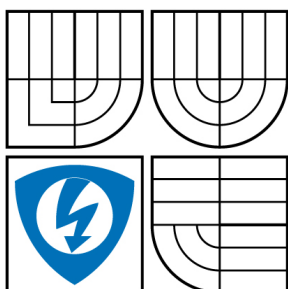


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

TERMOSTAT PRO TESTOVÁNÍ SYSTÉMŮ ZA SNÍŽENÝCH TEPLŮT

THERMOSTAT FOR SYSTEM TESTING AT LOW TEMPERATURES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

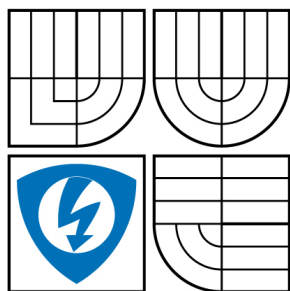
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

JIŘÍ SEDLÁČEK

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAROMÍR HUBÁLEK, Ph.D.

BRNO 2008



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Mikroelektronika a technologie

Student: Sedláček Jiří
Ročník: 3

ID: 89956
Akademický rok: 2007/2008

NÁZEV TÉMATU:

Termostat pro testování systémů za snížených teplot

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Proveďte rešerši o regulaci teploty pomocí Peltiérových článků a postavte izolovaný systém s hliníkovými chladiči pro testování. K tomuto systému navrhnete obvodové řešení regulace za užití mikrokontroléru. Celý systém zabudujte do jedné skříně a proveďte ověřovací měření a stanovte parametry systému.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Dle pokynů vedoucího práce.

Termín zadání: 5.10.2007

Termín odevzdání: 30.5.2008

Vedoucí práce: Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
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 § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

Licenční smlouva poskytovaná k výkonu práva užít školní dílo

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Jiří Sedláček
Bytem: Brno, Fryčajova 83, 614 00
Narozen/a (datum a místo): 7.11.1983, Brno

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 244/53, 602 00 Brno
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
Prof. Ing. Radimír Vrba, CSc.
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1 Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):
- ☐ disertační práce
 - ☐ diplomová práce
 - ☒ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Termostat pro testování systémů za snížených teplot
Vedoucí/ školitel VŠKP: Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.
Ústav: Ústav mikroelektroniky
Datum obhajoby VŠKP:

VŠKP odevzdal autor nabyvateli v:

- ☒ tištěné formě — počet exemplářů 2
- ☒ elektronické formě — počet exemplářů 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 30. 5. 2008

.....
Nabyvatel

.....
Autor

Abstrakt:

Tato bakalářská práce se zabývá návrhem a konstrukcí zařízení, které má sloužit pro testování vyvíjených elektronických obvodů při nižších teplotách než je teplota okolí v laboratoři. K chlazení je použito termoelektrické chlazení s Peltierovými články. Regulace teploty je provedena pomocí mikrokontrolérového řízení. Práce je rozdělena do tří částí. První část obsahuje teorii nutnou k realizaci zařízení. Ve druhé části je detailní popis konstrukce a funkce zařízení. Část třetí shrnuje naměřené parametry zařízení. Součástí práce je technická dokumentace.

Abstract:

This bachelor thesis deals with proposal and construction of device that should serve for testing of developed electronic circuits at lower temperatures than the ambient temperature in laboratory. Thermoelectric Peltier's coolers are used for cooling. The temperature regulation is provided by microcontroller control. The thesis is divided into three parts. First part includes necessary theory for realization of the device. In second part there is the detailed description of construction and function of the device. The third part summarises the measured parameters of the device. The thesis includes the technical documentation.

Klíčová slova:

Chlazení, mikrokontrolérové řízení, Peltierův článek, PID regulace, termoelektrické chlazení, testování

Keywords:

Cooling, microcontroller control, Peltier's cooler, PID regulation, thermoelectric cooling, testing

Bibliografická citace díla:

SEDLÁČEK, J. *Termostat pro testování systémů za snížených teplot*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 41 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Jaromír Hubálek, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla:

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. 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 jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 30. 5. 2008

.....

Poděkování:

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Jaromíru Hubálkovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce. Dále děkuji panu Milanu Vojáčkovi a Jiřímu Sedláčkovi st. za výrobu přístrojové skříně.

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	TEORIE POTŘEBNÁ PRO REALIZACI	9
2.1	PELTIERŮV ČLÁNEK	9
2.1.1	<i>Popis Peltierova článku</i>	<i>10</i>
2.2	REGULACE	11
2.2.1	<i>PID regulace</i>	<i>11</i>
2.2.2	<i>Realizace regulace</i>	<i>13</i>
2.3	TEPLO A JEHO CHLAZENÍ	13
2.3.1	<i>Tepllo</i>	<i>13</i>
2.3.2	<i>Chlazení</i>	<i>14</i>
2.4	SENZORY TEPLoty	14
2.4.1	<i>Popis použitelných teplotních senzorů</i>	<i>15</i>
2.5	MIKROKONTROLÉRY	16
3	VLASTNÍ ŘEŠENÍ PROJEKTU	17
3.1	MECHANICKÁ KONSTRUKCE	17
3.1.1	<i>Konstrukce chladícího prostoru</i>	<i>17</i>
3.1.2	<i>Přístrojová skříň</i>	<i>19</i>
3.2	ELEKTRICKÁ KONSTRUKCE	20
3.2.1	<i>Čidlo teploty DS18B20</i>	<i>21</i>
3.2.2	<i>Mikrokontrolér ADuC7026</i>	<i>23</i>
3.2.3	<i>Řízení Peltierových článků</i>	<i>25</i>
3.2.4	<i>Napájení</i>	<i>26</i>
3.2.5	<i>V/V zařízení</i>	<i>28</i>
3.3	PROGRAM	28
4	MĚŘENÍ	31
4.1	MĚŘENÍ NA SESTAVENÉM CHLADÍCÍM PROTOTYPU	31
5	ZÁVĚR	36
6	POUŽITÁ LITERATURA	37
7	SEZNAM ZKRATEK	40
8	SEZNAM PŘÍLOH	41
8.1	PŘÍLOHY PAPÍROVÉ	41
8.2	OBSAH CD	41

1 Úvod

Cílem práce je návrh a konstrukce zařízení pro testování elektronických systémů za snížených teplot. Ke chlazení je využito termoelektrické chlazení pomocí Peltierových článků. Toto zařízení lze v praxi využít při návrhu elektronických obvodů, které budou vystaveny nižším nebo i vyšším teplotám než je průměrná teplota okolního prostředí, ve kterém je vyvíjená aplikace instalována. Primárním úkolem je navrhnout a zkonstruovat termostat pro dosažení nízkých teplot. Zařízení by mělo být schopno dosáhnout teploty blíží se k 0 °C.

Vlastní práci lze rozdělit do čtyř etap.

V první etapě byla nastudována teorie teorii potřebná pro vlastní realizaci práce. Touto teorií je řízení a regulace teploty a výběr vhodného algoritmu pro realizaci regulátoru pomocí mikrokontrolérového řízení. Nedílnou součástí je výběr vhodných komponent, převážně teplotního senzoru.

Druhá etapa se sestává z konstrukce izolovaného systému, ve kterém bude probíhat vlastní testování obvodů. Pro postup konstrukce v této části je důležitá vhodná volba a dostupnost jednotlivých komponentů, které jsou při realizaci použity.

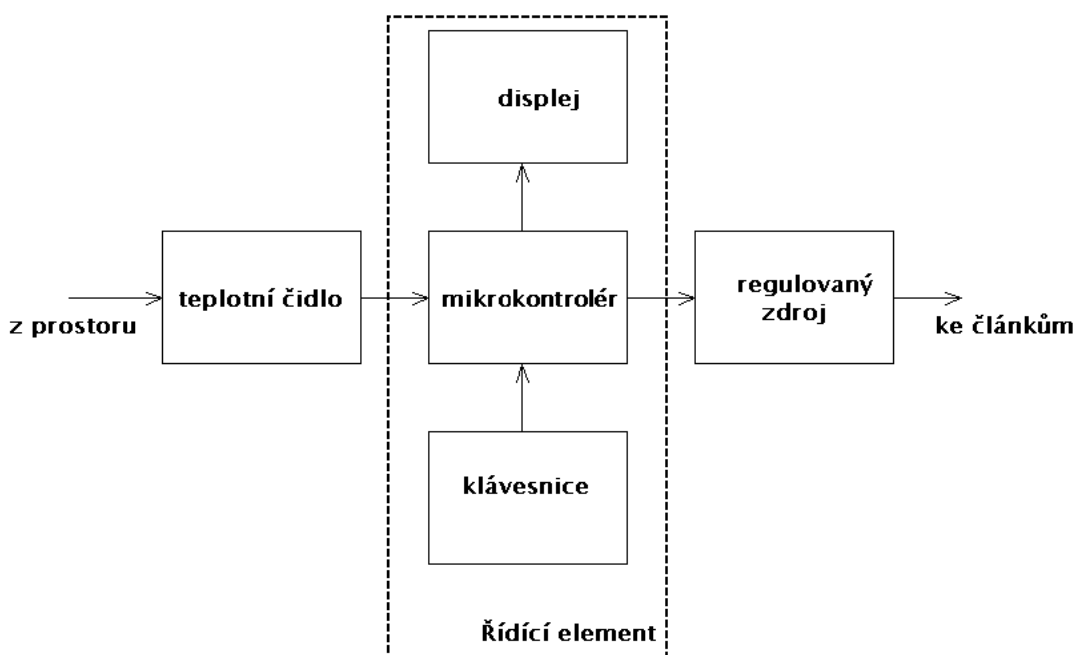
Třetí etapa je zaměřena na návrh, konstrukci a oživení ovládací elektroniky. V návrhu je důležitá vhodná volba řídicího elementu (mikrokontroléru), který bude zajišťovat vlastní regulaci výkonu Peltierových článků a tím chlazení. Nezbytnou součástí je konstrukce vhodné přístrojové skříně.

Čtvrtá etapa obsahuje provedení testovacích měření, vyhodnocení naměřených výsledků a odstranění nedostatků.

Při psaní této práce jsou slovní spojení testovací prostor a testovací box považovány za ekvivalentní a vyjadřují popis části zařízení, jenž má sloužit pro vkládání testovaného elektronického obvodu (systému).

2 Teorie potřebná pro realizaci

Konstruované zařízení funguje jako klimatická komora, ve které je možno měnit teplotu. Rozsah teplot je dán co nejmenší možnou dosažitelnou teplotou, jež je možné dosáhnout instalovanými Peltierovými články. Případná změna pro testování při vyšších teplotách, než je teplota okolí, ve kterém je umístěn tento termostat, je řešitelná záměnou polarity napájení, což Peltierův článek umožňuje. Blokové schéma zařízení je vyobrazeno na obrázku Obr. 1.



Obr. 1: Blokové schéma

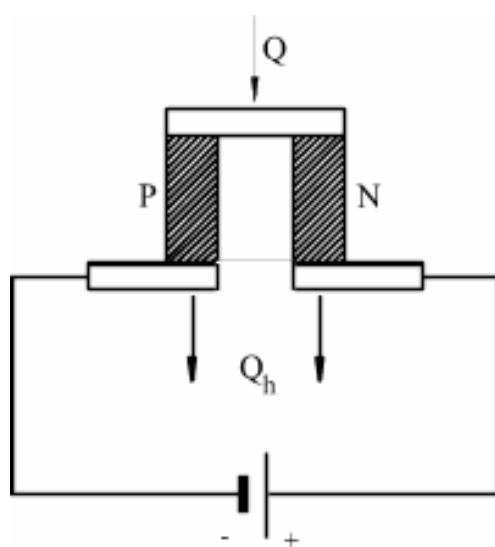
2.1 Peltierův článek

Peltierův článek je speciální polovodičové zařízení. Využívá tzv. Peltierova jevu, který objevil v roce 1834 francouzský fyzik Jean Charles Athanase Peltier. Peltierův jev je opačným jevem k Seebeckovu jevu. Seebeckův jev říká, že, jsou-li spojeny dva vodiče z různých kovů do uzavřeného obvodu a mají-li spoje různou teplotu T_1 a T_2 , protéká obvodem elektrický proud. Inverze v podobě Peltierova jevu zní: protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje Seebeckovým obvodem, pak vzniká teplotní rozdíl mezi oběma spoji. Teče-li proud z vnějšího zdroje daným spojením stejným směrem, jaký má proud při ohřátí tohoto spoje v Seebeckově jevu, pak se daný spoj ochlazuje. Prochází-li proud směrem opačným, pak se spoj ohřívá. Peltierův jev závisí na druhu materiálů a na jejich teplotě [1].

