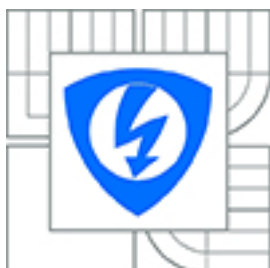




VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV BIOMEDICÍNSKEHO INŽINIERSTVA

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF BIOMEDICAL ENGINEERING

DIGITÁLNÍ TEPLOMĚR S ROZSAHEM OD 0 DO 50 STUPŇŮ C
DIGITAL THERMOMETER RANGING FROM 0 TO 50 DEGREES CELSIUS

BAKALÁRSKA PRÁCA
BACHELOR'S THESIS

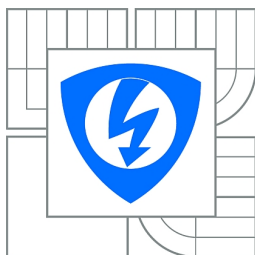
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ĽUBICA HORVÁTHOVÁ

VEDÚCI PRÁCE
SUPERVISOR

Doc. Ing. MILAN CHMELAŘ, CSc.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav biomedicínského inženýrství

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Biomedicínská technika a bioinformatika

Studentka: Ľubica Horváthová

ID: 155554

Ročník: 3

Akademický rok: 2014/2015

NÁZEV TÉMATU:

Digitální teploměr s rozsahem od 0 do 50 stupňů C

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1) Prostudujte senzory teploty a vyhodnoťte jejich vlastnosti. 2) Při hodnocení senzorů se zaměřte na jejich přesnost, na reprodukovatelnost měření a na složitost obvodové techniky potřebné pro jejich použití. 3) Vyberte vhodný a dostupný senzor teploty a navrhnete blokové schéma teploměru. Teploměr má signalizovat akustickým a optickým alarmem překročení nastavené teploty. 4) Navrhnete teploměr s digitálním údajem teploty pro rozsah teplot od 0 do 50 stupňů C s možností signalizace dosažení předem zvolené teploty akustickým a optickým alarmem. Návrh musí obsahovat schéma zapojení výpočet obvodů a rozpisku součástek.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] Kreidl Marcel: Měření teploty – senzory a měřicí obvody, BEN, Praha 2005, ISBN 80-7300-145-4

[2] Učební text ČVUT: Senzory tepelných veličin

Dostupné na:

measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/09_teploata%20text%20.pdf

Termín zadání: 9.2.2015

Termín odevzdání: 29.5.2015

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

Konzultanti bakalářské práce:

prof. Ing. Ivo Provazník, Ph.D.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

ABSTRAKT

Táto bakalárska práca sa zaoberá všeobecným rozdelením teplotných senzorov a výberom konkrétneho senzoru, vhodného pre naše použitie. V práci je popísaná bloková schéma zapojenia digitálneho teplomeru, tak isto ako konkrétny návrh schémy zapojenia digitálneho teplomeru s popisom použitých súčiastok. V závere práce je nad rámec zadania aj samotná realizácia a testovanie navrhnutého teplomeru.

KLÍČOVÁ SLOVA

Digitálny teplomer, senzor, teplota, signalizácia

ABSTRACT

This thesis focuses on the general classification of temperature sensors and the choice of one exact type of sensor, that is suitable for our application. In this thesis the block diagram of the digital thermometer is described as well as the specific schematic of the digital thermometer with the respective description of each component. Beyond the assignment, there is also the construction and testing of the proposed thermometer.

KEYWORDS

Digital thermometer, sensor, temperature, indication

HORVÁTHOVÁ, L'. Digitálny teplomer s rozsahom od 0 do 50°C. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačných technológií, 2015. 45 s. Vedoucí bakalářské práce doc.Ing. Milan Chmelař, CSc.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na tému „Digitální teploměr s rozsahem od 0 do 50 stupňů C“, som vypracovala samostatne pod vedením vedúceho bakalárskej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autorka uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušila autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahla nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomá následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Sb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Sb.

V Brne dňa

.....
(podpis autora)

Pod'akovanie

Veľmi rada by som sa poďakovala vedúcemu práce doc. Ing. Milanovi Chmelařovi, CSc. za odborné rady, pripomienky, pomoc a čas obetovaný pri konzultáciách a samotnej realizácii práce. Tiež by som týmto spôsobom chcela poďakovať Bc. Jakubovi Mackovi za veľkú trpezlivosť a najmä technickú pomoc pri vypracovávaní mojej bakalárskej práce. V neposlednom rade samozrejme ďakujem svojim rodičom za neustálu podporu pri štúdiu.

OBSAH

Úvod	3
1 Rozdelenie senzorov teploty	4
1.1 Elektrické snímače	4
1.1.1 Odporové senzory teploty	4
1.1.2 Termoelektrické snímače	7
1.2 Dilatačné snímače	7
1.2.1 Kvapalinové senzory teploty	8
1.2.2 Plynové a parné teploměry	8
1.2.3 Bimetalové (dvojkovové) teploměry	8
1.3 Špeciálne snímače	9
1.3.1 Akustické senzory	9
1.3.2 Kryštálové senzory	10
1.3.3 Šumové senzory	10
1.3.4 Teplotné indikátory	11
1.4 Senzory infračerveného žiarenia	11
1.4.1 Tepelné senzory	12
1.4.2 Kvantové senzory	12
1.5 Pyroelektrické senzory	12
1.6 Termovízne systémy	12
2 Hodnotenie teplotných senzorov	13
2.1 Porovnanie konkrétnych typov	13
2.2 Voľba teplotného senzoru	14
3 Návrh teplomeru	15
3.1 Bloková schéma	15
3.2 Popis blokov	16
3.3 Obvodové riešenie teplomeru	17
3.3.1 Teplotný senzor - Pt100	17
3.3.2 Zdroj konštantného prúdu - LM334	18
3.3.3 Zdroj referenčného napätia - LM336	20
3.3.4 Operačný zosilňovač - TLC272 - IC3A	21
3.3.5 Zosilňovač - AD620	22
3.3.6 Operačný zosilňovač - TLC272 - IC3B	24
3.3.7 Komparátor - LM393	25
3.3.8 Zapojenie signalizácie pomocou LED a sirénky	26
3.3.9 Displej	28
3.4 Obvodové riešenie zdroja	29
3.4.1 Napäťový regulátor - LE50ABZ	29
3.4.2 Komparátor - LM393	30
3.4.3 Zapojenie signalizácie pomocou LED	30
3.4.4 Napäťový menič - ICL7660	31
4 Realizácia	32
4.1 Postup realizácie teplomeru	32
4.2 Overenie funkčnosti teplomeru	37

Záver	38
Literatúra	39
Zoznam symbolov a skratiek	44
Zoznam veličín	45
A Schéma zapojenia celého teplomeru	I
B Rozpis použitých súčiastok	III

ÚVOD

Neoddeliteľnou súčasťou nášho každodenného života je teplota. Pojem, ktorý je známy snáď každému a ktorý je nesmierne dôležitý či už v meteorológii, technike, potravinárstve, geológii alebo v medicíne a mnohých ďalších odvetviach. Teplota je jednou zo siedmich základných veličín SI a vo väčšine vedeckých prác je jej hodnota vyjadrovaná v Kelvinovej stupnici. Okrem toho sa často používa tiež Celziová alebo Fahrenheitová stupnica v závislosti na type využitia, prípadne časti sveta, v ktorej sa nachádzame.

Otázkou je potom, ako najlepšie túto veličinu zmerať. Existuje viacero spôsobov, ktorými sme schopní zistiť hodnotu teploty. Princípy merania sú založené najmä na zmenách vlastností niektorých látok súvisiacich práve so zmenami teploty. Tieto zmeny sme potom schopní merať (termometria) kontaktnými a bezkontaktnými metódami. Podrobnejšie si obe tieto metódy aj s konkrétnymi typmi sensorov popíšeme v kapitole 1. Zariadenia, pomocou ktorých meriame teplotu, sú teplotné senzory. Tie zaznamenávajú fyzikálne zmeny ako napríklad objem, prúd či odpor, ktoré sa menia v závislosti na pôsobiacej teplote. Práve tieto teplotné senzory si podrobnejšie rozoberieme a jeden z nich vyberieme na zostrojenie digitálneho teplomeru, ktorého hlavnou úlohou bude kontrola teploty v prostredí s rozsahom od 0 do 50 °C.

V rámci zadania nie je definovaná požiadavka na presnosť navrhnutého teplomeru. My sme sa teda rozhodli jeho funkciu riešiť v prostredí biomedicíny, kde sa bude jednať napríklad o sledovanie teploty v inkubátoroch na množenie živočíšnych buniek. Pomocou funkcie nastavenia teploty a zvolenia si smeru signalizácie - či už pokles pod povolenú hranicu, alebo nárast nad určitú hodnotu, bude digitálny teplomer schopný sledovať zmeny teploty a tak upozorniť na ich kritické hodnoty. Vhodnou voľbou si potom môžeme nastaviť hraničnú teplotu, ktorá bude reprezentovať napríklad 5 °C, kde sa pri poklese zastavuje bunkové delenie, 27 °C, kde v bunkách cicavcov dochádza k zmenám v bunkovej membráne alebo 40 °C, kde sa pri prekročení narúšajú procesy endocytózy v bunkách a bunky môžu rýchlo hynúť.[1] V týchto prípadoch nás teda nebude zaujímať najväčšia možná presnosť merania, ale bude nám stačiť hodnota teploty na 1 °C, prípadne na 1 desatiné miesto.

1 ROZDELENIE SENZOROV TEPLoty

Existuje viacero rozdelení teplotných senzorov no možno najpoužívanejšie sa pokúsime priblížiť si konkrétnejšie. Jedná sa o rozdelenie podľa zdroja [8].

Dotykové snímače:

- Elektrické (odporové kovové, odporové polovodičové, termoelektrické)
- Dilatačné (kvapalinové, plynové, parné a bimetalové)
- Špeciálne (akustické, kryštálové, šumové, tekuté, teplomerné farby)

Bezdotykové snímače:

- Sensory infračerveného žiarenia (tepelné a kvantové)
- Pyroelektrické senzory
- Termovízne systémy (Pyrometry nezávislé na emisivite)

Dotykové snímače:

Najprv si predstavíme podrobnejšie dotykové snímače, ktoré už podľa názvu musia byť v priamom kontakte s predmetom, ktorého teplotu zisťujeme a využívajú vodivosť tepla na monitorovanie teplotných zmien. Sú užitočné na meranie teploty pevných, kvapalných aj plyných látok a sú schopné pracovať s pomerne širokým teplotným rozsahom.[10]

1.1 Elektrické snímače

Elektrické snímače teploty nám umožňujú prevádzať teplotu na elektrickú veličinu akou je napríklad napätie alebo odpor a následne ho spracovávať elektrickým obvodom a prevádzať na teplotný údaj.[3]

1.1.1 Odporové senzory teploty

Základný princíp odporových senzorov spočíva v závislosti elektrického odporu kovových a polovodičových materiálov na zmene teploty. Keďže každý materiál má iné fyzikálne aj chemické vlastnosti, je pomerne dôležitý jeho konkrétny výber, ktorý potom ovplyvňuje aj ďalšie charakteristiky týchto senzorov. Veľmi dôležitá požiadavka sa kladie na veľký a stály teplotný súčiniteľ odporu, popísaný rovnicou (1.1) prevzaté z [12].

$$R_x = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot \Delta\vartheta) \tag{1.1}$$

kde R_x je odpor senzoru [Ω] pri meranej teplote ϑ_x [K]

R_0 je odpor [Ω] pri vzťažnej teplote ϑ_0 [K]

α je teplotný súčiniteľ odporu daného materiálu

Odporové kovové senzory (RTD) zvyšujú elektrický odpor pri rastúcej teplote. Elektrický prúd je v kovoch vedený pomocou valenčných elektrónov, ktoré sa na jadro viažu iba slabšie a tak tvoria takzvaný elektrónový plyn. So zvyšujúcou sa teplotou ale atómy začínajú kmitať rýchlejšie, čo robí prechod valenčných elektrónov náročnejším a tým dochádza k vzrastu odporu.[11]

Najčastejšie sú využívané čisté kovy ako Pt, Ni, Cu alebo Ag. Najlepším a najpoužívanejším kovom je Pt. Predstavuje materiál s vysokou chemickou stálosťou, vysokou teplotou tavenia, je odolná voči oxidáciám a má aj najširší teplotný rozsah ($-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $850\text{ }^{\circ}\text{C}$).[5] Vyznačuje sa aj veľmi dobrou stabilitou, presnosťou a medzi dôležité plusy patrí aj výborná linearita závislosti odporu na teplote.[7] Charakteristiku kovového snímača vidíme na obrázku 1.2a Vlastný merací odporový článok sa potom konštruuje ako stočený odporový drôtik zatavený do skla, prípadne keramiky alebo je toto vinutie nahradené odporovou vrstvou nanesenou na nosnej doštičke.[9]

Odporové polovodičové senzory Pri polovodičoch je závislosť odporu na teplote opačná v porovnaní s kovmi. Tu je potrebné elektrónom dodať určitú energiu, napríklad tepelnú alebo elektromagnetickú, aby boli schopné viesť elektrický prúd. Koncentrácia nosičov náboja bude teda so stúpajúcou teplotou rásť a tým sa odpor bude znižovať. Odporové polovodičové senzory môžeme rozdeliť do ďalších dvoch skupín – monokryštalické a polykryštalické – inak tiež nazývané aj termistory.[11]

Monokryštalické polovodičové senzory bývajú najčastejšie vyrobené z kremíku. Ich význačnou devízou je ich pomerne dobrá lineárna závislosť odporu na teplote, ktorá sa síce nevyrovná tej u platinových sensorov, ale je možné ju vhodnými spôsobmi korigovať. Taktiež môžeme spomenúť jednoduchú integráciu do obvodov alebo lepšiu stabilitu ako u termistorov. Pri podrobnejšom rozdelení ešte môžeme rozlišovať senzory s PN prechodmi alebo bez nich. Pre veľmi nízke teploty sa dobre využíva napríklad dióda typu GaAs, ktorá je schopná merať v rozsahu od 1 K do 450 K.[5] Pri konštruovaní nášho teplomeru ich ale využívať nebudeme.

Termistory patria medzi ďalšie typy teplotných sensorov a už ich meno naznačuje, že sa jedná vo všeobecnosti o tepelne citlivé rezistory. Najčastejšie sú vyrábané z keramických materiálov ako sú napríklad oxidy niklu, mangánu alebo kobaltu a sú pokryté tenkou vrstvou skla alebo epoxidu. Aj napriek tomu, že sú veľmi ľahko poškoditeľné a stretávame sa s nelinearitou, často sa využívajú najmä vďaka svojej citlivosti, presnosti, opakovateľnosti merania a veľmi rýchlej odozve aj na malé zmeny teploty.[10] Najmä vďaka svojej veľmi malej veľkosti sa dobre používajú aj na takmer bodové meranie teploty. Podľa teplotného koeficientu (súčiniteľa odporu) ich môžeme rozdeliť na 2 podskupiny a to pozistory s kladným teplotným koeficientom a negastory s tým záporným. Na obrázku 1.1 môžeme vidieť rôzne tvary a veľkosti týchto dvoch typov termistorov.

Pozistory (PTC) sa vyznačujú svojím kladným teplotným súčiniteľom odporu, čo znamená, že s rastúcou teplotou rastie aj ich odpor. Jeho priebeh v závislosti na teplote môžeme popísať rovnicou (1.2) prevzatou z [9].

$$R = R_J \cdot e^{A \cdot \vartheta} \quad (1.2)$$

kde R predstavuje odpor senzoru [Ω]

R_J je odpor [Ω] pri referenčnej teplote ϑ_J [K]

ϑ symbolizuje teplotu [K]

ϑ_J je referenčná teplota závislá na chemickom zložení [K]

Spočiatku ide o mierny pokles odporu, po ktorom nasleduje jeho strmý nárast od takzvanej spínacej teploty a nakoniec opäť klesá pri vysokých teplotách. To znázorňuje presnejšie obrázok 1.2b z učebnice „Measurement in Technology“ [7]. Na konštrukciu pozistorov sa najčastejšie používa polykryštalická feroelektrická keramika ($BaTiO_3$).[9] Kvôli svojmu strmo stúpajúcemu odporu sa málokedy využívajú na meranie ale skôr ako vratné poistky, prúdové obmedzovače, teplotné spínače či ako súčasť samoregulačného kúrenia.[5] Keďže termistory ako také sú pasívne odporové zariadenia, na to, aby sme nimi mohli zmerať napäťový výstup potrebujeme cez ne nechať prechádzať prúd.



Obr. 1.1: Rôzne tvary PTC a NTC termistorov

Negastory (NTC) majú na rozdiel od PTC záporný teplotný koeficient, takže s rastúcou teplotou ich rezistivita klesá. Túto závislosť môžeme vyjadriť vzťahom (1.3) prevzatým z [5] a tiež obrázkom 1.2b.

$$R_T = R_{T_0}^{\left(\beta - \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right)} \quad (1.3)$$

kde β je materiálová konštanta nazývaná aj termistorová konštanta

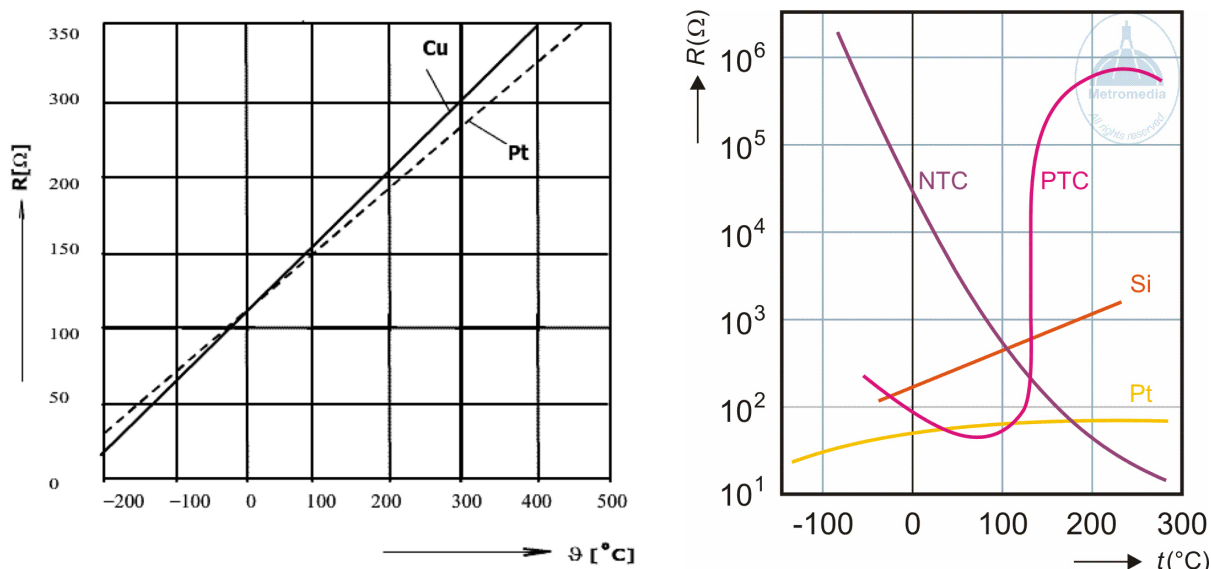
R_T reprezentuje odpor pri teplote T [Ω]

R_{T_0} je odpor pri teplote T_0 [Ω]

T a T_0 sú hodnoty teploty [K]

Podľa článku „Odporové senzory teploty“ [5] sa NTC termistory vyznačujú veľmi dobrou stabilitou a do rozsahu približne 300 °C sú aj veľmi presné. Aj keď je ich charakteristika nelineárna, v obvode je možné ju linearizovať. Pri výrobe sa často používa prášková technológia hrubých vrstiev, vďaka ktorej sa dosahuje lepšia opakovateľnosť a zvýši sa zameniteľnosť senzorov, takže recalibrácia pri náhrade nie je nutná. Ich konečný tvar môže byť napríklad diskový alebo vo forme čipu a je určený ich špecifickou aplikáciou.

