

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

TERMOSTAT PRO BIOLOGICKÉ EXPERIMENTY

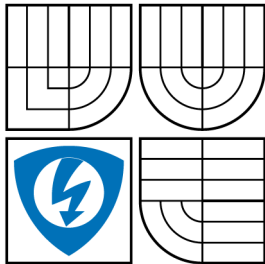
DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOVAN ŠTENS



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV BIOMEDICÍNSKÉHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND
COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

TERMOSTAT PRO BIOLOGICKÉ EXPERIMENTY THERMOSTAT FOR BIOLOGICAL EXPERIMENTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

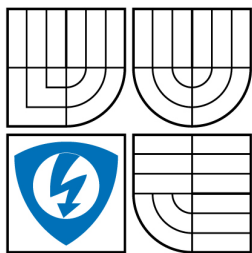
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. RADOVAN ŠTENS

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. MILAN CHMELAŘ, CSc.

BRNO 2010



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Biomedicínské a ekologické inženýrství

Student: Bc. Radovan Štens

ID: 48012

Ročník: 2

Akademický rok: 2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Termostat pro biologické experimenty

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhnete termostat pro experimentální účely s vnitřním objemem 2l, u kterého by bylo možno nastavit vnitřní teplotu v rozmezí 20-40 stupňů Celsia s přesností +/- 1 stupeň Celsia. Termostat má být napájen ze sítě, avšak s vlastním zálohováním napájení, které má být schopno jej napájet po dobu 2 hodin. Teplota uvnitř termostatu má být signalizována na vně umístěném displeji. Práce musí obsahovat rozbor zadání, výpočet obvodů, schema zapojení a rozpisku součástek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Improving the Accuracy of Temperature Measurement, dostupné na:

www.picotech.com/applications/temperature.html

[2] Temperature Sensors -Thermal Management Products, dostupné na : www.microchip.com

Termín zadání: 12.10.2009

Termín odevzdání: 21.5.2010

Vedoucí práce: doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

prof. Ing. Jiří Jan, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové 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

Diplomová práce se zabývá návrhem termostatu pro biologické experimenty o objemu 2 l s požadavkem nastavení rozsahu teplot v rozmezí 20–40° C a přesností ± 1 °C. V jednotlivých kapitolách jsou postupně popsány a vysvětleny části návrhu od možných způsobů měření teploty po komplexní řešení.

Na výstupu práce prezentuje potřebné výpočty, diskuzi modelovaného výkonu termostatu, schémata zapojení spolu s návrhem DPS a rozpisku součástek. Stejně tak není opomenuta softwarová stránka a možnosti realizace zařízení.

KLÍČOVÁ SLOVA

termostat – teplotní čidlo – DALLAS – Peltierův článek – zobrazovač LCD – PIC16F628A – chlazení – ohřev.

ABSTRACT

Master's thesis deals with a design of the thermostat for biological experiments considering 2 l of volume, with capability of setting up required temperature between 20–40° C and related accuracy of measurement ± 1 °C. Following chapters are one by one described and properly explained from possible ways of measuring temperature to final implementation.

Result of the thesis presents necessarily calculations, discussion of module's performance modeling, schematics together with PCB's design and the list of components. Neither the question of software nor possibilities of realization is neglected.

KEYWORDS

thermostat – temperature sensor – DALLAS – Peltier's element – LCD display – PIC16F628 – cooling – heating.

ŠTENS, Radovan *Termostat pro biologické experimenty*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav biomedicínského inženýrství, 2010. 76 s. Vedoucí práce byl doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Radovan Štens
Bytem: Křenovice 137, Křenovice, 751 41
Narozen/a (datum a místo): 19. srpna 1983 v Žiline

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanky fakulty:
prof. Ing. Jiří Jan, CSc, předseda rady oboru Biomedicínské a ekologické inženýrství
(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 biologické experimenty

Vedoucí/ školitel VŠKP: doc. Ing. Milan Chmelař, CSc.

Ústav: Ústav biomedicínského inženýrství

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- v 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.

* hodící se zaškrtněte

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: 20. května 2010

.....
Nabyvatel

.....
Autor

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Termostat pro biologické experimenty“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové 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 diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové 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.

Brno

.....

(podpis autora)

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Milanovi Chmelařovi, CSc. za podporu při zadávání tématu a ochotu podělit se o své bohaté zkušenosti v čase, který jsem měl k dispozici.

Dále bych rád poděkoval Ing. Miroslavu Němcovi za uvedení do problematiky návrhu hardwaru a 24 hodinovou asistenci. Ing. Evě Tolaszové potom za typografickou korekturu textu a formální rady.

V Brně dne 29. května 2010

.....

(podpis autora)

OBSAH

Úvod	14
1 Měření teploty	15
1.1 Teploměry dilatační	15
1.2 Termoelektrické teploměry	16
1.3 Odporové teploměry	17
1.3.1 Kovové odporové teploměry	17
1.3.2 Polovodičové odporové teploměry	18
1.3.3 Diodové a integrované senzory teploty	19
1.4 Shrnutí elektrických teploměrů	20
2 Digitální teploměr DS18B20	21
2.1 Jednovodičová sběrnice DALLAS	22
2.1.1 RESET/PRESENCE	22
2.1.2 ZÁPIS BITU	24
2.1.3 ČTENÍ BITU	24
2.2 Přehled funkce obvodu	25
2.3 Měření teploty	26
2.3.1 Napájení obvodu	28
3 Termoelektrický modul	29
3.1 Termoelektrický jev	29
3.1.1 Seebeckův jev	30
3.1.2 Peltierův jev	30
3.1.3 Thomsonův jev	31
3.2 Peltierův článek	31
3.2.1 Základní princip a konstrukce TM	32
3.2.2 Matematický model TM	32
3.3 Výpočet vlastností TM	35
3.3.1 Jednoúrovňová konfigurace TM	35
3.3.2 Výsledky	37
3.4 Shrnutí	42
4 Zobrazovač LCD	43
4.1 LCD MC1602E-SYL/H	43
4.2 Komunikace	43

5	Procesor	46
5.1	Mikroprocesor	46
5.1.1	Charakteristika MCU	47
5.2	PIC16F628A	47
5.2.1	Popis mikrokontroleru	48
6	Návrh	49
6.1	Napájení a výkonový akční člen	49
6.1.1	Transformátor	50
6.2	Zálohování napájení	52
6.2.1	Integrovaný obvod UC3906N	52
6.2.2	Postup výpočtů	55
6.3	Číslicová část	56
6.3.1	Rotační mikrospínač RE20S	57
6.3.2	LCD displej	57
6.3.3	Snímače teploty DALLAS	57
6.3.4	Spínání výkonové zátěže	58
6.4	Izolace, chlazení	58
6.4.1	Aktivní tepelná zátěž	58
6.4.2	Pasivní tepelná zátěž	58
6.4.3	Rovnice pro výpočet tepelných ztrát	59
6.4.4	Tepelný odpor chladiče	61
6.4.5	Shrnutí	61
6.5	Programové vybavení	62
6.5.1	Vývojový diagram programu termostatu	63
7	Závěr	64
	Seznam použitých zdrojů	65
	Seznam zkratk	67
	Seznam příloh	68
A	Výkresová dokumentace	69
A.1	Schéma zapojení zdroje napětí a nabíjecího obvodu - DPS01	69
A.2	Schéma zapojení řídicí části - DPS02	70
A.3	Schéma zapojení LCD displeje - DPS03	71
A.4	Deska plošných spojů DPS01	72
A.5	Deska plošných spojů DPS02	73
A.6	Deska plošných spojů DPS03	74

B	Rozpiska součástek	75
C	Akumulátor WP26-12	76

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Měřicí obvod diodového teploměru.	19
2.1	Číslování vývodů DS18B20 (pouzdro TO-92).	21
2.2	Realizace jednočipové sběrnice DALLAS	22
2.3	Časové průběhy RESET/PRESENCE.	23
2.4	Časové průběhy zápisu „nuly“ a „jedničky“ do DALLASU.	23
2.5	Časové průběhy čtení bitu z DALLASU.	24
2.6	Vnitřní blokové schéma teploměru DALLAS.	25
2.7	Blokové schéma převodníku teplota/číslo obvodu (DS18B20)	26
2.8	Externí napájení obvodu (DS18B20).	28
3.1	Sebeckův jev	30
3.2	Schematický diagram typického termoelektrického chladiče s dvěma páry elementu N a P	33
3.3	Jednoúrovňová konfigurace TM (obrázek upravený z [19]).	36
3.4	Peltierův článek v režimu ohřevu; Q_h - teplo dodávané objektu o teplotě T_h , Q_c teplo odnímané z okolí o teplotě T_c	37
3.5	Závislost vstupního napětí a proudu TM v daném rozsahu rozdílu teplot ΔT	40
3.6	Výkon horké strany článku pro daný rozsah ΔT v režimu ohřevu.	40
3.7	Charakteristika parametru COP_h pro daný rozsah ΔT	41
3.8	Výkon studené strany článku pro daný rozsah ΔT v režimu chlazení.	41
3.9	Charakteristika parametru COP_c pro daný rozsah ΔT	42
4.1	Dvouřádkový zobrazovač MC160E-SYL/H (převzato z [7]).	44
4.2	Zapojení zobrazovače s μP PIC16F628A.	45
5.1	Pouzdro DIP18 mikrokontroleru PIC16F628A.	47
6.1	Jedna s možností sepnutí TM pomocí H -můstku spolu se stavy pinů μP je znázorněna modrou přerušovanou čarou.	50
6.2	Ilustrační definice vybíjecího času kondenzátoru příslušející úrovni napětí U_{MIN}	51
6.3	Pouzdro DIL16 obvodu UC3906N a popis vývodů.	53
6.4	Typické zapojení obvodu uvedené výrobcem [20].	53
6.5	Křivky U a I průběhu nabíjení spolu s popisem stavů výstupů signalizace obvodu UC3906b (upraveno z [20].)	55
6.6	Výstupní charakteristika rotačního mikropínače RE20S (upraveno z [22]).	57
6.7	Blokové schéma termostatu.	62
6.8	Vývojový diagram programu termostatu.	63
A.1	Deska plošných spojů DPS01 - pohled ze strany součástek.	72

A.2	Deska plošných spojů DPS01 - pohled ze strany spojů.	72
A.3	Deska plošných spojů DPS02 - pohled ze strany součástek.	73
A.4	Deska plošných spojů DPS02 - pohled ze strany spojů.	73
A.5	Deska plošných spojů DPS03 - pohled ze strany součástek.	74
A.6	Deska plošných spojů DPS03 - pohled ze strany spojů.	74
C.1	Vybíjecí charakteristika akumulátoru WP-26-12 [23].	76
C.2	Nabíjecí charakteristika akumulátoru WP-26-12 [23].	76

SEZNAM TABULEK

1.1	Přehled teploměrů.	15
1.2	Nejčastější materiály užívané pro termoelektrické články.	17
1.3	Porovnání vlastností elektrických teploměrů.	20
2.1	Obsazení vývodů obvodu DS18B20.	22
2.2	Vztah teplota/data.	26
3.1	SM pro 6-ampérový modul o 71-párech.	33
3.2	RM pro 6-ampérový modul o 71-párech.	34
3.3	KM pro 6-ampérový modul o 71-párech.	34
3.4	Teplota potřebná k ohřátí/ochlazení vody s teplotním rozdílem $\Delta T = 40^\circ C$	38
3.5	Hodnoty Seebeckova koeficientu, odporu a vodivosti modulu (dosazení do vztahů 3.4, 3.7 a aplikace korekčních vztahů viz 3.9) pro $\Delta T = 40^\circ K$	39
3.6	Hodnoty vstupního napětí, výkonu a příkonu modulu v závislosti na rozdílu teplot stran $\Delta T = 40^\circ K$ a měnícím se proudem.	39
4.1	Obsazení vývodů LCD MC160E-SYL/H [1].	45
5.1	Vlastnosti MCU PIC16F628A.	48
6.1	Porovnání použitých součástek s největším příkonem – slaboproudá část.	49

ÚVOD

Teplotní regulace se dotýká mnoha vědních disciplín. Z biomedicínského pohledu se jedná například o laboratorní techniku. Kupříkladu biochemické reakce vyžadují pro přidání činidla stanovenou inkubační teplotu, bez které není možno provést analýzu správně. Další praktické využití termostatu lze najít při měření osmolality, kde je analyzovaný vzorek chlazen termoelektrickým modulem na teplotu kolem -10°C . V neposlední řadě je možno zmínit aplikaci při testech acidobazické rovnováhy, kde jsou parametry jako pH, krevní plyny pCO_2 , pO_2 a ionty značně závislé na teplotě. Tyto přístroje jsou nedílnou součástí laboratoří nemocnic, úzce spolupracujících například s anesteziologicko-resuscitačním oddělením, či jednotkou intenzivní péče. Z hlediska běžného života zasahuje problematika regulace teplot již do pouhého skladování potravin.

Tématem této diplomové práce je návrh biologického termostatu s vnitřním objemem 2l, nastavením rozsahu teplot $20\text{--}40^{\circ}\text{C}$ a přesností ± 1 stupeň Celsia. Práce je členěna do šesti tématických kapitol. První dvě kapitoly se věnují tématice měření teploty. Jsou zde prezentovány možné přístupy s výběrem vhodného teploměru. Ve třetí kapitole je podrobně zpracováno modelování výkonu *Peltierova článku* s odpovídajícím výstupem. Čtvrtá kapitola seznamuje čtenáře s vlastnostmi inteligentních zobrazovačů LCD a pátá kapitola se zaměřuje na řídicí člen - mikrokontroler. V kapitole návrhu je zpracována výpočetní stránka práce spolu s implementací dílčích částí systému.

1 MĚŘENÍ TEPLoty

Teplota je jednou z nejdůležitějších veličin ovlivňující téměř všechny stavy a procesy v přírodě. Při měření teploty T měříme obecně jinou veličinu A , která je na teplotě závislá podle určitého vztahu $A = f(T)$, který jsme schopni vyčíslit. K měření teploty se využívá celé řady funkčních principů, jejichž přehled je uveden v tab. 1.1 [12].

skupina teploměrů	typ teploměru	fyzikální princip	teplotní rozsah [°C]	
dilatační	plynový	změna tlaku	-5	+500
	tenzní	změna tenze par	-40	+400
	kapalinový	změna objemu	-200	+750
	kovový	délková roztažnost	0	+900
elektrické	termoelektrické	termoelektrický jev	-200	+1 700
	odporové kovové	změna elektrického odporu	-250	+1 000
	odporové polovodičové, diodové	změna prahového napětí	-200	+400
speciální	keramické žároměrky	bod měknutí	+600	+2 000
	teploměrná tělíska	bod tání	+100	+1 300
	teploměrné barvy	změna barvy	+40	+1 350
bezdotykové	termovize	snímání teplotního obrazu tělesa	-30	+1 200
	poměrové pyrometry	srovnání 2 svazků teplotního záření (TZ) o různých λ	+700	+2 000
	monokrystalické pyrometry	zachycení úzkého svazku TZ	+100	+3 000
	širokopásmové pyrometry	zachycení veškerého TZ	-40	+5 000

Tab. 1.1: Přehled teploměrů.

1.1 Teploměry dilatační

Dilatační teploměry využívají objemové nebo délkové roztažnosti plyných, kapalných, případně pevných látek. Změna teploty je potom úměrná změně tlaku, objemu nebo délky.

Plynové teploměry využívají vlastnosti toho, že tlak plynu je za stálého objemu přímo úměrný teplotě. **Teploměry tenzní** sledují závislosti mezi teplotou a rovnovážným tlakem v soustavě o jedné složce a dvou fázích: kapalina – pára. **Kapalinové teploměry** jsou potom založené na měření změny objemu kapaliny s teplotou. Běžně byly dostupné skleněné teploměry plněné rtutí. Byly jednoduché, spolehlivé, přesné a levné¹. Jejich nevýhodou, hlavně z provozního hlediska, byla křehkost a někdy i špatná čitelnost, dále potom problematický dálkový přenos údaje. Snímač

¹Od 1. Června roku 2009 je Evropskou unií prodej rtuťových teploměrů zakázán.

pro provozní použití je kovový a tvoří jej nádobka, spojovací kapilára a deformační tlakoměr. Nádobka je obvykle válcového tvaru (někdy bývá ve tvaru šroubovice) o průměru asi 15 mm a délce 100 až 200 mm. Spojovací kapilára má vnitřní průměr 0,1 až 0,35 mm. Celý systém je zcela vyplněn kapalinou a uzavřen. Změna objemu kapaliny s teplotou působí deformaci deformačního prvku tlakoměru. Principem **kovových teploměrů** je vztah mezi délkovou roztažností kovů a teplotou. V praxi se využívá bimetalických teploměrů, které jsou tvořeny dvojicí pevně spojených kovových pásků s rozdílným teplotním součinitelem roztažnosti. Při zvýšení teploty se pásek prohne na stranu materiálu s nižším součinitelem roztažnosti [12]. Bimetalický pásek je na jednom konci pevně uchycen, pohyb volného konce může být převeden na „ukazovatel“ nebo přímo ovládá spínač, který je součástí elektrického obvodu. Ten se potom při jisté nastavitelné teplotě sepne (nebo rozpojí). Snímané teploty mohou být v intervalech až o velikosti řádově několika tisíců °C, podle druhu použitých slitin.

1.2 Termoelektrické teploměry

Častou metodou s širokým rozsahem teplot je měření pomocí termočlánků. Termoelektrický článek je tvořen dvěma vodiči z různých kovových materiálů A a B , které jsou na obou koncích spolu vodivě spojeny. Jestliže teplota ϑ_m jednoho spoje bude různá od teploty ϑ_o druhého spoje, vznikne termoelektrické napětí a obvodem začne procházet termoelektrický proud. Ve zjednodušené formě můžeme závislost napětí na teplotě vyjádřit lineárním vztahem [12]:

$$U_E = \alpha_{AB} \cdot \vartheta_m + \alpha_{BA} \cdot \vartheta_o = \alpha_{AB}(\vartheta_m - \vartheta_o), \quad (1.1)$$

kde α_{AB} je koeficient závislý na použitém materiálu kovů, přičemž platí $\alpha_{AB} = -\alpha_{BA}$. Tato rovnice platí pouze v úzkém rozsahu teplot. Pro přesnější vyjádření závislosti se používá vztahu [12]:

$$U_E = \sum_{i=0}^n \alpha_i \cdot \Delta\vartheta^i, \quad (1.2)$$

kde n je rovno 2 až 14 podle požadované přesnosti rozsahu teplot a typu termoelektrického článku.

Aktivní konec termočlánku se nazývá horký (měřící), druhý konec je nazýván studeným a je nutné jej udržovat při konstantní teplotě. Výsledné termoelektrické napětí je dáno rozdílem napětí na horkém a studeném konci. Za předpokladu dostatečné teplotní stability studené strany, která se zpravidla elektronicky udržuje na hodnotě 20 °C, 25 °C, případně 50 °C, je výsledné termoelektrické napětí úměrné

pouze teplotě měřící strany. Jak bylo zmíněno výše, termoelektrické napětí termočlánku není v závislosti na teplotě lineární, a proto se při návrhu termočlánků vybírají takové materiály, které mají tuto závislost v daném intervalu co nejlineárnější. Mezi další požadavky patří vysoká citlivost termoelektrického napětí, časová stabilita, odolnost vůči vlivům okolí a možnosti průmyslového zpracování. Nejčastěji používané termočlánky jsou PtRh10 (platinarhodium), NiCr10 (niklchrom) a Fe-CuNi45 (konstantan). Přehled jejich parametrů spolu s některými dalšími materiály je uveden v tab. 1.2 [18].

Termoelektrický článek	Teplotní interval [°C]	Citlivost [μV/°C]	Označení
Platina(6–30%)/Rhodium	38–1 800	7,7	B
Wolfram(5–26%)/Rhenium	0–2 300	16	C
Chrom–Konstantan	0–982	76	E
Železo–Konstantan	0–760	55	J
Chrom–Hliník	–184–1 260	39	K
Platina(13%)/Rhodium–Platina	0–1 593	11,7	R
Platina(10%)/Rhodium–Platina	0–1 538	10,4	S
Měď–Konstantan	–184–400	45	T

Tab. 1.2: Nejčastější materiály užívané pro termoelektrické články.

1.3 Odporové teploměry

1.3.1 Kovové odporové teploměry

Odpor kovových vodičů s rostoucí teplotou vzrůstá. Pro čisté kovy je možno tuto závislost vyjádřit polynomem:

$$\rho_{\vartheta} = \rho_{\vartheta_0}(1 + A\vartheta + B\vartheta^2 + C\vartheta^3 + \dots), \quad (1.3)$$

kde ρ_{ϑ} měrný el. odpor teploměru při teplotě t_1 [$\Omega \cdot \text{m}$]
 ρ_{ϑ_0} měrný el. odpor teploměru při teplotě 0°C [$\Omega \cdot \text{m}$]
 A lineární teplotní koeficient odporu [K^{-1}]
 B kvadratický teplotní koeficient odporu [K^{-2}]
 C mocninný teplotní koeficient 3. řádu [K^{-3}]
(který se uvažuje pro teploty do 0°C)

Tento vztah lze v technické praxi aproximovat a pro určitý teplotní rozsah linearizovat, více např. v [12, 18]. Pro realizaci odporových teploměrů se používají především čisté kovy, jejichž teplotní součinitel je stálý a pokud možno co největší. Používanými materiály jsou platina, nikl a měď. Mezi hlavní klady těchto teploměrů patří jejich časová stabilita a rozsah měřitelných teplot.

1.3.2 Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové senzory využívají, podobně jako kovové, závislosti odporu na teplotě. Do této skupiny řadíme monokrystalické senzory teploty, NTC (*Negative Temperature Coefficient*) termistory a PTC (*Positive Temperature Coefficient*) termistory.

NTC-termistory (negastory) jsou vyráběny spékáním oxidů Fe_2O_3 , TiO_2 , CuO , MnO , NiO a dalších. Závislost odporu na teplotě je nelineární a odpor s teplotou klesá podle vztahu [12]:

$$R_{\vartheta} = R_{\vartheta_0}^{B_T(\frac{1}{\vartheta_0} - \frac{1}{\vartheta})}, \quad (1.4)$$

kde R_{ϑ} odpor termistoru při teplotě t [Ω]
 R_{ϑ_0} odpor termistoru při teplotě t_0 [Ω]
 B_T materiálová konstanta (veličina úměrná aktivační energii) [-].

