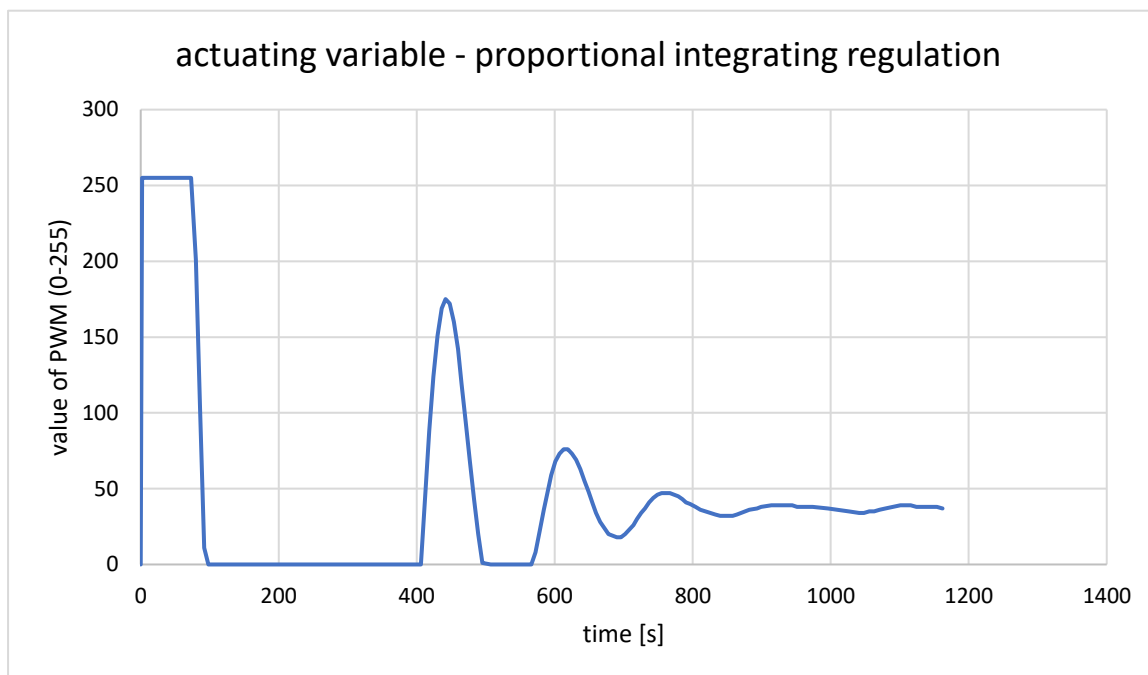
Pro kontrolu správnosti algoritmu jsme provedli toto měření s následujícími parametry:

Tabulka 18 - Parametry použité pro HW test PI regulace

Zesílení regulátoru	8
Časově integrační konstanta	2
Nastavená teplota	70°C



Picture 60 - HW test, PI regulace (teplota, regulační odchylka)



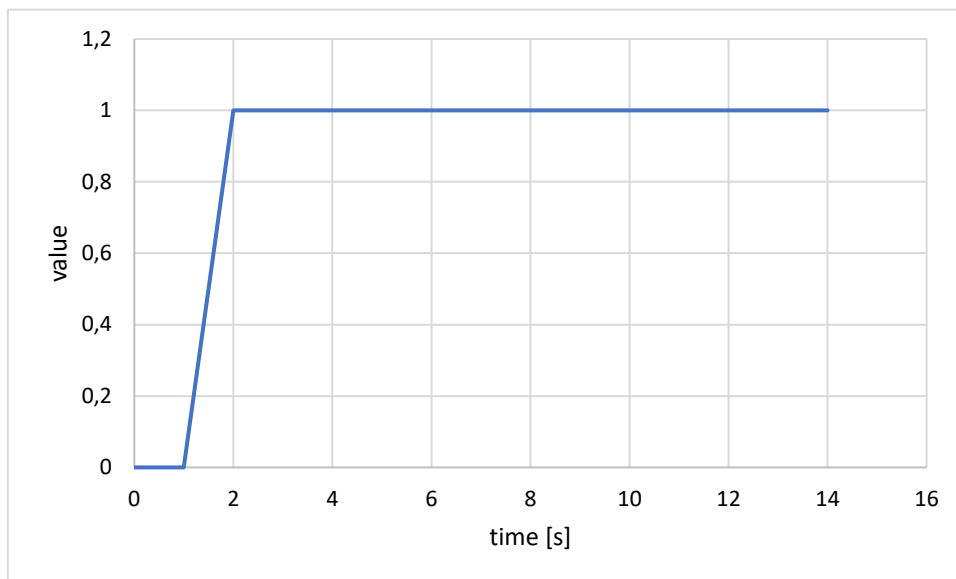
Picture 61 - HW test, PI regulace (akční veličina)

Z tohoto grafu vidíme, že regulátor pracuje tak jak očekáváme, ale v době, kdy by měla být teplota konstantní se regulátor rozkmitá. Regulační odchylka kmitá mezi -0,6 a 0,6. Nejspíše se jedná o špatně vybrané konstanty, proto je nutné provést identifikaci soustavy.

Jak jsme již psali v teoretické části této dokumentace, pokud je regulační odchylka příliš vysoká, regulátor pracuje jako dvojbodový. Pokud se regulační odchylka sníží, charakteristika se stane typickou pro PI regulaci.

7 Identifikace soustavy

Pro identifikaci soustavy potřebujeme změřit přechodovou charakteristiku. Tu změříme tak, že namísto akční veličiny přivedeme jednotkový skok.