První výzkumy, které souvisí s využitím Peltierových článků v praxi, jsou datovány na konec třicátých let 20. století a jsou spojeny s výzkumem termoelektrických vlastností materiálů pro články [2]. Koncem padesátých a v šedesátých letech docházelo k dynamickému rozvoji nových polovodičových materiálů, které splňovaly vhodné termoelektrické vlastnosti pro široké uplatnění v průmyslové výrobě [3]. V dnešní době se Peltierovy články využívají v automobilových ledničkách. Vhodné využití nachází i v lékařství a na všech místech, kde je potřeba chladit intenzivně na malé ploše. Mezi výhody patří, že článek neobsahuje žádné pohyblivé části, tj. neprodukuje žádné otřesy a lze jej jednoduše regulovat změnou napětí nebo proudu. Nevýhodou je poměrně velká proudová spotřeba.

2.1.1 Popis Peltierova článku

Peltierův článek je složen ze dvou polovodičových tělísek a spojovacího měděného můstku. Spojovací můstek zprostředkovává přívod elektrické energie nutné k napájení a absorbuje a vyzařuje teplo. Základní princip zapojení je zobrazen na obrázku Obr. 2.

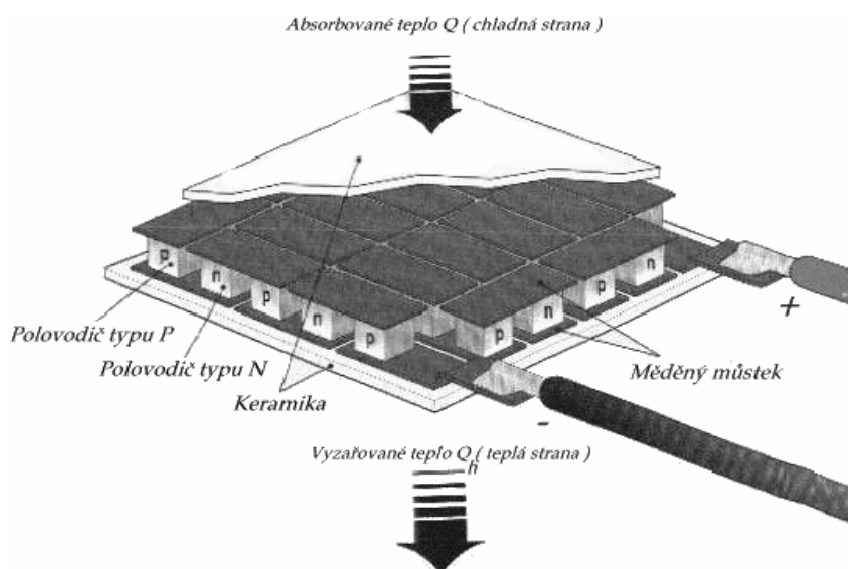


Obr. 2: Princip Peltierova článku [1].

kde Q je teplo absorbované, Q_h je teplo vyzařované, P polovodič typu P a N je polovodič typu N.

Základním polovodičovým materiálem pro výrobu Peltierova článku je převážně vizmut – tellurid, tj. termální systém Bi-Te-Se u N – typu polovodiče a Bi-Sb-Te u P – typu polovodiče. Tyto materiály se vyznačují výhodnými termoelektrickými vlastnostmi, nízkým měrným elektrickým odporem a malou tepelnou vodivostí. Spojovací můstky jsou zhotoveny z mědi, která má malý měrný elektrický odpor a umožňuje pájení. Nevýhodou je možná

difúze do polovodičového materiálu a tím zhoršení vlastností [1]. Jednotlivé elementy, vyobrazené na obrázku Obr. 2, Peltierova článku se zapojují do série a tvoří tak celek. Průřez průmyslově vyráběného článku je vyobrazen na obrázku Obr. 3. Povrch článku je tvořen keramickou destičkou. Pro zajištění dobrých chladících účinků je nutné dostatečně chladit teplou stranu článku pomocí výběru vhodného chlazení, viz kapitola 2.3.



Obr. 3: Průřez Peltierovým článkem [1]

2.2 Regulace

Pro nastavování a řízení průběhu teploty uvnitř termostatu je nejvhodnější použít mikrokontrolér. Ten umožňuje nastavování teplot pomocí klávesnice a zobrazení hodnot teplot a stavu zařízení na displeji. Pro regulaci a vyhodnocování teploty se používá PID regulace, která je výhodnější než jiné typy regulátorů.

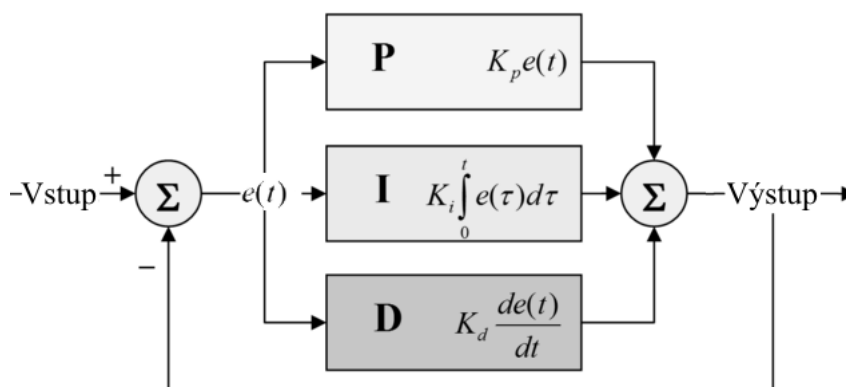
2.2.1 PID regulace

PID (proporcionálně integrační derivační) regulátor je lineární a spojitý. Požadované chování systému je dosaženo zpracováním informace obsažené v odchylce $e(t)$, pomocí jednotlivých proporcionálních, integračních a derivačních členů zapojených do zpětné vazby. Blokový diagram PID regulace je na obrázku Obr. 4. Zpracovávané $e(t)$ je zpravidla odchylka žádané hodnoty od skutečné hodnoty regulovaného členu. PID regulaci popisuje integrálně-diferenciální rovnice [4].

$$m(t) = K \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right], \quad (1)$$

kde $m(t)$ je výstup regulátoru, $e(t)$ je vstup regulátoru, K je proporcionální zesílení, T_i je integrační časová konstanta, T_d značí derivační časovou konstantu.

Určujícím faktorem reakce regulátoru na velikosti regulační odchylky je proporcionální člen. Integrační člen určuje reakci regulátoru na dobu trvání regulační odchylky. Derivační člen stanovuje reakci na rychlost změny regulační odchylky.



Obr. 4: PID algoritmus, [5] upraveno.

Pro řešení pomocí mikrokontroléru je vztah (1) upraven do diskrétního tvaru [4], který je pro naprogramování řídicího mikrokontroléru vhodnější:

$$M(z) = \left[K_p + \frac{K_i}{1 - z^{-1}} + K_d (1 - z^{-1}) \right] E(z), \quad (2)$$

kde K_p je proporcionální člen, K_i je člen integrační, K_d je derivační člen, $E(z)$ označuje odchylku žádané hodnoty od hodnoty skutečné.

Tyto veličiny tvoří tzv. konstanty regulátoru. Hodnota těchto konstant se určuje dle charakteru regulované veličiny a prostředí, v němž má být hodnota regulována. Správné určení konstant umožní přesnou regulaci.

K určení konstant regulátoru se používá Ziegler – Nicholsonova metoda [4]. Tato metoda je experimentální, a proto není nutné znát matematický model systému. Postup nastavování je takový, že nejprve se regulátor spustí pouze jako proporcionální. Postupně se zvyšuje hodnota konstanty K_p do doby, než začne soustava kmitat, tím získáme hodnotu K_m . Frekvenci těchto kmitů změříme a vypočteme úhlový kmitočet ω_m , který dosadíme do vztahů (3)

$$K_p = 0,6K_m \quad T_i = \frac{\pi}{\omega_m} \quad T_d = \frac{\pi}{4\omega_m} \quad (3)$$

kde T_i je perioda integračního členu, T_d je perioda derivačního členu.

Z vypočítaných hodnot podle vztahů (3) určíme pomocí vzorců (4) další konstanty regulátoru, které vložíme do rovnice (2).

$$K_i = \frac{KT}{T_i} \quad K_d = \frac{KT_d}{T} \quad (4)$$

2.2.2 Realizace regulace

Určení konstant regulátoru je provedeno na sestaveném a tepelně izolovaném systému. Zjištěné hodnoty jsou zaneseny do algoritmu pro výpočet regulace v mikrokontroléru. Výsledek výpočtu určuje pomocí vhodného zdroje velikost regulované veličiny (proudu nebo napětí) do Peltierových článků a tím ovlivňuje množství vyzařované tepelné energie. Na vstup regulátoru je připojen senzor, který měří teplotu uvnitř chlazeného systému. Na výstupu je již zmíněný zdroj napájení článků.

Vzhledem ke složitosti algoritmu PID byl použit k napsání této regulace do mikrokontroléru programovací jazyk C. Podrobnější popis programu je v kapitole 3.3.

2.3 Teplo a jeho chlazení

2.3.1 Teplo

Druhy přenosu tepla jsou vedení (kondukce), proudění (konvekce) a vyzařování (sálání, radiace). Všechny tři druhy přenosu tepla se uplatňují současně, ale s různou intenzitou podle charakteru šíření tepla v prostředí.

Při kondukcí dochází k přenosu tepla z prostředí s vyšší teplotou do prostředí s teplotou nižší. V případě chlazení Peltierových článku použitých v tomto systému se jedná o přenos mezi teplou stranou článku a chladičem, na který jsou články upevněny.

Využití konvečního způsobu přenosu tepla, který představuje přenos mezi povrchem pevného tělesa a plynem či kapalinou, je důležité pro dostatečné ochlazování chladiče vzduchem.

Přenos tepla radiací je pomocí vlnění. Energie vlnění se po dopadu na těleso mění v teplo. Způsob tohoto přenosu tepla v aplikaci má podíl na tom, že vhodnou volbou povrchové úpravy chladičů použitých v zařízení, nedojde k nevhodnému ovlivňování instalované ovládací elektroniky vyzařovaným teplem.

2.3.2 Chlazení

Ke chlazení je vhodné použít okolního vzduchu. Jeho proudění okolo chladičů může být přirozené v závislosti na vhodné volbě polohy chladiče. Další možností je nucená cirkulace, při které je možné dosáhnout lepšího proudění vzduchu přes žebra chladičů.

Méně používané, avšak u výkonnějších součástí nepostradatelné, je použití chlazení pomocí kapalinového média. Nejčastěji se využívá destilovaná voda, která však může reagovat s použitými komponentami chladicího okruhu a tím dochází k jeho znehodnocování. Často užívaný je speciální olej pro chlazení.

Další možností odvodu tepla je použití tepelných trubic (heat pipe). Jedná se o uzavřenou trubici, která je naplněna speciální látkou. Zahříváním jednoho konce dochází k odpařování této látky. Na druhém, chlazeném, konci se vzniklé páry kondenzují a vzniká zpět kapalina. Kapalina se vrací zpět k teplému místu a tím dochází k odvodu tepla do chladiče.

Jiné způsoby chlazení, jako jsou chlazení pomocí změny skupenství, chlazení při varu či použití zkapalněných plynů, nebudu v této aplikaci uvažovat.

2.4 Senzory teploty

Senzor (čidlo) teploty je funkční prvek, který tvoří vstupní blok měřicího řetězce [6]. Senzory můžeme dělit dle různých kritérií [6], např. podle:

- fyzikálního principu na senzory odporové, termoelektrické, polovodičové a dilatační,
- způsobu styku s měřeným objektem členíme senzory na dotykové a bezdotykové,
- transformace signálu rozlišujeme senzory aktivní a pasivní. Aktivní snímače působením teploty vytvářejí elektrickou energii. Pasivní čidla vyžadují ke své činnosti napájení, které zabezpečuje převod na elektrickou veličinu.

Důležitým parametrem teplotního senzoru jsou jeho dynamické vlastnosti, tzn., že signál vystupující ze senzoru musí s co nejmenším zkreslením sledovat měřenou teplotu.

2.4.1 Popis použitelných teplotních senzorů

Kovové odporové senzory teploty pracují na principu teplotní závislosti odporu kovu. Jako materiálu k výrobě se používá platiny, niklu a ve zvláštních případech mědi. Niklová čidla se vyznačují vysokou citlivostí, rychlou odezvou a malými rozměry. Teplotní rozsah je omezen a jsou nelineární. Platinová čidla jsou lineární a použitelná do velmi nízkých teplot ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$). Mají kladný teplotní koeficient TKR

Termoelektrické články fungují na principu Seebeckova jevu (viz 2.1). Tvoří je dva vodiče (někdy i polovodiče). Termočlánky se různí podle typu materiálu, ze kterého jsou konstruovány. Každý typ má jiné vlastnosti jako je měřicí rozsah a přesnost. Termoelektrické napětí vytvářené termočlánkem je v rozsahu (záleží na typu) maximálně desítek milivoltů, proto je nutné dostatečně potlačit rušení a napětí zesilovat. Výstupní charakteristika je nelineární.