V bežnej praxi sa často využívajú ako senzory teploty vonkajších priestorov, vo vetracích a klimatizačných zariadeniach alebo na meranie teploty chladiacej kvapaliny v automobiloch.[15]



Obr. 1.2: a) Charakteristika kovového senzoru, konkrétne Cu a Pt (prevzatá z [12]); b) Charakteristiky viacerých odporových snímačov - PTC, NTC, Si a Pt [7]

1.1.2 Termoelektrické snímače

Princíp ich funkcie je založený na Seebeckovom jave. Jeho všeobecná definícia citovaná z [13] znie: „Ak sú spojené dva vodiče z rôznych elektricky vodivých materiálov do uzavretého obvodu a ak majú spoje rôznu teplotu, preteká obvodom elektrický prúd.“ Dochádza teda k premene tepelnej energie na elektrickú a na voľných koncoch sa samovoľne generuje takzvané Seebeckovo elektrické napätie. Toto napätie závisí na teplote a na materiále, čo môžeme využiť na vytvorenie teplotných snímačov - termočlánkov. Tie sú zo všetkých teplotných senzorov používané najčastejšie. V závislosti na ich konkrétnom použití sa môžu rozmermi prispôbiť a môžu byť aj veľmi malé, čo predstavuje mnohokrát veľké pozitívum. Spomedzi všetkých teplotných snímačov sa vyznačujú najširším teplotným rozsahom od -200°C až do 2000°C , jednoducho sa používajú a ich odozva na teplotné zmeny je veľmi rýchla. Táto rýchlosť závisí z veľkej miery aj na rozmeroch senzoru. Pri malej hmotnosti bude odozva na zmenu teploty rýchla, naopak pri veľkom senzore bude táto odpoveď pomalšia. Ako už bolo spomínané, sú zostrojené z dvoch rozdielnych kovov, ktoré sú spolu zvarené. Jeden spoj sa nazýva chladný spoj, jeho teplotu musíme poznať na to, aby sme boli schopní odmerať teplotu na druhom spoji, zvanom aj teplý spoj. Najpoužívanějšími materiálmi na termočlánky sú železo-konštantán (typ J), meď-konštantán (typ T) a nikel-chróm (typ K). Keďže napätový výstup z termočlánku je veľmi malý, na 10°C zmeny je to iba niekoľko mV, je vhodné použitie zosilovača.[10] Ich využitie v praxi je často vo forme dotkových, vpichových, ponorných alebo štrbinových sond.[15]

1.2 Dilatačné snímače

Dilatačné snímače sú založené na teplotnej rozťažnosti kvapalín, plynov a kovov. Meranie teploty sa odvíja teda od zmeny dĺžky, objemu alebo tlaku.

1.2.1 Kvapalinové senzory teploty

Kvapalinové teploměry využívajú na svoju správnu funkciu objemovú rozťažnosť kvapalín. Existujú rôzne veľkosti, rozsahy aj konštrukcie. V spodnej časti je umiestnená nádobka s teplomernou kvapalinou. Najčastejšie sa používa ortuť, ktorá je vhodná svojimi fyzikálnymi vlastnosťami ako sú dobrá tepelná vodivosť, veľká objemová rozťažnosť, nepriehľadnosť alebo nezmáčavosť. V iných prípadoch sa môžu použiť niektoré organické látky napríklad toluén, alkohol alebo benzolan. Nádobka potom prechádza do tenkej kapiláry so stupnicou, kde odčítavame teplotu podľa hladiny kvapaliny, ktorá sa jej vplyvom rozťahuje až do kapiláry. Na jej druhom konci je umiestnená nádržka, ktorá chráni teplomer pred roztrhnutím pri prípadnom prehriatí. Je treba počítať so zmenami teploty prostredia, ktoré vplyvajú na kapiláru a preto je dôležité zabezpečiť teplotnú kompenzáciu. Najtypickejším kvapalinovým teplomerom býva tyčinkový teplomer a ďalšími predstaviteľmi tejto skupiny sú napríklad obalový, stonkový alebo kontaktný teplomer. Veľmi veľkú nevýhodu tohto typu senzoru predstavuje jeho krehkosť.[7]

1.2.2 Plynové a parné teploměry

Plynové teploměry využívajú teplotnú rozťažnosť dusíku, ktorým sú obyčajne plnené. Pri meraní teploty sa riadime plynovou rovnicou (1.4) použitou z [8].

$$p \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad (1.4)$$

kde p je tlak plynu [Pa]

V je objem plynu [m^3]

n predstavuje látkové množstvo [mol]

R reprezentuje molárnu plynovú konštantu [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]

T je termodynamická teplota [K]

Tlak plynu sa pomocou tlakomerného deformačného člena, ktorým býva najčastejšie Bourdonova trubica, prevádza na výchylku ukazovateľa. Tento deformačný člen býva často použitý aj v tlakomeroch.[6]

Parné senzory teploty sú založené na závislosti tlaku nasýtených pár na teplote. Spodná časť je vyplnená prchavou látkou a meriame tlak pár. Tento snímač sa vyznačuje veľkou citlivosťou a presnosťou.[9]

1.2.3 Bimetalové (dvojkovové) teploměry

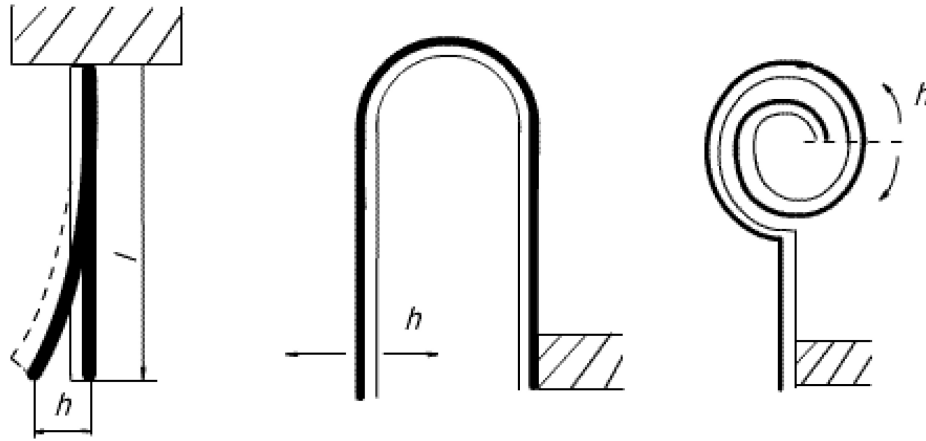
Základom bimetalových teplotných sensorov je pevný spoj dvoch kovových materiálov s rozdielnym teplotným súčiniteľom rozťažnosti. Pri zmene teploty sa každý bimetalový pásik deformuje odlišne a táto zmena je prevádzaná na stupnicu. Tvar bimetalických pásikov môže byť rôzny od plochého cez skrútený, až po tvar špirály či závitnice.[3, 8] Na obrázku 1.3 sú zobrazené spomínané tvary a h tu predstavuje veľkosť vychýlenia voľného konca pásika, ktorú vypočítame podľa rovnice (1.5) čerpanej z [12].

$$h = \frac{l^2}{S} \cdot \Delta\theta \quad (1.5)$$

kde h reprezentuje veľkosť vychýlenia voľného konca pásika [m]

l je dĺžka pásika [m]

S je hrúbka pásika [m]



Obr. 1.3: Možné tvary bimetalových pásov [12]

$\Delta\vartheta$ symbolizuje rozdiel teplôt $\vartheta_2 - \vartheta_1$ [ΔK]

Často sú využívané na takzvanú dvojpolohovú reguláciu teploty napríklad ako elektrický spínač v termostatoch na kontrolu ohrievania vody v boileroch, peciach alebo taktiež v chladiacich systémoch vozidiel. Tu sa najčastejšie používa jednoduchý bimetalový pásek, ktorý je na jednom konci pevne napojený na elektrický obvod a druhým koncom sa dotýka elektrických kontaktov a tak uzatvára obvod, ktorým preteká prúd. Pri zvýšenej teplote sa pásek deformuje a prerušuje kontakty, čím zabraňuje prechodu prúdu.

Existujú dva základné typy bimetalických pásov. S rýchlejšou odozvou sú to takzvané „snap-action“ typy, ktoré pri určitej nastavenej teplote prerušia prípadne spoja obvod. V praxi je ich bežne možné využiť napríklad v nastavení teploty na kuchynských rúrach, žehličkách alebo v domácom kúrení. Druhý typ predstavujú „creep-action“ pásiky s pomalšou odozvou, ktoré iba postupne menia svoju polohu. Tie sa používajú často v teplomeroch. Sú jednoduché, lacné a ich použitie siaha do 400 °C. [10]

1.3 Špeciálne snímače

Špeciálne senzory teploty sú založené na viacerých faktoroch, ktoré sa menia pri stúpaní alebo poklese teploty a tým pádom sme schopní hodnotu teploty odmerať. Podľa typu senzoru sa jedná napríklad o zmenu farby, alebo rezonančného kmitočtu či zmenu rýchlosti šírenia zvuku. Rozlíšujeme teda niekoľko typov špeciálnych snímačov teploty a niektoré z nich si predstavíme podrobnejšie.

1.3.1 Akustické senzory

Základom akustického teplomera je jeho odozva na zmenu teploty zmenou rýchlosti zvuku, označenou v našom prípade písmenom w . Podľa [8] je v ideálnom plyne definovaná rovnicou (1.6)

$$w^2 = \frac{c_p R \cdot T}{c_v M} \quad (1.6)$$

kde w znázorňuje teplotnú zmenu rýchlosti zvuku [$m \cdot s^{-1}$]

c_p a c_v sú merné tepelné kapacity plynu [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$]
 R_m je plynová konštanta [$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$]
 T reprezentuje termodynamickú teplotu [K]
 M symbolizuje molekulovú hmotnosť plynu [$kg \cdot mol^{-1}$]

Rýchlosť šírenia zvukovej vlny v pevnom telese závisí na jeho teplote a na jej zistenie sa používajú vo všeobecnosti dve metódy. Jedna pracuje s ultrazvukovou rezonanciou kde sa používa rezonátor z kryštálu kremíka na teploty do 250 °C a na vyššie teploty sa využívajú kovy ako molybdén alebo irídium. Druhá technika vysiela impulz cez tenký drôt, obyčajne wolframový prípadne rhéniový, ktorý na druhom konci sníma prijímač. Je možné dosiahnuť až rozlíšenie 0,2 °C. [7]

1.3.2 Kryštálové senzory

Kryštálové senzory fungujú na princípe teplotnej závislosti rezonančnej frekvencie výbrusu kremíkového kryštálu. Na zistenie teploty zapojíme kryštál do rezonančného obvodu tranzistorového oscilátora, kde sa na základe zmeny teploty mení aj rezonančná frekvencia kryštálu aj frekvencia oscilátora. Tieto kmity sa sčítajú s kmitmi teplotne nezávislého referenčného oscilátora a ich rozdiel sa potom následne vyhodnocuje čítačom. Všeobecne sa rezonančná frekvencia mení lineárne so zmenou teploty, čím sme schopní dosiahnuť veľmi vysokú presnosť a rozlíšenie až 10 μ K. [7]

1.3.3 Šumové senzory

Šumové teplomery využívajú náhodný pohyb elektrónov v rezistore, ktorý sa v ňom prejavuje ako napäťové fluktuácie. Keďže pohyb elektrónov je teplotne závislý, tak od teploty závisí aj generovanie tohto šumového napätia. Vo všeobecnosti teda meriame šumové napätie a na základe toho sme potom schopní odvodiť hodnotu neznámej teploty. Na meranie sa používa niekoľko spôsobov, kde buď do obvodu zapojíme dva rezistory alebo stačí iba jeden.

Pri použití dvoch rezistorov je na jednom konštantný odpor a udržiava sa na konštantnej teplote a druhý pracuje s premenlivým odporom a s neznámou teplotou. Hodnotu premenlivého odporu sa nastavuje až dovtedy, pokým sa napätia nevyrovnajú. Vtedy platí vzťah (1.7) prevzatý z [7].

$$T = \frac{R_0 \cdot T_0}{R} \quad (1.7)$$

kde R_0 je konštantný odpor [Ω] pri konštantnej teplote T_0 [K]

T je teplota rezistora [K] s premenlivým odporom R_0 [Ω], ktorú meriame

Pri nízkych teplotách je šumové napätie tak nízke, že bežné zosilňovače sa nedajú použiť a tak sa napätie prevádza na frekvenciu, ktorej zmeny potom meriame. Citlivý prvok v šumovom teplomeri predstavuje cievka, ktorá je obyčajne vyrobená z rhénia. Najčastejšie sa tieto typy teplomerov využívajú v náročných prevádzkach s množstvom rušivých vplyvov ako sú napríklad atómové, uholné alebo plynové elektrárne, prípadne petrochemické závody a iné. Umožňujú dlhodobé meranie v rozsahu od 300 °C do 1200 °C s dovolenou chybou 0,5 % až 0,1 % meracieho rozsahu. [7]

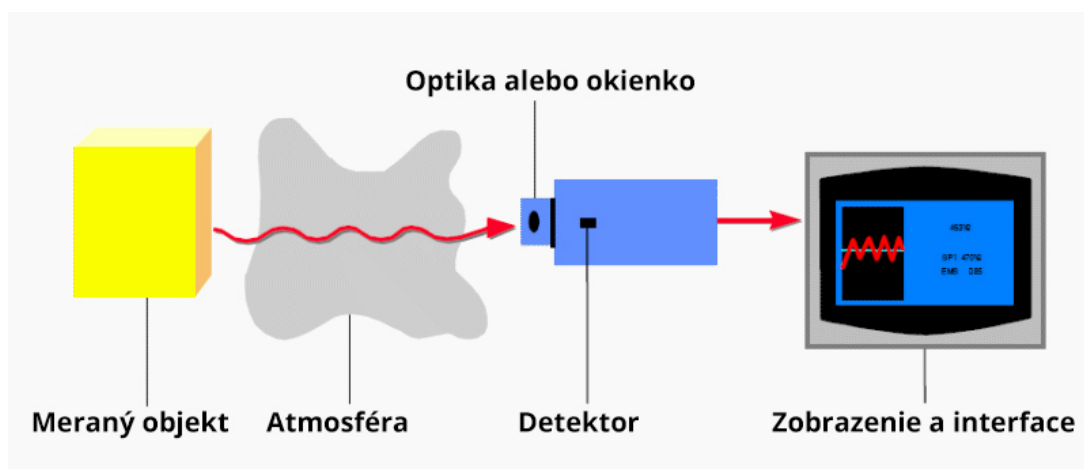
1.3.4 Teplotné indikátory

Teplotné indikátory vo všeobecnosti sú určené iba k približnému meraniu teploty a môžu byť založené na vratnej alebo nevratnej chemickej reakcii, prípadne na tavnom princípe. Môžu existovať v rôznych formách ako sú napríklad teplomerné tabletky, telieska, farby, ceruzky, kriedy, nátery alebo nálepky. Farebné teplotné indikátory sú vo forme nálepiek vyrobených z fólie a obsahujú jeden alebo viac terčikov s teplotne citlivými pigmentmi.