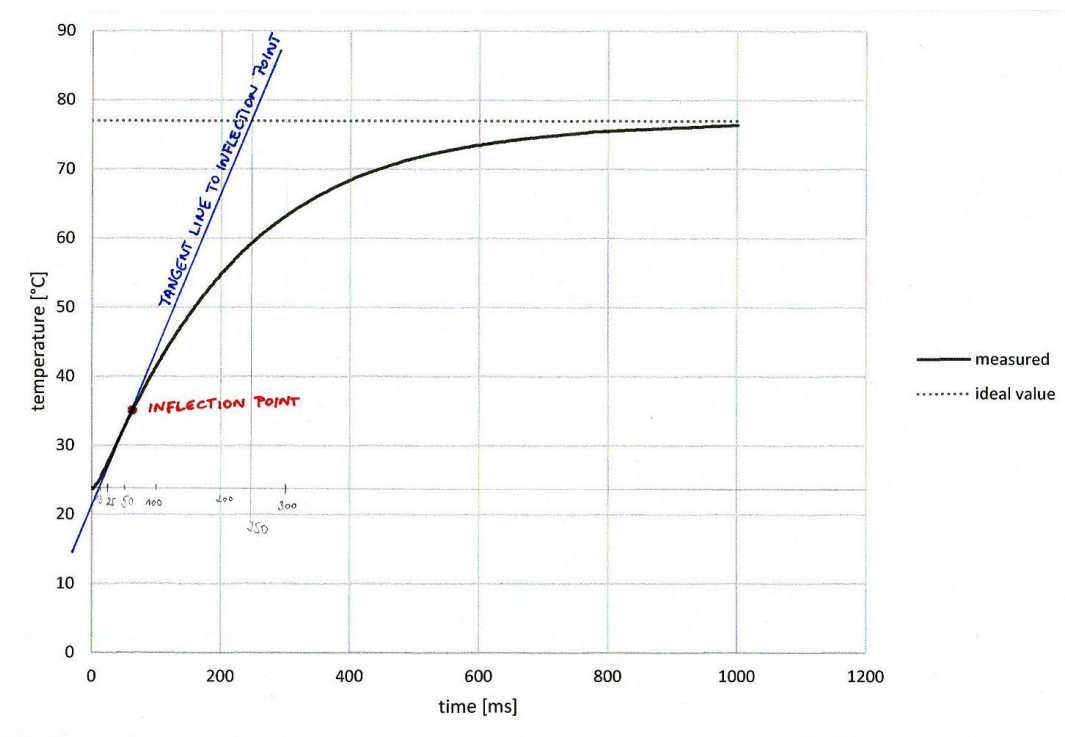
Obrázek 62 - Jednotkový skok

V naměřené charakteristice musíme najít inflexní bod (bod kde se mění přímka z konvexní na konkávní), a zkonstruovat tečnu k němu. V místě, kde tečna protne rovnoběžku s osou x vedenou začátkem charakteristiky, získáme úsečku 0 L. Po spuštění kolmice v místě, kde tečna protne rovnoběžku s osou x procházející maximem přechodové charakteristiky, vznikne protnutí kolmice s osou x úsečka L T.

Z velikosti úseček 0L a LT jsme schopni vypočítat dle empiricky získaných vztahů. Tato metoda je nazývaná Zingler-Nicholsova metoda.

Tabulka 19 – Vzorce pro výpočet konstant Zingler-Nicholasovou metodou

Regulace	K_P	K_I
P	$\frac{T}{L}$	0
PI	$0,9 * \frac{T}{L}$	$0,27 * \frac{T}{L^2}$



Obrázek 63 - Přejímová charakteristika, inflexní bod, tečna

Z grafu jsme schopni vyčíst následující hodnoty:

- Místo protnutí tečny s rovnoběžkou s osou x, vedenou počátkem charakteristiky: 13
- Místo protnutí tečny s rovnoběžkou s osou x, vedenou nejvyšší naměřenou hodnotou: 250

Z těchto hodnot jsme schopni vypočítat jednotlivé hodnoty:

- L: 13
- T: $250 - 13 = 237$

Po dosazení do výše uvedených vzorců dostaneme konstanty:

Tabulka 20 - Výpočet konstant Zingler-Nicholasovou metodou

Regulace	K_P	K_I
P	$\frac{T}{L} = \frac{237}{13} = 18,2$	0
PI	$0,9 * \frac{T}{L} = 0,9 * \frac{237}{13} = 16,4$	$0,27 * \frac{T}{L^2} = 0,27 * \frac{237}{13^2} = 0,4$

7.1 Kontrola správnosti konstant

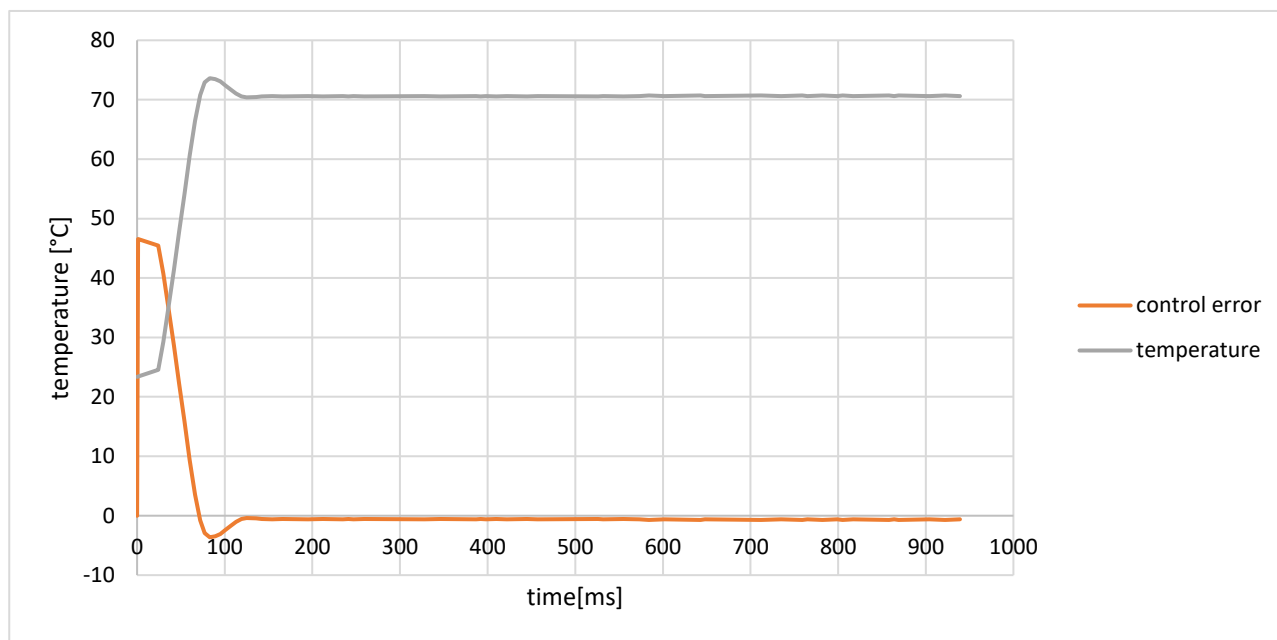
Správnost vypočtených konstant jsme potvrdili dalším kontrolním měřením.

7.1.1 Proporcionální regulace

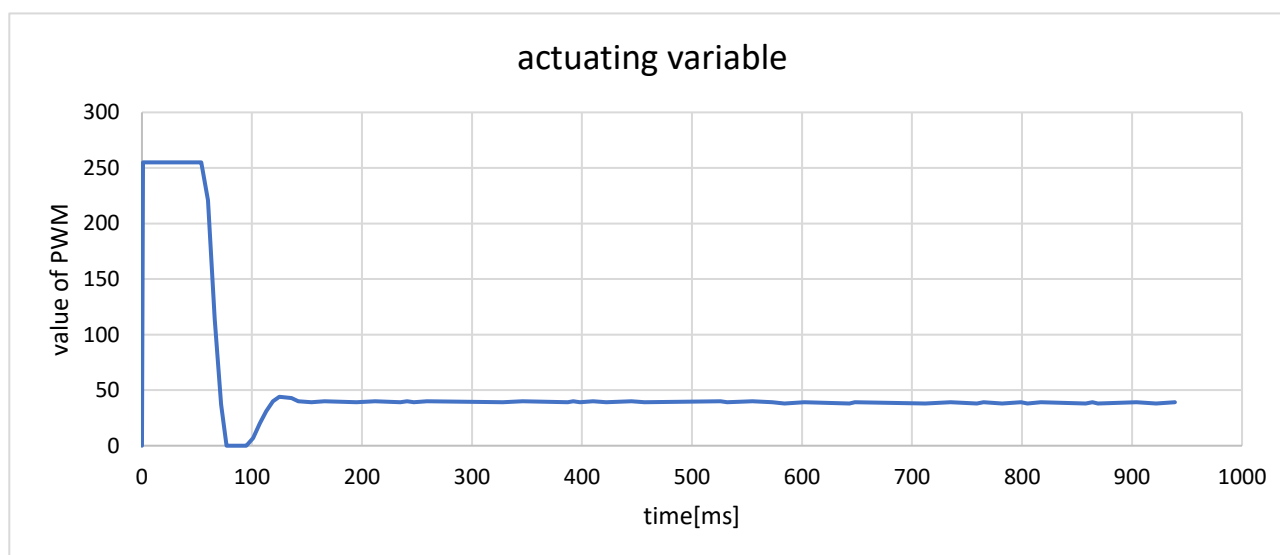
Provedli jsme měření s následujícími parametry:

Tabulka 21 - Parametry použité pro HW identifikované test P regulace

Zesílení regulátoru	18,2
Nastavená teplota	70°C



Obrázek 65 - Teplota, regulační odchylka (P regulace), identifikovaná soustava



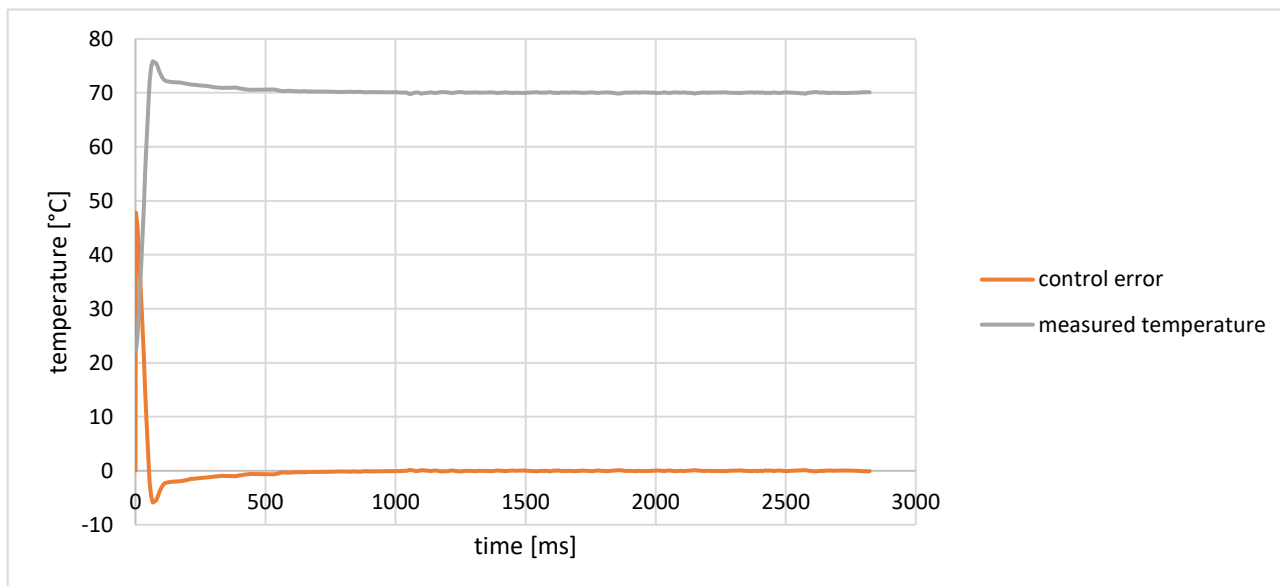
Obrázek 64 – Akční veličina (P regulace), identifikovaná soustava

7.1.2 Proporcionálně integrační regulace

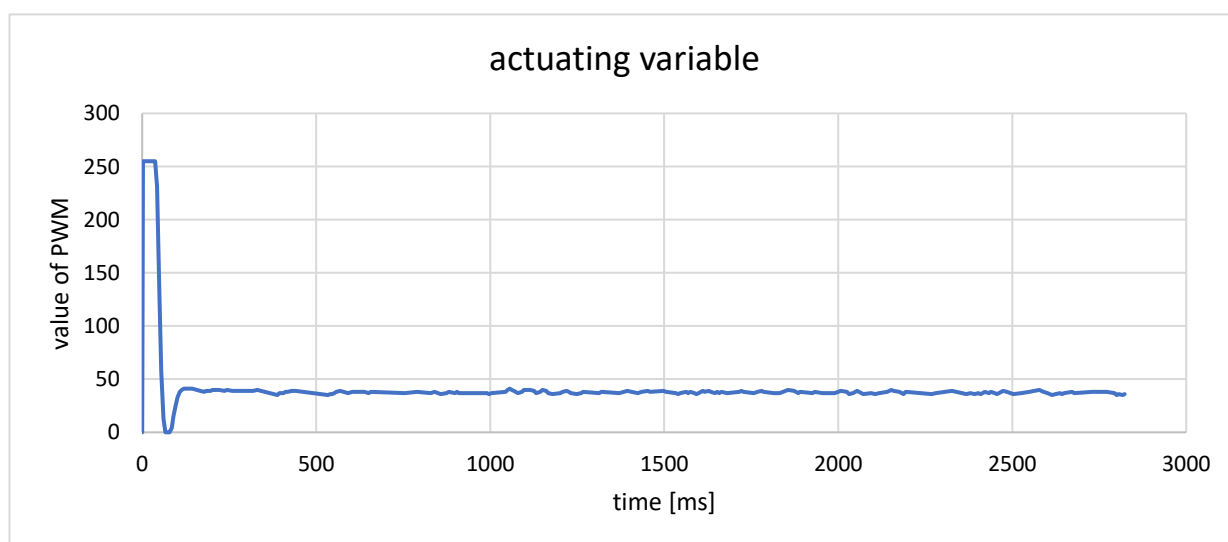
Provedli jsme měření s následujícími parametry:

Tabulka 22 - Parametry použité pro HW test identifikované PI regulace

Zesílení regulátoru	16,4
Časově integrační konstanta	0,4
Nastavená teplota	70°C



Obrázek 66 - Teplota, regulační odchylka (PI regulace), identifikovaná soustava



Obrázek 67 - Akční veličina (PI regulace), identifikovaná soustava

Vzhledem k neperiodičnosti zákmítů, si dovolíme tvrdit, že se jedná pouze o vliv prostředí (průvan, otevřené okno), a ne o systémovou chybu.

8 Finální model

Poslední částí našeho projektu je propojení výše zmíněných prvků dohromady. Přišroubování DPS , propojení s Arduinem a uzavření do boxů.

