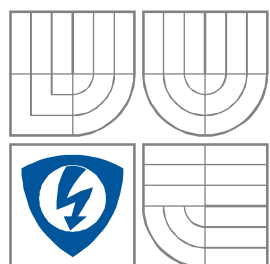


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNologiÍ**

ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

LABORATORNÍ TEPLOMĚR S ČIDLEM PT100

THE LABORATORY THERMOMETER WITH SENSOR PT100

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

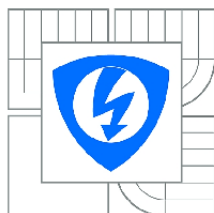
AUTHOR

Jiří Konečný

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav radioelektroniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Elektronika a sdělovací technika

Student: Jiří Konečný
Ročník: 3

ID: 120602
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Laboratorní teploměr s čidlem Pt100

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Prostudujte princip měření teploty různými senzory, zaměřte se na kovová odporová teplotní čidla typu Pt100. Seznamte se se základními obvody pro zpracování signálů ze senzorů - můstková zapojení, zesilovače, stabilizace.

Navrhněte konstrukci laboratorního teploměru s čidlem Pt100 pro rozsah měření teplot -200 až 300 C s přesností 0,5 C. Konstrukce teploměru bude založena na uP Atmel, napájení bateriové nebo externí.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] KREIDL, M. Senzory. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 141 s.
- [2] KREIDL, M. Měření teploty - senzory a měřicí obvody. Praha: Vydavatelství BEN, 2005. 240 s.

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 27.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida
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

Tato práce se zabývá problematikou dotykového měření teploty. Popisuje různé elektrické senzory teploty, které jsou rozděleny podle fyzikálních principů, na nichž pracují. U každého senzoru jsou uvedeny jeho vlastnosti, jako je teplotní rozsah, tolerance, výhody a nevýhody, popř. jejich měřicí obvody. Senzory jsou popisovány především matematickými rovnicemi a polynomy. Jejich znalost je nutná pro konstrukci dalších obvodů či zařízení pro zpracování informací ze senzorů. V této práci je také kompletně navrženo zapojení digitálního teploměru, který používá senzor Pt100. Podle tohoto návrhu je vyroben jeden prototypový kus.

KLÍČOVÁ SLOVA

Elektrické senzory neelektrických veličin, měření teploty, platinový senzor, Pt100, senzory teplot, teploměry, teplota.

ABSTRACT

This text put mind to questions of touch temperature measurement. Describes the various of electrical temperature sensors, which are divided in accordance with physical principles, on which they work. For each sensor are given its characteristics, such as temperature range, tolerance, advantages and disadvantages, or the measuring circuit. The sensors are described mainly by mathematical equations and polynomials. Their knowledge is needed for the construction of additional circuits or devices for processing information from sensors. In this work is also suggested a completely involvement of digital thermometer, which uses a Pt100. According to this proposal is made a prototype piece.

KEYWORDS

Electrical sensors nonelectric quantities, temperature measuring, platinum sensor, Pt100, temperature sensors, thermometers, temperature.

KONEČNÝ, J. *Laboratorní teploměr s čidlem Pt100*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 47 s. Bakalářská práce.
Vedoucí práce: doc. Ing. Miloslav Steinbauer, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svoji semestrální práci na téma Laboratorní teploměr s čidlem Pt100 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího semestrální 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 semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením tohoto semestrálního projektu jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Miloslavu Steinbauerovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne

.....

(podpis autora)

OBSAH

Seznam obrázků	8
1 Úvod	9
2 Senzory	10
2.1 Kovové odporové senzory	10
2.1.1 Platinové snímače	10
2.1.2 Niklové snímače.....	14
2.1.3 Měděné snímače.....	15
2.2 Polovodičové odporové senzory	16
2.2.1 Negastory – NTC termistory	17
2.2.2 Pozistory – PTC termistory.....	18
2.3 Měřicí obvody odporových snímačů	19
2.4 Polovodičové monokrystalické senzory	21
2.4.1 Monokrystalické křemíkové senzory	21
2.5 Monolitické PN senzory	22
2.5.1 Diodové PN senzory	22
2.5.2 Tranzistorové PN senzory	24
2.5.3 Monolitické (integrované) PN senzory	25
2.6 Termoelektrické články	26
3 Návrh konstrukce teploměru	29
3.1 Analogová část teploměru.....	29
3.1.1 Volba součástek analogové části	32
3.2 Digitální část teploměru	35
3.2.1 Volba součástek digitální části.....	35
3.2.2 Program pro mikrokontrolér	36
3.3 Návrh desky plošných spojů	36
4 Realizace teploměru	37
4.1 Zabudování do krabičky	37
4.2 Měřicí senzor	37

4.3	Testování přístroje	37
5	Závěr	38
	Literatura	39
	Seznam symbolů a veličin	40
	Seznam příloh	42

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1:	Závislost odporu čidla Pt100 na teplotě.....	12
Obr. 2:	Tolerance platinových senzorů podle různých tříd dle IEC 751 viz [1]......	13
Obr. 3:	Nelinearita platinového čidla v teplotním rozsahu od 0 do 100 °C viz [1]......	13
Obr. 4:	Závislost tolerance niklového senzoru na teplotě.	15
Obr. 5:	Porovnání teplotních závislostí termistorů (negastorů a pozistorů) s některými kovovými senzory viz [1].	16
Obr. 6:	Jednoduchý měřicí obvod vhodný pro odporové senzory s malou nelinearitou	19
Obr. 7:	Zapojení proudového zdroje s operačními zesilovači viz [5]	20
Obr. 8:	Můstkové zapojení měřícího obvodu viz [2]	21
Obr. 9:	Závislost odporu křemíkového senzoru na teplotě dle vztahu (31)	22
Obr. 10:	Ampér - voltové charakteristiky diody v závislosti na teplotě viz [1].....	24
Obr. 11:	Zapojení tranzistorové diody viz [1].....	24
Obr. 12:	Vnitřní zapojení obvodu PTAT obvodu (součást integrovaného PN senzoru) viz [1].....	25
Obr. 13:	Statické charakteristiky jednotlivých typů termoelektrických článků viz [1]....	28
Obr. 14:	Zesilovač napětí ze senzoru Pt100	30
Obr. 15:	4vodičové zapojení senzoru	31
Obr. 16:	Ochrana proti elektrostatickému výboji.....	32

