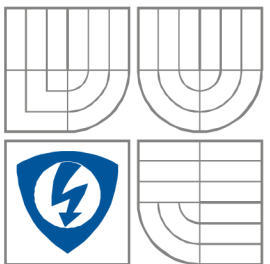




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Kontrolér termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru

Thermoelectric cooler controller for infrared detector

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Jan Vorálek

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jan Vorálek

ID: 155261

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Kontrolér termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Seznamte se s principy termoelektrických chladičů a zaměřte se na požadavky jejich napájení. Seznamte se možnostmi zpětnovazební regulace teploty chladičů. Navrhněte uspořádání kontroléru termoelektrického chladiče, který umožňuje nastavení teploty, její stabilizaci a zobrazení její hodnoty na displeji.

Navrhněte celkové obvodové řešení kontroléru a příslušné desky plošných spojů. Kontrolér realizujte, oživte a ověřte jeho funkci.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] FUKÁTKO, J., FUKÁTKO, T. Teplo a chlazení v elektronice 2. Praha: BEN – technická literatura, 2006.

[2] WILLIAMS, J., DOBKIN, R. Analog Circuit Design - A Tutorial Guide to Applications and Solutions. New York: Elsevier, 2011.

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 28.5.2015

Vedoucí práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

Konzultanti bakalářské práce:

doc. Ing. Tomáš Kratochvíl, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Práce se zabývá návrhem kontroléru termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru. Je zde popsán princip termoelektrických chladičů a požadavky na jejich napájení. Dále jsou popsány možnosti zpětnovazební regulace s důrazem na PID regulátor a jeho diskretní verzi (PSD regulátor). Následuje návrh samotného kontroléru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Termoelektrický chladič, termoelektrický jev, PID regulátor, PSD regulátor, Atmel AVR

ABSTRACT

This thesis deals with design of thermoelectric cooler controller. It contains a description of thermoelectric coolers – their principle and requirements on power supply. It also contains feedback control theory with focus on PID and discrete PID (PSD) control. The end of the thesis presents design of the controller.

KEYWORDS

Thermoelectric cooler, thermoelectric effect, PID controller, PSD controller, Atmel AVR

VORÁLEK, J. *Kontrolér termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru.*
Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních
technologií, Ústav radioelektroniky, 2015. 26 s., 6 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí
práce: doc. Ing. Petr Drexler, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Kontrolér termoelektrického chladiče infračerveného fotodetektoru jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval doc. Ing. Petru Drexlerovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

Úvod	1
1 Rozbor zadání	2
2 Teoretický popis hlavních částí systému	3
2.1 Termoelektrický chladič	3
2.1.1 Seebeckův jev	3
2.1.2 Peltierův jev	4
2.1.3 Konstrukce Termoelektrických chladičů	5
2.1.4 Napájení termoelektrických chladičů	6
2.2 Termistor.....	7
2.2.1 PTC termistor.....	7
2.2.2 NTC termistor	7
3 Zpěťnovazební regulace	9
3.1 PID regulátor.....	10
3.2 PSD regulátor.....	11
3.3 Nastavení regulátoru	12
4 Návrh systému	13
4.1 Obvodové řešení	15
4.2 Program mikrokontroléru	17
4.3 Mechanická konstrukce	18
4.4 Popis ovládání.....	19
4.5 Oživení a nastavení.....	20
4.6 Dosažené výsledky	21
5 Závěr	24
Literatura	25

Seznam příloh	27
A Charakteristiky použitého termistoru	28
A.1 Teplotní závislost odporu použitého termistoru	28
A.2 Graf teplotní závislosti odporu použitého termistoru	28
B Kontrolér termoelektrického chladiče	29
B.1 Schéma kontroléru	29
B.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	30
B.3 Deska plošného spoje – osazovací plán – top (strana součástek)	30
B.4 Seznam součástek	31

ÚVOD

Termoelektrické chladiče nacházejí uplatnění v mnoha oblastech techniky, kde je třeba chlazení s přesnou regulací teploty. Jednou z této oblastí je optika, kde se používají především k chlazení laserů a fotodetektorů. Práce se zabývá návrhem kontroléru termoelektrického chladiče pro chlazení infračerveného fotodetektoru.

V první kapitole je rozbor zadání – popis použitého fotodetektoru a požadavky na navrhované zařízení.

Druhá kapitola popisuje fyzikální princip termoelektrických chladičů, jejich konstrukci a požadavky na napájení. Dále je zde teoreticky popsán termistor – součástka, která je použita k měření teploty.

V třetí kapitole jsou představeny možnosti zpětnovazební regulace teploty. Je zde vysvětlena základní teorie zpětnovazební regulace a popsány nejpoužívanější regulátory - PID regulátor a jeho diskretní verze PSD regulátor.

Čtvrtá kapitola představuje samotný návrh kontroléru. Je tu popsána funkce zařízení, mechanická konstrukce, ovládání, nastavení a dosažené parametry.

1 ROZBOR ZADÁNÍ

Cílem práce je navrhnout kontrolér termoelektrického chladiče pro infračervený fotodetektor Newport 70203. Tento detektor obsahuje optický snímač Newport 70324 na bázi selenidu olovnatého. Snímač má aktivní plochu 1x3mm a umožňuje snímat záření o vlnové délce 1 až 5 μm . Součástí fotodetektoru je napájecí zdroj 100V pro snímač a střídavý zesilovač s šířkou pásma 8kHz a nastavitelným zesílením ve třech krocích. Optický snímač je chlazen dvoustupňovým termoelektrickým chladičem. Tento chladič je obvykle schopen dosáhnout teploty o 50°C nižší než teplota okolí, přičemž minimální dosažitelná teplota je -30°C. Maximální dovolený proud termoelektrickým chladičem je 1,3A, maximální dovolené napětí na chladiči je 0,8V. Teplota je snímána termistorem s negativním teplotním koeficientem, závislost odporu na teplotě je v příloze A. Fotodetektor pro svou činnost vyžaduje napájecí napětí $\pm 15\text{V}$ a +5V, tato napětí má poskytovat navržený kontrolér. Fyzické provedení fotodetektoru je na obr. 1.1. Navrhovaný kontrolér má umožnit nastavení teploty, její stabilizaci a zobrazení její hodnoty na displeji.



Obr 1.1 Provedení fotodetektoru Newport 70203

2 TEORETICKÝ POPIS HLAVNÍCH ČÁSTÍ SYSTÉMU

2.1 Termoelektrický chladič

Termoelektrický chladič je elektronická součástka využívající Peltierova jevu k chlazení. Při průchodu proudu termoelektrickým chladičem dohází k tepelnému toku z jedné strany článku na druhou, velikost tohoto toku je v ideálním případě přímo úměrná procházejícímu proudu. Termoelektrický chladič se zároveň při různé teplotě stran chová jako zdroj napětí vlivem Seebeckova jevu[1].

Hlavními výhodami termoelektrických chladičů jsou[2]:

- absence pohyblivých částí,
- vysoká spolehlivost a dlouhá životnost,
- malé rozměry a hmotnost,
- možnost chlazení i ohřevu,
- možnost dosažení nižší teploty než je teplota okolí,
- možnost velmi přesné regulace teploty.

2.1.1 Seebeckův jev

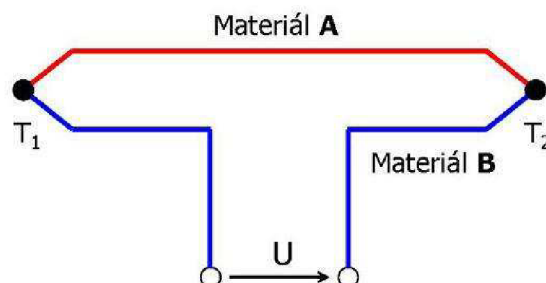
Spojením vodičů z dvou různých materiálů podle obr. 2 vznikne termočlánek, mezi jehož svorkami bude termoelektrické napětí přímo úměrné rozdílu teplot spojů T_1 a T_2 . Pro velikost tohoto napětí platí[1]:

$$U = \alpha_{AB}(T_2 - T_1), \quad (1)$$

kde α_{AB} je tzv. Seebeckův koeficient pro danou dvojici materiálů, T_1 a T_2 jsou teploty spojů vodičů. Seebeckův koeficient pro dvojici materiálů je roven[1]:

$$\alpha_{AB} = \alpha_A - \alpha_B, \quad (2)$$

kde α_A a α_B jsou Seebeckovy koeficienty pro jednotlivé materiály.



Obr 2.1 Principiální zapojení termočlánku, převzato a upraveno z [3]

Výsledné termoelektrické napětí termočlánku je součtem termoelektrických napětí vznikajících v jednotlivých vodičích v důsledku teplotního gradientu. Pokud je na

vodiči teplotní gradient, dochází k difuzi nosičů náboje ve směru, nebo proti směru (podle materiálu) tohoto gradientu a v části vodiče tak dochází k hromadění elektrického náboje. Tento děj probíhá tak dlouho, až vznikající elektrické pole brání další difuzi. V důsledku existence tohoto elektrického pole je mezi libovolnými dvěma místy vodiče rozdíl napětí přímo úměrný rozdílu teplot v těchto místech[4]. Seebeckův koeficient je definován jako změna tohoto napětí vůči změně teploty[4]:

$$\alpha = \frac{dU}{dT}. \quad (3)$$

Podle konvence je hodnota α kladná, pokud vzniklé termoelektrické napětí směřuje od chladnějšího místa k teplejšímu[4]. Polovodiče typu N mají Seebeckův koeficient záporný[5], polovodiče typu P kladný[4],[5]. U kovů o znaménku Seebeckova koeficientu rozhoduje především teplotní závislost střední volné dráhy elektronů[4]. U kovů, u kterých střední volná dráha elektronů s teplotou výrazně roste, dochází k difuzi volných elektronů z teplých částí do studených a hodnota α je záporná. U kovů, u nichž střední volná dráha elektronů s teplotou výrazně klesá, dochází k difuzi elektronů ze studených částí do teplých a hodnota α je kladná.

Vznik termoelektrického napětí tedy není podmíněn stykem dvou různých vodičů, ale pouze teplotním gradientem ve vodičích [6]. Použití dvou různých materiálů je ale jediný způsob jak tento jev zjistit [4]. Termoelektrické napětí tedy vzniká i na jediném vodiči, ale není měřitelné voltmetrem s přívodními vodiči ze stejného materiálu. V důsledku teplotního rozdílu mezi konci měřeného vodiče a voltmetrem by na přívodních vodičích voltmetru vznikla termoelektrická napětí opačného směru. Součet všech napětí by byl nulový [4].

2.1.2 Peltierův jev

Peltierův jev spočívá v uvolňování nebo pohlcování tepla na styku dvou vodičů z různých materiálů, kterými prochází elektrický proud. Vzniká v důsledku změny entropie nosičů náboje při průchodu přechodem [6]. Zda dochází k uvolňování nebo pohlcování tepla závisí na směru procházejícího elektrického proudu. Množství tohoto tepla je přímo úměrné velikosti proudu a platí pro něj[1]:

$$Q = \Pi_{AB} I t \quad (4)$$

kde Π_{AB} je Peltierův koeficient pro danou dvojici materiálů (tzv. relativní Peltierův koeficient[6]), I je elektrický proud a t je doba průchodu proudu. Peltierův koeficient Π_{AB} je roven [1]:

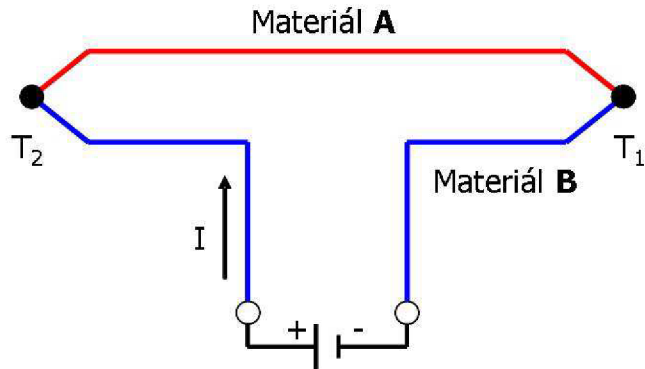
$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B, \quad (5)$$

kde Π_A a Π_B jsou Peltierovy koeficienty jednotlivých materiálů (tzv. absolutní Peltierovy koeficienty[6]). Peltierův jev souvisí se Seebeckovým jevem a pro relativní Peltierův koeficient platí[1]:

$$\Pi_{AB} = \alpha_{AB} T, \quad (6)$$

kde α_{AB} je Seebeckův koeficient dané dvojice materiálů a T je absolutní teplota spoje.