Polovodičová čidla využívají závislosti koncentrace nosičů náboje na teplotě. Mezi polovodičové teplotní senzory patří termistory a monokrystalické senzory. Termistor je odpor závislý na teplotě. Rozlišují se negativní (NTC – Negative Temperature Coefficient) termistory, kde odpor s teplotou klesá a pozitivní (PTC – Positive Temperature Coefficient) termistory, u kterých odpor s teplotou vzrůstá. Nevýhodou termistorů je nelinearita. Monokrystalická čidla se vyrábí z křemíku (Si) a využívají dominantní elektronovou vodivost. Pracují na principu pohyblivosti nosičů. Teplotní rozsah takto zhotoveného senzoru se pohybuje od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $150\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Monolitické senzory jsou založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Teplotní rozsah je podobný jako u monokrystalických senzorů. Přesnost se pohybuje v rozsahu $0,5\% - 2\%$. Vlastní senzor teploty a elektronický obvod tvoří integrální součástku (monolitický blok). Standardně jsou založeny na dvojici tranzistorů napájených ze zdroje proudu. Výhodou těchto čidel je, že do jednoho pouzdra jsou integrovány zesilovače nebo obvody pro digitální výstup (PWM, A/D) a sofistikovanější čidla obsahují navíc mikroprocesor.

Další druhy teploměru fungují na principu roztažnosti pevných nebo kapalných látek. Jedná se převážně o teploměry dilatační, skleněné a tlakové. Jiné speciální teplotní senzory se používají pro dotykové měření teploty a montují se na povrch měřeného objektu. Tyto druhy měření teploty, stejně jako bezdotykové měření teplot, nejsou pro tuto aplikaci vhodné, a proto se jimi v rozboru nebudu zabývat.

Jako nejvhodnější považuji pro tuto aplikaci použití monolitického teplotního čidla s integrovaným digitálním výstupem. Toto řešení umožňuje jednodušší konstrukci této aplikace.

2.5 Mikrokontroléry

Jako řídicí jádro aplikace je nevhodnější použít mikrokontrolér (MCU), který umožňuje řídit aplikaci pomocí vhodné regulace a zároveň zabezpečovat indikaci, tj. zobrazení stavu a nastavení požadovaných hodnot.

Mikrokontrolér, někdy nazývaný jako jednočipový počítač, se od klasického procesoru odlišuje tím, že kromě samotného procesoru má kolem jádra integrovány periferie a další funkce, jako je paměť, oscilátor, analogově-digitální a digitálně-analogové převodníky nebo výstupy s pulzně-šířkovou modulací (PWM) či jiné periferie.

Mikrokontroléry můžeme dělit podle více kritérií. V první řadě podle použité architektury na mikropočítače s architekturou Von Neumannovou nebo Harvardskou. V dnešní době se pro zpracování signálů převážně využívá Harvardská architektura, která se vyznačuje oddělením paměti programu od paměti zpracovávaných dat (DSP procesory). Další možné dělení je podle použitého typu instrukčního souboru. Běžně používané jsou úplný instrukční soubor (CISC) a redukovaný instrukční soubor (RISC). Soubor typu RISC se vyznačuje tím, že zpracovává více jednoduchých instrukcí než jednu složitou, jak je tomu u instrukčního souboru CISC, čímž dosahuje rychlejšího zpracování dat [7].

Mikrokontroléry lze také rozlišovat podle velikosti zpracovávaného binárního slova a to na 8 bitové, 16 či 32 bitové MCU. Tato vlastnost vypovídá o tom, jak velké binární slovo je mikrokontrolér schopen najednou zpracovat. Nezbytnou informací pro výběr je čas potřebný na jednu instrukci. Dále pak je důležitým prvkem při výběru velikost a typ paměti, počet vstupů a výstupů, typ a počet AD a DA převodníků. Další významnou vlastností je počet vývodů (pinů).

U analogově-digitálního převodníku je hlavním kritériem s jakou chybou převodník převádí v jednotkách LSB. U DA převodníku je nejdůležitější, jaké jsou výstupní parametry a chyby převodu a také linearita výstupu, případně jaká je maximální napěťová úroveň.

Dalším, i když nikoliv tak důležitým (z hlediska funkčnosti), je systém programování a dostupnost softwarového vybavení, jako je vlastní programovací prostředí a další ladící prostředky, či typ pouzdra, ve kterém je jednočipový počítač proveden, případně jaká je napěťová úroveň, kterou využívá na výstupech.

Konkrétní parametry mikrokontroléru, který byl využit v konstruované aplikaci, jsou popsány v kapitole 3.2.2.

3 Vlastní řešení projektu

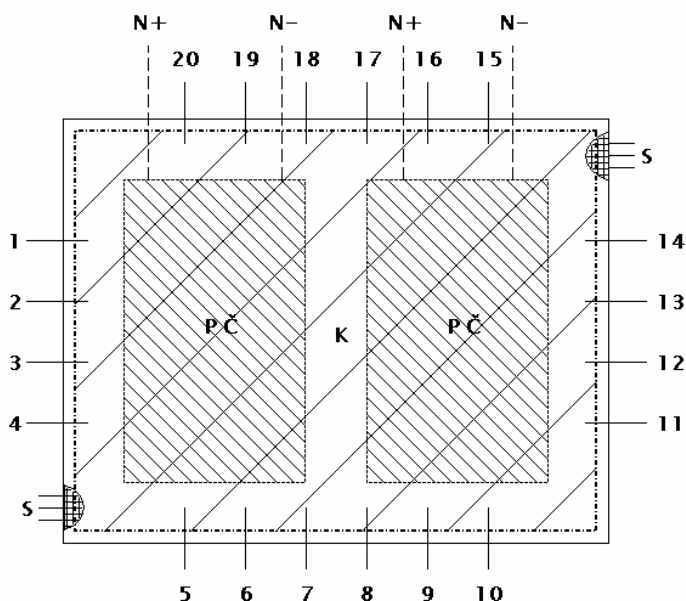
Součástí této kapitoly je deskripce konstrukčního řešení, které bylo zvoleno pro zpracování projektu. Kapitola je rozdělena podle klasického řešení konstrukčního návrhu na konstrukci mechanickou, elektrickou a programovou. Struktura členění podle časového hlediska vykonávaných prací nebyla zvolena z důvodu prolínání jednotlivých konstrukčních úkonů, které se na vyvíjené aplikaci prováděly.

3.1 *Mechanická konstrukce*

3.1.1 *Konstrukce chladicího prostoru*

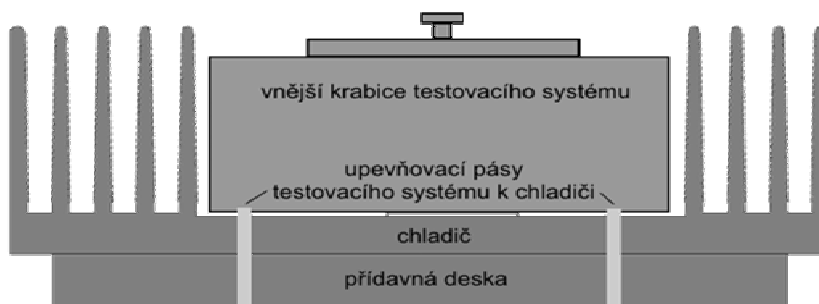
Jako první byl zkonstruován chladicí prostor, v němž mají probíhat vlastní testy obvodů. Testovacím prostorem je pocínovaná plechová krabička o rozměrech $92 \times 67 \times 22$ mm opatřená 20 vývody pro připojení testovacích vodičů testovaného obvodu (Obr. 5). Díky těmto vývodům je maximální možná velikost testovaného elektronického obvodu omezena na velikost $75 \times 55 \times 20$ mm. Jednotlivé vývody jsou očíslovány, viz tabulka Tab. 1. Jako vývodů je použito různých typů vodičů. Deset vodičů je stíněno, čtyři vodiče jsou v provedení koaxiální kabel a 3×2 vývody jsou použity pro napájení testovaného obvodu. Napájecí vodiče jsou měděná lanka o průměru 1,5 mm. Stíněné vodiče mají stínící obal vyvedený na krabičku. Koaxiální kabely mají stínící žílu též připevněnou na bok plechové krabičky. Toto řešení bylo zvoleno z důvodu úspory vstupně-výstupních konektorů. Ve dvou rozích jsou upevněna čidla teploty. Na spodní části krabičky jsou připevněny dva páry Peltierových článků typu TEC – 12703 o rozměrech $40 \times 40 \times 4,7$ mm chladicí stranou do vnitřního prostoru krabičky. Maximální hodnoty napájení jsou 12 V a 3 A na článek. V celém povrchu dna krabičky je umístěna keramická deska, která zajišťuje odvod tepla z celé plochy dna krabičky rovnoměrně. Vnější strana spodní části je opatřena nátěrem z vytvrzené izolační polyuretanové pěny Makroflex. Výrobce uváděná nejnižší teplota použitelnosti je -10 °C. Celý takto vytvořený komplet je umístěn do plastové krabice, která má rozměry $160 \times 140 \times 60$ mm. Součástí spodní strany plastové krabice je otvor, který slouží pro odvod tepla od Peltierových článků do chladiče. Ve víku plastové krabice je zhotoven otvor pro přístup do testovacího prostoru. Vodiče vycházející z plechové krabičky jsou vyvedeny vně plastové krabice pro zapojení na zdířky, které jsou na čele přístrojové skříně. Vnitřní prostor je vyplněn stejnou polyuretanovou těsnicí pěnou. Důvod použití izolační pěny je zajištění co nejmenšího ovlivnění testovacího prostoru okolní teplotou a tím zaručení bezproblémového dosažení a udržení požadované teploty uvnitř. Víčko plechové krabičky je upevněno na

plastový kvádr. Vnitřek je též vyplněn stejnou izolační pěnou. Pro snadnou manipulaci je víko opatřeno úchytem. Fotografie sestaveného chladicího systému jsou v příloze 1.



Obr. 5: Schématické uspořádání vnitřku testovacího prostoru, půdorys

kde N+, N- jsou přívody napájení Peltierových článků (PČ), S – teplotní čidlo, K – keramika, 1 až 20 – jednotlivé vývody. Číslo vývodu, jeho provedení a typ konektoru na čelní straně přístrojové skříně jsou shrnuty v tabulce Tab. 1.



Obr. 6: Schématické znázornění sestaveného chladicího systému

Důležitým prvkem je dobré chlazení teplé strany Peltierových článků. Dostatečné chlazení umožní dosažení nízké teploty. Proto je na spodní části krabíčky připevněn hliníkový chladič, který byl po provedených měřeních (viz kapitola 4) doplněn o přídavnou desku širokou 20 mm. Pro dokonalý přenos tepla od článku do chladiče je prostor mezi těmito částmi natřen teplovodivou silikonovou pastou s tepelnou vodivostí $0,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Obrázek celého sestavného chladicího systému je na obrázku Obr. 6.

Jako teplotního čidla je použit obvod DS18B20 od firmy Maxim¹. Podrobnější popis a vlastnosti tohoto čidla jsou v podkapitole 3.2.1.

Tab. 1: Provedení jednotlivých vývodů krabičky

Číslo vývodu	Typ připojení	Konektor	Číslo vývodu	Typ připojení	Konektor
1	stíněný vodič	přístrojový – zelený	11	koaxiální kabel	BNC
2	stíněný vodič	přístrojový – zelený	12	koaxiální kabel	BNC
3	koaxiální kabel	BNC	13	stíněný vodič	přístrojový – zelený
4	koaxiální kabel	BNC	14	stíněný vodič	přístrojový – zelený
5	stíněný vodič	přístrojový – zelený	15	napájení –	přístrojový – černý
6	stíněný vodič	přístrojový – zelený	16	napájení +	přístrojový – červený
7	stíněný vodič	přístrojový – zelený	17	napájení –	přístrojový – černý
8	stíněný vodič	přístrojový – zelený	18	napájení +	přístrojový – červený
9	stíněný vodič	přístrojový – zelený	19	napájení –	přístrojový – černý
10	stíněný vodič	přístrojový – zelený	20	napájení +	přístrojový – červený

3.1.2 Přístrojová skříň

Přístrojová skříň je zkonstruovaná z ocelového plechu 1,5 mm silného. Sestavený chladicí systém je dovnitř skříně namontován pomocí čtyř ocelových distančních sloupů o průměru 17 mm a připevněn na dno skříně. Velikost distančních sloupů byla zvolena z důvodu váhy a stability chladiče. Ve dně je dále na osmi distančních sloupcích upevněna dvojice desek plošných spojů s elektronikou a zdrojem napájení elektroniky.

