



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Název:	Výukový přípravek s Peltierovým článkem
Student:	Karel Hynek
Vedoucí:	Ing. Miroslav Skrbek, Ph.D.
Studijní program:	Informatika
Studijní obor:	Podstatové inženýrství
Katedra:	Katedra číslicového návrhu
Platnost zadání:	Do konce letního semestru 2017/18

Pokyny pro vypracování

Navrhněte a realizujte výukový přípravek chladicího boxu s Peltierovým článkem. Existující konstrukci chladicího boxu doplňte o chladič s ventilátorem pro dostatečné chlazení teplého konce článku. Navrhněte a realizujte elektroniku pro řízení výkonu chlazení pulzní-šíkovou modulací, sledování teploty uvnitř i vně boxu polovodičovými a odporovými teplotními senzory. Vše připojte k mikropočítačovému kitu a napište základní programové vybavení ve formě knihoven a demo aplikace. Rozsah práce upesněte po dohodě s vedoucím práce.

Seznam odborné literatury

Dodá vedoucí práce.

doc. Ing. Hana Kubátová, CSc.
vedoucí katedry

prof. Ing. Pavel Tvrdík, CSc.
děkan

V Praze dne 3. ledna 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA INFORMAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
KATEDRA ČÍSLICOVÉHO NÁVRHU



Bakalářská práce

Výukový přípravek s Peltiérovým článkem

Karel Hynek

Vedoucí práce: Ing. Miroslav Skrbek, Ph.D.

12. května 2017

Poděkování

V první řadě bych na tomto místě rád poděkoval panu Ing. Miroslavu Skrbkovi, Ph.D. za jeho neuvěřitelnou ochotu mi pomoci a velké množství rad, které značným způsobem přispěly ke zkvalitnění práce. Dále bych rád poděkoval své přítelkyni Kateřině za jazykovou korekturu a pomoc s úpravou obrázků. A v poslední řadě děkuji své rodině za podporu během celé doby mého studia.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o etické přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona, ve znění pozdějších předpisů. V souladu s ust. § 46 odst. 6 tohoto zákona tímto uděluji nevýhradní oprávnění (licenci) k užití této mojí práce, a to včetně všech počítačových programů, jež jsou její součástí či přílohou, a veškeré jejich dokumentace (dále souhrnně jen „Dílo“), a to všem osobám, které si přejí Dílo užít. Tyto osoby jsou oprávněny Dílo užít jakýmkoli způsobem, který nesnižuje hodnotu Díla, a za jakýmkoli účelem (včetně užití k výdělečným účelům). Toto oprávnění je časově, teritoriálně i množstevně neomezené. Každá osoba, která využije výše uvedenou licenci, se však zavazuje udělit ke každému dílu, které vznikne (byť jen zčásti) na základě Díla, úpravou Díla, spojením Díla s jiným dílem, zařazením Díla do díla souborného či zpracováním Díla (včetně překladu), licenci alespoň ve výše uvedeném rozsahu a zároveň zpřístupnit zdrojový kód takového díla alespoň srovnatelným způsobem a ve srovnatelném rozsahu, jako je zpřístupněn zdrojový kód Díla.

V Praze dne 12. května 2017

.....

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta informačních technologií

© 2017 Karel Hynek. Všechna práva vyhrazena.

Tato práce vznikla jako školní dílo na Českém vysokém učení technickém v Praze, Fakultě informačních technologií. Práce je chráněna právními předpisy a mezinárodními úmluvami o právu autorském a právech souvisejících s právem autorským. K jejímu užití, s výjimkou bezúplatných zákonných licencí, je nezbytný souhlas autora.

Odkaz na tuto práci

Hynek, Karel. *Výukový přípravek s Peltiérovým článkem*. Bakalářská práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta informačních technologií, 2017.

Abstrakt

Bakalářská práce se zabývá tvorbou výukového přípravku s Peltierovým článkem. Tento přípravek dokáže ochladit i ohřát kapalinu na požadovanou teplotu pomocí termoelektrického chlazení a ohřevu.

Cíle bylo dosaženo pomocí číslicového regulátoru, který ovládá Peltierův článek pulzně šířkovou modulací.

Práce se v první řadě zabývá konstrukcí přípravku a návrhem chlazení teplé strany Peltierova článku s ohledem na funkčnost a velikost celého zařízení. Dále řeší návrh elektrického schématu, plošného spoje a výběr součástek. V poslední řadě se práce zabývá implementací nezbytných knihoven pro čtení senzorů, regulátoru a ukázkové aplikace.

Vytvořený přípravek byl úspěšně otestován a měl by sloužit jako výuková pomůcka na ČVUT v Praze.

Klíčová slova Výukový přípravek, Peltierův článek, Stabilizace teploty, Číslicový regulátor

Abstract

This bachelor's thesis deals with design of educational kit with the Peltier device. The kit can cool and warm up liquid on preset temperature using thermoelectric cooling and warming.

The goal was reached with discrete controller, which is controlling Peltier device by pulse width modulation.

This thesis concerns construction of whole kit and designing cooler for Peltier device considering size of the kit. It also deals with design of electrical scheme, circuit board and selecting right electronic components. Lastly, thesis deals with implementation of libraries for reading from sensors, discrete controller and sample application.

The educational kit was successfully tested and should help to educate students at CTU in Prague.

Keywords Educational Kit, Peltier Device, Temperature stabilization, Discrete controller

Obsah

Úvod	1
1 Rešeršní část	3
1.1 Peltiérův článek	3
1.2 Regulace	7
1.3 1 Wire	10
1.4 Vývojová deska Nordic nRF51822 mKIT	14
1.5 Software	14
2 Analýza a návrh	17
2.1 Existující prototyp	18
2.2 Konstrukce	18
2.3 Senzory	21
2.4 Elektronika a hardware	23
2.5 Knihovny a ukázkový program	28
3 Realizace	35
3.1 Plošný spoj	35
3.2 Programové vybavení	38
3.3 Konstrukce	44
4 Testování	47
4.1 Funkčnost chlazení a ohřevu	47
4.2 Plošný spoj	48
4.3 Filtrování PWM	48
4.4 Teplotní senzory	48
4.5 Kvadrurní dekodér	49
4.6 Regulátor	49
4.7 Úprava knihovny mBED	51
4.8 Ukázková aplikace	51

Závěr	53
Literatura	55
A Seznam použitých zkratk	59
B Obsah příloženého CD	61
C Seznam součástí a schéma zapojení	63
D Maska plošného spoje	67
E Grafy průběhu regulace	69
F Překlad projektu v mBED	73
G Dokumentace přípravku pro studenty	75
G.1 Zařízení 1 Wire	75
G.2 Zařízení na sběrnici I ² C	76
G.3 Analogová zařízení	76
G.4 Ovládací prvky	77
G.5 Řízení Peltiérova článku	77

Seznam obrázků

0.1	Ilustrační obrázek	2
1.1	Regulační obvod	8
1.2	1 Wire - Připojení	11
1.3	1 Wire - Inicializace	12
1.4	1 Wire - Komunikace	12
2.1	Schéma Konstrukce	18
2.2	Blokové schéma elektroniky	23
2.3	Buzení P-MOS	24
2.4	Zapojení PT100	27
2.5	Blokové schéma programového vybavení	28
2.6	Časový hazard implementace PWM v mBED	31
3.1	Výukový přípravek	35
3.2	Plošný spoj	36
3.3	Zapojení filtru PWM	37
4.1	Graf průběhu regulace	50
D.1	Maska plošného spoje ze strany součástek	67
D.2	Maska plošného spoje ze strany spojů	68
E.1	Graf průběhu regulace č. 1	69
E.2	Graf průběhu regulace č. 2	70
E.3	Graf průběhu regulace č. 3	70
E.4	Graf průběhu regulace č. 4	71
E.5	Graf průběhu teploty č. 1	71
E.6	Graf průběhu teploty č. 2	72

Seznam tabulek

1.1	Seřízení PID regulátoru podle Ziegler-Nicholsovy metody	10
2.1	Specifikace článku TEC127050	19
3.1	Zapojení pinů na řídicí desku	39
C.1	Seznam součástí	66
G.1	Zapojení 1 Wire	75
G.2	1 Wire zařízení	75
G.3	Zapojení I ² C	76
G.4	Zařízení I ² C	76
G.5	Analogová zařízení	76
G.6	Hodnoty k výpočtu	76
G.7	Zapojení ovládacích prvků	77
G.8	Řízení článku	77

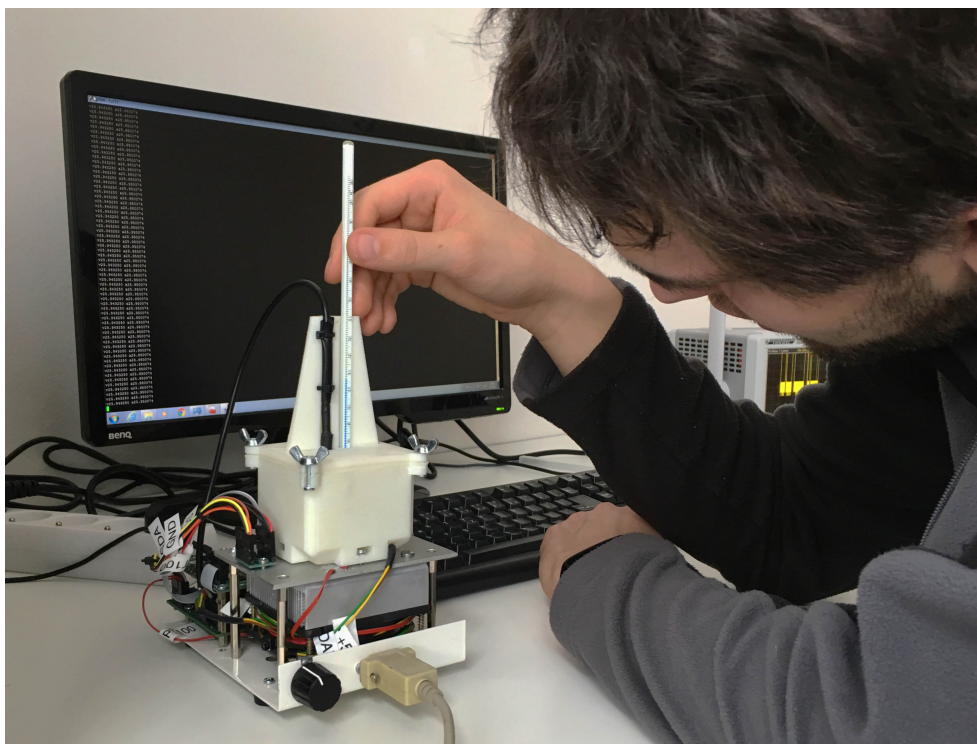
Úvod

Cílem práce je vytvoření výukového přípravku s Peltiérovým článkem. Přípravek dokáže ochladit i ohřát tekutinu na požadovanou teplotu a tu pomocí regulátoru nadále udržovat. Vytvořené zařízení by mělo sloužit jako výuková pomůcka v předmětu Pokročilé vestavné systémy vyučovaného na Fakultě informačních technologií ČVUT v Praze.

O správný chod celého zařízení se stará vývojová deska nRF51822 mKIT od společnosti Nordic Semiconductor, obsahující procesor architektury ARM Cortex M0. Ta ovládá výkon Peltiérova článku pomocí pulzně šířkové modulace a zároveň kontroluje teplotu pomocí pěti teplotních čidel rozmístěných na přípravku. Tyto teplotní senzory jsou připojeny pomocí rozhraní I²C, 1 Wire a A/D převodníku. Ovládání zařízení je řešeno pomocí sériového rozhraní RS232 a mechanického rotačního enkodéru.

Součástí bakalářské práce je také implementace knihoven a ukázkového programu v prostředí mBED, která poskytuje podklady pro budoucí využití ve výuce.

V následujícím textu je nejdříve představen Peltiérův článek, regulátor a sběrnice 1 Wire. V druhé kapitole je popsán návrh vlastního přípravku, identifikovány největší problémy a nastíněn způsob jejich řešení. Ve třetí kapitole je uvedena konkrétní realizace konstrukce, elektrického zapojení a ukázkového programu s regulátorem. V poslední kapitole jsou popsány metody, které sloužily k finálnímu ověření funkčnosti celého zařízení.



Obrázek 0.1: Ilustrační obrázek práce studenta s přípravkem

Rešeršní část

1.1 Peltiérův článek

V roce 1834 uveřejnil v časopise *Annales de physique et chimie* francouzský fyzik Jean C. Peltier článek o teplotních anomáliích, které zpozoroval na rozhraní dvou elektrických vodičů, když jimi protékal elektrický proud. Tato „anomálie“, dnes označována jako Peltiérův jev, popisuje, že při průchodu elektrického proudu spojem dvou vodičů se na jedné straně jejich styčných ploch teplo uvolňuje a na druhé zase pohlcuje. Na základě tohoto jevu dnes fungují termoelektrické články, pro které se používá anglické označení TEC (Thermo-electric Cooler). V češtině se pro tyto články ustálilo několik názvů, ale nejčastěji se označují jako Peltiérové články [1].

Článek pracuje jako tepelná pumpa, která v podstatě vysává teplo z jedné své strany a předává jej na druhou. Směr tohoto tepelného proudění je dán směrem procházejícího proudu.

Peltiérové články našly uplatnění v mnoha odvětvích lidské činnosti (lékařství, laboratorní zařízení, klimatizační zařízení. . .), z nichž asi nejznámější je použití v auto-ledničkách. Výhodou Peltiérova článku je jeho vysoká spolehlivost, jelikož neobsahuje žádné mechanické části. Naopak nevýhodou, která nejspíše zabránila jeho masovému rozšíření v chladících jednotkách, je příliš nízká účinnost [2].

1.1.1 Konstrukce

Základním stavebním prvkem TEC článku je mřížka sériově zapojených termoelektrických článků mezi dvěma keramickými deskami. Jeden termoelektrický článek je tvořen dvěma polovodiči typu P (polovodič s děrovou vodivostí) a N (polovodič s elektronovou vodivostí), které jsou připájeny na můstek spojující oba vodiče dohromady. Tento můstek vytváří rozhraní, na kterém vzniká Peltiérův jev. Pájené spojení vodičů na můstek omezuje maximální pracovní

teplotu článku, kterou je právě teplota tání použité pájky. Výrobci ale často udávají (z důvodu životnosti) maximální teplotu mnohem nižší [3].

Typ použité pájky se liší podle typu článku a nejvyšší možné teploty, které může být Peltiérův článek dlouhodobě vystaven. Nejčastěji se používají pájky ze slitiny cín-antimon, nebo cín-olovo.

Typ použitého termoelektrického materiálu se odvíjí od maximálního teplotního zatížení. Nejčastěji se ale volí slitiny na bázi telluru a bismutu. Můstky bývají často z mědi pro její malý měrný elektrický odpor [4].

1.1.2 Chladící a topný výkon

Abychom mohli formulovat vztahy pro výpočet výkonu TEC článku, je třeba nejprve zmínit množství rovnic, ze kterých jsou výsledné vztahy složeny. Vztahy 1.1 až 1.11 jsou převzaty z [2].

Na studené straně článku je odnímán tepelný výkon Q_c dle vztahu:

$$Q_c = \alpha \cdot T_c \cdot I \text{ [W]} \quad (1.1)$$

kde je α konstanta termoelektrického napětí [$V \cdot K^{-1}$],

T_c teplota studené strany článku [K],

I proud procházející článkem [A].

Na teplé straně článku se uvolňuje tepelný výkon Q_h dle vztahu:

$$Q_h = \alpha \cdot T_h \cdot I \text{ [W]} \quad (1.2)$$

kde je α konstanta termoelektrického napětí [$V \cdot K^{-1}$],

T_h teplota teplé strany článku [K],

I proud procházející článkem [A].

Účinkem procházejícího proudu vzniká uvnitř článku tepelný výkon Q_j , tzv. Jouleovo teplo. Velikost tohoto výkonu je dána vztahem:

$$Q_j = R \cdot I^2 \text{ [W]} \quad (1.3)$$

kde je R vnitřní odpor článku [Ω],

I proud procházející článkem [A].

Vlivem teplotního rozdílu mezi stranami a tepelnou vodivostí článku K se šíří teplo Q_v , které je dáno vztahem:

$$Q_v = K \cdot \Delta T [W] \quad (1.4)$$

kde K lze vyjádřit vztahem:

$$K = \frac{1}{l} \cdot (S_1 \cdot \lambda_1 + S_2 \cdot \lambda_2) [W \cdot K^{-1}] \quad (1.5)$$

a ΔT vyjádříme vztahem:

$$\Delta T = T_h - T_c [K] \quad (1.6)$$

kde je K tepelná vodivost článku $[W \cdot K^{-1}]$,

ΔT rozdíl teplot stran $[K]$,

S_1, S_2 průřezy polovodičových sloupků $[m^2]$,

l délka polovodičových sloupků $[m]$,

λ_1, λ_2 měrné tepelné vodivosti polovodičových sloupků $[W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}]$,

T_h teplota teplé strany článku $[K]$,

T_c teplota studené strany článku $[K]$.

Při předpokladu, že průběh teploty mezi teplou a studenou stranou článku je lineární a zanedbáme-li vliv přívodů a přechodových odporů, můžeme vyjádřit chladicí výkon Q_{ch} článku TEC následujícím vztahem:

$$Q_{ch} = Q_c - \frac{1}{2} Q_j - Q_v [W] \quad (1.7)$$

Po dosazení vztahů 1.1, 1.3 a 1.4 dostáváme finální vztah pro výpočet chladicího výkonu Q_{ch} :

$$Q_{ch} = \alpha \cdot T_c \cdot I - \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T [W] \quad (1.8)$$

Při stejném předpokladu jako u vyjadřování chladicího výkonu, můžeme popsat příkon Peltiérova článku P .

Ten se skládá z výkonu spotřebovaného na uvolnění Jouleova tepla (viz. rovnice 1.3) a výkonu spotřebovaného na překonání potenciálového rozdílu mezi teplým a studeným koncem článku. Výsledný vztah pro příkon tedy zní:

$$P = Q_j + (Q_h - Q_c) [W] \quad (1.9)$$

kde je Q_j Jouleovo teplo $[W]$,

Q_h výkon, který je uvolňován na teplé straně článku $[W]$,

Q_c výkon, který je odnímán ze studené strany článku $[W]$.

Na teplé straně článku se vyzařuje teplo absorbované na chladné straně a zároveň příkon P článku. Na základě těchto informací lze formulovat vztah pro vyzařovaný výkon Q_H následovně:

$$Q_H = Q_{ch} + P \text{ [W]} \quad (1.10)$$

Po dosazení vztahů z 1.8, 1.9 a následné jednoduché úpravě dostáváme konečný vztah pro výpočet topného výkonu.

$$Q_H = \alpha \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T \text{ [W]} \quad (1.11)$$

Nyní nám už jen zbývá určit konstanty K , α a R . Odvození vztahů pro jejich výpočet lze provést z výše popsaných rovnic pomocí několika poměrně technických a trikových úprav, kterými se nebudeme zabývat a popíšeme si pouze výsledné vztahy. Tyto úpravy jsou popsány v [5].

Tepelnou vodivost K vyjádříme pomocí vztahu:

$$K = \frac{Q_{ch_0}}{\Delta T_0} \text{ [W} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.12)$$

kde je Q_{ch_0} výkon článku při $\Delta T = 0$ [W],
 ΔT_0 teplotní rozdíl stran při $Q = 0$ [K].

Vnitřní odpor článku R lze vyjádřit vztahem:

$$R = \frac{2 \cdot Q_{ch_{max}}}{I_{max}^2} \text{ [\Omega]} \quad (1.13)$$

kde je $Q_{ch_{max}}$ maximální chladicí výkon článku [W],
 I_{max} velikost proudu procházejícího článkem při maximálním výkonu [A].

Konstantu termoelektrického napětí α lze vyjádřit následujícím vztahem:

$$\alpha = \frac{R \cdot I_{max}}{T_c} \text{ [V} \cdot \text{K}^{-1}] \quad (1.14)$$

kde je R vnitřní odpor článku [\Omega],
 I_{max} velikost proudu procházejícího článkem při maximálním výkonu [A],
 T_c teplota studené strany článku [K].

Hodnoty potřebné pro výpočet konstant K , R a α uvádí výrobce ve specifikaci, nebo je nutné je změřit.