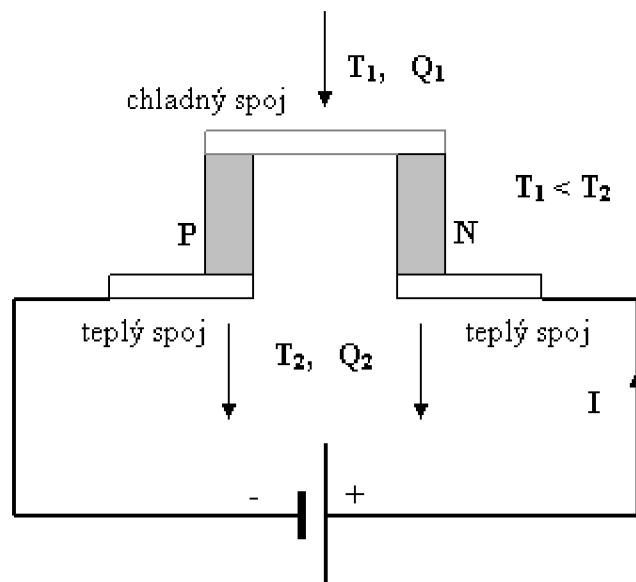
Jev je obvykle demonstrován na obvodu podle obr. 2.2, který je tvořen spojením vodičů z dvou různých materiálů tak, že tvoří dva přechody. Při průchodu proudu se jeden přechod zahřívá a druhý ochlazuje.



Obr 2.2 Principiální zapojení termočlánku, převzato z [3]

2.1.3 Konstrukce Termoelektrických chladičů

Základním prvkem termoelektrického chladiče je termoelektrický článek tvořený dvěma tělísky z různých materiálů. Tělíska jsou na jednom konci propojena vodivým můstkem, k druhým koncům se vodivými můstky přivádí elektrický proud [1]. Provedení takového článku je na obr. 2.3.



Obrázek 2.3 Konstrukce termoelektrického článku, převzato z [7]

Materiály pro výrobu tělísek by měly mít co největší Seebeckův koeficient a elektrickou vodivost a co nejmenší tepelnou vodivost. Vysoká vodivost omezuje ohřev Joulovým

teplem, malá tepelná vodivost omezuje nežádoucí přenos tepla z teplé strany článku na studenou. Tyto fyzikální vlastnosti jsou zahrnuty v tzv. koeficientu efektivnosti Z , pro který platí[5]:

$$Z = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{\lambda} \quad (7)$$

kde α je Seebeckův koeficient, σ je měrná elektrická vodivost a λ je součinitel tepelné vodivosti.

Jako materiál tělísek se pro vysoký koeficient efektivnosti používají především polovodiče s tzv. tetradimitovou krystalickou strukturou (sloučeniny $A_2^V B_3^{VI}$, kde $A = \text{Bi, Sb}$ a $B = \text{Se, Te}$)[6]. Tělíska jsou tvořena polovodiči rozdílných vodivostí. Nejpoužívanějším materiálem pro chladicí články je Bi_2Te_3 [6]

Kovy jako materiál tělísek nejsou vhodné, protože mají malou hodnotu Seebeckova koeficientu a konstantní poměr mezi elektrickou a tepelnou vodivostí (Franzův-Wiedemannův zákon). Elektrickou a tepelnou vodivost tak nelze měnit nezávisle na sobě[8].

Výsledný termoelektrický chladič je tvořen velkým množstvím těchto článků umístěných mezi dvěma keramickými destičkami, které zajišťují mechanickou pevnost celku. Články jsou elektricky propojeny do série a orientovány tak, aby jejich tepelný tok směřoval stejným směrem[9].

Několik termoelektrických chladičů může být umístěno na sobě, výsledný chladič se označuje jako vícestupňový. Vícestupňové chladiče umožňují dosáhnout většího rozdílu teplot.

2.1.4 Napájení termoelektrických chladičů

Množství tepla, které chladič odebere za jednotku času je přímo úměrné proudu (jak vyplývá ze vztahu (7)) a ideální je tedy napájení zdrojem konstantního proudu. Volt-ampérová charakteristika termoelektrického chladiče je však přibližně lineární a je tedy možné k napájení použít i zdroj napětí [10]. Pokud ale nemají obě strany chladiče stejnou teplotu, vzniká na něm vlivem Seebeckova jevu termoelektrické napětí, které se efektivně odečítá od napájecího napětí. Výsledný proud je tedy menší, než by vyplývalo z Ohmova zákona a závisí na rozdílu teplot stran chladiče [10]. Maximální účinnosti chladič obvykle dosahuje pro proud a napětí v rozmezí jedné až dvou třetin maximálních dovolených hodnot [11].

Pro napájení lze použít PWM (pulzně šířkovou) regulaci, odebrané množství tepla vlivem Peltierova jevu odpovídá střední hodnotě proudu. PWM signál má ale větší efektivní hodnotu proudu než ekvivalentní stejnosměrný proud, a ohmické ztráty jsou tak větší. Chladič při použití PWM regulace pracuje vždy s nižší účinností, než při použití stejnosměrného zdroje se stejnou střední hodnotou proudu [12],[13].

Termoelektrické chladiče se nedoporučuje periodicky spínat s periodou srovnatelnou s tepelnými konstantami chladiče, protože dochází k tzv. tepelnému cyklování – chladič se periodicky ohřívá a ochlazuje. Různé části chladiče mají rozdílné koeficienty teplotní roztažnosti a vlivem změn teploty jsou mechanicky namáhány. To vede k výraznému snížení životnosti chladiče [14],[15]. Pro PWM regulaci se doporučuje frekvence spínání minimálně 1kHz [14].

2.2 Termistor

Termistory jsou polovodičové součástky vykazující elektrický odpor s velkou závislostí na teplotě. Dělí se na termistory se záporným teplotním součinitelem odporu (NTC termistor, negistor) a termistory s kladným teplotním součinitelem odporu (PTC termistor, pozistor). Teplotní součinitel odporu je definován vztahem:

$$\alpha = \frac{100}{R} \cdot \frac{dR}{dT} \quad (8)$$

kde R je odpor a T je teplota.

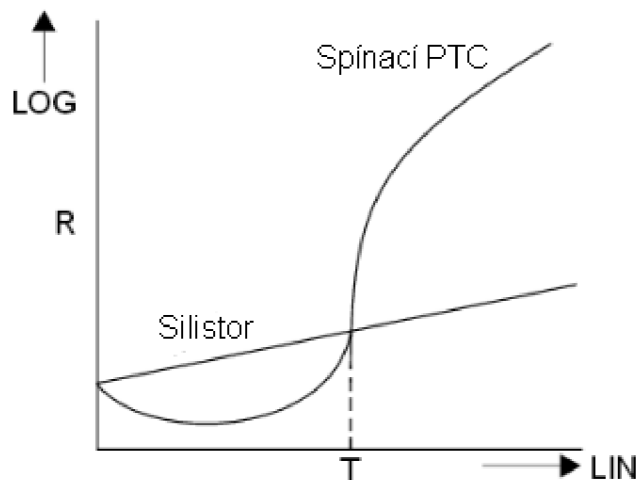
2.2.1 PTC termistor

U PTC termistorů odpor s teplotou roste. PTC termistory se dělí do dvou kategorií – silistory a spínací PTC termistory [16].

Silistory mají v celém pracovním rozsahu lineární závislost odporu na teplotě [16], odpor roste se strmostí přibližně $+0.77\% / ^\circ\text{C}$ [17]. Používají se především pro teplotní kompenzaci polovodičových součástek [17].

Spínací PTC termistory mají závislost odporu na teplotě silně nelineární, odpor s teplotou nejdříve mírně klesá a po dosažení určité teploty prudce vzroste [17]. Používají se např. v obvodech pro samoregulační topení, nadproudové ochrany, zdroje proudu a zpoždovací obvody, kde se využívá ohřevu termistoru proudem který jím prochází [18].

Graf závislosti odporu obou typů PTC termistorů je zobrazen na obr. 2.4.



Obrázek 2.4 Teplotní závislost odporu silistoru a spínacího PTC, převzato a upraveno z [17]

2.2.2 NTC termistor

U termistorů NTC odpor s teplotou exponenciálně klesá. Pro závislost odporu na teplotě

platí[19]:

$$R = R_0 * e^{\beta \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (9)$$

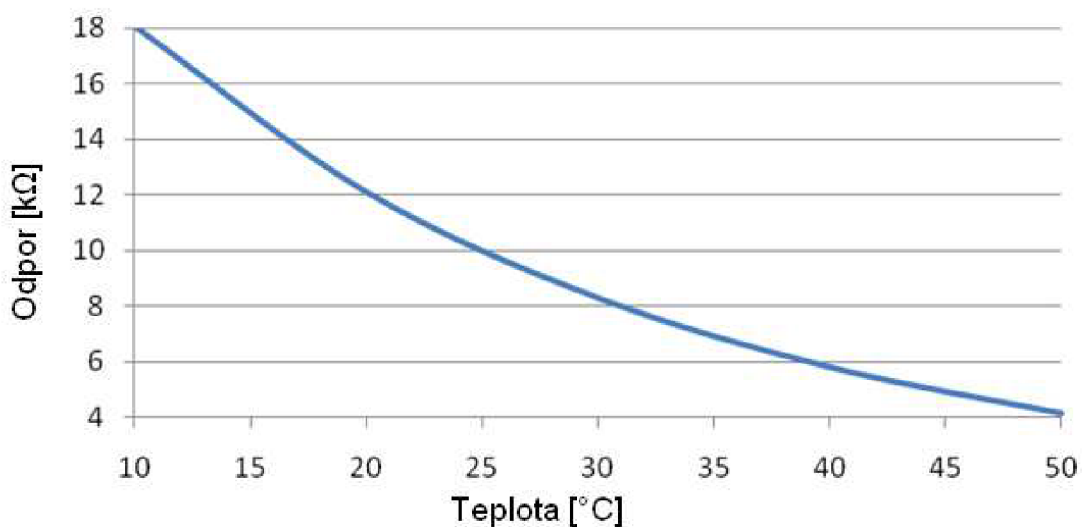
kde R_0 je odpor při referenční teplotě T_0 , T je absolutní teplota a β je tzv. termistorová konstanta. Příklad teplotní závislosti odporu je na obr. 2.5. Termistorovou konstantu β je možné určit z hodnot odporu při dvou různých teplotách podle vztahu [20]:

$$\beta = \frac{\ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right)}{\left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)}, \quad (10)$$

kde R_1 je odpor termistoru při teplotě T_1 , R_2 je odpor termistoru při teplotě T_2 . Obvykle se volí $T_1=25^\circ\text{C}$ a $T_2=85^\circ\text{C}$. Pro činitel odporu α platí přibližný vztah[21]:

$$\alpha = \frac{\beta}{T^2}. \quad (11)$$

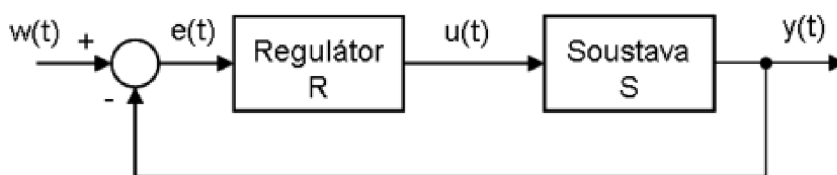
Termistory NTC se používají především pro měření teploty, teplotní kompenzaci elektronických obvodů a omezení proudového nárazu při zapnutí spínaných zdrojů [20].