Teplota, pri ktorej dôjde k zmene farby nálepky, je daná zložením náteru a na nálepke je vyznačená. Farba sa mení v dôsledku chemickej reakcie, ktorá mení spektrum odrazivosti náteru. [3] Teplotné indikátory môžu byť vratné alebo nevratné a podľa presného typu indikátora a tým je presnejšie špecifická svojím rozsahom alebo životnosťou či materiálom, z ktorého sú vyrobené a presnosťou, ktorú môžu dosiahnuť.[7]

Bezdotykové snímače:

Druhou veľkou skupinou teplotných senzorov sú bezdotykové snímače. Tie využívajú prúdenie a vyžarovanie tepla na monitorovanie teplotných zmien. Najčastejšie zisťujeme teplotu v kvapalinách a plynách v podobe tepla, ktoré stúpa a chladu, ktorý klesá v konvekčných prúdoch alebo detekujeme vyžarovanie energie z predmetov vo forme infračerveného žiarenia. [10] Toto žiarenie je potom senzorom prevedené na elektricky merateľnú veličinu, ktorá je spracovaná podobne ako pri dotykových senzoroch. Merať sme schopní iba povrchovú teplotu objektov. Na obrázku 1.4 je znázornený reťazec bezkontaktných snímačov teploty. [16]



Obr. 1.4: Bloková schéma bezkontaktného reťazca, prevzatá z [16]

1.4 Senzory infračerveného žiarenia

Senzory infračerveného žiarenia pokrývajú vlnové dĺžky časti elektromagnetického žiarenia a to konkrétne od $0,78 \mu\text{m}$ do $1 \mu\text{m}$, čo spadá do blízkeho infračerveného spektra a od $1 \mu\text{m}$ do $3 \mu\text{m}$ do krátkovlnného infračerveného spektra. Podľa interakcie fotónov s materiálom senzoru sa jedná buď o tepelný alebo o kvantový senzor.[8]

1.4.1 Tepelné senzory

Tepelné senzory obsahujú citlivú časť, ktorá sa otepľuje pri absorpcii fotónov a potom sa táto pohltená energia vyhodnocuje nepriamo cez dotykový teplotný senzor, ktorým býva najčastejšie termočlánková batéria alebo bolometer¹. Taktiež sa môže merať teplota predmetov, ktoré sú chladnejšie ako je senzor, kde je potom tepelný tok prevrátený a citlivá časť senzoru sa ochladzuje.[8]

1.4.2 Kvantové senzory

Kvantové senzory sa využívajú pre termovízne snímanie obrazu. Pri priamej interakcii dopadajúcich fotónov na senzorovú štruktúru vznikajú fyzikálne javy, ktoré práve kvantové senzory využívajú. Bezdotykovo meriame pomocou fotodiód a fotovodivostných detektorov, ktoré sú väčšinou vo fotonapäťovom režime. Pre lepšie výsledky pomeru signálu k šumu musíme tieto senzory chladiť.[8]

1.5 Pyroelektrické senzory

Princíp funkcie pyroelektrických senzorov spočíva v pyroelektrickom jave, čo môžeme definovať ako zmenu spontánnej polarizácie pri zmene teploty. Pri dopade infračerveného žiarenia na povrch materiálu meriame elektrický náboj, ktorý na povrchu vzniká. Tento jav nachádzame u pyroelektrík s trvalou polarizáciou alebo u niektorých feroelektrík. Rozsah možných nameraných teplôt sa pohybuje od $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ až po $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ čo zodpovedá vlnovým dĺžkam od $5\text{ }\mu\text{m}$ do $14\text{ }\mu\text{m}$. [16]

1.6 Termovízne systémy

Termovízne systémy sú schopné bezkontaktne merať teplotné polia. Obyčajne sa rozdeľujú na dve skupiny a to bez rozkladu obrazu a s rozkladom obrazu. Systémy bez rozkladu obrazu pracujú na princípe obrazových meničov, kde sa tepelný obraz vytvára optikou na fotokatóde. Z nej sa potom emitujú elektróny, ktoré sú zosilnené fotonásobičom a usmernené na luminiscenčné tienidlo, kde vytvárajú už viditeľný obraz. Systémy, ktoré sú založené na rozklade obrazu, fungujú na elektronickom alebo opticko-mechanickom princípe. Moderné termovízne kamery znova fungujú bez rozkladu obrazu a vyznačujú sa chladenou plošnou maticou detektorov alebo maticou nechladených bolometrov, ktorá je umiestnená v ohnisku optického systému. [16]

¹veľmi citlivý teplomer, ktorého odpor sa mení s teplotou. Najčastejšie sa používa na meranie teplotnej radiácie infračerveného spektra.[4]

2 HODNOTENIE TEPLOTNÝCH SENZOROV

Teplotné senzory sme schopní na základe ich špecifických parametrov medzi sebou porovnávať. Tým pádom sme schopní vybrať najvhodnejší senzor pre konkrétnu aplikáciu.

2.1 Porovnanie konkrétnych typov

V predchádzajúcej kapitole sme si teplotné senzory rozdelili do základných skupín a popísali sme podrobnejšie ich vlastnosti. Nie všetky typy senzorov sú ale vhodné pre každé použitie a konkrétne na zostrojenie digitálneho teplomeru nás budú zaujímať iba tri typy. Zameriame sa teda najmä na porovnanie termočlánku, odporového kovového senzora (RTD) a termistoru typu NTC, ktoré by čo najlepšie mohli spĺňať podmienky pre naše použitie. Bude nás zaujímať rad parametrov, ktoré sú pre konštrukciu teplomeru dôležité a to napríklad rozsah merania, rýchlosť reakcie senzoru na zmeny teploty, linearita, presnosť, reprodukovateľnosť alebo zložitosť obvodu, na základe ktorých môžeme ľahšie vybrať vhodný senzor. V nasledujúcej tabuľke si porovnáme spomínané parametre termočlánkov, RTD a termistorov NTC.

Tabuľka 2.1: Porovnanie senzorov, vhodných pre naše použitie pre konštrukciu digitálneho teplomera

parametre	termočlánok	odporový kovový senzor - RTD	termistor NTC
teplotný rozsah	veľmi široký −260 °C až 1800 °C	široký −240 °C až 650 °C	stredný −70 °C až 260 °C
presnosť	dobrá	výborná	dobrá
stabilita	slabá až dobrá	veľmi dobrá	slabá
rýchlosť odozvy na zmenu teploty	stredná až rýchla	stredná	stredná až rýchla ¹
linearita	veľmi dobrá	výborná	dobrá ²
reprodukovateľnosť	dobrá	výborná	dobrá
citlivosť	dobrá	veľmi dobrá	výborná
zložitosť potrebného obvodu	zložitejšie ³	jednoduché ⁴	zložitejšie ⁵

¹rýchlosť závisí na hmotnosti použitého snímača

²až pri väčšom teplotnom rozsahu je treba linearizovať

³výstup závisí na rozdiel teploty medzi chladným a teplým spojmom

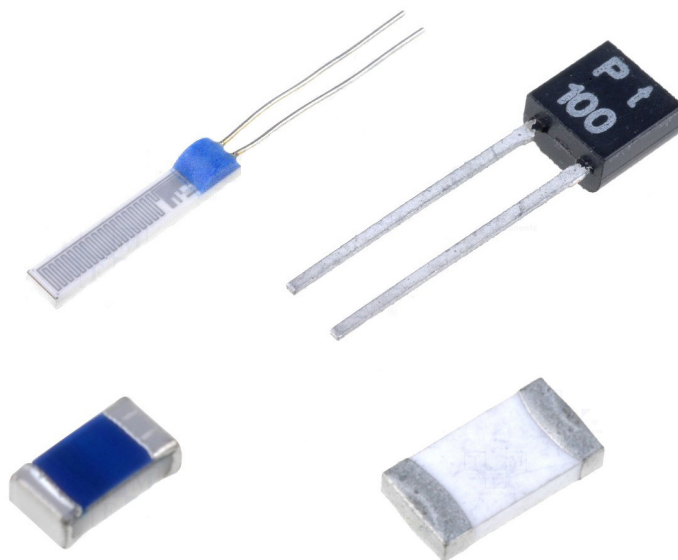
⁴nie je potrebná linearizácia charakteristiky senzoru v obvode

⁵je potrebná teplotná kompenzácia obvodu a zosilovač

2.2 Voľba teplotného senzoru

Na základe porovnania senzorov v tabuľke a vyhovujúcich parametrov pre naše použitie sme si vybrali odporový kovový snímač - RTD, s ktorým budeme následne ďalej pracovať. Konkrétne využijeme platinový snímač Pt100, ktorý patrí medzi najčastejšie používané typy odporových senzorov používaných v priemysle. Svojimi špecifickými fyzikálnymi a chemickými vlastnosťami je platina veľmi vhodný materiál na rôzne použitia, ako sú napríklad chirurgické nástroje, optické vlákna, dentálne zliatiny, či šperky alebo je dokonca súčasťou cytostatík⁶ vo farmaceutickom priemysle. Tento materiál je tepelne aj elektricky dobre vodivý a keďže nereaguje s kyslíkom, je odolný voči korózií. Pre naše použitie je teda pomocou platinového senzoru a vhodne zvolenej metódy merania možné dosiahnuť veľmi vysokú presnosť. Ako sme spomínali už v kapitole 1, naše meranie budeme zakladať na fakte, že elektrický odpor platinového senzoru je veľmi výrazne závislý na teplote.[14] Je špecifický svojím odporom $100\ \Omega$ pri $0\ ^\circ\text{C}$. Podľa zdroja [28], teplotná zmena $1\ ^\circ\text{C}$ spôsobí rozdiel v elektrickom odpore o hodnote $0,384\ \Omega$, takže aj malá chyba v nameranej hodnote odporu môže spôsobiť pomerne veľkú odchýlku v teplote. Preto sa kvôli väčšej presnosti pri dlhom vedení používa štvorvodičové zapojenie, kde 2 z nich vedú prúd a 2 merajú napätie prechádzajúce sensorom. V našom prípade to ale nebude nutné, pretože senzor bude zapojený priamo do obvodu.

Teplotný senzor je presný, nie je veľmi drahý, ľahko sa používa a tiež môže byť jednoducho nahradený. V tomto prípade samozrejme záleží na požadovanej presnosti, s ktorou chceme merať. Ak nám nejde o presnosť na desatiny stupňa, potom sa zaobídeme aj bez nutnej recalibrácie. Ako môžeme vidieť na obrázku 2.1, konkrétne typy Pt100 senzorov sa líšia okrem svojho tvaru, farby púzdra a celkového vzhľadu aj rozsahom pracovnej teploty, rozmermi či rozdielnym teplotným koeficientom.



Obr. 2.1: Platinový teplotný senzor - Pt100 - rôzne typy

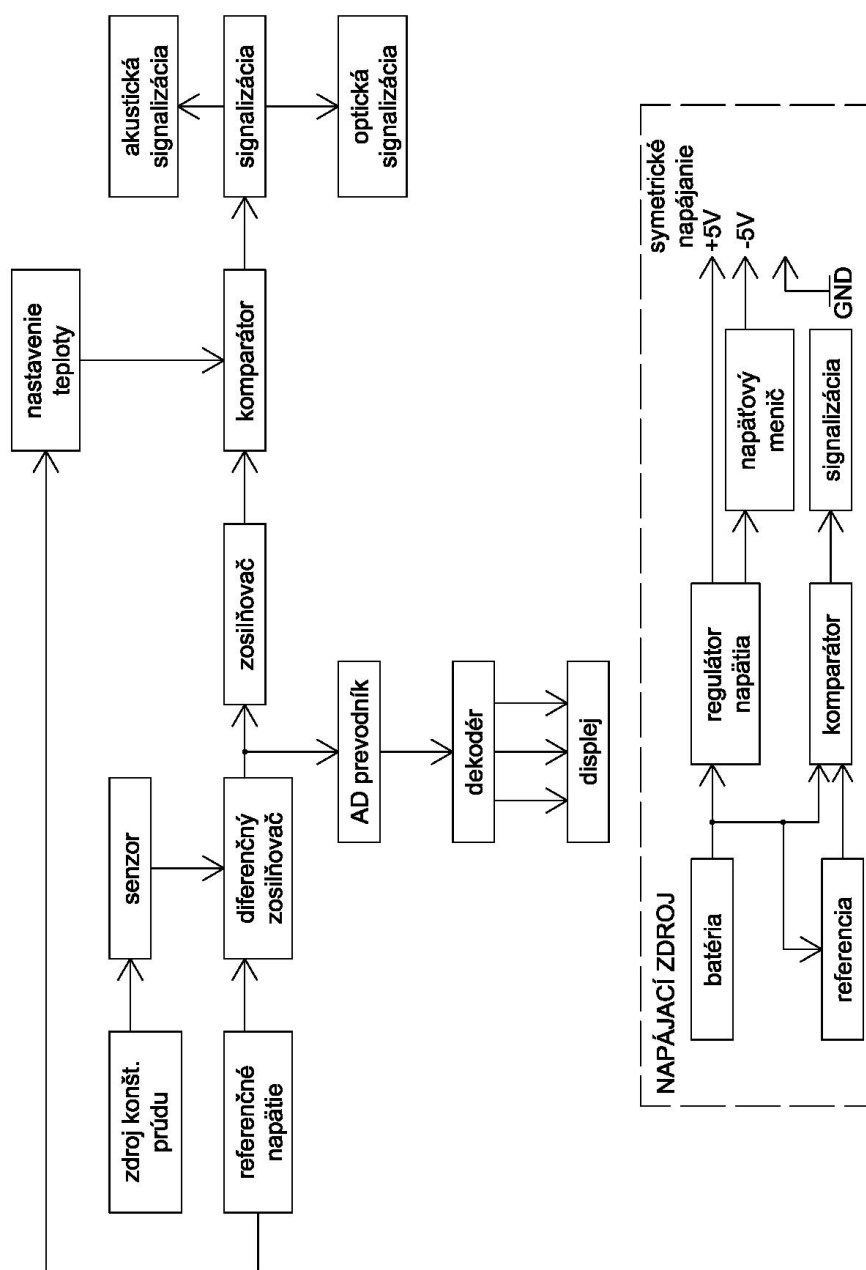
⁶látky, ktoré potláčajú alebo úplne zastavujú rast rakovinových buniek

3 NÁVRH TEPLOMERU

V návrhu teplomeru sa venujeme podrobnejšie návrhu blokovej schémy teplomeru a napájacieho zdroja, podrobnejšiemu popisu konkrétnych blokov a nakoniec navrhnutému obvodovému riešeniu digitálneho teplomeru a napájacieho zdroja.

3.1 Bloková schéma

Na základe potrebných blokov na správnu funkciu teplomeru sme si zostavili blokovú schému, ktorá bude vyzerať nasledovne.



Obr. 3.1: Návrh blokovej schémy

3.2 Popis blokov

Na zostrojenie digitálneho teplomeru potrebujeme zapojiť vybraný senzor v určitom poradí s ďalšími súčiastkami, aby sme docielili požadovanú funkciu. Na začiatku sa budeme zaoberať iba všeobecným prepojením blokov s konkrétnymi komponentmi a neskôr si presnejšie popíšeme výber súčiastok s výpočtom ich použitých hodnôt.

Teplotný senzor je schopný merať teplotu na základe zmeny jeho odporu. Do vytvorenej blokovej schémy by sme si na pozíciu senzoru teda mohli zapojiť platinový senzor Pt100 alebo termistor. V oboch prípadoch sa jedná o snímače, ktoré menia svoj odpor v závislosti na teplote, čím by vyhovel zapojeniu v blokovej schéme. Na základe porovnania v kapitole 2 sme si vybrali senzor Pt100, ktorý budeme ďalej používať. Následne použitím zdroja konštantného prúdu docielime priamy prevod odporu zo senzoru na napätie, s ktorým budeme ďalej pracovať. Pri teplote 0°C bude na čidle nulové napätie. Keďže chceme na výstupe dostať 0 mV pri 0°C a 50 mV pri 50°C , použijeme do zapojenia zdroj referenčného napätia, ktorý nám umožní vykompenzovať toto napätie pri nulovej teplote. Na zosilnenie rozdielu nameraných hodnôt napätia použijeme diferenčný zosilňovač, na ktorého výstupe bude naše požadované napätie pri spodnej a vrchnej hranici zadaného rozsahu. V tomto momente bude treba získaný analógový signál previesť na digitálny, na čo nám dobre poslúži A/D prevodník. Rýchlosť tejto transformácie signálu nie je pre nás nijako významne dôležitá. Teraz signál už v digitálnej forme prevedieme cez digitálny dekodér a následne do sedem segmentového displeja, kde sa nám zobrazí hodnota nameranej teploty. Pomocou dekodéra sa na displeji rozsvietia segmenty tak, aby zobrazovali číselnú hodnotu nameranej teploty a každý segment bude tým pádom osobitne napojený na vlastnú dráhu z dekodéra. Môžeme použiť napríklad sedem segmentový LED displej. Ten má väčšiu spotrebu prúdu, ktorá dosahuje hodnoty 10 mA na jeden segment, čo by v našom prípade znamenalo veľmi veľkú spotrebu prúdu, ale jeho výhoda spočíva v tom, že svieti sám. Ďalšou možnosťou je použitie LCD. Tie môžu byť reflexné alebo s podsvietením. Reflexné majú menšiu spotrebu prúdu, čo našej aplikácii z dôvodu batériového napájania vyhovuje viac. LCD s podsvietením majú spotrebu podstatne vyššiu, ale sú dobre čitateľné aj v noci. Na displeji sa potom zobrazí hodnota nameranej teploty. Z dôvodu, že hodnota napätia bude rádovo v jednotkách milivoltov, použijeme ešte operačný zosilňovač, ktorého úlohou bude zosilniť hodnotu odporu na vyhovujúcejšiu hodnotu. Nakoniec, náš digitálny teplomer má okrem zobrazenia teploty na displeji taktiež signalizovať prekročenie nastavenej teploty aj prostredníctvom svetelnej a akustickej signalizácie. Do obvodu teda zapojíme digitálny komparátor, ktorý bude na základe jeho vstupného signálu operačného zosilňovača porovnávať nameranú teplotu s tou nastavenou. Na jeho výstupe bude LED a piezomenič, ktoré zabezpečia očakávanú signalizáciu. Na správnu funkciu potrebujeme ešte zapojiť zdroj. Bude sa jednať o batériový zdroj s regulátorom napätia, ktorý zabezpečuje konštantné napätie na vstupe meracej časti teplomeru. Ďalšou súčasťou bude zdroj referenčného napätia, ktorý bude vyvedený z meracej časti a analógový komparátor, ktorý bude porovnávať hodnotu napätia na batériách a signalizovať prípadné vybitie. Poslednú časť napájacieho zdroja bude tvoriť napäťový menič, ktorého úlohou bude vytvoriť symetrické napájanie pre súčiastky v meracej časti. Ten je napájaný napätím $+5\text{ V}$ pomocou lineárneho regulátoru napätie, ktorý má na svojom vstupe 9 V batériu. Na výstupe meniča teda dostaneme napätie -5 V , ktoré je spolu s napätím $+5\text{ V}$ proti zemi zdroja.

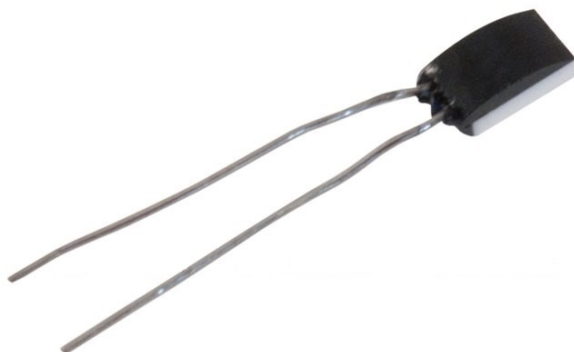
V tejto časti kapitoly sa budeme venovať už konkrétnym typom súčiastok, ktoré sme sa rozhodli použiť do nášeho zapojenia a podrobnejšie si popíšeme ich vlastnosti. Celú schému zapojenia si rozdelíme do dvoch väčších častí, ktoré budú predstavovať schéma teplomeru a schéma zdroja.

3.3 Obvodové riešenie teplomeru

V obvodovom riešení teplomeru sa budeme zaoberať meracou časťou, ktorú tvorí senzor, zdroj konštantného prúdu, zdroj referenčného napätia, zosilňovač, impedančný transformátor, neinvertujúci zosilňovač, komparátor a optická a akustická signalizácia, ktoré sme si už v istej miere popísali v časti popisu blokovej schémy. Teraz sa už budeme venovať konkrétnemu výpočtu použitých súčiastok.