Na levém boku (z pohledu od čela přístrojové skříně) jsou ve výši žebér chladiče vyraženy otvory pro dva ventilátory o průměru 60 mm, které zajišťují nucenou cirkulaci vzduchu přes žebra chladiče. Otvory ventilátorů jsou opatřeny bezpečnostní mřížkou. Ve spodní části je tato bočnice opatřena 32 obdélníkovými otvory se zaoblenými hranami pro vstup vzduchu ke spínanému zdroji a deskám plošných spojů.

¹ Dříve se společnost jmenovala Dallas Semiconductor. Dnes je součástí společnosti Maxim Integrated Products, Inc. (dále v textu uváděna jako Maxim).

Vrchní a pravý boční díl jsou vyrobeny z děrovaného plechu o stejné tloušťce jako plechy ostatní. Děrování umožňuje dostatečný únik teplého vzduchu z prostoru skříně. Otvor pro vstup do prostoru pro testovaný systém je lemován ochrannou gumou, která zajišťuje obsluhu bezpečnou manipulaci s testovaným vzorkem vkládaným do testovacího boxu. Zadní díl skříně obsahuje síťový vstup a zevnitř skříně je na zadní stěně připevněn spínaný zdroj pro napájení článků.

Čelní díl má otvory pro připevnění displeje, klávesnice, síťového vypínače a konektorů, ke kterým se bude připojovat testovaný elektronický obvod.

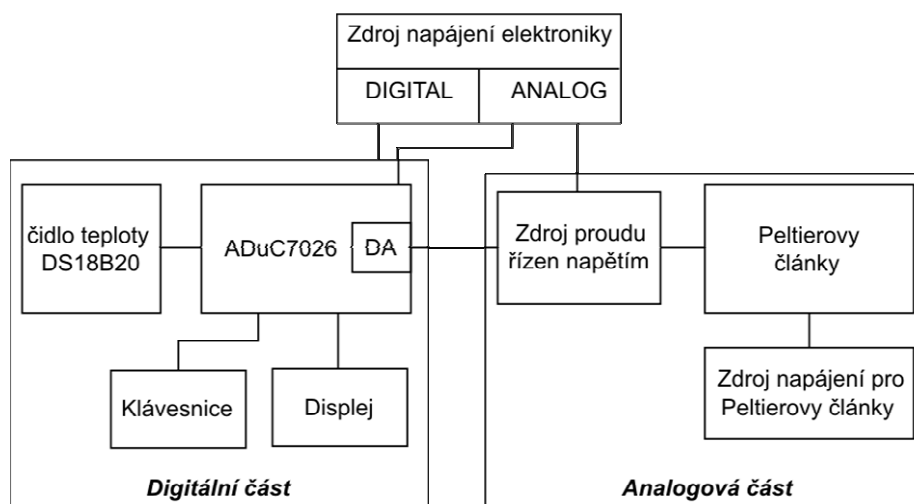
Celá přístrojová skříň má nátěr béžové barvy, který zajišťuje jak estetickou funkci tak antikorozi úprava povrchu. Nátěr nemá izolační charakter ve smyslu elektrické bezpečnosti.

Všechny části přístrojové skříně jsou k sobě spojeny pomocí šroubů $M3 \times 10$, tím se skříň stává samonosná, tj. není použito žádných nosníků. Závit pro šrouby není vyřezán do plechu, ale v místě spoje je speciální závitový nýt, který má dostatečnou délku závitu pro dobré spojení.

Výkresová dokumentace je v příloze 2 a fotografie jsou v příloze 1.

3.2 Elektrická konstrukce

Tato část je věnována elektronické konstrukci zařízení, které je stejně důležité jako konstrukce mechanická. Blokové schéma elektronické části aplikace je znázorněno na obrázku Obr. 7. Jednotlivé bloky jsou popsány v následujících částech včetně nutných výpočtů a komponent použitých pro konstrukci zařízení. Celkové schéma a schéma zdrojů včetně navržených desek plošných spojů jsou uvedeny v příloze 3 a fotografie v příloze 1.



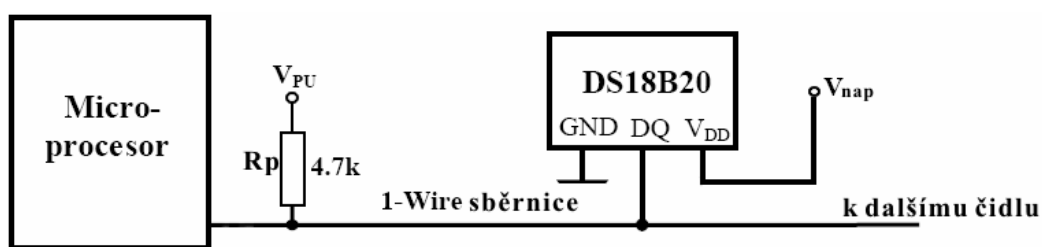
Obr. 7: Blokové schéma elektronické části zařízení

3.2.1 Čidlo teploty DS18B20

Pro typ použitého čidla byla požadována co největší přesnost a malý rozměr. Jako vhodné se ukázalo použití čidla DS18B20, které je v pouzdře TO92 se třemi vývody (napájení, datový vodič a zem) a měří s přesností $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Rozsah teplot je od $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+125\text{ }^{\circ}\text{C}$. Výrobce garantovaná přesnost je pro rozsah teplot $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$. Čidlo je digitální teploměr měřící ve stupních Celsia. Má 9 – 12-bitový nastavitelný převodník. Komunikace s okolím probíhá pomocí sběrnice 1-Wire, která vyžaduje pouze jeden datový vodič ke komunikaci s řídicím mikrokontrolérem. Z tohoto důvodu není nutné konstruovat převodník. Každé čidlo obsahuje jedinečné 64 bitové identifikační číslo, které umožňuje připojení všech čidel na jednu datovou sběrnici. Této možnosti není nutné v aplikaci využít, protože obě čidla mají vlastní vstupně-výstupní bránu (pin) na mikrokontroléru.

Rozlišení čidla je uživatelsky definovatelné v rozmezí 9 až 12 bitů. To umožňuje nastavit, s jakým krokem teplot čidlo měří. Jednotlivé kroky se pohybují v rozmezí $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ u rozlišení 9 bitů až po $0,0625\text{ }^{\circ}\text{C}$ při rozlišení 12 bitů. Výchozím nastavením je 12 bitů a je zachováno i při použití v termostatu.

Čidlo je možné provozovat ve dvou napájecích módech. První možnost je napájení pomocí zdroje na napájecí vývod obvodu (pin 3, značen V_{DD}). Druhou možností je provozovat čidlo v tzv. parazitním napájecím módu, kdy je pro napájení využito vlastní datové sběrnice. V této aplikaci je použita první metoda napájení. Principiální schéma zapojení je na obrázku Obr. 8. Rezistor $4,7\text{ k}\Omega$ je připojen na napětí, které posunuje sběrnici do logické úrovně jedna. Toto napětí slouží pro napájení digitálních obvodů. V této aplikaci se používá $3,3\text{ V}$.



Obr. 8: Princip zapojení čidla teploty, [8] upraveno

Měření teploty

Po připojení napájení (zapnutí) nebo je-li čidlo ve stavu klidu a má nízké napájení, se inicializuje měření teploty a analogově digitální převod. Pro přečtení změřené teploty musí mikrokontrolér vyslat příkaz pro zpracování získané informace. Následně jsou zpracována

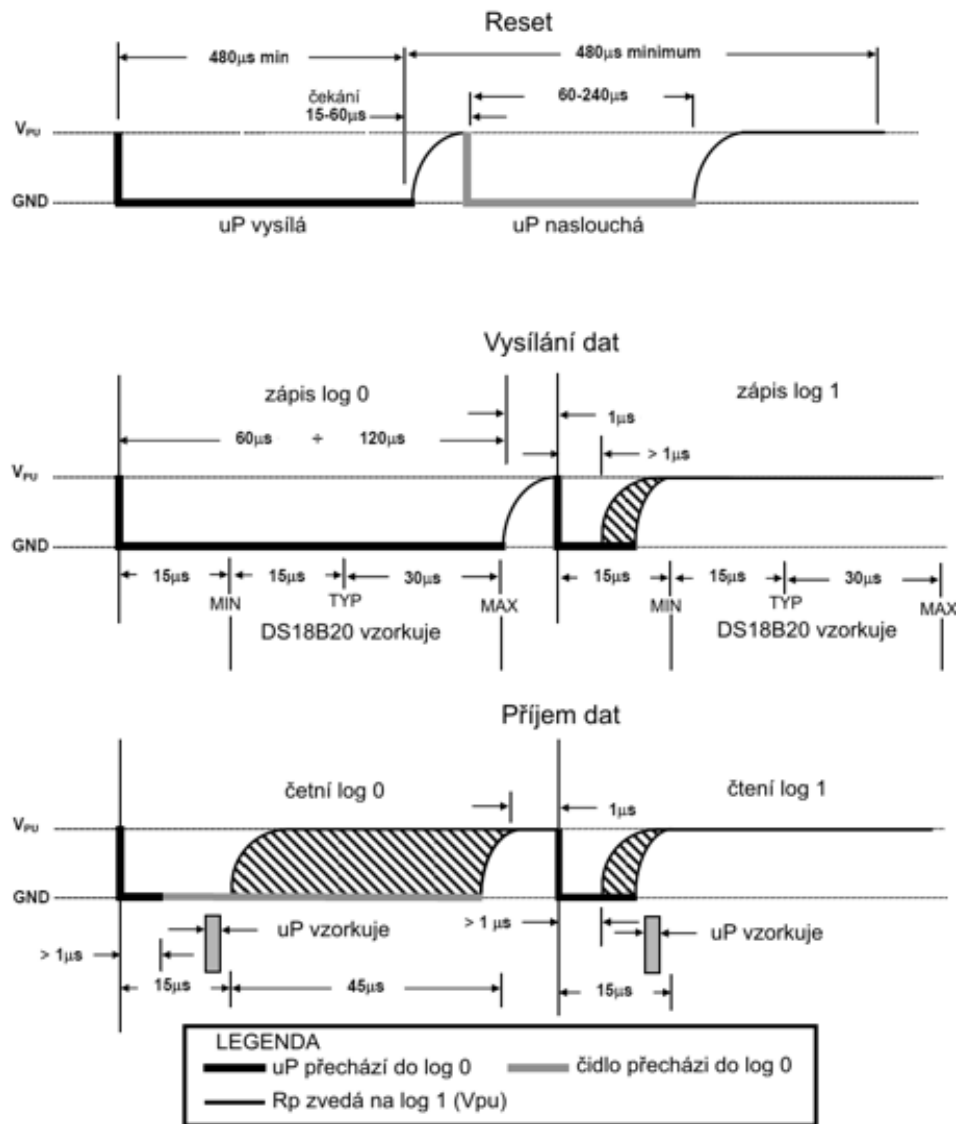
data uložena do dvoubajtového teplotního registru v zásobníkové paměti. Po ukončení činnosti je čidlo přepnuto do klidového stavu. Po dobu konverze vysílá čidlo logickou 0. Po skončení konverze je vysílána logická jednička. Teplotní data jsou uloženy jako 16-ti bitové číslo se znaménkem, které je prodloužené o dvojkový doplněk v teplotním registru. Znaménkové bity indikují, je-li teplota kladná nebo záporná. Pro zápornou teplotu je použita 1. U teplot větších než nula stupňů Celsia včetně je použita 0. Při 12-ti bitovém rozlišení je vnitřní paměť zcela využita.

Sběrnice 1–Wire

Tento typ datové sběrnice byl navržen firmou Maxim. Umožňuje připojit více zařízení k mikrokontroléru pomocí dvou vodičů. Jeden vodič je datový a druhý je společná zem. Zařízení se připojují paralelně k těmto vodičům. Komunikace je rozdělena na několik částí.

Zahájení komunikace je provedeno pomocí resetovacího pulzu, který datovou sběrnici přivede na logickou 0. Poté je sběrnice uvolněna a pomocí rezistoru R_p (viz Obr. 8) je vyzdvižena do logické jedničky. Mezitím mikrokontrolér monitoruje sběrnici. Je-li ke sběrnici připojeno čidlo, je detekována vzestupná hrana a po časové prodlevě je logická hodnota přivedená mikrokontrolérem na sběrnici na hodnotě 0. Pokud je čidlo správně inicializováno, může být zahájen přenos informací.

Data jsou vysílána v časových úsecích. V jednom úseku je přijat nebo vyslán jeden bit informace. Mezi úseky je mezera o 1 μs . Celkem je používáno čtyř časových úseků: zápis 1, zápis 0, čtení 1 a čtení 0. Zápisové úseky přenáší informaci od mikrokontroléru k čidlu, čtecí úseky přenášejí data od čidla k řídicímu členu. Všechny úseky jsou provedeny na základě informací mikrokontroléru. Průběh komunikace po sběrnici i s časovými údaji je na obrázku Obr. 9.