8.1 Kontrolér regulátoru

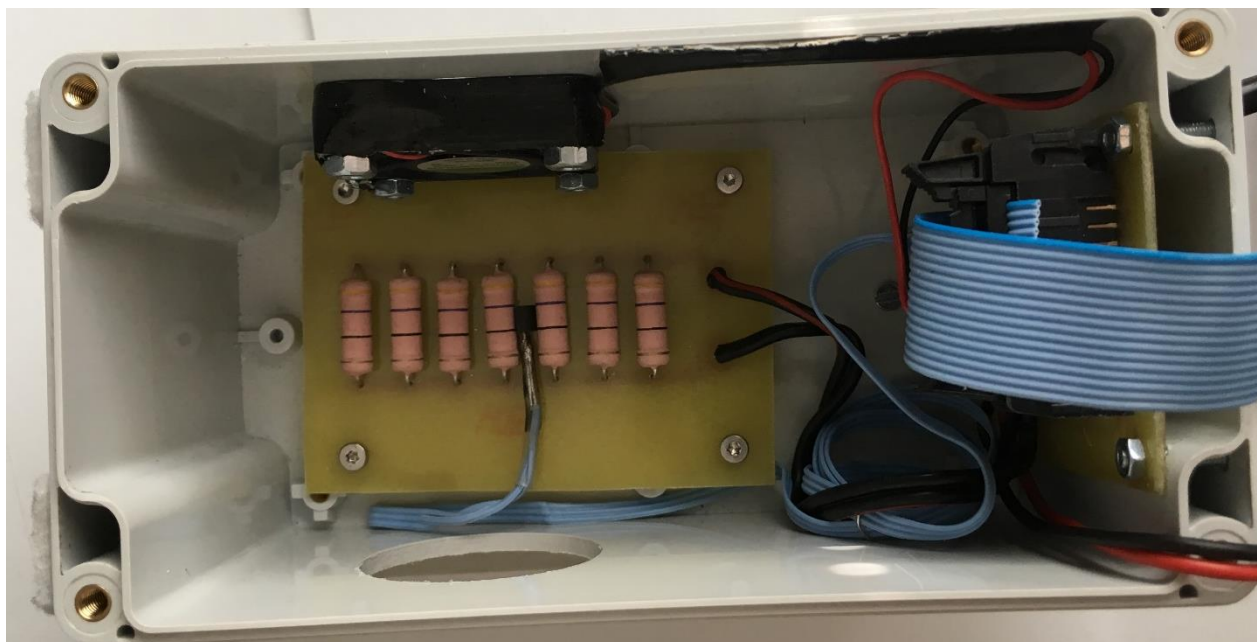


Obrázek 68 – Osazování kontroléru

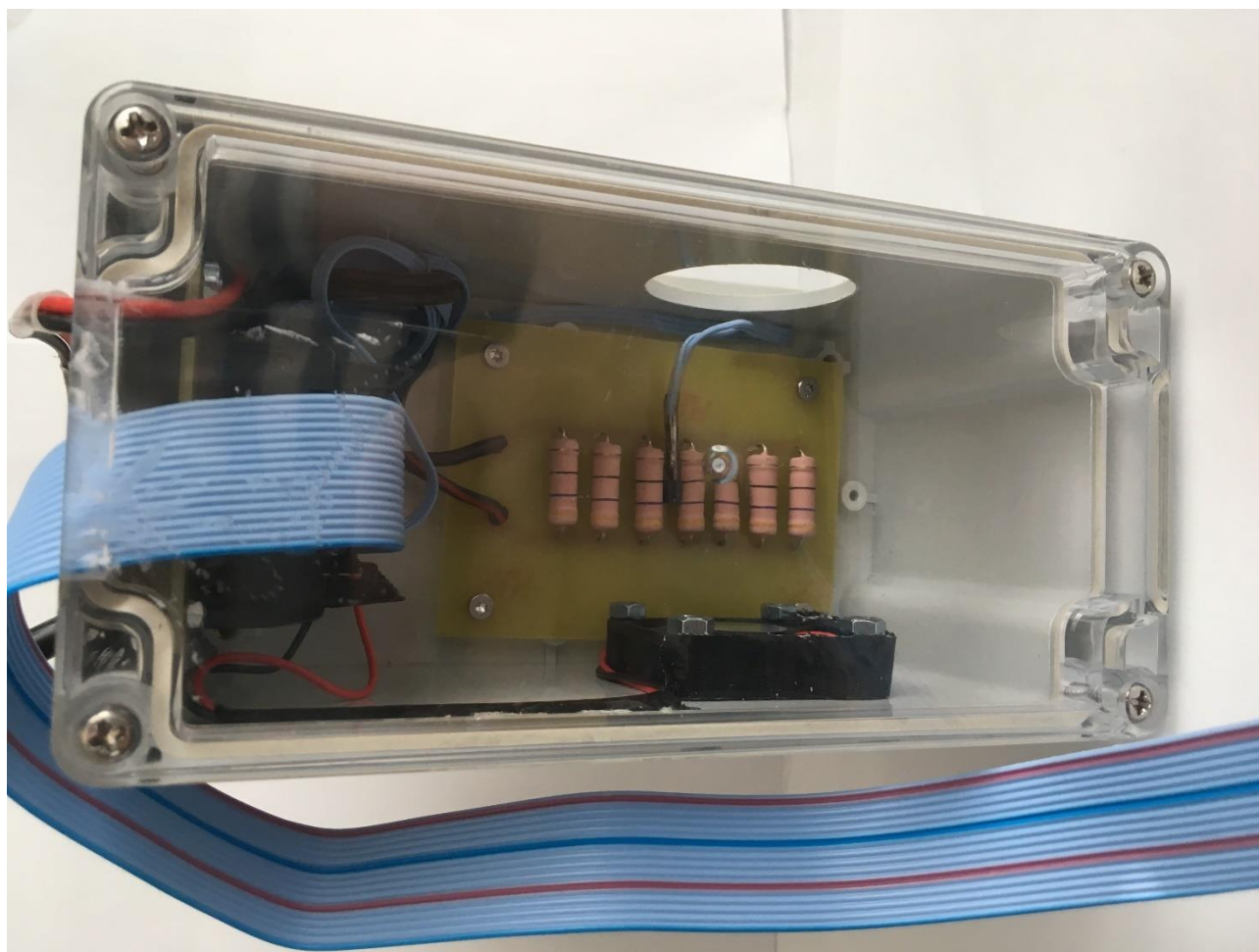


Obrázek 70 – Finální model kontroléru

8.2 Komůrka s vyhřívacím tělesem



Obrázek 69 – Osazování komůrky



Obrázek 71 – Finální model komůrky

8.3 Program regulátoru

Program jsme upravili tak, aby ihned po zapnutí regulátoru byly nastaveny námi vypočtené konstanty. Možnost změnit konstantu pro měření jsme ponechali, pro případné zkoušení s jiným nastavením.

9 Závěr

Na závěr chceme říci, že koncepce regulátoru byla dle našeho názoru uskutečněna. Postavili jsme funkční model pro demonstraci regulací včetně webového rozhraní. Během realizace jsme narazili na mnoho problému, ale většinu se nám podařilo úspěšně vyřešit.