Obrázek 2.5 Příklad teplotní závislosti odporu pro NTC termistor s $R_0=10\text{k}\Omega$ při $T_0=25^\circ\text{C}$, převzato a upraveno z [22]

3 ZPĚTNOVAZEBNÍ REGULACE

Cílem práce je navrhnout zařízení, které bude stabilizovat teplotu fotodetektoru pomocí zpětnovazební regulace. Zpětnovazební regulace je proces, jehož cílem je dosažení co nejmenšího rozdílu mezi skutečnou a požadovanou hodnotou výstupní veličiny regulované soustavy. Regulace se uskutečňuje pomocí tzv. regulátoru. Regulátor a regulovaná soustava spolu tvoří regulační obvod, jehož struktura je zobrazena na obr. 3.1. V regulačním obvodu je použita zpětná vazba – informace o skutečné hodnotě výstupní veličiny je zavedena na vstup regulátoru.



Obrázek 3.1 Regulační obvod, převzato z [23]

Vstupní veličina $w(t)$ (požadovaná hodnota) se spolu s výstupní veličinou $y(t)$ přivádí do rozdílového uzlu, jehož výstupem je regulační odchylka $e(t)$, pro kterou platí [24]:

$$e(t) = w(t) - y(t). \quad (12)$$

Na základě regulační odchylky regulátor generuje akční (řídící) veličinu $u(t)$, kterou je řízena regulovaná soustava.

Kvalitu regulace lze zhodnotit podle těchto kritérií [25]:

- Trvalá regulační odchylka – rozdíl mezi skutečnou a požadovanou hodnotou výstupní veličiny, pokud je vstupní veličina konstantní
- Doba regulace – doba, za jakou se výstupní veličina ustálí v určité toleranci (obvykle 1 – 5%) požadované hodnoty při jednotkové skokové změně vstupní veličiny
- Relativní překmit, při jednotkové skokové změně vstupní veličiny

Často používaným regulátorem je tzv. PID (proporcionálně integračně derivační regulátor).

3.1 PID regulátor

PID regulátor je tvořen proporcionální, integrační a derivační složkou. Hodnota výsledné akční veličiny regulátoru je součtem příspěvků jednotlivých složek. Blokové schéma PID regulátoru je na obr. 3.2.

Akční veličina proporcionální složky je přímo úměrná regulační odchylce a lze ji popsat vztahem [25]:

$$u_p(t) = r_0 e(t), \quad (13)$$

kde r_0 je váha proporcionální složky. Proporcionální složka regulátoru zrychluje odezvu na skokovou změnu regulační odchylky, příliš vysoká hodnota r_0 však způsobí velké překmitý až nestabilitu obvodu [26].

Akční veličina integrační složky je přímo úměrná integrálu regulační odchylky, platí pro ni [25]:

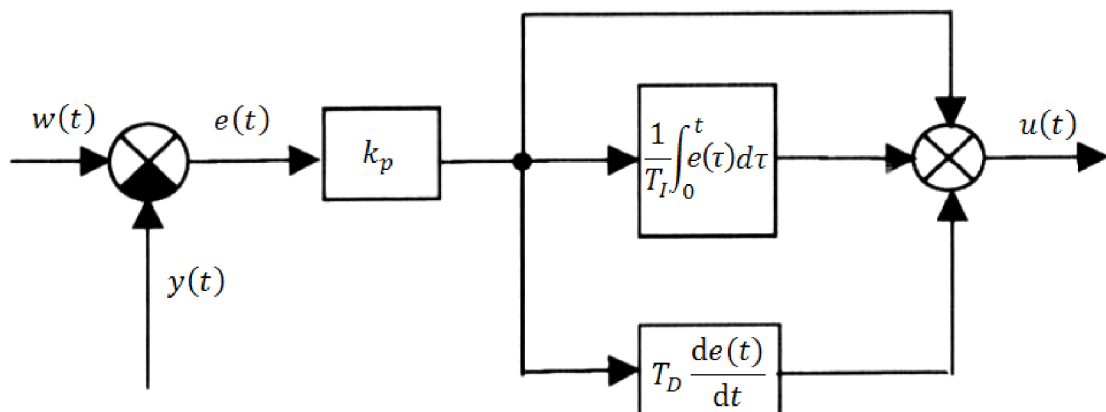
$$u_I(t) = r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau, \quad (14)$$

kde r_{-1} je váha integrační složky regulátoru. Integrační složka je nezbytná pro dosažení nulové regulační odchylky v ustáleném stavu [25],[27]. Velká hodnota r_{-1} zvyšuje překmitý a zhoršuje stabilitu [27].

Pro akční veličinu derivační složky regulátoru platí [25]:

$$u_D(t) = r_1 \frac{de(t)}{dt}, \quad (15)$$

kde r_1 je váha derivační složky regulátoru. Derivační složka při vhodné volbě r_1 zlepšuje odezvu na rychlou změnu regulační odchylky (snižuje překmit a dobu ustálení) a zvyšuje stabilitu regulačního obvodu [27]. Derivační složka regulátoru se často nepoužívá, regulátor tvořený pouze proporcionální a integrační složkou se označuje jako PI regulátor.



Obrázek 3.2 Blokové schéma PID regulátoru, převzato a upraveno z [25]

Sloučením vztahů (13) až (15) vznikne výsledný vztah popisující PID regulátor v časové oblasti [25]:

$$u(t) = r_0 e(t) + r_{-1} \int_0^t e(\tau) d\tau + r_1 \frac{de(t)}{dt}, \quad (16)$$

kde r_0 , r_{-1} , r_1 jsou váhy proporcionální, integrační a derivační složky regulátoru. Vztah lze upravit do tvaru [25], [24]:

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_D \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (17)$$

kde k_p je zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta regulátoru a T_D je derivační časová konstanta regulátoru. Mezi koeficienty ve vztazích (16) a (17) platí převodní vztahy [25]:

$$r_0 = k_p, \quad r_{-1} = \frac{k_p}{T_I}, \quad r_1 = k_p T_D. \quad (18)$$

Ze vztahu (17) lze použitím Laplaceovy transformace získat vztah pro obrazový přenos PID regulátoru [25]:

$$G_r(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = r_0 + \frac{r_{-1}}{s} + r_1 s = k_p \left(1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s \right) \quad (19)$$

3.2 PSD regulátor

PSD regulátor je diskretní analogií PID regulátoru. Používá se při realizaci regulátoru pomocí číslicového systému, např. mikrokontroléru. Veličiny regulátoru nejsou v čase spojité, ale mění se pouze v diskretních okamžicích, pro které platí:

$$t = kT, \quad (20)$$

kde $k = (0, 1, 2, \dots)$ a T je perioda vzorkování. Vztah (17) lze dosazením ze vztahu (20) upravit do tvaru [24]:

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{T_I} I(kT) + k_p T_D D(kT), \quad (21)$$

kde $e(t)$ je regulační odchylka, k_p je zesílení regulátoru, T_I je integrační časová konstanta, T_D je derivační časová konstanta regulátoru, $I(kT)$ je integrál regulační odchylky v čase kT a $D(kT)$ je derivace regulační odchylky v čase kT .

Spojité integrál se většinou nahrazuje numerickým výpočtem zpětnou obdélníkovou metodou a pro $I(kT)$ tak platí [24]:

$$I(kT) = \int_0^t e(\tau) d\tau \approx T \sum_{i=1}^k e(iT). \quad (22)$$

Vztah (22) lze upravit do rekurzivní podoby:

$$I(kT) = I[(k - 1)T] + e(kT). \quad (23)$$

Náhradu derivace lze provést tzv. zpětnou diferencí [24]:

$$D(kT) = \frac{e(kT) - e[(k - 1)T]}{T}. \quad (24)$$

Vzorkovací perioda T se obvykle volí podle jednoho ze vztahů [24]:

$$T = \frac{T_1}{10}, \quad (25)$$

$$T = \left(\frac{1}{6} \div \frac{1}{15}\right) T_{95}, \quad (26)$$

kde T_1 je největší časová konstanta regulované soustavy, T_{95} je doba, po které dojde k dosažení 95% ustálené hodnoty na přechodné charakteristice regulované soustavy.

3.3 Nastavení regulátoru

K nastavení koeficientů PID a PI regulátoru existuje mnoho metod, pro svou jednoduchost je často používána Ziegler-Nicholsova metoda [28].

Nejdříve se vyřadí integrační a derivační složka regulátoru a zesílení proporcionální složky K_p se zvyšuje tak dlouho, až dojde k rozkmitání. Tato hodnota K_p se nazývá kritické zesílení, značí se K_{krit} . Perioda kmitů se nazývá kritická perioda, značí se T_{krit} [28].

Konstanty PID regulátoru se pak nastaví na [28]:

$$K_p = 0,6K_{krit}, \quad (27)$$

$$T_I = 0,5T_{krit}, \quad (28)$$

$$T_D = 0,125T_{krit}. \quad (29)$$

Pro konstanty PI regulátoru se volí [28]:

$$K_p = 0,45K_{krit}, \quad (30)$$

$$T_I = 0,85T_{krit}. \quad (31)$$

4 NÁVRH SYSTÉMU

Většina kontrolérů termoelektrických chladičů je řešena jako PID regulátor, který řídí proud chladičem.

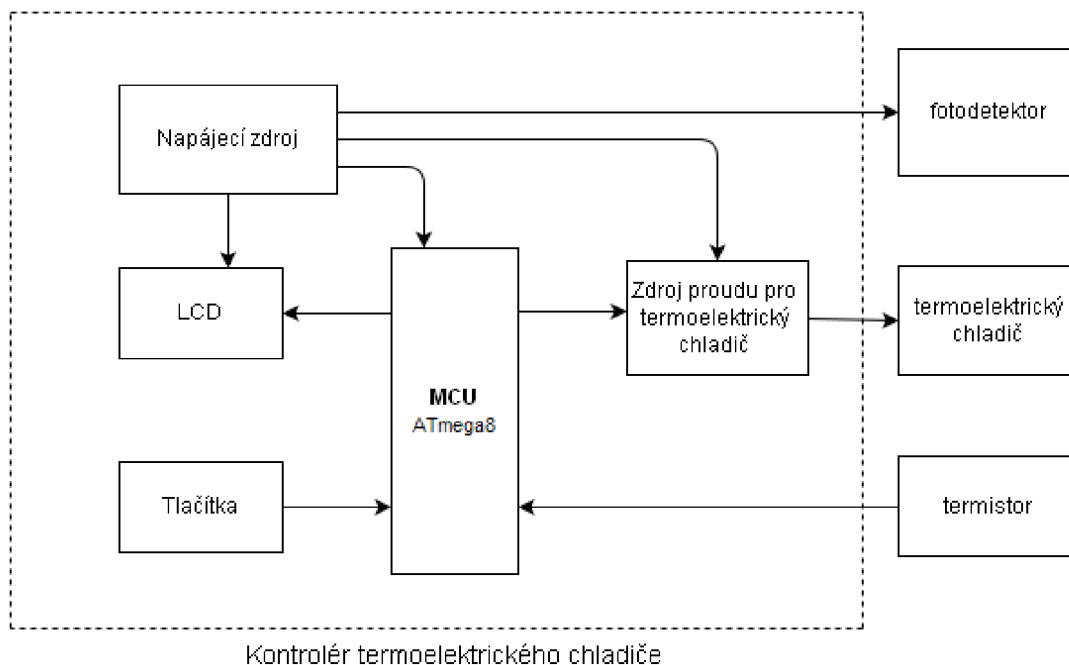
Většinou je použit spínaný zdroj proudu, který topologicky odpovídá dvěma snižujícím synchronně řízeným měničům zapojeným proti sobě. Pro stavbu těchto spínaných zdrojů proudu se vyrábí speciální integrované obvody, např. MAX1968, MAX1969, LTC1923. Tyto obvody jsou poměrně drahé, takto řešený zdroj proudu má však vysokou účinnost.