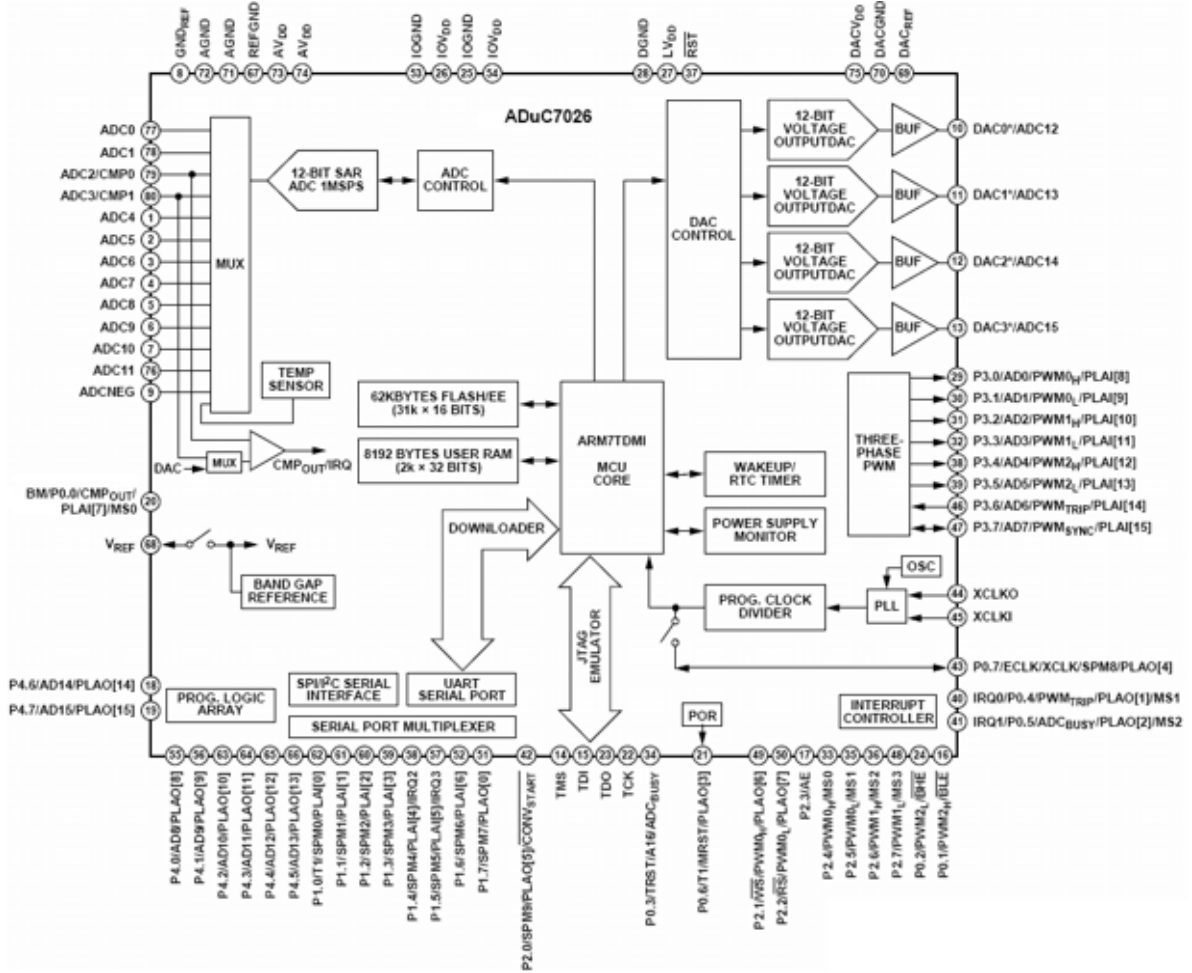


Obr. 9: Časové průběhy komunikace po datové sběrnici od teplotního čidla, převzato z [8] a upraveno

3.2.2 Mikrokontrolér ADuC7026

Použitý mikrokontrolér od firmy Analog Device byl vybrán pro jeho instrukční soubor typu RISC (jádro ARM7 TDMI) s 41 MIPS. Důležité parametry ADuC7026 jsou 4 integrované dvanáctibitové DA převodníky s relativní přesností ± 2 LSB, nelinearitou ± 1 LSB, ofsetem 15 mV a výstupní napětí je v rozmezí 0 – 3,3 V při použití externího napájení. MCU má 12 AD převodníků které mají rychlost 1 MSPS s chybou ± 1 LSB, které v aplikaci nejsou využity. Počet digitálních vstupně výstupních bran je 40. Mikrokontrolér obsahuje integrovanou 62 kB flash paměť a také 8 kB. Programovat lze přes rozhraní JTAG nebo po sériové lince. Mikrokontrolér pracuje na frekvenci 41,78 MHz s externím krystalem

s frekvencí 32,768 kHz. Blokové schéma je na obrázku Obr. 10. Další periférie jsou pulzně-šířkové výstupy, sériová rozhraní a programovatelné logické pole.

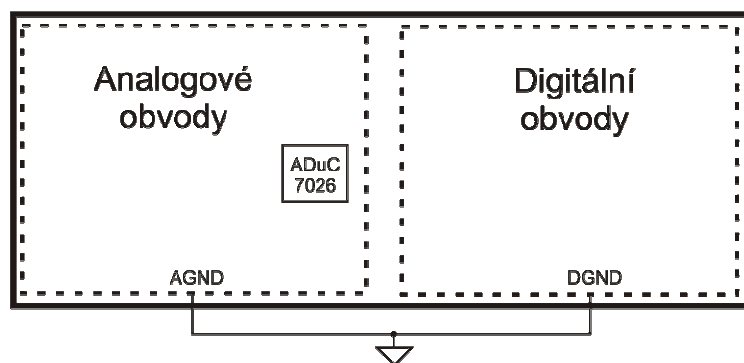


Obr. 10: Blokové schéma mikrokontroléru, [9]

Procesor zpracuje 41 milionů instrukcí za vteřinu (41 MIPS), tj. čas jedné instrukce (T_{inst}) je 23,4 ns, viz rovnice (5), kde N je počet instrukcí v MIPS.

$$T_{inst} = \frac{1}{N \cdot 10^6} \frac{1}{41 \cdot 10^6} = 2,43 \cdot 10^{-8} \text{ s} = \underline{\underline{23,4 \text{ ns}}} \quad (5)$$

Napájení tohoto mikrokontroléru je dvojí – analogové a digitální. Velikost obou napětí je 3,3 V. Důležité je, jak uvádí výrobce, dobře oddělit analogovou a digitální část. To je zabezpečeno dvojím napájením z napájecí části a umístěním analogové části obvodu, jak je zobrazeno na obrázku Obr. 11.



Obr. 11: Rozmístění analogových a digitálních součástek, [9] upraveno

Dalším důvodem výběru byla dostupnost a programové vybavení. Pouzdro procesoru je typu LQFP s osmdesáti vývody. Velký počet vstupně výstupních bran umožnilo pohodlné připojení periferních zařízení, jako jsou displej a tlačítková klávesnice, které slouží k zobrazení stavu zařízení a jeho nastavení uživatelem.

3.2.3 Řízení Peltierových článků

Řízení Peltierových článků je provedeno po dvojicích. Svůj řídicí obvod mají zvlášť články uvnitř a zvlášť články umístěné vně testovacího prostoru. K řízení je použit zdroj proudu řízený napětím [10]. Jeho schéma je na obrázku Obr. 12. Toto řešení je vhodné zejména proto, že výstup z DA převodníku mikrokontroléru je napěťový a také proto, že napájení Peltierových článků pro plný výkon vyžaduje vyšší napětí (i proud) než dokáže poskytnout výstup DA převodník.

Výstupní napětí z digitálně-analogového převodníku vstupuje do neinvertovaného vstupu operačního zesilovače. K řízení proudu je použito MOSFET tranzistoru, který řídí proud mezi elektrodami drain a source. K elektrodě drain je připojen záporný pól sériového spojení Peltierových článků. Kladný pól této dvojice je připojen na napájecí napětí 24 V. Velikost proudu (I_{TEC}) protékajícím Peltierovými články se rovná velikosti proudu protékajícím přes rezistor R_3 . Velikost proudu se vypočítá podle vztahu (6).

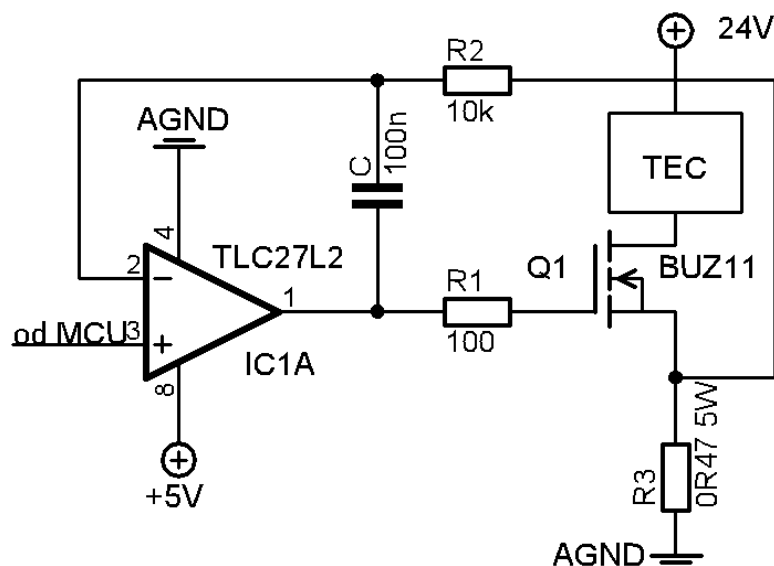
$$I_{TEC} = I_{R_3} = \frac{U_{DA}}{R_3} \quad (6)$$

Proudy protékající skrze rezistory R_1 a R_2 jsou v podstatě zanedbatelné, a tudíž nemají za následek snižování napětí v obvodu. Záporná zpětná vazba určuje velikost napětí na elektrodě source tranzistoru. Kondenzátor C_1 slouží jako filtrační.

Použitý operační zesilovač je TLC27L2. Tento operační zesilovač vyrábí firma Texas Instruments, je rail-to-rail a nevyžaduje symetrické napájení. Nesymetricky napájený

operační zesilovač je použit z důvodu, že v případě použití operačního zesilovače se symetrickým napájením by bylo nutné konstruovat navíc symetrický napájecí zdroj.

Tranzistor BUZ11 je N – MOSFET s indukovaným kanálem v pouzdře TO220. Toto pouzdro umožňuje jednoduché připojení na chladič, kterým je tranzistor opatřen. Chladiče odvádějí přebytečné teplo, které vzniká procházejícím proudem při řízení článků.



Obr. 12: Řídící část – zdroj proudu řízen napětím, TEC je řízená dvojice Peltierových článků

3.2.4 Napájení

V zařízení je zapotřebí napětí o různých velikostech a proudové zatížitelnosti, konkrétně dvakrát 3,3 V pro napájení mikrokontroléru, 5 V pro napájení operačních zesilovačů a zdroj 24 V, který dodá minimálně 6A pro napájení Peltierových článků.

Zdroj pro napájení článků je nezávislý, komerčně vyráběný, spínaný zdroj 24 V, 6,3 A. Tento zdroj je použit také pro napájení ventilátorů. Zdroj nízkých napětí je klasický transformátorový zdroj.

V zapojení zdroje pro napájení elektroniky je použit hermetický transformátor do desky plošných spojů se dvěma sekundárními vinutími. Jedno vinutí je použito pro vytvoření digitálního napájecího napětí a druhé vytváří napájecí napětí analogové. K usměrnění obou větví je použit diodový můstek dimenzovaný na proud 1,5 A, který je zcela dostatečný k velikosti odebíraného proudu v desítkách mA. Usměrněné napětí je filtrováno elektrolytickým kondenzátorem o kapacitě 2,2 mF. Potřebné napětí je vytvářeno stabilizátorem LM317T v katalogovém zapojení, viz [11]. Z analogové větve 5 V je odbočka

na další stabilizátor, který zabezpečuje tvorbu analogového napětí 3,3 V. Transformátor má vstup jištěn 80 mA pojistkou.

Výpočet pojistky, podle [12], vztah upraven pro dvě sekundární vinutí.

$$I_1 = \frac{2P_s}{U_1 \cdot \eta} = \frac{(U_2 \cdot I_2) \cdot 2}{U_1 \cdot \eta} = \frac{(12 \cdot 0,417) \cdot 2}{230 \cdot 0,8} = 0,055 \text{ A} = \underline{\underline{55 \text{ mA}}} \quad (7)$$

Výpočet velikosti filtračního kondenzátoru podle [12].

$$C = \frac{I_m}{2f(U_m - U_x)} = \frac{0,417}{2 \cdot 50 \cdot (15,3 - 12)} = 0,0013 \text{ F} = \underline{\underline{1,3 \text{ mF}}}, \quad (8)$$

kde C je kapacita kondenzátoru [F],

I_m je maximální odebíraný proud z transformátoru [A],

f je frekvence střídavého napětí [Hz], pro elektrickou síť 50Hz,

U_m je maximální výstupní napětí transformátoru [V],

U_x je minimální výstupní napětí transformátoru při maximální zátěži [V].