1.1.3 Napájení

Pro správný chod termoelektrického článku je třeba neměnného konstantního stejnosměrného napětí. Přesto moderní číslicové regulátory často potřebují (z důvodu přesnosti) regulovat pracovní proud pomocí pulzně šířkové modulace (PWM). Dalo by se předpokládat, jako u mnoha jiných periférií, že průměrný výkon článku při vyšších frekvencích PWM je stejný, jako při konstantním proudu stejné hodnoty. To bohužel neplatí u Peltiérových článků. Úbytek výkonu na TEC lze vypočítat následujícím vztahem, který je převzat z [6]:

$$Q_{DC} - Q_{PWM} = \frac{(\zeta \cdot I_m)^2 \cdot R}{2} \cdot \left(\frac{1}{\zeta} - 1 \right) [W] \quad (1.15)$$

kde je Q_{DC} výkon článku při napájení konstantním stejnosměrným napětím [W],
 Q_{PWM} výkon článku při napájení pomocí pulzně šířkové modulace [W],
 ζ střída pulzně šířkové modulace ($0 \leq \zeta \leq 1$),
 I_m amplituda proudu při napájení PWM,
 R vnitřní odpor článku [Ω].

Tento problém se řeší filtrováním PWM. Ale i po důkladné filtraci obsahuje proud střídavou složku. Větší střídavá složka má za následek snížení výkonu, a tedy i snížení maximálního teplotního rozdílu ΔT mezi teplou a studenou stranou. Podle doporučení výrobců by maximální amplituda střídavé složky neměla přesáhnout 10 % [7].

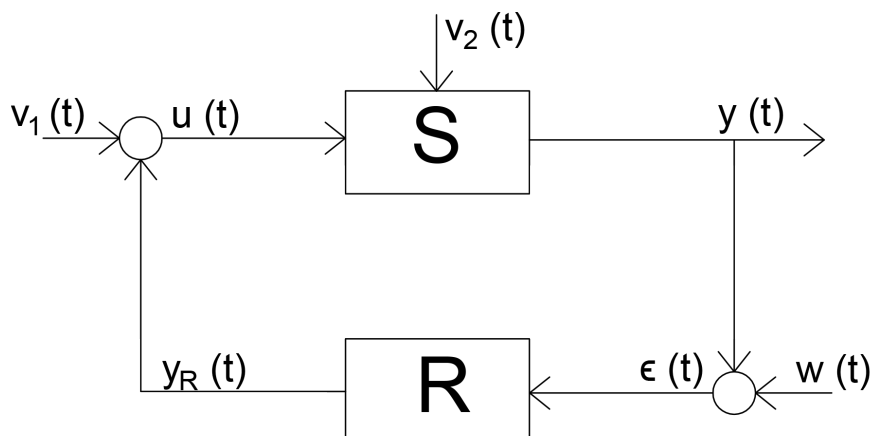
Vliv střídavé složky na výkon článku lze vypočítat jako poměr maximálního teplotního rozdílu s nulovou střídavou složkou ku maximálnímu teplotnímu rozdílu se střídavou složkou o amplitudě N [4]:

$$\frac{\Delta T_{max}}{\Delta T} = \frac{2}{N^2} \quad (1.16)$$

kde je ΔT_{max} maximální možný teplotní rozdíl mezi stranami článku [K],
 ΔT teplotní rozdíl při zvlnění [K],
 N je amplituda zvlnění.

1.2 Regulace

Regulátor je část regulačního obvodu, který má za úkol vyhodnocování odchylky systému od žádaného stavu (regulační odchylka) a její zpracování dle řídicích parametrů. Na základě zpracované odchylky vygeneruje výstupní signál (akční veličinu), který by měl působit na regulovanou soustavu tak, aby odchylka byla nulová.



Obrázek 1.1: Základní blokové schéma regulačního obvodu. S regulovaná soustava (řízený systém), R regulátor (řídící systém), y regulovaná veličina, w žádaná hodnota regulované veličiny, ϵ regulační odchylka, y_R akční veličina, u řídicí veličina, v poruchová veličina [8].

V průmyslu se používá velké množství regulátorů, které se liší reakcí výstupního signálu na regulační odchylku [8]. V tomto textu se budeme věnovat pouze PID regulátorům.

1.2.1 PID regulátory a jejich varianty

Výstup PID regulátoru je tvořen třemi složkami.

- *Proporcionální (P)*
Určuje reakci regulátoru na velikost regulační odchylky.
- *Integrační (I)*
Reaguje na dobu trvání regulační odchylky.
- *Derivační (D)*
Určuje reakci regulátoru na rychlost změny regulační odchylky.

Výstup PID regulátoru popisuje následující integro-diferenciální rovnice:

$$y_R(t) = K_P \cdot \varepsilon(t) + K_I \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt + K_D \cdot \frac{\varepsilon(t)}{dt} \quad (1.17)$$

kde je $y_R(t)$ výstup v čase t ,

- $\varepsilon(t)$ regulační odchylka v čase t ,
- K_x nastavující konstanty dané složky,
- $K_P \cdot \varepsilon(t)$ proporcionální složka,
- $K_I \cdot \int_0^t \varepsilon(t) dt$ integrační složka,
- $K_D \cdot \frac{d\varepsilon(t)}{dt}$ derivační složka.

Konstanty u PID regulátoru mohou být i nulové. Pak se bavíme o tzv. redukovaných variantách PID regulátorů, které lze také použít. Výjimku tvoří regulátor, kde by jediná nenulová složka byla derivační. Takový regulátor není funkční, a proto derivační složku nelze použít samostatně.

Jelikož se jedná o spojitý regulátor, tedy všechny veličiny jsou spojitě v čase, nelze PID regulátor implementovat v klasických mikrokontrolérech s diskretním pojetím času. Pro regulování v mikrokontrolérech lze použít PSD (Proporcionálně-Sumačně-Diferenční) regulátor, který používá vztah pro PID regulátor, pouze jej diskretizuje po časovém úseku Δt . Výstup PSD regulátoru lze tedy popsat následujícím vztahem, který byl převzat z [8].

$$y_R(n \cdot T) = K_P \cdot \varepsilon(n \cdot T) + K_S \cdot \sum_{k=1}^n \varepsilon(k \cdot T) + K_D \cdot \left[\frac{\varepsilon((n-1) \cdot T) - \varepsilon(n \cdot T)}{T} \right] \quad (1.18)$$

kde je T perioda vzorkování [s],

- $y_R(n \cdot T)$ výstup po dobu n -té vzorkovací periody regulátoru,
- $\varepsilon(n \cdot T)$ regulační odchylka po dobu n -té vzorkovací periody regulátoru,
- K_x nastavující konstanty dané složky,
- $K_P \cdot \varepsilon(n \cdot T)$ proporcionální složka,
- $K_S \cdot \sum_{k=0}^n \varepsilon(k \cdot T)$ sumační složka,
- $K_D \cdot \left[\frac{\varepsilon((n-1) \cdot T) - \varepsilon(n \cdot T)}{T} \right]$ diferenční složka.

Z porovnání vztahů 1.18 a 1.17 vyplývá, že integrální složka byla nahrazena sumou a derivační složka diferencí. Zde je nutné poznamenat, že možností diskretizace spojitého regulátoru je více a v 1.18 je použita ta nejjednodušší se zpětnou obdélníkovou náhradou integrační složky, která se podle [8] používá nejčastěji.

1.2.2 Metody nastavování

Pro seřízení regulátorů bylo vyvinuto několik algoritmů. Asi nejznámějším algoritmem je metoda kritických parametrů, také známá jako Ziegler-Nicholsova.

Tato metoda byla publikována v roce 1942 a je založena na frekvenční charakteristice uzavřeného regulačního obvodu. Byla určena pro nastavování parametrů spojitých regulátorů, ale její princip lze použít i pro číslicové regulátory. S její pomocí jsme schopni nastavit regulátor bez vytváření modelu regulované soustavy [9].

Základní princip spočívá v tom, že se snažíme dostat regulovanou soustavu na hranici stability. Toho docílíme tím, že vyřadíme integrační a derivační složku. Změnou zesílení K_P (viz. 1.17) je soustava přivedena na hranici stability. Tedy, že regulovaná soustava kmitá netlumenými kmity o konstantní periodě a amplitudě. Perioda těchto kmitů se nazývá kritická perioda a označuje se T_k . Hodnota zesílení K_P , při které je soustava na hranici stability, se nazývá kritické zesílení a označuje se K_{Pk} .

Na základě kritických parametrů se podle tabulky 1.1 určí optimální parametry pro PSD nebo PID regulátor. Vztahy pro výpočet hodnot pro diskrétní PSD regulátor vycházejí ještě ze vzorkovací periody T .

Tabulka 1.1: Seřízení PID regulátoru z kritických hodnot podle Ziegler-Nicholsovy metody. Převzato z [9] a [10].

Regulátor	K_P	K_I	K_D
P	$0,5 \cdot K_{Pk}$	-	-
PI	$0,45 \cdot K_{Pk}$	$1,2 \cdot \frac{K_P}{T_k}$	-
PS	$0,45 \cdot K_{Pk} \cdot \frac{T}{T_k}$	$0,54 \cdot \frac{K_{Pk} \cdot T}{K_P \cdot T_k}$	-
PID	$0,5 \cdot K_{Pk}$	$2 \cdot \frac{K_P}{T_k}$	$\frac{K_P \cdot T_k}{8}$
PSD	$0,6 \cdot K_{Pk} \cdot \frac{T}{T_k}$	$1,2 \cdot \frac{K_{Pk} \cdot T}{K_P \cdot T_k}$	$3 \cdot K_{Pk} \cdot T_k \cdot \frac{1}{40 \cdot T}$

1.3 1 Wire

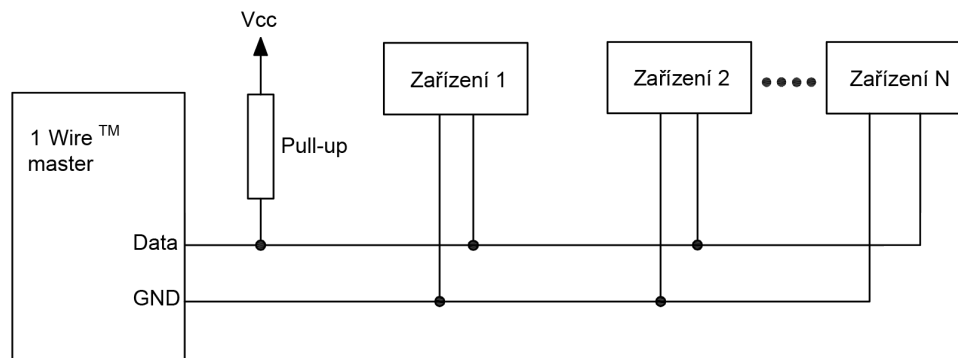
1 Wire je sběrnice navržená společností v 90. letech Dallas Semiconductor Corp. Sběrnice 1 Wire poskytuje komunikaci a také napájení pomocí jediného vodiče a typicky se používá pro komunikaci s malými zařízeními, jako jsou teplotní čidla, EEPROM a jiné.

Jedná se o sériovou komunikaci řízenou jedním masterem s datovou propustností až 125 kb/s v režimu overdrive. Ve standardním režimu se komunikuje rychlostí 15,4 kb/s [11].

Princip komunikace je trochu podobný sběrnici I²C s tím, že je pouze na jednom vodiči. Jedná se tedy o asynchronní komunikaci a protokol pro komunikaci na linkové vrstvě k tomu musí být patřičně upraven.

Datový vodič je připojený pomocí pull-up rezistoru a jednotlivá zařízení „stahují“ sběrnici k zemi (viz. obrázek 1.2). Zařízení napájená parazitně (z datového vodiče) obsahují kondenzátor, který udrží náboj i během komunikace. Nicméně pokud takové zařízení vykonává nějakou činnost (měření teploty), musí master zajistit dostatek napájení tím, že nekomunikuje a drží sběrnici v logické 1.

Jelikož může být na sběrnici připojeno více zařízení, je třeba jednotlivá zařízení identifikovat. K tomu slouží unikátní 64bitová adresa, která je pevně přidělena každému zařízení z výroby a je uložena v jeho paměti ROM [12].

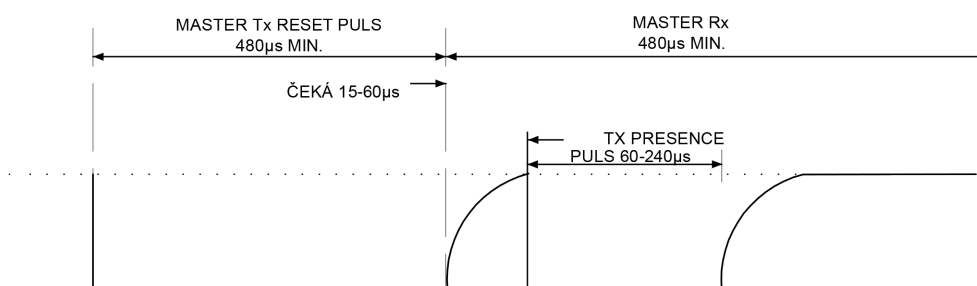


Obrázek 1.2: Připojení zařízení na sběrnici 1 Wire.

1.3.1 Komunikace

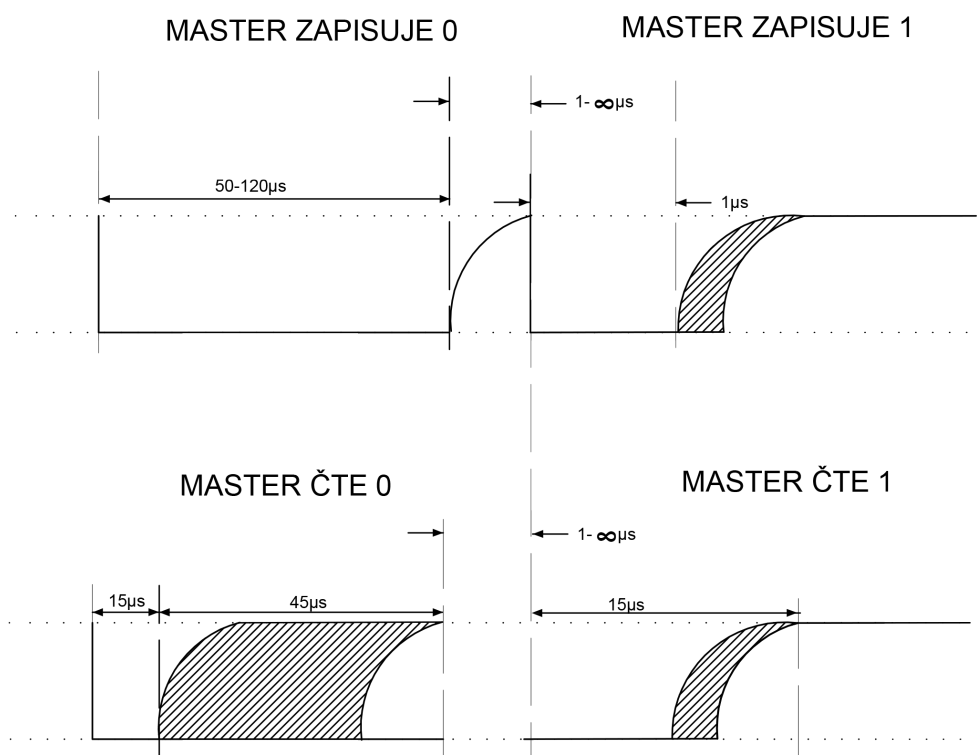
V této sekci se omezíme pouze na komunikaci ve standardním režimu. Ta se od komunikace v režimu overdrive liší pouze v časování. Komunikaci zahajuje vždy master tzv. reset pulzem, kterým uzemní datový vodič do logické 0. V této úrovni zůstává vodič alespoň $450 \mu\text{s}$. Následně master sběrnici uvolní a poslouchá. Pokud je na sběrnici přítomné nějaké 1 Wire zařízení, tak oznámí svou přítomnost uvedením sběrnice do logické 0 alespoň na dobu $60 \mu\text{s}$ tzv. presence pulzem (viz. obrázek 1.3). Pokud je na sběrnici zařízení více, tak všechna odpovídají zároveň.

1. REŠERŠNÍ ČÁST



Obrázek 1.3: Inicializace komunikace na sběrnici 1 Wire [13].

Po správném ohlášení alespoň jednoho zařízení může master pokračovat ve složitější komunikaci. Data jsou vysílána a přijímána v časových oknech (slotech). Jedno časové okno je dlouhé 60 - 120 μs , během kterého je přijat, nebo vyslán jeden bit. Mezi jednotlivými sloty musí být alespoň 1 μs mezera, kde je sběrnice v klidovém stavu. Zápis, nebo čtení bitů probíhá podle obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Komunikace na sběrnici 1 Wire [13].

Průběh celkové komunikace můžeme rozdělit do tří částí:

- Iniclace: Všechny transakce jsou zahájeny masterem pomocí reset pulzu.
- Odeslání ROM příkazu. Master po přijetí presence bitu odesílá příkaz sběrnice. Sběrnice 1 Wire definuje 5 příkazů [13].
 - *Search ROM (0xF0)*

Tento příkaz slouží k iniciaci enumerace zařízení na sběrnici a zjištění jejich adres. Tato enumerace se provádí pomocí speciálního vyhledávacího algoritmu sběrnice 1 Wire, který je popsán v [14].
 - *Search alarm (0xEC)*

Tento příkaz je stejný jako Search ROM s tím rozdílem, že se vyhledávání zúčastní pouze zařízení, která mají nastavený příznak alarmu. Tedy, že potřebují urychleně něco sdělit masterovi.
 - *Read ROM (0x33)*

Tento příkaz se používá, pokud je na sběrnici přítomen pouze jeden slave. Pomocí tohoto příkazu dokáže master přečíst unikátní adresu zařízení bez použití speciálního vyhledávacího algoritmu. Pokud by na sběrnici bylo přítomno více zařízení, začala by komunikovat současně, což by způsobilo neplatnost čtené adresy.
 - *Match ROM (0x55)*

Po tomto příkazu následuje odeslání adresy zařízení. Příkaz oznamuje zařízením na sběrnici, že až do dalšího reset pulzu bude další komunikace určena pouze pro zařízení s ROM adresou, která následovala po příkazu.
 - *Skip ROM (0xCC)*

Tento příkaz funguje jako multicast. Oznamuje zařízením, že na následující příkazy mají reagovat všechna. To je užitečné ve chvíli, když je na sběrnici pouze jedno zařízení, nebo chceme, aby všechna zařízení provedla jednu operaci. Např. zahájila měření teploty.
- Odeslání funkčního příkazu pro zařízení a jeho odpověď. Tyto příkazy nejsou součástí definice sběrnicevého systému 1 Wire a jsou pro každé zařízení rozdílné.

1.4 Vývojová deska Nordic nRF51822 mKIT

Vedoucím práce byla vybrána deska Nordic nRF51822 mKIT. Tato deska je osazena mikrokontrolérem nRF51822, který je postavený na bázi ARM Cortex M0. Mikrokontrolér podporuje mimo jiné pro tuto práci nejdůležitější funkce:

- rozhraní UART
- rozhraní I²C
- tři 16bitové časovače
- jednotku PPI (Programmable Peripheral Interconnect). Tato jednotka slouží pro interakce mezi jednotlivými periferiemi a je nezbytná pro generování PWM bez zásahu procesoru.
- 31 vyvedených pinů pro všeobecné použití
- 10bitový A/D převodník s možností externí reference
- rozhraní pro dekódování signálu z kvadraturního enkodéru

Ačkoliv je deska určena převážně na prototypování Bluetooth Smart aplikací, její použití je vhodné i v aplikacích, které tuto kategorii nesplňují a to hlavně z důvodu množství periferií, které jsou na mikrokontroléru přítomny [15].

1.5 Software

1.5.1 ARM mBED

mBED je platforma obsahující online vývojové prostředí pro rychlý a profesionální vývoj produktu na mikrokontrolérech architektury ARM. Tato platforma zahrnuje množství knihoven vytvořené jinými uživateli a SDK (Software Development Kit) pro velké množství mikrokontrolérů, mezi které také patří nRF51822, použitý v této práci. Toto SDK implementuje ovladače a poskytuje rozhraní k ovládání periferií [16].

1.5.2 Eagle

Eagle je program od společnosti Autodesk pro navrhování elektronických systémů. Sestává se z editoru pro navrhování elektronických schémat a návrháře desky plošných spojů. Výhodou tohoto editoru je jeho veliká podpora ze strany výrobců plošných spojů, kteří poskytují nastavovací skripty pro generování výstupních souborů a komunita, která vytváří knihovny obsahující součástky. Výstupem tohoto programu jsou standardizované Gerber a Excellon soubory, které výrobci plošných spojů akceptují [17].