Některé kontroléry používají PWM regulaci, dosahují ale menší účinnosti (viz. kap. 2.1.4) a mohou způsobovat rušení.

Termoelektrické chladiče se nedoporučuje periodicky spínat a vypínat s nízkou frekvencí (k tomu by docházelo např. při jednoduché regulaci teploty komparátorem s hysterezí), protože se tím výrazně snižuje jejich životnost (viz kap. 2.1.4).

V navrženém zařízení je použit lineární zdroj proudu. Lineární zdroje proudu mají malou účinnost, jsou ale jednodušší, nezpůsobují rušení a pravděpodobně budou spolehlivější.

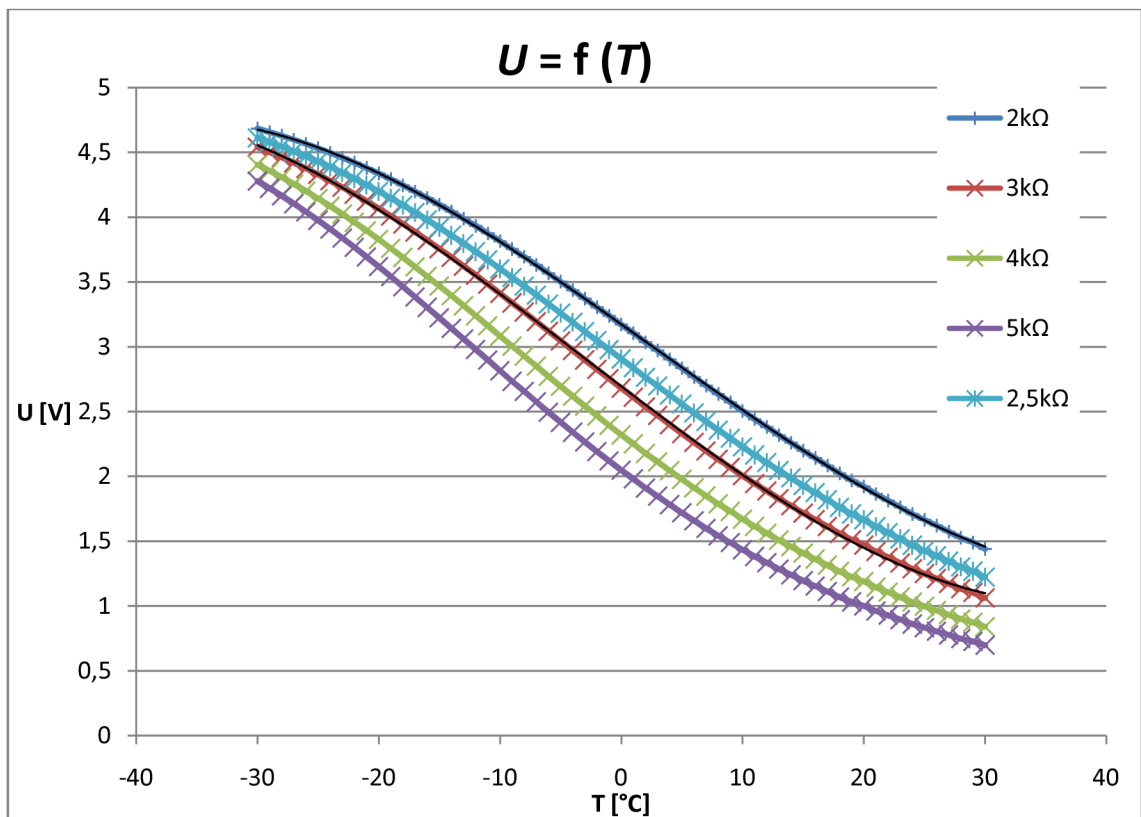
Navržené zařízení používá diskrétní PID regulátor (PSD regulátor) implementovaný v mikrokontroléru. Blokové schéma systému je na obr. 4.1. Hlavním řídicím obvodem je mikrokontrolér Atmel Atmega8. Mikrokontrolér periodicky měří teplotu a srovnává ji s nastavenou hodnotou, rozdíl těchto hodnot (regulační odchylka) je použit jako vstup softwarově řešeného PSD regulátoru. Na základě výstupní hodnoty (akční veličiny) PSD regulátoru je ovládán zdroj proudu pro termoelektrický chladič.



Obrázek 4.1 Blokové schéma kontroléru termoelektrického chladiče

PSD regulátor lze implementovat přímou aplikací vztahů (13), (23) a (24), nebo aplikací diferenční rovnice, kterou lze z těchto vztahů odvodit pomocí Z-transformace. V tomto zařízení byl použit první způsob.

Teplota je měřena prostřednictvím 10-bitového A/D převodníku integrovaného v mikrokontroléru, který měří napětí na termistoru zapojeném v odporovém děliči. Při vhodné volbě rezistoru v děliči lze získat přibližně lineární závislost napětí na teplotě, ačkoliv teplotní závislost odporu samotného termistoru je exponenciální. Teplotní závislost výstupního napětí děliče pro různé hodnoty odporu je zobrazena na obr. 4.2. Hodnota odporu byla zvolena 4,7kΩ.



Obrázek 4.2 Závislost výstupního napětí odporového děliče na teplotě pro různé hodnoty odporu rezistoru, napájecí napětí je 5V

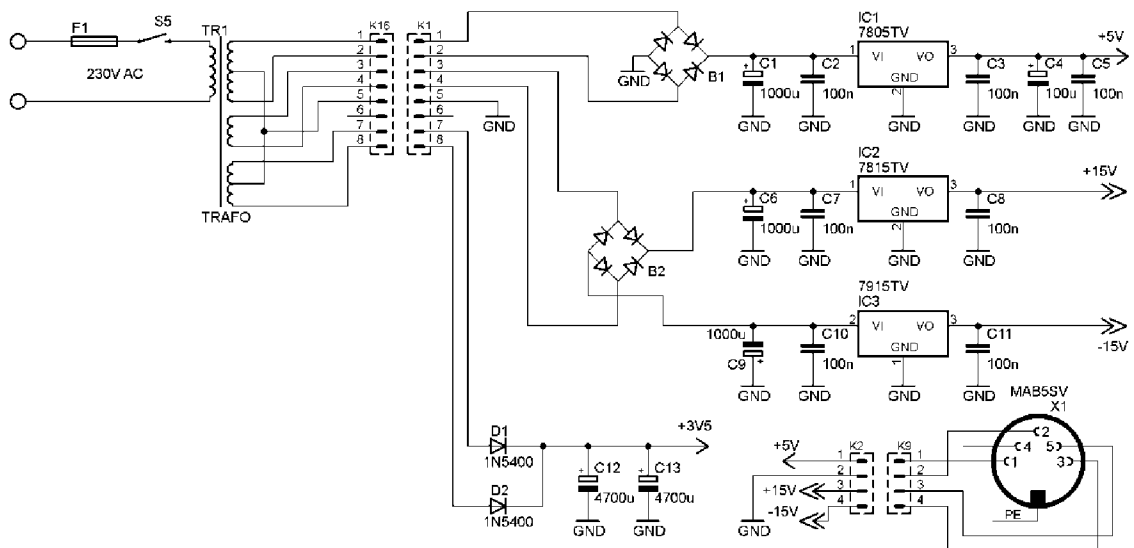
Požadovaná teplota se nastavuje pomocí tlačítek, parametry PSD regulátoru se nastavují prostřednictvím rozhraní RS232. Nastavená i aktuální teplota chladiče je zobrazena na textovém LCD displeji.

4.1 Obvodové řešení

Schéma kontroléru je na obr. 4.4. K napájení kontroléru jsou použita napětí $\pm 15\text{V}$, 5V a přibližně 3V . Napájecí zdroj je tvořen síťovým transformátorem s výstupními napětími $2 \times 15\text{V}$, 7V a $2 \times 3\text{V}$. Výstupní napětí se usměrní a vyhladí filtračními kondenzátory. Stabilizovaná napětí $+15\text{V}$, -15V a $+5\text{V}$ se získají pomocí integrovaných stabilizátorů napětí 7815, 7915 a 7805.

Napětí 3V není stabilizované a je použito k napájení zdroje proudu pro termoelektrický chladič. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti bylo snahou použít co nejnižší napětí, při kterém je ještě zajištěna jeho spolehlivá funkce. Symetrické vinutí s vyvedeným středem umožnilo použít dvoucestný usměrňovač pouze ze dvou diod, který má poloviční úbytek napětí oproti můstkovému usměrňovači.

Napájecí zdroj je kromě napájení samotného kontroléru použit i pro napájení fotodetektoru. Použitý fotodetektor vyžaduje napájecí napětí $\pm 15\text{V}$ a $+5\text{V}$, za tímto účelem jsou tato napětí vyvedena na konektor DIN. Schéma napájecího zdroje je na obr. 4.3.



Obrázek 4.3 Schéma napájecí části zařízení

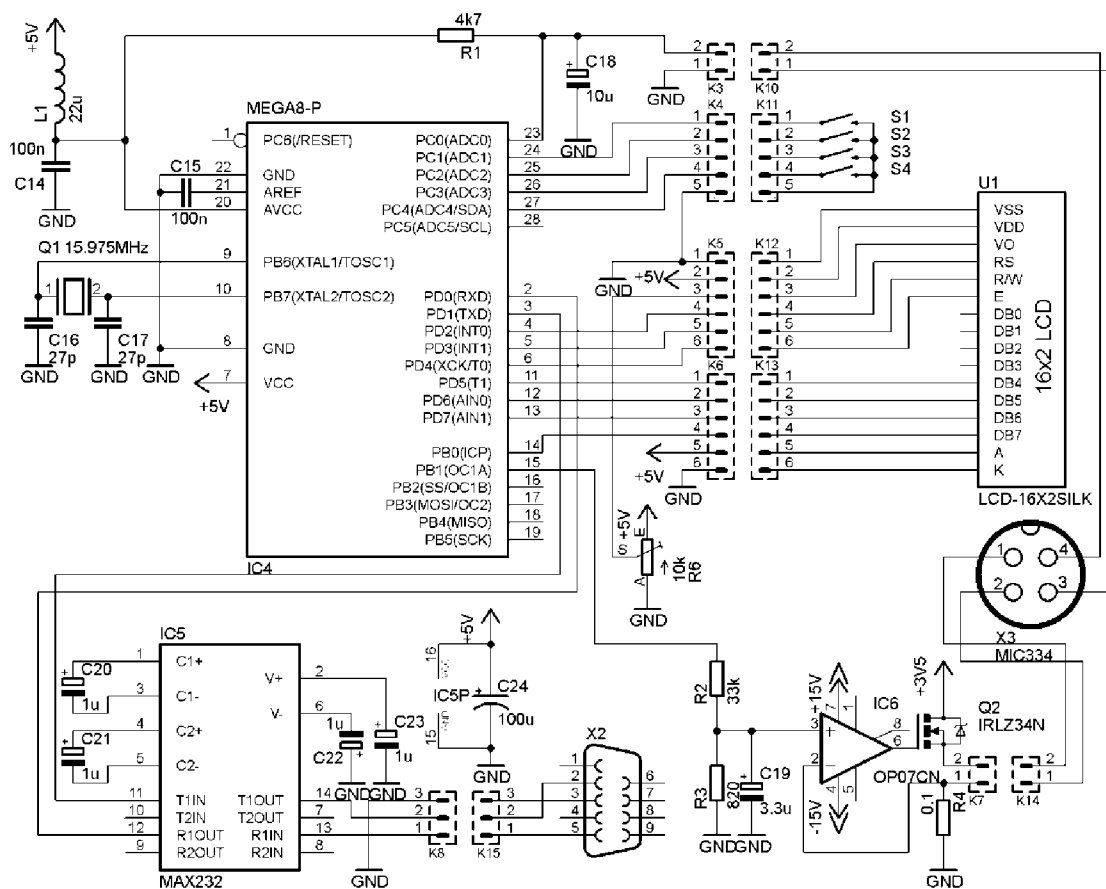
Hlavním obvodem zařízení je mikrokontrolér ATmega8. Mikrokontrolér měří napětí na pinu PC0(ADC0), ke kterému je připojen napěťový dělič tvořený R1 a termistorem. Pro omezení rušení AD převodníku je analogová část mikrokontroléru napájena přes LC filtr tvořený L1 a C14, referenční napětí převodníku dostupné na pinu Aref je blokováno kondenzátorem C15.