Pro výpočet rezistorů pro nastavení požadované úrovně stabilizovaného napětí je použit vztah z katalogového listu [11]. Pro výpočet byla použita iterační metoda. Hodnoty R_1 a I_{adj} uvádí katalogový list obvodu. Ukázka výpočtu je uvedena pro stabilizátor IO1, viz schéma v příloze č. 1. Hodnoty rezistorů pro další stabilizátory byly vypočítány stejnou metodou.

Výsledné vypočítané napětí sice není přesně požadované (3,3 V), ale hodnota se odchyluje maximálně o dvě setiny voltu. Při kontrolním měření výpočtu se dosáhlo hodnoty 3,29 V a obě hodnoty, jak vypočítanou, tak naměřenou, lze považovat za dostačující vzhledem k tolerancím součástek² u všech počítaných, resp. měřených napětí, které jsou aplikací požadovány.

$$U_{výst} = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) + I_{adj} R_2 = 1,25 \cdot \left(1 + \frac{390}{240}\right) + 100 \cdot 10^{-6} \cdot 390 = \underline{\underline{3,28 \div 3,3 \text{ V}}} \quad (9)$$

² Přesné hodnoty tolerancí vzhledem k množství použitých součástek nejsou uvedeny. Přesné hodnoty jsou uvedené v katalogových listech použitých součástek.

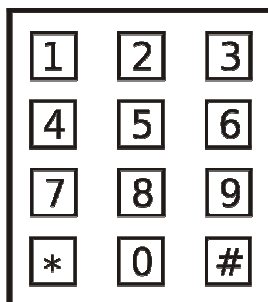
Součástí desky plošného spoje zdroje napájení je i stabilizace napětí pro napájení ventilátorů ze spínaného zdroje + 24 V. Jednotlivé ventilátory jsou připojeny pomocí konektorů.

3.2.5 V/V zařízení

Přístroj má pro zajištění zobrazování stavu použit alfanumerický monochromatický dvouřádkový LCD displej se šestnácti znaky na řádek. Displej je ovládán standardním řadičem HD44780U od firmy HITACHI. Ke komunikaci s mikrokontrolérem používá osmi bitovou komunikaci. Displej obsahuje zelené podsvícení pro lepší čitelnost zobrazovaných znaků.

Vstupní periferie je v podobě klávesnice s dvanácti tlačítky. Každé tlačítko má samostatnou vstupní bránu na mikrokontroléru. Klávesnice slouží k nastavení požadované teploty, na kterou má být testovací prostor temperován. Hodnota se zadává pomocí tlačítek s číslem. Hvězdička (*) slouží pro zadání desetinné čárky a klávesou křížek (#) uživatel zadanou volbu potvrdí. Rozložení tlačítek na klávesnici je na obrázku Obr. 13.

Základní postup manipulace se zařízením je v příloze 4.

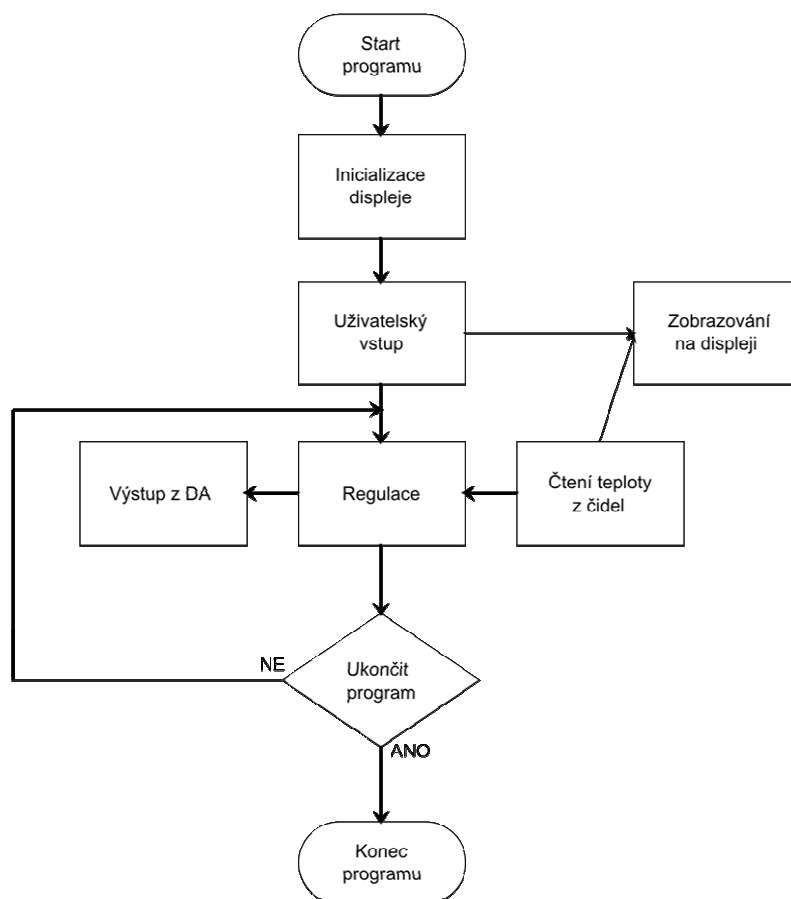


Obr. 13: Rozložení tlačítek klávesnice

3.3 Program

Řídící program pro mikrokontrolér je napsán pomocí programu μ Vision3³. Jako jazyk pro zdrojový kód byl použit programovací jazyk C. Kompletní zdrojový kód a programové soubory jsou součástí elektronické přílohy. Program má za úkol zajišťovat řízení a funkci celého zařízení. Jeho primárním úkolem je výpočet regulace. K dalším činnostem, které software zabezpečuje, patří zajištění uživatelského vstupu, tj. volba požadované teploty zadané pomocí klávesnice. Nezbytnou součástí je zobrazení stavu přístroje pomocí LCD displeje. Blokové schéma programu je na obrázku Obr. 14, tučně je vyznačena hlavní trasa programu.

³ Výrobce softwaru je firma Keil Elektronik GmbH / Keil Software, Inc. Verze programu je 3.60



Obr. 14: Blokové schéma programu

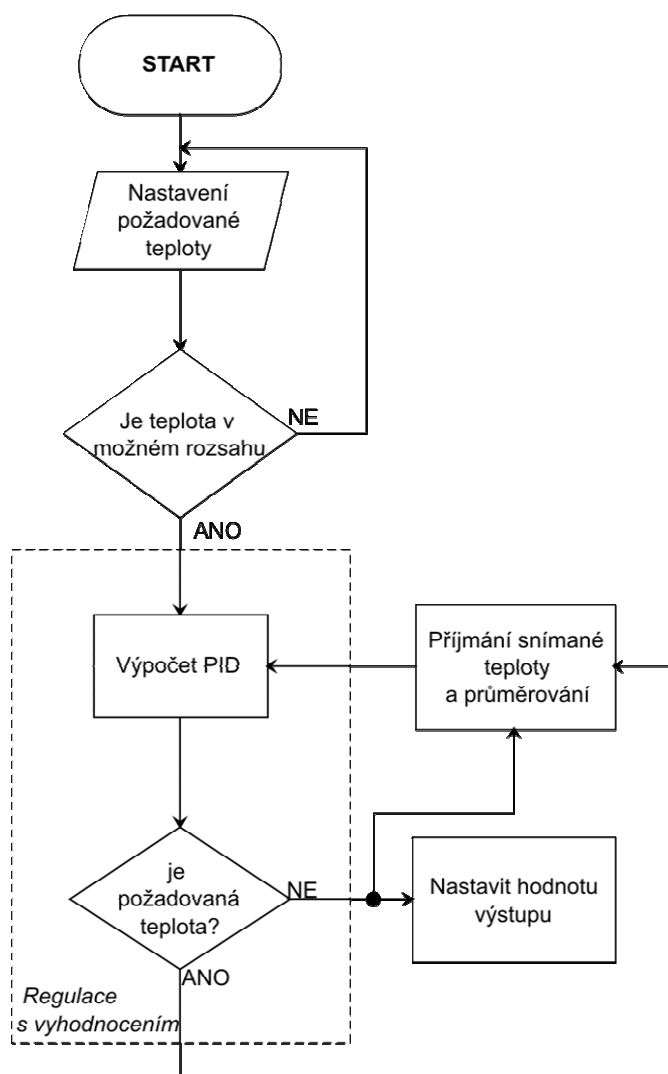
Program je členěn na několik vlastních funkcí, které se vzájemně volají a to ve dvou základních souborech⁴. Jeden soubor (*main.c*) je hlavní a obsahuje veškeré funkce pro nastavování a řízení, vyjma funkcí pro obsluhu displeje. Tyto podpůrné funkce jsou v druhém souboru (*lcd.c*). Funkce pro displej byla napsána pomocí literatury [13], ze které se zdrojový kód přizpůsobil pro zapojení použité v tomto konstruovaném zařízení. Modifikace spočívala především v jiném adresování portů, které obsluhují LCD displej. Obslužné funkce pro displej jsou připojeny do hlavního souboru pomocí hlavičkového souboru (*lcd.h*).

V hlavním souboru jsou obsaženy funkce pro práci s čidly teploty, obsluhu klávesnice a pro výpočet PID regulace. Při psaní funkcí pro práci se senzory teploty byla použita literatura [8] a [14]. Podfunkce pro ovládání čidel mají za úkol zabezpečit komunikaci se senzory teploty a načíst ji do paměti mikrokontroléru pro její další zpracování. V první řadě pro regulaci, ale také pro zobrazení na alfanumerickém displeji. Podrobněji se komunikací teplotních senzorů s okolím zabývá kapitola 3.2.1.

⁴ Myšleny jsou pouze soubory, které jsem napsal. Hlavičkové soubory nejsou ve výčtu zahrnuty.

Regulační výpočet je obsažen ve funkci *PID*. Jedná se o zápis diskrétní formy PID regulace tak, jak je popsán v kapitole 2.2.2. Konstanty regulátoru jsou napevno zakomponovány do programu.

Program má následující průběh. Po zapnutí přístroje displej zobrazí výzvu uživateli, aby zadal požadovanou teplotu, na kterou chce vychladit testovací prostor. Zadané číslo vstupuje společně s hodnotami z teplotních senzorů, které jsou průměrovány do algoritmu pro výpočet regulace. Hodnota vypočítané odchylky určuje velikost výstupního napětí z DA převodníku pro řízení zdroje proudu, který reguluje proud Peltierovými články. Toto napětí může nabývat hodnot 0,1 V až 3,2 V. Nastavená a aktuální změřená teplota se zobrazuje na displeji přístroje. Vývojový diagram regulační smyčky je na obrázku Obr. 15.



Obr. 15: Vývojový diagram regulační smyčky

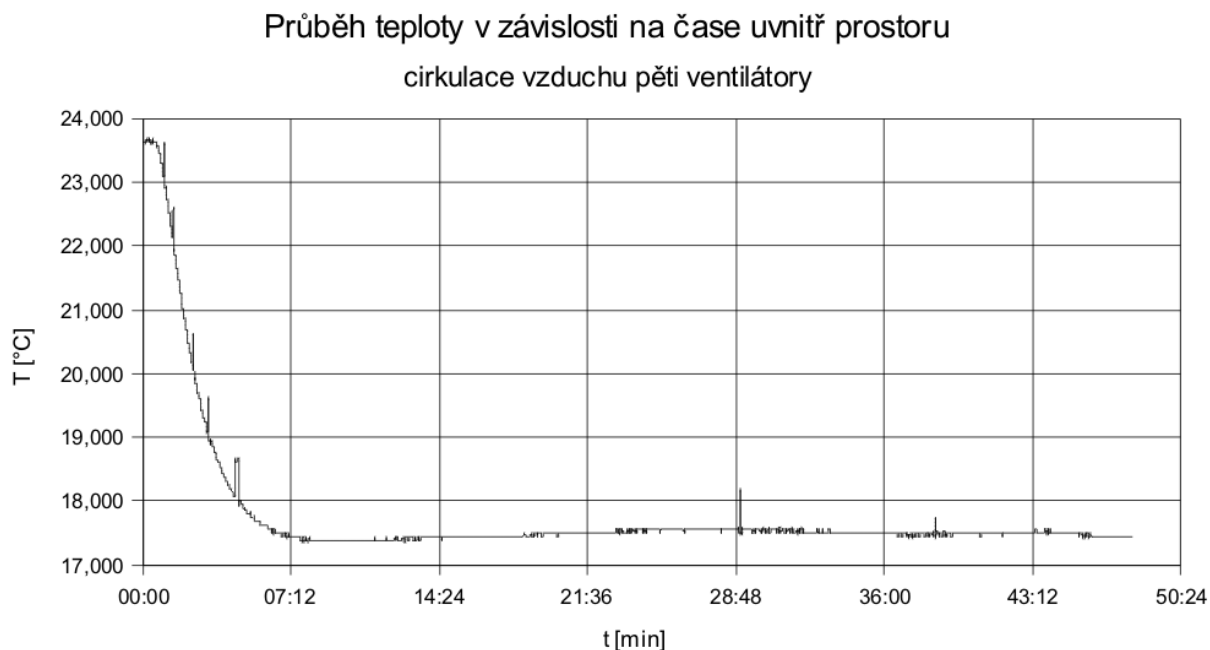
4 Měření

Na sestavené části testovacího prototypu (komplet plechové a plastové krabice upevněné na chladič) byla provedena měření ke zjištění účinnosti chlazení a možné tepelné dosažitelnosti uvnitř prostoru.