3.3.1 Teplotný senzor - Pt100

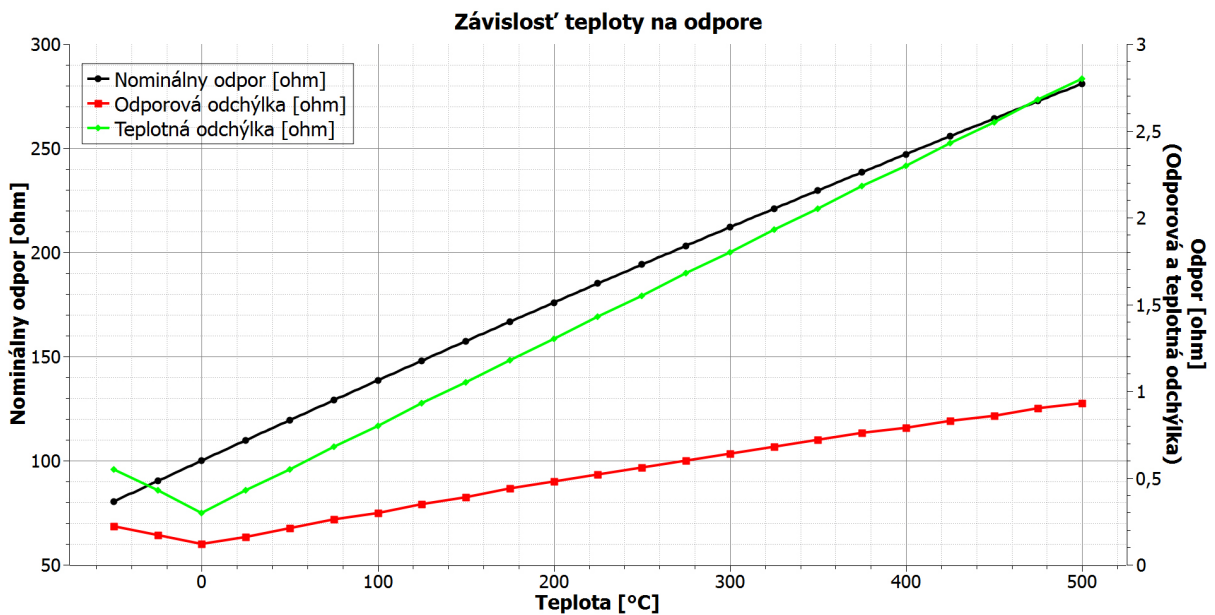
Ako sme spomínali už v kapitole 2, konkrétny teplotný senzor, ktorý v našom zapojení použijeme, bude senzor Pt100.[27] Hodnota, ktorá nás ale bude zaujímať je maximálny možný prúd pretekajúci snímačom. Ako jeho hodnota je uvedený 1 mA, ktorú by sme teda nemali prekročiť, aby nedošlo k zahrievaniu senzoru a následne chybám merania. Keďže sa jedná o senzor Pt100, jeho odpor pri 0 °C je 100 Ω. Jeho tvar je znázornený na obrázku 3.2



Obr. 3.2: Platinový senzor Pt100 pre naše použitie

Na základe parametrov a hodnôt teploty a odporu, ktoré sú uvedené v tabuľke katalógového listu, sme si vytvorili graf 3.3 závislosti odporu na meniacej sa teplote a vyniesli sme do neho aj teplotnú a odporovú odchýlku. V ňom môžeme vidieť, že so zmenou teploty sa odpor snímača mení lineárne ale navyše zobrazuje aj malé nepresnosti merania vyjadrené ďalšími dvoma krivkami. Do jedného grafu sme sa rozhodli vložiť všetky tri krivky, kde závislosť odporu na teplote je značená čiernou farbou a odčítavame ju z osi Y na ľavej strane, značenú ako *Nominálny odpor [Ω]* a teplotnú a odporovú odchýlku, zobrazenú zelenou a červenou farbou, naopak odčítavame z osi Y na pravej strane *Odpor [Ω]*, (*Odporová a teplotná odchýlka*). Tabuľka hodnôt odporu a teploty

v katalógovom liste popisuje celý pracovný rozsah senzoru Pt100 od -50 do $500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nás zaujíma iba rozsah určený v zadaní práce, teda od 0 do $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, v ktorom z princípu funkcie tohto teplotného senzoru existuje lineárna závislosť odporu na teplote.

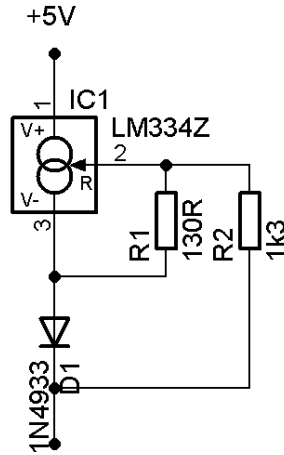


Obr. 3.3: Graf závislosti odporu na teplote, odporová a teplotná odchýlka - podľa tabuľky z [27]

3.3.2 Zdroj konštantného prúdu - LM334

Chceme, aby napätie, ktoré dostávame transformáciou z teplotného senzoru bolo výhradne funkciou odporu nášho Pt100 senzoru. Na to nám posluží zdroj konštantného prúdu tvorený obvodom LM334. Jedná sa o nastavovateľný zdroj prúdu, ktorý je schopný funkcie iba s jedným externým odporom. V tom prípade ale generuje prúd s 0.33 percentnou závislosťou na $1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nulovú výchyľku v rámci závislosti na teplote je ale možné dosiahnuť pridaním jedného rezistora a jednej diódy. Toto zapojenie pracuje na princípe kompenzácie pozitívnej teplotnej závislosti obvodu LM334 negatívnou teplotnou závislosťou pridanej silikónovej diódy. Aj vďaka tomuto je veľmi vhodný pre použitie v rámci snímania teploty. LM334 pracuje v rozmedzí teplôt od 0 do $70\text{ }^{\circ}\text{C}$, čo v rámci našej aplikácie stačí. Typické zapojenie zdroja prúdu s pridanou diódou a odporom vidíme na obrázku 3.4. Na pin 1 privádzame napájacie napätie $+5\text{ V}$ a jeho výstup z pinu 3 cez diódu vedie na teplotný senzor. Na základe zadaných hodnôt a priložených vzorcov si vypočítame hodnoty konkrétnych pridaných súčiastok.[25]

Vďaka zapojeniu zdroja konštantného prúdu, ktorý bude pomocou LM334 nastavený na konkrétnu hodnotu, je priamo prevádzaný odpor na napätie.



Výstup na teplotný senzor

Obr. 3.4: Schéma zapojenia zdroja prúdu - LM334Z

Stanovenie veľkostí súčiastok k LM334

Ako sme už spomínali, jedná sa o zdroj konštantného prúdu, vďaka ktorému dostaneme odpor z platinového senzoru iba ako funkciu napätia. Do jeho najjednoduchšieho zapojenia s jedným odporom sme si pridali ešte jednu diódu a jeden odpor kvôli odstráneniu teplotnej závislosti. Oba odpory majú v katalógovom liste [25] doporučenú hodnotu od výrobcu v závislosti na charakteristikách ostatných súčiastok. Konštantný prúd sme si zvolili o hodnote 1 mA, čo je maximálny povolený prúd pretekajúci teplotným snímačom. Na základe vzorcov a výpočtov v katalógovom liste vieme, že výsledný prúd I_{vysl} je zložený z čiastkových prúdov I_1 , ktorý preteká odporom R_1 a I_2 , pretekajúci odporom R_2 (3.1).

$$I_{vysl} = I_1 + I_2 \quad (3.1)$$

Navyše je do hodnoty prúdu I_1 započítaný aj vstupný kľudový prúd, označovaný ako I_{BIAS} , ktorý prechádza obvodom LM334 a zvyšuje napätie U_R o 5,9% a do hodnoty prúdu I_2 je k napätiu U_R pripočítané napätie na dióde v priepustnom smere (U_D). Podľa rovnice prúdu z Ohmovho zákona teda spočítame hodnoty jednotlivých prúdov:

$$I_1 = \frac{U_R}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_R + U_D}{R_2} \quad (3.2)$$

Do použitej rovnice (3.2) si doplníme hodnoty úbytku napätia na dióde v priepustnom smere rovnom 0,6 V (U_D), napätí (U_R) pretekajúcom cez odpor R_1 o hodnote 67,7 mV a danom pomere hodnôt R_2/R_1 rovnom 10.

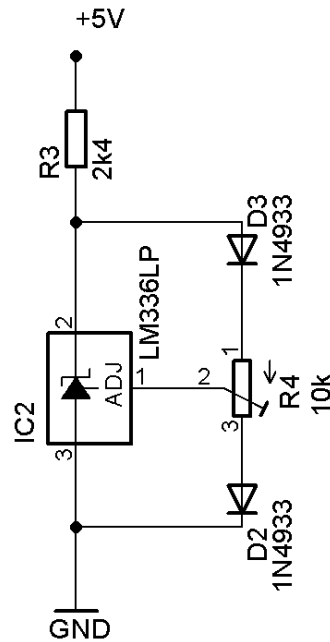
$$I_{vysl} = \frac{67,7 \text{ mV}}{R_1} + \frac{67,7 \text{ mV} + 0,6 \text{ V}}{R_2} \quad (3.3)$$

$$I_{vysl} = \frac{0,134 \text{ V}}{R_1} \quad (3.4)$$

Hodnoty odporov sú pri celkovom výslednom prúde ($I_{vysl} = 1 \text{ mA}$) dopočítané na $R_1 = 134 \Omega$ a $R_2 = 1340 \Omega$. Najbližšie možné použiteľné hodnoty sme si určili z dostupných rezistorov firmy GM Electronic. Toto zaokrúhlenie do existujúcich rád rezistorov nijako nevedí našej aplikácii a ich skutočné hodnoty budú teda: $R_1 = 130 \Omega$ a $R_2 = 1,3 \text{ k}\Omega$.

3.3.3 Zdroj referenčného napätia - LM336

Pomocou zdroja konštantného prúdu sme docielili, aby nám senzorom pretekal prúd o veľkosti 1 mA a aby bolo napätie závislé iba na odpore. Pri teplote 0 °C bude odpor senzoru 100 Ω a teda podľa Ohmovho zákona bude na ňom napätie 0,1 V. Chceli by sme dosiahnuť, aby pri 0 °C bolo napätie na vstupe nášho meradla nulové a pri 50 °C, čo je horná hranica rozsahu nášho teplomeru, bola na vstupe milivoltmetra (meradla) jeho hodnota 50 mV, vďaka čomu sa na displeji zobrazí číslica 50. Na kompenzáciu tohto napätia nám veľmi dobre poslúži zdroj referenčného napätia, kde sme si vybrali konkrétne obvod LM336. Jedná sa o 2,5 V referenčnú diódu s nízkym teplotným koeficientom, ktorý je navyše možné jednoducho kompenzovať a teplotnú závislosť tak úplne odstrániť. Tak isto ako ďalšie použité súčiastky pracuje dobre v rozsahu od 0 do 70 °C. Má garantovanú teplotnú stabilitu a dynamickú impedanciu 0,2 Ω. Existujú rôzne spôsoby zapojenia obvodu doporučené výrobcom. Nás bude ale zaujímať zapojenie, ktoré má minimálny teplotný koeficient a teda pozostáva z jedného externého rezistora, dvoch diód a jedného trimru.[26] Toto zapojenie je zobrazené na obrázku 3.5 a presnejšie aj s hodnotami súčiastok následne vysvetlené.



Obr. 3.5: Schéma zapojenia zdroja referenčného napätia - LM336LP

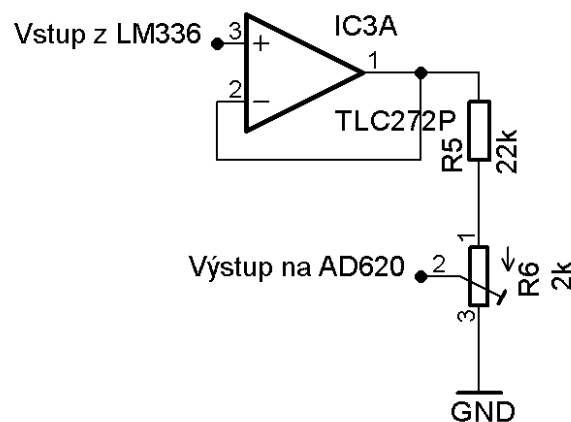
Stanovenie veľkostí súčiastok k LM336

V našom zapojení tohto zdroja referenčného napätia je použitý jeden externý rezistor, dve diódy a jeden trimer, ktoré majú v katalógovom liste [26] svoje doporučené hodnoty. Pri vstupnom napätí 5 V nám 2,5 V zostane na stabilizačnom prvku. Zvyšných 2,5 V nám zostane na pridanom rezistore R_3 . Jeho doporučená hodnota je 2,5 kΩ, ale keďže táto hodnota nie je dostupná, vyberieme si odpor najbližšej hodnoty. Zmenou z 2,5 kΩ na 2,4 kΩ dôjde iba k minimálnemu zvýšeniu prúdu z hodnoty 1 mA na hodnotu 1,042 mA, čo naše zapojenie neovplyvní a neprekročí to povolené hodnoty. K LM336 ešte pridáme odporový trimer R_4 nastavený na hodnotu 10 kΩ, aby sme čo najpresnejšie dostali hodnotu referenčného napätia 2,5 V.

3.3.4 Operačný zosilňovač - TLC272 - IC3A

Aby tento zdroj referenčného napätia nebol zafažený, pripojíme na jeho výstup impedančný transformátor, tvorený operačným zosilňovačom TLC272C-IC3A. Vyznačuje sa veľmi vysokým vstupným odporom o hodnote až $10^{12} \Omega$, pri napájacom napätí 5 V má veľmi malý prúdový odber a to konkrétne 3,6 mA pri teplote 0°C , čo ho činí ideálnym pre aplikácie, ktoré sú napájané batériami. TLC272C je navyše opäť určený pre rozsah teplôt od 0 do 70°C , čo nášmu použitiu vyhovuje. Toto pevné púzdro obsahuje dva operačné zosilňovače, ktoré sú z hľadiska vstupu a výstupu na sebe nezávislé a spoločné majú iba napájanie zo zdroja. V našom zapojení splňajú dve rozdielne úlohy. V katalógovom liste tohto zariadenia tiež nájdeme informáciu o maximálnom povolenom vstupnom napätí, čo predstavuje 1 V pri teplote 25°C a 1,5 V pri ostatných teplotách.[29]

IC3A bude, ako sme už spomínali, pracovať v obvode ako impedančný transformátor s jednotkovým zosilnením, veľmi vysokým vstupným odporom a naopak nízkym výstupným odporom. Jeho vstup bude predstavovať pin 3, kde bude vchádzať signál zo zdroja referenčného napätia LM336 a tým pádom bude napätie na operačnom zosilňovači 2,5 V. Na výstupe, ktorý predstavuje pin 1, bude pripojený delič, tvorený jedným odporom a jedným trimrom. Tým zabezpečíme, že na tomto pine bude práve napätie z teplotného senzoru pri 0°C , čo je 0,1 V. Výstup z trimru (R_6) bude tvoriť vstup do obvodu AD620 (pin 2) a bude zabezpečovať kompenzáciu napätia pri 0°C . Presné zapojenie a hodnoty súčiastok sú následne dopočítané.



Obr. 3.6: Zapojenie operačného zosilňovača vo funkcií impedančného transformátora TLC272 - IC3A

Stanovenie veľkostí súčiastok k TLC272 - IC3A

K tejto časti operačného zosilňovača IC3A je pripojený odporový delič zložený z jedného rezistoru a jedného trimru na presnejšie nastavenie odporu. V obvode IC3A, ktorý funguje ako impedančný transformátor, je vďaka obvodu LM336 napätie 2,5 V. Prúd, ktorý preteká ním a tiež odporovým deličom, sme si zvolili na hodnotu $100 \mu\text{A}$, kvôli čo najmenšej spotrebe z dôvodu batérového napájania. Opäť si podľa Ohmovho zákona dopočítame hodnotu odporu, ktorá sa bude rovnať súčtu R_5 a R_6 .

$$R_{celk} = \frac{2,5 \text{ V}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ A}} = 25 \text{ k}\Omega \quad (3.5)$$

Chceme, aby napätie z trimru bolo 100 mV, vďaka čomu bude pri teplote 0 °C medzi vstupmi 2 a 3 prístrojového operačného zosilňovača AD620 nulový rozdiel napätí. Keďže trimer je nastavovateľný prvok, je vhodnejšie zvoliť si hodnotu napätia s určitou rezervou, ktorú potom bežcom trimru nastavíme presne na našu požadovanú hodnotu. Budeme teda voliť hodnotu napätia na trimri 120 mV a potom:

$$R_6 = \frac{0,12 \text{ V}}{1 \cdot 10^{-4} \text{ A}} = 1,2 \text{ k}\Omega \quad (3.6)$$

Trimer s odporom 1,2 kΩ neexistuje, takže si zvolíme vyššiu možnú použiteľnú hodnotu 2 kΩ, k tomu R_5 zvolíme 22 kΩ a prepočítame si podľa použitých hodnôt odporov výstupné napätie z trimru R_6 :

$$U_{R_6} = U \cdot \frac{R_6}{R_6 + R_5} = 2,5 \text{ V} \cdot \frac{2 \cdot 10^3 \Omega}{2 \cdot 10^3 \Omega + 22 \cdot 10^3 \Omega} = 208,3 \text{ mV} \quad (3.7)$$

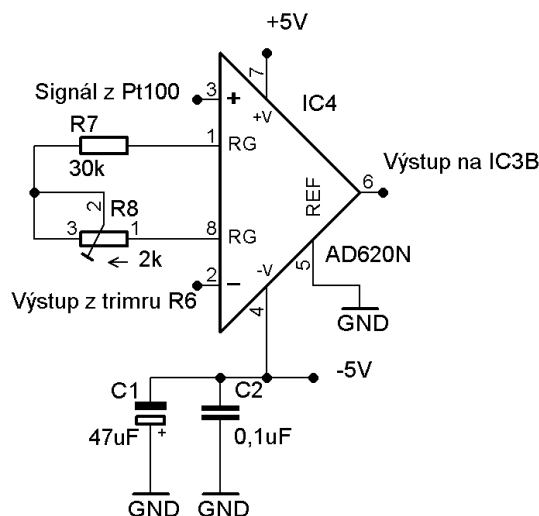
Výsledné napätie na trimri R_6 bude teda 208,3 mV, čo si pomocou bežca upravíme na 100 mV. To bude predstavovať aj výsledné napätie na vstupe do operačného zosilňovača AD620 pri 0 °C. Aby bolo nastavenie čo najpresnejšie a stabilné, zvolíme si 25 otáčkový cermetový trimer.