Něteré problémy se nám bohužel nepodařilo vyřešit, ale myslíme si, že tyto problémy nebyly způsobeny špatným propojením nebo vadným programem. Například po připojení na webový server Arduino není schopno tak rychle rozeznat odeslání požadavku, a proto je zapotřebí všechno provést dvakrát. Myslíme si, že řešením by bylo využití druhého mikroprocesoru, nebo linuxového serveru pro hostování serveru, ale našim cílem bylo vytvořit jednoduchý pro obsluhu tak pro přenášení demonstrační model.

10 Reference

1. **ST Microelectronic.** [Online] May 2008. [Citace: 7. March 2019.] <https://www.st.com/resource/en/datasheet/cd00001225.pdf>.
2. **SPŠE Havířov.** Číslicové řídicí systémy. [Online] 05. 11 2017. [Citace: 7. March 2019.] publicat at school intranet.
3. **Mgr. Tomáš Zárybnický et al.** Elektronická učebnice. [Online] [Citace: 7. March 2019.] <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/957>.
4. **Mean Well.** farnell.com. [Online] 11. 3 2016. [Citace: 7. March 2019.] http://www.farnell.com/datasheets/2547981.pdf?_ga=2.189240107.1092266099.1551970860-455427088.1537292678.
5. **Integrated, Maxim.** maximintegrated.com. [Online] -. - 2018. [Citace: 7. March 2019.] <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>.
6. **Skalický, Jiří.** *Teorie řízení 1*. Brno : Vysoké učení technické, 2002. ISBN 8021421126.

11 Seznam použitých zkratek

CNC	computer numeric control
CZK	česká koruna
ČNB	česká národní banka
DPS	deska plošných spojů
DNS	domain name systém
GND	uzemnění
HTML	hypertext markup language
HW	hardware
IP	internet protocol
PLN	polský zloty
PWM	pulse width modulation
SPI	serial peripheral interface
SS	střídavé (napětí)
ST	stejnoseměrné (napětí)
TFT LCD	thin film transistor liquid crystal display
URL	uniform resource locator

Poznámka: V seznamu nejsou uvedeny obecně známe zkratky.

12 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Seznam proměnných používaný u všech typů regulací	15
Tabulka 2 – Dvojbodová regulace (teorie).....	16
Table 3 – Seznam použitých proměnných v proporcionální regulaci	17
Tabulka 4 – Seznam přidáných proměnných pro PI regulaci	17
Tabulka 5 - Parametry tranzistoru BD 139	23
Tabulka 6 – Rozpočet.....	27
Tabulka 7 – Piny pro signalizaci stavu na hlavním panelu	37
Tabulka 8 - Arduino Mega pinout (piny 22- 53).....	40
Tabulka 9 –Konektor pro přední indikační panel.....	41
Tabulka 10 – Konektor pro vyhřívací komůrku.....	41
Tabulka 11 – Seznam součástek pro DPS mikrokontroléru.....	42
Tabulka 12 - LRS-35-12	44
Tabulka 13 – Seznam součástek pro DPS pro komůrku	45
Tabulka 14 – Seznam součástek pro DPS pro vyhřívací těleso	46
Tabulka 15 – Seznam součástek pro DPS pro kontrolní panel	49
Tabulka 16 – Parametry použité pro HW test dvojbodové regulace.....	55
Tabulka 17 - Parametry použité pro HW test P regulace	56
Tabulka 18 - Parametry použité pro HW test PI regulace.....	57
Tabulka 19 – Vzorce pro výpočet konstant Zingler-Nicholasovou metodou	59
Tabulka 20 - Výpočet konstant Zingler-Nicholasovou metodou	60
Tabulka 21 - Parametry použité pro HW identifikované test P regulace	61
Tabulka 22 - Parametry použité pro HW test identifikované PI regulace.....	62

13 Seznam obrázků

Obrázek 1 – Školní model regulátoru	14
Obrázek 2 – Blokové schema teplotního regulátoru	15
Obrázek 3 – Časová závislost teploty u dvojbodové regulace (teorie)	16
Obrázek 4 - time dependence of temperature in two-point regulation (theoretical)	16
Obrázek 5 – Časová závislost akční veličiny u dvojbodové regulace (teorie).....	16
Obrázek 6 - time dependence of heating in two-point regulation (theoretical)	16
Obrázek 7 – schema zapojení senzoru DS18B20	18
Obrázek 8 – Pulzně šířková modulace	18
Obrázek 9 – Výkonový transistor jako ohřívač	19
Obrázek 10 – Výkonový transistor s chladičem	19
Obrázek 11 – Cívka z odporového drátu	20
Obrázek 12 – Výkonový resistor jako ohřívač.....	20
Obrázek 13 – Rozdíl obalů výkonových rezistorů – oranžový 50W, bílý 5W	21
Obrázek 14 – Schéma vyhřívacího tělesa se 4 rezistory	21
Obrázek 15 - 4 keramické paralelně zapojené rezistory.....	22
Obrázek 16 – Skupina výkonových rezistorů	22
Obrázek 17 – Simulace spínání tranzistoru v obvodu na obrázku číslo 17.....	24
Obrázek 18 – Topné těleso se spínacím tranzistorem	24
Obrázek 19 – První hardwarové testy s 4 rezistory a chladičem, komůrka (200ml, sklo).....	25
Obrázek 20 – Obvod pro chlazení.....	26
Obrázek 21 – Reakce enkóderu na otáčení nebo zmáčknutí.....	26
Obrázek 22 – Hlavní menu vykreslené na TFT displeji	30
Obrázek 23 – Vývojový diagram vysvětlující logiku dvojbodové regulace.....	31
Obrázek 24 - Vývojový diagram vysvětlující logiku proporcionální regulace.....	33
Obrázek 25 - Vývojový diagram vysvětlující logiku proporcionálně integrační regulace	35
Obrázek 26 – Bitmapa s logy	37
Obrázek 27 - Web interface během měření	38
Obrázek 28 – Data z měřicího souboru na HTML stránce	39
Obrázek 29 – Schéma propojení mikrokontroléru a jednotlivých DPS.....	42
Obrázek 30 – DPS mikrokontroléru (osazovací plán)	43
Obrázek 31 – DPS mikrokontroléru (měřítko 1:1)	43
Obrázek 32 – DPS mikrokontroléru (vrchní strana)	43
Obrázek 33 – DPS mikrokontroléru (strana součástek).....	43
Obrázek 34 – Schéma propojení DPS pro komůrku	45
Obrázek 35 – Schéma propojení DPS pro vyhřívací těleso	46
Obrázek 36 – DPS pro komůrku (osazovací plán).....	46
Obrázek 37 – DPS pro komůrku (měřítko 1:1).....	46
Obrázek 38 - DPS pro vyhřívací těleso (měřítko 1:1)	47
Obrázek 39 - DPS pro vyhřívací těleso (osazovací plán)	47
Obrázek 40 – DPS pro komůrku (vrchní strana).....	47
Obrázek 41 – DPS pro komůrku (strana součástek)	47
Obrázek 42 - DPS pro vyhřívací těleso (vrchní strana)	48
Obrázek 43 - DPS pro vyhřívací těleso (strana součástek).....	48
Obrázek 44 – Schéma propojení DPS kontrolního panelu	48
Obrázek 45 – DPS pro kontrolní panel (osazovací plán).....	49
Obrázek 46 – DPS pro kontrolní panel (měřítko 1:1).....	49
Obrázek 47 – DPS pro kontrolní panel (strana součástek).....	50
Obrázek 48 – DPS pro kontrolní panel (vrchní strana).....	50
Obrázek 49 - SOLIDWORKS model krytu mikrokontroléru	51