Měření probíhalo pomocí rozhraní USB na 1–Wire a obslužného programu OneWireViewer dodávaného firmou Maxim. Tento program umožňuje uložit naměřené hodnoty. Napájení Peltierových článků zabezpečovaly laboratorní zdroje Agilent E3613A a Hewlett Packard E3632A. Teplota okolí se pohybovala v rozmezí 20 – 25 °C. Celkem bylo provedeno 18 měření, z nichž jsou dále uvedeny pouze relevantní výsledky.

4.1 Měření na sestaveném chladícím prototypu

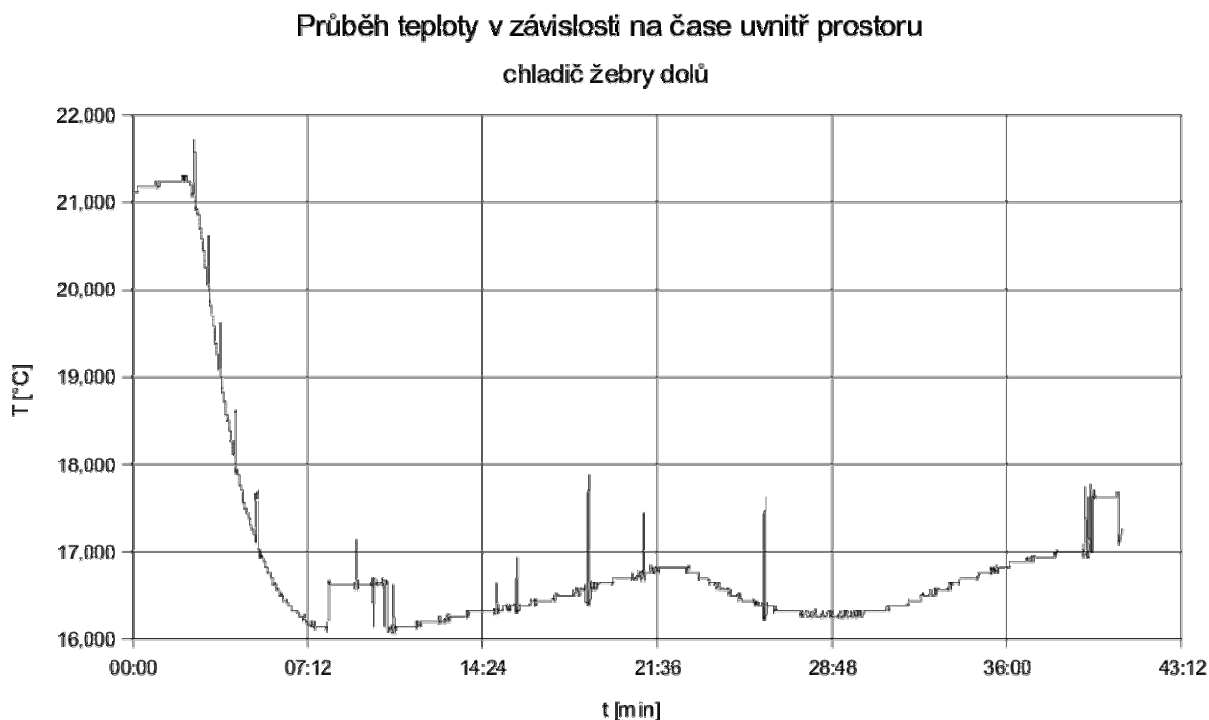
Byl použit chladič a dva paralelně elektricky zapojené Peltierovy články. Napájení článku bylo při zahájení měření na maximální hodnotě, tj. 12 V. Naměřený průběh je v grafu Obr. 16. Teplota okolí byla 24 °C. Ochlazování chladiče zabezpečovalo 5 ventilátorů. Čtyři byly připevněné na žebra, pátý ventilátor chladil místo styku článků a chladiče. Jako chladícího média se používal okolní vzduch. Množství ventilátorů ukázalo jak nejlépe tyto ventilátory upevnit na hliníkový chladič, aby zabezpečovali dostatečnou cirkulaci vzduchu.



Obr. 16: Cirkulace vzduchu pomocí 5 ventilátorů

Dosažené výsledky byly zcela nedostatečné ($17,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), proto bylo nutné přistoupit ke zjištění možných příčin, aby bylo možné dosáhnout lepších tepelných výsledků.

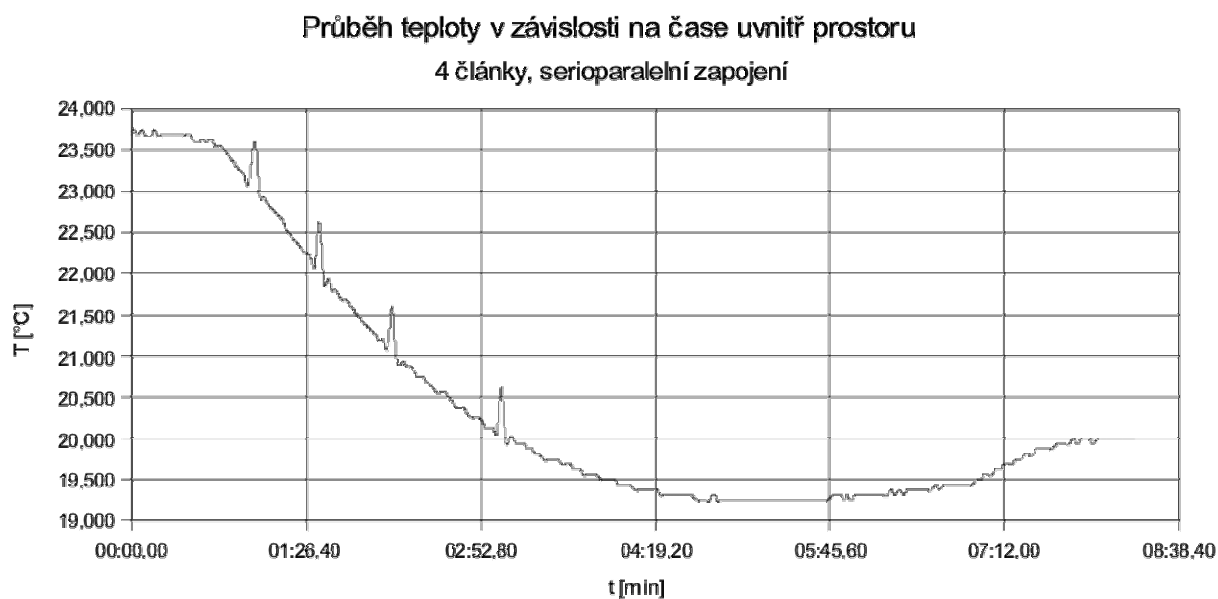
Měření bylo provedeno za následujících podmínek: Chladič byl orientovaný žebry dolů, z důvodu zajištění neprostupnosti tepla z chladiče přes izolační výplň do testovacího prostoru. Dále byly použity dva Peltierovy články elektricky zapojené paralelně a maximální napájení 12 V ihned při zahájení měření. Čtyři ventilátory umístěné na žebrech zajišťovaly nucenou cirkulaci vzduchu přes žebra chladiče.



Obr. 17: Chladič žebry dolů

Naměřené výsledky ukazují dosažení mírně lepší teploty než v předchozím měření a zjištění, že teplo prostupuje do testovacího prostoru. To ukázala krátká doba, po kterou se teplota udržela na dané hodnotě. Z tohoto důvodu se přikročilo k prodloužení vzdálenosti mezi chladičem a testovacím prostorem doplněním o dva Peltierovy články. Ty zabezpečují dostatečnou vzdálenost a umožňují dosáhnout lepšího průběhu teploty uvnitř prostoru. Vzniklý prostor vyplnila polystyrénová izolace.

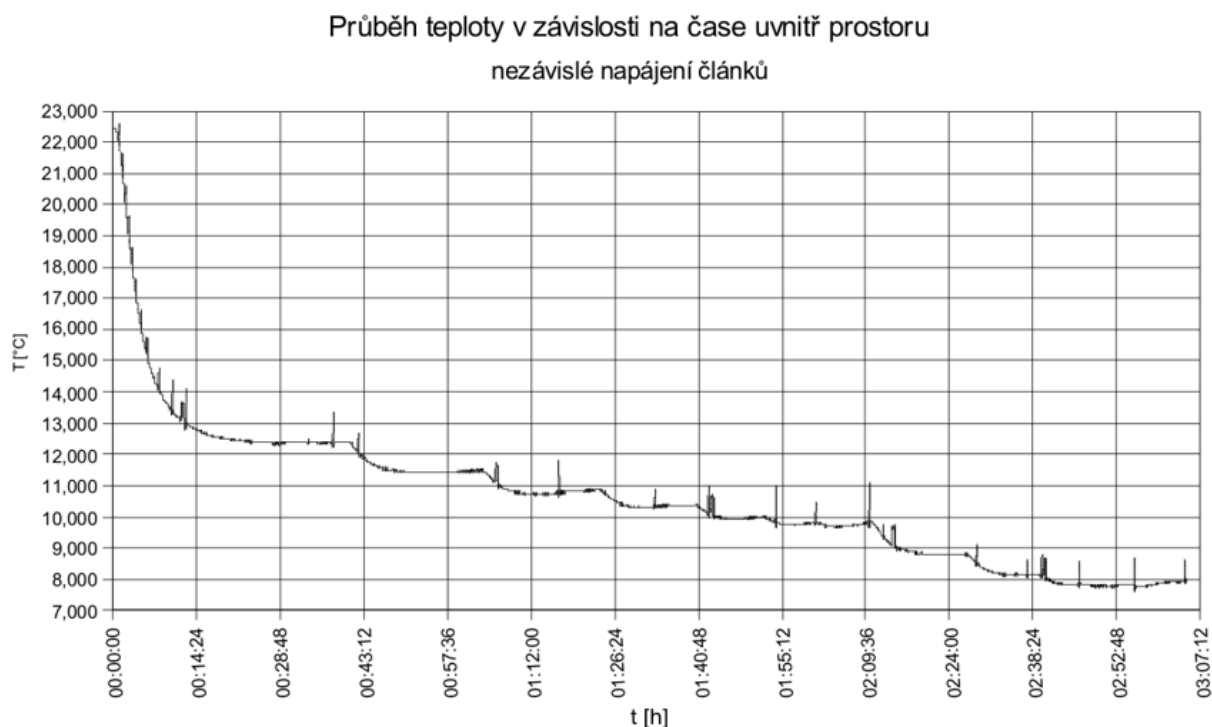
Měření probíhalo se čtyřmi Peltierovými články. Elektricky byly zapojené sérioparalelně. Toto zapojení bylo zvoleno z důvodu potřeby menšího výkonu napájecího zdroje. Napájení bylo maximální, tj. 24 V při začátku měření.



Obr. 18: Čtyři Peltierovy články, serioparalelní zapojení

Teplota 19,25 °C dosažená tímto měřením byla zcela nevyhovující. Příčinou takto vysoké teploty je napájení článků okamžitým maximálním napětím zajišťující plný výkon a nedostatečně velký chladič. Během krátké doby došlo k nasycení hliníkového chladiče teplem. Následovala další měření, ve kterých byla testována reakce článků na dodávaný výkon pomocí regulace napájecího napětí.

Poslední z provedených měření bylo provedeno se čtyřmi Peltierovými články. Každá dvojice článků byla napájena zvlášť a postupně bylo napětí zvyšováno. Přesné hodnoty ukazuje tabulka Tab. 2. Chladič byl doplněn o přídatnou hliníkovou desku širokou 20 mm přišroubovanou na spodní část chladiče.