Tyto termistory jsou levné, poskytují široký rozsah hodnot odporu (od $0,1\Omega$ až do několika $\text{M}\Omega$) a pro jejich miniaturní rozměry je lze použít i v aplikacích s omezeným prostorem. Díky vysoké teplotní citlivosti není nutné výstupní veličinu dále příliš zesilovat. Běžný měřicí rozsah teploty je od $-60\text{ }^\circ\text{C}$ do $+200\text{ }^\circ\text{C}$ (výjimečně až do $400\text{ }^\circ\text{C}$). Nevýhodou je časová nestálost a nelinearita, což lze zlepšit vhodným výběrem a použitím kompenzačních obvodů.

PTC-termistory (pozistory) jsou polovodičové součástky s kladným teplotním součinitelem odporu. Vyrábějí se z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. BaTiO_3 . Použití pozistorů je dáno tvarem jejich charakteristiky. Jsou vhodné pro měření ve velmi úzkém teplotním intervalu, zejména pro signalizační účely. Termistor je účelným a zároveň přesným snímačem v řadě aplikací.

Monokrystalické senzory teploty se vyrábějí z křemíku, germania či india. V praxi je běžný výskyt křemíkových senzorů, které jsou vhodné pro měření v rozsahu $-50\text{ }^\circ\text{C}$ až $+150\text{ }^\circ\text{C}$. Teplotní závislost rezistivity křemíku je v tomto rozsahu teplot dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů (tzv. nevlastní elektronová vodivost podmíněná přítomností cizích prvků). Podobně jako je tomu u kovů, dochází vlivem zvyšující se teploty k rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče a následnému snižování

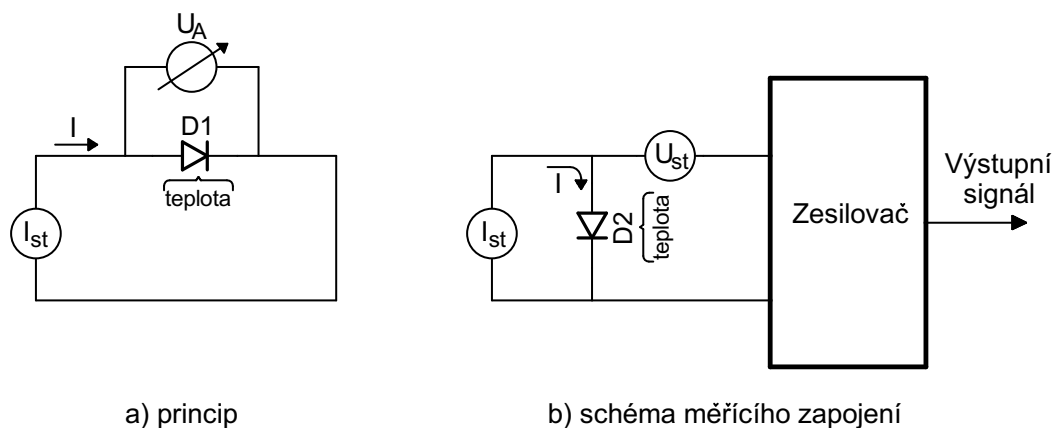
jejich pohyblivosti. Odpor senzoru se v závislosti na teplotě parabolicky zvyšuje dle vztahu [12]:

$$R_{\vartheta} = R_0 + k(\vartheta - \vartheta_0)^2, \quad (1.5)$$

kde R_0 je odpor senzoru při vztavné teplotě ϑ_0 .

1.3.3 Diodové a integrované senzory teploty

Tyto senzory využívají principu změny vlastností PN přechodu (*Zenerova jevu*). Při jejich realizaci se používá germaniových či křemíkových diod nebo tranzistoru. Germaniové snímače jsou vhodné pro měření nízkých teplot (-190°C i nižších). Křemíkové diody potom nachází uplatnění v rozsahu měření od -50 do $+150^\circ\text{C}$ (případně -150 až $+300^\circ\text{C}$). Prahové napětí diody se mění přibližně o $2\text{ mV}/^\circ\text{C}$ a závislost je lineární v oblasti 15 až 45°C s přesností $0,03\%$. V celém měřicím rozsahu pak s přesností $0,5^\circ\text{C}$. Pro tyto vlastnosti již není potřeba provádět linearizaci, nicméně je nutná přesná reference, se kterou se stabilizované napětí na diodě srovnává. Diodová čidla mají velmi příznivé dynamické vlastnosti. Časové konstanty se pohybují v jednotkách či desetinách sekundy. Dále tato čidla vykazují velmi dobrou časovou stálost [12]. Schématické zapojení měřícího obvodu je na obrázku 1.1.



Obr. 1.1: Měřící obvod diodového teploměru.

Díky velmi snadné integraci je do pouzdra teplotního snímače možné zakomponovat číslicový modulátor, který tak plní funkci AD převodníku. Výstupní signál pak namísto napěťového či proudového charakteru nabývá binárních hodnot. Tím se odstraní potřeba externího AD převodníku a vzorky je možné zpracovávat přímo řídicím μ procesorem. Jako příklad můžeme uvést TMP03 (*Analog Devices*) nebo DS18B20

(*Dallas Semiconductors*), viz dále. Tyto IO disponují vlastní programovatelnou pamětí, až 16-ti bitovým rozlišením a nevyžadují žádnou kalibraci [18]. Komunikace probíhá zpravidla po jednovodičové sběrnici.

1.4 Shrnutí elektrických teploměrů

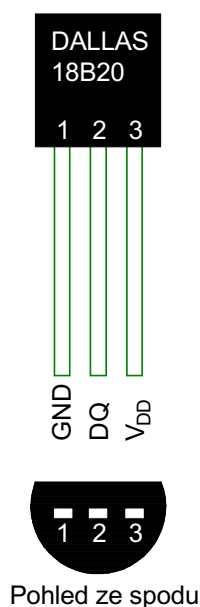
V tab. 1.3 vidíme shrnutí vlastností jednotlivých elektrických teploměrů. Mimo termočlánek, jehož silné stránky se v navrhované aplikaci nevyužijí, by připadalo v úvahu použití kterékoli kategorie senzorů. V návrhu termostatu pro biologické experimenty však byla dána přednost vlastnostem integrovaných křemíkových čidel, o jejichž výhodách je pojednáno výše.

	Termočlánek	Kovový teploměr pro Pt	Termistor	Integrovaný senzor
Přesnost	$\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Citlivost	desítky $\text{V}/^{\circ}\text{C}$	$3,58\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$	jednotky $\Omega/^{\circ}\text{C}$	$5\text{--}20\ \text{mV}/^{\circ}\text{C}$
Teplotní rozsah	$-270\text{--}1800\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-200\text{--}850\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-100\text{--}450\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-55\text{--}150\text{ }^{\circ}\text{C}$
Char. průběh	polynom 4. řádu	polynom 2. řádu	exponenciální	lineární závislost
Buzení	-	zdrojem I	zdrojem U	typicky zdrojem U
Forma výstupu	napětí	elektrický odpor	elektrický odpor	U, I nebo digitální
Orientační cena	podle typu cca od 600 Kč do několika tisíc Kč	podle jakosti Pt od 200 Kč	od 10 Kč	100–500 Kč

Tab. 1.3: Porovnání vlastností elektrických teploměrů.

2 DIGITÁLNÍ TEPLOMĚR DS18B20

V této kapitole se pojednává o obvodu DS18B20 od společnosti (*Dallas Semiconductors*). Jedná se o digitální teploměr komunikující po jednovodičové sběrnici DALLAS (1-WireTM). Teplotu lze měřit v 9 až 12-bitovém rozlišení a k dispozici je i uživatelsky nastavitelný horní a spodní práh alarmu. Rozsah provozních teplot je -50°C až $+125^{\circ}\text{C}$ s udávanou přesností $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ v intervalu -10°C až -85°C , což je pro potřeby návrhu dostačující. Mimo to je možné tento obvod napájet přímo z datového vodiče (tzv. „*parazitní napájení*“) a ušetřit tak nutnost použití externího zdroje.



Obr. 2.1: Číslování vývodů DS18B20 (pouzdro TO-92).

Každý DS18B20 nese originální 64-bitový sériový kód, kterým lze na jedné sběrnici provádět identifikaci. To pomocí mikroprocesoru umožňuje využít hned několik těchto digitálních teploměrů a jejich vhodným umístěním tak zajistit korektnost měření určitého prostoru (objemu). Tato vlastnost je v naší aplikaci přínosem a bude zohledněna při celkovém návrhu termostatu. Obsazení vývodů pro pouzdro *TO-92* je vidět v tab. 2.1.

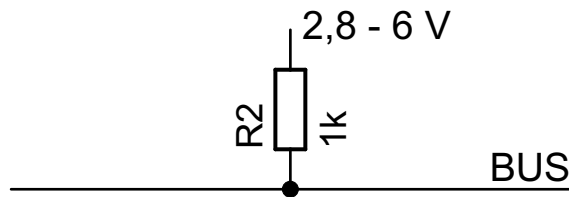
Vývod	Popis vývodu	TO-92
GND	Zem	1
DQ	Data Vstup/Výstup	2
V_{DD}	Napájení	3

Tab. 2.1: Obsazení vývodů obvodu DS18B20.

2.1 Jednovodičová sběrnice DALLAS

Jednovodičová sběrnice DALLAS se využívá u řady obvodů realizujících elektronickou identifikaci, u adresovatelných spínačů, dotykových pamětí, multipřístupových klíčů atd.

Název této sběrnice je však trochu zavádějící. Jedná se totiž o dva vodiče. Jeden společný vodič vede uzemnění a druhý slouží současně pro napájení připojených obvodů a přenos dat. Tato sběrnice je použitelná až do délky 300 m.

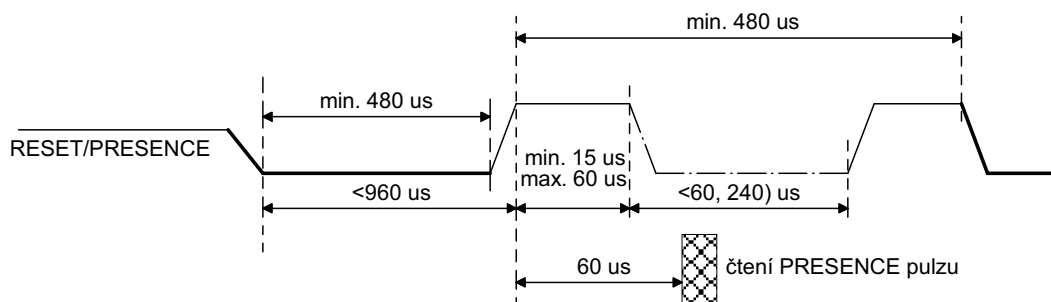


Obr. 2.2: Realizace jednočipové sběrnice DALLAS

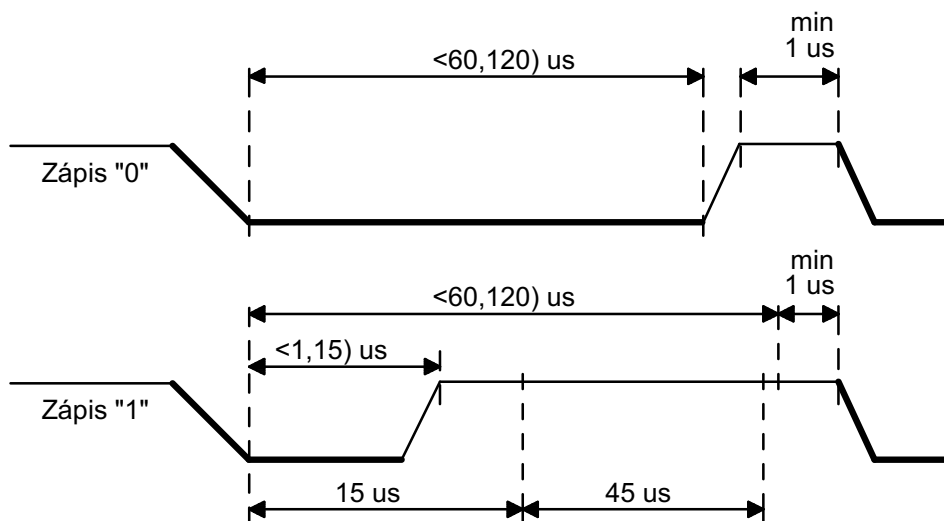
Základními komunikačními sekvencemi je **RESET/PRESENCE**, **ZÁPIS BITU** - *jedničky a nuly* a **ČTENÍ BITU**. Nyní si popíšeme jejich nejdůležitější parametry.

2.1.1 RESET/PRESENCE

Mikroprocesor vyšle na sběrnici v úrovni L **RESET** pulz dlouhý $480 \mu s$. Pokud je ke sběrnici připojen alespoň jeden obvod DALLAS, vyšle do $60 \mu s$ svůj **PRESENCE** pulz (viz obr. 2.3). Test tohoto pulzu je vhodné provádět $60 \mu s$ po ukončení **RESET** pulzu. Jakákoliv další komunikace může probíhat až po uplynutí $480 \mu s$ od **RESET** pulzu [10].



Obr. 2.3: Časové průběhy RESET/PRESENCE.



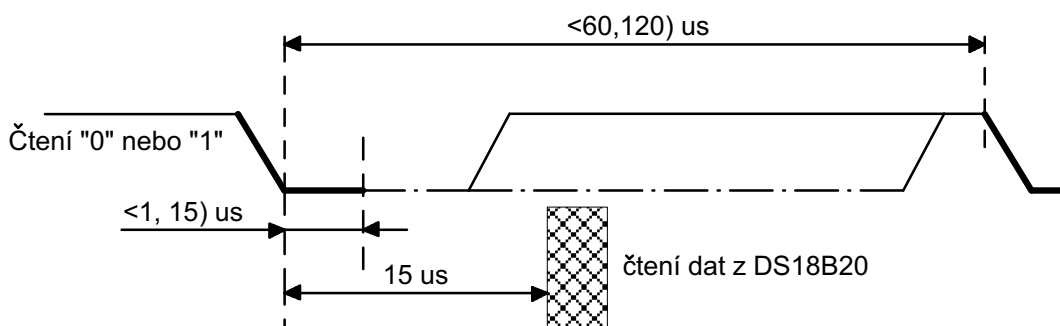
Obr. 2.4: Časové průběhy zápisu „nuly“ a „jedničky“ do DALLASU.

2.1.2 ZÁPIS BITU

Při požadavku o zápis nuly pošle mikroprocesor $60 \mu\text{s}$ dlouhou úroveň L . Následující komunikace může pokračovat nejméně po $1 \mu\text{s}$ (viz obr. 2.4).

Zápis jedničky se doporučuje zahájit $5 \mu\text{s}$ dlouhou úrovní L a po ní pokračovat v jakékoliv komunikaci neméně po $56 \mu\text{s}$ [10].

2.1.3 ČTENÍ BITU



Obr. 2.5: Časové průběhy čtení bitu z DALLASU.

Čtení bitu z obvodu DS18B20 je zahájeno $5 \mu\text{s}$ trvající úrovní L , přičemž vzorkování dat na sběrnici provádíme $10 \mu\text{s}$ po ukončení této nízké úrovně (viz obr. 2.5). Má-li být přečtena nula, obvod podrží data v úrovni L ještě alespoň $55 \mu\text{s}$ [10].

Poznámka: V prezentovaných časových diagramech jsou jednotlivé úrovně odlišeny podle toho, kdo ze zúčastněných - DS18B20, mikroprocesor či *pull-up* ji zajišťuje.

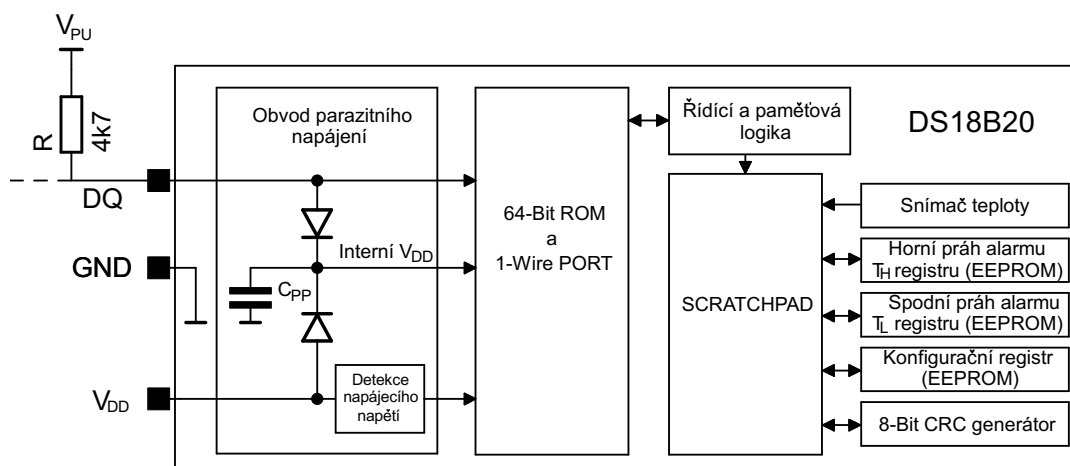
—————	upínací odpor
—————	mikrokontrolér
— · — · — · —	DS18B20

2.2 Přehled funkce obvodu

Na obrázku 2.6 je vidět blokové schéma digitálního teploměru DS18B20. Popis vývodů je uveden v tabulce 2.1 na začátku této kapitoly. Unikátní sériový kód zařízení je uložen v 64-bit paměti ROM. Paměť *scratchpadu* (pole pracovních registrů) disponuje registrem teploty (2-byte), do kterého se ukládá digitální výstup ze senzoru. Dále je tato paměť využívána pro nastavení horního a spodního prahu alarmu o velikosti 1-byte (registr T_H a T_L), plus 1-byte obsazuje konfigurační registr. Ten nám poslouží k definování požadovaného rozlišení převodníku *teplota/číslo*. Registry T_H , T_L a konfigurační registr si data uchovávají i po vypnutí zařízení.

DS18B20 využívá technologii sběrnice *1-Wire*, jejíž protokol implementuje komunikaci pomocí jednoho řídicího signálu. To vyžaduje vedení se slabším *pull-up* rezistorem, jelikož zařízení jsou ke sběrnici připojena skrz 3-stavový, případně *open-drain* port (vývod **DQ** obvodu). V této architektuře bude μ procesor (topologie master – slave) identifikovat a adresovat jednotlivé teploměry podle jejich 64-bit unikátního kódu.

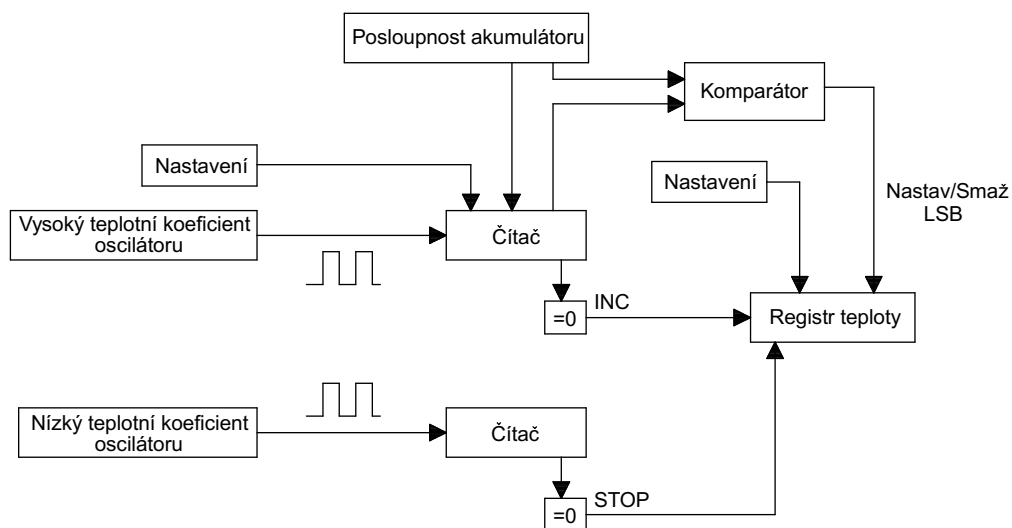
Technologie *parazitního napájení* dodává potřebné napětí skrz *pull-up* rezistor vývodu *DQ* za stavu sběrnice o úrovni *H*. Tímto signálem dochází k nabití interního kondenzátoru (C_{pp}), který představuje zdroj napájení obvodu ve stavu úrovně sběrnice *L*. V návrhu této možnosti není využito, je nahrazena alternativou externího zdroje vedeného vývodem V_{DD} .



Obr. 2.6: Vnitřní blokové schéma teploměru DALLAS.

2.3 Měření teploty

Funkčním jádrem obvodu DS18B20 je převodník **teplota/číslo**, jehož součástí je registr teploty (viz obr. 2.7).



Obr. 2.7: Blokové schéma převodníku teplota/číslo obvodu (DS18B20).

Při inicializaci je hodnota teplotního registru nastavena na $+85\text{ }^{\circ}\text{C}$, což odpovídá formátu *0550h* v šestnáctkové soustavě. Přehled výstupu senzoru v závislosti na teplotě je vidět v tabulce 2.2.

Teplota [$^{\circ}\text{C}$]	Digitální výstup	
	Dvojkový	Šestnáctkový
+125	0000 0111 1101 0000	07D0h
+85	0000 0101 0101 0000	0550h
+25,0625	0000 0001 1001 0001	0191h
+10,125	0000 0000 1010 0010	00A2h
+0,5	0000 0000 0000 1000	0008h
0	0000 0000 0000 0000	0000h
-0,5	1111 1111 1111 1000	FFF8h
-10,125	1111 1111 0101 1110	FF5Eh
-25,0625	1111 1110 0110 1111	FE6Fh
-55	1111 1100 1001 0000	FC90h

Tab. 2.2: Vztah teplota/data.

Souhrn operací po zahájení převodu *teplota/číslo* je možno popsat následovně. Vždy když čítač oscilátoru s **nízkým** teplotním koeficientem „přeteče“ (přejde do

nuly), je inkrementován **teplotní registr**. K jeho zvyšování dochází tak dlouho, dokud nepřejde do nuly čítač oscilátoru s **velkým** teplotním koeficientem. V této chvíli dochází k zastavení čítání obou čítačů. Stav čítače oscilátoru s **nízkým** teplotním koeficientem indikuje, kolik impulzů přišlo od poslední změny obsahu **teplotního registru**.