1.5.3 OpenSCAD

OpenSCAD je software pro modelování 3D CAD objektů. Oproti standardním nástrojům se OpenSCAD odlišuje hlavně tím, že modelování probíhá pomocí psaní jednoduchého skriptu. Jedná se tedy spíše o 3D kompilátor, který skript převede do modelu. Pro modelování je použito principu *Constructive solid geometry* (CSG), kde je výsledný model vytvořen z primitivních těles (kvádr, koule, válec. . .) pomocí operací sjednocení, průniku a rozdílu. Výstupem programu jsou STL soubory, které je jednoduché převést do tisknutelné podoby na 3D tiskárně [18].

V tomto programu byly navrženy plastové díly pro již existující prototyp.

Analýza a návrh

Při návrhu přípravku byl kladen důraz převážně na zajímavou ukázkou možností termoelektrického chlazení a ohřevu. V této souvislosti bylo po konzultaci s vedoucím práce rozhodnuto, že přípravek bude měnit teplotu kapaliny. Tím bude docíleno zajímavější demonstrace, například pokud kapalina zamrzne.

Veškeré požadavky na výukový přípravek znějí takto:

- Ovládání výkonu Peltiéřova článku pomocí PWM
- Možnost změny režimu z chlazení na ohřev a naopak
- Použití vývojové desky Nordic nRF51822 mKIT
- Polovodičové senzory teploty
- Analogové senzory teploty
- Lihový teploměr
- Možnost rozšíření přípravku o senzory s rozhraním I²C
- Sériové rozhraní RS232
- Mechanický rotační enkodér
- PSD regulátor pro udržování teploty
- Pevnost konstrukce
- Zachování kompaktních rozměrů. Přípravek musí být umístěn na plechové podložce o rozměrech 160 × 120 mm, která tvoří základ velkého množství výukových přípravků na FIT ČVUT.

Ze zadání práce také vyplývá, že by se mělo pokračovat v již hotovém prototypu, který obsahoval plastový izolační box a Peltiéřův článek TEC127050.

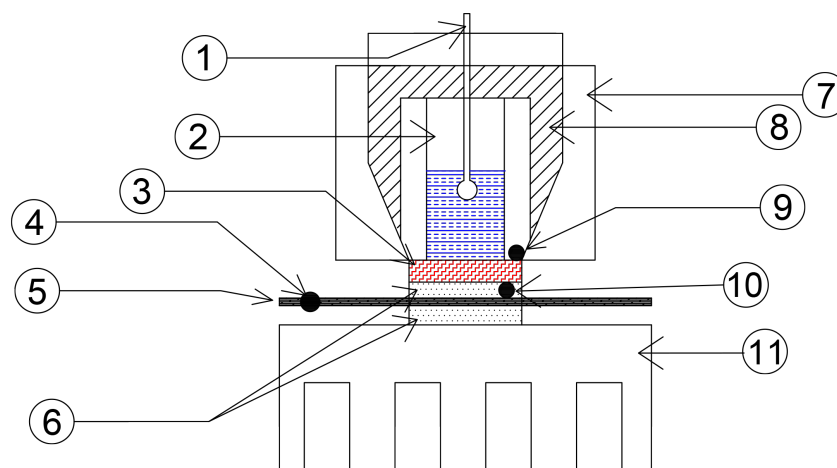
2.1 Existující prototyp

Na katedře číslicového návrhu FIT ČVUT v Praze vznikl pod vedením Ing. Miroslava Skrbka, Ph.D. raný prototyp konstrukce přípravku, ze kterého práce vychází. Prototyp obsahoval následující komponenty:

- Design plastového boxu
- Design víka
- Lihový teploměr pro názornější ukázkou změny teploty uvnitř přípravku
- Peltiérův článek TEC127050
- Hliníkovou desku, která sloužila jako chladič

Během prvotních testů se ukázalo, že hliníková deska nedostačovala jako chladič. To způsobovalo, že se Peltiérův článek přehříval a hřál na obou stranách.

2.2 Konstrukce



Obrázek 2.1: Schéma konstrukce. 1 teploměr umístěný uvnitř kapaliny, 2 nádoba na kapalinu, 3 Peltiérův článek, 4 teploměr umístěný na chladiči, 5 hliníkový plech, 6 teplovodivá pasta, 7 plastový izolační box, 8 vnitřní izolace, 9 a 10 teploměry pro sledování teploty článku, 11 chladič s ventilátorem.

2.2.1 Výběr chladiče

Navrhnout chlazení Peltiérova článku byl jeden z nejobtížnějších úkolů. Vybraný chladič musí zajistit dostatečný odvod tepla a zároveň musí být kompaktních rozměrů.

Celé zařízení (včetně plošného spoje a řídicí desky) by mělo být umístěno na plechové podložce o rozměrech 160×120 mm. Tento požadavek vedl k odhadu rozměrového limitu chladiče na $80 \times 100 \times 60$ mm. Měl by být vybrán nejmenší možný chladič, který bude svým chladícím výkonem dostávat. Aby bylo možné takový chladič vybrat, je třeba nejprve vypočítat topný výkon článku TEC127050.

Ve výpočtu budeme postupovat podle sekce 1.1.2.

Nejprve musíme určit konstantu termoelektrického napětí α a tepelnou vodivost článku K . Elektrický odpor článku není nutné počítat, neboť jej již napsal výrobce ve specifikaci uvedené v tabulce 2.1. Ve výpočtu budeme používat hodnoty z této tabulky pro konstantní teplotu teplé strany 50 °C.

$$\alpha = \frac{R \cdot I_{max}}{T_c} [V \cdot K^{-1}] \quad (2.1)$$

$$\alpha = \frac{2,83 \cdot 5}{348,15} = 0,04 [V \cdot K^{-1}]$$

$$K = \frac{Q_0}{\Delta T_0} [W \cdot K^{-1}] \quad (2.2)$$

$$K = \frac{49,7}{348,15} = 0,143 [W \cdot K^{-1}]$$

Vypočtené hodnoty dosadíme do vztahu 1.11 pro výpočet topného výkonu při stejné teplotě obou stran článku $Q_{H\Delta T_{min}}$.

$$Q_{H\Delta T_{min}} = \alpha \cdot T_h \cdot I + \frac{1}{2} R \cdot I^2 - K \cdot \Delta T [W] \quad (2.3)$$

$$Q_{H\Delta T_{min}} = 0,04 \cdot 323,15 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 2,83 \cdot 25 - 0,143 \cdot 0 = 100 [W]$$

Tabulka 2.1: Specifikace článku TEC127050 [3]

Teplota teplé strany	25 °C (298,15 K)	50 °C (323,15 K)
$Q_{max} [W]$	45,7	49,7
$\Delta T_{max} [K]$	340,15	348,15
$I_{max} [A]$	5	5
$V_{max} [V]$	15,4	16,4
Měrný odpor článku $[\Omega]$	2,51	2,83

Ze vztahu 2.3 vyplývá, že článek v případě stejné teploty obou stran (tedy v okamžiku připojení do elektrického obvodu) dosáhne topného výkonu 100 W. Je důležité si uvědomit, že tento okamžik bude opravdu krátký. Se zvyšujícím se ΔT bude výkon vlivem tepelné vodivosti mezi stranami klesat. Po dosažení maximální možné ΔT nám vychází výkon $Q_{H\Delta T_{max}}$ takto:

$$Q_{H\Delta T_{max}} = 0,04 \cdot 323,15 \cdot 5 + \frac{1}{2} \cdot 2,83 \cdot 25 - 0,143 \cdot 348,15 = 50,22 [W] \quad (2.4)$$

Výsledek v 2.4 také definuje minimální požadavky na chladič. Pokud bychom použili chladič, který by nedokázal odvést teplo alespoň o velikosti 50 W, docházelo by k přehřívání článku a tím by se snižovala jeho životnost.

Vzhledem k výpočtům by bylo nejlepší použít takový chladič, který by dokázal odvést teplo o velikosti 100 W. Tyto chladiče jsou ale poměrně drahé a velice prostorově náročné. Jeho použití tedy z důvodu rozměrového limitu nepřicházelo v úvahu.

Po konzultaci s vedoucím práce byl vybrán chladič Artic Alpine M1, který dokáže pohltit teplo o velikosti 50 W, což je spodní hranice nároků. Jeho rozměry (80 × 80 × 45 mm) jako jediné z dostupných chladičů vyhovovaly rozměrovému limitu. Zároveň byl zakoupen ventilátor dosahující rychlosti 3 000 otáček za minutu (RPM). Ten nahradí ventilátor dodávaný výrobcem k chladiči, který dosahuje rychlosti pouze 700 RPM [19]. Tímto krokem dojde ke zvýšení průtoku vzduchu mezi žebry chladiče a zvýší se tak i jeho celkový výkon.

2.2.2 Uchování kapaliny

V souvislosti s rozhodnutím, že přípravek bude regulovat teplotu kapaliny, bylo třeba vyřešit její umístění v přípravku. Ačkoliv podle [1] jsou Peltiérové články na určitou vlhkost stavěny, výrobce v [3] píše, že pokud bude článek umístěn v prostředí se zvýšenou vlhkostí, je třeba s ním tento fakt konzultovat. Z této informace můžeme odvodit, že článku malé množství vody pravděpodobně neublíží, ale neměl by jí být dlouhodobě vystaven. Vodu tedy musíme uchovávat ve speciální nádobě. Pro nádobu byly definovány následující požadavky:

- Válcovitý tvar pro snadné vyjmutí z přípravku.
- Vyrobena z kovu
- Tlusté stěny pro dobrý rozvod tepla
- Průměr podstavy nesmí být větší než 35 mm
- Rovné dno pro co nejlepší dotyk s Peltiérovým článkem.

Jediným kandidátem, kterého se podařilo sehnat, byl starší hliníkový obal na film do fotoaparátu. Po několika testováních se ale neosvědčil z důvodu příliš tenkých stěn, které nedokázaly kvalitně rozvést chlad. Z toho důvodu kapalina zamrzala pouze odspodu, což výrazně prodlužovalo dobu tuhnutí. Nakonec bylo rozhodnuto, že se vysoustruží nová nádoba, která bude splňovat všechny požadavky na ní kladené.

2.2.3 Umístění teploměru

Přípravek musí být dle zadání osazen množstvím různých teplotních senzorů. Pro správnou funkčnost přípravku je třeba umístit teploměry na obě strany

článku, aby bylo možné sledovat přehřívání a článek případně s dostatečným předstihem vypnout. Dalším potřebným čidlem je vodotěsný teploměr, který bude ponořen do kapaliny uvnitř přípravku. Tento teploměr zde musí být, aby zajistil zpětnou vazbu pro regulátor.

Jelikož se jedná o výukový přípravek bylo by ještě vhodné umístit digitální a analogový senzor vedle sebe, aby bylo možné porovnávat naměřené hodnoty a případnou nepřesnost jednotlivých čidel. Student pak bude moci porovnávat rozdílné vlastnosti dvou senzorů.

Proto bylo rozhodnuto, že se umístí dvě čidla na chladič, aby po zapnutí přípravku bylo zřetelně vidět, jak se teplota mění na každém čidle různou rychlostí.

2.2.4 Úpravy existujícího návrhu izolačního boxu

Během analýzy konstrukce se vyskytla potřeba upravit již existující návrh plastových dílů tvořících izolační box. Stávající box neumožňuje uchovat kapalinu v rozumném množství (50 ml), a tak bude třeba jej zvětšit. Dále dojde k zateplení vnitřní části, aby se co nejvíce zabránilo tepelným ztrátám. K zateplení může být využita vata, která však při rozliti kapaliny navlhne. Z toho důvodu bude použit modelářský polystyrén, který lze při polití ihned otřít.

Pro napájecí vodiče teplotních senzorů umístěných uvnitř plastového boxu bude třeba na těle a víku vytvořit otvory.

2.3 Senzory

Výběr senzorů byl podřízen několika faktorům. Senzory musí být dostatečně přesné a zároveň musí, vzhledem k tomu, že se jedná o výukový přípravek, být typickým zástupcem polovodičových nebo analogových čidel. Při výběru byla největším omezením dostupnost čidel na českém trhu.

2.3.1 Analogové senzory

Aby byl splněn požadavek, že se má jednat o typického zástupce, bylo zřejmé, že bude použit kovový teplotní senzor. Ty jsou považovány v průmyslových aplikacích za standard. Konkrétně nejrozšířenějším teplotním čidlem je platinový odporový senzor PT100, ačkoliv i jiné termistory na bázi niklu a mědi jsou v průmyslu také často používány [20]. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto, že se použije teplotní senzor PT100, který je snadno k sehnání v mnoha pouzdrech a provedeních.

2.3.2 Polovodičové senzory

Vzhledem k tomu, že se jedná o výukový přípravek, bylo nutné vybrat alespoň dva druhy polovodičových senzorů s rozdílným komunikačním rozhraním. Pro

komunikaci s teplotními senzory se nejčastěji v PC používá sběrnice SMBus. Ta se od sběrnice I²C liší pouze v několika detailech. Nespornou výhodou sběrnice I²C je podpora v hardwaru na mikrokontroléru. Proto bude použito teplotní čidlo s tímto rozhraním.

Oproti očekávání byl v době tvorby bakalářské práce na českém trhu dostupný pouze jeden teplotní senzor s rozhraním I²C a to LM75A od společnosti NXP. Tento teplotní senzor má poměrně dobrou přesnost ($\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$) a programovatelnou funkci teplotního hlídače s hysterezí. Překročení nastavené teploty dokáže teploměr oznámit pomocí speciálního pinu OS (Overtemp Shutdown). Aby bylo možné na sběrnici umístit více těchto senzorů, jsou vyvedeny tři adresní piny, kterými lze nastavit poslední tři bity adresy zařízení.

Pro druhý teploměr bylo zvoleno rozhraní 1 Wire. Ačkoliv tato sběrnice nemá v mikrokontroléru nRF51822 hardwarovou podporu, polovodičové teplotní senzory s tímto rozhraním jsou pro svou cenu a malé provedení poměrně populární a představují největší procento použití sběrnice 1 Wire [11]. Senzory je typicky možné zapojit pouze pomocí dvou vodičů, nicméně některá teplotní čidla obvykle mají vyvedený také třetí pin určený pouze k napájení. Na českém trhu byly v době návrhu bakalářské práce dostupné dva senzory s tímto rozhraním.

První dostupný senzor byl DS18S20, který měří s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž teplota je ukládána do 9bitového registru. DS18S20 podporuje také funkci teplotního hlídače. Teplotní hlídač je v teploměru realizován pomocí speciálního alarm módu vyhledávání sběrnice 1 Wire [21].

Jako o něco lepší volba byl zvolen druhý dostupný teplotní senzor DS18B20, neboť obsahuje více funkcí. Jedná se o téměř identický teploměr jako DS18S20, ale oproti němu nabízí i nastavení přesnosti (9 - 12 bitů) pro měřenou teplotu [13].

2.3.3 Rozmístění

Samotné umístění teploměrů bylo určeno v 2.2.3, rozmístění jednotlivých typů ještě učiněno nebylo.

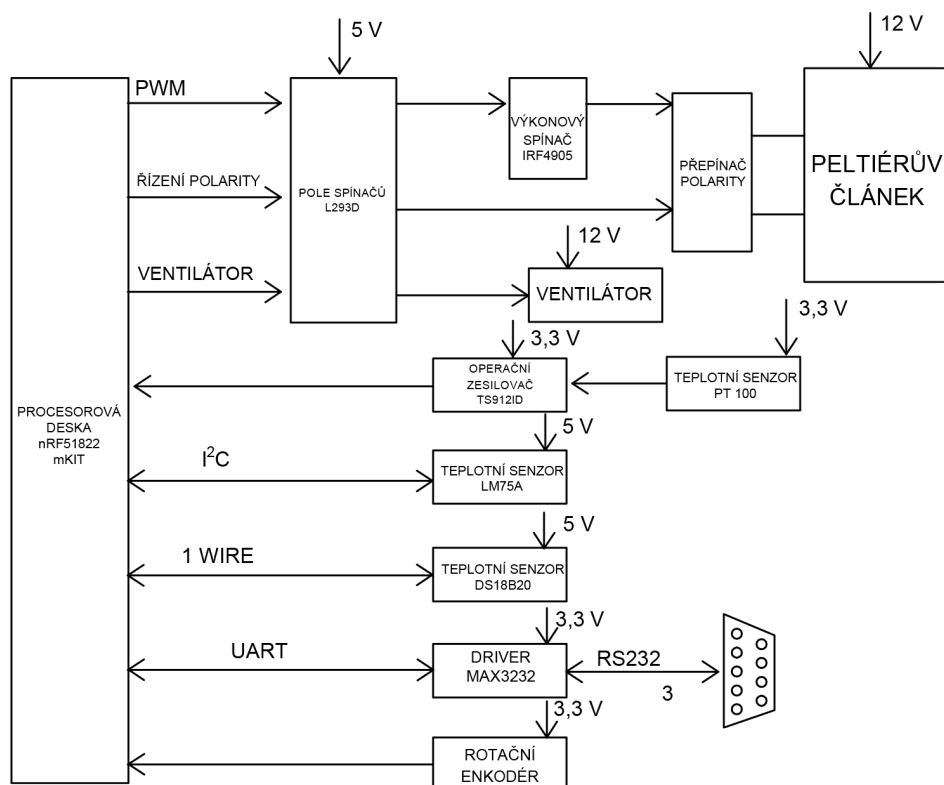
Pod Peltiérovým článkem bude použito teplotní čidlo PT100, jelikož se jej podařilo sehnat v opravdu malém provedení ($1,7 \times 2,4 \times 1\text{ mm}$) [22].

Teplotní čidlo DS18B20 se podařilo sehnat ve dvou provedeních. Vodotěsné provedení bude umístěno přímo v kapalině a běžné provedení (TO92) bude umístěno uvnitř přípravku na Peltiérově článku. Pro čidlo LM75A zbylo umístění na chladiči současně s PT100.

Kvůli možnosti budoucího rozšíření bude přidán ještě další senzor LM75A, který dokáže měřit teplotu okolí, a bude umístěn přímo na desce plošných spojů (DPS). Tento senzor však nebude v bakalářské práci využit, pouze se s ním bude počítat při návrhu elektroniky.

2.4 Elektronika a hardware

Realizace přípravku vyžaduje kromě pevné mechanické konstrukce také množství elektroniky pro ovládání Peltiérového článku a dalších periférií. V této sekci se pokusím shrnout řešení největších problémů, které byly v oblasti hardwaru identifikovány.



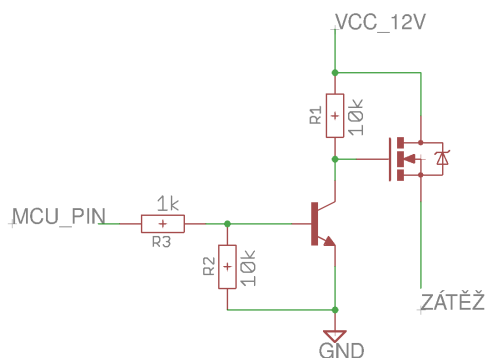
Obrázek 2.2: Blokové schéma zapojení elektroniky.

2.4.1 Generování PWM

Pro ovládání výkonu Peltiérového článku je nutné (kvůli zadání) použít PWM. Jelikož mají články při tomto způsobu ovládání nižší výkon (viz. 1.1.3), je nutné signál PWM převést na stabilní napětovou hodnotu pomocí dolní propusti (filtru). Řešení tohoto problému lze nalézt v návrhu spínaného zdroje, který je popsán v [23].

Jako spínač bude sloužit tranzistor typu MOSFET, který bude ovládán z mikrokontroléru. Za spínač se připojí LC filtr. Indukčnost v tomto filtru uchovává energii při sepnutí a uvolňuje při rozepnutí tranzistoru. Kondenzátory následně toto napětí vyhlazují [24].

Buzení tranzistoru MOSFET může být vyřešeno dvěma způsoby. Prvním způsobem je použití P-MOS tranzistoru, který bude buzen pomocí NPN bipolárního tranzistoru. Toto zapojení je zobrazeno v obrázku 2.3. Výhodou



Obrázek 2.3: Možný způsob zapojení ovládání tranzistoru P-MOS

tohoto řešení je hlavně jednoduchost realizace. Nevýhodou je, že přes rezistor $R1$ bude nabíjena báze MOSFET tranzistoru, která se při vyšší frekvenci PWM nestihne nabít.

Lepším řešením je použití obvodu L293D jako budiče MOSFET tranzistorů, který dovolí vyšší frekvenci PWM. Při použití nízké frekvence (méně než 18 kHz) by indukčnost ve filtru způsobovala nepříjemné pískání [25].

2.4.2 Přepínání polarity proudu

Pro přepnutí módu z chlazení na ohřev bude třeba obrátit směr toku proudu přes Peltiérův článek. Jedním z možných řešení je zapojení čtyř tranzistorů do H můstku jako v [26]. Při zvažování tohoto způsobu řešení nebyl nalezen na českém trhu žádný integrovaný obvod, který by snesl stálý proud 5 A. Z toho důvodu by bylo třeba H můstek sestavit pomocí čtyř MOSFET tranzistorů. Navíc toto řešení vyžaduje zdvojení LC filtru, o jehož použití bylo rozhodnuto v 2.4.1.