Na zbylé piny portu C jsou připojena tlačítka. Stiskem tlačítka se příslušný pin spojí se zemí. Pokud tlačítko není stisknuté, na pinu je vysoká úroveň zajištěna interním pull-up rezistorem. Zákmity jsou ošetřeny programově.

Na piny PD2-7 a PB0 je připojen LCD displej 2x16 znaků s řadičem HD44780. Displej pracuje ve čtyřbitovém režimu, jsou tedy využity pouze horní čtyři bity datové sběrnice. Trimr R6 slouží k nastavení kontrastu displeje.

Mikrokontrolér generuje na pinu PB1 PWM signál o frekvenci přibližně 4kHz. Tento signál je přiveden na dolní propust tvořenou R2, R3 a C19, na výstupu je napětí přímo úměrné střídě. Tímto napětím je řízen zdroj proudu pro termoelektrický chladič, tvořený operačním zesilovačem IC6, rezistorem R4 a tranzistorem Q2.

Piny RXD a TXD jsou využity k sériové komunikaci s počítačem prostřednictvím rozhraní RS232. Obvod IC5 slouží k převodu logických úrovní TTL na RS232 a opačně.



Obrázek 4.4 Schéma kontroléru

4.2 Program mikrokontroléru

Program pro mikrokontrolér byl napsán v jazyku C. V hlavní smyčce programu běží pouze výpis textu na displej, reakce na stisk tlačítek, odesílání dat na UART a zpracování textu přijatého UARTem. Ostatní funkce jsou vykonávány pomocí přerušení.

Pro komunikaci mikrokontroléru s displejem byla použita knihovna, jejímž autorem je Peter Fleury. Tato knihovna je dostupná pod licencí GNU GPL [29].

Čtení stavu tlačítek probíhá v obsluze přetečení čítače/časovače2, algoritmus ošetření zákmitů a funkce automatického opakování vychází z [30]. Kódy stisknutých tlačítek jsou přidávány do kruhové fronty, čtení fronty probíhá v hlavní smyčce programu.

Mikrokontrolér periodicky spouští AD převod, hodnota AD převodníku je přečtena v přerušení vyvolaném po dokončení převodu. Naměřené hodnoty se průměrují po osmi vzorcích – každých osm vzorků se postupně sečte a poté se vydělí osmi pomocí bitového posunu. Tím se omezí dopad případné chyby, vzniklé např. rušením. Tato průměrná hodnota se použije jako index vyhledávací tabulky, ve které jsou uloženy hodnoty teploty odpovídající jednotlivým hodnotám získaným AD převodem. Teploty v tabulce jsou vynásobeny stem a uloženy jako celé číslo (tedy např. 21,5°C je v tabulce uloženo jako 2150). Ve stejném formátu je v příslušné proměnné uložena nastavená teplota. Nastavená a aktuální změřená teplota se předá proceduře PSD regulátoru.

Procedura PSD regulátoru je založena na přímé aplikaci vztahů (13), (23) a (24), implementace vychází z [31]. Z rozdílu nastavené teploty a změřené aktuální teploty se určí regulační odchylka e .

Hodnota proporcionální složky regulátoru se získá vynásobením regulační odchylky e proměnnou pid_kpp , která odpovídá proporcionálnímu zisku regulátoru. Výsledek se omezí na rozsah – 65535 až 65535.

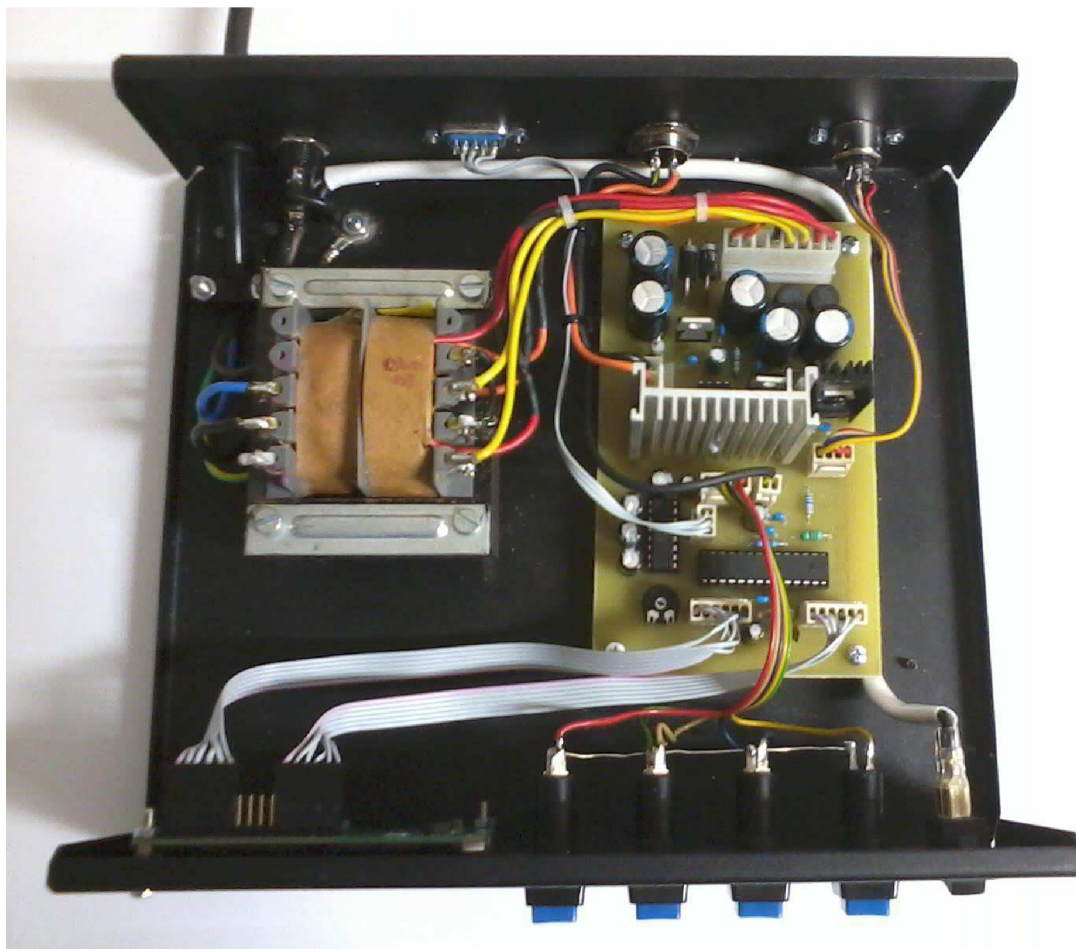
Pro výpočet integrační složky regulátoru se regulační odchylka e vynásobí proměnnou pid_kii , která odpovídá váze integrační složky regulátoru. Výsledek se přičte k předchozím hodnotám (proměnná sum_iterm). Hodnota integrační složky se získá vydělením proměnné sum_iterm pomocí bitového posunu doprava o nastavený počet bitů (uložený v proměnné sum_iterm_sh). Volbou vzájemné kombinace proměnných pid_kii a sum_iterm_sh lze nastavit integrační časovou konstantu regulátoru ve velmi velkém rozsahu. Rozsah proměnné sum_iterm je omezen tak, aby integrační složka regulátoru nabývala hodnot – 65535 až 65535.

Hodnota derivační složky se získá vynásobením rozdílu aktuální a předchozí regulační odchylky proměnnou pid_kdd .

Hodnoty jednotlivých složek regulátoru se poté sečtou a výsledek se omezí na rozsah 0 až 65535. Poté se vydělí šestnácti (bitovým posunem o čtyři bity doprava), čímž se získá hodnota v rozsahu 0 až 4095. Ta se použije pro nastavení střídavy PWM generátoru, který pracuje s dvanáctibitovým rozlišením.

4.3 Mechanická konstrukce

Zařízení bylo zabudováno do kovové přístrojové krabičky o rozměrech 235x70x217mm. Obvod kontroléru byl zhotoven na jednostranné desce plošných spojů o rozměrech 130x80mm, návrh desky je v příloze B. Veškeré ovládací prvky, displej i konektory jsou s deskou propojeny pomocí kabelů. Deska plošných spojů i transformátor jsou ke dnu krabičky připevněny pomocí distančních sloupků. Mechanické provedení kontroléru je zobrazeno na obr. 4.5.



Obrázek 4.5 Mechanické provedení kontroléru termoelektrického chladiče

4.4 Popis ovládání

Kontrolér se ovládá pomocí čtyř tlačítek. Prvním tlačítkem se zvyšuje teplota, druhým se snižuje. Třetím tlačítkem se vybírá číslice, která se mění prvními dvěma tlačítky. Čtvrtým tlačítkem se zapne nebo vypne chlazení.

Parametry kontroléru se nastavují prostřednictvím rozhraní RS232 pomocí libovolného terminálového programu. Terminál je třeba nastavit na datovou rychlost 19200bps, 8 datových bitů, 1 stop bit a žádnou paritu. Odeslaný řetězec musí být zakončen znakem ‘\r’, ‘\n’, ‘\0’ nebo ‘;’.

Kontrolér podporuje tyto příkazy:

- $kpp=n$, $kii=n$, $kdd=n$ – nastavení příslušného parametru PSD regulátoru; n je celé číslo v rozsahu -32768 až 32767
- $ish=n$ – nastavení proměnné sum_iterm_sh (viz kap. 4.2); n je celé číslo v rozsahu 0 až 46
- $tim_div=n$ – nastavení frekvence AD převodníku, $f_{ADC} = 1158/tim_div$ [Hz], ve vztahu je započteno i průměrování (viz kap. 4.2); n je celé číslo v rozsahu 0 až 255
- $pwm=n$ – nastavení střídy PWM v manuálním režimu; n je celé číslo v rozsahu 0 (minimální střída) až 4095 (maximální střída)
- $t=n$ – nastavení požadované teploty, teplota se zadává celočíselně a vynásobená stem; n je celé číslo v rozsahu -3000 až 3000
- $sendt=n$ – povoluje ($n \neq 0$) nebo zakazuje ($n=0$) odesílání hodnot změřené teploty
- $uartd=n$ – nastavuje interval, s jakým je odesílána aktuální teplota (pokud je odesílání povoleno), $t = uartd / f_{ADC}$ [s]; n je celé číslo v rozsahu 0 až 255
- $manual=n$ – povoluje ($n \neq 0$) nebo zakazuje ($n=0$) manuální režim, v manuálním režimu je PSD regulátor vyřazen z činnosti, střída zůstane nastavena na poslední hodnotu, lze ji změnit příkazem pwm
- $ireset$ – vynuluje integrační složku PSD regulátoru (proměnnou sum_iterm)
- $save$ – uloží hodnoty pid_kpp , pid_kii , pid_kdd a sum_iterm_sh do eeprom
- $load$ – načte hodnoty pid_kpp , pid_kii , pid_kdd a sum_iterm_sh z eeprom
- $sendparams$ – odešle aktuální hodnoty proměnných pid_kpp , pid_kii , pid_kdd a sum_iterm_sh

4.5 Oživení a nastavení

Po osazení desky plošných spojů byla nejdříve ověřena správná činnost napájecího zdroje. Poté byl ke svorkám určeným pro termoelektrický chladič připojen rezistor a nastavením střídavy PWM v manuálním režimu byla ověřena funkčnost zdroje proudu. Následně byla vyzkoušena činnost PSD regulátoru na regulaci ohřevu rezistoru.