Kmitočet oscilátoru s **vysokým** teplotním koeficientem se zvyšující teplotou klesá. Při spodní hranici rozsahu operačních teplot obvodu (viz tab. 2.2) dochází k prodloužení cyklu oscilátoru s **nízkým** teplotním koeficientem. Převod je tak ukončen ještě před inkrementací **registru teploty**.

Hodnota registru oscilátoru s **nízkým** teplotním koeficientem je porovnána s příslušnou konstantou v **akumulátoru posloupnosti** a podle výsledku porovnání **komparátorem** je nastaven LSB registru teploty.

V **akumulátoru posloupností** je před každým cyklem definována počáteční hodnota čítače oscilátoru s **nízkým** teplotním koeficientem. Tímto způsobem je realizována linearizace převodu s přesností na 1 °C. Linearizace s 0,5 °C přesností pak nastavováním LSB registru teploty pomocí **komparátoru** [10].

Snímač teploty spolu s teplotním registrem, který je umístěn v poli pracovních registrů (**Scratchpad**) a příslušnými obvody popsány výše tvoří převodník *teplota/číslo*.

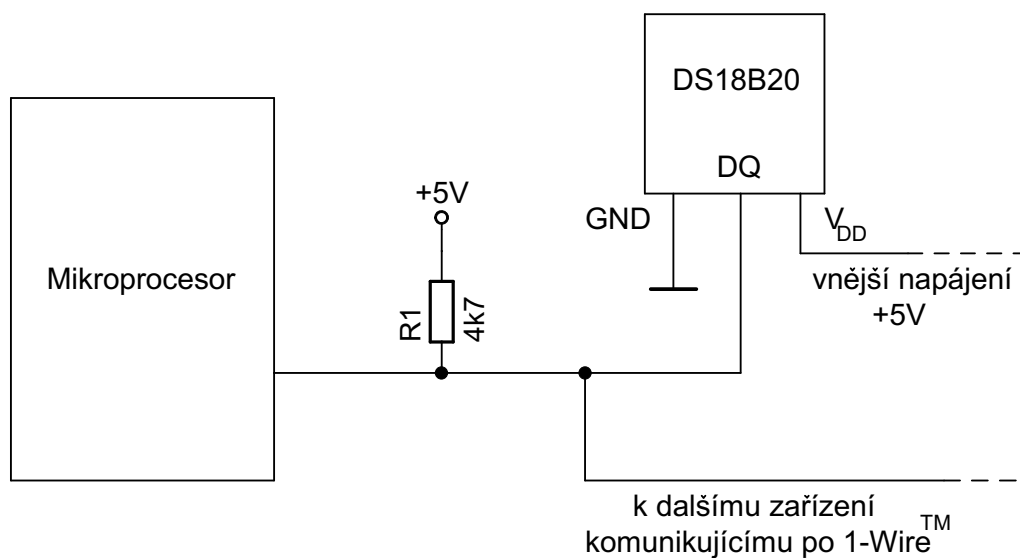
Klopný obvod **horního** prahu alarmu a příslušný registr horní meze teploty (T_H) s ekvivalentní **dolní** mezí (registr T_L) jsou volány instrukcí „vyhledej alarm“. Vždy po ukončení převodu je klopný obvod **horního** a **dolního** prahu teploty nastaven podle naměřené teploty a nastavených mezí. U teplotních snímačů, u kterých je naměřená teplota vyšší než horní práh T_H , nebo nižší než dolní práh teploty T_L , je klopný obvod nastaven do aktivní úrovně a po obdržení instrukce „vyhledej alarm“ se identifikují. Toho lze při realizaci termostatu využít.

V závislosti na obsahu registru **scratchpadu** generuje generátor CRC byte (8-bit), který je používán pro kontrolu platnosti dat čtených z digitálního teploměru. Řídící logika spolu s jednovodičovým portem (**1-wire port**) realizuje vysílání a příjem dat z/do DS18B20. Přenos dat i generování osmibitového CRC je podrobně popsán v [10].

ROM kód obvodu je uložen v 64-bitové paměti a jeho formát je stejný u všech obvodů *Dallas* komunikujících po jednovodičové sběrnici. *Nonvolatile* ROM, označovaná také E²ROM, je zálohovaná paměť uvnitř obvodu a slouží k uložení mezí, eventuálně i konfiguračního slova [8]. Obsah T_H , T_L , případně konfiguračního registru, tak zůstane i po vypnutí napájení teploměru uchován a nemusí se proto po zapnutí obnovovat z řídicího μ procesoru.

2.3.1 Napájení obvodu

Obvod **detekce napájecího napětí** slouží ke zjišťování, zda je použito externí (vnější) napájení teploměru prostřednictvím vývodu V_{DD} nebo je teploměr napájen po datové lince (*parazitní napájení*). Protože je pro provedení převodu potřeba většího proudu [10], je v návrhu snazší využít externího zdroje napájení obvodu DS18B20 (viz obr. 2.8).



Obr. 2.8: Externí napájení obvodu (DS18B20) .

3 TERMOELEKTRICKÝ MODUL

Výběr termoelektrického modulu (TM) vyžaduje posouzení navrhovaného systému jako celku. Tato kapitola se zabývá standardním modulem, jehož parametry vyhovují zadaným požadavkům.

Výsledná práce celého návrhu je v čase přirozeně proměnná, funkčnost ohřevu a případné chlazení je závislé na několika vzájemně provázaných parametrech. V praxi to často znamená provést sérii výpočtů, klasifikaci a následný výběr vhodného TM. Řešení této problematiky předchází zamyšlení nad následujícími otázkami:

1. V jakém rozsahu/na jaké teplotě je potřeba objekt udržovat?
2. Kolik tepla (jakou energii) je potřeba objektu/z objektu dodat/odebrat?
3. Je časová odezva na změnu teploty důležitá? Pokud ano, s jakou rychlostí je potřeba dosáhnout žádané teploty objektu po připojení DC napětí?
4. Jaká je očekávaná teplota okolí? Bude se během činnosti zařízení výrazně měnit?
5. Do jaké míry budou do provozu termostatu zasahovat vnější zdroje energie formou kondukce, konvekce a/či radiace?
6. Kolik je pro modul a chladič k dispozici místa?
7. Jaké je třeba napájení?
8. Je potřeba teplotu ohřívání/chlazení objektu řídit? S jakou přesností?
9. Jaká změna teploty chladiče je během provozu přibližně očekávána? Je možné, že se bude významně měnit v závislosti na kolísání teploty okolí?

Je zřejmé, že každá z koncepcí bude obsahovat vlastní soubor požadavků, jejichž vlastnosti a důležitost se budou lišit. Tato kapitola se bude věnovat jejich výběru a vzájemné optimalizaci.

3.1 Termoelektrický jev

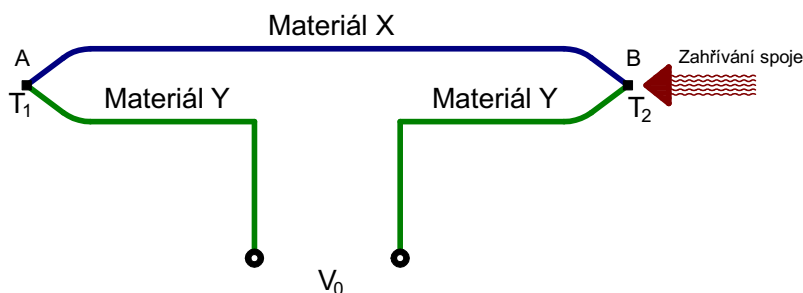
Nebo taky **Peltier–Seebeckův jev**, jehož principu je v práci využito, popisuje vztah přeměny rozdílu teplot na elektrické napětí a opačně (termoelektrické zařízení generuje při rozdílné teplotě stran napětí). Naopak po jeho připojení na stejnosměrný zdroj napětí vytváří teplotní diferenci, známou jako **Peltierův jev**. Na atomární úrovni, specificky nosiči náboje (elektrony i elektronové díry), se vlivem teplotního gradientu šíří ze strany teplejší na stranu chladnější. Jedná se o termicky-indukovaný proud.

Tohoto jevu je možné využít za účelem výroby elektrické energie, k měření teploty, k ohřevu či chlazení prostoru, případně látky. Směr ohřevu/chlazení je přitom závislý na směru toku elektrického proudu, což dělá z termoelektrických zařízení poměrně vhodný nástroj pro regulaci teploty.

Termoelektrický jev v podstatě zahrnuje tři oddělené jevy - výše zmíněný **Peltierův** a **Seebeckův** jev, třetím je potom **Thomsonův** jev. *Jouleovo teplo*, neboli ztráty vznikající průchodem elektrického proudu materiálem o určité rezistivitě, se v kontextu TM vztahují k nedokonalosti (ne-ideálnosti) materiálu, ze kterého je vyroben. Peltier–Seebeckův a Thomsonův jev je z principu termodynamiky reverzibilní, zatím co *Jouleovo teplo* není.

3.1.1 Seebeckův jev

Tento jev se projevuje u dvou různých vodičů, případně polovodičů, u kterých je teplota v místě jejich spoje udržována na rozdílných hodnotách ($T_1 > T_2$). Obvodem (viz obr. 3.1) poteče vlivem teplotní diference elektrický proud. *Seebeckův jev* se tedy projeví vznikem *termoelektrického napětí*.



Obr. 3.1: Seebeckův jev

Pro *elektromotorické napětí* E_{AB} a absolutní teploty spojů platí experimentálně zjištěný vztah [5]:

$$E_{AB} = (a_A - a_B) \cdot (T_2 - T_1) + 0,5 \cdot (b_A - b_B) \cdot (T_2 - T_1)^2, \quad (3.1)$$

kde E_{AB} je elektromotorické napětí; a, b - Seebeckovy koeficienty a T - teplota.

3.1.2 Peltierův jev

Peltierův jev byl objeven francouzským fyzikem *Jean-Charles Peltierem* roku 1834. Průchod elektrického proudu I obvodem složeným ze dvou různých vodivých materiálů generuje v jednom místě jejich spoje teplo T_2 (ohřev) a v druhém místě T_1 ho absorbuje (chlazení). Velikost „Peltierova“ tepla \dot{Q} přijatého ve spojení o teplotě T_1 za jednotku času lze vyjádřit vztahem [19]:

$$\dot{Q} = \prod_{AB} \cdot I = \left(\prod_B - \prod_A \right) \cdot I, \quad (3.2)$$

kde Π_{AB} je Peltierův koeficient celého termočlánku, Π_B a Π_A potom koeficient každého z materiálů.

Tyto koeficienty představují množství energie, kterou jednotka náboje přenesení daným materiálem. Ačkoli je pohyb nosičů náboje napříč spojem plynulý, s tím související šíření tepla je kvůli diferencii Π_A a Π_B nesouměrné. To má za následek nenulový rozdíl v distribuci tepla jednotlivých spojů, konkrétně ve formě akumulace či spotřeby závislé na směru toku elektrického proudu v daném místě.

Celá soustava se tak snaží dostat do rovnovážného stavu před připojením stejnosměrného proudu, na jedné straně absorpcí energie a jejím uvolněním na straně druhé. Jednotlivé dvojice vodičů se pro zvýšení účinku zapojují do série tzv. modulů (článků) viz dále.

3.1.3 Thomsonův jev

Třetí termoelektrický jev objevil a experimentálně potvrdil *W. Thomson* (1824–1907) následujícím experimentem. Zahřívá-li se dlouhá kovová tyč v jejím středu, vznikne na obou stranách teplotní spád. Oba konce budou mít stejnou teplotu. Jestliže současně tyčí prochází jedním směrem elektrický proud, zjistíme, že jedna strana tyče se proti předchozímu stavu ochladí a druhá ohřeje. Rozdělení teploty je nesouměrné.

3.2 Peltierův článek

Aktivním výkonovým prvkem v návrhu biologického termostatu je *Peltierův článek*. V krátkosti jsou představeny jeho výhody a nevýhody. Dále bude objasněn základní princip a dimenzování článku z hlediska výkonu.

Mezi výhody použití termoelektrických modulů patří [19]:

- ▷ žádné pohyblivé části
- ▷ malá velikost a nízká váha
- ▷ schopnost chladit pod teplotu okolí
- ▷ možnost vyhřívání a chlazení jedním modulem
- ▷ přesné řízení teploty
- ▷ vysoká životnost
- ▷ široké možnosti napájení

Naopak k nevýhodám se řadí zejména:

- ▷ nízká účinnost
- ▷ poměrně vysoká spotřeba

▷ použitelnost do chladícího výkonu přibližně 200 W

3.2.1 Základní princip a konstrukce TM

Polovodičovým materiálem pro výrobu těchto článků bývá nejčastěji slitina *Bismut–Telluridu*, která je vhodně dopována za účelem získání individuálních bloků, či elementů majících odlišnou charakteristickou vodivost typu „N“ a „P“.

Peltierův článek je prakticky sestaven ze dvou či více elementů takového polovodičového materiálu. Elementy jsou vzájemně elektricky propojeny sériově a termálně paralelně. Elektrické propojení těchto termoelektrických elementů je typicky konstruováno mezi dva keramické substráty. Ty nám zaručí celkovou mechanickou integritu, ochranu vůči kontaktu s vnějším materiálem a zároveň elektrickou izolaci individuálních elementů. Jako celek dosahuje TM velikosti jedné strany čtverce od přibližně 2,5–50 mm a výšky 2,5–5 mm [13].

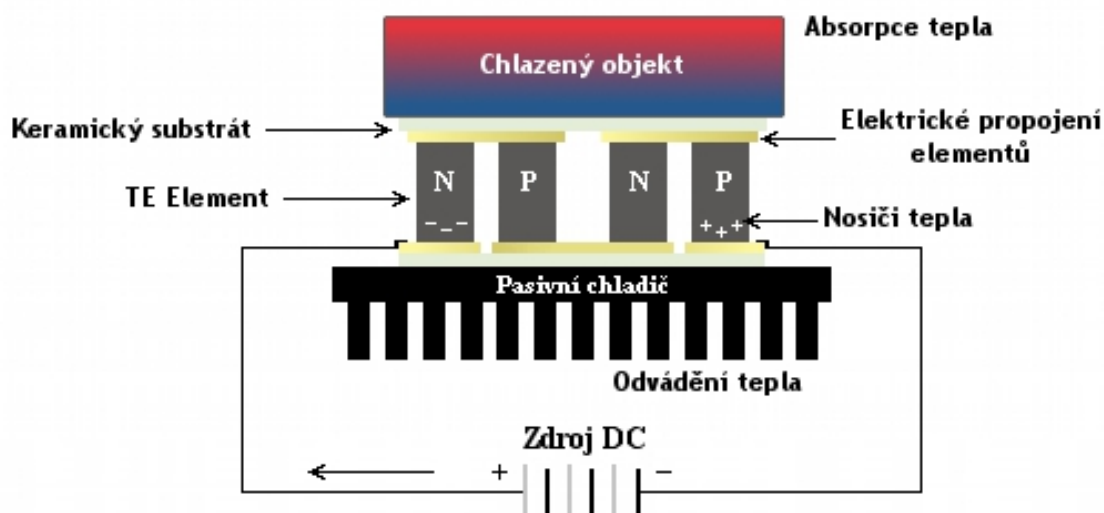
V konstrukci TM je použit jak *typ-N*, tak *typ-P* slitiny termoelektrického materiálu *Bismut–Tellurid*. Takovéto uspořádání způsobuje pouze jednosměrné šíření tepla, zatím co elektrický proud teče střídavě mezi horním a dolním propojením, napříč každým *N* a *P* elementem. Materiál s „elektronovou“ *N* vodivostí obsahuje více elektronů, než je potřeba pro vytvoření perfektní struktury molekulární mřížky. Oproti tomu materiál s „děrovou“ vodivostí má elektronů nedostatek. Tento nadbytek elektronů jedné části tvoří spolu s dírami části druhé nosiče, které vedou tepelnou energii skrz termoelektrický modul. Na obrázku 3.2 je tento princip zobrazen pro klasický příklad termoelektrického chladiče, který výsledkem působení elektrického proudu I odebírá z okolí teplo. Většina těchto modulů bývá vyráběna se shodným počtem elementů každého typu, přičemž jeden *termoelektrický pár* představuje jeden *N* a *P* element.

Proudění tepla (teplo které je aktivně „pumpováno“ napříč termoelektrickým modulem) je proporcionální velikosti připojeného elektrického DC proudu I . Jeho regulací je možné řídit tepelný tok a tudíž i teplotu.

3.2.2 Matematický model TM

Funkci termoelektrického zařízení je možno matematicky popsat a vytvořit tak jeho model. Protože má použitý polovodičový materiál při výrobě modulu několik teplotně závislých parametrů, bude na ně brán při tvorbě funkčního modelu zřetel. Tato podkapitola si neklade za cíl podrobně popsat techniky počítačového modelování, spíše seznámit čtenáře se základními algebraickými výrazy popisujícími chování TM.

Parametry, které je nutné zakomponovat do našeho modelu, jsou *efektivní Seebeckův koeficient* SM , *elektrický odpor* RM a *tepelná vodivost* KM modulu. Tyto tři



Obr. 3.2: Schematický diagram typického termoelektrického chladiče s dvěma páry elementu N a P .

veličiny jsme schopni vyjádřit pomocí polynomických rovnic. Použité specifické koeficienty jsou platné pro rozsah teplot od $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ a byly odvozeny ze standardně průmyslově vyráběného 71-párového 6-ampérového modulu. Při modelování zvoleného *Peltierova článku* je použito korekčních faktorů doporučených výrobcem viz dále [19].

Seebeckův koeficient

Seebeckův koeficient lze jako funkci teploty vyjádřit polynomem třetího stupně:

$$S_M = s_1 + s_2T + s_3T^2 + s_4T^3, \quad (3.3)$$

kde S_M je *Seebeckův koeficient* modulu [$\text{V}/^{\circ}\text{K}$] a T je průměrná teplota modulu v $^{\circ}\text{K}$.

s_1	$1,33450 \times 10^{-2}$
s_2	$-5,37574 \times 10^{-5}$
s_3	$7,42731 \times 10^{-7}$
s_4	$-1,27141 \times 10^{-9}$

Tab. 3.1: S_M pro 6-ampérový modul o 71-párech.

Výše uvedené polynomické vyjádření reprezentuje Seebeckův koeficient při nulovém rozdílu teplot stran modulu ($\Delta T = T_h - T_c = 0$). Pro $\Delta T > 0$ je potřeba spočítat každou stranu zvlášť podle následujícího vztahu:

$$S_{MT_h} \text{ nebo } S_{MT_c} = s_1T + \frac{s_2T^2}{2} + \frac{s_3T^3}{3} + \frac{s_4T^4}{4}. \quad (3.4)$$

Výsledný SM je potom:

$$S_M = (S_{MT_h} - S_{MT_c})/\Delta T, \quad (3.5)$$

kde S_{MT_h} je Seebeckův koeficient modulu na horké straně modulu o teplotě T_h a S_{MT_c} na chlazené straně o teplotě T_c .

Odpor modulu

Obdobně jako SM je vyjádřen odpor modulu pomocí polynomu třetího stupně:

a) pro $\Delta T = 0$

$$R_M = r_1 + r_2 T + r_3 T^2 + r_4 T^3, \quad (3.6)$$

b) a pro $\Delta T > 0$

$$R_{MT_h} \text{ nebo } R_{MT_c} = r_1 T + \frac{r_2 T^2}{2} + \frac{r_3 T^3}{3} + \frac{r_4 T^4}{4} \quad (3.7)$$

Výsledný RM je potom:

$$R_M = (R_{MT_h} - R_{MT_c})/\Delta T, \quad (3.8)$$

kde R_{MT_h} je odpor na horké straně modulu o teplotě T_h a R_{MT_c} na chlazené straně o teplotě T_c a T je průměrná teplota modulu v °K. Hodnoty jednotlivých koeficientů vidíme v následující tabulce.

r_1	2,08317
r_2	$-1,98763 \times 10^{-2}$
r_3	$8,53832 \times 10^{-5}$
r_4	$-9,03143 \times 10^{-8}$

Tab. 3.2: RM pro 6-ampérový modul o 71-párech.

Tepelná vodivost

Pro tepelnou vodivost modulu platí stejný předpis polynomické funkce jako v případě odporu s rozdílem v hodnotách koeficientů (místo r_x dosazujeme k_x):

k_1	$4,76218 \times 10^{-1}$
k_2	$-3,89821 \times 10^{-6}$
k_3	$-8,64864 \times 10^{-6}$
k_4	$2,20869 \times 10^{-8}$

Tab. 3.3: KM pro 6-ampérový modul o 71-párech.

Konverze parametrů pro moduly s jinou konfigurací

Pro každý z parametrů (SM, RM, KM), který neodpovídá zmíněné konfiguraci, je nutné aplikovat korekční faktor dle níže uvedených vztahů [19]:

$$\begin{aligned} S_n &= S_M \times \frac{N_n}{71} \\ R_n &= R_M \times \frac{6}{I_{MAX_n}} \times \frac{N_n}{71} \\ K_n &= K_M \times \frac{I_{MAX_n}}{6} \times \frac{N_n}{71} \end{aligned} \quad (3.9)$$

Kde S_n je Seebeckův koeficient nového modulu, R_n jeho elektrický odpor a K_n tepelná vodivost. N_n je počet párů a I_{MAX_n} optimální nebo maximální proud tekoucí modulem.