Druhé řešení je zapojení pomocí relé s dvakrát přepínacími kontakty. H můstek má oproti relé výhodu v rychlosti přepínání. Tato výhoda je ale poměrně malá, neboť na přepínač polarity nejsou kladeny nároky na rychlost.

Při použití relé odpadne duplikování části obvodu, což umožní celkové zmenšení plošného spoje. Zároveň bude docházet k menšímu úbytku napětí, neboť spojení povede pouze přes jeden tranzistor. Zapojení pomocí relé se tedy jeví jako lepší řešení, a proto bude použito.

2.4.3 Zdroj napětí

Článek TEC127050 má podle [3] při 15 V maximální příkon 5 A, z čehož vyplývají poměrně velké proudové nároky na zdroj napětí. Bylo tedy potřeba využít externího zdroje napětí.

Jako vstupní napětí bylo zvoleno 12 V, především z důvodu snadné dostupnosti potřebného síťového napájecího adaptéru. Vstupní napětí je přímo přivedeno do Peltiéřova článku a ventilátoru. Obvod L293D, který je používán k buzení MOSFET tranzistoru, potřebuje pro napájení napětí 5 V. Je tedy potřeba vstupní napětí snížit.

Řešení tohoto požadavku se nabízí několik. Prvním řešením je použití odporového děliče napětí. Jeho výhodou je velice snadná realizace, nevýhodou jsou zas tepelné ztráty a závislost výstupního napětí na připojené zátěži.

Druhou variantou je zapojení jednoduchého stabilizačního obvodu se Zenerovou diodou [27]. Jedná se o velice podobný obvod jako v případě odporového děliče. Jeho nepopíratelnou výhodou je slabé, nebo jen velmi malé zakolísání napětí při změně velikosti odebíraného proudu. Tento obvod však stejně jako odporový dělič dosahuje velkých tepelných ztrát [28].

Jako nejvhodnější možnost vzhledem ke kvalitě stabilizace a účinnosti byl zvolen lineární stabilizátor. Proudové zatížení tohoto stabilizátoru se pohybuje kolem 0,3 A. Zahřívání tedy nebude příliš velké a jednoduché přišroubování stabilizátoru k plošnému spoji zabrání přehřívání.

2.4.4 Sériové rozhraní RS232

Mikrokontrolér nRF51822 podporuje sériové rozhraní UART na TTL (3,3 V) úrovních. Aby mohl procesor komunikovat pomocí rozhraní RS232, je potřeba k němu připojit budič, který upraví signál do patřičné napěťové úrovně [29]. Po analýze českého trhu bylo rozhodnuto, že se použije budič MAX3232, který lze napájet 3,3 V. Tato vlastnost zajistí, že se na výstupu budiče neobjeví více než 3,3 V a nedojde ke zničení pinu na mikrokontroléru. Pro zapojení budeme postupovat podle doporučení od výrobce v [30].

2.4.5 Zapojení teplotních senzorů

2.4.5.1 PT100

Teplotní čidlo PT100 musí být připojené k 3,3 V napájení z mikrokontroléru, aby bylo zajištěno, že se na mikrokontrolér nepřivede vyšší napětí, které by vedlo k jeho zničení. Samotné zapojení tohoto čidla bývá realizováno pomocí měřících můstků, přičemž pro potlačení vlivu odporu přívodů bývá využíváno nejčastěji třívodičového zapojení [20].

Během návrhu bylo na nepájivém poli vyzkoušeno množství zapojení, která by přicházela v úvahu včetně vícevodičových můstkových zapojení. Na základě těchto testů se jevílo použití nejjednoduššího dvouvodičového zapojení popsá-

ného v [31] jako dostačující, jelikož interní (10bitový) A/D převodník nedosahuje takové přesnosti, aby zaznamenal změnu mezi jednotlivými zapojeními.

V [31] je navíc použita pozitivní kompenzace nelineární změny elektrického odporu teplotního čidla PT100. Tato kompenzace ale nebude využita, neboť během testování správnosti návrhu nebyla na A/D převodníku v mikrokontroléru zaznamenána změna mezi použitím a nepoužitím této kompenzace.

Dalším problémem, který bylo potřeba vyřešit, je limit na maximální proud procházející teplotním čidlem, který činí 1 mA [22]. Z toho důvodu bylo třeba zvolit dostatečně velký měřící rezistor, který bude zároveň průtok proudu omezovat. Hodnotu rezistoru R lze vypočítat následujícím vztahem:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{3,3}{0,001} = 3300 \text{ } [\Omega] \quad (2.5)$$

kde je U napětí přivedené na rezistor [V]

I proud jím protékající [A].

Vypočítaná hodnota rezistoru 3300 Ω je skutečně hraniční. Aby byla vytvořena rezerva, bude použit měřící rezistor s hodnotou 4700 Ω . Elektrický odpor měřícího rezistoru je poměrně velký oproti hodnotě elektrického odporu PT100, který se bude reálně pohybovat mezi 80 (-40 °C) a 157 (110 °C) Ω . Pomocí odporového děliče lze vypočítat mezní hodnoty napětí.

$$U_{-40} = U_{vcc} \cdot \frac{R_{PT100}}{R_{PT100} + R_{měřící}} = 3,3 \cdot \frac{80}{80 + 4700} = 0,05[mV] \quad (2.6)$$

$$U_{110} = U_{vcc} \cdot \frac{R_{PT100}}{R_{PT100} + R_{měřící}} = 3,3 \cdot \frac{142}{142 + 4700} = 0,09[mV] \quad (2.7)$$

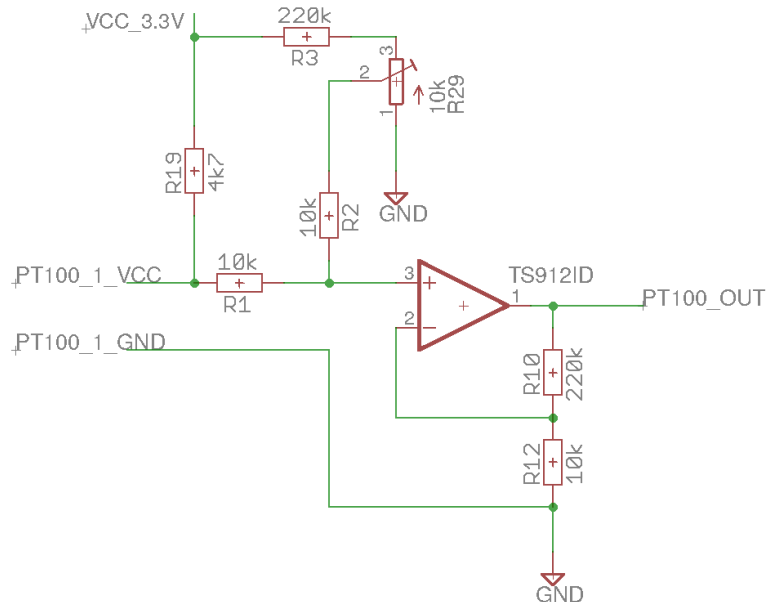
Z výpočtů v 2.6 a 2.7 vyplývá, že teplotní rozdíl 150 °C vytvoří napěťový rozdíl pouhých 40 mV. Při měření na rozsahu 0-3,3 V 10bitovou přesností A/D převodníku vychází jeho citlivost na 3 mV. Po převedení této hodnoty na teplotní stupně vychází přesnost měření pomocí teplotního čidla PT100 na 11,5 °C.

Z předešlých výsledků vyplývá, že je třeba napětí na PT100 před přivedením do A/D převodníku zesílit. V [31] změníme rezistory v neinvertujícím zapojení operačního zesilovače, aby bylo docíleno 23 násobného zesílení vstupního napětí. Toto zesílení bylo zvoleno tak, aby byla dostatečná rezerva pro případné měření vyšší či nižší teploty, než jsou odhadovaná maxima.

Dalším faktorem, který dokáže poměrně výrazně zpřesnit měření, je použitý operační zesilovač. Tento zesilovač by měl být typu Rail to Rail s nízkým šumem, nízkou vstupní napěťovou asymetrií a vývody pro její kompenzaci.

V době tvorby bakalářské práce byl k dispozici pouze jednoduchý Rail to Rail operační zesilovač s nízkým šumem TS912ID. Vstupní napěťová asymetrie tohoto zesilovače může být až 10 mV, přičemž nemá piny pro její kompen-

zaci [32]. Proto bylo po konzultaci s vedoucím práce zvoleno zapojení zobrazené v obrázku 2.4 především z důvodu, že při jeho použití není oproti [33, strana 6] třeba zdroje záporného napětí.



Obrázek 2.4: Zapojení teplotního čidla PT100 a kompenzace vstupní napěťové asymetrie operačního zesilovače

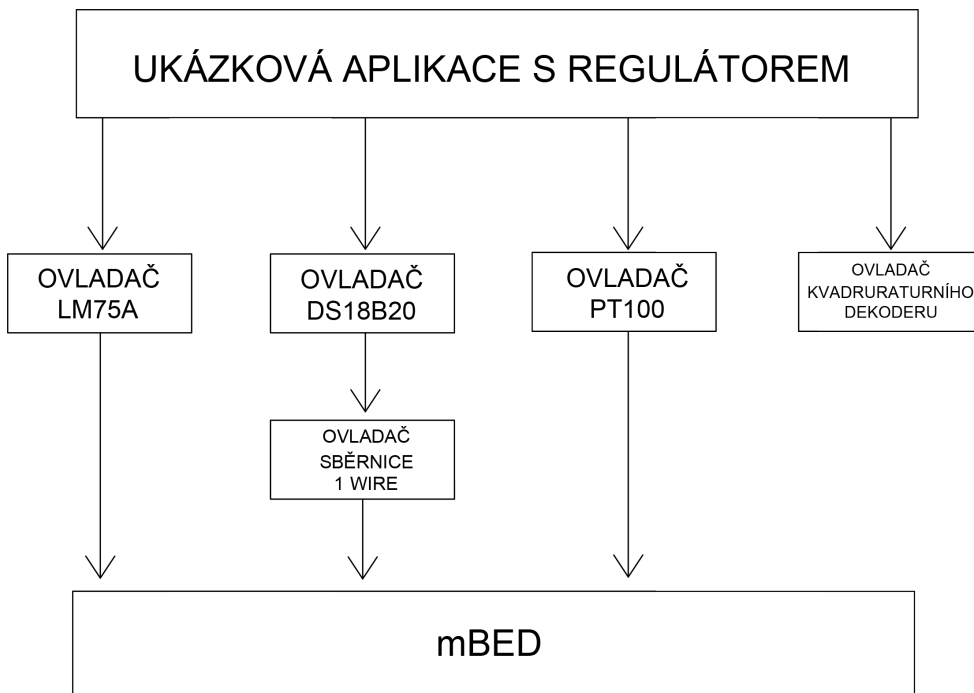
2.4.5.2 Polovodičové senzory

Při zapojení ostatních senzorů budeme postupovat podle doporučení od výrobce v [13] a [34], přičemž bylo rozhodnuto, že pro napájení senzorů bude použito lineárního stabilizátoru. Připojením těchto senzorů na externí zdroj napájení se sníží zátěž stabilizátoru napětí na vývojové desce, a zároveň se eliminuje případné riziko snížení interní napěťové reference pro A/D převodník v době největší zátěže, která by způsobila nepřesnost měření teploty na analogovém senzoru.

Dále bylo rozhodnuto, že senzor DS18B20 nebude napájen přímo ze sběrnice 1 Wire, nýbrž bude využito třetího pinu, který je k tomu určen. Je to z důvodu, že by po zahájení měření teploty nebylo možné na sběrnici komunikovat po dobu 750 ms (maximální doba měření [13]), aby byl zaručen dostatek napájení během konverze teploty (viz. 1.3).

2.5 Knihovny a ukázkový program

Řízení celého přípravku má za úkol mikrokontrolér nRF51822, pro který je třeba navrhnout programové vybavení. Toto vybavení bude realizováno v prostředí mBED, které již obsahuje ovladače pro většinu periférií a jeho použití výrazně urychlí vývoj.



Obrázek 2.5: Blokové schéma programového vybavení.

2.5.1 Komunikace se senzory

V sekci 2.3 bylo rozhodnuto, že se použijí celkem tři druhy senzorů. S rozhraním I²C, 1 Wire a analogovým, který bude připojený do A/D převodníku. Knihovna mBED již obsahuje ovladače pro I²C sběrnici a A/D převodník, které mají podporu v hardwaru. Naopak sběrnice 1 Wire žádnou podporu nemá a je tedy nutné použít knihovnu implementující softwarové rozhraní 1 Wire. Po důkladném prozkoumání většiny dostupných knihoven na platformě mBED, bylo rozhodnuto, že se vytvoří vlastní knihovna. Většina prozkoumaných knihoven neimplementuje všechny funkce sběrnice, nebo na mikrokontroléru nRF51822 nefunguje.

Pro komunikaci s jednotlivými typy senzorů bylo nalezeno poměrně velké množství knihoven. Ty však opomíjely rozšířené vlastnosti digitálních sen-

zorů, proto bylo třeba naprogramovat knihovny vlastní. Výhodou vytvoření vlastních knihoven je možnost vytvořit si ucelený objektový návrh s polymorfismem.

2.5.2 Komunikace s uživatelem

Pro komunikaci s uživatelem bylo vedoucím práce rozhodnuto použít sériové linky a kvadrurního dekodéru. Pro sériovou linku je v knihovně mBED dostupné API. To umožňuje jednoduché posílání po rozhraní pomocí funkce *printf*. Příjem je možné realizovat pomocí dvou módů.

- *scanf*
blokující čekání na zprávu ze sériové linky
- *attach*
přiřazení sériovému portu přerušovací rutinu, která se zavolá vždy, když je přijatý nějaký bajt.

Vzhledem k tomu, že okamžik přijetí příkazu po sériové lince je nepředvídatelný, je třeba využít druhého způsobu. V přerušovací rutině budou skládány dohromady jednotlivé příkazy, které se následně vloží do fronty ke zpracování.

Pro kvadrurní dekodér se na platformě mBED žádná knihovna nenachází, proto je potřeba navrhnout vlastní rozhraní. Kvadrurní dekodér je v mikrokontroléru přítomen pouze jednou a opětovná inicializace objektu implementujícího dekodér by mohla zrušit správnou funkčnost objektu vytvořeného dříve. Aby se zabránilo výše popsané situaci, použije se návrhový vzor singleton, který této situaci jednoduše zabrání [35].

2.5.3 Ovládání

Pro ovládání uživatelem pomocí sériové linky a kvadrurního dekodéru bylo třeba navrhnout komunikační protokol. Tento protokol by měl být dostatečně jednoduchý a intuitivní, aby bylo možné jej psát přímo z konzole počítače, bez nutnosti dalšího programu. Zároveň se na sériové lince velice často stane, že se samovolně vygeneruje sekvence bajtů bez přičinění komunikujících stran.

Bylo rozhodnuto, že každá zpráva bude začínat „&“ a končit „;“. Toto ohraničení zpráv povede alespoň k částečnému odfiltrování chybných bajtů.

Následně byly navrženy tyto příkazy, které definují požadavky a funkce celé demo-aplikace:

- *SetMode*
Tímto příkazem se nastavuje, jestli má přípravek chladit, nebo hřát. Příkaz očekává argument *C* - chlazení, nebo *W* - ohřev.

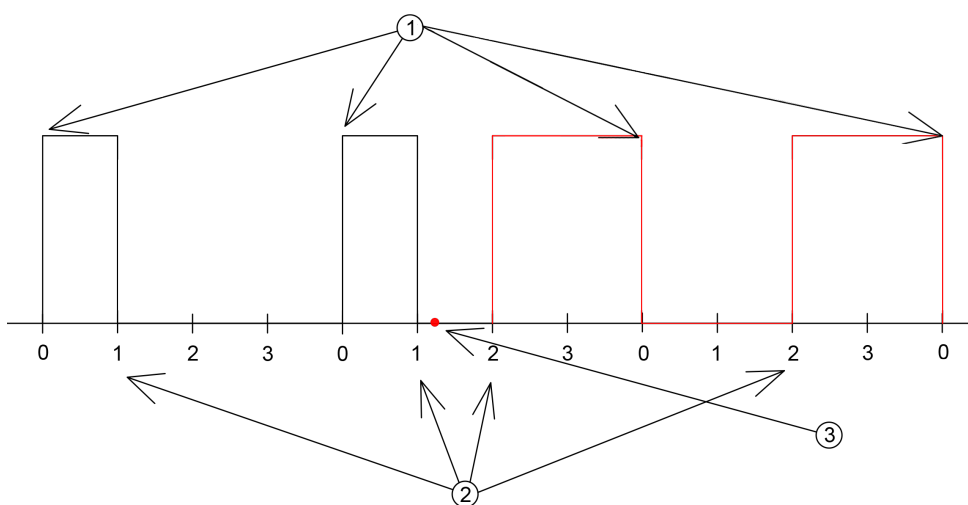
- *SetPower*
Nastavení výkonu. Příkaz očekává argument mezi 0 a 1 specifikující procentuální výkon. Pokud není žádný argument předán, nastaví se výkon 0 %. Po vyslání tohoto příkazu začne Peltiérův článek chladit, nebo hřát v závislosti na dříve nastaveném módu.
- *SetSetpoint*
Nastavení žádané teploty pro regulátor. Příkaz očekává argument požadované teploty, pokud není žádný argument předán, nastaví se aktuálně změřená teplota kapaliny (výstup regulátoru bude nulový). Po vyslání tohoto příkazu se spustí regulační smyčka, která se bude snažit ohřát, nebo ochladit kapalinu (v závislosti na dříve nastaveném módu) na požadovanou teplotu.
- *ShowCtrInfo*
Po vyslání tohoto příkazu bude každých pět sekund vypisována aktuální nastavená teplota pro regulaci a naměřená teplota kapaliny. Pokud nebude žádná regulace aktivní, příkaz skončí chybou. Tento příkaz bude implementován pro snadné generování grafů průběhu teploty během regulace.
- *ShowTemp*
Po vyslání tohoto příkazu budou každých pět sekund vypisovány naměřené hodnoty z jednotlivých senzorů. Příkaz očekává argument 0 - 5 specifikující číslo senzoru. Pokud není žádný argument předán, proběhne výpis všech senzorů současně. K zastavení výpisu dojde, je-li přípravek předán jiný příkaz, nebo bylo pootočeno s kvadraturním enkodérem.
- *GetTemp*
Tento příkaz je totožný jako příkaz *ShowTemp* s tím rozdílem, že výpis proběhne jednorázově.
- *ShutDown*
Po vyslání tohoto příkazu dojde k vypnutí Peltiérova článku.
- *Help*
Po vyslání tohoto příkazu proběhne zobrazení nápovědy s výše popsanými příkazy včetně přiřazených čísel jednotlivým teploměřům.

Po nastavení přípravek do patřičného módu (Chlazení - Výkon, Ohřev - Regulátor. . .), lze nastavenou hodnotu (předanou parametrem) upravit pomocí rotačního mechanického enkodéru.

2.5.4 Řízení výkonu Peltiérova článku

Pro generování PWM je v prostředí mBED vytvořena knihovna. Ta však obsahuje závažnou chybu, která byla během analýzy objevena.

V knihovně mBED je řešeno generování PWM pomocí jednotky PPI, která je v mikrokontroléru přítomna (viz. 1.4). V této jednotce je nakonfigurováno přepojení tak, že událost od časovače (přetečení a shodná hodnota s porovnávacím registrem) přepne polaritu na pinu bez nutnosti zásahu procesoru. Toto řešení však s sebou nese určitá rizika při změně střídy PWM na časovači. V tu chvíli může dojít k časovému hazardu a převrácení nastavené střídy (viz. obrázek 2.6). Implementace PWM v knihovně mBED těmto hazardům předchází poměrně nešikovným způsobem. Při přetečení čítače je pokaždé voláno přerušení, ve kterém jsou tyto hodnoty znovu nastaveny. Přerušení je voláno, i když nedošlo k žádné změně.



Obrázek 2.6: Časový hazard. 1 Převrácení polarity pinu, přetečení časovače, 2 Převrácení polarity pinu, shodná hodnota s porovnávacím registrem, 3 Změna střídy na dvě časové jednotky, úprava hodnoty v porovnávacím registru časovače

Ačkoliv je těmto hazardům pomocí přerušení předcházeno, k inverzi stejně dochází kvůli špatnému nastavování pinu při nulové střídě. Chyba se projeví, pokud dojde k úpravě střídy z nulové na nenulovou a zároveň je hodnota registru časovače nulová [36]. Pro odstranění hazardu je třeba při změně střídy PWM vypnout, vynulovat čítač a nastavit pin do 1. Odstranění této chyby je věnována sekce 3.2.5.