Poté již byl ke kontroléru připojen termoelektrický chladič s termistorem. Pro nastavení koeficientů PSD regulátoru byla použita Ziegler-Nicholsova metoda. Koeficienty integrační a derivační složky regulátoru byly nastaveny na nulu, koeficient proporcionální složky byl snižován (koeficient je záporný) tak dlouho, až systém začal kmitat se stálou amplitudou. To nastalo při hodnotě $k_{pp}=-750$, tato hodnota byla označena jako kritický zisk:

$$K_{krit} = -750. \quad (32)$$

Systém kmital s periodou:

$$T_{krit} = 17s. \quad (33)$$

Koeficient proporcionální složky byl poté určen ze vztahu (30):

$$k_{pp} = 0,45 \cdot K_{krit} = 0,45 \cdot (-750) = -324. \quad (34)$$

Integrační časová konstanta byla určena pomocí vztahu (31):

$$T_I = 0,85T_{krit} = 0,85 \cdot 17 = 14,45 \doteq 15. \quad (35)$$

Derivační složka především zlepšuje odezvu systému při skokových změnách regulační odchylky. Vzhledem k tomu, že vstupní veličina (zvolená teplota) je po nastavení konstantní a teplota fotodetektoru by v ustáleném stavu také neměla výrazně kolísat, derivační složka pro jednoduchost nebyla použita. Kontrolér je tedy nastaven jako PI (resp. PS) regulátor.

Koeficient k_{ii} lze ze vztahů (18), (22) a popisu algoritmu v kap. 4.2 vyjádřit jako:

$$k_{ii} = \frac{k_{pp} \cdot 2^{sum_iterm_sh}}{T_I \cdot f_{ADC}}, \quad (36)$$

při $f_{ADC}=40,62\text{Hz}$ a $sum_iterm_sh=12$ k_{ii} vychází:

$$k_{ii} = \frac{k_{pp} \cdot 2^{sum_iterm_sh}}{T_I \cdot f_{ADC}} = \frac{-324 \cdot 2^{12}}{15 \cdot 40,62} = -2178. \quad (37)$$

Koeficient derivační složky by se dal případně určit ze vztahů (18) a (24):

$$k_{ii} = k_{pp} \cdot T_D \cdot f_{ADC}. \quad (38)$$

Pokud by byla k nastavení regulátoru použita jiná metoda, kde by byl proporcionální zisk regulátoru K_p určen výpočtem, hodnotu k_{pp} by bylo třeba dopočítat. Proporcionální zisk K_p bývá určen jako procentuální změna výstupní veličiny vzhledem k výstupnímu rozsahu ku procentuální změně regulační odchylky vzhledem ke vstupnímu rozsahu. Pro vzájemný vztah mezi K_p a k_{pp} lze potom odvodit:

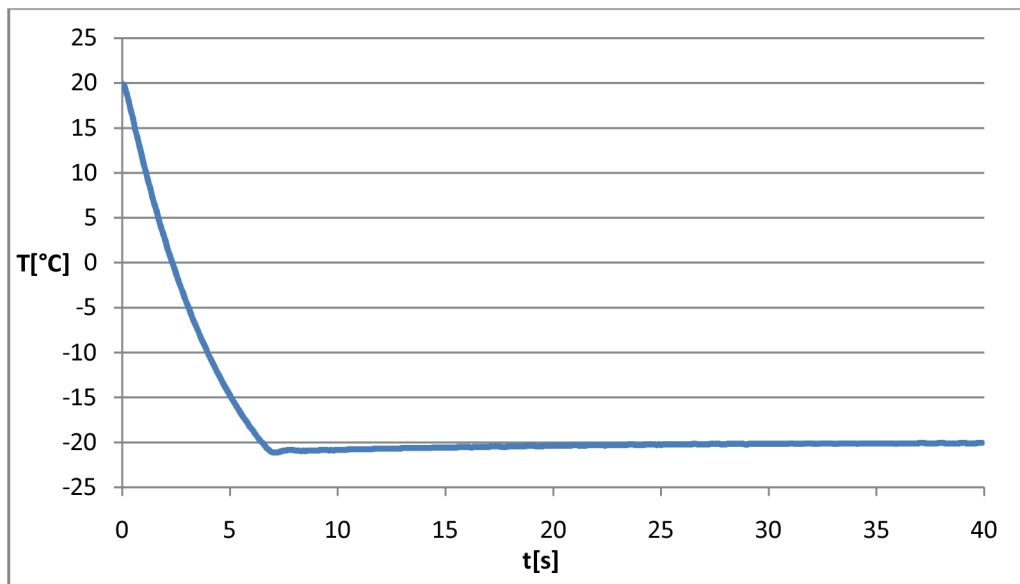
$$\begin{aligned} K_p &= \frac{u \cdot (w_{max} - w_{min})}{e \cdot (u_{max} - u_{min})} = \frac{k_{pp} \cdot (w_{max} - w_{min})}{16 \cdot (u_{max} - u_{min})} \\ &= \frac{k_{pp} \cdot (3000 - (-3000))}{16 \cdot (4095 - (-4096))} = 0,04578 \cdot k_{pp}, \end{aligned} \quad (39)$$

$$k_{pp} = 21,84 \cdot K_p, \quad (40)$$

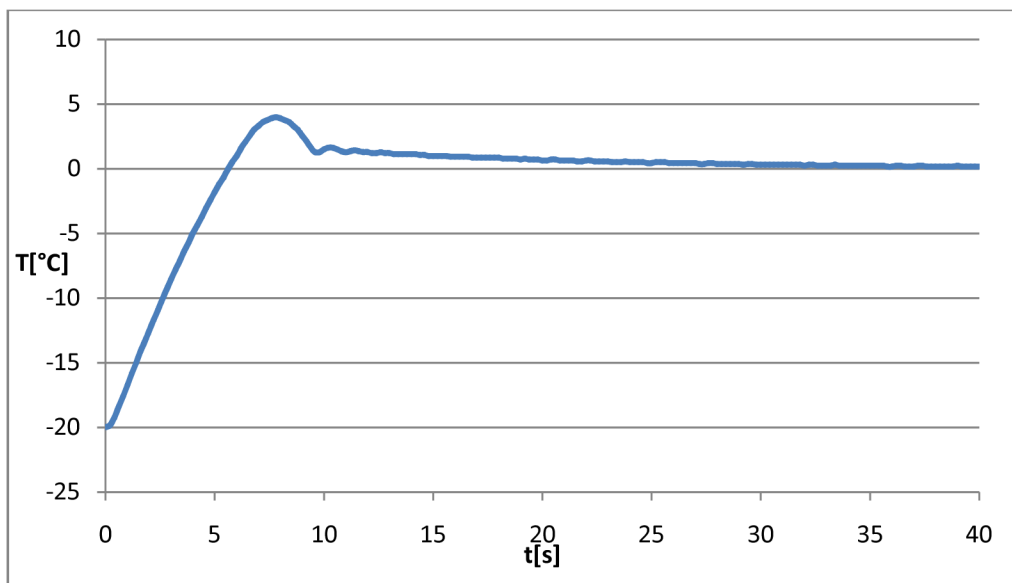
kde w_{max} a w_{min} jsou maximální a minimální hodnoty vstupní veličiny (teplota ve tvaru, v jakém je uložena ve vyhledávací tabulce), u_{max} a u_{min} jsou maximální a minimální hodnoty řídicí veličiny (hodnota kterou se nastavuje střída PWM). Hodnota u_{min} je ve skutečnosti omezena na nulu, ve výpočtu je však třeba uvažovat plný rozsah před omezením.

4.6 Dosažené výsledky

S nastavenými hodnotami byla změřena odezva na skokovou změnu nastavené teploty. Grafy závislosti teploty na čase jsou na obr. 4.6 a 4.7.

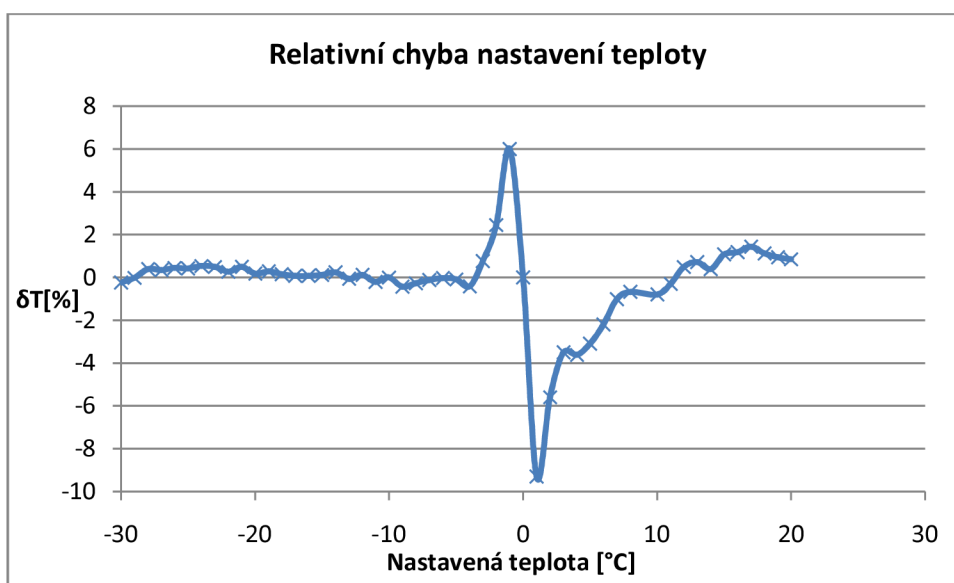


Obrázek 4.6 Odezva na změnu nastavené teploty z 20°C na -20°C

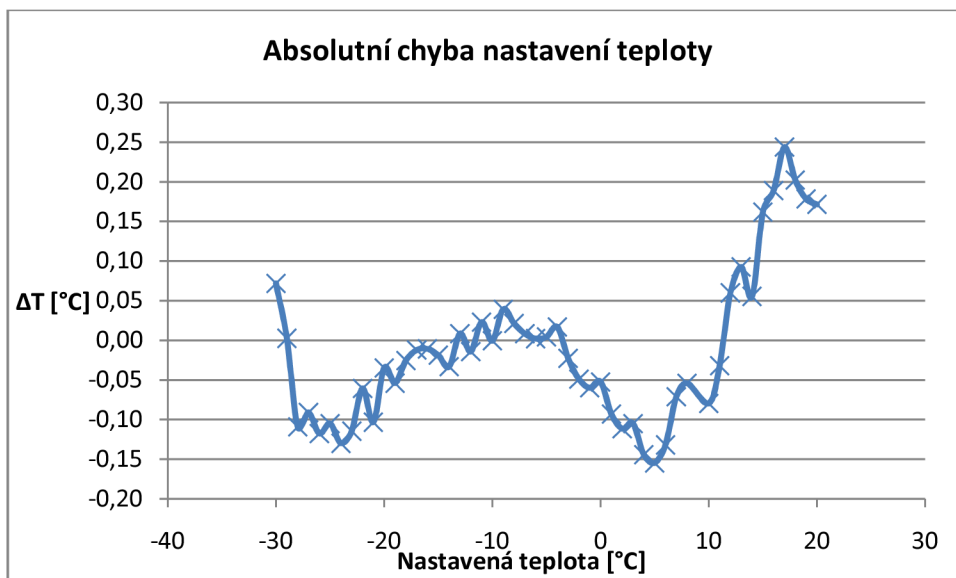


Obrázek 4.7 Odezva na změnu nastavené teploty z -20°C na 0°C

Změřená odezva byla vyhovující a nastavené koeficienty proto nebyly dále upravovány. Poté byla určena chyba nastavení teploty. Z hodnoty získané AD převodem bylo spočítáno napětí a následně odpor termistoru. Z odporu termistoru byla zjištěna skutečná teplota, ta byla porovnána s nastavenou. Závislosti odchylky teploty jsou zobrazeny na obr. 4.8 a 4.9.



Obrázek 4.8 Relativní chyba nastavení teploty



Obrázek 4.9 Absolutní chyba nastavení teploty

Změřená odchylka teploty od nastavené hodnoty byla menší než 0,25°C a byla způsobena především omezeným rozlišením AD převodníku.