3.3 Výpočet vlastností TM

V našem návrhu je uvažován Peltierův článek, jehož vlastnosti uvedené výrobcem¹ jsou při teplotě horké strany článku $T_h = 50^\circ\text{C}$:

- $I_{MAX} = 12,00\text{ A}$
- $U_{MAX} = 17,50\text{ V}$
- $\Delta T_{MAX} = 70^\circ\text{K}$
- $Q_{cMAX} = 114,00\text{ W}$

Mezi parametry ovlivňujícími chování Peltierova článku patří těchto pět aplikovaných proměnných:

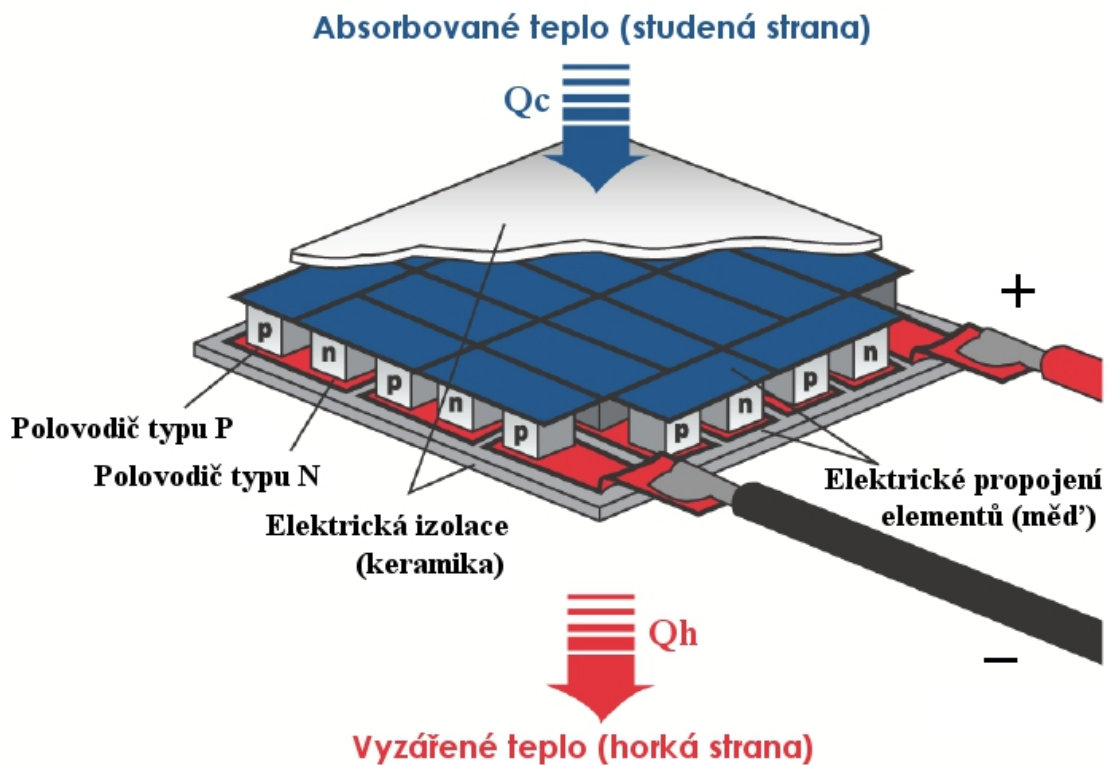
- ▷ I_{IN} - vstupní proud v ampérech
- ▷ U_{IN} - vstupní napětí ve voltech
- ▷ T_h - horká strana modulu ve stupních Kelvina
- ▷ T_c - studená strana modulu ve stupních Kelvina
- ▷ Q_c - vstupní tepelný výkon (*teplo pumpováno*) modulu ve wattech

Při výpočtu je nutné alespoň tři z těchto proměnných správně zvolit. Běžným postupem bývá buď stanovení hodnot **1)** T_h , I a Q_c nebo **2)** T_h , I a T_c . V této práci je použito druhé metody.

3.3.1 Jednoúrovňová konfigurace TM

Následující výklad popisuje matematicky jednoúrovňovou konfiguraci TM, jak je zobrazeno na obrázku 3.3 (*režim chlazení*) [19].

¹ „High Power Thermoelectric module“ - model 9500/127/120 B od výrobce FerroTec.



Obr. 3.3: Jednoúrovňová konfigurace TM (obrázek upravený z [19]).

- ▷ Teplotní rozdíl (ΔT) napříč modulem ve $^{\circ}\text{K}$, případně $^{\circ}\text{C}$ je:

$$\Delta T = T_h - T_c \quad (3.10)$$

- ▷ Odebíraný (*pumpovaný*) tepelný výkon (Q_c [W]) modulu je:

$$Q_c = (S_M \times T_c \times I_{IN} - (0,5 \times I_{IN}^2 \times R_M) - (K_M \times \Delta T)). \quad (3.11)$$

- ▷ Vstupní napětí (U_{IN} [V]) modulu je:

$$U_{IN} = (S_M \times \Delta T) + (I_{IN} \times R_M) \quad (3.12)$$

- ▷ Vstupní elektrický výkon (P_{IN} [W]) modulu je:

$$P_{IN} = U_{IN} \times I_{IN} \quad (3.13)$$

- ▷ Vyprodukované teplo (Q_h [W]) modulem je:

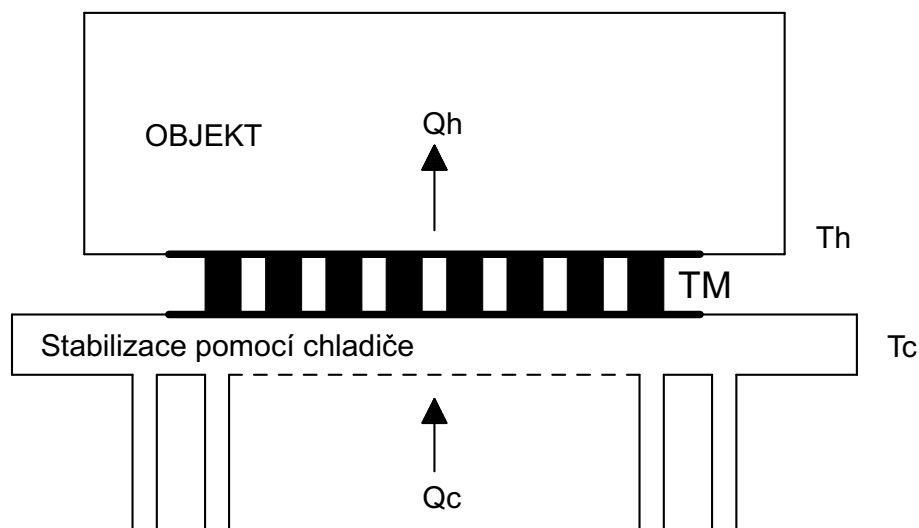
$$Q_h = P_{IN} + Q_c \quad (3.14)$$

- ▷ Koefficient výkonu chlazení (COP_c [-]) studené strany modulu je:

$$COP_c = Q_c / P_{IN} \quad (3.15)$$

Peltierův článek v režimu ohřevu

TM může pomocí změny polarity vstupního DC proudu pracovat v *režimu ohřevu*. Z tohoto pohledu náš článek pracuje jako „*tepelná pumpa*“ dodávající do systému teplo o výkonu Q_h . Tento režim je zobrazen na obr. 3.4, kde je chladič a ohříváný objekt ve vzájemné opozici, o teplotě objektu T_h a teplotě chladiče T_c .



Obr. 3.4: Peltierův článek v režimu ohřevu; Q_h - teplo dodávané objektu o teplotě T_h , Q_c teplo odnímané z okolí o teplotě T_c .

Q_h je možno spočítat podle vztahu:

$$Q_h = (S_M \times T_h \times I_{IN} + (0,5 \times I_{IN}^2 \times R_M) - (K_M \times \Delta T)). \quad (3.16)$$

Koeficient výkonu ohřevu (COP_h [-]) horké strany modulu je potom:

$$COP_h = Q_h/P_{IN}. \quad (3.17)$$

Existuje celá řada dalších vlastností TM, které lze popsat matematicky. Pro účely návrhu jsou však výše uvedené vztahy dostačující. Odpovědi na položené otázky a řešení problematiky tepelných ztrát jsou zodpovězeny v následující podkapitole.

3.3.2 Výsledky

Tato část práce věnuje pozornost spočítaným výsledkům výše zmíněného termoelektrického modulu (viz strana 35) a jejich analýze s ohledem na funkci navrhovaného

termostatu. Ten má pracovat v rozsahu teplot 20–40 °C s objemem 2l a přesností $\pm 1^\circ\text{C}$. Matematický model **vychází z těchto předpokladů**²:

1. Maximální hodnota rozdílu požadované a skutečné teploty objektu při počáteční teplotě stran modulu $T_h = T_c = \text{teplota okolí}$ nepřekročí $\Delta T_{MAX} = 40^\circ\text{C}$.
2. Potřebný výkon a tím pádem i čas ohřevu/chlazení je stanoven pro vodu viz tabulka 3.4.
3. Časová odezva na změnu teploty objektu je dimenzována z hlediska laboratorního využití.
4. Zvolená teplota okolí je $T_o = 25^\circ\text{C}$, bez očekávaných výrazných změn (do $\pm 2^\circ\text{C}$).
5. Relevantní vnější zdroje kondukce, konvekce a/či radiace nejsou uvažovány.
6. Prostorové nároky celého návrhu nepředstavují problém.
7. Požadavky na napájení vyplývají z modelových charakteristik, nicméně nesmí být opomenuta hranice U_{MAX} udávaná výrobcem.
8. Peltierův článek umožňuje velmi přesnou regulaci teploty (ve speciálních případech s přesností $0,001^\circ\text{K}$).
9. Teplota chladiče bude závislá na provozu TM, vliv kolísání teploty okolí je zmíněn výše.

V [m ³]	m [kg]	ρ_{vody} [kg·m ⁻³]	T ₀ [°K]	T ₁ [°K]	c _{vody} [J/kg·°K]
0,002	1,999	999,97	273,15	313,15	4190

$$\mathbf{Q} = 335,189 \text{ [kJ]}$$

Tab. 3.4: Teplo potřebné k ohřátí/ochlazení vody s teplotním rozdílem $\Delta T = 40^\circ\text{C}$.

Na základě stanovení množství potřebného tepla byl vybrán termoelektrický modul s adekvátním výkonem. Ten udává výrobce jako hodnotu Q_{MAX} , zpravidla chladičí výkon při nulovém rozdílu teplot stran modulu $\Delta T = 0^\circ\text{K}$. U výpočtů byla zvolena konstantní teplota studené strany modulu $T_c = 298,15^\circ\text{K}$ s měnící se teplotou horké strany. V praxi jde samozřejmě o systém dynamický, nicméně níže prezentované hodnoty s grafickým výstupem jsou při řešení otázky potřebného výkonu a definice schopnosti časové odezvy na požadovanou změnu teploty dostačující. Z důvodu přehlednosti jsou tabulkové hodnoty uvedeny pouze pro rozdíl teplot $\Delta T = 40^\circ\text{K}$.

V Tabulce 3.6 a 3.5 jsou prezentovány dopočítané hodnoty jednotlivých koeficientů, výkonů, vstupního napětí, proudu a efektivnosti modulu.

Následuje grafická interpretace vlastností námi modelovaného TM pro rozsah $I_{IN} = 0 \div 12 \text{ A}$ a $\Delta T = 0 \div 70^\circ\text{K}$:

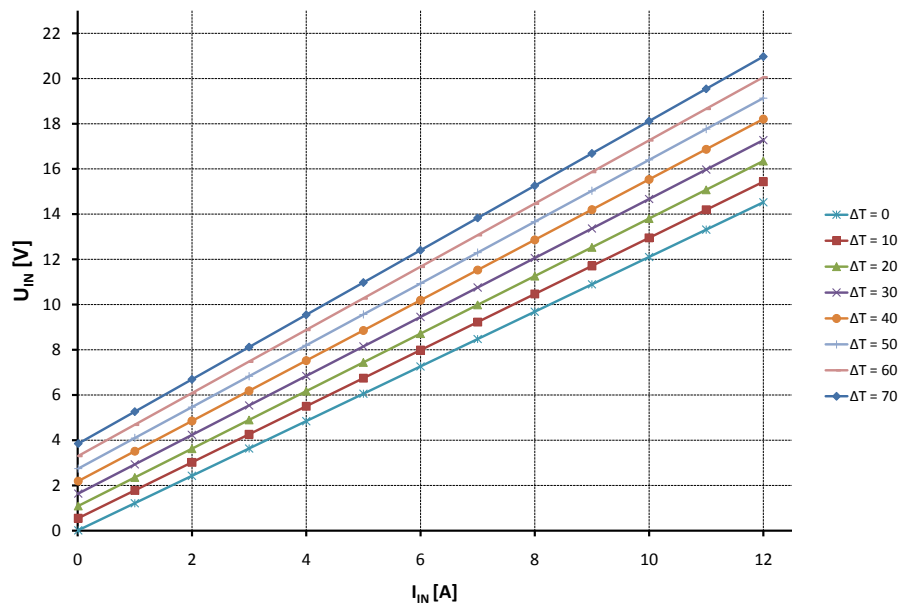
²Zároveň jsou zodpovězeny otázky položené v začátku této kapitoly.

S_{MT_h}	S_{MT_c}	SM
6,856	5,639	0,0544
R_{MT_h}	R_{MT_c}	RM
373,303	313,564	1,3357
K_{MT_h}	K_{MT_c}	KM
121,537	109,037	1,1179

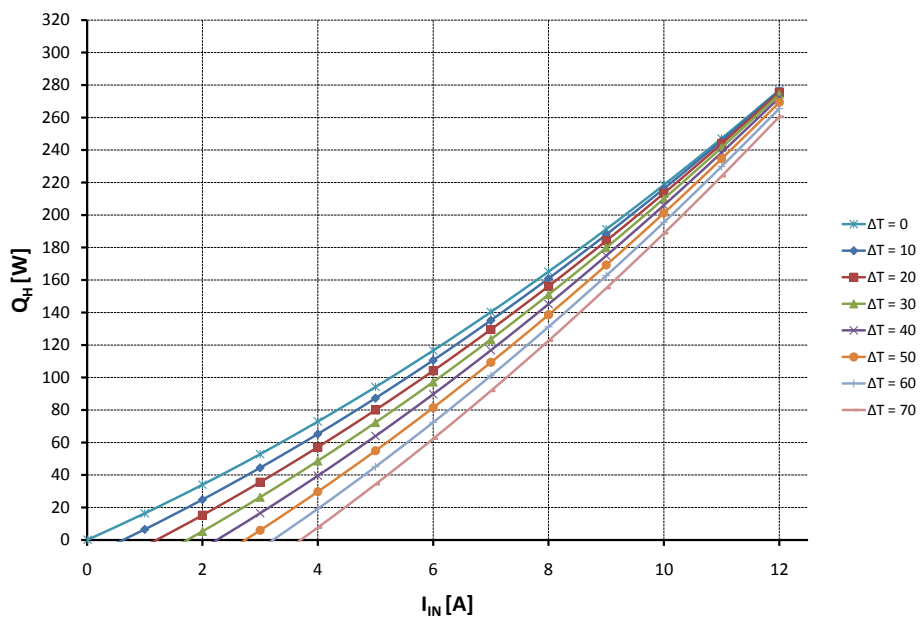
Tab. 3.5: Hodnoty Seebeckova koeficientu, odporu a vodivosti modulu (dosazení do vztahů 3.4, 3.7 a aplikace korekčních vztahů viz 3.9) pro $\Delta T = 40^\circ\text{K}$.

$T_h = 338,15^\circ\text{K}, T_c = 298,15^\circ\text{K}$						
U_{IN}	I_{IN}	Q_c	P_{IN}	Q_h	COP_h	COP_c
[V]	[A]	[W]	[W]	[W]	[-]	[-]
18,20	12	53,76	218,46	272,22	1,25	0,25
16,87	11	52,90	185,56	238,46	1,29	0,29
15,53	10	50,70	155,33	206,04	1,33	0,33
14,20	9	47,17	127,78	174,95	1,37	0,37
12,86	8	42,31	102,89	145,20	1,41	0,41
11,53	7	36,10	80,68	116,79	1,45	0,45
10,19	6	28,56	61,14	89,71	1,47	0,47
8,85	5	19,69	44,27	63,96	1,44	0,44
7,52	4	9,48	30,08	39,56	1,32	0,32
6,18	3	0	18,55	16,48	0,89	0
4,85	2	0	9,70	0	0	0
3,51	1	0	3,51	0	0	0

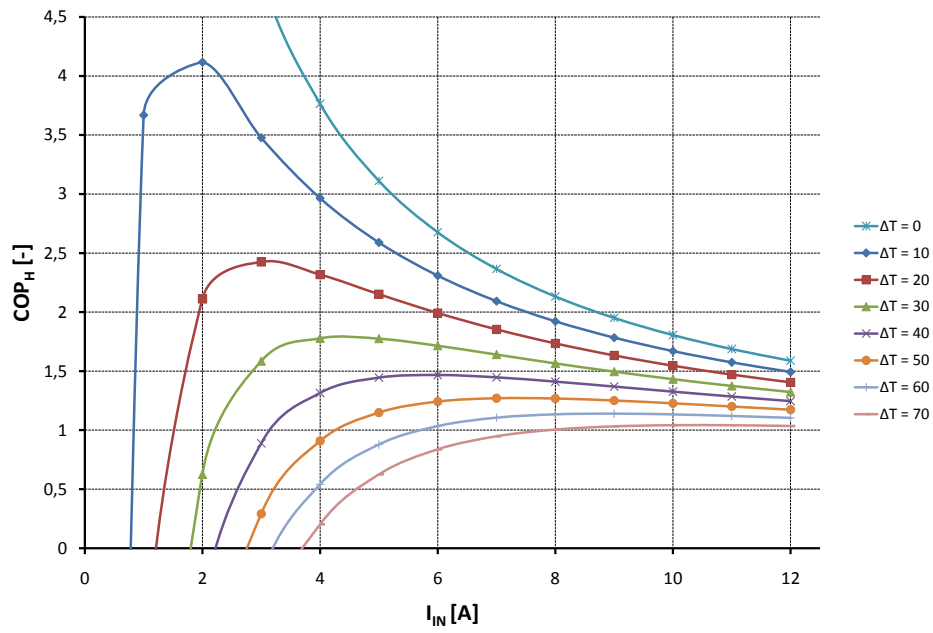
Tab. 3.6: Hodnoty vstupního napětí, výkonu a příkonu modulu v závislosti na rozdílu teplot stran $\Delta T = 40^\circ\text{K}$ a měnícím se proudem.



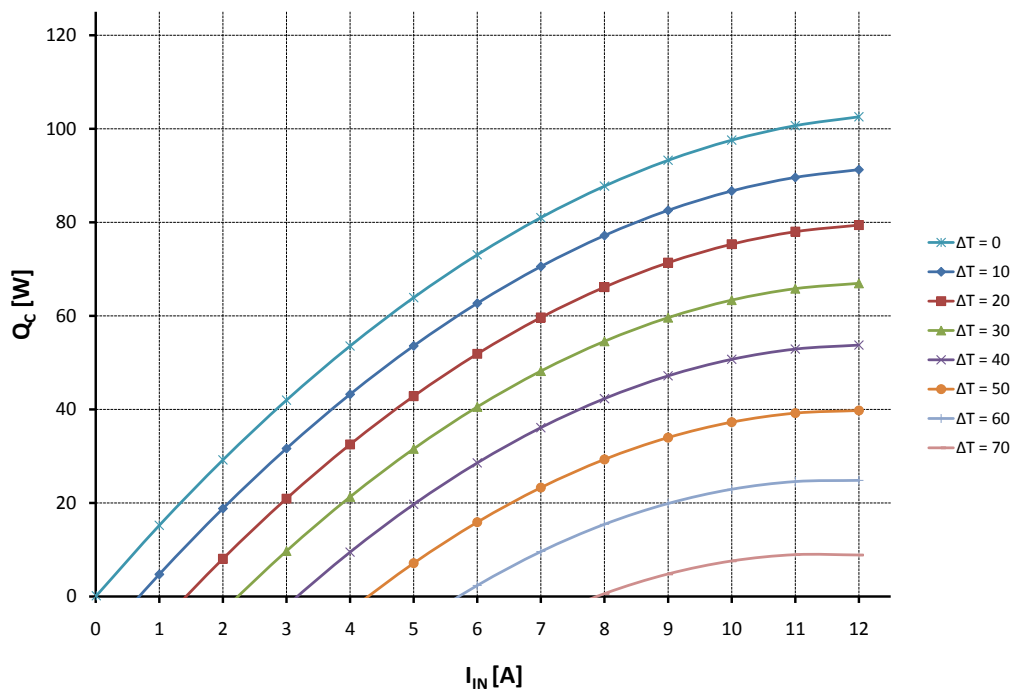
Obr. 3.5: Závislost vstupního napětí a proudu TM v daném rozsahu rozdílu teplot ΔT .



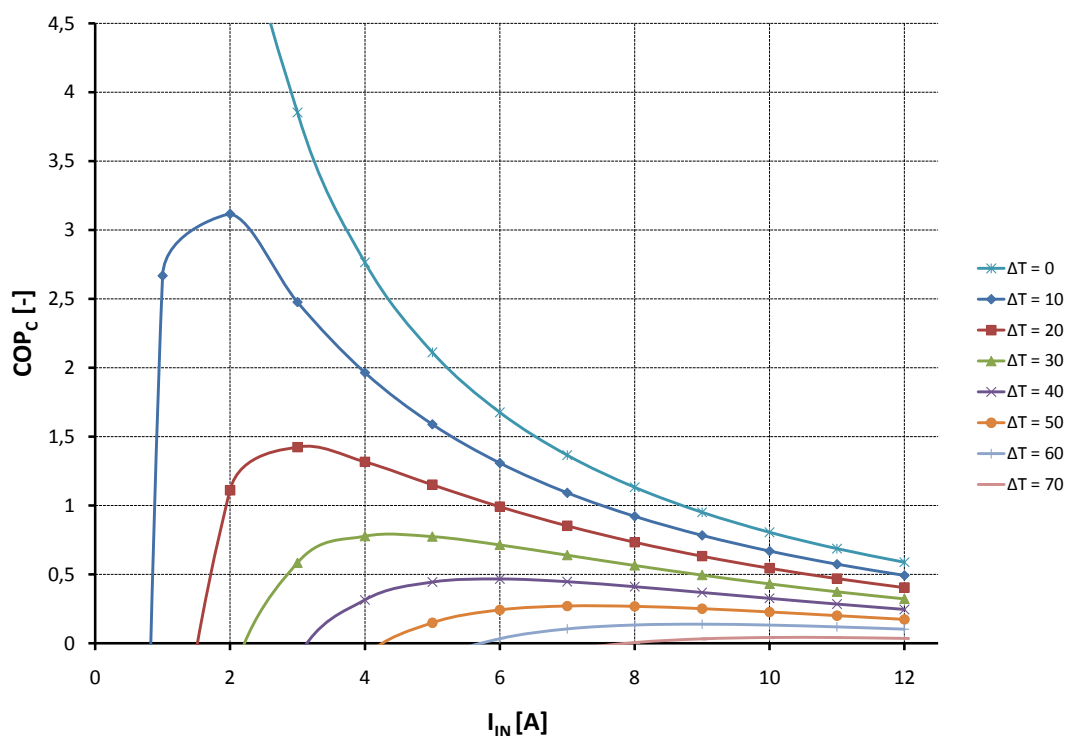
Obr. 3.6: Výkon horké strany článku pro daný rozsah ΔT v režimu ohřevu.