2.5.5 Regulátor

Vzhledem k tomu, že požadavky vedoucího práce vyžadují mód ohřevu a chlazení, je třeba implementovat dva PSD regulátory s rozdílnými vlastnostmi, mezi kterými bude uživatel přepínat. Po konzultaci s vedoucím práce bylo

z důvodu zjednodušení zvoleno, že program sám nebude přepínat mezi chlazením a ohřevem a v případě překmitu bude spoléhat na vnější vlivy, které regulovanou soustavu přivedou zpět do žádaného stavu.

Obecně je třeba v tomto typu regulátoru zajistit, aby byl výpočet výstupu regulátoru volán pravidelně. Proto se bude muset metoda implementující PSD regulátor volat v přerušení od časovače, které bude mít vysokou prioritu.

2.5.6 Určení teploty z čidla PT100

Nejprve je pro určení teploty potřeba vypočítat elektrický odpor teplotního čidla. Pro zapojení dle obrázku 2.4 lze pro výpočet vycházet z výpočtu napětí na odporovém děliči.

$$U_{PT100} = U_{vcc} \cdot \frac{R_{PT100}}{R_{PT100} + R_{19}} \quad (2.8)$$

kde je U_{PT100} napětí naměřené pomocí A/D převodníku [V],

U_{vcc} napájecí napětí [V],

R_{PT100} elektrický odpor teplotního senzoru [Ω],

R_{19} elektrický odpor měřicího rezistoru [Ω].

Ve výrazu 2.8 máme pouze jednu neznámou a to R_{PT100} . Jeho úpravou dostáváme výraz pro výpočet elektrického odporu teplotního čidla.

$$R_{PT100} = \frac{R_{19} \cdot U_{PT100}}{R_{PT100} + U_{vcc} - U_{PT100}} \quad (2.9)$$

Dále je třeba vypočtený elektrický odpor převést na teplotu. Hodnota elektrického odporu se na teplotním čidle PT100 mění téměř lineárně, avšak výraz pro přesný výpočet, který udává výrobce v [22], představují dva polynomy třetího stupně. Jeden pro záporné a druhý pro kladné teploty.

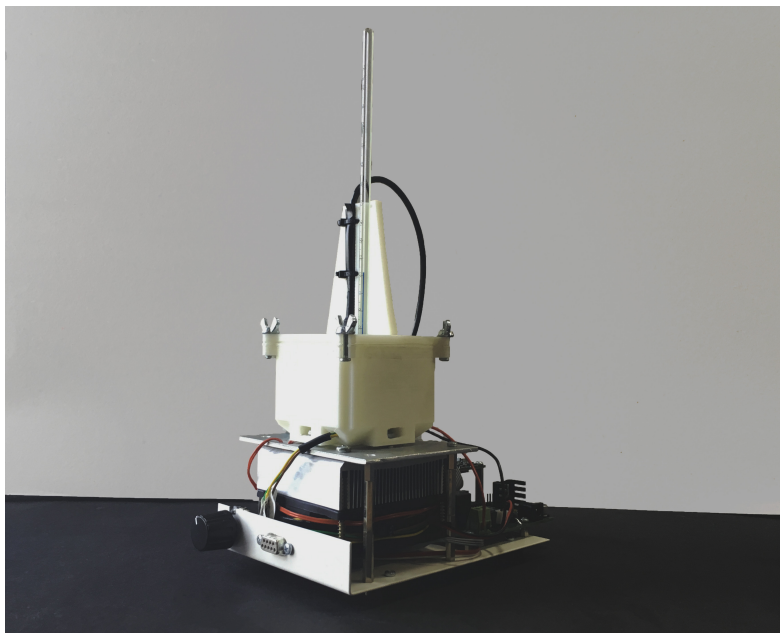
Jelikož se jedná o výukový přípravek, byl zvolen výpočet pomocí převodní tabulky, protože se s tímto způsobem převodu student spíše nesetkal. Vztah mezi elektrickým odporem a teplotou nemusí být u analogových čidel vždy určen polynomem. Velice často se stává, že výrobce dodává k teplotnímu čidlu pouze převodní tabulku.

V paměti budou uloženy hodnoty elektrického odporu čidla mezi -100 až 200 °C s přesností na jednotky stupňů. Podle místa uložení elektrického odporu v tabulce bude možné zjistit hodnotu teploty. Pro zjištění teploty nalezneme v tabulce dvě nejbližší hodnoty elektrického odporu a teploty k nim náležících. Následně se bude mezi těmito teplotami lineárně aproximovat podle [31].

Jednou z nevýhod tohoto rozhodnutí je možná větší nepřesnost výsledku vypočteného pomocí lineární aproximace oproti výsledku vypočteného pomocí vzorce. Podle [20] se na intervalu 0 - 100 °C často odchylka zanedbává a výpočet se provádí pouze pomocí lineární aproximace, jelikož dosahuje maximálně hodnoty 0,38 °C.

Během prvotních testů bylo experimentálně zjištěno, že chyba lineární aproximace mezi dvěma nejbližšími celými stupni Celsia je 0,004 °C. Jedná se tedy o zanedbatelné číslo oproti jiným chybám, které vzniknou v obvodu a převodem v A/D převodníku.

Realizace



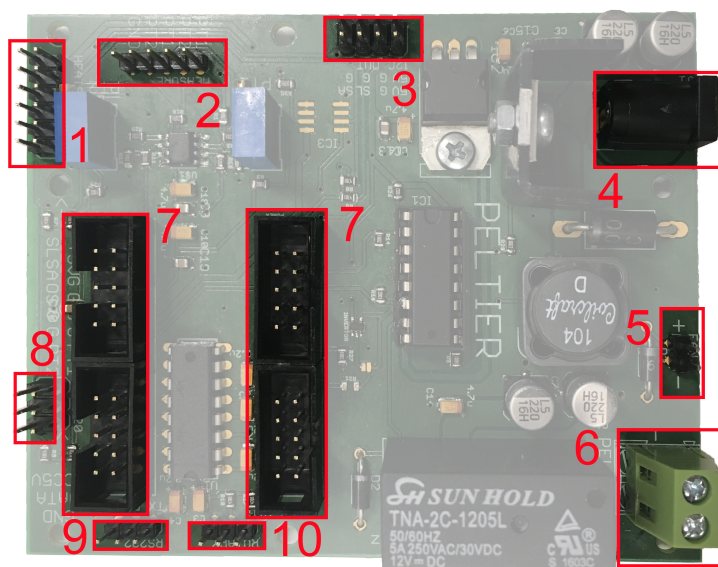
Obrázek 3.1: Vytvořený výukový přípravek

3.1 Plošný spoj

Vzhledem tomu, že bylo nutné použít poměrně velké množství elektrických součástek na malém prostoru, bylo potřeba navrhnout a nechat vyrobit desku plošných spojů (DPS). Celkové koncepcce plošného spoje počítá se dvěma zdroji napájení a třemi různými napěťovými hladinami na DPS.

První zdroj 3,3V napětí je umístěn přímo na prototypovací desce s mikrokontrolérem. Druhý napájecí zdroj 12V napětí je externí. Tento zdroj je

3. REALIZACE



Obrázek 3.2: Plošný spoj. 1 Konektor pro připojení senzorů na chladiči, 2 Konektor pro měření vstupní napětové asymetrie operačního zesilovače, 3 Konektor pro připojení čidel s rozhraním I²C, 4 Napájecí konektor, 5 Konektor pro připojení ventilátoru, 6 Svorkovnice pro připojení Peltiérového článku, 7 Konektor pro připojení řídicí desky nRF51822, 8 Konektor pro připojení zařízení se sběrnici 1 Wire, 9 Konektor pro připojení RS232, 10 Konektor pro připojení rotačního enkodéru

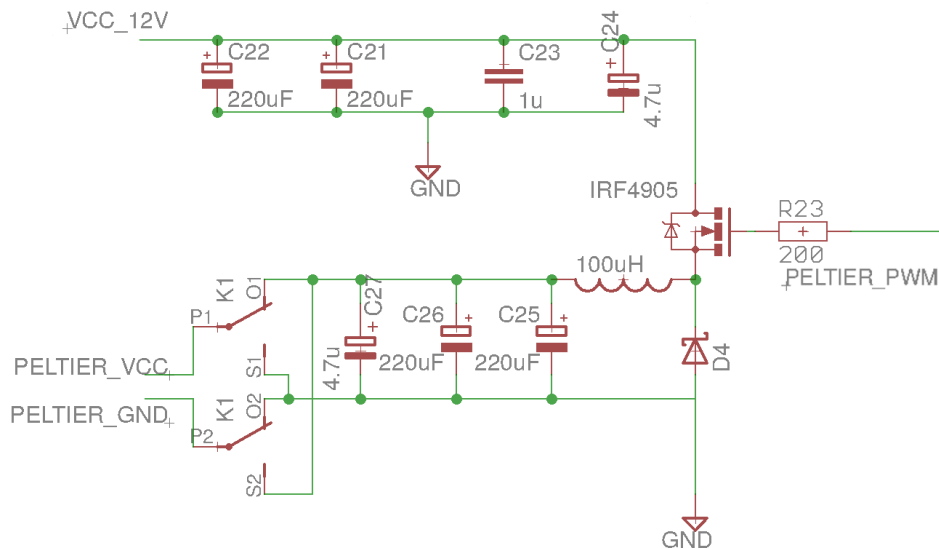
zapojen pomocí souosého napájecího konektoru, známého pod anglickým názvem *power jack*.

DPS je rozdělen na dvě části. Levá strana je určena výkonové elektronice. Na této straně dochází k ovládání výkonu Peltiérového článku pomocí spínání. Zde je připojený ventilátor, relé a tranzistorové pole L293D.

V pravé části jsou umístěny obvody pro komunikaci s uživatelem, komunikaci s digitálními senzory a operační zesilovač pro čtení napětí z PT100.

3.1.1 Regulace výkonu Peltiérového článku

V 2.4.1 bylo rozhodnuto se pro návrh obvodu regulace inspirovat spínaným zdrojem s tím, že generátor PWM bude v tomto případě mikrokontrolér. Funkce filtru byla nejprve otestována na nepájivém poli. Během těchto testů



Obrázek 3.3: Zapojení filtru PWM pro Peltierův článek

byly experimentálně určeny hodnoty součástek pro frekvenci PWM 25 kHz. Tato frekvence vychází jako vhodný kompromis mezi velikostí kondenzátoru a reakční dobou tranzistoru. Cívka o indukčnosti 1 μH a kondenzátor o kapacitě 440 μF by měly zabezpečit dostatečnou filtraci PWM signálu, při které amplituda není vyšší než 10 %. Pro dokonalejší vyhlazení byl přidán ještě malý tantalový kondenzátor o velikosti 4.7 μF , který dokáže zachytit napěťové špičky o vyšší frekvenci generované cívkou. Celé zapojení je zobrazeno na obrázku 3.3.

Rychlé změny v toku proudu zapříčiněné spínáním představují pro zdroj poměrně velkou zátěž. Dochází následně k úbytku napětí v celém obvodu. Z toho důvodu bylo nutné umístit před tranzistor kondenzátory *C22* a *C21*, které snižují pokles napětí při otevírání a naopak pohlcují špičku při zavírání tranzistoru. Tyto kondenzátory a použití zpomalovacího rezistoru *R23*, který zpomaluje nabíjení báze tranzistoru zajišťují stabilní napětí ve zbytku obvodu.

Báze tranzistoru je přes rezistor *R23* přivedena k budiči L293D. Který je řízen přes invertor přímo z mikrokontroléru. Invertor byl do datové cesty přidán z toho důvodu, aby nedocházelo k otevření tranzistoru (P - MOS) ve chvíli, kdy je připojené pouze 12V napájení a uživatel nepřipojil napájení k mikrokontroléru.

3.1.2 Zapojení další elektroniky

3.1.2.1 Ventilátor a relé

Pro zapojení ventilátoru a relé bylo použito volných portů v tranzistorovém poli L293D. K těmto indukčním zátěžím byla připojena paralelně dioda.

3.1.2.2 Teplotní senzory

Zapojení teplotního čidla LM75A bylo provedeno podle doporučení výrobce v [34]. Na napájecí pin bylo přivedeno 5 V. Piny SDA a SCL byly připojeny přes pull-up rezistor s hodnotou 4700 Ω k 3,3V napájení. Stejným způsobem byl také zapojen pin OS. Adresní piny u teplotního čidla umístěného na chladiči byly uzemněny, u čidla umístěného na DPS (není osazen) je nejnižší bit adresy jedničkový, zbylé jsou nulové. Výsledná adresa pro teploměr umístěný na chladiči je tedy *0x48* a u čidla umístěného na DPS je *0x49*.

Senzor DS18B20 má vyvedený pin pro napájení, ačkoliv sběrnice 1 Wire umožňuje napájení zařízení pouze z datového pinu. Na tento pin bylo přivedeno napájení 5 V. Datový pin byl zapojený přes pull-up rezistor s hodnotou 4700 Ω k 3,3 V napájení. Toto zapojení je doporučováno výrobcem v [13].

Senzor PT100 byl zapojen podle obrázku 2.4. Toto zapojení bylo po analýze v sekci 2.4.5.1 zvoleno jako nejvhodnější. Zároveň byly na plošném spoji vyvedeny piny, na kterých je možné srovnávat napětí na teplotním čidle s napětím na invertujícím vstupu operačního zesilovače. Tyto piny poslouží k nastavení optimální kompenzace vstupní napěťové asymetrie operačního zesilovače.

3.1.3 Zapojení řídicí desky

Na prototypové desce nRF51822 bylo využito celkem 12 pinů pro všeobecné použití, napájecí piny jsou použity všechny. Pro jednoduchost zapojení byly využity konektory, které se zapojí na všechny kolíky vyvedené z jednoho jumperu na desce a připojí se do jumperů *J1* až *J4* vytvořených na plošném spoji, které přesně kopírují rozložení pinů na prototypové desce. Zapojeny jsou tedy všechny piny, ale na vytvořeném DPS mají funkci pouze některé. Funkční piny jsou uvedeny v tabulce 3.1.

3.2 Programové vybavení

Ukázková práce se skládá ze tří hlavních částí.

- Knihovna pro komunikaci se senzory
- Regulátor
- Řízení přípravku a zpracovávání vstupu od uživatele.

Tabulka 3.1: Zapojení pinů na řídicí desku nRF51822 mKIT.

Název pinu	Funkce
P0_1	Teplotní senzor PT100 Peltiérův článek
P0_3	Teplotní senzor PT100 chladič
P0_9	UART TX
P0_11	UART RX
P0_12	Teplotní hlídač senzoru LM75A
P0_20	I ² C SCL
P0_21	Kvadrurní dekodér, kanál A
P0_22	I ² C SDA
P0_23	Kvadrurní dekodér, kanál B
P0_24	PWM pro Peltiérův článek
P0_28	Ovládání relé
P0_29	1 Wire
P0_30	Ovládání ventilátoru
VCC	
GND	

V textu bakalářské práce není prostor pro zdokumentování všech implementovaných metod, proto jsou dále uvedeny pouze ty nejdůležitější. Kompletní dokumentace je na přiloženém CD.

3.2.1 Implementace knihoven pro komunikaci s teplotními senzory

Pro návrh knihoven bylo použito objektového přístupu. Abstraktní třída *CSensor* určuje rozhraní, které implementuje každá třída představující senzor. Obsahuje dvě metody:

- *float Read(void)*
Jedná se o abstraktní metodu. Její funkcí je vyčtení aktuálních dat ze senzoru. Pokud má senzor více možných výstupů, jedná se o ten nejvíce používaný.
- *const char * Get_Name(void)*
Tato metoda provádí vyčtení jména senzoru, které bylo předáno při inicializaci.

Ostatní třídy, reprezentující jednotlivé druhy teplotních čidel, mají pouze přidány metody, které jsou pro ně specifické.

3.2.1.1 CDS18B20

Třída *CDS18B20* obsahuje metody sloužící k ovládání teploměru DS18B20. Pro komunikaci s teplotním čidlem byla vytvořena třída *COne_wire*, která softwarově implementuje sběrnici 1 Wire. Tato třída nabízí metody, které pokrývají veškeré funkce této sběrnice (viz. 1.3). Pro čtení teploty byly vytvořeny následující tři funkce.

- *float Temperature(void)*
Tato metoda v teploměru zahájí měření teploty. Následně blokujícím způsobem počká, než teploměr oznámí dokončení a vrátí z něj aktuální naměřenou teplotu.
- *float Get_Only_Temperature(void)*
Tato metoda přečte hodnotu z teplotních registrů v čidle. Při tomto čtení není prováděno měření teploty. Teplota vyčtená pomocí této metody nemusí být aktuální.
- *static void Global_Temp_Request(COne_wire * ow)*
Tato metoda posílá všem teploměrům na sběrnici 1 Wire požadavek na zahájení měření teploty.

Poslední dvě metody (které se navzájem doplňují) jsou vytvořeny, jelikož měření teploty trvá u 12bitové přesnosti 750 ms [13]. Tímto rozděleným způsobem je docíleno neblokujícího čekání.

Další metody slouží k nastavení teplotního hlídače a přesnosti měřené teploty. Jedná se převážně o jednoduché zapisování a vyčítání hodnot z registrů teploměru. Implementace metod pro ovládání tohoto čidla proběhla podle [13].

3.2.1.2 CPT100

Ve třídě *CPT100* jsou implementovány metody sloužící ke čtení teploty z teplotního čidla PT100. Pro čtení napětí je využito rozhraní *AnalogIn* z knihovny mBED. K výslednému přečtení teploty slouží metoda *Temperature*, která přijímá parametr typu *bool*. Pokud je této funkci předána parametrem hodnota *true*, pak probíhá měření v ladícím módu, kdy jsou na sériovou linku kromě teploty vypisovány i další hodnoty:

- Surová hodnota z A/D převodníku mezi 0 a 1
- Napětí naměřené na teplotním čidle PT100
- Vypočítaný elektrický odpor

Ve výchozím stavu, stejně tak v abstraktní metodě *Read* (viz. 3.2.1), je tento výpis vypnutý.

Dále třída obsahuje definici převodní tabulky s nejnižší teplotou $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ a nejvyšší $170\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a metody, které dokážou na základě tabulky převést elektrický odpor na teplotu. Hodnoty tabulky byly převzaty z [37].

3.2.1.3 CLM75A

Třída *CLM75A* obsahuje metody pro komunikaci s teploměrem LM75A. Pro komunikaci s teplotním čidlem jsou použity metody objektu *I2C* z knihovny *mBED*. Ve třídě je vytvořené rozhraní pokrývající veškeré funkce tohoto senzoru. Implementace proběhla podle [34].

3.2.2 Ovladač pro kvadraturní dekodér

Základním stavebním kamenem ovladače je čítač reprezentující počet pozic, o které byl enkodér otočen. Při otáčení enkodéru jedním směrem hodnota v čítači roste, otáčení směrem druhým hodnota klesá. Při detekci otočení je vygenerováno přerušení, ve kterém je vyčten hardwarový čítač kvadraturního dekodéru. V tomto čítači je uložen počet pulzů, které nastaly od posledního čtení.

Dále je volána dělička pulzů, jelikož každý rotační enkodér vygeneruje na otočení o jednu pozici různý počet impulzů. Hodnotu této děličky lze nastavit voláním funkce *qdec_set_counter_prescaler*. Po tomto výpočtu je volán uživatelský callback, ve kterém je předána hodnota čítače jako parametr. Díky tomuto callbacku si může uživatel nadefinovat vlastní přerušovací rutinu.

Počáteční nastavení kvadraturního dekodéru je implementováno ve funkci *qdec_init()*.

1. Nejprve je třeba nastavit periodu vzorkování obou kanálů. Perioda byla zvolena nejnižší možná a to $128\text{ }\mu\text{s}$ zapsáním *0* do registru *SAMPLERER* na nejnižší pozici.
2. Dále je třeba nastavit periodu generování zprávy o změnách a nastavení přerušení. Pokud zpráva nese informaci o události na dekodéru, pak je vygenerováno přerušení. Nastavení bylo zvoleno tak, že se zprávy generují každých 280 vzorků zapsáním *7* do registru *REPORTPER* na nejnižší pozici. Přerušení bylo nastaveno zapsáním *1* do registru *INTENSET* a *INTEN*.
3. Následně je zapnut hardwarový debounce zapsáním *1* do registru *DBFEN* na nejnižší pozici.
4. Dále jsou jednotlivým kanálům v dekodéru přiřazeny piny, které byly funkci předány parametrem. Toto nastavení proběhne zapsáním čísla pinu do registrů *PSELA* a *PSELB*.