3.3.5 Zosilňovač - AD620

Nameraný signál z teplotného senzoru je zosilnený diferenčným zosilňovačom, ktorého jeden vstup je spojený s teplotným sensorom a druhý so zdrojom referenčného napätia LM336. Tento diferenčný zosilňovač bude mať za úlohu zosilniť rozdiel dvoch napätí. Ako sme už spomínali, referenčné napätie je nastavené tak, aby pri teplote 0 °C bola na výstupe zosilňovača 0. Jedným napätím je teda kompenzačné napätie odpovedajúce úbytku napätia na senzore pri 0 °C a prúde 1 mA prechádzajúcim cez čidlo. Tým druhým je úbytok napätia na Pt100, ktoré si pri 50 °C zosilníme na hodnotu 50 mV. Na to sme si vybrali do nášho obvodu prístrojový operačný zosilňovač AD620. Zosilňovač AD620 sa vyznačuje stabilitou jeho parametrov a jeho maximálny prúdový odber je iba 1,3 mA, čo je veľmi vhodné pre batériovo napájané použitie. Navyše potrebuje iba jeden externý odpor na nastavenie zosilnenia od 1 do 10000. Vo svojom púzde je zložený z troch operačných zosilňovačov a jeho presné vnútorné zapojenie je popísané konkrétnejšie v katalógovom liste súčiastky.[17]

Na pine 2 (AD620) sme si prostredníctvom prvého stupňa obvodu TLC272 (IC3A) a odporovému deliču nastavili napätie 100 mV. Pri teplote 0 °C bude teda napätie na oboch pinoch (2 a 3) tohto operačného zosilňovača vykompenzované na rovnakú hodnotu. Na pinu 3 obvodu AD620 si teraz budeme nastavovať napätie pri 50 °C. Chceme, aby na výstupe z tohto operačného zosilňovača bolo pri teplote 50 °C napätie 50 mV. Preto si zistíme hodnotu odporu na platinovom snímači pri tejto teplote a vypočítame si zodpovedajúcu hodnotu napätia. Rozdiel napätí pri 0 a 50 °C budeme chcieť zosilniť na 50 mV. Toto dosiahneme pomocou jedného externého rezistoru pripojeného na piny 1 a 8, ktorý sme si z dôvodu jednoduchšej nastavovateľnosti zložili z jedného odporu a jedného trimru.

Do tohto zapojenia si ešte pridáme 2 kondenzátory - C_1 a C_2 , pretože nechceme, aby sa nám vplyvom spätnej väzby na vodičoch zosilňovač rozkmital. Výrobcovia odporúčajú zapájať tieto blokovacie kondenzátory tesne ku súčiastke, aby sa zabránilo rušeniu. Obvykle používané hodnoty sú 10 μF a 0,1 μF, ktoré sme si ale po konzultácii s vedúcim práce ešte upresnili a stanovili ich hodnoty na $C_1 = 47 \mu\text{F}$ a $C_2 = 0,1 \mu\text{F}$. Tak isto si



Obr. 3.7: Schéma zapojenia operačného zosilňovača AD620

na začiatok schémy nášho teplomeru pripojíme ešte dva ďalšie kondenzátory - C_3 a C_4 . Ich hodnoty sú rovnaké ako pri C_1 a C_2 , takže elektrolytický kondenzátor C_3 bude mať kapacitu $47 \mu\text{F}$ a fóliový kondenzátor C_4 bude mať $0,1 \mu\text{F}$.

Stanovenie veľkostí súčiastok k AD620

Zapojenie tohto zosilňovača pozostáva z jedného externého odporu, ktorý riadi hodnotu zosilnenia. Interné odpory v súčiastke majú presne nastavené hodnoty odporu na $24,7 \text{ k}\Omega$, čím umožňujú, že zosilnenie riadi externý odpor. Rovnica pre výpočet zosilnenia (3.8) je stanovená v katalógovom liste.[17]

$$G = \frac{R_1 + R_2}{R_G} + 1 \quad (3.8)$$

Z výrazu (3.8) teda môžeme odvodiť:

$$R_G = \frac{49,4 \text{ k}\Omega}{G - 1} \quad (3.9)$$

My sme si jeden externý odpor nahradili jedným odporom (R_7) a jedným trimrom (R_8), kvôli presnejšiemu nastaveniu hodnoty odporu. Najprv sme si z tabuľky hodnôt odporu v katalógovom liste teplotného senzoru Pt100[27] zistili hodnotu odporu pri 50°C , ktorá je $119,4 \Omega$. Následne sme si vypočítali napätie pomocou Ohmovho zákona a zistili si rozdiel medzi napätím pri 0 a 50°C . To predstavuje hodnotu $19,4 \text{ mV}$, ktorú pomocou AD620 potrebujeme zosilniť na 50 mV . Zosilnenie G bude teda rovné:

$$G = \frac{50 \text{ mV}}{19,4 \text{ mV}} = 2,58 \quad (3.10)$$

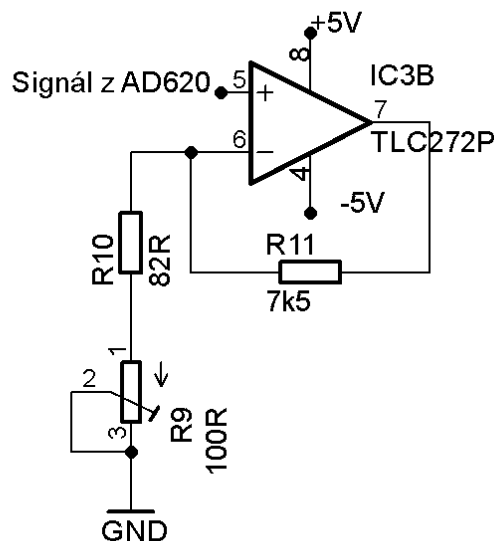
A dosadením tejto hodnoty do vzorca (3.9) dostaneme potrebný výsledný odpor externého rezistoru (v našom prípade súčet odporov R_7 a R_8).

$$R_G = \frac{49,4 \cdot 10^3 \Omega}{2,58 - 1} = 31,266 \text{ k}\Omega \quad (3.11)$$

Presná hodnota takéhoto odporu nie je dostupná a preto si ju poskladáme z $R_7 = 30 \text{ k}\Omega$ a $R_8 = 2 \text{ k}\Omega$.

3.3.6 Operačný zosilňovač - TLC272 - IC3B

Ako sme už spomínali, operačný zosilňovač TLC272 je zložený z dvoch zosilňovačov, kde každý z nich plní v obvode svoju osobitú funkciu. IC3A sme si už popísali. IC3B bude zabezpečovať zosilnenie prostredníctvom svojho neinvertujúceho zapojenia. Signál zo zosilňovača AD620, ktorý zabezpečuje zatiaľ iba malé zosilnenie, je potrebné ešte zosilniť na primeranú hodnotu. Pri 50 °C dostaneme totiž iba napätie 50 mV. Prostredníctvom neinvertujúceho zosilňovača TLC272(ICB3) si túto hodnotu zosilnenia zvolíme na 50. Pri tomto zosilnení bude napätie na výstupe zosilňovača pri 50 °C rovné 2,5 V, čo nám umožní nastaviť signalizáciu prekročenia teploty optickým a akustickým alarmom v celom rozsahu teplôt. Zapojenie tohto neinvertujúceho operačného zosilňovača môžeme vidieť na obrázku 3.8. Tiež si prostredníctvom rovníc dopočítame hodnoty príslušných odporov.



Obr. 3.8: Zapojenie operačného zosilňovača vo funkcií neinvertujúceho zosilňovača TLC272 - IC3B

Stanovenie veľkostí súčiastok k TLC272 - IC3B

Aby sme nastavili požadované zosilnenie na hodnotu 50, musíme si dopočítať hodnoty pridaných rezistorov R_{11} , R_{10} a R_9 a ich zvolením z dostupných hodnôt odporov. To dosiahneme pomocou rovnice:

$$K = 1 + \frac{R_{11}}{R_{10} + R_9} = 50 \quad (3.12)$$

z ktorej dopočítame, že

$$\frac{R_{11}}{R_{10} + R_9} = 49 \quad (3.13)$$

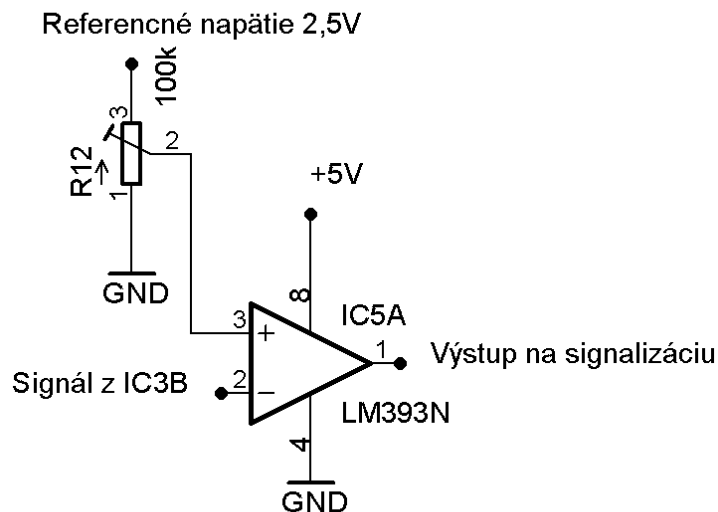
Z dostupných hodnôt odporov, sme sa nakoniec rozhodli pre pevné odpory $R_{11} = 7,5 \text{ k}\Omega$ a $R_{10} = 82 \Omega$ a pre možnosť väčšej presnosti použijeme $R_9 = 100 \Omega$ - cermetový trimer na keramickej podložke z dôvodu väčšej stability. Na ňom si nastavíme hodnotu odporu na 71 Ω , aby nám čo najpresnejšie vyšla hodnota zosilnenia. Po dosadení do rovnice (3.12)

dostaneme veľmi presný výsledok zosilnenia. V rámci realizácie použijeme namiesto trimru jeden odpor $150\ \Omega$, čo pre testovanie nebude vadiť.

$$K = 1 + \frac{7500}{82 + 71} = 50,019 \quad (3.14)$$

3.3.7 Komparátor - LM393

V zadaní našej práce je požiadavka na signalizáciu nastavenej teploty, prípadne signalizáciu prekročenia alebo poklesu teploty pod určitú nastavenú hranicu. Zvolili sme si riešenie, ktoré nedovoľuje jednoduchú manipuláciu s nastavením teploty, ale vyžaduje zásah technika. Tým pádom vylúčime akúkoľvek náhodnú manipuláciu s nastavením chcenej hranice. K tomu nám veľmi dobre poslúži komparátor, ktorý bude mať za úlohu porovnať napätie nameranej teploty s nastavenou hodnotou a v prípade, že sa tieto 2 hodnoty napätia budú rovnáť, vnútorný tranzistor komparátoru sa zopne, rozsvieti sa signalizačná LED a tak isto začne písať aj sirénka zabezpečujúca akustickú signalizáciu. Aby sme si na komparátore nastavili chcené napätie, použijeme nastavovací prvok vo forme jedného nastavovateľného trimru. Pomocou neho si nastavíme dané napätie na pine 3 komparátoru. Do jeho pinu 2 vedie zosilnený signál z neinvertujúceho zosilňovača TLC272-IC3B, ktorý je už 50 krát zosilnený. Vypočítanú hodnotu trimru spolu s prepočítavacou tabuľkou teploty a korešpondujúceho napätia na pine 3 si následne uvedieme.



Obr. 3.9: Schéma navrhnutého komparátoru LM393

Stanovenie veľkostí súčiastok k LM393

Obvod LM393 v našom zapojení slúži ako komparátor hodnôt napätia. Ako sme sa už skorej zmienili, do pinu 2 prichádza už zosilnený signál z operačného zosilňovača s neinvertujúcim zapojením a toto napätie porovnáva komparátor s nastaveným napätím na pine 3. To nastavíme pomocou viacotáčkového odporového trimru R_{12} , aby sme si mohli hodnotu jeho odporu nastaviť čo najpresnejšie. V našom prípade sme si vybrali konkrétne 21 otáčkový cermetový trimmer, čo znamená, že pomocou 21 otáčok zmeníme polohu bežca z minimálnej na maximálnu pozíciu. Nižšie vidíme prepočítavaciu tabuľku 3.1, podľa ktorej si môžeme zmeniť nastavenie napätia vzhľadom na požadovanú teplotu pri otvorení

krytu teplomeru a pre nastavení trimru. V našom prípade si požadovanú hodnotu teploty nastavíme na 40 °C, takže napätie na komparátore na pine 3 bude rovné 2 V.

Tabuľka 3.1: Prepočítavacia tabuľka teploty na potrebné napätie na komparátore

teplota [°C]	napätie [V]
50	2,50
45	2,25
40	2,00
35	1,75
30	1,50
25	1,25
20	1,00
15	0,75
10	0,50
5	0,25
0	0

Keďže máme napájanie z batériového zdroja, chceme, aby prúdový odber bol čo najmenší. Zvolíme si hodnotu prúdu, ktorú pripustíme na trimri, na 25 μ A a podľa toho si dopočítame hodnotu odporu R_{12} .

$$R_{12} = \frac{U_{R_{12}}}{I_{R_{12}}} = \frac{2,5 \text{ V}}{25 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (3.15)$$

Aby sme medzi bežcom trimru a zemou mali nastavenú hodnotu napätia na 2 V, bude na ňom odpor 80 k Ω , čo nám poslúži k signalizácii 40 °C.

3.3.8 Zapojenie signalizácie pomocou LED a sirénky

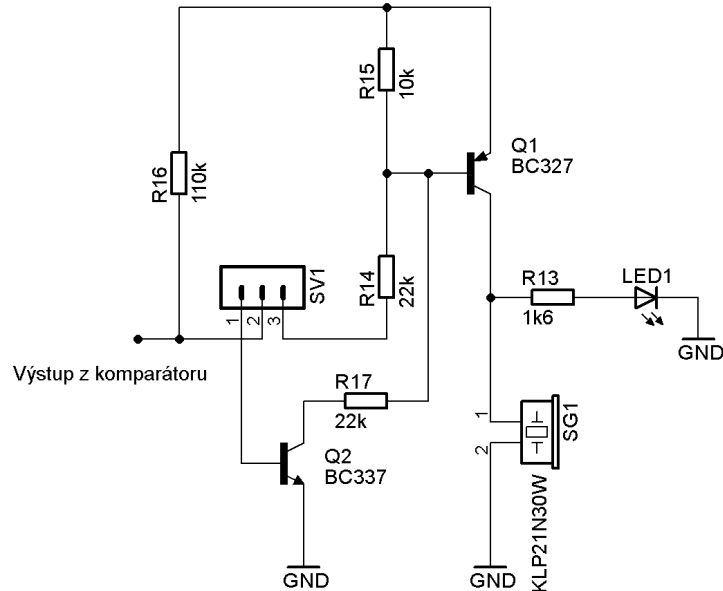
Prostredníctvom komparátoru v našom zapojení porovnáme hodnoty napätia name-
ranej a nastavenej teploty. Keďže sa pri dosiahnutí a prekročení nastavenej teploty má
jednať o optickú aj akustickú signalizáciu, zabezpečíme ju pripojením LED a sirénky do
nášho obvodu.

Na výstup komparátoru, ktorý tvorí jeho pin 1 pripojíme dva tranzistory, z ktorých
jeden má za úlohu spínať LED a sirénku pri prekročení nastavenej hodnoty teploty a druhý
zase pri poklese pod nastavenú hranicu. Toto riadi prepínač, ktorým si môžeme určiť,
o ktorú signalizáciu sa bude jednať.

K LED pripojíme jeden odpor, ktorého hodnotu si dopočítame tak, aby sa dióda
rozsvietila pri zopnutom komparátore. Prúd pretekajúci LED potrebný k jej správnej
funkcii je známy z katalógového listu [23] a jeho hodnota je 2 mA. Tak isto z katalógového
listu vyčítame aj hodnotu napätia na LED v priepustnom smere - 1,85 V. Na základe
známych hodnôt prúdu a napätia si dopočítame hodnotu potrebného odporu.

K správnej akustickej signalizácii potrebujeme pripojiť do obvodu sirénku. Tá ku
svojej funkcii bude potrebovať jeden tranzistor PNP a dva rezistory pri prekročení teploty
a dva odpory s tranzistorom NPN pri poklese teploty. Vyberieme si dostupné a vhodné
tranzistory, pri ktorých nás zaujíma najmä prúdový zosilňovací činiteľ. Ten vyčítame
z katalógového listu [18] a [19] pod označením h_{FE} a jeho hodnota je 100 v oboch
prípadoch. Z katalógového listu [22] si zistíme zvyšné potrebné hodnoty pre výpočet

súčiastok. V tomto prípade sa bude jednať o maximálnu hodnotu prúdu pretekajúcu sirénkou, čo pri napájacom napätí 5 V bude 5 mA. Veľkosť tohto prúdu sme zistili meraním. Tiež potrebujeme zistiť hodnotu prúdu pretekajúcu LED, čo bude predstavovať 2 mA. Hodnota I_{max} , ktorú použijeme pri výpočte bude teda 7 mA.



Obr. 3.10: Zapojenie signalizácie pomocou LED a sirénky

Stanovenie veľkostí súčiastok k LED a sirénke

K správnej funkcií zapojenej LED budeme potrebovať jeden odpor. Jeho hodnotu si stanovíme na základe parametrov diódy upresnených v katalógovom liste [23] a podľa rovnice na výpočet odporu, kde U_b je napájacie napätie (5 V), U_{LED} je hodnota napätia na LED v priepustnom smere (1,85 V) a I_{LED} je prúd pretekajúci LED potrebný k správnej funkcií, známy z katalógového listu (2 mA).

$$R_{13} = \frac{U_b - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 \text{ V} - 1,85 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 1,575 \text{ k}\Omega \quad (3.16)$$

Keďže takáto hodnota odporu dostupná nie je, volíme najbližšiu dostupnú hodnotu, takže $R_{13} = 1,6 \text{ k}\Omega$.