Obrázek 50 - SOLIDWORKS model ochranného skla	51
Obrázek 51 – Finální model krytu pro mikrokontrolér (včetně přilepených LED diod a ochranného skla).....	52
Obrázek 52 – Finální model komůrky včetně již instalovaného napájecího zdroje	53
Obrázek 53 - SOLIDWORKS model komůrky	53
Obrázek 54 – Zadní pohled na komůrku se zdrojem	54
Obrázek 55 – Boční pohled na komůrku se zdrojem	54
Obrázek 56 - HW test, dvojbodová regulace (teplota, regulační odchylka)	55
Obrázek 57 - HW test, dvojbodová regulace (akční veličina)	56
Obrázek 58 - HW test, P regulace (teplota, regulační odchylka)	56
Obrázek 59 - HW test, P regulace (akční veličina)	57
Picture 60 - HW test, PI regulace (teplota, regulační odchylka).....	57
Picture 61 - HW test, PI regulace (akční veličina).....	58
Obrázek 62 - Jednotkový skok.....	59
Obrázek 63 - Přechodová charakteristika, inflexní bod, tečna	60
Obrázek 64 – Akční veličina (P regulace), identifikovaná soustava	61
Obrázek 65 - Teplota, regulační odchylka (P regulace), identifikovaná soustava	61
Obrázek 66 - Teplota, regulační odchylka (PI regulace), identifikovaná soustava.....	62
Obrázek 67 - Akční veličina (PI regulace), identifikovaná soustava	62
Obrázek 68 – Osazování kontroléru.....	63
Obrázek 69 – Osazování komůrky	64
Obrázek 70 – Finální model kontroléru	64
Obrázek 71 – Finální model komůrky	65

14 Seznam použitých výňatků ze zdrojového kódu

Zdrojový kód 1 - setval (float value, float mn, float mx, float inc) funkce	29
Zdrojový kód 2 – Funkce pro vykreslení menu	30
Zdrojový kód 3 – Vykreslení menu včetně pohybu v něm	30
Zdrojový kód 4 – Dvojbodová regulace (zkráceno)	32
Zdrojový kód 5 – Proporcionální regulace (zkráceno)	34
Zdrojový kód 6 - Proporcionálně integrační regulace (zkráceno)	36

15 Přílohy

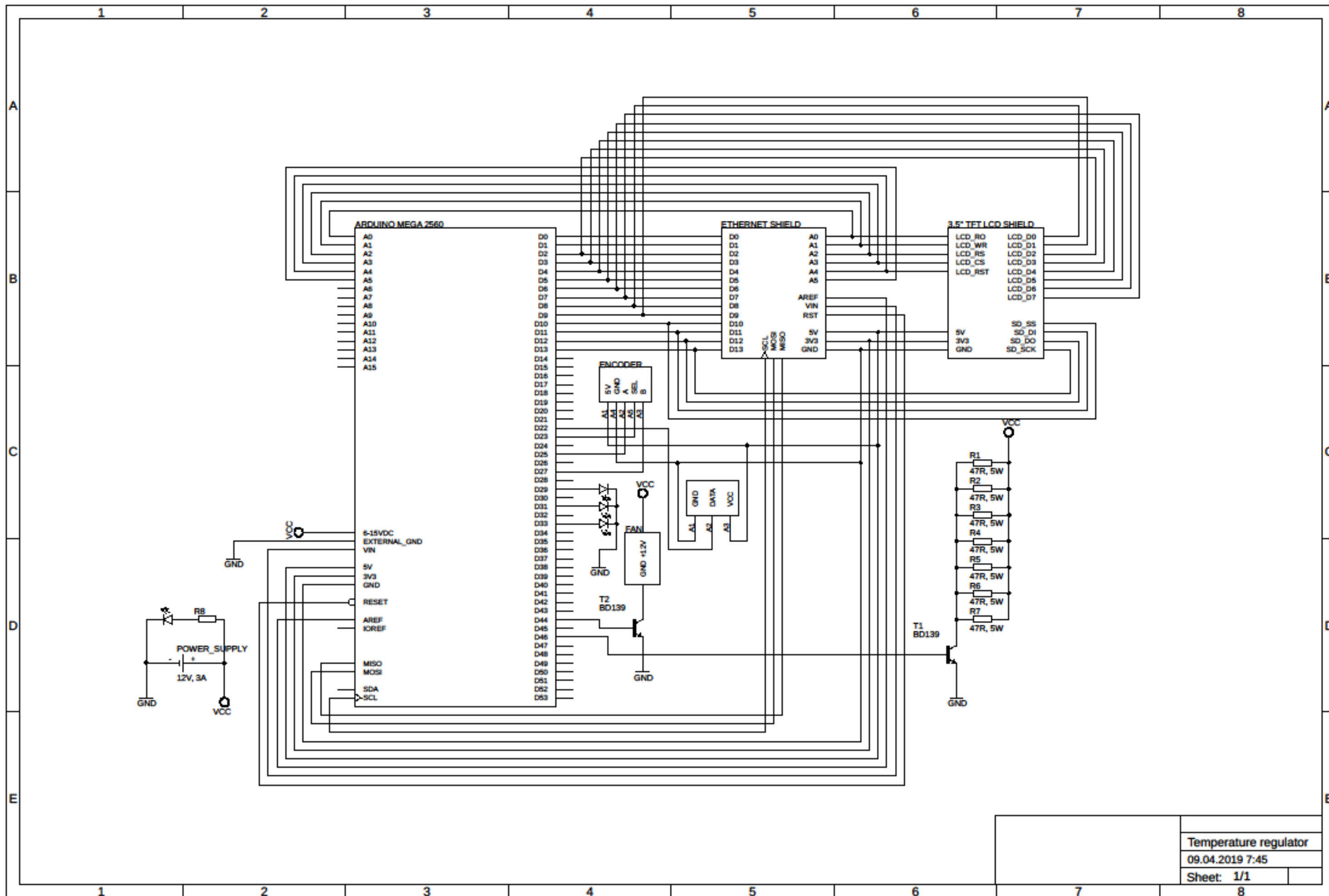
V textu:

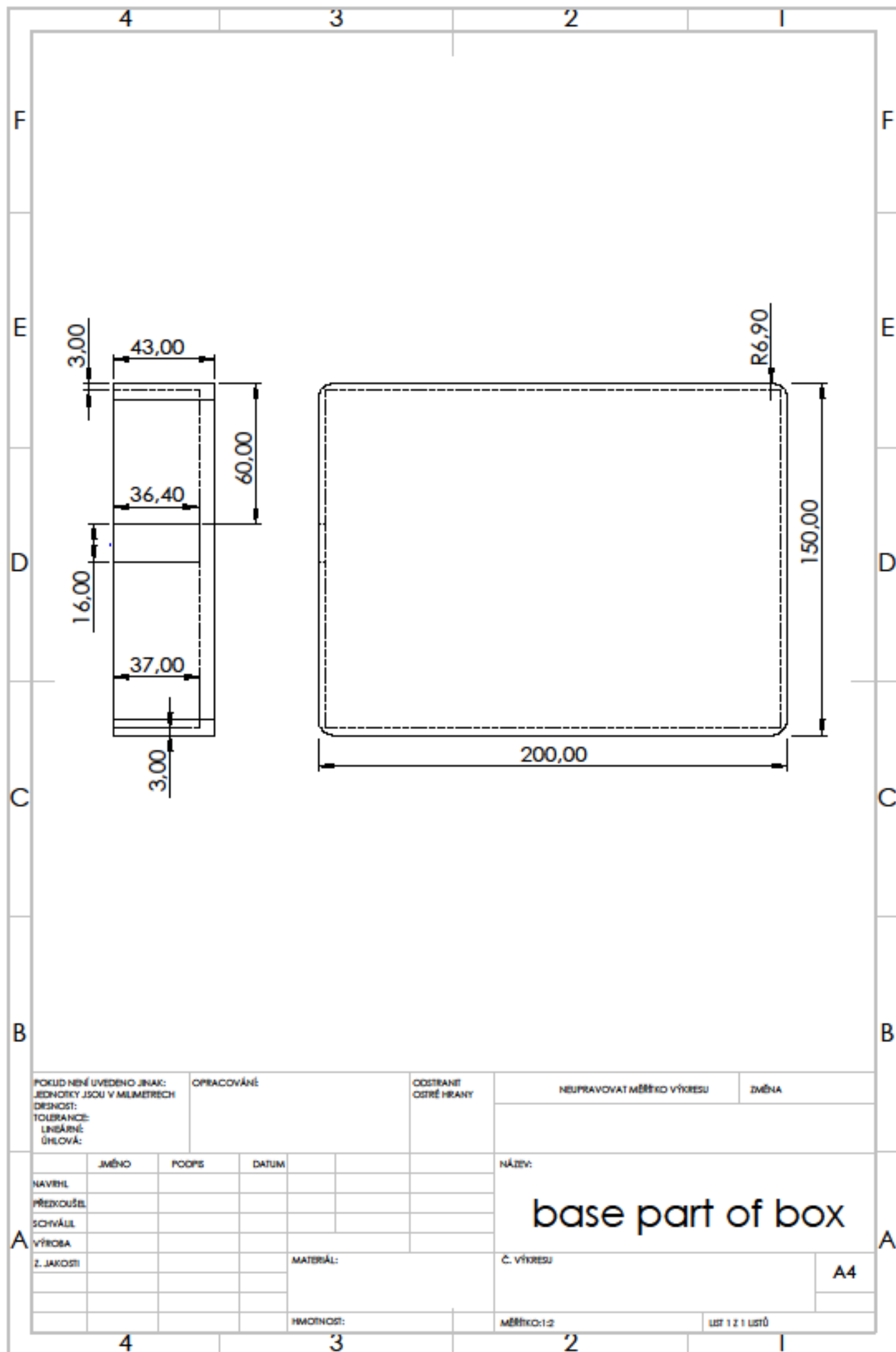
Soubor 1 - Soubor config.txt.....	38
Soubor 2 – Příklad měřicího souboru	39

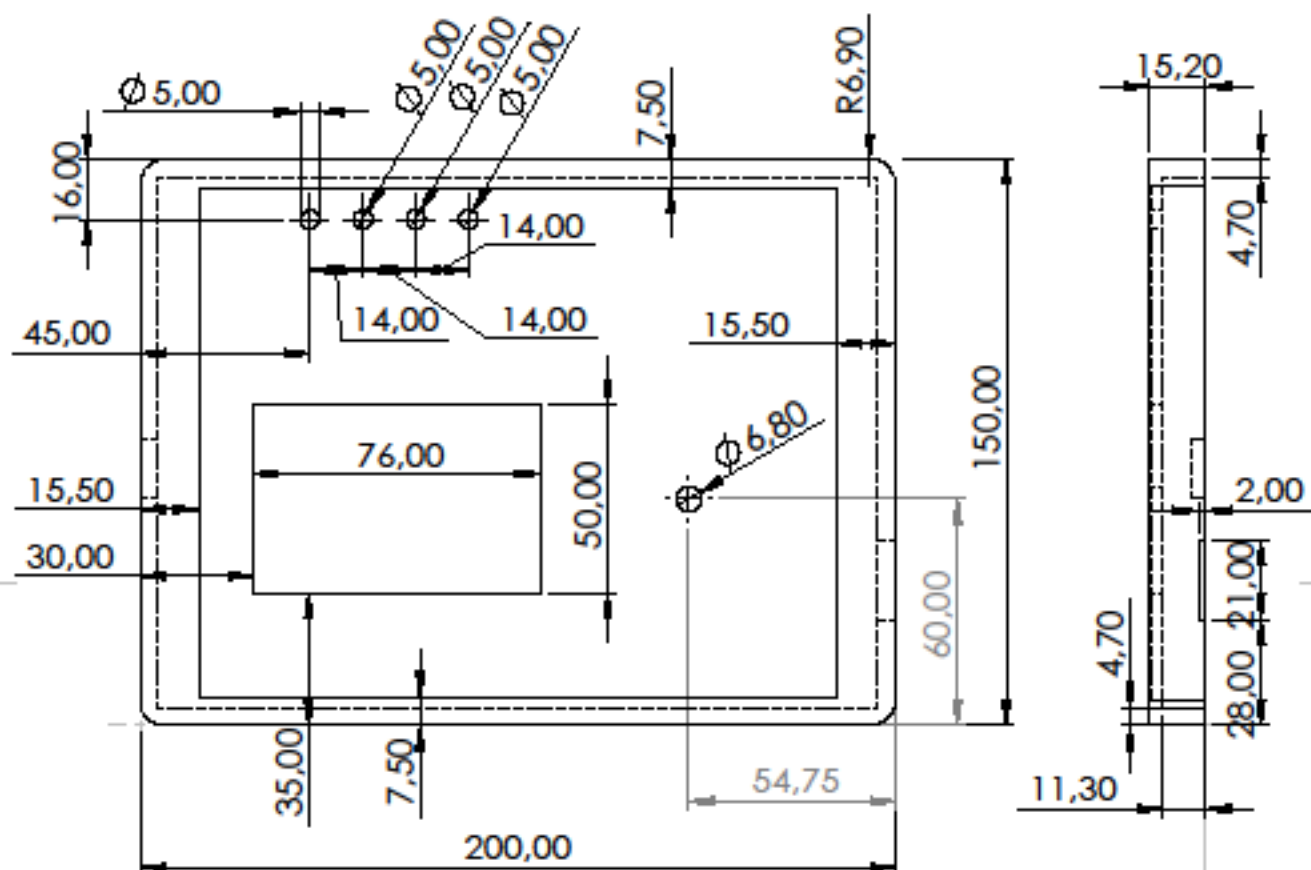
Ostatní:

- Schéma zapojení
- Base part of box – výkres součásti
- Upper part of box – výkres součásti
- Protective glass – výkres součásti
- Base part of heater box – výkres součásti
- Upper part of heater box – výkres součásti
- Zdrojový kód – hlavní program pro regulátor
- Bitmapa – zdrojový soubor pro vykreslení loga

•







POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DEKOR:
TOLERANCE:
UNĚBÁRNĚ
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNĚ

ODSTRANIT
OSTŘÍ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMĚNO	PODPS	DATUM		
NAVĚHL					
PŘEDKOUŠEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI					

MATERIÁL:

HMOTNOST:

NÁZEV:

upper part of box

Č. VÝKRESU

MĚŘÍTKO:1:2

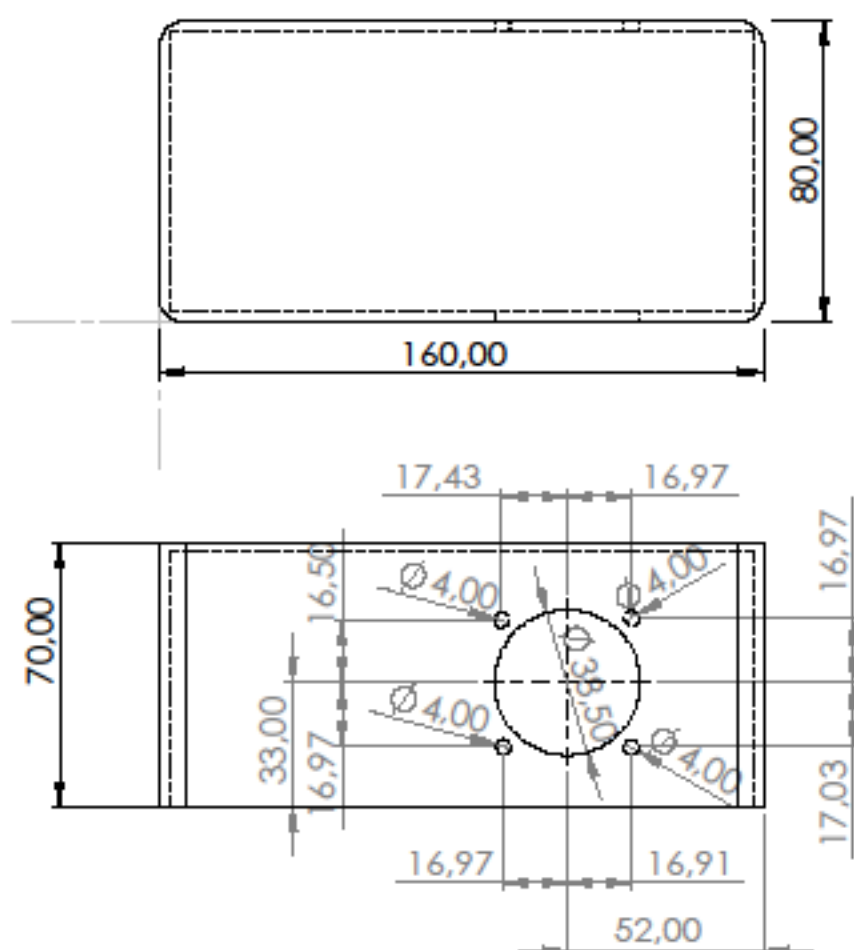
A4

LIST 1 Z 1 LISTŮ

4				3				2				1			
F															
E															
D															
C															
B															
A															

POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DEKHOŠT: TOLERANCE: LINIÁRNÍ: ÚHELOVÁ:				OBRACOVÁNÉ				OSTRANIT OSTŘÍ HRANY		NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU				JMÉNO	
										protective glass					
NÁZEV:		protective glass													
Č. VÝKRESU															
MĚŘÍTKO: 1:1		A4													
LIST 1 Z 1 LISTŮ															

4				3				2				1			
---	--	--	--	---	--	--	--	---	--	--	--	---	--	--	--



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK:
JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH
DESNOST:
TOLERANCE:
LINIÁRNÍ:
ÚHLOVÁ:

OPRACOVÁNÉ

ODSTRANIT
OSTŘÍ HRANY

NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU

ZMĚNA

	JMÉNO	PODPS	DATUM		
NAVŘEL					
PŘEDKOUŠEL					
SCHVÁLIL					
VÝROBA					
Z. JAKOSTI					

MATERIÁL:

HMOTNOST:

NÁZEV:

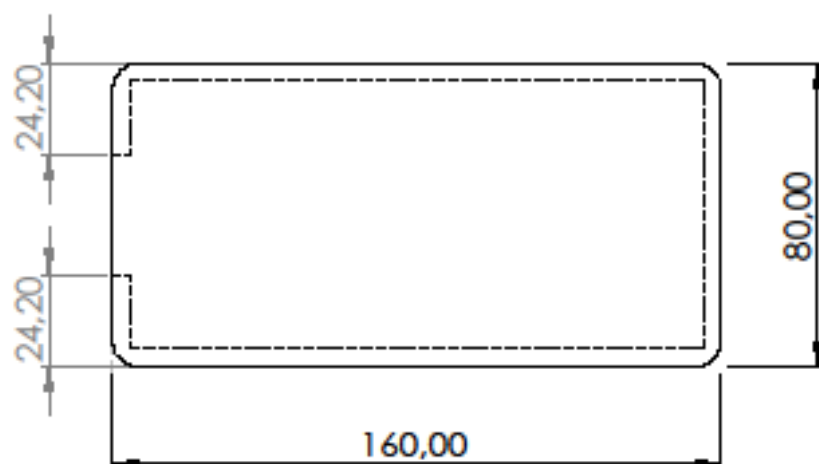
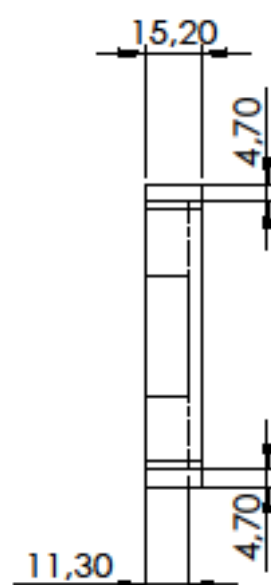
base of heater box

Č. VÝKRESU

MĚŘÍTKO:1:2

A4

LIST 1 Z 1 LISTŮ



POKUD NENÍ UVEDENO JINAK: JEDNOTKY JSOU V MILIMETRECH DEŠKOST: TOLERANCE: LINIÁRNĚ ÚHELOVĚ:			OPRACOVÁNĚ			ODSTRANIT OSTŘÍ HRANY			NEUPRAVOVAT MĚŘÍTKO VÝKRESU		ZMĚNA	
									NÁZEV: upper part of heater box			
NÁVHL									Č. VÝKRESU			
PŘEDKOUŠEL												
SCHVÁLIL									A4			
VÝROBA												
Z. JAKOSTI						MATERIÁL:						
						HMOTNOST:			MĚŘÍTKO:1:2		LIST 1 Z 1 LISTŮ	