5 ZÁVĚR

V bakalářské práci byly popsány principy termoelektrických chladičů, jejich konstrukce a nároky na napájení. Dále byly popsány principy zpětnovazební regulace s důrazem na PID regulátor a jeho diskrétní verzi PSD regulátor.

Bylo navrženo celkové obvodové řešení kontroléru, využívající diskrétní PID regulátor implementovaný v mikrokontroléru ATmega8. Zařízení bylo postaveno a oživeno. K nastavení parametrů regulátoru byla použita Ziegler-Nicholsova metoda. Derivační složka regulátoru nebyla využita, kontrolér tedy pracuje jako PI regulátor. I přesto má přechodová charakteristika poměrně malý překmit a krátkou dobu ustálení, hlavně při skokovém snížení nastavené teploty. Při skokovém zvýšení nastavené teploty je překmit větší, což je pravděpodobně způsobeno delší časovou konstantou systému při ohřevu. Termoelektrický chladič je totiž zapojen tak, že proud jím může procházet jen jedním směrem, může tedy pouze chladit. Systém je velmi stabilní, teplota obvykle kolísá pouze o hodnotu odpovídající jednomu bitu rozlišení AD převodníku.

LITERATURA

- [1] GOLAB, František a František KAMENČÁK. Termoelektrické jevy a jejich užití. Vyd. 1. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1975, 83 s.
- [2] Thermoelectric Technical Reference — Advantages of Thermoelectric Cooling. Ferrotec [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <https://www.ferrotec.com/Technology/Thermoelectric/Thermalref04>
- [3] ČERMÁK, Patrik. Elektrina přímo z tepla. *3pól* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://3pol.cz/888-elektrina-primo-z-tepla>
- [4] KASAP, Safa. Thermoelectric Effects in Metals: Thermocouples. Web-Materials :: Safa Kasap [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.kasap.usask.ca/samples/Thermoelectric-Seebeck.pdf>
- [5] MIKYŠKA, Ladislav. *Termoelektrické články*. 1. vyd. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964, 152 s.
- [6] KARAMAZOV, Simeon. *Interakce bodových poruch ve vybraných krystalech tetradymitové struktury*. Vyd. 1. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2007, 56 s. ISBN 978-80-7395-012-5.
- [7] POLÁK, Z. Teplo v experimentech. *Souborný sborník veletrhu nápadů učitelů fyziky* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://vnuf.cz/sbornik/prispevky/10-25-Polak.html>
- [8] BRÁZDIL, Marian. Peltierův článek pro chlazení malých výkonů: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s. Vedoucí práce doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
- [9] Thermoelectric Coolers Basics. *TEC Microsystems* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://www.tec-microsystems.com/EN/Intro_Thermoelectric_Coolers.html
- [10] TELLUREX CORPORATION. The Most Frequently Asked Questions About Thermoelectric Cooling. *The Department of Physics at the University of Toronto* [online]. 2006 [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.physics.utoronto.ca/~phy326/xrf/APPENDIX%20C.pdf>
- [11] FAQ's & Technical Information. *TE Tech Products* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <https://totech.com/faqs/>
- [12] PWM vs. Direct Current. *Meerstetter Engineering* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.meerstetter.ch/compendium/pwm-vs-direct-current>
- [13] Application Tips. *RMT Ltd Thermoelectric Cooling Solutions* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: http://www.rmtltd.ru/technology/tips/dc_or_pwm.php
- [14] Thermoelectric Module Reliability. *Solid State Cooling Systems* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <http://www.sscooling.com/thermoelectric-reliability>
- [15] Thermoelectric Technical Reference: Reliability of Thermoelectric Coolers. *Ferrotec* [online]. [cit. 2014-11-30]. Dostupné z: <https://thermal.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef10>

- [16] BAKER. Temperature Sensing Technologies. *Microchip Technology Inc* [online]. 2002 [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00679a.pdf>
- [17] PTC THERMISTORS. *GE Measurement & Control* [online]. [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://www.ge-mcs.com/download/appnotes/ptcnotes.pdf>
- [18] SPECTRUM SENSORS & CONTROLS, IN. PTC Thermistors Applications. *DigiKey Electronics* [online]. [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://www.digikey.com/Web%20Export/Supplier%20Content/api-technologies-1171/pdf/api-ptc-applications.pdf?redirected=1>
- [19] Negative Temperature Coefficient Thermistors for Temperature Measurement. *Portland State Aerospace Society* [online]. 2003 [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://psas.pdx.edu/RocketScience/Thermistors.pdf>
- [20] NTC/PTC Thermistors. *AVX Online* [online]. [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: http://www.avx.com/docs/masterpubs/ntc_ptc.pdf
- [21] NTC Thermistors. *AVX Online* [online]. 11.4. 2003 [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://www.avx.com/docs/masterpubs/ntctherm.pdf>
- [22] Temperature measurement in the Human Body Range. *MEDTEQ* [online]. [cit. 2014-12-7]. Dostupné z: <http://www.medteq.info/med/HumanBodyTempMeas>
- [23] HUŠEK, Petr. ZPĚTNOVAZEBNÍ ŘÍZENÍ, POŽADAVKY NA REGULACI. *České vysoké učení technické v Praze* [online]. [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: https://moodle.dce.fel.cvut.cz/pluginfile.php/4897/mod_resource/content/4/Cvic_9_Zpetna%20vazba.pdf
- [24] BALÁTEĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2003, 663 s. ISBN 80-7300-020-2.
- [25] VÍTEČKOVÁ, Miluše a Antonín VÍTEČEK. *Základy automatické regulace*. Přepřac. 2. vyd. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008, 243 s. ISBN 978-80-248-1924-2.
- [26] PID Theory Explained. *National Instruments* [online]. 2011 [cit. 2014-12-13]. Dostupné z: <http://www.ni.com/white-paper/3782/en/>
- [27] ÅSTRÖM, Karl Johan. 6 PID Control. *California Institute of Technology* [online]. 2002 [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: <http://www.cds.caltech.edu/~murray/courses/cds101/fa02/caltech/astrom-ch6.pdf>
- [28] BLAHA, P., VAVŘÍN, P. Řízení a regulace 1. *Ústav automatizace a měřicí techniky, Vysoké učení technické v Brně* [online]. [cit. 2014-12-14]. Dostupné z: http://www.uamt.feec.vutbr.cz/~richter/vyuka/0809_BRR1/texty/brr1.pdf
- [29] FLEURY, Peter. Peter Fleury Online: AVR Software. Peter Fleury's Home Page [online]. 2006 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://homepage.hispeed.ch/peterfleury/avr-software.html#libs>
- [30] MCUforum - Zákmity tlačítek:. *MCUforum* [online]. 2012 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: http://mcu.cz/forum_m/archive/index.php?thread-1315.html
- [31] AVR221: Discrete PID controller. *Atmel* [online]. 2006 [cit. 2015-05-22]. Dostupné z: <http://www.atmel.com/images/doc2558.pdf>

SEZNAM PŘÍLOH

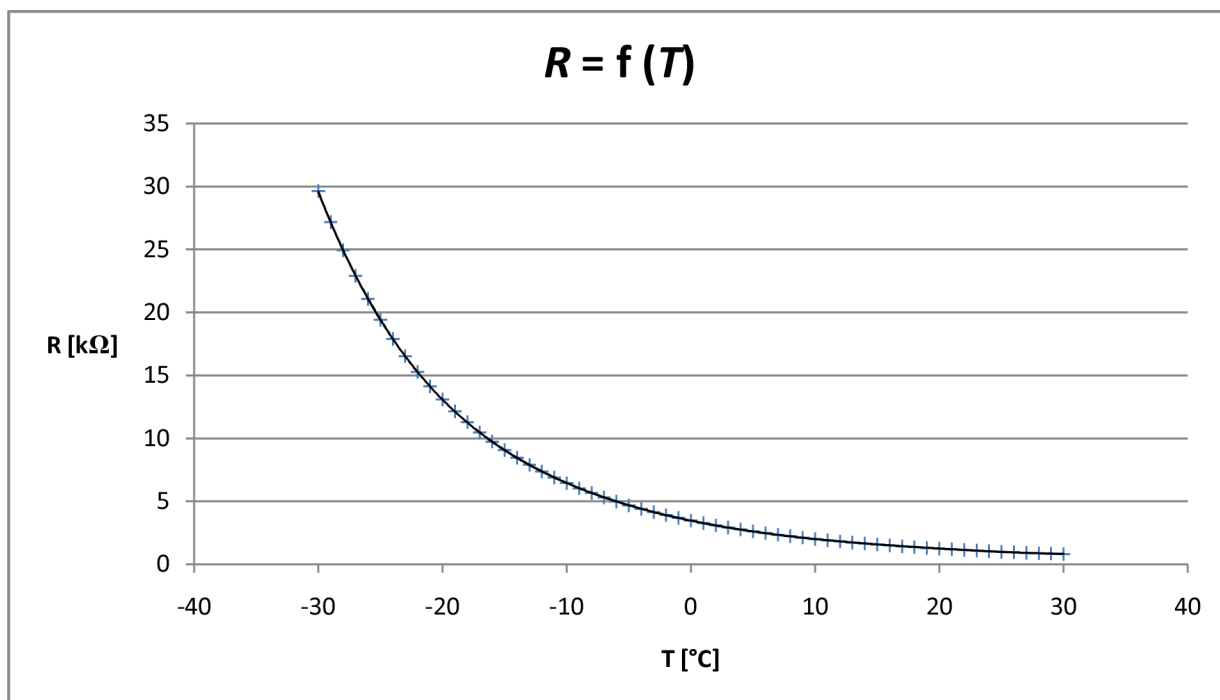
A	Charakteristiky použitého termistoru	28
A.1	Teplotní závislost odporu použitého termistoru	28
A.2	Graf teplotní závislosti odporu použitého termistoru	28
B	Kontrolér termoelektrického chladiče	29
B.1	Schéma kontroléru	29
B.2	Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)	30
B.3	Deska plošného spoje – osazovací plán – top (strana součástek)	30
B.4	Seznam součástek	31