Obr. 3.7: Charakteristika parametru COP_h pro daný rozsah ΔT .



Obr. 3.8: Výkon studené strany článku pro daný rozsah ΔT v režimu chlazení.



Obr. 3.9: Charakteristika parametru COP_c pro daný rozsah ΔT .

3.4 Shrnutí

Na základě požadavků zadání byl spolu s volenými parametry definován vhodný termoelektrický modul. Presentované grafické závislosti poskytují poměrně jasnou principiální představu o teplotně závislých parametrech článku. Dále z nich lze vyčíst velikost vstupního napětí a proudu. Je zřejmé, že jedním z úkolů návrhu bude definice chlazení TM. Schopnost udržet příslušnou stranu modulu v přijatelné teplotní stabilitě hraje podstatnou roli z hlediska účinnosti celého zařízení. Této problematice se budeme dále věnovat v kapitole návrhu.

4 ZOBRAZOVAČ LCD

Při výběru zobrazovacího zařízení je potřeba zohlednit základní parametry, mezi které patří zejména struktura segmentů (*segmentová*, *alfanumerická* nebo *maticová*), rozměry a zpracování, rozsah provozních teplot (standardní nebo průmyslový), způsob napájení, komunikace s mikroprocesorem a v neposlední řadě cena. Z ergonomického hlediska je to potom dobrá čitelnost, jak v případě sníženého osvětlení, tak různých zorných úhlů. Podle požadavků návrhu jsou dostupné displeje reflexní (bez podsvícení), nebo s LED podsvícením. S ohledem na dobrou čitelnost by bylo vhodné, aby displej rovněž podporoval českou diakritiku, popř. jiné znakové sady [18]. Zadání diplomové práce si neklade žádné zvýšené požadavky na signalizaci displejem, stejně jako na záležitosti týkajících se provozu. Autor tak uvažuje akademické laboratorní podmínky, pro které by postačil i segmentový displej. Ten by byl nicméně značně omezen zobrazením pouze číselné hodnoty. Proto bude v návrhu použit znakový zobrazovač LCD, jehož nespornou výhodou je možnost zobrazení znakových sad.

4.1 LCD MC1602E-SYL/H

Jedná se o dvouřádkový zobrazovač s LED podsvícením. Každý řádek má 16 znaků. Znaky jsou tvořeny maticí 5×8 bodů. Komunikaci s μ procesorem (μ P) zajišťuje speciální integrovaný obvod - řadič, který ovládá celý displej. Standardem se stal řadič *HD44780* od firmy *HITACHI*. Všichni výrobci používají *HD44780*, nebo jeho ekvivalent. Z pohledu komunikace tím pádem nehraje roli, kdo displej vyrobil [1]. Pro dosažení plné kompatibility displeje je navíc zapojení přívodního konektoru stejné, což se v praxi ocení.

4.2 Komunikace

Displej může pracovat minimálně s šesti až maximálně jedenácti vodiči plus napájení +5 V. Před připojením k μ P je potřeba zvolit šířku datové komunikace. Modul podporuje přenos po 8-bitové (**DB0–DB7**) nebo pouze 4-bitové sběrnici (**DB4–DB7**), kde se data posílají dvěma zápisy, nejdříve horní, a pak dolní půlbyte.

Po zapnutí μ P a displeje je nutné provést jeho základní inicializaci. Nastaví se počet bitů datové komunikace, směr psaní znaků, posun řádku, pozice a blikání kurzoru. Po této inicializaci je displej připraven na komunikaci.

- ▷ 8-bitová sběrnice – Pošle se 8 bitů a zapíšu se *Enablem*.
- ▷ 4-bitová sběrnice – Tato možnost přináší úsporu vývodů na μ P, avšak komunikace bude $2 \times$ pomalejší, protože se data posílají nadvakrát. Nejdříve se pošlou

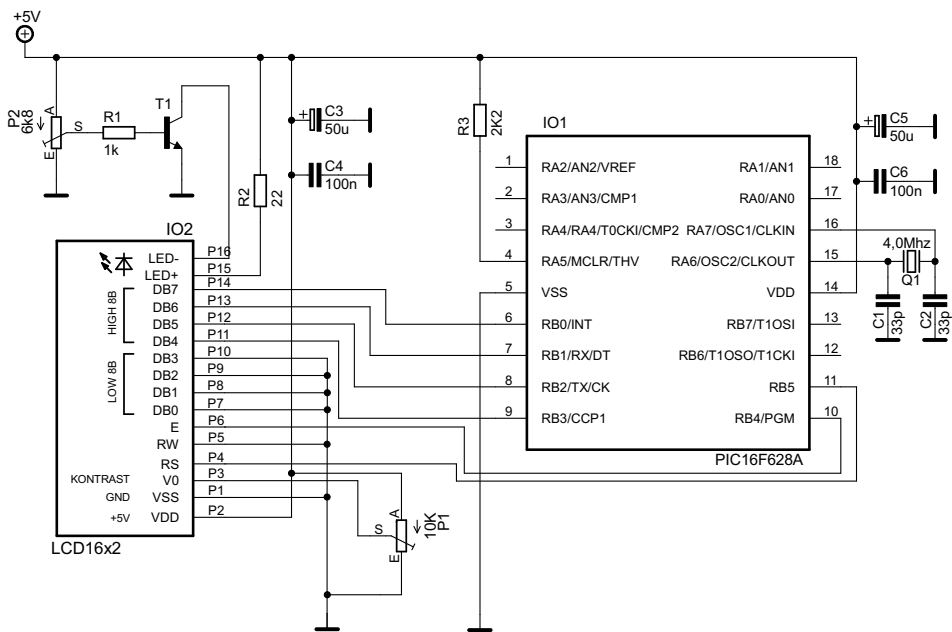


Obr. 4.1: Dvouřádkový zobrazovač MC160E-SYL/H (převzato z [7]).

vyšší 4 bity, zapíšou se *Enablem*, a pak nižší 4 bity a zapíšou se *Enablem*. V tomto režimu se datová linka **DB0–DB3** na displeji spojuje se zemí. Zapojení displeje s μP je na obrázku 4.2.

Základní komunikaci μP s displejem můžeme popsat následovně: Pomocí **R/S**, **R/W** a datových vodičů jsou do LCD modulu přenášeny příkazy a data určená k zobrazení, případně jimi čteme data paměti generátoru znaků (**CG RAM**), paměti zobrazovaných dat (**DD RAM**), příznak „*bussy*“ a adresu čítače kurzoru.

Vzhledem k časovým relacím ovládání zobrazovače je μP poměrně pomalé zařízení. Z toho důvodu by nemělo činit problémy dodržet časové posloupnosti bez vkládání čekacích smyček. Pro provedení zápisu nebo čtení do/ze zobrazovače postačí čtyři kroky [10]. Obsazení vývodů dvouřádkového LCD displeje vidíme v tabulce 4.1.



Obr. 4.2: Zapojení zobrazovače s μ P PIC16F628A.

Vývod	Signál	Úroveň	Popis
1	V_{SS}	0	Zem
2	V_{DD}	+5 V	Napájecí napětí
3	V_0	-	Nastavení kontrastu
4	R/S	H/L	H: Data; L: Instrukce
5	R/W	H/L	H: Čtení; L: Zápis
6	E	H, H-L	Vstup povolení
7~14	DB0~DB7	H/L	Data kód 0~7 (LSB)
15	A	-	podsvícení-anoda LED
16	K	-	podsvícení-katoda LED

Tab. 4.1: Obsazení vývodů LCD MC160E-SYL/H [1].

5 PROCESOR

Procesor (CPU - *Central Processing Unit*) je ústřední výkonná jednotka počítače, která z paměti čte instrukce a na jejich základě vykonává program. Ten je zapsaný v jazyce označovaném jako tzv. *strojový kód*, který se podle typu procesoru skládá z jednodušších nebo složitějších strojových instrukcí. V dnešní době si pod pojmem CPU představíme elektronický integrovaný obvod, i když v historii byly procesory realizovány i elektromechanicky. Rodina procesorů, které zpracovávají stejný strojový kód, tvoří specifickou *architekturu* procesoru.

Procesory můžeme rozdělit podle:

1. **šířky operandu** na 4, 8, 16, 32, 64 – bitové
2. **struktury**
 - ▷ CPU – procesory pro osobní počítače a servery
 - ▷ MCU (*Microcontroller Unit*) – mikrokontroler, mikrořadič, jednočipový mikropočítač
 - ▷ DSP (*Digital Signal Processor*) – digitální signálové procesory (architektura je optimalizovaná pro matematické operace, které se uplatňují ve zpracování signálů)
3. **rozsahu souboru instrukcí**
 - ▷ CISC – *Complete Instruction Set Computing*
 - ▷ RISC – *Reduced Instruction Set Computing*
4. **podporované architektury**
 - ▷ *Von Neumann*
 - ▷ *Harward*.

5.1 Mikroprocesor

Mikroprocesor (μP) je procesor integrovaný do jednoho čipu. Takový obvod obsahuje:

- ▷ Jádro procesoru:
 - řadič
 - sadu registrů (pro uchování operandů a mezivýsledků)
 - ALU (aritmeticko – logická jednotka)
 - FPU (jednotka plovoucí řádové čárky)
- ▷ Integrované periferní obvody.

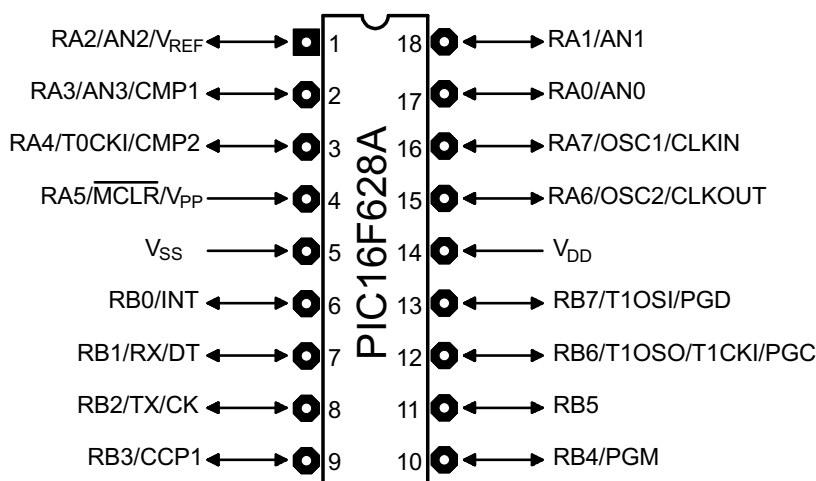
5.1.1 Charakteristika MCU

V jednom obvodovém pouzdře jsou s procesorovým jádrem obsaženy i periferní obvody, přičemž sběrnice spojující jádro s periferiemi je obvykle vedena jen v rámci pouzdra. Mezi výhody použití MCU je možno zmínit nízkou cenu, nízkou spotřebu elektrického proudu (v aktivním i klidovém režimu), malé rozměry příslušného systému a usnadnění řešení z hlediska EMC (*Electromagnetic Compatibility*). K nevýhodám patří menší výpočetní výkon stejně jako možnosti rozšíření.

Společným záměrem všech výrobců moderních jednočipových mikropočítačů je co možná nejvyšší stupeň integrace periferií (k nejběžnějším patří například A/D převodník, LCD řadič, sériová rozhraní či obvody pro PWM – *Pulse Width Modulation*). To sebou přináší zjednodušení návrhu zařízení, snížení nákladů na výrobu, zlepšení spolehlivosti a snížení spotřeby energie [15].

5.2 PIC16F628A

MCU PIC16F628A patří do rodiny PIC16FXX, tedy skupiny univerzálních 8-bit jednočipových mikropočítačů. Je vyroben technologií CMOS (*Complementary Metal-Oxide-Semiconductor*) a založen na architektuře RISC. Podporuje *Harwardskou* architekturu, tzn. paměť je rozdělena na paměť programu a dvě paměti dat tak, aby současně dva operandy mohly vstupovat do ALU.



Obr. 5.1: Pouzdro DIP18 mikrokontroleru PIC16F628A.

5.2.1 Popis mikrokontroleru

Vyčerpávající popis vlastností a použitých technologií můžeme najít v [15]. Pro přehled postačí obrázek 5.1 a následující tabulka 5.1.

Hodiny	Maximální taktovací frekvence [MHz]	20
Paměť	Programová paměť Flash [slovo]	2048
	Paměť dat typu RAM [byte]	224
	Paměť dat typu EEPROM [byte]	128
Periferie	Modul časovače	TMR0, TMR1, TMR2
	Komparátorů	2
	Modul převodník AD/komparátor/PWM	1
	Sériová komunikace	USART
	Interní napěťová reference	Ano
Specifika	Zdrojů přerušení	10
	Vstupně/výstupní brány	16
	<i>Brown-out</i> ¹ reset	Ano
	Pouzdro	18-pin DIP, SOIC, 20-pin SSOP, 28-pin QFN

Tab. 5.1: Vlastnosti MCU PIC16F628A.

¹Detekční obvod výpadku napájecího napětí.

6 NÁVRH

Tato kapitola se věnuje finálnímu návrhu celého zařízení. Následuje popis jednotlivých funkčních bloků a případných výpočtů součástek.

6.1 Napájení a výkonový akční člen

Jedním z prvních kroků návrhu musí být stanovení velikosti napájecího napětí, stability a proudové vytěžitelnosti. Stejně jako ve většině případu i tady pracuje číslicová část s pevným stejnosměrným napětím 5 V. To se tedy týká μP , LCD displeje a snímačů teploty DALLAS. U analogové části je však situace díky *Peltierově článku* zcela odlišná. Námi modelovaný termoelektrický modul dosahuje při maximálním proudu a napětí hodnoty příkonu 210 W. Pro aplikaci v rámci této diplomové práce není takového výkonu potřeba. Úvahou bylo proto zvoleno s pomocí příslušných modelových charakteristik (viz kapitola 3, od strany 37) 12 V napájení TM. Spínání článku (bude ještě zmíněno dále) je v součinnosti s mikrokontrolerem realizováno pomocí *H-můstku*. Při výpočtu velikosti protékajícího proudu I modulem (sepnutý stav 1), viz obrázek 6.1, se vychází z teorie metody postupného zjednodušování obvodu [2] tedy¹:

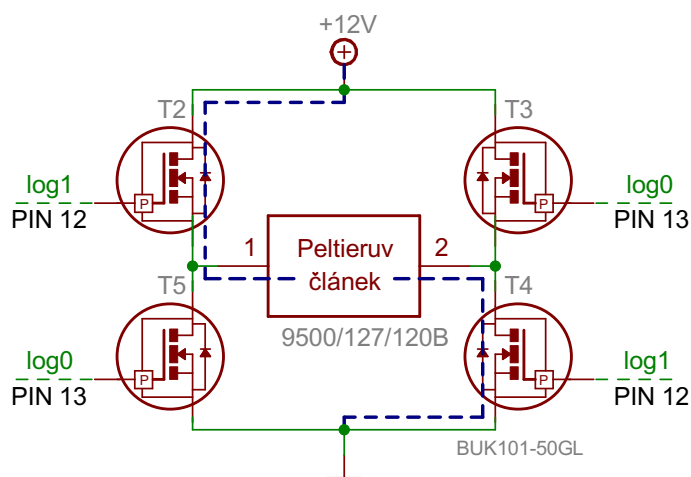
$$\begin{aligned}U_{IN} &= U_{PC} + 2 \cdot U_T \\U_{IN} &= R_{PC} \cdot I + 2 \cdot R_T \cdot I \\I &= \frac{U_{IN}}{R_{PC} + 2 \cdot R_T} \\I &= \frac{12 \text{ V}}{2,22 \Omega} = 5,4 \text{ A}\end{aligned}\tag{6.1}$$

Ze slaboproudé části bude nejvíce proudově odebírat μP (přibližně 160 mA/5 V) [15] a LCD displej (82 mA/5 V se zapnutým podsvícením), viz tabulka 6.1.

Součástka	P [mW]	Poznámka
Mikroprocesor	800	Příkonové maximum s připojenými periferiemi
LCD displej	410	Včetně LED podsvícení
2 × DALLAS	< 20	Celková spotřeba

Tab. 6.1: Porovnání použitých součástek s největším příkonem – slaboproudá část.

¹Pro výpočet odporu *Peltierova článku* je použita tabulka 3.6, pro $I_{IN} = 1 \rightarrow 6 \text{ A}$; R_T je stanoveno z [4]



Obr. 6.1: Jedna s možností sepnutí TM pomocí *H-můstku* spolu se stavy pinů μP je znázorněna modrou přerušovanou čarou.

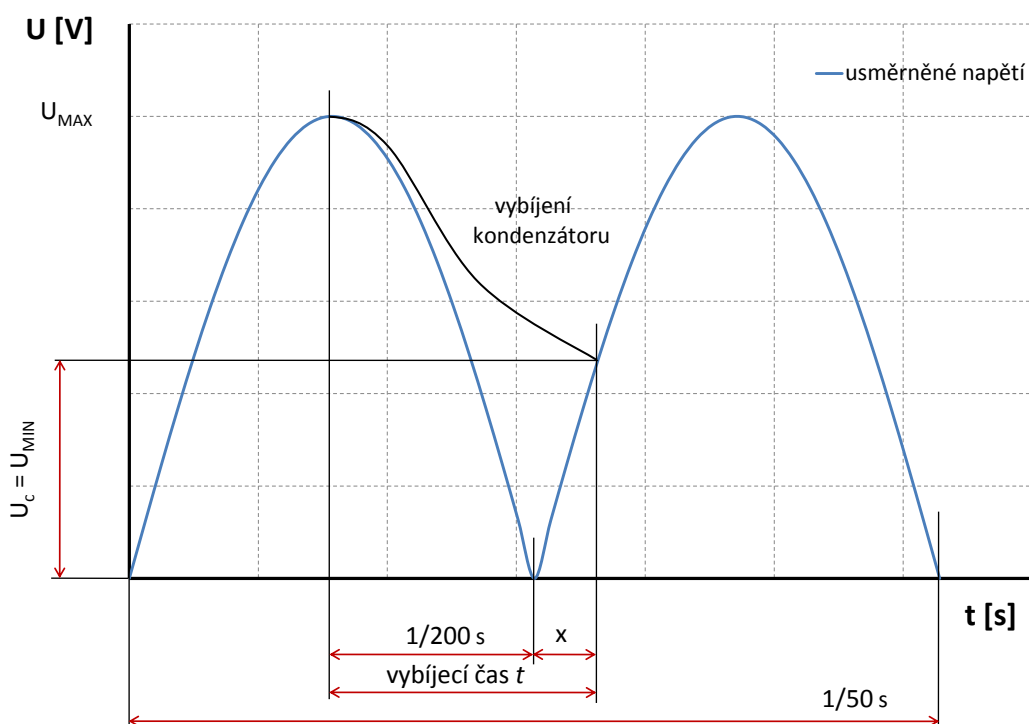
6.1.1 Transformátor

Základ zdroje napětí je tvořen toroidním transformátorem se zdánlivým výkonem sekundárního vinutí 200 VA (24 V; 8,333 A)². Ten byl dimenzován s ohledem na výkonovou část návrhu a požadavky zálohovaného napájení. Pro usměrnění je použit můstek do 10 A s hodnotou $V_{RRM} = 100 V$ (*Maximum Repetitive Peak Reverse Voltage*). Příslušný nárazový kondenzátor připojený za můstek musí splňovat požadavek minimálního napětí, které je nutné dodávat. Schématické zobrazení průběhu napětí spolu s ilustračním průběhem vybíjení kondenzátoru (reálný průběh vybíjení kondenzátoru je funkcí exponenciály) vidíme na obrázku 6.2. Jeho kapacitu spočítáme pro 12 V baterii, která je použita pro účely zálohování rozebírané v následující podkapitole. Průběh vybíjení nárazového kondenzátoru lze popsat vztahem [2]:

$$U_c = U \cdot e^{-\frac{t}{R_z \cdot C}} \quad (6.2)$$

kde je U_c napětí kondenzátoru [V]
 U nabíjecí napětí [V]
 t vybíjecí čas [s]
 R_z odpor připojené zátěže [Ω]
 C kapacita kondenzátoru [F].

²Tento transformátor není běžně dostupný, je nutné ho proto objednat přímo u výrobce [14].



Obr. 6.2: Ilustrační definice vybíjecího času kondenzátoru příslušející úrovni napětí U_{MIN} .

Prahové napětí U_c je stanoveno pomocí nabíjecí charakteristiky zvoleného akumulátoru a příslušných napěťových úbytků prvků obvodu. Nabíjecí napětí 12 V akumulátoru stanovíme z katalogového listu výrobce [23], kde je toto napětí udáno v rozsahu 14,4 V až 15 V. Napětí na kondenzátoru by tedy při vybíjení nemělo poklesnout pod zvolenou mez $U_{OC} = 14,7 V$ plus úbytek na můstkovém usměrňovači $U_{us} = 1,1 V$ a řídicím *Darlingtonově* tranzistoru $U_{DT} = 3 V$ nabíjecího obvodu.

$$U_c = U_{OC} + U_{us} + U_{DT} = 14,7 V + 1,1 V + 3 V = 18,8 V. \quad (6.3)$$

Nyní se spočítá neznámá část vybíjecího času t_x (viz obrázek 6.2):

$$\begin{aligned} \sin\left(\frac{U_c}{U_{sek} - U_{us}}\right) &= \alpha_c \\ \sin\left(\frac{18,8 V}{32,84 V}\right) &= \alpha_c \\ 34,9^\circ &= \alpha_c \\ 45^\circ &\dots \frac{1}{200} s \\ 34,9^\circ &\dots \frac{0,005 s}{45^\circ} \cdot 34,9^\circ = 3,87 \cdot 10^{-3} s \end{aligned}$$

kde U_{sek} je napětí sekundárního vinutí toroidního transformátoru.