Obr. 19: Čtyři články, nezávislé napájení a přídavná deska

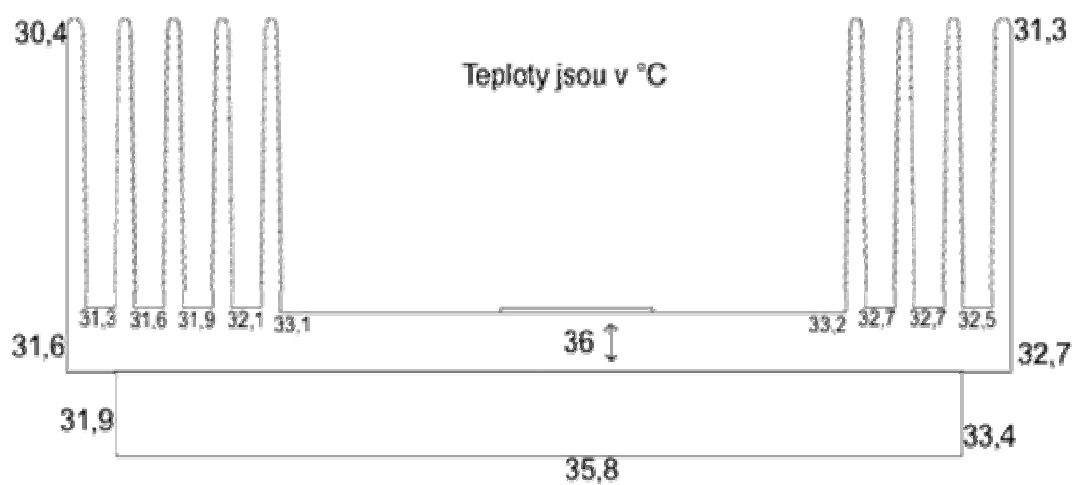
Použitím rozdílného napájení vnitřní a vnější dvojice Peltierových článků se podařilo dosáhnout minimální teploty 7,75 °C. Napájecí napětí bylo zvyšováno vždy, když se teplota ustálila na dosaženém lokálním maximu. V momentě kdy byly vnější články napájeny maximálním napětím, připojili se na napájení i články vnitřní a postupně se zvyšovala hodnota napětí po jednom voltu. Volbu napájet nejprve články vnější a až pak vnitřní byla zvolena proto, aby nedošlo k poškození vnějších článků teplem, které by vydávaly články vnitřní, pokud by bylo použito obráceného postupu.

Použitý způsob napájení je vhodný pro dosažení co nejmenší teploty, avšak doba po kterou chlazení probíhá, není zcela ideální. Při testování bylo dosaženo minimální možné teploty za dobu delší jak 3 hodiny. Přesný čas, kdy již nedoházelo k ochlazování ani k udržení teploty, ale k pozvolnému oteplování prostupujícím teplem, byl 3 hodiny a 1 minuta.

Při měření byla zjištěna i povrchová teplota na chladiči. Měření probíhalo v různých místech povrchu chladiče. Naměřené hodnoty pomohly k určení šíření tepla chladičem. Konkrétní naměřené hodnoty jsou vyobrazeny na obrázku Obr. 20. Měření teploty obstarávala měřicí ústředna ALMEMO 2390 – 5 s připojeným termočlánkem typu K. Toto měření probíhalo současně s měřením, jehož výstup je zobrazen v grafu Obr. 19.

Tab. 2: Zvyšování napětí na jednotlivých článcích při testovacím měření

čas h	teplota °C	napětí na článku	
		vnitřní V	vnější V
0:00:00	22,438	0	6
0:40:00	12,375	0	7
1:03:00	11,500	0	8
1:23:00	10,850	0	9
1:40:00	10,375	0	10
1:51:00	10,000	0	11
2:00:00	9,812	0	12
2:10:00	9,812	1	12
2:26:00	8,812	2	12
2:40:00	8,125	3	12
2:55:00	7,812	4	12
3:03:00	7,875	5	12



Obr. 20: Teploty naměřené na chladiči v průběhu měření. Pro přehlednost není zakreslen testovací prostor.

5 Závěr

Konstruované zařízení jsem sestavil a vložil do navržené plechové přístrojové skříně. Zdroje a analogovou část řídicí elektroniky jsem podrobil otestování a tyto části jsou funkční. Z důvodů problémů s programátorem pro mikrokontrolér se mě nepodařilo nahrát program do paměti. Proto byl program testován pouze simulátorem, který ovšem neumožňoval zcela plně zastoupit konstruovanou aplikaci, hlavně určit konstanty regulace.

Na sestaveném měřicím prototypu jsem provedl testovací měření. Ze změřených výsledků je patrné, že minimální dosažená teplota $7,75\text{ }^{\circ}\text{C}$, je použitelná, je cca o $16\text{ }^{\circ}\text{C}$ nižší než okolní, avšak zatím stále pro některé aplikace nedostačující. Při měření bylo dále zjištěno, že doba, za kterou bylo dosaženo naměřené teploty, je příliš dlouhá (3 hodiny). Ze všech provedených měření vyplynulo, že použitelná nejnižší hodnota teploty, při které je možno testovat elektronické systémy, se pohybuje okolo $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měření ukázala, že se uvnitř testovacího boxu sráží vzdušná vlhkost, která je částečně eliminována absorbérem vlhkosti.

Vhodným postupem ke snížení požadované teploty uvnitř testovacího prostoru, je možnost dimenzovat použitý chladič dodáním další přídavné desky a zajištěním lepší cirkulace vzduchu přes jeho žebra a třetího Peltierova článku ve druhé vrstvě, jenž by zajistil dostatečný odvod tepla z první vrstvy. Tato varianta ovšem znamená zvýšení hmotnosti celého zařízení a posílení napájecího zdroje pro Peltierovy články. Možnou alternativou je použití jiného než vzduchového chlazení. Jako vhodné a dostupné se zdá být použití kapalinového chlazení. Toto řešení ovšem vyžaduje zcela jiný konstrukční návrh.

6 Použitá literatura

Seznam literatury je řazen podle použití při zpracování textu.

- [1] DŘÍNEK, Milan. Peltierovy termobaterie [online]. HW server, c1997-2005 , 16. Prosinec 1999 [cit. 2007-12-09]. Text v češtině. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Dokumentace/ART652-Peltierovy-termobaterie.html>>.
- [2] MANN, Samuel Brooks. Transverse Thermoelectric Effects for Cooling and Heat Flux Sensing. [s.l.], 2006. 120 s. Virginia Polytechnic Institute and State University. Thesis for the degree of Master of Science. Dostupný z WWW: <scholar.lib.vt.edu/theses/available/etd-06232006-132342/unrestricted/Brooks_S_Mann_Thesis.pdf>.
- [3] Thermoelectrics.com : Experts in Thermoelectric Materials, Devices, Systems and Measurement [online]. c1999-2003 [cit. 2008-05-12]. Dostupný z WWW: <<http://www.thermoelectrics.com/introduction.htm#semiconductors>>.
- [4] SKALICKÝ, Jiří. Teorie řízení I. Brno : VUT FEKT, 2002. 98 s. ISBN 80-214-2112-6.
- [5] PID controller [online]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2008 , 6 May 2008, at 09:30 [cit. 2008-05-06]. Anglicky. Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller>.
- [6] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2005. 240 s. Senzory neelektrických veličin; sv. 1. ISBN 80-7300145-4.
- [7] Jednočipový počítač [online], Wikipedie: Otevřená encyklopedie, c2008, Datum poslední revize 3. 05. 2008, 19:55 UTC, [cit. 2008-05-06] <http://cs.wikipedia.org/index.php?title=Jedno%C4%8Dipov%C3%BD_po%C4%8D%C3%ADta%C4%8D&oldid=2540600>
- [8] Maxim. DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer. 21s. [cit. 2008-05-06] Dostupný z WWW: <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>>
- [9] Analog Device. Precision Analog Microcontroller ADuC7026. 92s. [cit. 2008-05-06] Dostupný z WWW <<http://www.analog.com/en/prod/0%2C2877%2CADUC7026%2C00.html>>
- [10] Voltage Controlled Current Source - Current Servo [online]. c2004 [cit. 2007-12-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.daycounter.com/Circuits/Current-Servo/Current-Servo.phtml>>.

- [11] National Semiconductor. LM117/LM317A/LM317 3-Terminal Adjustable Regulator. 26s. [cit. 2008-05-06] Dostupný z WWW <<http://www.national.com/ds.cgi/LM/LM117.pdf>>
- [12] OLEJÁR, Martin. Návrh stejnosměrného zdroje napětí [online]. HW Server, c1997-2005 , 24. Duben 2004 [cit. 2007-12-09]. Text v češtině. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/Produkty/Obecne-produkty/ART1091-Navrh-stejnosmerneho-zdroje-napeti.html>>. <http://www.elweb.cz/clanky.php?clanek=65>.
- [13] Analog Device. Interfacing the HD44780-Based Character LCD to an ADuC702x. 8s. [cit. 2008-05-06] Dostupný z WWW <http://www.analog.com/UploadedFiles/Application_Notes/4002628005564AN_908.pdf>
- [14] Maxim. Interfacing the DS18X20/DS1822 1-Wire Temperature Sensor in a Microcontroller Environment. 19s.[cit. 2008-05-06] Dostupný z WWW:<<http://pdfserv.maxim-ic.com/en/an/AN162.pdf>>
- [15] FUKÁTKO, Tomáš, FUKÁTKO, Jaroslav. Teplo a chlazení v elektronice II. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. 120 s. ISBN 80-7300-199-3.
- [16] HALLIDAY, David, RESNICK, Robert, WALKER, Jearl. Fyzika : Vysokoškolská učebnice obecné fyziky. 1. vyd. Brno : Vutium, 2000. 5 sv. (328, 247, 311, 143, 165 s.). Překlady vysokoškolských učebnic; sv. 1. ISBN 80-214-1869-9.
- [17] KADLEC, Václav. Učíme se programovat v jazyce C. Praha : Computer Press, 2002. 277 s. ISBN 80-7226-715-9.
- [18] KRČMÁŘ, Dalibor. Učebnice Jazyk C. 1. vyd. Praha : Computer Press, 2001. 185 s. ISBN 8072262955.
- [19] MANN, Burkhard. C pro mikrokontroléry. Václav Losík. 1. české vydání vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2003. 275 s. ISBN 80-7300-077-6.
- [20] MALÝ, Martin. Sběrnice 1-Wire™ [online]. HW server, c1997-2005 , 17. Listopad 2004 [cit. 2007-12-09]. Text v češtině. Dostupný z WWW: <<http://hw.cz/rozhrani/art1215-sbernice-1-wire.html>>.
- [21] Mikrokontrolér [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie, 2008 , 21:16, 27. február 2008 [cit. 2008-05-06]. Slovenský. Dostupný z WWW: <<http://sk.wikipedia.org/wiki/Mikrokontrol%C3%A9r>>.
- [22] Peltierův článek [online]. Wikipedie, otevřená encyklopedie, 12. 11. 2007 [cit. 2007-12-09]. Dostupný z WWW: <http://cs.wikipedia.org/wiki/Peltier%C5%AFv_%C4%8DI%C3%A1nek>.

- [23] Texas Instruments TLC27L2 LinCMOSTM precision dual operational amplifier. 2005. 45s. [cit. 2008-05-01] Dostupný z WWW <<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/tlc27l2.html>>

7 Seznam zkratek

1-wire	jednovodičová sběrnice
DA	digitálně analogový, např. převodník
LQFP	čtvercové pouzdro s nízkým profilem (low-profile quad flat package)
LSB	nejméně významný bit (least significant bit)
MCU	mikrokontrolér (microcontroller unit)
MIPS	milión instrukcí za vteřinu (million instructions per second)
MSPS	milión vzorků za sekundu (mega samples per seconde)
NTC	negativní termistor (negative temperature coefficient)
PID	proporcionálně integračně derivační regulace (proportional–integral–derivative controller)
PTC	pozitivní termistor (positive temperature coefficient)
PWM	pulzně-šířková modulace (pulse-width modulation)
TEC	termoelektrický chladič, též Peltiérův článek (thermoelectric cooler)
uP	mikrokontrolér
USB	univerzální sériová sběrnice (universal serial bus)

8 Seznam příloh

8.1 Přílohy papírové

- 1) fotografie zařízení
- 2) výkresy přístrojové skříně
- 3) schémata a návrh desek plošných spojů
- 4) návod na použití

8.2 Obsah CD

CD obsahuje

elektronickou verzi této práce, a popisný soubor závěrečné práce dále pak v jednotlivých složkách s názvy:

- Foto (fotografie zařízení)
- Program (zdrojový kód programu pro procesor)
- Schema (schémata, návrh desek plošných spojů v programu Eagle)
- Vykresy (technickou dokumentaci přístrojové skříně ve formátu AutoCAD (*.dwg))