Dále je ve funkci `qdec_start()` povolen kvadraturní dekodér zapsáním `1` do registru `ENABLE` a povolením příslušného úkolu následně zapnut kvadraturní dekodér.

Veškeré funkce, které poskytuje tento ovladač, jsou zabaleny do třídy `CQdec` implementující objektové rozhraní. Tento objekt je realizován pomocí návrhového vzoru singleton. Tím je zabezpečen pouze jediný výskyt instance této třídy v kódu.

3.2.3 Regulátor

Regulátor je reprezentován třídou `CController`. Jelikož bylo třeba implementovat dva regulátory (ohřevu a chlazení), které se odlišují pouze ve výpočtu chyby, bylo přistoupeno k polymorfismu s virtuální metodou `Get_Error`.

Nejdůležitější metoda obsažená v této třídě se nazývá `Control`, která se po zapnutí regulátoru volá periodicky na základě přerušení od časovače. Perioda vzorkování a výpočtu chyby byla zvolena vzhledem k pomalosti celého systému na 5 s.

V metodě `Control` je nejprve zavolána virtuální metoda `Get_Error`, která vypočítá odchylku regulované soustavy od žádaného stavu. Následně je na základě této odchylky proveden výpočet výstupu regulátoru podle vztahu 1.18. Tento výstup je předán callback funkci, jejíž ukazatel je objektu předán v konstruktoru. Callback funkce má za úkol propagovat výstup regulátoru upravením akční veličiny tak, aby došlo k minimalizaci regulované odchylky. V ukázkové aplikaci je v této funkci upravena střída PWM.

Konstanty pro výpočet výstupu regulátoru jsou předány v konstruktoru. Tyto konstanty byly určeny pomocí Ziegler-Nicholsovy metody (viz. 1.2.2).

Pro zjištění parametrů byly nejprve použity vztahy pro diskrétní PSD regulátor. Tyto hodnoty se ukázaly jako nevyhovující, jelikož při jejich použití nedošlo k ustálení regulátoru. Z toho důvodu bylo použito vztahů určených pro spojitý PID regulátor. Výpočet byl proveden následovně:

- Pro chladicí regulátor byla změřena kritická hodnota $K_{Pk} = 0,4$ a kritická perioda $T_k = 42$ s. Po dosazení byly určeny hodnoty parametrů následovně.

$$K_P = 0,5 \cdot K_{Pk} = 0,5 \cdot 0,4 = 0,2$$

$$K_I = 2 \cdot \frac{K_P}{T_k} = 2 \cdot \frac{0,2}{42} = 0,01$$

$$K_D = \frac{K_P \cdot T_k}{8} = \frac{0,2 \cdot 42}{8} = 1,05$$

- Pro regulátor ohřevu byla změřena kritická hodnota $K_{Pk} = 0,3$ a kritická perioda $T_k = 46$ s.

$$K_P = 0,5 \cdot K_{Pk} = 0,5 \cdot 0,3 = 0,15$$

$$K_I = 2 \cdot \frac{K_P}{T_k} = 2 \cdot \frac{0,15}{46} = 0,00652$$

$$K_D = \frac{K_P \cdot T_k}{8} = \frac{0,15 \cdot 46}{8} = 0,8625$$

Pro zjištění chyby je třeba v metodě *Get_Error* přechíst hodnotu zpětné vazby regulátoru. Jelikož jako zpětná vazba pro regulátor je použit senzor DS18B20, jehož vyčítání je poměrně dlouhé, bylo v ukázkovém programu využito neblokujícího čtení hodnot (viz. 3.2.1.1). Požadavek na zahájení měření je generován každou sekundu v přerušení od časovače. Vyčtené hodnoty jsou tedy nejvýše sekundu zastaralé, což vzhledem k pomalosti celého regulovaného systému nemá žádný význam.

3.2.4 Implementace demo-aplikace

Pro implementaci ukázkové aplikace bylo třeba, kromě již zmíněných knihoven, vytvořit objekty, které budou běh celé aplikace řídit. Proto byly vytvořeny následující třídy:

- *CSuper_IO*
Tato třída se stará o komunikaci po sériové lince. Provádí detekci jednotlivých příkazů a následně je vkládá do fronty.
- *CWorker*
Tato třída se stará o zpracovávání příkazů ze sériové linky a impulzů z rotačního enkodéru. Po zavolání metody *Work()* je v nekonečné smyčce vyčítána fronta přijatých příkazů.
- *CTemp_ctr*
Tato třída se stará o ovládání Peltiérova článku, včetně jeho polarity směru proudu a teploty. V této třídě je rovněž implementováno zapínání ventilátoru, který se zapne pokud naměřená teplota na straně chladiče přesáhne 30 °C. Teplota je kontrolována v přerušení, které je voláno každých 10 s.
Zároveň se tato třída stará, aby nedošlo k přehřátí Peltiérova článku. Pokud je naměřena na jedné ze stran Peltiérova článku teplota vyšší než 80 °C, dojde k jeho zablokování, dokud teplota neklesne pod 60 °C.
- *CTemp_holder*
Tato třída v sobě udržuje jednotlivé regulátory a stará se o jejich správné přepínání na základě požadavku uživatele.

Demoaplikace funguje přesně podle specifikace napsané v 2.5.3.

3.2.5 Úpravy knihovny mBED

Knihovna mBED obsahuje implementaci ovladače PWM pro vývojový kit Nordic nRF51822 mKIT. Bylo zjištěno, že tato implementace obsahuje závažnou chybu, která může způsobit inverzi střídý PWM (viz. 2.4.1). Veškeré změny knihovny mBED byly provedeny v souboru *pwmout_api.c* (*/targets/TARGET_NORDIC/TARGET_MCU_NRF51822/pwmout_api.c*) ve funkcích:

- *pwmout_write*
- *pwmout_period_us*
- *pwmout_pulsewidth_us*

V nich dochází ke změně hodnot registrů v časovači. Pro eliminaci časového hazardu byl časovač zastaven a vynulován. Dále je do registru časovače zapísána nová hodnota a pin přepnut do 1. Následně je časovač zapnut a PWM funguje bez účasti procesoru. Toto řešení má stejně jako implementovaný algoritmus v mBED za následek, že změna střídý nebo periody na jednom PWM kanálu ovlivní i ostatní kanály krátkým výpadkem. Na druhou stranu nevede k žádnému časovému hazardu a nepotřebuje pro svůj správný chod přerušeni, a tedy procesorový čas.

Další změnou, která byla provedena, je změna periody časovače na 1 μ s, místo předchozích 4 μ s. Tato změna ale nesouvisí s výše popsanou chybou. Změna přesnosti byla nutná pro generování PWM o frekvenci 25 kHz (viz. 3.1.1).

3.3 Konstrukce

Přípravek se skládá ze dvou hlavních částí. Desky plošných spojů, na které je pevně přichycen vývojový kit s mikrokontrolérem, a boxu s chladičem a víkem. Obě tyto části jsou připojeny k plechovému podstavci, který tvoří základ většiny výukových přípravků na FIT ČVUT v Praze.

3.3.1 Úpravy plastových dílů

Plastové díly byly vyrobeny na 3D tiskárnách v laboratoři FIT ČVUT v Praze, z materiálu ABS v bílé barvě. ABS se vyznačuje poměrně vysokou pevností a odolností proti teplu.

Veškeré provedené úpravy v návrhu vycházejí ze zdrojových kódů použitých v již hotovém prototypu. Izolační box byl zvýšen o 13 mm a každá stěna byla zúžena o 5 mm, přičemž naspodu boxu zůstala tloušťka stěn původní, jelikož byla přesně vypočítána pro velikost Peltiéřova článku. Zároveň byl vytvořen otvor, který vede uvnitř stěny izolačního boxu pro vodiče k teplotnímu čidlu DS18B20, které měří teplotu na článku uvnitř plastového boxu.

Cesta, kterou vodiče vedou uvnitř stěny přípravku, je zvolena co nejdelší, aby se jejich teplota přizpůsobila teplotě vnitřní. Pokud by jejich teplota byla vyšší (nižší), mohla by značným způsobem ovlivnit měření.

Do plastového víka bylo nutné udělat další otvor pro přívod kabelů. S tím souvisí také zvětšení držáku, o který byl v původní verzi opřený lihový teploměr. Na tomto držáku také přibýly otvory pro uchycení teplotního čidla DS18B20.

3.3.2 Zateplení izolačního boxu

Pro zateplení byl použit modelářský polystyren o tloušťce 5 mm. Ten byl nařezán podle rozměrů izolačního boxu a následně vložen dovnitř. Rozměry nařezaného polystyrenu byly zvoleny o něco větší, aby uvnitř přípravku držely bez nutnosti lepidla a bylo možné je v případě vylití kapaliny vyjmout a usušit. Pouze polystyren umístěný na víku byl přilepen.

3.3.3 Montáž chladiče a senzoru PT100

Zakoupený chladič byl namontován na hliníkovou desku, která sloužila jako chladič v první verzi. Pro co nejlepší přenos tepla byla použita teplovodivá pasta.

Teplotní čidlo bylo umístěno do vyfrézované drážky na hliníkové desce a zalito teplovodivou pastou. Aby se zabránilo nechtěnému vytržení, byly vyvrtány do hliníkové desky dva otvory, kterými je vodič k senzoru protažen. Samotné uchycení senzoru na určeném místě zajišťuje pevné přichycení izolačního boxu a Peltiérovu článku k hliníkové desce. Na senzor je vyvíjen z jejich strany tlak a nemělo by v žádném případě dojít k vytržení.

3.3.4 Připevnění ostatních čidel

Teploměry LM75A a PT100 byly připevněny na expandér, který se obvykle používá k převodu součástky z SMD na DIP. Do tohoto expandéru byly provrtány otvory na šroubky, kterými se přichytil k hliníkové desce.

Teploměr DS18B20 umístěný uvnitř izolačního boxu byl přitisknut k Peltiérovu článku pomocí polystyrenové izolace. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu špatné přesnosti teplotního čidla. Tepelná izolace zajistí, že teploměr bude měřit pouze teplotu na článku a bude minimálně ovlivněn okolní teplotou.

Vodotěsný teploměr DS18B20 byl pevně přichycen k plastovému víku pomocí plastových pásek a připravených otvorů.

Testování

Testování všech komponent probíhalo průběžně během procesu návrhu a konstrukce. Během tvoření bakalářské práce byly vytvořeny celkem dva prototypy, na kterých byla funkčnost a adekvátnost zvolených řešení důkladně testována. V této kapitole je popsáno finální testování během a po osazování plošného spoje.

4.1 Funkčnost chlazení a ohřevu

4.1.1 Chladič

Testování přehřívání Peltiéřova článku probíhalo přímým připojením napájecích vodičů Peltiéřova článku k 12 V napětí generovaného laboratorním zdrojem. Teplota na teplé straně byla odečítána pomocí již umístěného teplotního čidla PT100. Teplota na chladné straně byla pro větší přesnost odečítána pomocí bezkontaktního teploměru. Na vnější straně článku byla po zapnutí naměřena maximální teplota 47 °C, zatímco na chladné straně byla naměřena teplota -20 °C.

4.1.2 Zmrazení a ohřev kapaliny

Vyrobená nádoba byla naplněna vodou a umístěna do izolačního boxu. Následně byl nastaven výkon Peltiéřova článku v módu chlazení na nejvyšší možnou úroveň. Kapalina začala po obvodu nádoby mrznout během jedné minuty, přičemž k celkovému zamrznutí došlo po deseti minutách.

Stejným způsobem byl otestován také ohřev. Teplota dosáhla hodnoty 80 °C přibližně po čtyřech minutách.

4.2 Plošný spoj

Plošný spoj byl nejprve otestován multimetrem, aby se ověřilo, zda nedošlo během výrobního procesu ke zkratům mezi vodiči. Po osazení výkonové části bylo připojeno 12V napětí a multimetrem otestováno, zda nedošlo k chybě během návrhu a je na všech pinech správné napětí.

Po osazení veškerých součástek byla ještě pro kontrolu změřena kapacita na jednotlivých spojkách a elektrický odpor rezistorů. Při tomto testování bylo zjištěno, že měřící odpory pro PT100 vlivem příliš velkého zahřátí během pájení snížily svůj elektrický odpor z 4700 na 4600 Ω .

4.3 Filtrování PWM

Pro testování filtru PWM byl připojen zdroj 12V napětí k plošnému spoji a sonda osciloskopu byla připojena do svorkovnice, ve které byl zároveň připojený i Peltiérův článek. Měření kmitů bylo provedeno pomocí osciloskopu na 80, 50 a 20% stříde PWM. V žádném z těchto případů zvlnění nepřekročilo hranici 5 % z celkového napětí.

Dále bylo v této souvislosti provedeno měření průběhu napětí za lineárním stabilizátorem, které neneslo žádné známky spínání.

4.4 Teplotní senzory

Testování senzorů probíhalo ve více krocích. Nejprve se testovala správnost implementovaných knihoven a následně se testovala funkčnost senzorů na svém finálním umístění během chodu celého přípravku. Naměřené hodnoty byly porovnávány s lihovým a bezkontaktním teploměrem.

4.4.1 Teploměr LM75A

Funkčnost teploměru LM75A byla ověřena pomocí úspěšného vyčtení teploty. Tato teplota byla o 1 °C vyšší oproti skutečné teplotě. Funkčnost teplotního hlídače a funkce s ním související byly otestovány pomocí osciloskopu a během testů nebyly zjištěny žádné chyby.

4.4.2 Teploměr DS18B20

Vyčtená teplota ze senzoru byla o 1,5 °C vyšší oproti skutečné teplotě. Správnou komunikací se senzorem byla ověřena také funkčnost softwarové implementace sběrnice 1 Wire.

Funkčnost implementovaného vyhledávacího algoritmu byla vyzkoušena pomocí dvou teplotních čidel na sběrnici, přičemž došlo k úspěšnému vyčtení adres. Test ostatních funkcí teploměru byl proveden úspěšně a nebyly zjištěny žádné chyby.

Po zapnutí přípravku nedokázal teploměr umístěný uvnitř izolačního boxu přesně změřit teplotu na Peltiérově článku v režimu chlazení. Bezkontaktní teploměr ukazoval teplotu -20 °C a teplotní čidlo ukazovalo teplotu -10 °C . Tato nepřesnost byla dána tím, že Peltiérovův článek nedokázal dokonale ochladit teplotní čidlo, které zároveň měřilo teplotu vzduchu těsně nad článkem. Výsledek se nezlepšil ani po zalití čidla do teplovodivé pasty. Při ohřevu nebyl tento jev upozorován.

4.4.3 Teploměr PT100

Jelikož testování čidla PT100 znamená zároveň i testování hardwarového zapojení operačního zesilovače, probíhal tento test ve více krocích.

- Nejprve byl změřen elektrický odpor teplotního čidla a jeho hodnota byla porovnána s převodní tabulkou. Tato teplota přibližně odpovídala skutečné.
- Druhým krokem bylo připojení teplotního čidla. Po přivedení napájení bylo pomocí multimetru změřeno napětí na teplotním senzoru a následně byla zkalibrována vstupní napěťová asymetrie operačního zesilovače.
- Třída *CPT100* byla nastavena do ladícího režimu, ve kterém jsou na sériový port vypisovány kromě teploty také naměřené hodnoty z A/D převodníku a hodnota vypočítaného odporu teplotního čidla.

Naměřené napětí se od skutečného lišilo o $0,5\text{ mV}$. Této skutečnosti odpovídala určená teplota, která byla o $1,5\text{ °C}$ vyšší oproti skutečné. To je podle mého názoru zapříčiněno nepřesností multimetru, který byl využíván ke kalibraci a také nepřesností měřících rezistorů umístěných nad teplotním čidlem.

4.5 Kvadraturní dekodér

Testování kvadraturního dekodéru a zapojení rotačního enkodéru bylo provedeno náhodným otáčením a výpisem čítače enkodéru na sériovou linku. Tento test proběhl úspěšně. Dle očekávání při rychlejším otáčení nedochází na straně dekodéru k detekci všech hran a je přečteno menší množství pulzů. Tento jev je ale podmíněn vysokou rychlostí otáčení.

4.6 Regulátor

Testování nastavení regulátoru bylo uskutečněno pomocí zaznamenávání teploty z ponorného čidla DS18B20 do grafu.

Testování regulátoru chlazení probíhalo tak, že se kapalina (voda) měla z pokojové teploty 23 °C zregulovat na 15 °C . Ustáleného stavu bylo dosaženo za 12 minut. Graf průběhu regulace je zobrazen na obrázku 4.1. Další test

4. TESTOVÁNÍ

byl proveden tak, že se kapalina měla z pokojové teploty zregulovat na 0 °C. Vzhledem k tomu, že voda při této teplotě již mrzne, docházelo k jejímu zamrznutí od stran. Po zamrznutí samotného teploměru došlo k prudkému poklesu teploty, který výrazně vychýlil regulátor. K ustálenému stavu došlo přibližně po dvou hodinách po několika rozmrznutí a zamrznutí.

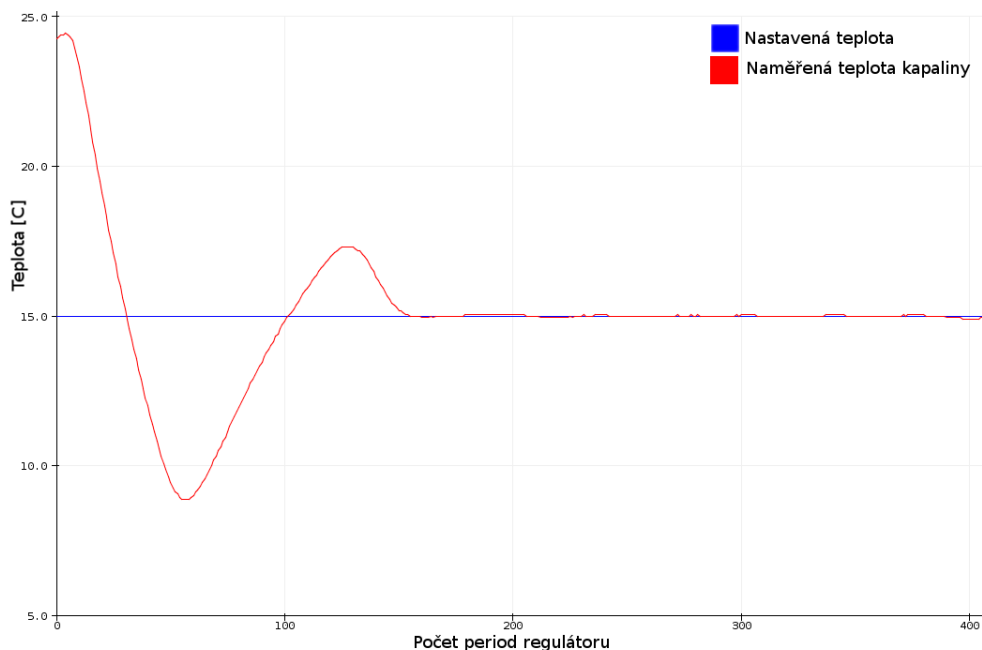
Dále byla otestována reakce regulátoru na změnu nastavené hodnoty. Regulátor se nejdříve nechal ustálit na 10 °C a následně se změnila nastavená hodnota o 1 °C. Teplota se po této změně ustálila za 4 minuty.

Testování regulátoru ohřevu probíhalo podobným způsobem s tím, že se teplota kapaliny měla zregulovat z pokojové teploty na 36 °C. Ustáleného stavu bylo dosaženo za 11 minut.

Stejně jako u chladicího regulátoru byla otestována také reakce regulátoru na změnu nastavené hodnoty. Při změně teploty z 35 na 36 °C bylo ustáleného stavu dosaženo za 3 minuty.

Při změně zpět na 35 °C trvalo ustálení regulátoru 6 minut. Delší doba ustálení je zapříčiněna dobrou izolací boxu, která prodlužuje samovolné chladnutí kapaliny.

Během testování bylo zjištěno, že oba regulátory mají překmit okolo pěti stupňů. Tento překmit není úplně malý, ale v tomto typu regulované soustavy nevadí.



Obrázek 4.1: Průběh regulace při nastavení chladicího regulátoru na 15 °C.

4.7 Úprava knihovny mBED

Zde je nutné podotknout, že nepřítomnost časových hazardů, které byly v původní implementaci PWM v knihovně obsaženy, není možné testem prokázat. Přesto byl vytvořen testovací program, který v nekonečné smyčce mění střídu periody. Následně byl na osciloskopu sledován průběh PWM a zda nedochází k inverzi. Tato kontrola byla vykonávána po dobu 5 minut, během kterých nedošlo k žádné inverzi.