Dosazením do vztahu 6.2 se řeší kapacita kondenzátoru (hodnota odporu zátěže R_z , byla spočítaná v rovnici 6.1):

$$\begin{aligned} e^{\frac{0,005s+t_x}{R_z \cdot C}} &= \frac{U_{sek} - U_{us}}{U_c} \\ t &= R_z \cdot C \cdot \ln \frac{U}{U_c} \\ C &= \frac{8,87 \cdot 10^{-3}s}{2,22\Omega \cdot \ln 1,746} \\ C &= 7,18 \cdot 10^{-3}F \end{aligned}$$

Otázka napájení je z části vyřešená, následujícím tématem je návrh zálohovaného napájení.

6.2 Zálohování napájení

Ze zadání diplomové práce plyne požadavek na zálohu napájení, a to minimálně po dobu 2 hodin. Při dimenzování akumulátoru se vychází především z výkonové části obvodu a tedy příkonu *Peltierova článku*. Ten za určených provozních podmínek nepřesáhne maximum 65 W (12 V; 5,4 A) viz výše.

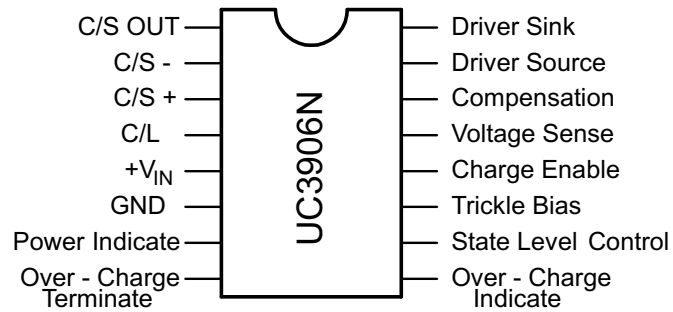
Obecně je kapacita akumulátorů udávána v ampér hodinách (Ah), pro konstantní proudové zatížení 5,4 A však musíme nahlédnout do katalogového listu výrobce baterie a z vybíjecích charakteristik akumulátoru stanovit dobu, po kterou jsme schopni tento proud dodávat. S jistou rezervou byl zvolen olověný 26 Ah akumulátor *WP26-12* (výrobce *KUNG LONG*). Relevantní charakteristiky jsou uvedeny v příloze C.

6.2.1 Integrovaný obvod UC3906N

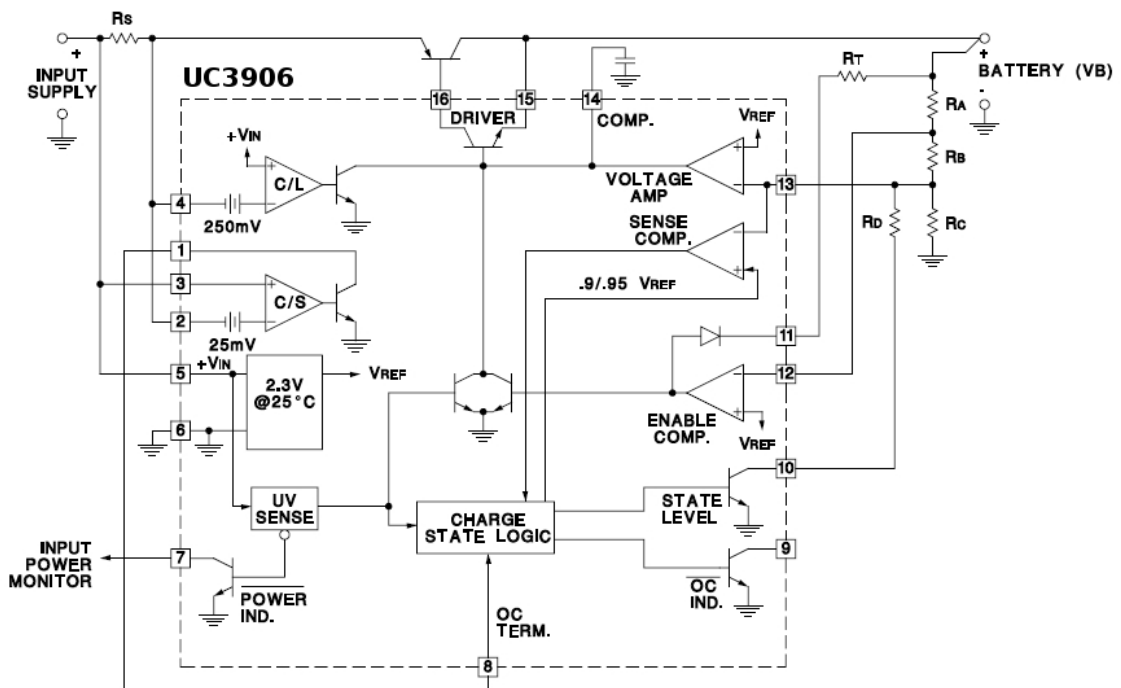
O dobíjení akumulátoru se postará integrovaný obvod *UC3906* od výrobce *Texas Instruments*. Je navržen s ohledem na optimální kontrolu kapacity a životnosti baterie. Z dalších vlastností obvodu je možno zmínit precizně nastavenou napěťovou referenci s velmi dobrou teplotní stabilitou, kontrolu napětí na výstupu z nabíječky a typický odběr pouze 1,6 mA [20]. Obvod je umístěn v pouzdře DIL16 (viz obrázek 6.3) a implicitně je nastaven na tři režimy nabíjení. Výrobce uvedené zapojení vývodů obvodu je znázorněno na obr. 6.4.

Základní parametry nabíječky:

- ▷ napájecí napětí (U_{IN}) - **max. 40 V**
- ▷ napájecí proud (I_{nap}) - **1,8 – 2,7 mA**



Obr. 6.3: Pouzdro DIL16 obvodu UC3906N a popis vývodů.



Obr. 6.4: Typické zapojení obvodu uvedené výrobcem [20].

- ▷ výstupní proud (PIN 16) - **max. 25 mA**
- ▷ ztrátový výkon (P_{MAX}) - **1 000 mW**
- ▷ provozní teplota -55°C až $+150^{\circ}\text{C}$

Popis jednotlivých fází nabíjení

V **první fázi** je akumulátor nabíjen „startovacím“ I_T a plným proudem I_{MAX} na 95 % maximálního nabíjecího napětí. Celý proces je tedy zahájen přezkoušením akumulátoru a počátečním nabitím hluboce vybitých článků. Nabíjení proudem I_T probíhá do úrovně napětí na svorkách U_T , což odpovídá 1,9 V na článek. V případě vady některého článku baterie by nebyla dosažena potřebná napěťová úroveň a nabíjení by tak nemohlo pokračovat. Po překročení této hranice se nabíjí stálým proudem I_{MAX} do stavu 95 % U_{OC} (U_{12}).

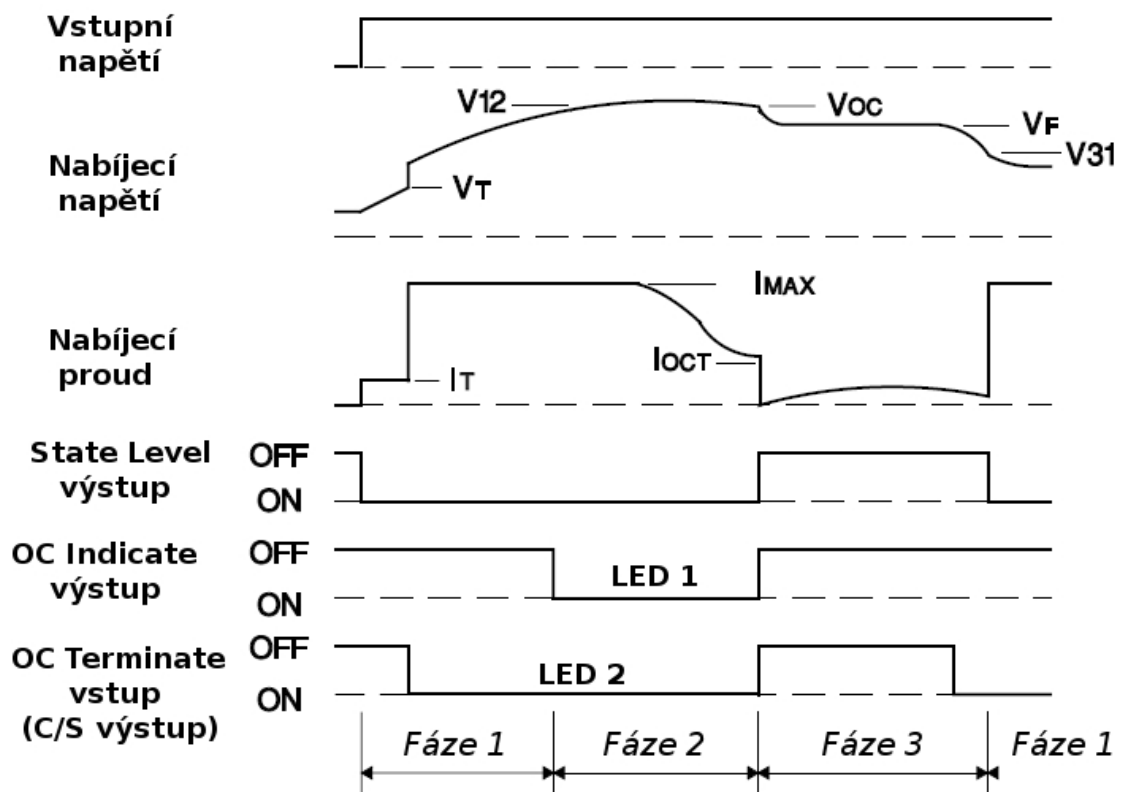
Velikost proudu I_{MAX} v ampérech je doporučeno zvolit jako jednu desetinu jmenovité kapacity akumulátoru v Ah [17]. V případě menšího nabíjecího proudu trvá nabíjení déle, je však šetrnější k baterii. Nabíječka pracuje v režimu **A** – nabíjení *konstantním proudem*.

Druhou fází procesu nabíjení je *nabíjení při konstantním napětí* (režim **B**). Dochází ke zvýšení napětí na svorkách akumulátoru z hodnoty U_{12} na U_{OC} . Tomu odpovídá napětí přibližně 2,45 V na článek. Po dosažení tohoto limitu začíná obvod pracovat jako zdroj stálého napětí U_{OC} . Nabíjecí proud klesá na hodnotu jedné desetině I_{MAX} , kdy je tato fáze ukončena.

Třetí fáze má za úkol vyrovnávat samovolné vybíjení, ke kterému dochází jak z fyzikálního principu konstrukce, tak například při teplotách pod bodem mrazu. Poklesem napětí na svorkách z U_{OC} na U_F se zahájí dobíjení stejně velkým proudem, jako je proud vybíjecí, a na baterii je udržováno konstantní napětí U .

V případě připojení zátěže, která z akumulátoru odebere proud větší, než je maximální nabíjecí proud I_{MAX} , dojde k poklesu napětí až do úrovně U_{31} (odpovídající 90 % U_F), tedy 2,26 V na článek. Při těchto hodnotách přechází nabíječka do první fáze činnosti.

Na obrázku 6.5 vidíme grafickou interpretaci průběhu napětí a proudu při jednotlivých fázích nabíjení, spolu se změnou stavů výstupů pro signalizaci pomocí LED. Postup výpočtů parametrů prvků IO UC3906 je probrán v následující podkapitole.



Obr. 6.5: Křivky U a I průběhu nabíjení spolu s popisem stavů výstupů signalizace obvodu UC3906b (upraveno z [20].)

6.2.2 Postup výpočtů

Následující postup výpočtu je doporučený a popsán výrobcem obvodu UC3906 v [20, 21]:

1. Volba dělicího proudu I_D v rozmezí $50 \mu\text{A}$ až $100 \mu\text{A}$
2. $R_C = 2,3 V / I_D$
3. $R_A + R_B = R_{SUM} = (U_F - 2,3 V) / I_D$
4. $R_D = 2,3 V \cdot R_{SUM} / (U_{OC} - U_F)$
5. $R_A = (R_{SUM} + R_X) \cdot (1 - 2,3 V / U_T)$
kde $R_X = R_C \cdot R_D / (R_C + R_D)$
6. $R_B = R_{SUM} - R_A$
7. $R_S = 0,25 V / I_{MAX}$
8. $R_T = (U_{IN} - U_T - 2,5 V) / I_T$
9. $I_{OCT} = \frac{I_{MAX}}{10}$.

Poznámka: $U_{12} = 0,95 \cdot U_{OC}$, $U_{31} = 0,90 \cdot U_F$.

Hodnoty napětí a proudu dosazované do vztahů vycházejí z nabíjecí a vybíjecí charakteristiky zvoleného akumulátoru [23].

- ▷ Velikost dělicího proudu je zvolena:

$$I_D = 50 \cdot 10^{-6} A$$

- ▷ Udržovací („*Floating Charge*“ – **fáze 3**) nabíjení akumulátoru je nastaveno na hodnotu napětí:

$$U_F = 13,6 V$$

- ▷ Nabíjecí proud I_{MAX}^3 („*Over Charge*“ – **fáze 2**) po ukončení **fáze 1** a příslušná napěťová horní mez je potom:

$$U_{OC} = 14,7 V$$

$$I_{MAX} = I_{TM} + I_{BAT} + I_{IO} = 7 A$$

- ▷ Startovací nabíjení proudem I_T („*Trickle Charge*“ – počátek **fáze 1**) je stanoveno do napětí:

$$U_T = 11,4 V$$

$$I_T = 100 \cdot 10^{-3} A$$

- ▷ Velikost odporů je dopočítána podle uvedených vztahů následovně:

$$R_C = \frac{2,3 V}{50 \cdot 10^{-6} A} = 46 k\Omega$$

$$R_A + R_B = R_{SUM} = \frac{(13,6 V - 2,3 V)}{50 \cdot 10^{-6} A} = 226 k\Omega$$

$$R_D = \frac{2,3 V \cdot 226 \cdot 10^3 \Omega}{14,7 V - 13,6 V} = 473 k\Omega$$

$$R_X = \frac{46 \cdot 10^3 \Omega \cdot 473 \cdot 10^3 \Omega}{46 \cdot 10^3 \Omega + 473 \cdot 10^3 \Omega} = 41 k\Omega$$

$$R_A = (226 \cdot 10^3 \Omega + 41 \cdot 10^3 \Omega) \cdot (1 - 2,3 V / 11,4 V) = 213 k\Omega$$

$$R_B = 226 \cdot 10^3 \Omega - 213 \cdot 10^3 \Omega = 13 k\Omega$$

$$R_S = \frac{0,25 V}{7 A} = 0,035 \Omega$$

$$R_T = \frac{32,8 V - 11,4 V - 2,5 V}{100 \cdot 10^{-3} A} = 189 k\Omega$$

$$I_{OCT} = \frac{7 A}{10} = 0,7 A$$

$$U_{12} = 0,95 \cdot 14,7 V = 13,9 V$$

$$U_{31} = 0,90 \cdot 13,6 V = 12,2 V$$

6.3 Číslicová část

Jádrem číslicové části je mikrokontrolér PIC16F628A (I03). Ten vyhodnocuje data posílaná digitálními teploměry DALLAS (I04, I05), registruje impulzy rotačního mikropínače (RE20S), vypisuje výsledky měření na displej a řídí výkonovou zátěž.

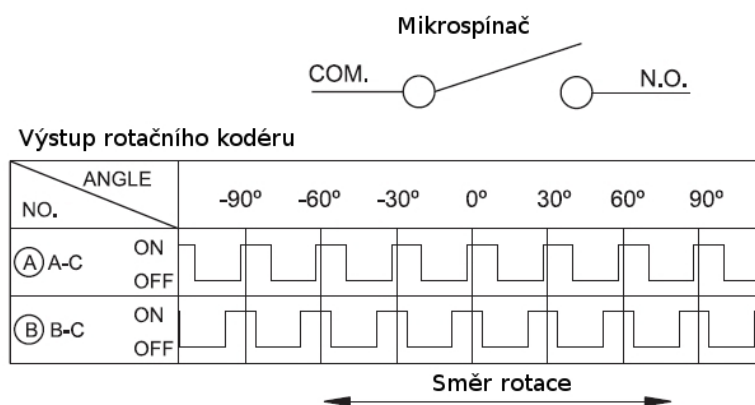
³Součet maximálních proudů – zátěží, nabíjení a integrovaných obvodů.

6.3.1 Rotační mikrospínač RE20S

Nastavování teploty termostatu je řešeno rotačním mikrospínačem. Mikrospínač dává povel mikrokontroléru k aktivaci podprogramu volby teploty a pomocí registrace impulsů při rotaci dochází k snižování/zvyšování nastavené teploty. Vlastnosti spínače jsou shrnuty v následujících bodech [22]:

- ▷ Rotační kodér: 20 kroků na otáčku se středovým mikrospínačem
- ▷ Provozní napětí: 50 V
- ▷ Počet impulsů na 1 otáčku: 20
- ▷ Minimální životnost: 30 000 otáček
- ▷ Parametry kontaktu: 16 V/1 mA, 5 V/10 mA
- ▷ Kovový drážkový hřídel 6 mm.

Průběh výstupů je znázorněn na obrázku 6.6



Obr. 6.6: Výstupní charakteristika rotačního mikrospínače RE20S (upraveno z [22]).

6.3.2 LCD displej

Zapojení displeje je uvedeno v příloze A.3. Komunikace mezi mikrokontrolérem a řadičem Hitachi HD44780U probíhá z důvodu ušetření výstupu μP po horních čtyřech datových bitech (DB4 – DB7). Ovládání řadiče je zprostředkováno pomocí dvou řídicích kontaktů RS a R/W a hodinového signálu E . Změnou logické úrovně na RS se definuje typ posílaného slova - logická 1 informuje o následující instrukci a logická 0 o následně posílaných datech. $R/W = 0$ pak nastavuje zápis na displej.

6.3.3 Snímače teploty DALLAS

V návrhu jsou použity dva digitální teploměry DALLAS DS18B20 (I04 a I05) využívající technologii *1-WireTM*. Pro rozsah teplot 10 °C – 60 °C postačí teplotu měřit

v 9-bitovém rozlišení se zaokrouhlením na desetiny °C. Softwarově je možnost ošetřit práh alarmu pro každý z teploměrů. Identifikace a řízení těchto obvodů je popsáno v kapitole 2.

6.3.4 Spínání výkonové zátěže

Spínání výkonové zátěže zajišťuje *H-můstek* ve spolupráci s μP . Ten se skládá ze čtyř digitálních MOSFET tranzistorů s řídicí a ochrannou logikou. Podle sepnuté dvojice pracuje *Peltierův článek* v režimu ohřevu, případně chlazení. Protože sepnutí obou párů tranzistorů není hardwarově ošetřeno, je nutné na tuto skutečnost myslet při návrhu řídicího softwaru μP . Interval hystereze termostatu není v případě aplikace termoelektrického modulu zásadní, nicméně ho lze řešit opět programově – častějším odečtem a vyhodnocením měřených hodnot blížících se prahové hodnotě teploty (*horní meze hystereze*). Program je možné koncipovat tak, aby vypínal spojitě napájení ohřevu/chlazení TM ještě před touto mezí. Pak se již teplota reguluje spínáním akčního členu krátkými diskrétními impulsy, a to do té doby, než dosáhne horního bodu hystereze, kdy se aktivní řízení přeruší.

6.4 Izolace, chlazení

Jedna z nezanedbatelných částí návrhu termostatu je definice vhodného chlazení *Peltierova článku* a izolace systému, v němž je teplota regulována. Některé s významných faktorů ovlivňující tuto problematiku jsou diskutovány v této podkapitole.

6.4.1 Aktivní tepelná zátěž

Aktivní tepelnou zátěží je chápáno teplo, které je produkováno termoelektrickým modulem. Ve většině aplikací je rovno elektrickému příkonu TM, nicméně existují případy, kdy je určení této aktivní složky náročnější [19]. V této práci je příkon článku považován za dostatečný ukazatel aktivní tepelné zátěže.

6.4.2 Pasivní tepelná zátěž

Pasivní tepelná zátěž (označována taktéž jako *tepelný únik* či *parazitní tepelná zátěž*) je rovna velikosti ztráty, případně přírůstku tepelné energie dodávané chlazeným/ohřívaným objektem následkem kondukce, konvekce a/nebo radiace. Do této složky spadá vedení tepla vzduchem, izolací, a elektrickou kabeláží.

Určení dílčích složek celkové pasivní tepelné zátěže je poměrně náročné a nad rámec tohoto textu. Je však možno provést částečnou kalkulaci, která má pozitivní vypovídající hodnotu.

6.4.3 Rovnice pro výpočet tepelných ztrát

Vedení tepla pevnou látkou

Vedení tepla je závislé na geometrii, vodivosti a velikosti teplotního gradientu materiálu. V následujícím vztahu se neuvažuje změna tepelné vodivosti vlivem měnící se teploty [19].

$$Q = \frac{K \cdot \Delta T \cdot A}{x}, \quad (6.4)$$

kde	Q	Teplo vedené materiálem [W]
	K	Tepelná vodivost materiálu [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
	A	Povrch materiálu [m ²]
	x	Tloušťka materiálu [m]
	ΔT	Teplotní rozdíl mezi teplou a studenou stranou materiálu [°C].

Přenos tepla mezi okolím a povrchem materiálu prouděním

Proudění tepla mezi okolím a povrchem neizolovaného materiálu může pro termostat představovat významnou zátěž. Matematicky je vyjádřena jako [19]:

$$Q = h \cdot A \cdot \Delta T, \quad (6.5)$$

kde	Q	Přenos tepla z/do okolí [W]
	h	Koeficient přestupu tepla - pro uzavřené prostory 23–28; otevřené 85–113 [m ² ·°C]
	A	Povrch materiálu [m ²]
	ΔT	Teplotní rozdíl mezi povrchem a okolím [°C].

Přenos tepla stěnou s izolací

Ztráta tepla skrz izolované stěny nádoby kombinuje prvek tepelné vodivosti izolačního materiálu s prvkem ztrát prouděním z vnějšího povrchu izolace.

$$Q = \frac{A \cdot \Delta T}{\frac{x}{K} + \frac{1}{h}}, \quad (6.6)$$

kde	Q	Tepelná ztráta izolovaného materiálu [W]
	K	Tepelná vodivost izolace [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$]
	A	Povrch izolačního materiálu [m ²]
	x	Tloušťka izolace [m]
	ΔT	Teplotní rozdíl mezi povrchem a okolím [°C]
	h	Koeficient přestupu tepla - pro uzavřené prostory 23–28; pro otevřené 85–113 [m ² ·°C].