Ako sme už spomínali, pri zapojení sirénky budeme potrebovať dva odpory a jeden tranzistor PNP pri prekročení teploty. Z dostupných tranzistorov od firmy GM Electronic si vyberieme vyhovujúci dostupný tranzistor používaný pre spínanie, konkrétne BC327, ktorého prúdový zosilňovací činiteľ je rovný 100. Keď tranzistor zopne, saturačné napätie na báze je rovné 0,6 V, pretože PN prechod báza-emitor je dióda v priepustnom smere. Ako prvý si vypočítame prúd, ktorý preteká bázou tranzistoru v nasýtenom stave (I_{nas}). K výpočtu použijeme hodnotu prúdového zosilňovacieho činiteľa (β) a aj opravnú konštantu (s_1), ktorej hodnota je obvykle 2.

$$I_{nas} = \frac{I_{max}}{\beta} \cdot s_1 = \frac{7 \cdot 10^{-3} \text{ A}}{100} \cdot 2 = 0,14 \text{ mA} \quad (3.17)$$

Následne si zvolíme hodnotu odporu R_{15} , ktorý nám zabezpečí, aby sa tranzistor správne uzavrel a pretekal ním čo najmenší zbytkový prúd. Obvykle ju volíme na hodnotu 10 k Ω .

Tým pádom je na odpore R_{15} napätie $0,6\text{ V}$, čo je napätie na dióde pri zopnutom tranzistore a preteká ním prúd o hodnote $I_{R_{15}}$ podľa rovnice (3.18) .

$$I_{R_{15}} = \frac{U_{LED}}{R_{15}} = \frac{0,6\text{ V}}{10^4\ \Omega} = 0,06\text{ mA} \quad (3.18)$$

Výsledná hodnota prúdu pretekajúca odporom R_{14} bude potom počítaná podľa vzorca (3.19)

$$I_{R_{14}} = I_{nas} + I_{R_{15}} = 0,14 \cdot 10^{-3} + 0,06 \cdot 10^{-3} = 0,2\text{ mA} \quad (3.19)$$

Nakoniec sme už schopní dopočítať si hodnotu samotného odporu R_{14} , ktorá bude závisieť na vstupnom napätí U_b , napätí U_{LED} , na prúde pretekajúcom týmto odporom $I_{R_{14}}$ a nakoniec na saturačnom napätí tranzistoru v komparátore, ktorého hodnota je malá a preto ju môžeme zanedbať. Tým pádom bude teda R_{14} rovný

$$R_{14} = \frac{U_b - U_{LED}}{I_{R_{14}}} = \frac{5\text{ V} - 0,6\text{ V}}{0,2 \cdot 10^{-3}\text{ A}} = 22\text{ k}\Omega \quad (3.20)$$

Rovnakú hodnotu bude mať aj odpor R_{17} , ktorý zapojíme na kolektor druhého tranzistoru NPN.

Posledná hodnota odporu, ktorú musíme dopočítať bude R_{16} . Ten bude pripojený na pin 1 komparátoru a jeho hodnota bude závisieť na prúde pretekajúcom tranzistorom $I_{R_{14}}$, prúdovom zosilňovacom činiteli rovnom 100, opravnej konštante (s_2), ktorú si tentokrát zvolíme na hodnotu 20 a nakoniec napájacom napätí a napätí U_{LED} . Ako prvý si dopočítame prúd $I_{R_{16}}$.

$$I_{R_{16}} = \frac{I_{R_{14}}}{\beta} \cdot s_2 = \frac{0,2 \cdot 10^{-3}\text{ A}}{100} \cdot 20 = 0,04\text{ mA} \quad (3.21)$$

Z toho si dopočítame hodnotu odporu R_{16} .

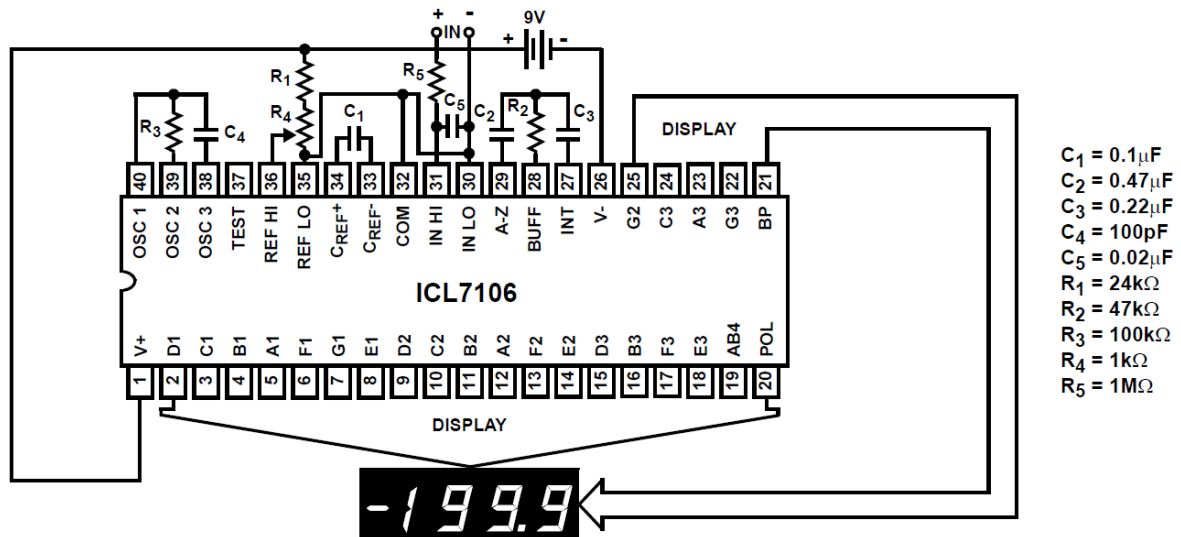
$$R_{16} = \frac{U_b - U_{LED}}{I_{R_{16}}} = \frac{5\text{ V} - 0,6\text{ V}}{0,04 \cdot 10^{-3}\text{ A}} = 110\text{ k}\Omega \quad (3.22)$$

3.3.9 Displej

Ako sme spomínali už vo všeobecnejšom popise blokov, medzi možné riešenia zobrazenia patria displeje typu LED alebo LCD. Na to, aby sme boli schopní zobrazit' na displeji hodnotu teploty od 0 do $50\text{ }^\circ\text{C}$ s prípadnou presnosťou na jedno desatinné miesto, budeme potrebovať minimálne 3 číslicové sedem segmentové displeje. Návrh tohto zapojenia by sme realizovali pomocou 3, 5 číslicového LCD spojeného s A/D prevodníkom, konkrétne ICL7106. Jeho doporučené zapojenie aj s konkrétnymi hodnotami súčiastok je uvedené v katalógovom liste [20] a môžeme ho vidieť na obrázku 3.11.

LCD ešte môžu byť dvoch typov a to reflexné a priesvitové. Z hľadiska spotreby prúdu a batériového zdroju napájania, by sme použili reflexný displej. Všetky súčiastky by boli doporučené od výrobcu, takže v tejto časti by sme nič nedopočítavali.

My sme sa v našom prípade rozhodli zapojenie použiť iba v rámci testovania a využijeme iba panelový LCD voltmeter, konkrétne milivoltmeter, pre meranie DC napätia s LCD a bielym LED podsvietením s rozsahom od 0 do $199,9\text{ mV}$. Jeho vlastnosti sú rovnaké ako ICL7106, akurát sa jedná v tomto prípade jedná o priesvitový panelový



Obr. 3.11: Doporučené zapojenie ICL7106 s LCD displejom, prevzaté z [20]

merací prístroj, ktorý má vyššiu spotrebu prúdu ale aj napriek tomu na testovanie stačí. Vzhľadom k tomu, že použitý milivoltmeter potrebuje na svoje napájanie plávajúci zdroj, použili sme doštičkovú 9 V batériu.

Podľa popisu, doporučení a našich rozhodnutí sme si vytvorili schému celého teplomera, ktorú môžeme vidieť v prílohe A.1.

3.4 Obvodové riešenie zdroja

V obvodovom riešení napájacieho zdroja sa budeme zaoberať najmä regulátorom napätia, komparátorom pre signalizáciu vybíjania batériového zdroja a meničom napätia.

3.4.1 Napätový regulátor - LE50ABZ

Jedná sa o stabilizátor napätia s malým rozdielom medzi vstupným a výstupným napätím a svojimi vlastnosťami je veľmi vhodný pre batériovo napájané zapojenia. Použijeme ho z dôvodu, že naše zapojenie bude, ako sme spomínali už skôr, napájané z batériového zdroja. Na napájanie použijeme 5 NiMh akumulátorov. Napätový regulátor potom zo vstupného napätia vytvorí 5 V, ktorými je potom napájaný ako komparátor s napätovým meničom v zdroji, tak aj celá meracia časť teplomeru. Pre svoju správnu stabilnú funkciu potrebuje napätový regulátor LE50ABZ iba zapojenie dvoch kondenzátorov, ktorých doporučené hodnoty sú uvedené v katalógovom liste.[24] Ich doporučené hodnoty sú minimálne z dôvodu stability, my si ale zvolíme väčšie hodnoty zo skúsenosti po konzultácií s vedúcim práce. Podľa toho teda kondenzátory C_5 a C_6 budú mať hodnoty $0,1\mu\text{F}$ a $47\mu\text{F}$. Navyše ešte použijeme jeden fóliový kondenzátor C_7 s kapacitou $0,1\mu\text{F}$, ktorý bude slúžiť na filtráciu vyšších kmitočtov.

Napätový regulátor dodá do obvodu maximálny prúd 100mA , ktorý potom využívajú ostatné použité integrované obvody, zobraenie na displeji a signalizácia pomocou LED a sirénky. V nasledujúcej tabuľke 3.2 si vypočítame spotrebu celého teplomeru, aby sme zistili, či nemôže nastať okamih, kedy bude regulátor preťažený.

Tabuľka 3.2: Tabuľka spotreby prúdu teplomeru

súčiastka	spotreba na zdroji + [mA]	spotreba na zdroji - [mA]	poznámka
LM334	1,00	0	
LM336	1,00	0	
AD620	1,60	1,60	výstup naprázdno
TLC272	1,40	1,40	záťaž zanedbaná
LM393	2,00	0	nesymetrické napájanie
LED	2,00	0	iba v prípade alarmu
KPL21N30W	5,00	0	iba v prípade alarmu
Displej LED	0,08	0	reflexný
ICL7660	0,10	0	
LED - zdroj	2,00	0	iba v prípade slabej batérie
rezerva	0,50	0	prúd rezistormi, ktorý sme zanedbali
Celkovo cez regulátor	10,68		bez alarmu s nabitými akumulátormi
	19,68		s alarmom a slabými akumulátormi

Ako môžeme vidieť z posledných dvoch riadkov tabuľky 3.2, ani pri slabých akumulátoroch a signalizácií nenastane moment, kedy bude regulátor napätia preťažený. V tabuľke je zaznamenaná aj spotreba reflexného displeja s prevodníkom. Ten sme v rámci realizácie zamenili za digitálny milivoltmeter, ktorý je napájaný z 9 V doštičkovej batérie a teda neodoberá prúd z batérového zdroja.

3.4.2 Komparátor - LM393

Keďže máme napájanie z batérového zdroja, opäť bude podmienkou, aby prúdový odber bol čo najmenší. Zvolíme si hodnotu prúdu, ktorú pripustíme na trimri, na $50 \mu\text{A}$ s napätím 5 V na výstupe z bateriek a podľa toho si dopočítame hodnotu odporu R_{18} .

$$R_{18} = \frac{U_{R_{18}}}{I_{R_{18}}} = \frac{5 \text{ V}}{50 \cdot 10^{-6} \text{ A}} = 100 \text{ k}\Omega \quad (3.23)$$

Ako referenciu si v tomto prípade privedieme zdroj referenčného napätia z meracej časti teplomeru, čo je v schéme A.2 označené ako Referencia (1).

Hlavnou funkciou tohto komparátoru bude porovnávanie hodnoty napätia na akumulátoroch s referenčnou hodnotou a následná signalizácia slabej batérie. Tá sa spustí pokiaľ napätie na akumulátoroch poklesne z 1,3 V na 1,1 V na článok, to znamená na 5,5 V na celý zdroj.

3.4.3 Zapojenie signalizácie pomocou LED

V tomto prípade nám LED bude slúžiť ako signalizácia vybitej batérie. K jej správnej funkcii budeme potrebovať do zapojenia pridať jeden odpor, ktorého hodnotu si upresníme

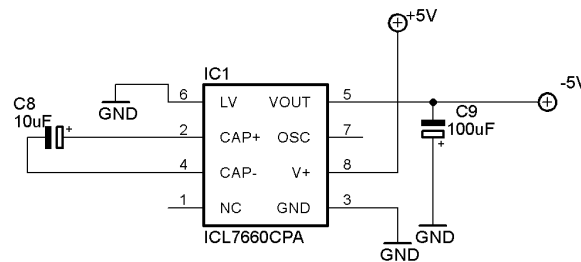
tak isto ako v zapojení meracej časti. Keďže napájacie napätie je 5 V, prúd pretekajúci LED je známy z katalógového listu [23] a jeho hodnota je 2 mA a zároveň poznáme aj hodnotu napätia na LED v priepustnom smere - 1,85 V, dopočítame si potrebnú hodnotu odporu R_{19} .

$$R_{19} = \frac{U_b - U_{LED}}{I_{LED}} = \frac{5 \text{ V} - 1,85 \text{ V}}{2 \cdot 10^{-3} \text{ A}} = 1,575 \text{ k}\Omega \quad (3.24)$$

Keďže takáto hodnota odporu opäť nie je dostupná, tak isto ako pri zapojení LED v signalizácii teplomeru, volíme najbližšiu dostupnú hodnotu, takže $R_{19} = 1,6 \text{ k}\Omega$.

3.4.4 Napätový menič - ICL7660

Poslednou dôležitou súčasťou v zapojení zdroja bude napätový menič ICL7660. Ten v našom zapojení zabezpečuje zmenu napätia z kladných na záporné hodnoty, čo v našom prípade bude vytvárať -5 V a tým teda umožňovať symetrické napájanie teplomeru. Jeho účinnosť predstavuje 99,9%, jednoducho sa používa a vyžaduje iba 2 elektrolytické kondenzátory C_8 a C_9 s kapacitou $10 \mu\text{F}$. Tieto hodnoty sú takisto iba doporučené od výrobcu. Pri použití týchto hodnôt ale dochádza k zvlneniu napätia na výstupe a preto zo skúseností na výstupe meniča použijeme kondenzátor s väčšou kapacitou a teda C_9 bude mať $100 \mu\text{F}$. Presné zapojenie meniča je doporučené v katalógovom liste.[21]



Obr. 3.12: Zapojenie napätového meniča ICL7660

Opäť sme si podľa doporučení a našich rozhodnutí vytvorili celkovú schému tentokrát napájacieho zdroja, ktorú môžeme vidieť v prílohe A.2.

4 REALIZÁCIA

V predchádzajúcej kapitole 3 sme si popísali návrh zapojenia ako meracej časti, tak aj napájacej časti nášho digitálneho teplomeru a vypočítali sme si hodnoty potrebných súčiastok, ktorých presný rozpis nájdeme v prílohách práce B.1, B.2 a B.3. Tým sme splnili zadanie bakalárskej práce. Aj napriek tomu sme sa rozhodli nad rámec zadania náš návrh teplomeru zapojiť a následne otestovať jeho funkčnosť. Táto posledná kapitola bude teda venovaná realizácií digitálneho teplomeru do finálnej podoby, jeho zapojeniu na doske plošných spojov a jeho testovaniu.

4.1 Postup realizácie teplomeru

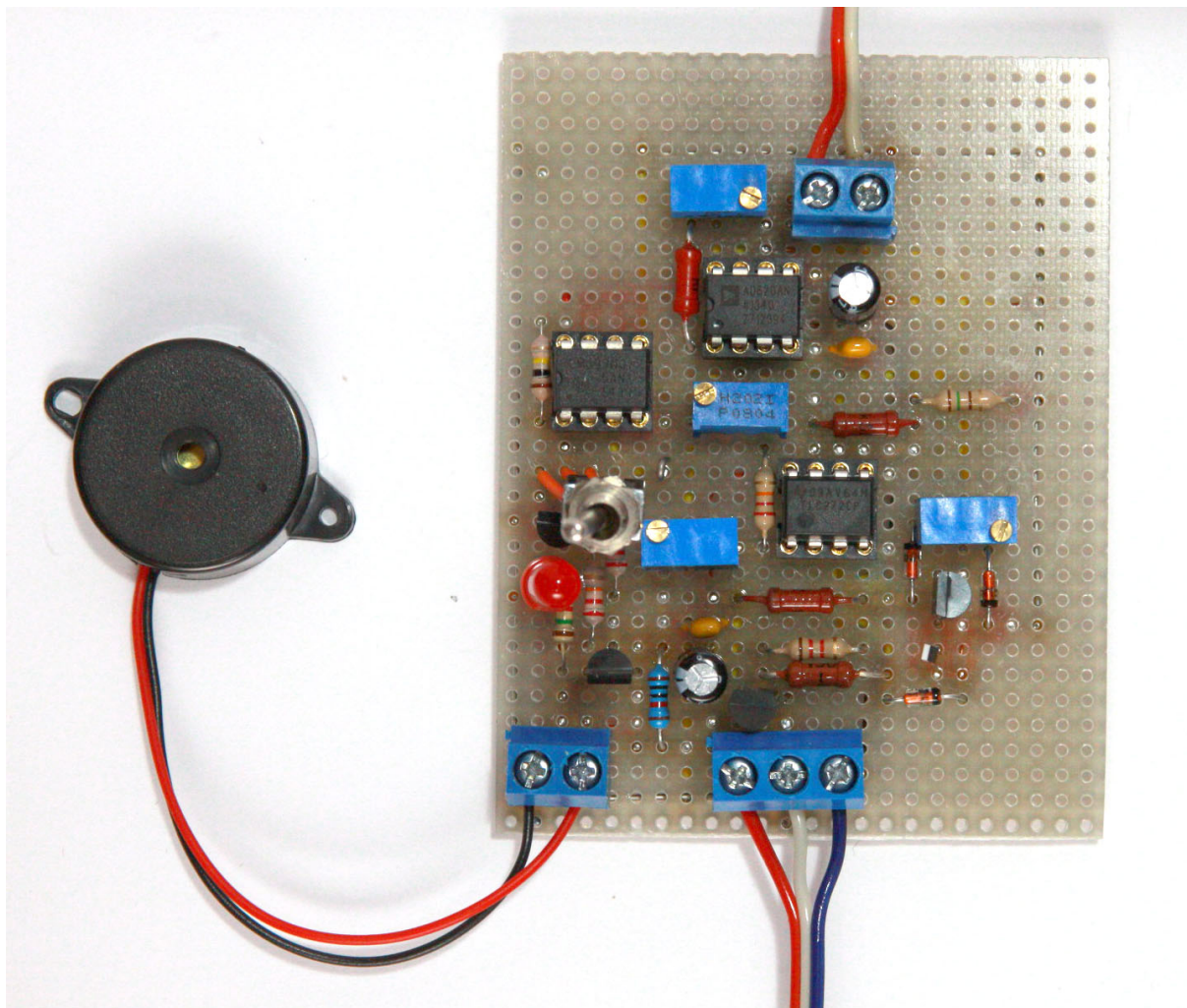
V rámci našej praktickej realizácie zapojenia sme sa rozhodli zapojiť meraciu časť teplomeru aj napájaciu časť. Prvým krokom pri realizácii bolo vybratie vhodných rezistorov, kondenzátorov a všetkých potrebných súčiastok. Po zhromaždení potrebných komponentov do zapojenia, sme si súčiastky rozložili na dosku plošných spojov s cieľom, aby vytvorené rozloženie zaberalo čo najmenšiu plochu. Na základe toho sme tak mohli predísť dlhým prepájaným úsekom a chybám, ktoré by mohli pri pájaní nastať.