4.8 Ukázková aplikace

V ukázkové aplikaci byly nejprve vyzkoušeny příkazy, které mají přímý vliv na výkon Peltiérova článku. Každý příkaz byl zadán nejprve bez argumentu, poté s argumentem a následně proběhla úprava nastavení pomocí rotačního enkodéru. Tento test proběhl úspěšně.

Dále byly vyzkoušeny příkazy zobrazující teplotu a nápovědu. Každému příkazu, kterému lze předat argument, byl předán také nevalidní argument. Tyto argumenty byly úspěšně detekovány a byla vypsána patřičná chybová hláška.

Během těchto testů docházelo ke spouštění a vypínání ventilátoru v závislosti na teplotě strany Peltiérova článku u chladiče.

Testy ukázkové aplikace tedy dopadly úspěšně. Ukázková aplikace spojuje dohromady vše, co bylo v této bakalářské práci vytvořeno. Úspěšným otestováním této aplikace byla otestována celková integrace jednotlivých softwarových, elektrických i konstrukčních komponent.

Závěr

Cílem zadání bakalářské práce bylo vytvořit výukový přípravek s Peltiérovým článkem, který bude vhodný jako výuková pomůcka na Fakultě informačních technologií ČVUT v Praze. Práce navazovala na již hotový prototyp přípravku.

V první řadě byla navržena celková konstrukce přípravku, chlazení článku a úpravy v již existujícím prototypu izolačního boxu, který byl vytištěný na 3D tiskárně. Dále byla navržena a vysoustružena nádoba pro uchování kapaliny uvnitř přípravku, jejíž správná funkčnost v rozvodu tepla byla ověřena.

Dále byly vybrány tři druhy teplotních senzorů s ohledem na praktičnost a poučení budoucích studentů, které byly umístěny na již navrženou konstrukci.

Pro správnou funkčnost celého přípravku byly vybrány součástky, navrženo schéma a plošný spoj, který řeší zapojení Peltiérova článku, funkčnost teplotních čidel a ovládání pomocí sériového rozhraní RS232 a rotačního kvadrurního enkodéru. Funkčnost plošného spoje byla pečlivě ověřena.

V poslední řadě bylo navrženo a vytvořeno softwarové vybavení pro mikrokontrolér nRF51822 s architekturou ARM na platformě mBED. Toto vybavení obsahuje softwarovou implementaci sběrnice 1 Wire, knihovny pro čtení dat ze tří různých druhů teplotních senzorů, ovladač pro kvadrurní enkodér, regulátor ohřevu i chlazení stabilizující teplotu kapaliny uvnitř přípravku, knihovny pro celkové ovládání a ukázkovou aplikaci spojující vše dohromady. Správná funkčnost jednotlivých komponent, ale i jejich integrace v ukázkové aplikaci byla odzkoušena.

V poslední řadě bylo provedeno měření odchylek teplotních senzorů proti lihovému a bezkontaktnímu teploměru a odzkoušena jejich funkčnost pro kontrolu a řízení teploty na přípravku.

Spojením všeho výše popsaného byl vytvořen výukový přípravek jako celek a ověřena jeho funkčnost. Přípravek zmrazil a ohřál uvnitř umístěnou kapalinu.

V budoucnu by bylo možné využít volných pinů na desce plošných spojů pro rozšíření o další senzory. Další prostor pro rozšíření tkví v zabudovaném Bluetooth modulu v mikrokontroléru pro vzdálené ovládání přípravku.

Literatura

- [1] Mikyška, L.: *Termoelektrické články*. Malá elektrotechnická knihovna, Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
- [2] Golab, F.; Kamenčák, F.: *Termoelektrické jevy a jejich užití*. Pomocné knihy pro žáky (Státní pedagogické nakladatelství), Státní pedagogické nakladatelství, 1975.
- [3] P and N Technology (Xiamen) Co.,Ltd.: *Thermoelectric Cooler Performance Specifications [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.601-040.1.pdf>
- [4] Gromov, G.: Thermoelectric Cooling Modules [online]. *BUSINESS BRIEFING: GLOBAL PHOTONICS APPLICATIONS AND TECHNOLOGY*, 2001: s. 1–8, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.rmtltd.ru/docs/technology/publications/Thermoelectric_Cooling_Modules.pdf
- [5] Mejzlík, M.: *Návrh a tvorba laboratorní úlohy s Peltierovým článkem*. Diplomová práce, Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2009, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=15693
- [6] RMT, Ltd.: *Application Tips: DC OR PWM [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.rmtltd.ru/technology/tips/dc_or_pwm.php
- [7] RMT, Ltd.: *Application Tips: RIPPLES [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.rmtltd.ru/technology/tips/ripples.php>
- [8] Hyniová, K.: *Základy řízení systémů: přednášky*. České vysoké učení technické, 2012, ISBN 9788001050651.
- [9] Švarc, I.; Šeda, M.; Vítečková, M.: *Automatické řízení*. Akademické nakladatelství CERM, 2007, ISBN 9788021434912.

- [10] *PID Control [online]*. 2003, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://web.stanford.edu/class/archive/ee/ee392m/ee392m.1034/Lecture4_PID.pdf
- [11] Láník, Vladimír: *MicroLan - A jde to i s jedním vodičem! [online]*. 2009, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://vyvoj.hw.cz/navrh-obvodu/rozhrani/microlan-a-jde-to-i-s-jednim-vodicem.html>
- [12] Maxim Integrated Products, Inc.: *Application Note 1796: Overview of 1-Wire Technology and Its Use [online]*. 2015, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/1796>
- [13] Maxim Integrated Products, Inc.: *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer [online]*. 2015, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [14] Maxim Integrated Products, Inc.: *Application Note 187: 1-Wire Search Algorithm [online]*. 2002, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/187>
- [15] Nordic Semiconductor: *nRF51 Series Reference Manual (Version 3.0) [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.nordicsemi.com/eng/content/download/13233/212988/file/nRF51_Series_Reference_manual%20v3.0.pdf
- [16] ARM Ltd. : *What is mbed? [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.mbed.com/en/about-mbed/what-mbed/>
- [17] Autodesk: *EAGLE [online]*. 2017, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.autodesk.com/products/eagle/features/all>
- [18] OpenSCAD: *About OpenSCAD [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.openscad.org/about.html>
- [19] ARCTIC, GmbH.: *Alpine M1 [online]*. 2015, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: https://www.arctic.ac/eu_en/downloads/dl/file/id/1454/alpine_m1_spec_sheet_english.pdf
- [20] Kreidl, M.: *Měření teploty - senzory a měřicí obvody*. Senzory neelektrických veličin, BEN - technická literatura, 2005, ISBN 8073001454.
- [21] Maxim Integrated Products, Inc.: *DS18S20 High-Precision 1-Wire Digital Thermometer [online]*. 2008, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18S20.pdf>
- [22] CYNTEC CO., LTD.: *Specification of Pt Thermal Sensor [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.530-109.1.pdf>

-
- [23] Maxim Integrated Products, Inc.: *Application Note 2031: DC-DC Converter Tutorial [online]*. 2001, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/2031>
- [24] Maxim Integrated Products, Inc.: *Application Note 2031: DC-DC Converter Tutorial [online]*. 2001, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/2031>
- [25] ON Semiconductor: *Understanding the Noise Issue Out of Inductor Based DC-DC Converter [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8172-D.PDF>
- [26] Texas Instruments Incorporated: *Closed-Loop Temperature Regulation Using the UC3638 H-Bridge Motor Controller and a Thermoelectric Cooler [online]*. 2001, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/an/slva202a/slva202a.pdf>
- [27] Analog Devices, Inc.: *Chapter 6: Diode applications (Power supplies, voltage regulators and limiters) [online]*. 2014, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://wiki.analog.com/university/courses/electronics/text/chapter-6>
- [28] Bezděk, M.: *Elektronika: [učebnice]*. Kopp, třetí vydání, 2008, ISBN 9788072323654.
- [29] Maxim Integrated Products, I.: *Application Note 723: Selecting and Using RS-232, RS-422, and RS-485 Serial Data Standards [online]*. 2000, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/723>
- [30] Maxim Integrated Products, Inc.: *MAX3222/MAX3232/MAX3237/MAX3241* [online]*. 2007, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX3222-MAX3241.pdf>
- [31] Maxim Integrated Products, Inc.: *Application Note 3450: Positive Analog Feedback Compensates PT100 Transducer [online]*. 2001, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/app-notes/index.mvp/id/3450>
- [32] STMicroelectronics: *TS912: Rail-to-rail CMOS dual operational amplifier [online]*. 2007, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/data/attachments/dsh.926-018.1.pdf>
- [33] National Semiconductor Corporation: *Op Amp Circuit Collection [online]*. 2002, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.ti.com/ww/en/bobpease/assets/AN-31.pdf>

- [34] NXP Semiconductors: *LM75A Digital temperature sensor and thermal watchdog [online]*. 2007, [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/LM75A.pdf
- [35] Pecinovský, R.: *Návrhové vzory: [33 vzorových postupů pro objektové programování]*. Computer Press, 2007, ISBN 9788025115824.
- [36] Nordic Semiconductor: *mbed-os:pwmout_api.c [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: https://github.com/ARMmbed/mbed-os/blob/master/targets/TARGET_NORDIC/TARGET_MCU_NRF51822/pwmout_api.c
- [37] Thermocouple Instruments Limited: *PT100 Resistance Table [online]*. [cit. 2017-04-01]. Dostupné z: <http://www.micropik.com/PDF/pt100.pdf>

Seznam použitých zkratk

- A/D** Analogově digitální převodník
- ABS** Akrylonitrilbutadienstyren
- API** Application programming interface
- ČVUT** České vysoké učení technické v Praze
- DIP** Dual in-line package
- DPS** Deska plošných spojů
- EEPROM** Electrically erasable programmable read-only memory
- FIT** Fakulta informačních technologií
- I²C** Inter-integrated circuit
- PC** Personal computer
- PID** Proporcionálně - integračně - derivační
- PPI** Programmable peripheral interconnect
- PSD** Propocionálně - sumačně - diferenční
- PWM** Pulse width modulation
- ROM** Read-only memory
- RPM** Revolutions per minute
- SCL** Serial clock line
- SDA** Serial data line
- SMBus** System management bus

A. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

SMD Surface-mount device

STL Stereolithography

TEC Thermo electric cooler

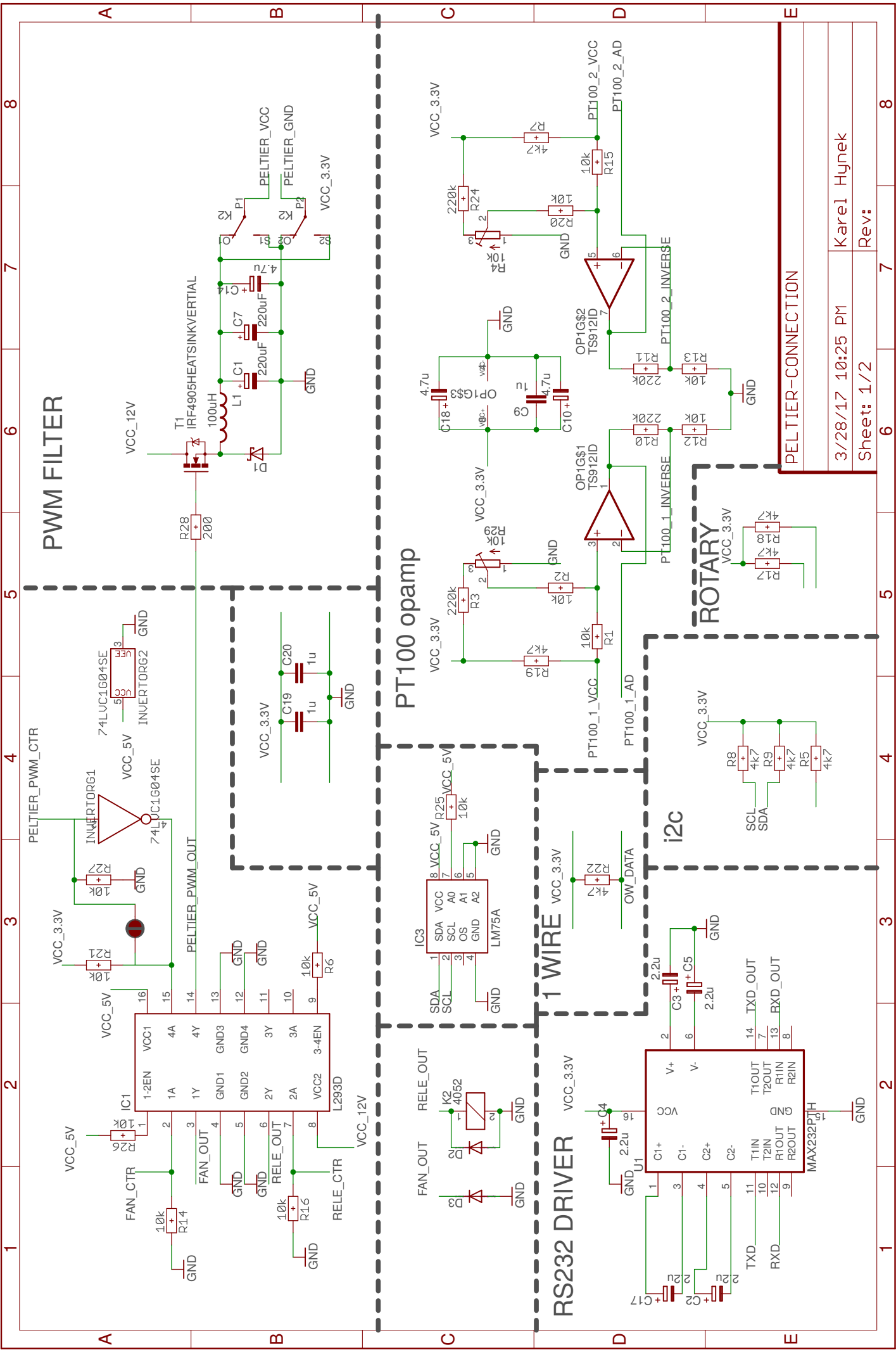
TTL Transistor-transistor-logic

UART Universal asynchronous receiver/transmitter

Obsah přiloženého CD

readme.txt.....	stručný popis obsahu CD
build	
├─ stl.....	vygenerované STL soubory pro výrobu plastových dílů
├─ gerber.....	vygenerované GERBER soubory pro výrobu DPS
└─ hex.....	adresář s přeloženým ukázkovým programem
src	
├─ eagle.....	projekt EAGLE (schéma a plošný spoj)
├─ peltier	
│ └─ peltier.zip	zdrojové kódy ukázkové aplikace s knihovnami
├─ openscad.....	zdrojové kódy pro OpenScad (plastové díly)
├─ edux..	zdrojové kódy pro stránku v systému pro podporu výuky Edux
└─ thesis	zdrojová forma práce ve formátu $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$
doc	
├─ peltier.....	dokumentace ukázkového programu v Doxygen (html)
└─ api.....	dokumentace API pro studenty programu v Doxygen (html)
text	text práce
└─ thesis.pdf	text práce ve formátu PDF

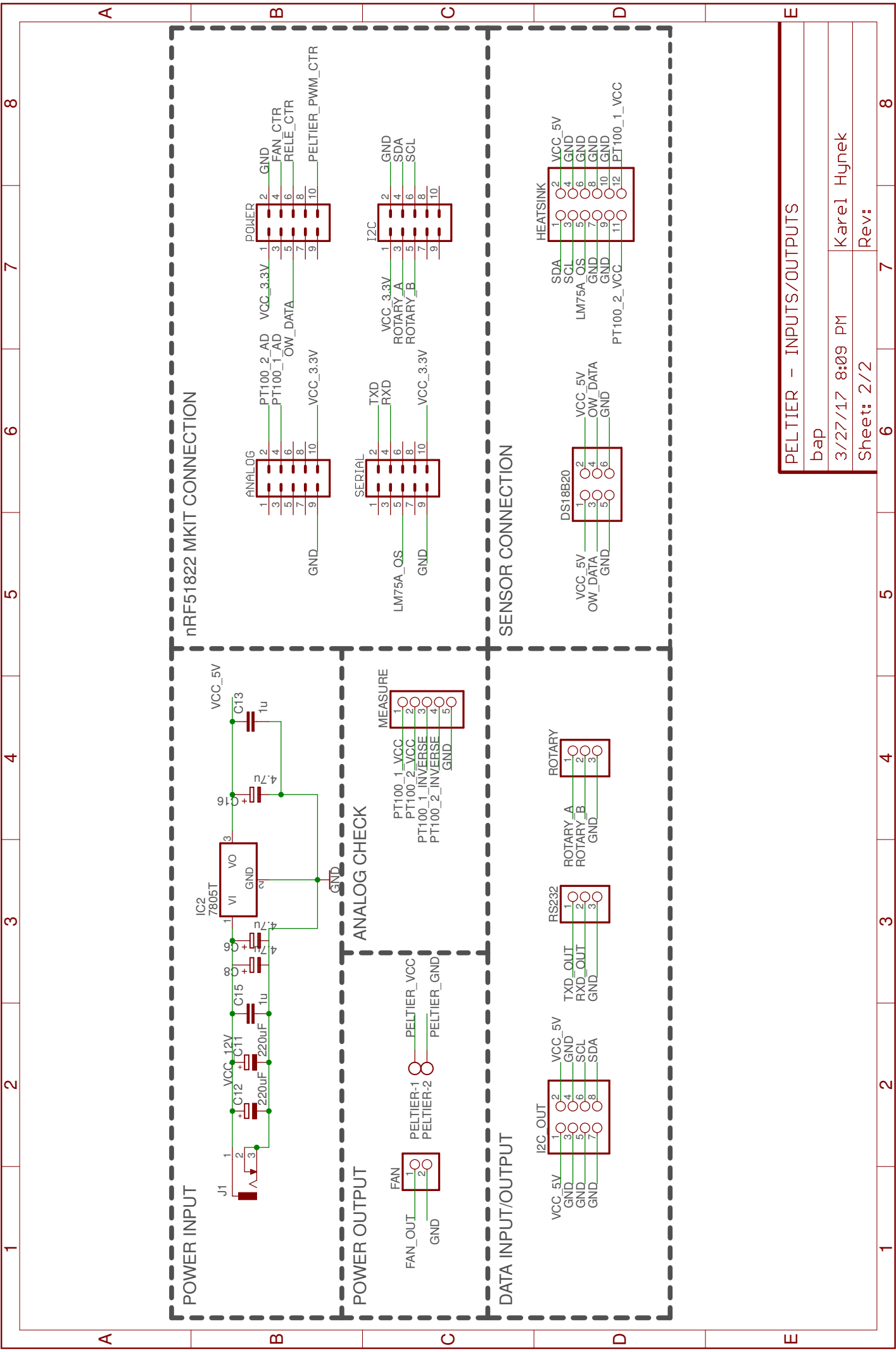
Seznam součástí a schéma zapojení



PELTIER-CONNECTION

3/28/17 10:25 PM Karel Hlynek

Sheet: 1/2



PELTIER - INPUTS/OUTPUTS							
bap							
3/27/17 8:09 PM				Karel Hlynek			
Sheet: 2/2				Rev:			