Čas nutný ke změně teploty objektu

Důkladné stanovení časové odezvy systému na termoelektrické chlazení/ohřev je obtížné. Vyžaduje provedení detailní analýzy systému jako celku. Pro odhad se může vycházet ze vztahu [19]:

$$t = \frac{m \cdot c_p \times \cdot T}{Q}, \quad (6.7)$$

kde	t	Odezva systému na změnu teploty [s]
	m	Hmotnost materiálu [g]
	c_p	Měrná tepelná kapacita materiálu [J·kg·°C]
	ΔT	Teplotní změna materiálu [°C]
	Q	Teplo odevzdáno/přijato materiálem [W/s]. ⁴

Poznámka: Výkon TM je proporcionální teplotní změně ΔT modulu. Ve vztahu 6.7 vystupuje průměrná hodnota tepelného výkonu článku Q, kterou lze stanovit podle rovnice (režim **chlazení**):

$$Q = 0,5 \cdot (Q_c \sim \Delta T_{MIN} + Q_c \sim \Delta T_{MAX}), \quad (6.8)$$

kde Q_c při ΔT_{MIN} je množství tepla „pumpovaného“ termoelektrickým modulem při určité počáteční teplotě po zapnutí termostatu. Teplotní diference stran modulu je nulová ($\Delta T = 0$), výkon modulu je maximální. Q_c při ΔT_{MAX} je naopak okamžik, kdy se dosáhne požadované teploty objektu. ΔT je nenulová a výkon modulu nižší (viz modelování charakteristik TM v kapitole 3 na straně 37).

Přenos tepla radiací

Z charakteru zadání (rozsah nastavitelné teploty: 20–40 °C, objem regulovaného prostoru 2l) je možno tepelné ztráty vlivem radiace zanedbat. Studie je využitelná

⁴1 Watt = 0,239 cal/s.

v případě víceúrovňové konfigurace, při teplotách blízkých spodnímu limitu článku [19].

Odpor izolace

Odpor izolace je veličina vyjadřující její schopnost zabránit úniku tepla. Vztah mezi tímto odporem, tloušťkou izolace, a tepelnou vodivostí udává následující vztah [19]:

$$R = \frac{x}{K}, \quad (6.9)$$

kde x Tloušťka izolace [m]
 K Tepelná vodivost izolace [$\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$].

6.4.4 Tepelný odpor chladiče

Podle očekávané hodnoty ΔT a příkonu tělesa se stanoví tepelný odpor nebo tepelná vodivost chladiče. Tento parametr poukazuje na *chladičí výkon* chladiče. Čím je hodnota tepelného odporu nižší, tím je vyšší *chladičí výkon* a opačně pro tepelnou vodivost [6]. Výpočetní vztah pro maximální příkon *Peltierova článku* a zvolenou teplotní diferenci bude:

$$R = \frac{\Delta T}{P} = \frac{40^\circ C}{65 W} = 0,615^\circ C/W, \quad (6.10)$$

kde ΔT Rozdíl teploty horké a studené strany TM
 P Maximální příkon Peltierova článku.

6.4.5 Shrnutí

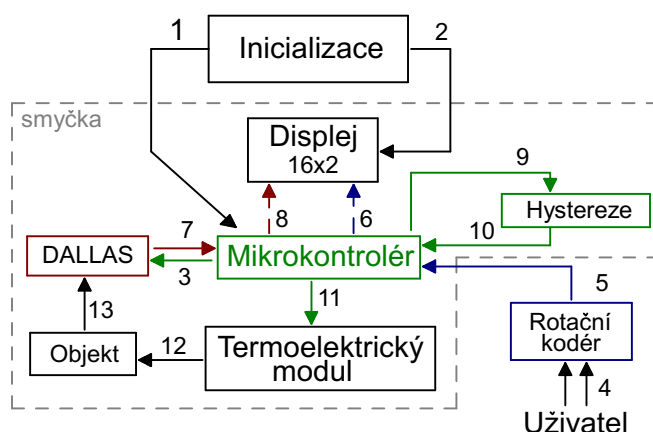
Celková účinnost chlazení/ohřevu, jakožto časová odezva systému a spolehlivost celého zařízení je těsně spjata se schopností:

- ▷ vhodně izolovat regulovaný prostor
- ▷ udržovat teplotní rozdíl stran modulu na minimum ($\Delta T \rightarrow \min$).

Pro účely realizace navrženého termostatu je proto nutné volit vhodnou izolaci (například *polyuretanovou pěnu*). Pro zlepšení tepelné vodivosti na rozhraní styčných ploch *Peltierův článek* a povrch chlazené/ohříváné stěny termostatu (podle směru porudu) lze použít **teplovodivou pastu**. Aktivní chlazení modulu by mělo splňovat požadavek na tepelný odpor chladiče. Ten by neměl přesáhnout hodnotu $0,615^\circ C/W$ (viz vztah 6.10).

6.5 Programové vybavení

Funkční blokové schéma termostatu je uvedeno na obrázku 6.7.



Obr. 6.7: Blokové schéma termostatu.

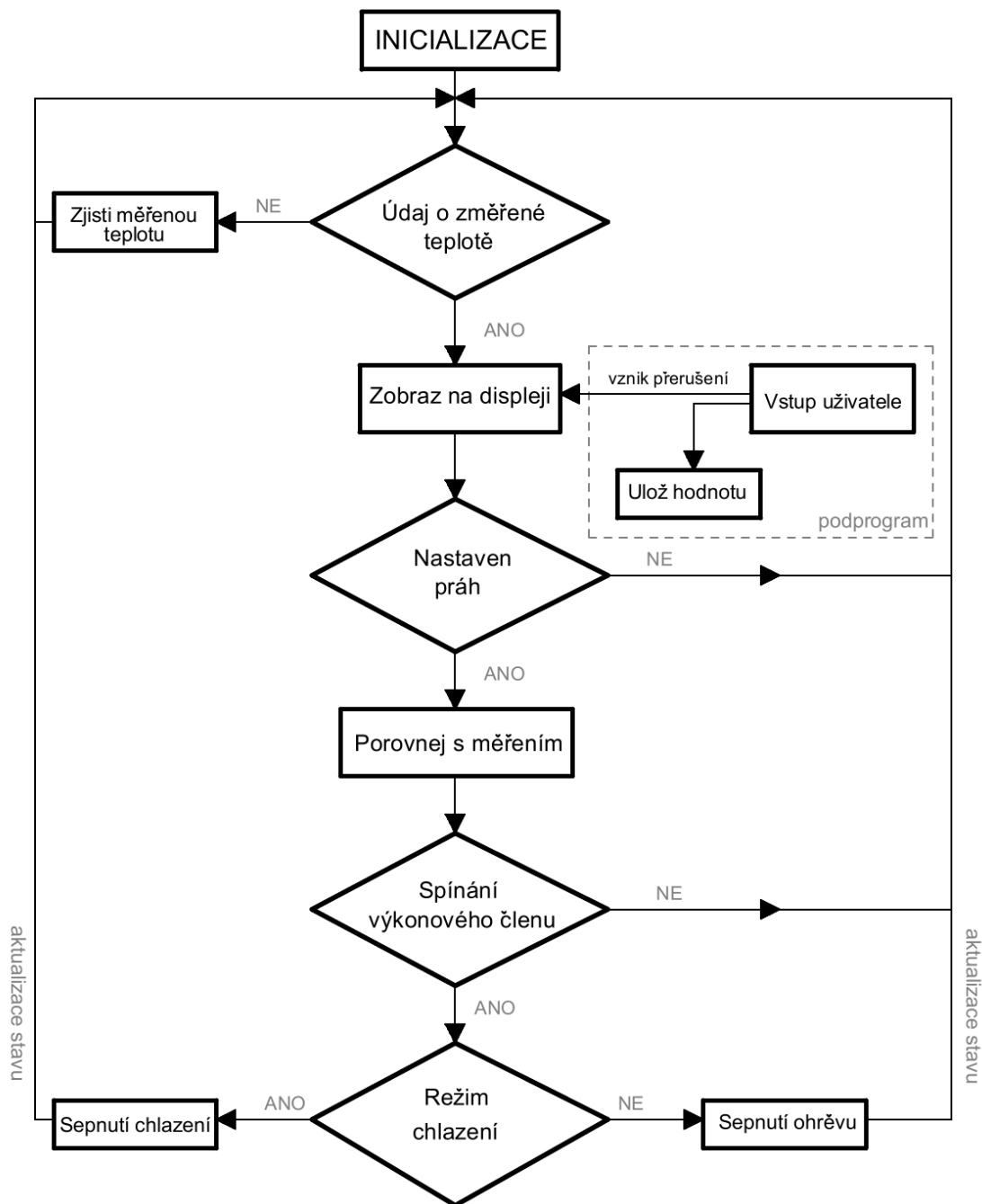
Význam jednotlivých kroků funkce termostatu je možný shrnout do několika bodů:

1. Ihned po zapnutí se provede inicializace mikrokontroleru - nulování konstant a výstupů.
2. Následuje „oživení“ LCD displeje - nastaví se způsob komunikace, přiřazení výstupů μP , způsob posuvu kurzoru, blikání kurzoru, atd.
3. Identifikace digitálních teploměrů DALLAS na sběrnici - μP vysílá **RESET** pulz.
4. Uživatel vyvolá stiskem tlačítka přerušení - nastává skok do podprogramu.
5. Podprogram slouží k nastavení teploty termostatu - otáčením kodéru se teplota inkrementuje/dekrementuje, stiskem dojde k aktivaci nastavení.
6. Mikrokontroler odešle nastavenou teplotu zobrazovači.
7. Čtení změřené teploty.
8. Hodnota změřené teploty je zobrazena LCD displejem.
9. Měřená teplota je srovnána s požadovanou a nastavenou hysterezí.
10. Příjem výsledku porovnání.
11. PWM regulace termoelektrického modulu v režimu ohřev/chlazení.
12. Ohřev/chlazení objektu.
13. Snímání teploty objektu digitálním teploměrem.

Celý proces je vykonáván ve smyčce. Při stisknutí tlačítka dojde opět k přerušení a vyvolání podprogramu obsluhujícího toto přerušení - nastavení nově požadované teploty.

6.5.1 Vývojový diagram programu termostatu

Na základě funkčního blokového schématu termostatu je vytvořen vývojový diagram programu.⁵



Obr. 6.8: Vývojový diagram programu termostatu.

⁵Návrh okomentovaného programu je obsahem příloženého CD.

7 ZÁVĚR

Tato diplomová práce seznamuje čtenáře s popisem a finálním návrhem termostatu pro biologické experimenty se zálohovaným napájením. Je diskutován vstupní člen zařízení - teploměr, vlastnosti spolu s dimenzováním výkonového členu a možnosti zobrazení výsledků. Ovládání termostatu je navrženo s ohledem na jednoduchost, o řízení se stará vhodný mikrokontroler. Výhodou je implementace zálohovaného napájení, které je schopno udržet termostat v provozu při plném výkonu déle jak 2 hodiny.

Přínos a využití zpracovaného návrhu může být nejen v oblasti biomedicínských aplikací, ale i v interdisciplinárních oblastech jako je biologie. Koncepce má své využití i z hlediska mobility. Omezením může být přesnost měření teploty (s tolerancí $\pm 1^\circ\text{C}$) a vnitřní objem termostatu. Zpracování však není zcela statické, je zde ponechán prostor pro případnou úpravu dle podmínek konkrétního využití.

Náklady na realizaci elektronické části se pohybují kolem 1 800 Kč (do ceny není započítána položka *Peltierova článku*, akumulátoru a konstrukčního materiálu). Komerčně dostupná zařízení (GME electronic) se pohybují řádově od 500 Kč do přibližně 2 000 Kč. Zmíněnou částku citelně navyšuje zohlednění výkonu termostatu (časová odezva na změnu teploty) a požadavek zálohovaného napájení (cena akumulátoru). Za výhodu se dá považovat možnost rozšíření počtu snímačů teploty DALLAS, pracujících na principu jednovodičové sběrnice. To lze zohlednit v případě požadavku většího vnitřního prostoru termostatu a vyšší přesnosti měření teploty.

Případná budoucí práce by mohla směřovat cestou aplikace celého zařízení. Jedním z cílů by tak byl návrh konstrukčního řešení, jeho výroba a testování vlastností systému.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ATM1602B Series. *Standard Character LCD Modules*. Specifications. ST Microelectronics. [Online] [Citace: 15. Květen 2010] <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/513/513-109/dsh.513-109.1.pdf>.
- [2] Brančík, L. *Elektrotechnika 1*. Skriptum VUT v Brně, 2004, s. 1–160. ISBN: TEE102.
- [3] BRÁZDIL, M. *Peltierův článek pro chlazení malých výkonů: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 57 s.
- [4] BUK101-50GL. *PowerMOS tranzistor - Logic level TOPFET*. Product specification. Philips Semiconductors. [Online] 1. Leden 1993. [Citace: 15. Květen 2010] <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>>.
- [5] Bureš, J. conVerter. *Seebeckův jev*. [Online] [Citace: 15. Květen 2010] <<http://www.converter.cz/tabulky/seebeck.htm>>.
- [6] Částka, M. *Stanovení tepelného odporu chadiče*. Článek na serveru CTTL. [Online] 4. Ledna 2010 [Citace: 15. Květen 2010] <<http://www.ctl.cz/index.php?gid=10555&kap=3>>.
- [7] Doveda Boys. *Znakové LCD displeje*. Stránky procesorů PIC. [Online] 25. Února 2007 [Citace: 15. Květen 2010] <<http://doveda.byl.cz/lcd/>>.
- [8] DS18B20. *Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer*. Full Data Sheet. Dallas Semiconductor. [Online] [Citace: 15. Květen 2010] <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>>.
- [9] Ferrotec High Power Thermoelectric Modules. *Peltier Cooler Model 9500/127/120B*. FerroTec. [Online] [Citace: 15. Květen 2010] <http://www.ferrotec.com/index.php?id=module_detail&mod_id=115>.
- [10] Hrbáček, J. *Komunikace mikrokontroléru s okolím – 1. díl*. BEN – technická literatura, Praha 1999, 1. vydání. ISBN 80-86056-42-2.
- [11] Hrbáček, J. *Komunikace mikrokontroléru s okolím – 2. díl*. BEN – technická literatura, Praha 2000, 1. vydání. ISBN 80-86056-73-2.
- [12] Kadlec, K. *Měřicí a řídicí technika*. Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, Fakulta chemicko-inženýrská, studijní materiály.

- [Online] Únor 2005. [Citace: 15. Květen 2010]
 <<http://uprt.vscht.cz/ucebnice/MRT/F4/F4-ram.htm>>.
- [13] Laird Technologies. *Thermoelectric Handbook*. [Online] 9. Únor 2010. [Citace: 15. Květen 2010] <<http://www.lairdtech.com/temhandbook/>>.
- [14] NT Magnetics s.r.o. *Transformátory pro univerzální použití 58xxx*. [Online] [Citace: 15. Květen 2010]
 <http://www.ntmagnetics.cz/cz/doc/58xxxx_xxxx_x.pdf>.
- [15] PIC16F627A/628A/648A. *Microcontrollers with nanoWatt Technology*. Data Sheet. Microchip. [Online] [Citace: 15. Květen 2010]
 <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/devicedoc/40044f.pdf>>.
- [16] Pinker, J. *Mikroprocesory a mikropočítače*. BEN – technická literatura, Praha 2004, 1 vydání. ISBN 80-7300-110-1.
- [17] Slánský, M. *Inteligentní nabíječka Pb akumulátorů*. [Online] 13. Zář 2006. [Citace: 15. Květen 2010] <<http://hw.cz/Teorie-a-praxe/Konstrukce/ART1685-Inteligentni-nabijecka-Pb-akumulatoru.html>>.
- [18] Snopek, P. *Přesný Termostat: bakalářská práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2006. 59 s.
- [19] Thermoelectric Technical Reference. *Mathematical Modeling of TEC Modules*. FerroTec. [Online] 2001–2009. [Citace: 15. Květen 2010]
 <<http://www.ferrotec.com/technology/thermoelectric/thermalRef11/>>.
- [20] UC3906. *Sealed Lead-Acid Battery Charger*. Data Sheet. Texas Instruments. [Online] [Citace: 15. Květen 2010]
 <<http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/uc3906.pdf>>.
- [21] UC3906. *Improved Charging Methods for Lead-Acid Batteries Using the UC3906*. Application Notes. Texas Instruments. [Online] [Citace: 15. Květen 2010] <<http://focus.ti.com/lit/an/slua115/slua115.pdf>>.
- [22] VYP D RE20S. *Spínače kódové*. Specifikace. [Online] [Citace: 15. Květen 2010]
 <<http://www.pselectronic.cz/k5108-250-vyp-d-re20s.html>>.
- [23] WP26-12. *Rechargeable Sealed Lead Acid Battery*. Specifications. Kung Long. [Online] [Citace: 15. Květen 2010]
 <http://www.gme.cz/_dokumentace/dokumenty/540/540-056/dsh.540-056.2.pdf>.

SEZNAM ZKRATEK

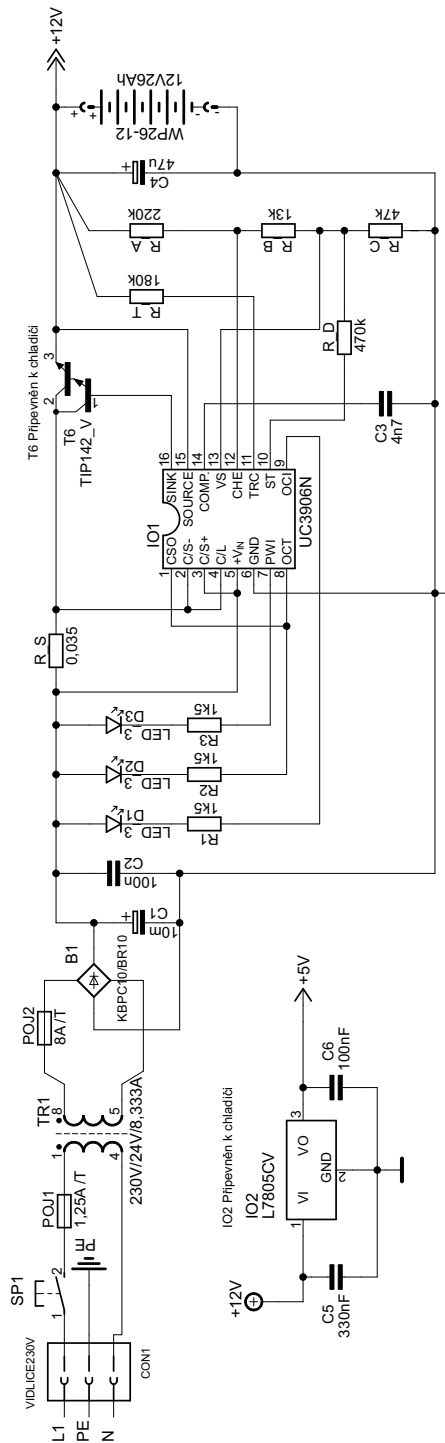
AD	Analogově-digitální
Ah	Ampér hodina
ALU	Aritmeticko - logická jednotka
CMOS	Complementary Metal-Oxide-Semiconductor
COP	Coeficient of Performance
CPU	Central Processing Unit
CRC	Cyclic Redundancy Check
DC	Direct current
DIL	Dual in Line
DPS	Deska plošných spojů
DSP	Digital Signal Processor
EMC	Electromagnetic Compatibility
FPU	Jednotka plovoucí řádové čárky
IO	Integrovaný obvod
KM	Tepelná vodivost modulu
LCD	Liquid Crystal Display
LSB	Last Significant Bit
MCU	Microrontrroller Unit
MOSFET	Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor
NTC	Negative Temperature Coefficient
PCB	Printed circuit board
PN	Pozitivně-negativní
PTC	Positive Temperature Coefficient
PWM	Pulse Width Modulation
RISC	Reduced Instruction Set Computing
RM	Elektrický odpor modulu
ROM	Read Only Memory
SM	Seebeckův koeficient modulu
TM	Termoelektrický modul
TZ	Teplovní záření
DDRAM	Display Data RAM. (paměť zobrazovaných znaků)
CGRAM	Character Generator RAM. (paměť pro uložení vlastního znaku)
μ P	Mikroprocesor, mikrokontroler