Zapojenie teplomeru a zdroja sme rozdelili na dva osobitné plošné spoje a prepojili sme ich iba tromi drôtmi, ktoré viedli napájacie napätia (+5 V, -5 V a zem) zo zdroja do teplomeru a ktoré sme si na meracej časti spojili vďaka svorkovnici. Takým istým spôsobom sme si na plošný spoj napojili sirénku, ktorá zabezpečuje akustickú signalizáciu a milivoltmeter, ktorý zobrazuje hodnotu nameranej teploty. V zapojení sme si ešte integrované obvody napojili pomocou patíc, do ktorých sme ich vložili až po ukončení práce s mikropájkou. Pre toto riešenie sme sa rozhodli z dôvodu, že pomocou patíc sa jednoduchšie hľadajú chyby v zapojení, keďže sa integrovaný obvod môže z obvodu tak ľahko odstrániť a nepoškodí sa.

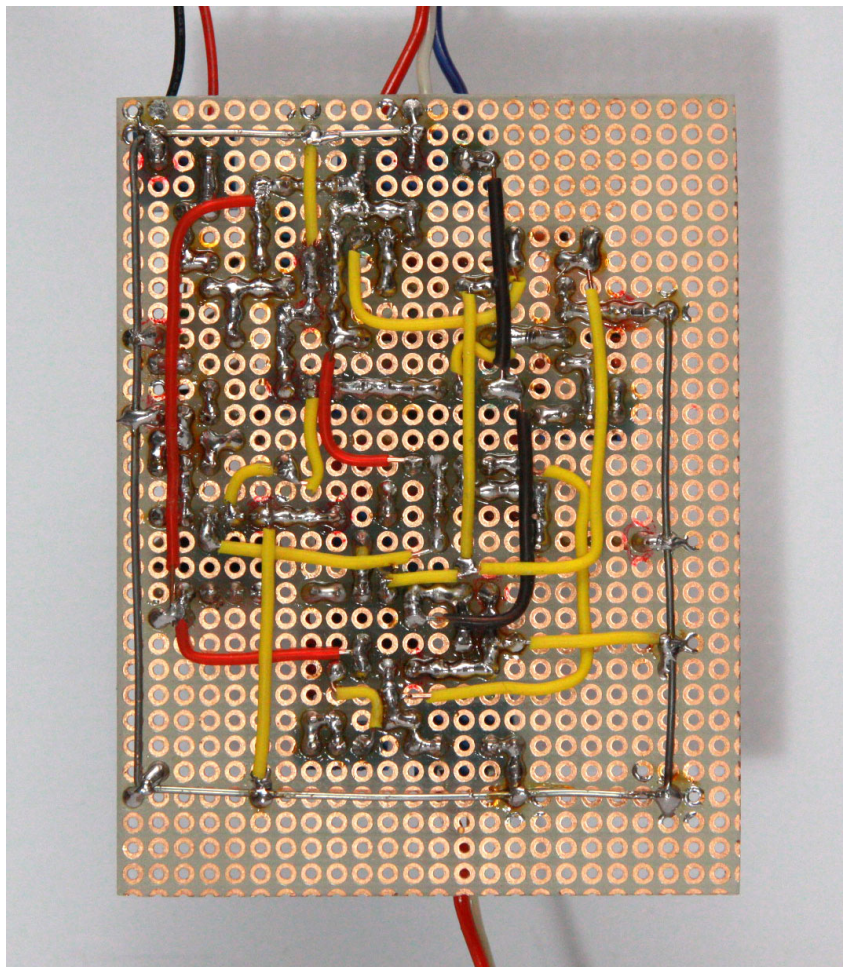
Po rozmiestnení súčiastok sme začali letovať na dosku plošných spojov. Ak bolo možné spojiť súčiastky kvapkou cínu, urobili sme to takým spôsobom, ak to ale nebolo možné, spojili sme tieto miesta pomocou drôtu presnej požadovanej dĺžky. Tento drôt bol očistený od svojej pôvodnej izolácie a na miesto nej sme naň navliekli silikónovú bužírku s vysokou teplotnou odolnosťou a z dôvodu, aby nevznikali v miestach dotyku žiadne nežiadúce skraty. Ako môžeme vidieť na obrázku spodnej strany plošného spoja 4.2, použili sme 3 farby silikónovej bužírky a to konkrétne červenú na napájanie kladným napätím, čiernu na napájanie záporným napätím a nakoniec žltú na všetky ostatné spoje. Na obrázku 4.1 potom môžeme vidieť finálne zapojenie meracej časti teplomeru.

Pri zapojení zdroju sme použili jednu svorkovnicu na pripojenie batérií a 3 drôty na prepojenie napájacieho napätia ako sme už spomínali. V tomto prípade sme si farbu použitej silikónovej bužírky vybrali opäť podľa napájacieho napätia, kde červená reprezentovala +5 V, modrá -5 V a nakoniec spevnený hrubší drôt prepájal v zapojení zem. Tak isto ako sme si v prípade meracej časti dovolili zameniť LCD za milivoltmeter iba v rámci testovacieho zapojenia, aj v prípade zdroja sme si zapojenie napájacieho zdroja zjednodušili. V tomto prípade na krátke testovanie nebolo potrebné do obvodu zapojiť komparátor, ktorý má na starosti sledovať stav vybitia batérií a teda nepotrebujeme zapájať ani referenciu z meracej časti, rozhodli sme sa však pridať do zapojenia zdroja LED, ktorá signalizuje zapnutie zdroja. Pohľad na zapojenie zdroja môžeme vidieť na

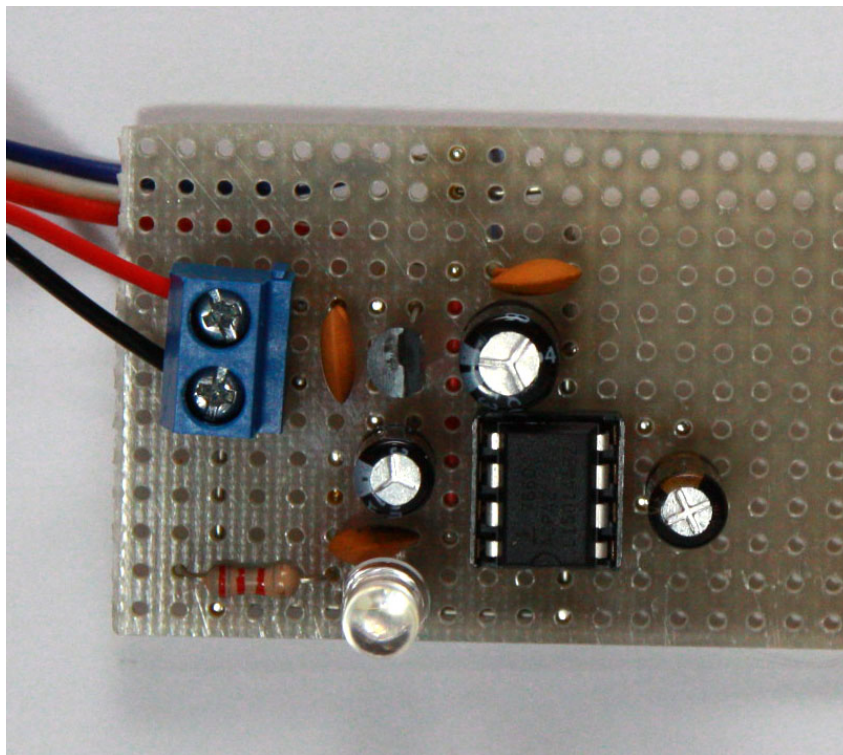
obrázku 4.3 a 4.4. Nakoniec sme si odľotili kompletne zapojenie digitálneho teplomer v momente, kedy svietia obe LED, jedna v zdroji na signalizáciu zapnutia a druhá v meracej časti na signalizáciu prekročenia nastavenej teploty. To je potom zobrazené na obrázku 4.5.



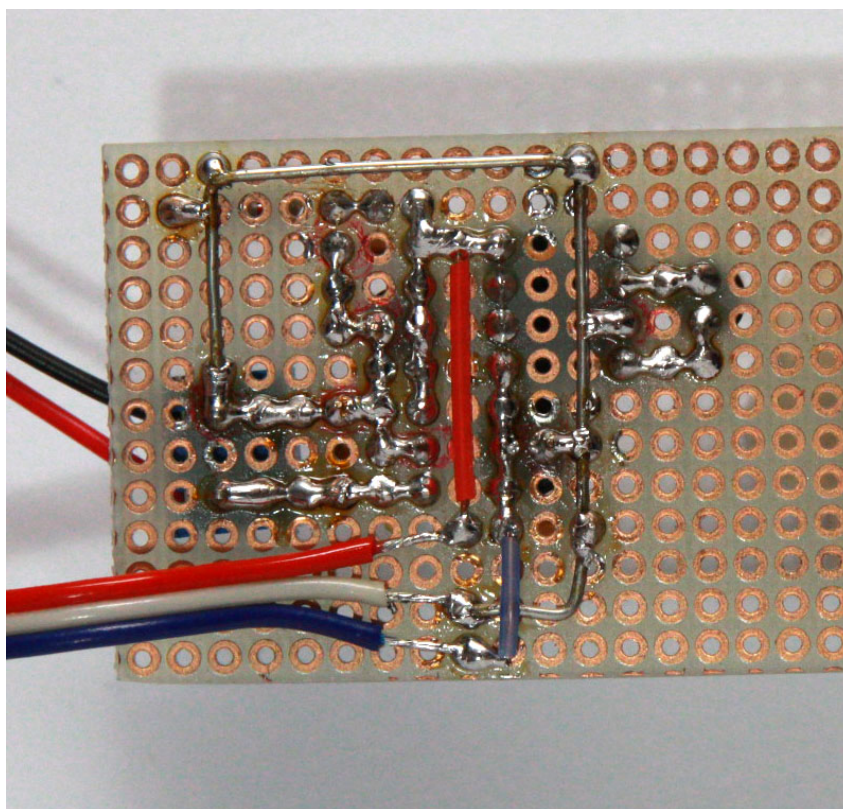
Obr. 4.1: Fotografia realizácie meracej časti - pohľad zhora



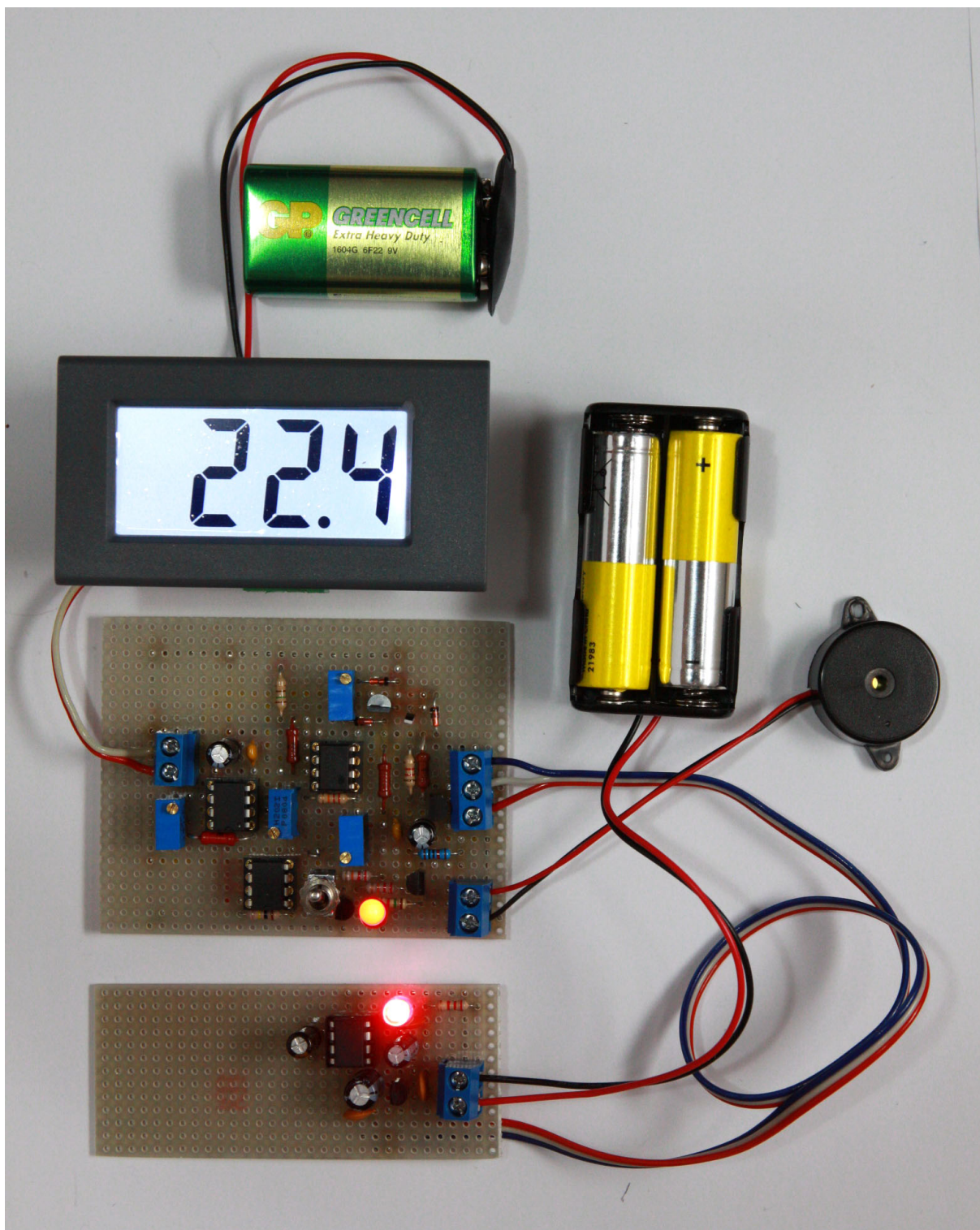
Obr. 4.2: Fotografia realizácie meracej časti - pohľad zdola



Obr. 4.3: Fotografia realizácie napájacieho zdroja - pohľad zhora



Obr. 4.4: Fotografia realizácie napájacieho zdroja - pohľad zdola



Obr. 4.5: Fotografia kompletného zapojenia digitálneho teplomera

4.2 Overenie funkčnosti teplomeru

Po dôkladnom letovaní a zapojení všetkých potrebných súčiastok na správne miesto sme si potrebovali funkčnosť zhotoveného teplomeru overiť. V prvom rade sme skúsili meráciu časť pripojiť na externý zdroj v laboratóriách, kde sme otestovali funkčnosť optickej a akustickej signalizácie, ako aj prepínača, ktorý riadi nastavenie prekročenia alebo poklesu teploty pod nastavenú hranicu. Tak isto sme si overili správne zobrazovanie teploty na displeji a nastavovanie hraničnej teploty otáčaním trimru. Nakoniec sme po zapojení napájacieho zdroja otestovali funkciu teplomera aj pri batériovom napájaní z nášho batériového zdroja. Môžeme teda skonštatovať, že návrh nášho zapojenia fungoval s optickou aj akustickou signalizáciou, ktorú bolo možné prepínať.

ZÁVER

V kapitole 1 sme si predstavili podrobnejšie rôzne typy teplotných senzorov, zamerali sme sa predovšetkým na ich funkciu a priblížili sme si ich vlastnosti. Na základe ich popisu sme si vybrali tri typy teplotných senzorov, ktoré by mohli vyhovovať podmienkam pre naše použitie do digitálneho teplomeru. Presnejšie sme si ich porovnali v kapitole 2, kde sme si na základe rozboru ich vlastností vybrali platiový senzor Pt100, ktorý svojimi parametrami najviac vyhovuje nášmu zadaniu. Pokračovali sme návrhom blokovej schémy podľa požiadavok na zapojenie teplomeru, z ktorej sme vychádzali pri samotnom návrhu presného obvodu riešenia teplomeru a ktorá je aj spolu s výpočtom obvodov a potrebných súčiastok popísaná konkrétnejšie v kapitole 3 a v prílohách.

Jediným spôsobom, ktorým bolo možné overiť správnosť nášho návrhu, bola samotná realizácia celej elektroniky teplomeru, ktorú sme podrobnejšie, aj s pridanými obrázkami realizácie, popísali v kapitole 4. Tú sme uskutočnili aj nad rámec zadania našej bakalárskej práce. Keďže sa jednalo iba o skúšobnú realizáciu, použili sme na zostrojenie univerzálny plošný spoj, kde sme A/D prevodník s dekodérom a displejom nahradili už zhotoveným digitálnym milivoltmetrom. Ten obsahoval vnútorné zapojenie v podstate totožné s tým, ktoré sme uviedli v bakalárskej práci a ktoré je doporučené od výrobcu. Použitie digitálneho milivoltmetra má na rozdiel od reflexného displeja väčšiu spotrebu energie, čo v prípade nášho testovacieho zapojenia nemalo žiadny veľký význam. Zapojenie zdroja sme zase zjednodušili o komparátor, použitý na sledovanie stavu napájacích batérií, čo taktiež nemalo žiadny vplyv na funkčnosť celého zariadenia.

Nakoniec sme si overili funkciu zapojenia a to kontrolou všetkých obvodov prístroja. Skontrolovali sme alarmový systém, ktorý má za úlohu hlásiť prekročenie nastavenej teploty, navyše s možnosťou prepínania medzi spodnou a hornou hranicou a tiež ďalšie časti, ktoré zabezpečujú najmä kalibráciu a nastavenie teplomeru.