1 2 3 4 5 6 7 8

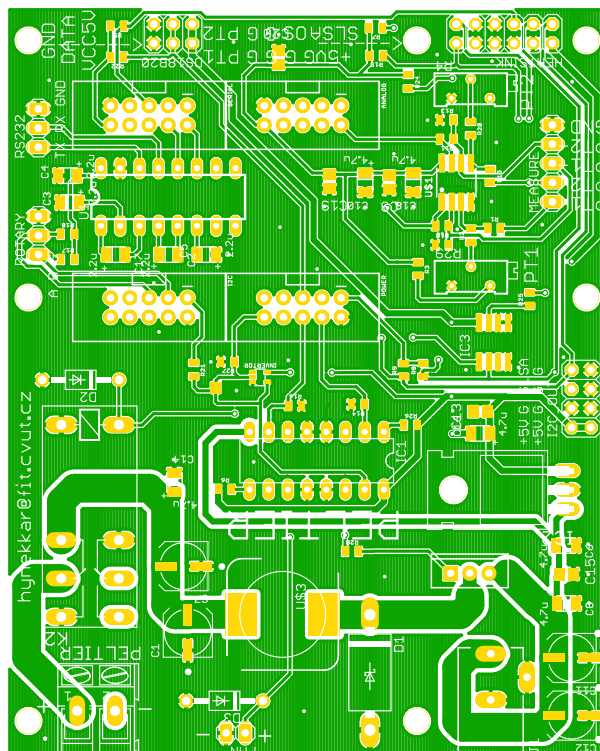
1 2 3 4 5 6 7 8

C. SEZNAM SOUČÁSTEK A SCHÉMA ZAPOJENÍ

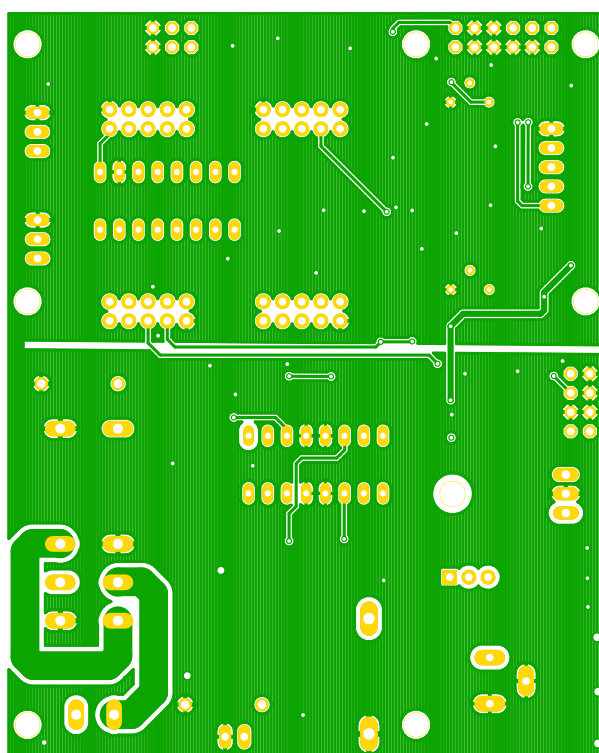
Tabulka C.1: Seznam použitých součástek

Jméno	Hodnota	Pouzdro	Katalogové jméno
C1, C7, C12, C11	220 μF	C8	EZV221M16RC8
C6, C8, C10, C14, C16, C18	4,7 μF	A	TAJA475K016RNJ
C9, C15, C13, C19, C20	1 μF	A	CC0805KKX5R8BB105
C2, C3, C4, C5, C17	2,2 μF	0805	TAJA225K016RNJ
R5, R8, R9, R17, R18, R22, R19, R7,	4k7 Ω	0805	
R3, R24, R10, R11	220k Ω	0805	
R12, R11, R1, R15, R2, R20, R25, R14, R26, R21, R27, R6, R17	10k Ω	0805	
R29, R4	10k Ω	64Z	M64Z103KB40
InvertorG1		SOT 553	74LVC1G04
T1		TO220	IRF4905PBF
OP1		SO8	TS912
MAX3232PTH		DIP16	MAX3232CPE
L293D		DIP16	L293D
K2			TNA2C1205L
L1		D	CoilCraft inductor 104
D1		DO201	SB5100
D2, D3		DO41	SB160
IC2		TO220	LM7805

Maska plošného spoje

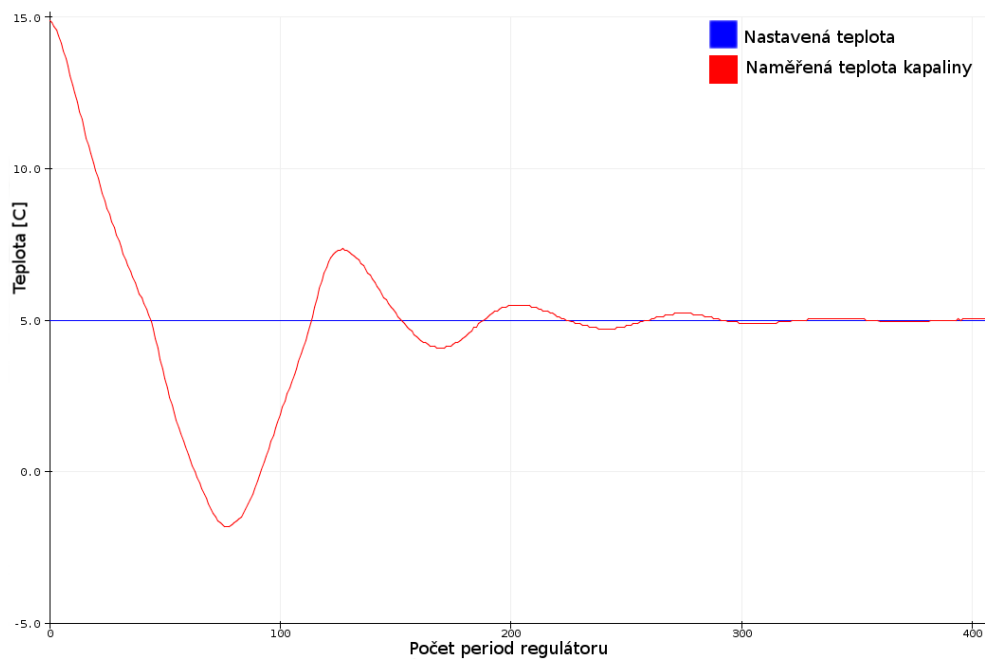


Obrázek D.1: Maska plošného spoje - pohled ze strany součástek



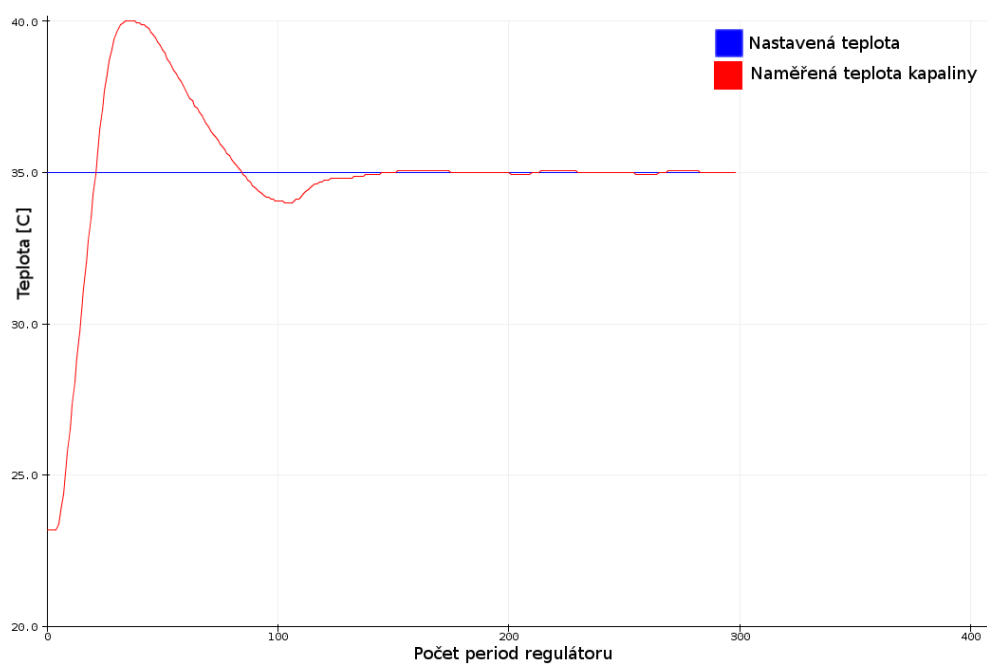
Obrázek D.2: Maska plošného spoje - pohled ze strany spojů

Grafy průběhu regulace

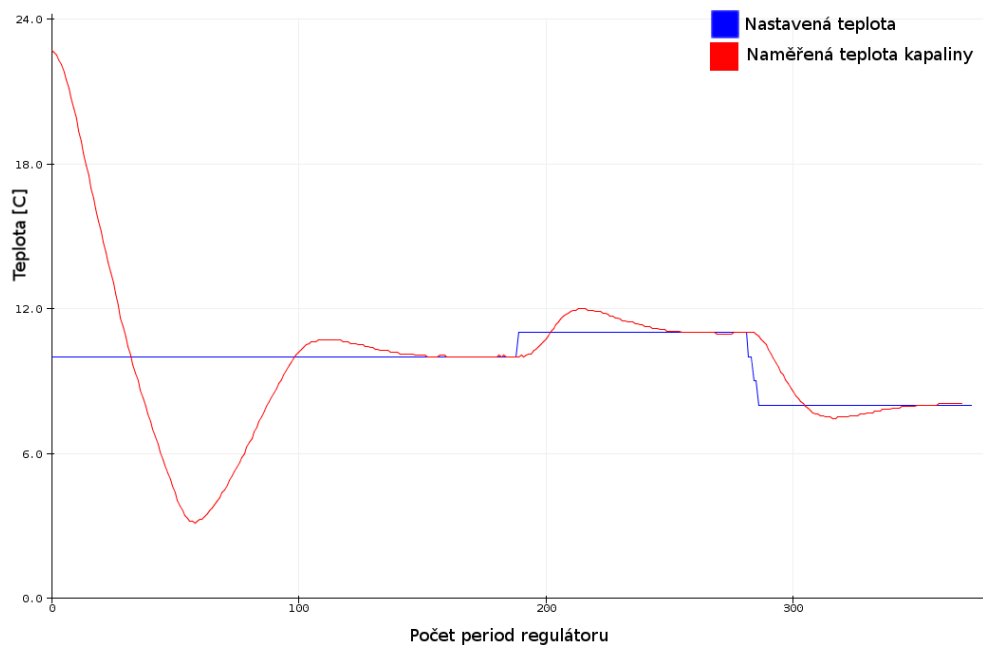


Obrázek E.1: Průběh regulace při nastavení chladícího regulátoru na 5 °C.

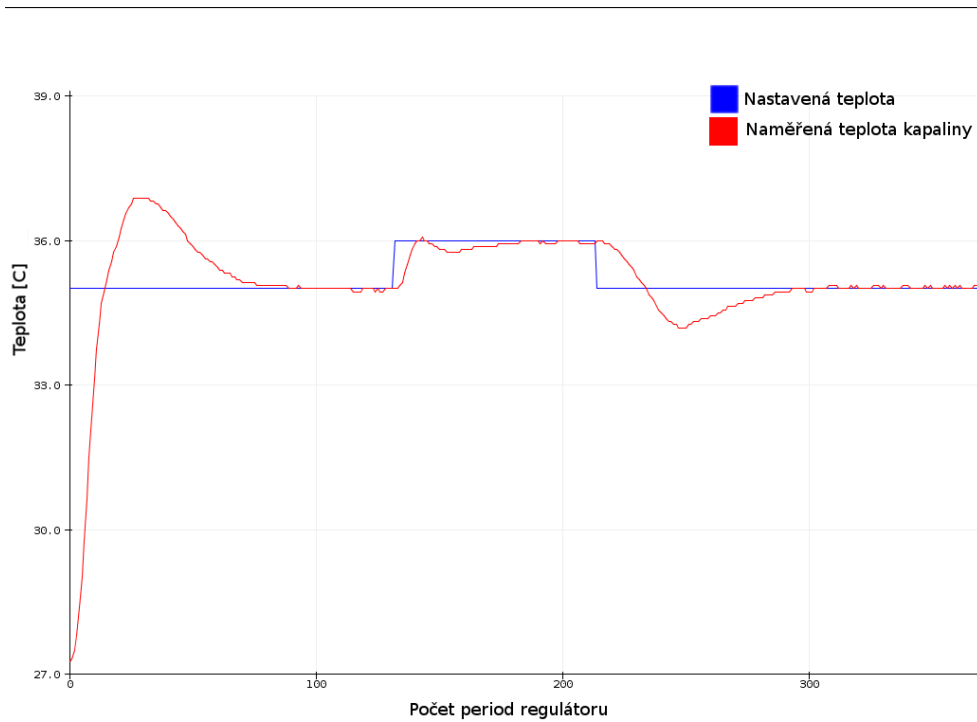
E. GRAFY PRŮBĚHU REGULACE



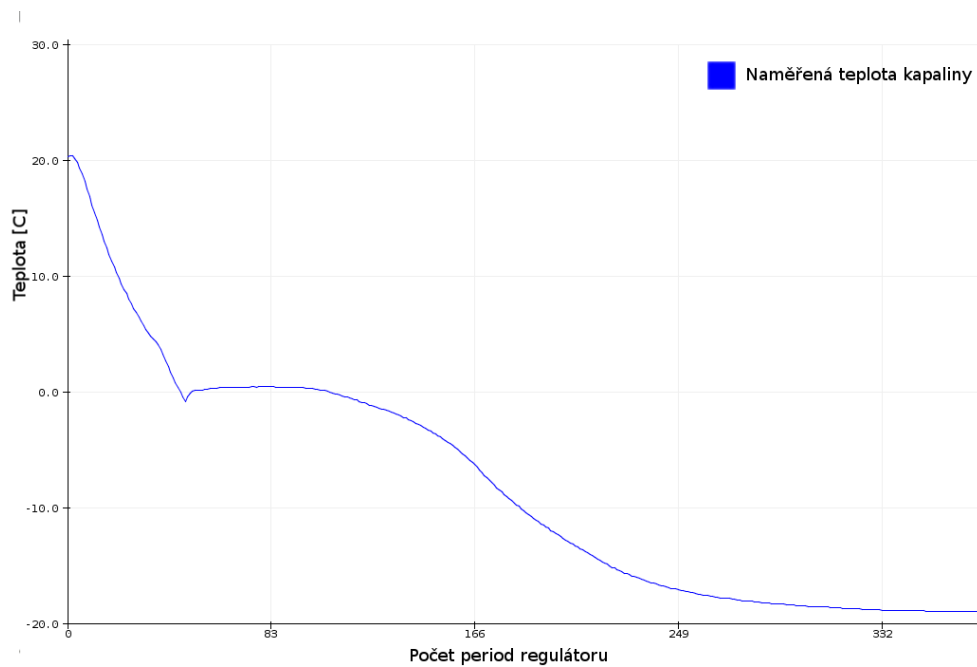
Obrázek E.2: Průběh regulace při nastavení regulátoru ohřevu na 35 °C.



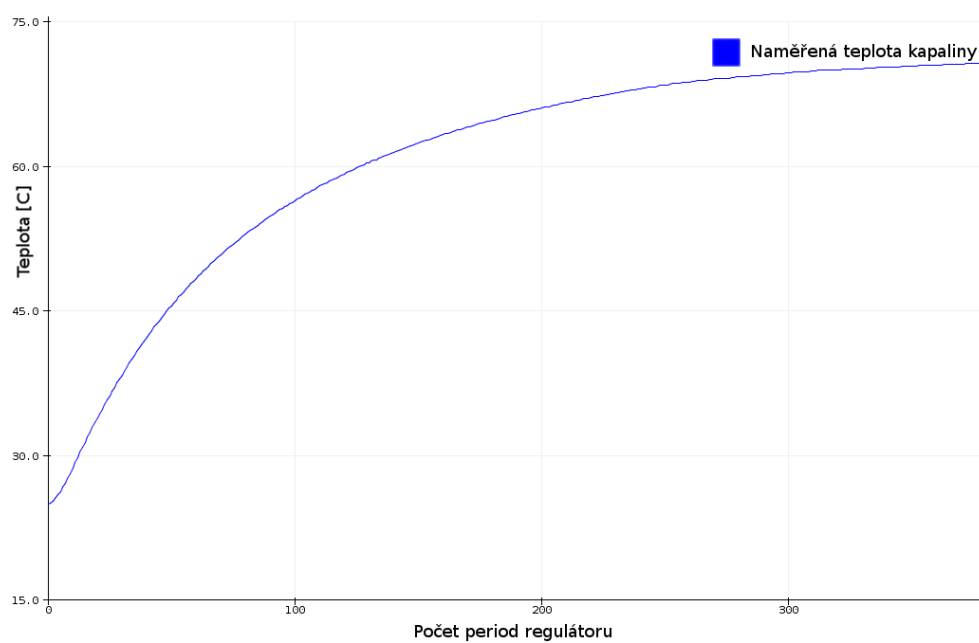
Obrázek E.3: Průběh reakce chladícího regulátoru na změnu nastavené teploty.



Obrázek E.4: Průběh reakce regulátoru ohřevu na změnu nastavené teploty.



Obrázek E.5: Průběh poklesu teploty při maximálním chladícím výkonu.



Obrázek E.6: Průběh nárůstu teploty při 40% topném výkonu.

Překlad projektu v mBED

Překlad je možné provést online pomocí vývojového nástroje mBED, ale také offline s překladačem GNU-ARM. Tento návod se však bude věnovat překladu pomocí online kompilátoru mBED, protože není třeba jiného programu než webového prohlížeče.

Vývojové prostředí je dostupné na adrese <https://developer.mbed.org/>. Pro jeho použití je potřeba si vytvořit účet.

Nejprve je potřeba nainportovat existující projekt do vývojového prostředí. To se provede poklepnutím na tlačítko *Import* v levém horním rohu. Dále v záložce *Upload* vyberte cestu k .zip souboru s projektem, který je přiložen na CD. Klepněte na tlačítko *Import* a zadejte název programu, který se zobrazí ve vývojovém prostředí. Následně začne prostředí importovat projekt.

Fáze importování projektu obsahuje chybu. Prostor mBED i po dokončeném a úspěšném importu programu stále informuje uživatele o probíhající nahrávání. Pokud ani po 3 minutách prostředí nezahlásí úspěšný import, je třeba znovu načíst stránku a importovaný program by se měl zobrazit v záložce *My Programs*. Během vývoje bakalářské práce trval import přibližně půl minuty v závislosti na rychlosti připojení.

Finální překlad se zahájí pomocí tlačítka *Compile*. Po zkompileování nabídne prostředí výsledný .hex soubor ke stažení.

Dokumentace přípravku pro studenty

G.1 Zařízení 1 Wire

Tabulka G.1: Zapojení 1 Wire

Pin	Funkce	Poznámka
P0_29 (IN/OUT)	Data	Žádné zařízení není napájené z datového vodiče.

Tabulka G.2: 1 Wire zařízení

Adresa	Zařízení	Specifikace	Umístění
0x28, 0xee, 0x63, 0x73, 0x1f, 0x16, 0x02, 0xb4	DS18B20	[13]	Peltiérův článek, uvnitř boxu
0x28, 0xFF, 0x15, 0xe6, 0x64, 0x15, 0x03, 0x6c	DS18B20	[13]	Uvnitř kapaliny

G.2 Zařízení na sběrnici I²C

Tabulka G.3: Zapojení I²C

Pin	Funkce
P0_22 (IN/OUT)	SDA
P0_20 (IN/OUT)	SCL
P0_12 (IN)	Teplotní hlídač LM75A umístěný na chladiči.

Tabulka G.4: Zařízení na sběrnici I²C

Adresa	Zařízení	Specifikace	Umístění
0x48	LM75A	[34]	Chladič
0x49	LM75A	[34]	DPS - IC3

G.3 Analogová zařízení

Tabulka G.5: Zapojení Analogových zařízení

Pin	Zařízení	Specifikace	Umístění
P0_1 (ANALOG IN)	PT100	[22]	Peltiérův článek, vně boxu
P0_3 (ANALOG IN)	PT100	[22]	Chladič

Tabulka G.6: Hodnoty nutné k výpočtu elektrického odporu teplotního senzoru.

Vstupní napětí	2.9 V
Hodnota měřicího rezistoru	4600 Ω
Zesílení operačního zesilovače	23×

Výpočet napětí na teplotním senzoru U_{PT} provedeme následujícím vztahem:

$$U_{PT} = \frac{V_{ADC} \cdot U_{VCC}}{A} \quad (\text{G.1})$$

kde je V_{ADC} surová hodnota z A/D převodníku mezi 0 a 1,
 U_{VCC} vstupní napětí[V],
 A hodnota zesílení.

Výpočet elektrického odporu teplotního senzoru R_T vypočítáme:

$$R_T = \frac{U_{PT} \cdot R_M}{U_{VCC} - U_{PT}} \quad (\text{G.2})$$

kde je U_{PT} napětí na teplotním senzoru [V],
 R_M elektrický odpor měřicího rezistoru [Ω],
 U_{VCC} vstupní napětí [V],
 U_{PT} napětí na teplotním senzoru [V].

G.4 Ovládací prvky

Tabulka G.7: Zapojení ovládacích prvků

Pin	Funkce	
P0_9 (OUT)	TX	Sériové rozhraní RS232
P0_11 (IN)	RX	
P0_21 (IN)	Kanál A	Kvadraturní dekodér
P0_23 (IN)	Kanál B	

G.5 Řízení Peltiéroveho článku

Tabulka G.8: Zapojení řízení Peltiéroveho článku

Pin	Funkce	Ovládání	
P0_24 (OUT)	Ovládání výkonu článku pomocí PWM	Žádný výkon	0
		Maximální výkon	1
P0_29 (OUT)	Přepínání polarity proudu	Chlazení	0
		Ohřev	1
P0_30 (OUT)	Ovládání ventilátoru	Vypnuto	0
		Zapnuto	1