SEZNAM PŘÍLOH

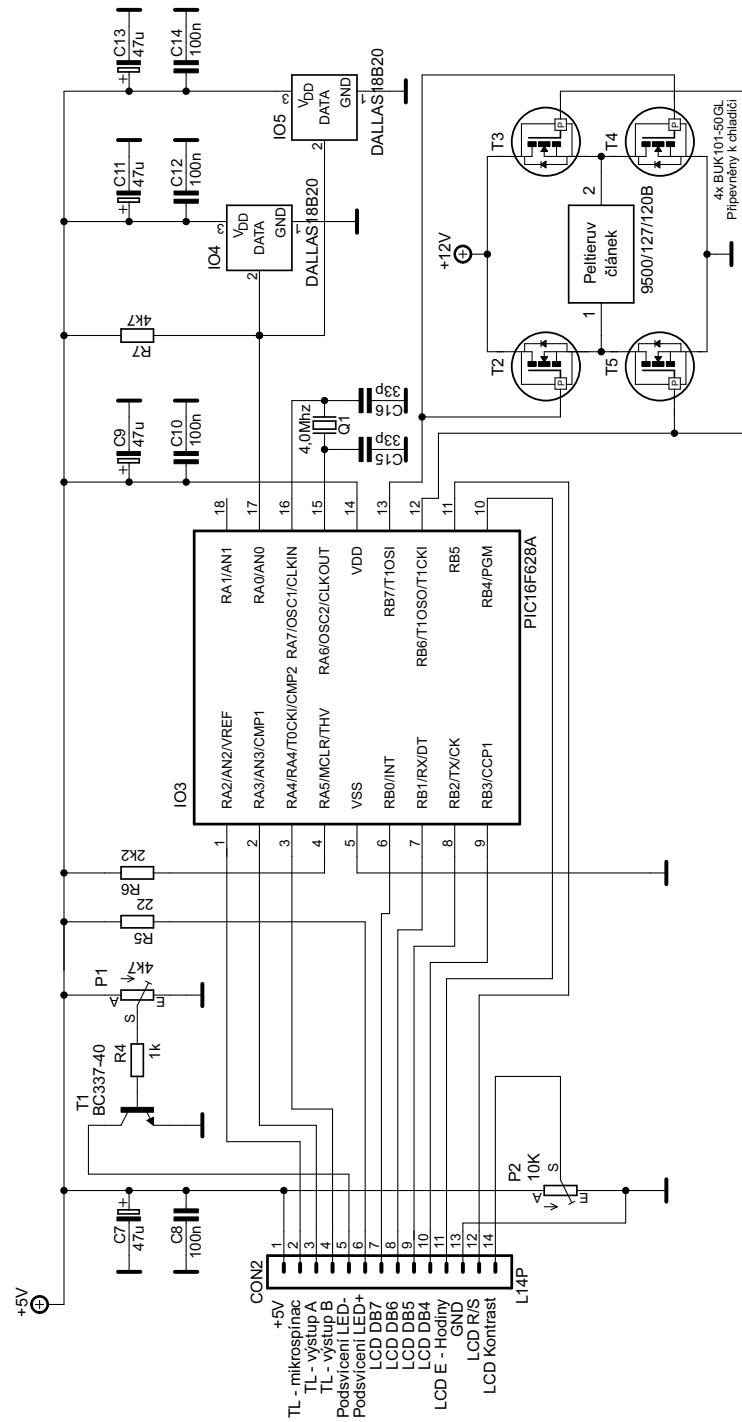
A	Výkresová dokumentace	69
A.1	Schéma zapojení zdroje napětí a nabíjecího obvodu - DPS01	69
A.2	Schéma zapojení řídicí části - DPS02	70
A.3	Schéma zapojení LCD displeje - DPS03	71
A.4	Deska plošných spojů DPS01	72
A.5	Deska plošných spojů DPS02	73
A.6	Deska plošných spojů DPS03	74
B	Rozpiska součástek	75
C	Akumulátor WP26-12	76

A VÝKRESOVÁ DOKUMENTACE

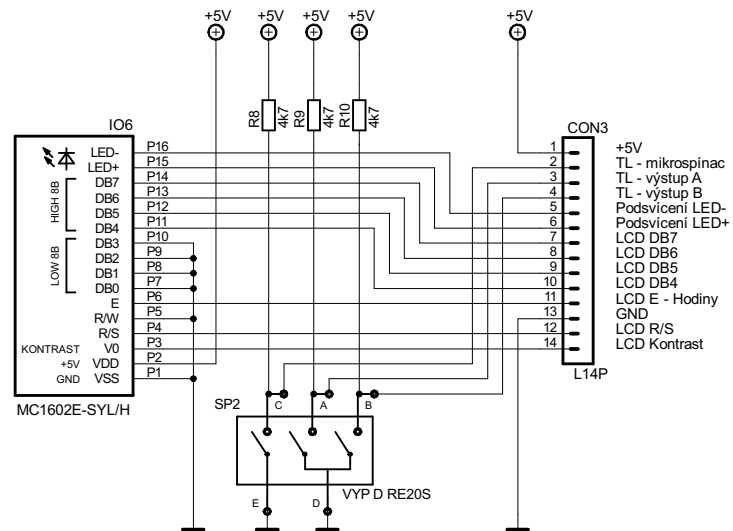
A.1 Schéma zapojení zdroje napětí a nabíjecího obvodu - DPS01



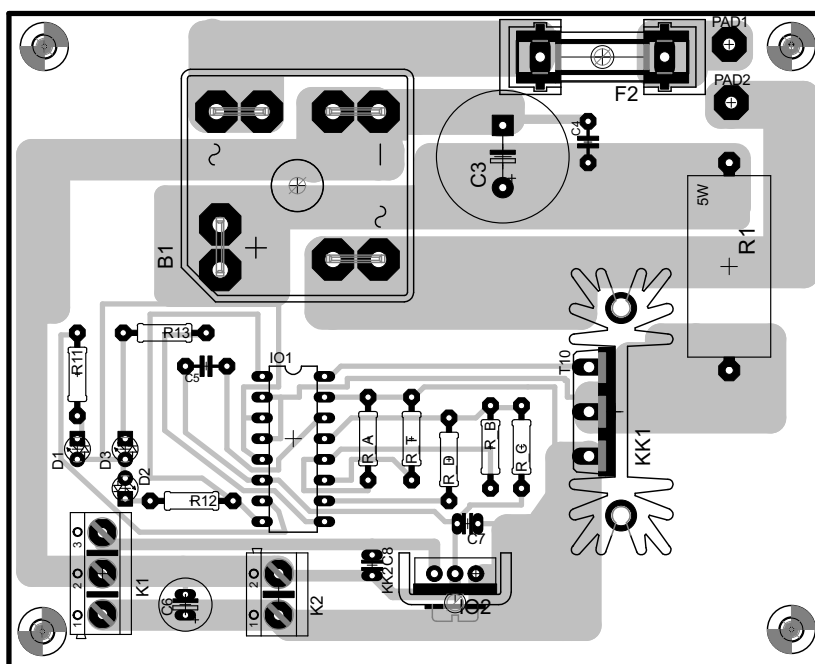
A.2 Schéma zapojení řídicí části - DPS02



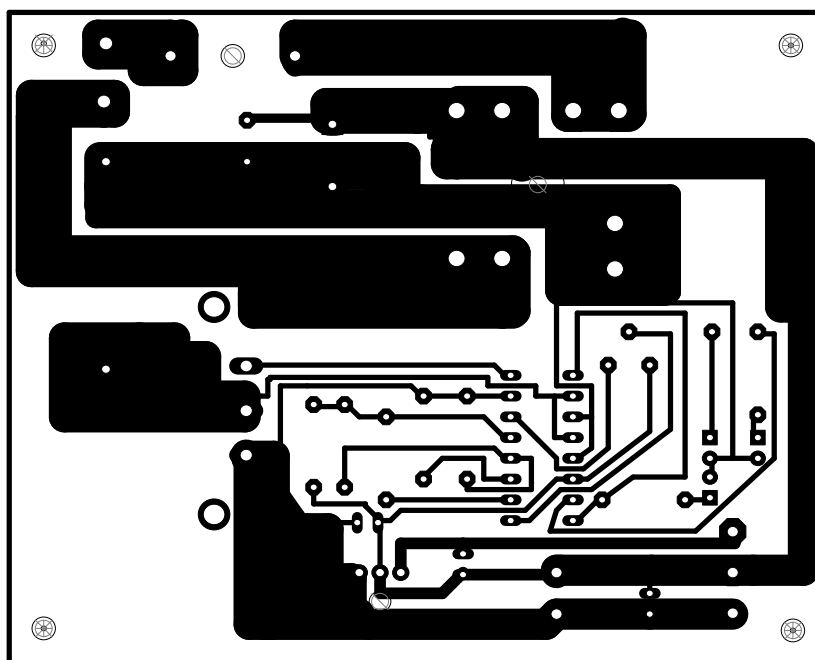
A.3 Schéma zapojení LCD displeje - DPS03



A.4 Deska plošných spojů DPS01

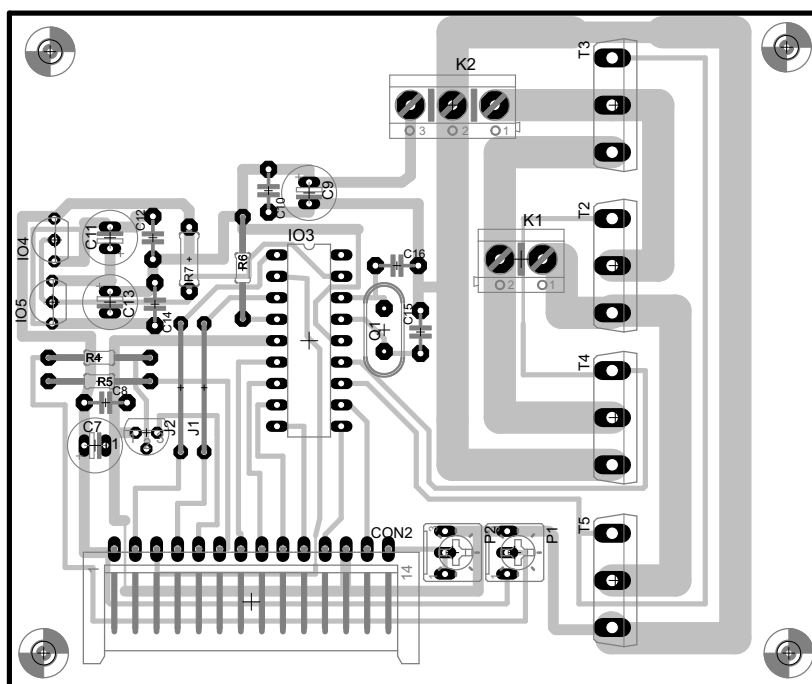


Obr. A.1: Deska plošných spojů DPS01 - pohled ze strany součástek.

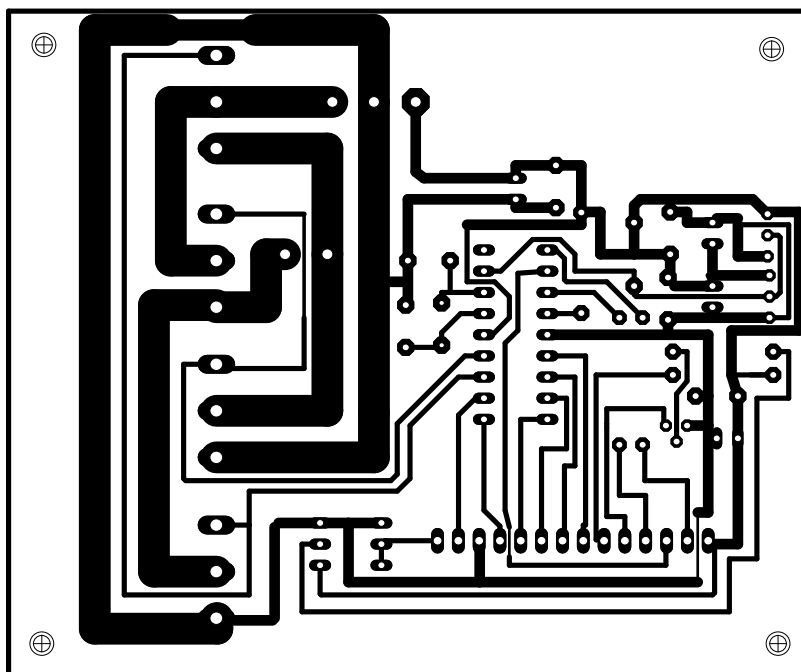


Obr. A.2: Deska plošných spojů DPS01 - pohled ze strany spojů.

A.5 Deska plošných spojů DPS02

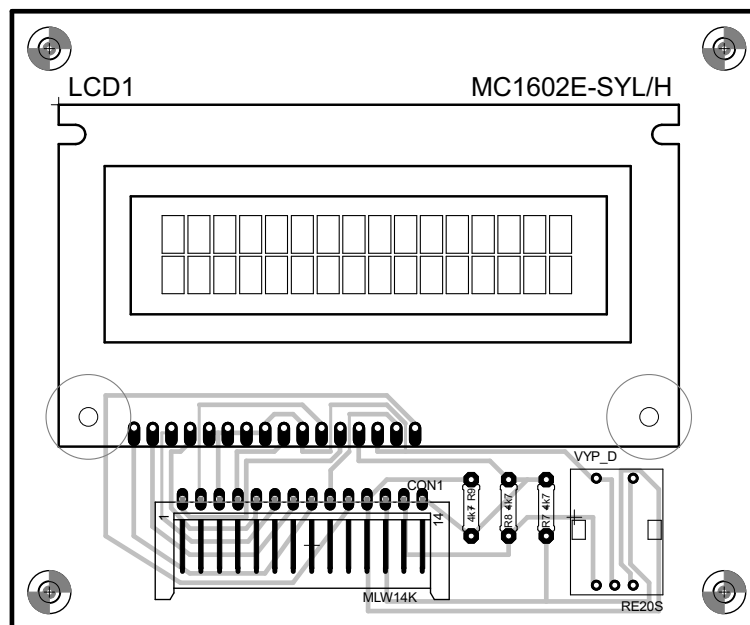


Obr. A.3: Deska plošných spojů DPS02 - pohled ze strany součástek.

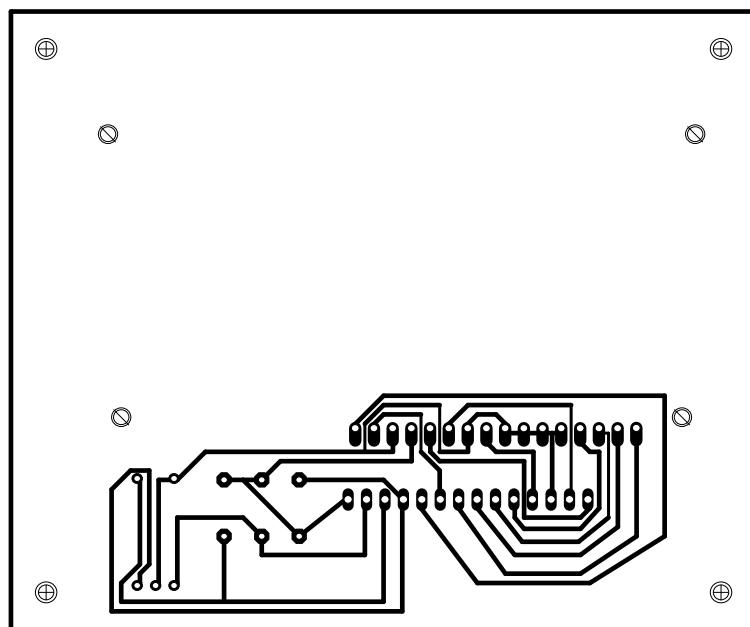


Obr. A.4: Deska plošných spojů DPS02 - pohled ze strany spojů.

A.6 Deska plošných spojů DPS03



Obr. A.5: Deska plošných spojů DPS03 - pohled ze strany součástek.

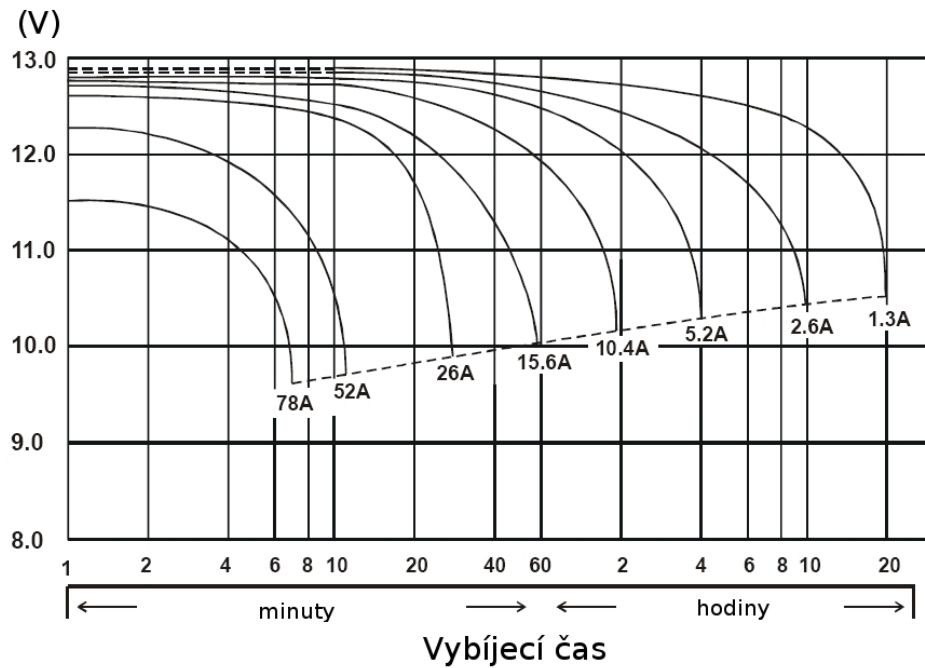


Obr. A.6: Deska plošných spojů DPS03 - pohled ze strany spojů.

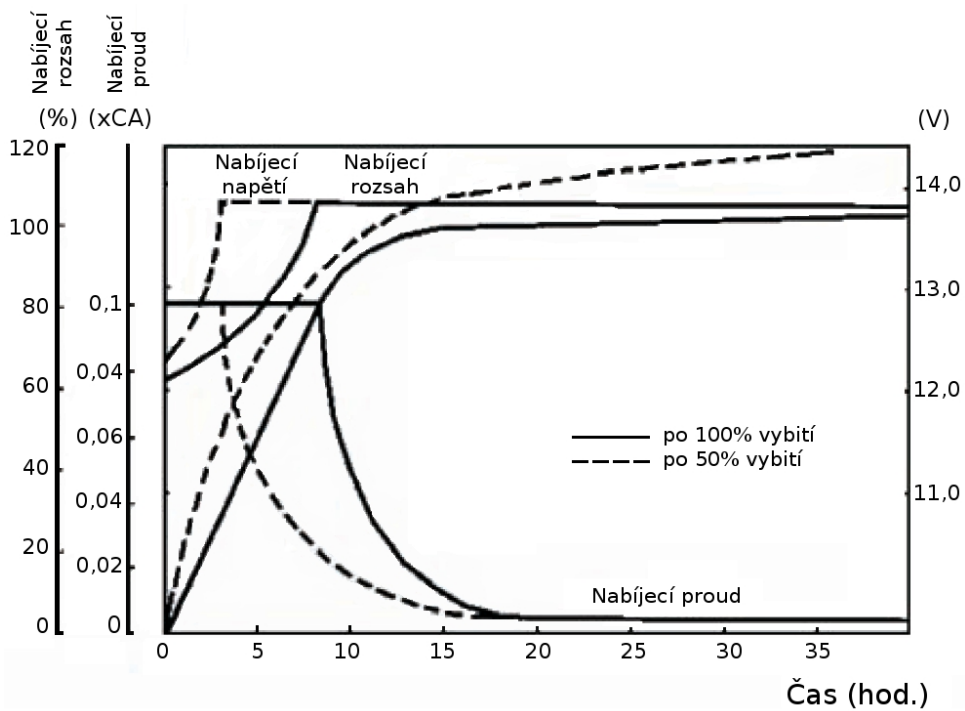
B ROZPISKA SOUČÁSTEK

Sch. značka	Typ – označení	Cena/ks	Dodavatel	Popis
TR1	58-0200-024-x	dotaz	NT Magnetics s.r.o.	Toroidní transf. 230 V/24 V/8,333 A
POJ1	FSB01.25	5 Kč	GM Electronic	Trubičková pojistka 6,3×32 mm, T
POJ2	FSB08	5 Kč	GM Electronic	Trubičková pojistka 6,3×32 mm, T
CON1	GSD781	10 Kč	Schurter	Síťový napájecí konektor (male)
CON2	LP14	6,5 Kč	Tyco Electronics	Konektor 14-ti žilový (male)
CON3	LP14	6,5 Kč	Tyco Electronics	Konektor 14-ti žilový (male)
B1	KBPC10/BR10	13 Kč	GM Electronic	Usměrňovací můstek do 10 A
IO1	UC3906N	220 Kč	Texas Instruments	Obvod pro nabíjení Pb akumulátorů
IO2	L7805CV	7,5 Kč	ST Microelectronics	Stabilizátor napětí 5 V
IO3	PIC16F628A	51 Kč	Microchip	8-bit mikrokontrolér
IO4, IO5	DS18B20	50 Kč	DALLAS Semicond.	Digitální teploměr
IO6	MC1602E-SYL/H	125 Kč	GM Electronic	Alfanumerický LCD displej 16×2
D1, D2, D3	LED5mm	2 Kč	GM Electronic	5 mm LED diody různých barev
T1	BC337-40	1,5 Kč	GM Electronic	Křemíkový NPN tranzistor
T2, T3, T4, T5	BUK101-50GL	70 Kč	Philips Semicond.	Digitální tranzistor - N
T6	TIP142	25 Kč	STMicroelectronics	Darlingtonův tranzistor do 10 A - N
Q1	Q 4.096 Mhz	10 Kč	GM Electronic	Krystal 4,096 Mhz
P1	PTC10MVK004.7	15 Kč	GM Electronic	Cermetový trimr 10 mm - ležatý
P2	PTC10VK010	17 Kč	GM Electronic	Cermetový trimr 10 mm - ležatý
R1, R2, R3	RR 1K5	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R4	RR 1K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R.S	RG-ODP-KAN05	30 Kč	GM Electronic	Odporový drát - kanthal
R.A	RR 220K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R.B	RR 13K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R.C	RR 47K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R.D	RR 470K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R.T	RR 180K	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R5	RR 22R	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R6	RR 2K2	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
R7, R8, R9, R10	RR 4K7	1 Kč	GM Electronic	Metalizovaný rezistor 0,6 W
C1	E10000M/50V	85 Kč	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor radiální do 50 V; 10 mF
C2, C6, C8, C10, C12, C14	CK 100N/63V	1 Kč	GM Electronic	Keramický kondenzátor 100 nF
C3	CK0805 4N7/50V	2 Kč	GM Electronic	Keramický kondenzátor 4,7 nF
C4, C7, C9, C11, C13	E47M/50V	2 Kč	Jamicon	Elektrolytický kondenzátor radiální do 50 V; 47 μF
C5	CK 330N/50V	4,5 Kč	Hitano	Keramický kondenzátor 330 nF
C15, C16	CK 33P/500V	1,5 Kč	CYM	Keramický kondenzátor 33 pF
PČ	9500/127/120B	1 200 Kč	FerroTec	Peltierův článěk $U_{MAX} = 17,5 V$
Akumulátor	WP26-12	1 090 Kč	Kung Long	Olověný akumulátor 12V/26Ah
SP1	P-H8600VB01T	10 Kč	GM Electronic	Kolébkový spínač do panelu
SP2	VYP D RE20S	62 Kč	PS electronic, s.r.o.	Kódový spínač

C AKUMULÁTOR WP26-12



Obr. C.1: Vybíjecí charakteristika akumulátoru WP-26-12 [23].



Obr. C.2: Nabíjecí charakteristika akumulátoru WP-26-12 [23].