Pri testovaní sme zistili, že všetky časti navrhnutého teplomeru fungujú podľa predpokladov a podľa zadania a žiadne súčiastky nebolo potrebné dodatočne upravovať. Môžeme teda skonštatovať, že navrhnuté zariadenie je plne funkčné podľa našich predstáv aj stanovených cieľov, navyše s možnosťou prepínania žiadanej signalizácie a voľby nastavenej teploty a teda, že zadanie tejto bakalárskej práce bolo splnené.

LITERATÚRA

- [1] ČOLLÁKOVÁ, Jana. 2011. Průtokové komůrky pro mikroskopii živých buněk. Brno. Dostupné také z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=43012. Diplomová práce. VUT v Brně. Vedoucí práce Ing. Martin Antoš, Ph.D.
- [2] KADERÁBEK, Petr. Měření teploty. *SPŠ a VOŠ Chomutov* [online]. 21.8.2012 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://web.spsc.v.cz/~kaderabek/osciloskopy/teplota.pdf>
- [3] MAREŠ, Luděk. Teplota a její měření. *Tzb-info.cz* [online]. 6.3.2006 [cit. 2014-10-20]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3115-teplota-a-jeji-mereni>
- [4] MERRIAM-WEBSTER DICTIONARY. Definition of bolometer [online]. 2014 [cit. 2014-12-31]. Dostupné z: <http://www.merriam-webster.com/dictionary/bolometers>
- [5] Odporové senzory teploty. *Umel.feec.vutbr.cz* [online]. [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~adamek/uceb/DATA/s_3_2_4.htm
- [6] *Plynové teploměry* [online]. 2014 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.bhvsenzory.cz/product-29-plyнове-teplomery.html>
- [7] REGTIEN, Paul, HALAJ, Martin, KUREKOVÁ, Eva. Meranie teploty. COMP. BY EVA KUREKOVÁ, Comp.Peter Gabko. *Measurement in technology* [online]. Bratislava: Peter Juriga - Grafické štúdio [for the Vienna University of Technology], 2005 [cit. 2014-10-10]. ISBN 8089112056.
- [8] Senzory tepelných veličin. Učební text ČVUT Dostupné na: measure.feld.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/09_teploa%20text%20.pdf
- [9] Snímače teploty. *VOŠ a SPŠ Kutná Hora* [online]. 4.6.2002 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.edumat.cz/texty/teplota.pdf>
- [10] STORR, Wayne. Temperature sensors. *ElectronicsTutorials* [online]. 2014 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: http://www.electronics-tutorials.ws/io/io_3.html
- [11] ŠPRINGL, Vít. Měření teploty - polovodičové odporové senzory teploty. *Hw.cz* [online]. 19.8.2004 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.hw.cz/teorie-a-praxe/dokumentace/mereni-teploty-polovodicove-odporove-senzory-teploty.html>
- [12] Technické prostriedky automatizačnej techniky: Snímače. *SOŠ Žarnovica* [online]. 8.10.2008 [cit. 2014-10-10]. Dostupné z: <http://www.soszc.eu/mta/images/snimace.pdf>
- [13] Termoelektrické princípy snímačov. *Katedra leteckej technickej prípravy (KLTP)* [online]. 2009 [cit. 2014-10-18]. Dostupné z: <http://www.senzorika.leteckafakulta.sk/?q=node/241>

- [14] TRUSTWORTHY INVESTMENT HOLDING SE. Fyzikální a chemické vlastnosti platiny [online]. 2015 [cit. 2015-02-17].
Dostupné z: <http://twicz.com/produkty-a-sluzby/o-platine/fyzikalni-a-chemicke-vlastnosti-platiny>
- [15] VOJÁČEK, Antonín. Přehled principů el. měření teploty - 1. díl [online]. 24.6.2014 [cit. 2014-10-18].
Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/prehled-principu-el-mereni-teploty-1-dil>
- [16] VOJÁČEK, Antonín. Přehled principů el. měření teploty - 2. díl - bezdotykové [online]. 30.6.2014 [cit. 2014-10-18].
Dostupné z: <http://automatizace.hw.cz/rehled-principu-el-mereni-teploty-2-dil-bezdotykove>

Katalógové listy použitých súčiastok:

- [17] AD620 Datasheet. *AD620 (Rev. H): Low Cost Low Power Instrumentation Amplifier Data Sheet*. ANALOG DEVICES, Inc. 12.7.2011, 21 s.
Dostupné z: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf>
- [18] BC327 PNP Datasheet. *BC327/A BC328 PNP*. CONTINENTAL DEVICE INDIA LIMITED. 20.12.2005, 5 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/210/056/bc327-40-cdil-datasheet-1.pdf>
- [19] BC337 NPN Datasheet. *BC337/A BC338 NPN*. VIGAN. 2014, 2 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/210/018/bipolarni-tranzistor-bc337-25-datasheet-1.pdf>
- [20] ICL7106 Datasheet. *ICL7106 3,5 Digit, LCD/LED Display, A/D Converters* [online]. INTERSIL CORPORATION. 2000, 16 s. [cit. 2015-05-18].
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/320/001/7106cpl-datasheet-1.pdf>
- [21] ICL7660A Datasheet. *ICL7660, ICL7660A - CMOS Voltage Converters*. INTERSIL CORPORATION. 10.10.2005, 11 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/933/114/7660acba-datasheet-1.pdf>
- [22] KPL21N30W Datasheet. *Sirénka KPL21N30W*. GM ELECTRONIC. 1.9.2014, 1 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/641/022/sirenka-kpl21n30w-datasheet-1.pdf>
- [23] LED L-53LSRD Datasheet. *L-53LSRD datasheet*. KINGBRIGHT. 14.4.2006, 3 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/511/448/l-53lsrd-datasheet-1.pdf>

- [24] LE50ABZ Datasheet, *Very Low Drop Voltage Regulators with Inhibit* [online]. STMICROELECTRONICS. 2005, 28 s.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/330/094/le50abz-datasheet-1.pdf>
- [25] LM334 Datasheet. *LM134/LM234/LM334 3-Terminal Adjustable Current Sources*. NATIONAL SEMICONDUCTOR. 17.3.2000, 14 s.
Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/8641/NSC/LM334Z.html>
- [26] LM336-2.5V Datasheet. *LM136-2.5/LM236-2.5/LM336-2.5V Reference Diode*. NATIONAL SEMICONDUCTOR. máj 1998, 12 s.
Dostupné z: <http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/102242/NSC/LM336-2.5V.html>
- [27] PT100 Datasheet. SA10100609. Engineering spec. of SA10100609: Specification of Pt Thermal Sensor. Cyntec co., ltd.
Dostupné z: <http://www.gme.cz/img/cache/doc/530/109/platinove-teplotni-cidlo-pt100-100r-datasheet-1.pdf>
- [28] PT100 platinum resistance thermometers. Pico Technology Ltd [GB] [online]. 2014 [cit. 2015-02-17].
Dostupné z: <https://www.picotech.com/library/application-note/pt100-platinum-resistance-thermometers>
- [29] TLC272 Datasheet. *LinCMOS Precision Dual Operational-Amplifiers (Rev. E): TLC272*. TEXAS INSTRUMENTS, Incorporated. 8.5.2008, 47 s.
Dostupné z: <http://www.ti.com/lit/ds/slos091e/slos091e.pdf>

ZOZNAM OBRÁZKOV

1.1	Rôzne tvary PTC a NTC termistorov	6
1.2	a) Charakteristika kovového senzoru, konkrétne Cu a Pt (prevzatá z [12]); b) Charakteristiky viacerých odporových snímačov - PTC, NTC, Si a Pt [7]	7
1.3	Možné tvary bimetalových pásov [12]	9
1.4	Bloková schéma bezkontaktného reťazca, prevzatá z [16]	11
2.1	Platinový teplotný senzor - Pt100 - rôzne typy	14
3.1	Návrh blokovej schémy	15
3.2	Platinový senzor Pt100 pre naše použitie	17
3.3	Graf závislosti odporu na teplote, odporová a teplotná odchýlka - podľa tabuľky z [27]	18
3.4	Schéma zapojenia zdroja prúdu - LM334Z	19
3.5	Schéma zapojenia zdroja referenčného napätia - LM336LP	20
3.6	Zapojenie operačného zosilňovača vo funkcií impedančného transformátora TLC272 - IC3A	21
3.7	Schéma zapojenia operačného zosilňovača AD620	23
3.8	Zapojenie operačného zosilňovača vo funkcií neinvertujúceho zosilňovača TLC272 - IC3B	24
3.9	Schéma navrhnutého komparátoru LM393	25
3.10	Zapojenie signalizácie pomocou LED a sirénky	27
3.11	Doporučené zapojenie ICL7106 s LCD displejom, prevzaté z [20]	29
3.12	Zapojenie napäťového meniča ICL7660	31
4.1	Fotografia realizácie meracej časti - pohľad zhora	33
4.2	Fotografia realizácie meracej časti - pohľad zdola	34
4.3	Fotografia realizácie napájacieho zdroja - pohľad zhora	35
4.4	Fotografia realizácie napájacieho zdroja - pohľad zdola	35
4.5	Fotografia kompletného zapojenia digitálneho teplomera	36
A.1	Zapojenie meracej časti teplomeru	I
A.2	Zapojenie napájacieho zdroja	II

ZOZNAM TABULIEK

2.1	Porovnanie senzorov, vhodných pre naše použitie pre konštrukciu digitálneho teplomera	13
3.1	Prepočítavacia tabuľka teploty na potrebné napätie na komparátore	26
3.2	Tabuľka spotreby prúdu teplomeru	30
B.1	Rozpis súčiastok meracej časti teplomeru	III
B.2	Rozpis súčiastok batériového zdroja	IV
B.3	Rozpis ostatných použitých súčiastok	IV

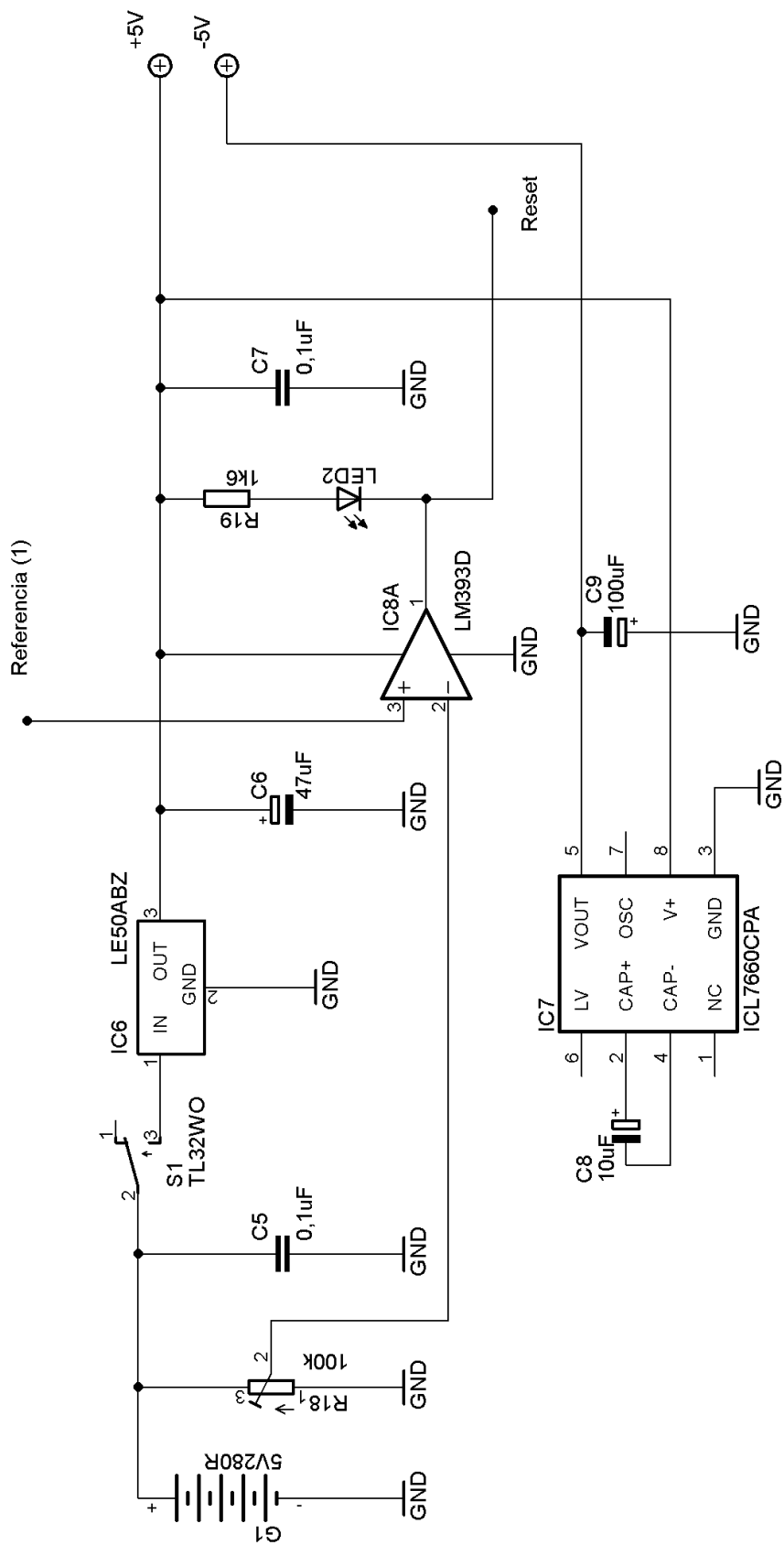
ZOZNAM SYMBOLOV A SKRATIEK

PTC	Positive Temperature Coefficient - pozistor
NTC	Negative Temperature Coefficient - negastor
RTD	Resistance Temperature Detector - odporový kovový senzor
Pt	platina
Si	kremík
Cu	meď
Pt100	platinový teplotný odporový senzor
LED	Light Emitting Diode - elektroluminiscenčná dióda
Ag	striebro
Ni	nikel
LCD	Liquid Crystal Display - displej z tekutých kryštálov
FB	feedback pin - spätnoväzbový pin

ZOZNAM VELIČÍN

Veličina	Značka	Jednotka
Napätie	U	V
Teplota	$T, \vartheta, \vartheta_J, T_0$	K
Teplota	t	$^{\circ}C$
Odpor	$R, R_x, R_0, R_J, R_{T_0}, R_T$	Ω
Teplotný súčiniteľ odporu	α	—
Prúd	I	A
Objem	V	m^3
Materiálová konštanta	β	—
Tlak	p	Pa
Látkové množstvo	n	mol
Veľkosť vychýlenia	h	m
Dĺžka	l	m
Hrúbka	S	m
Rýchlosť zvuku	w	$m \cdot s^{-1}$
Merná tepelná kapacita	c_p, c_v	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
Plynová konštanta	R_m	$J \cdot K^{-1} \cdot mol^{-1}$
Molekulová hmotnosť	M	$kg \cdot mol^{-1}$

PŘÍLOHY



Obr. A.2: Zapojenie napájacieho zdroja

B ROZPIS POUŽITÝCH SÚČIASTOK

Tabuľka B.1: Rozpis súčiastok meracej časti teplomeru

súčiastka	hodnota	typ súčiastky
kondenzátory		
C_1, C_3	47 μF	elektrolytický kondenzátor
C_2, C_4	0,1 μF	fóliový kondenzátor
rezistory		
R_1	130 Ω	metalizovaný rezistor
R_2	1,3 k Ω	metalizovaný rezistor
R_3	2,4 k Ω	metalizovaný rezistor
R_4	10 k Ω	viacotáčkový cermetový trimer
R_5, R_{14}, R_{17}	22 k Ω	uhlíkový rezistor
R_6, R_8	2 k Ω	viacotáčkový cermetový trimer
R_7	30 k Ω	metalizovaný rezistor
R_9	100 Ω	viacotáčkový cermetový trimer
R_{10}	82 Ω	uhlíkový rezistor
R_{11}	7,5 k Ω	metalizovaný rezistor
R_{12}	100 k Ω	viacotáčkový cermetový trimer
R_{13}	1,6 k Ω	uhlíkový rezistor
R_{15}	10 k Ω	uhlíkový rezistor
R_{16}	110 k Ω	metalizovaný rezistor
všetky uhlíkové do príkonu 0,25 W, všetky metalizované do 0,4 W		
súčiastka	názov	typ súčiastky
integrované obvody		
IC1	LM334Z	prúdový zdroj 2 μA – 10 mA, TO92
IC2	LM336LP	napäťová referencia 2,5 V, TO92
IC3A, IC3B	TLC272P	2x LinCMOS OZ - nízkoпрíkonový, DIP8
IC4	AD620N	zosilňovač LC LP 2,3 – 18 V, DIP8
IC5	LM393N	2x komparátor - 300 ns, DIP8
ostatné súčiastky		
D1, D2, D3	1N4933	dióda 75 V/0,15 A, DO35
Pt100		platinový teplotný senzor PT100
LED1	L-53LSRD	LED 5 mm, signalizácia dosiahnutej teploty - červená
SG1	KPL21N30W	sirénka 3 – 30 V DC, SPL min. 80 dB
SV1	P-B069C	páčkový prepínač P-B069C
Q1	BC327	bipolárny PNP tranzistor
Q2	BC337	bipolárny NPN tranzistor

Tabuľka B.2: Rozpis súčiastok batériového zdroja

súčiastka	hodnota	typ súčiastky
kondenzátory		
C_5, C_7	0,1 μF	fóliový kondenzátor
C_6	47 μF	elektrolytický kondenzátor
C_8	10 μF	elektrolytický kondenzátor
C_9	100 μF	elektrolytický kondenzátor
rezistory		
R_{18}	100 $\text{k}\Omega$	viacotáčkový cermetový trimer
R_{19}	1,6 $\text{k}\Omega$	uhlíkový rezistor
uhlíkový rezistor do príkonu 0,25 W		
súčiastka	názov	typ súčiastky
integrované obvody		
IC6	LE50ABZ	lineárny regulátor napätia 5 V/0,1 A, TO92
IC7	ICL7660CPA	ICL7660CPA DC-DC menič 1,5–12 V, DIP8
IC8	LM393D	2x komparátor - 300 ns, DIP8
ostatné súčiastky		
LED2	L-53LSRD	LED, signalizácia zapnutia zdroja - červená
G1	5V280R	batériový zdroj - 5 NiMh akumulátorov
S1	TL32WO	spínač zdroja

Tabuľka B.3: Rozpis ostatných použitých súčiastok

názov	počet	typ súčiastky
DPS	2	univerzálny plošný spoj
SOKL 8	1	patica obyčajná 8 pinov
DIL08PZ	3	patica precízna 8 pinov
AA NiMh	5	5 NiMh akumulátorov
ARK300V-2P	3	šroubovacia svorkovnica do DPS
ARK300V-3P	1	šroubovacia svorkovnica do DPS