A CHARAKTERISTIKY POUŽITÉHO TERMISTORU

A.1 Teplotní závislost odporu použitého termistoru

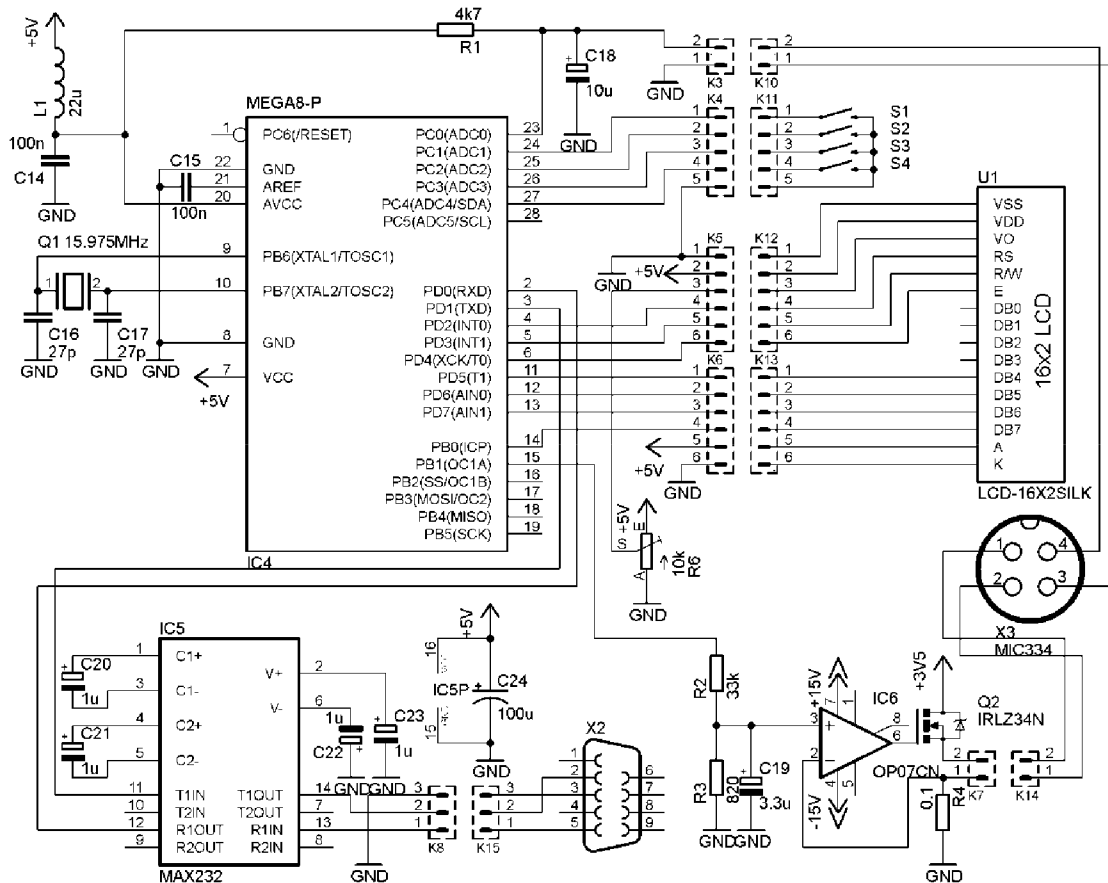
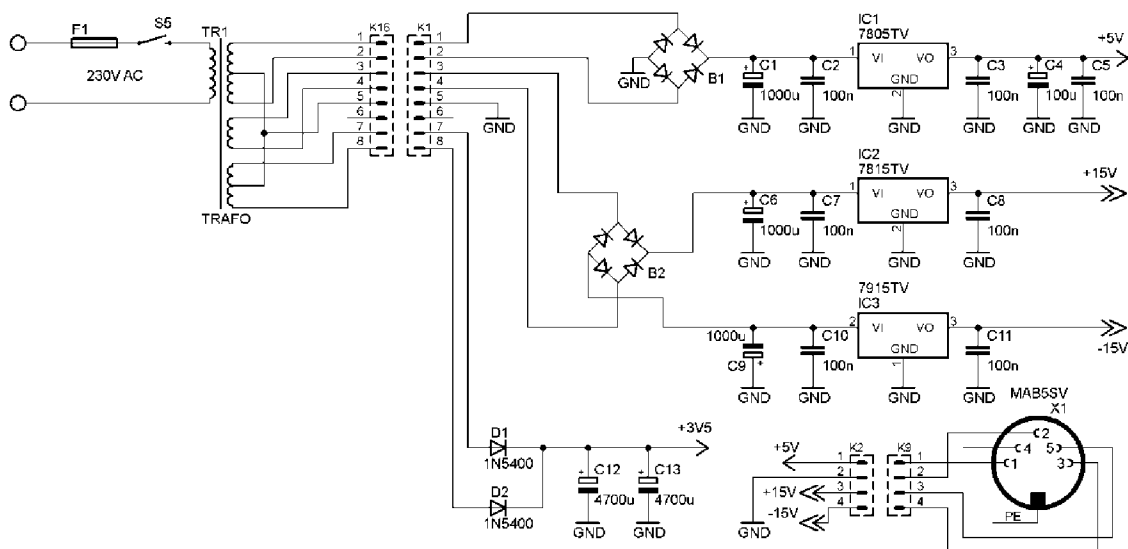
T [°C]	R [kΩ]	T [°C]	R [kΩ]	T [°C]	R [kΩ]	T [°C]	R [kΩ]	T [°C]	R [kΩ]
-30	29,62	-17	10,47	-4	4,4	9	2,12	22	1,14
-29	27,15	-16	9,74	-3	4,14	10	2,01	23	1,09
-28	24,91	-15	9,07	-2	3,9	11	1,91	24	1,04
-27	22,89	-14	8,46	-1	3,68	12	1,82	25	1
-26	21,06	-13	7,89	0	3,47	13	1,73	26	0,96
-25	19,4	-12	7,37	1	3,28	14	1,65	27	0,92
-24	17,89	-11	6,89	2	3,09	15	1,57	28	0,88
-23	16,52	-10	6,44	3	2,93	16	1,5	29	0,85
-22	15,27	-9	6,03	4	2,77	17	1,43	30	0,81
-21	14,13	-8	5,66	5	2,62	18	1,36		
-20	13,09	-7	5,31	6	2,48	19	1,3		
-19	12,14	-6	4,98	7	2,35	20	1,25		
-18	11,27	-5	4,68	8	2,23	21	1,19		

A.2 Graf teplotní závislosti odporu použitého termistoru

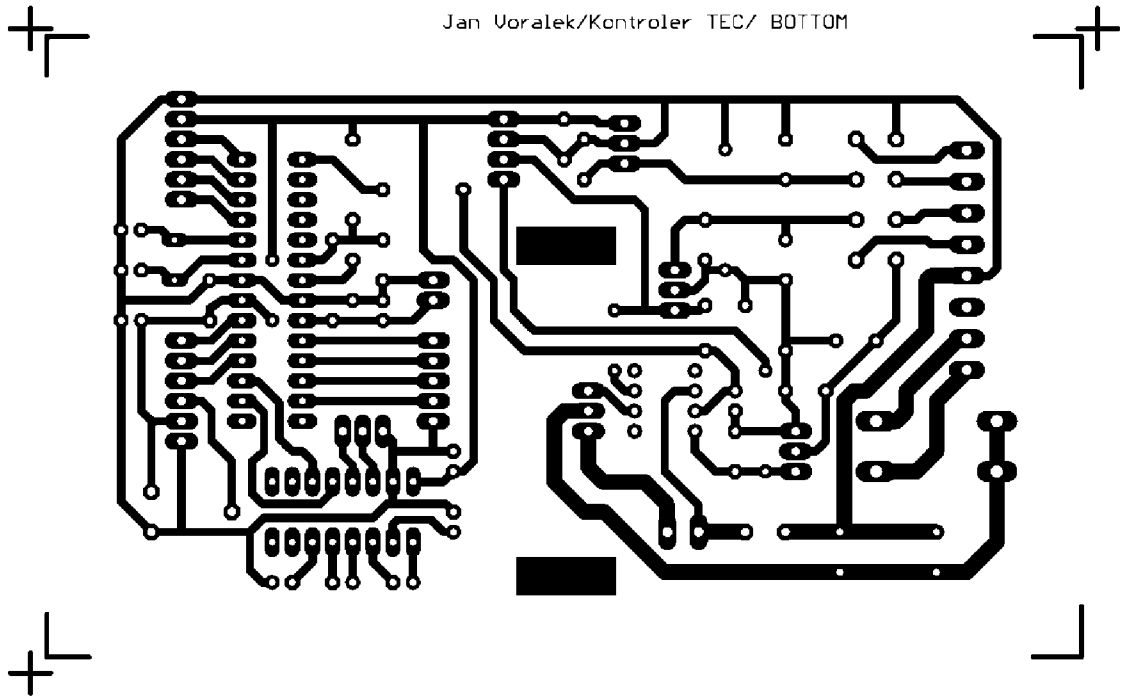


B KONTROLÉR TERMOELEKTRICKÉHO CHLADIČE

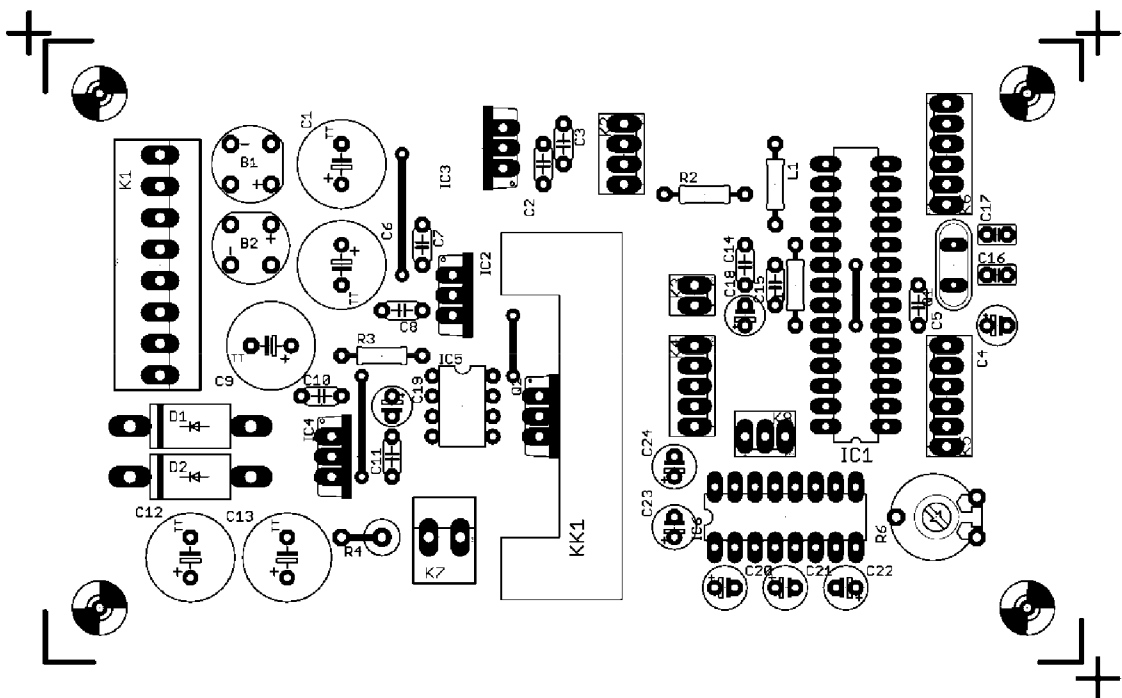
B.1 Schéma kontroléru



B.2 Deska plošného spoje – bottom (strana spojů)



B.3 Deska plošného spoje – osazovací plán – top (strana součástek)



B.4 Seznam součástek

Označení	Hodnota	Pouzdro	Popis
B1	B250C1500	RB1A	usměrňovací můstek
B2	B250C1500	RB1A	usměrňovací můstek
C1	1000u	TT5D11	elektrolytický kondenzátor
C2	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C3	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C4	100u	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C5	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C6	1000u	TT5D11	elektrolytický kondenzátor
C7	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C8	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C9	1000u	TT5D11	elektrolytický kondenzátor
C10	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C11	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C12	4700u	TT5D11	elektrolytický kondenzátor
C13	4700u	TT5D11	elektrolytický kondenzátor
C14	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C15	100n	C050-024X044	keramický kondenzátor
C16	27p	C025-025X050	keramický kondenzátor
C17	27p	C025-025X050	keramický kondenzátor
C18	10u	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C19	3.3u	E2,5-5	elektrolytický kondenzátor
C20	1u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C21	1u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C22	1u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C23	1u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
C24	100u	E2,5-6	elektrolytický kondenzátor
D1	1N5400	DO201-15	dioda
D2	1N5400	DO201-15	dioda
IC1	MEGA8-P	DIL28-3	mikrokontrolér
IC2	7815TV	TO220V	integrovaný stabilizátor
IC3	7805TV	TO220V	integrovaný stabilizátor
IC4	7915TV	TO220V	integrovaný stabilizátor
IC5	OP07CN	DIL08	operační zesilovač
IC6	MAX232	DIL16	převodník TTL/RS232
K1		PSH04-08P	konektor
K2		PSH02-04P	konektor
K3		PSH02-02P	konektor
K4		PSH02-05P	konektor
K5		PSH02-06P	konektor
K6		PSH02-06P	konektor

K7		PSH04-02P	konektor
K8		PSH02-03P	konektor
L1	22u	0207/10	cívka
Q1	15.975MHz	QS	krystal
Q2	IRLZ34N	TO220BV	mosfet
R1	4k7	0207/10	rezistor
R2	33k	0207/10	rezistor
R3	820	0207/10	rezistor
R4	0.1	P0613V	rezistor
R6	10k	PT-10	trimr