1 ÚVOD

Znalost teploty je důležitá ve všech oblastech dnešní lidské činnosti. První zařízení sloužící k měření teploty sestrojil v roce 1592 italský fyzik, astronom a matematik Galileo Galilei. Tento teploměr pracoval na principu teplotní objemové roztažnosti vzduchu a byl málo přesný. Výrazným zlepšením byl rtuťový teploměr s první teplotní stupnicí německého fyzika Daniela G. Fahrenheita vyrobeným roku 1724. Od této doby nastává neustálý vývoj nových teploměrů. Ve 20. století vznikají elektrické teploměry, které k měření používají převodníky teploty na elektrické veličiny – tzv. senzory.

Cílem této bakalářské práce je prostudovat principy měření teploty různými elektrickými senzory a vytvořit kompletní návrh digitálního teploměru i s následnou realizací. Práce popisuje nejpoužívanější skupiny teplotních senzorů. Zaměřena je na platinový odporový senzor Pt100, protože je prakticky použit v konstrukci teploměru. Nechybí také popis různých zapojení tzv. měřících obvodů, které slouží k úpravě elektrických veličin ze senzorů pro následné zpracování.

V návrhu teploměru je vytvořeno celkové schéma zapojení, deska s plošnými spoji a program pro mikrokontrolér. Vyroben je jeden kus teploměru, na kterém je ověřena správnost celého návrhu konstrukce.

2 SENZORY

Senzor teploty je hlavní součástí celého měřicího řetězce. Je v přímém styku s měřicím prostředím. Synonyma pro senzor jsou také snímač, převodník nebo detektor. Senzor transformuje neelektrickou fyzikální veličinu teplotu na elektrickou veličinu. Citlivou částí senzoru je čidlo. Tato kapitola obsahuje základní skupiny teplotních senzorů, které se používají pro dotykové elektronické měření teploty. Popisuje jednotlivé základní skupiny a druhy senzorů a jejich vlastnosti.

2.1 Kovové odporové senzory

Tyto senzory jsou vhodné pro velké teplotní rozsahy a pro velké přesnosti měření. Pracují na principu změny elektrického odporu kovu v závislosti na teplotě. Kov si lze představit jako soubor kladných iontů umístěných v mřížkových bodech krystalové mřížky a tzv. elektronového plynu tvořeného souborem chaoticky se pohybujících elektronů. Pro měrnou vodivost (konduktivitu) kovu platí dle [1]

$$\sigma = ne^2 \frac{\tau}{m}, \quad (1)$$

kde je

σ	konduktivita,
n	počet elektronů v jednotkovém objemu,
e	elementární náboj,
τ	relaxační čas elektronů,
m	hmotnost nosiče náboje.

Kovové odporové senzory se vyrábí buď ve 2vodičovém nebo 4vodičovém provedení. U 2vodičového provedení se při měření přičítá k odporu samotného senzoru odpor vývodů a způsobuje tak nejistotu měření v rozmezí od 0,1 do 0,5 °C. Většinou ale tato nejistota se zanedbává a tudíž se používá jednodušší varianta se 2 vodiči.

2.1.1 Platinové snímače

Platina je prvek, který je chemicky netečný a časově stálý a má vysokou teplotu tání. U nejpřesnějších senzorů (např. pro meteorologické účely) je nutná vysoká čistota platiny (až 99,999 %). Měřicí odpor, který tvoří základní konstrukční část teploměru, se vyrábí

- drátkovou technologií,
- tenkovrstvou technologií,
- tlustovrstvou technologií.

Měřicí odpor je tvořen spirálovitě stočeným platinovým drátkem o průměru od 0,01 do 0,05

mm, který je zataven do keramiky nebo do skla. Jiným řešením je navinutý platinový drátek na pertinaxové nebo slídové podložce. Teplotní délková roztažnost platiny ($9 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$) je jiná než teplotní roztažnost izolačních materiálů a proto při změnách teploty dochází k systematické chybě způsobené relativními změnami délek obou materiálů. Tato chyba způsobí vznik hystereze, která dosahuje při teplotách nad $400 \text{ }^\circ\text{C}$ až $\pm 0,25 \text{ }^\circ\text{C}$. Nejlepších výsledků se tedy dosahuje při uložení platinového drátku do vzduchu, nebo do směsi helia a kyslíku. Přímý styk platiny s atmosférou způsobuje vlivem vodíku a oxidů uhlíku nestabilitu rezistivity platiny. Čistota platiny se posuzuje dle redukovaného odporu W_{100} dle [1]

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0} \geq 1,385. \quad (2)$$

Podle U.S.Industrial Standard se používá čistší platina s $W_{100} = 1,391$. Z toho plyne, že se i mírně liší koeficienty rovnice (3).

Teplotní závislost elektrického odporu pro rozsah teploty od -200 do 0°C je dána vztahem dle [1]

$$R_t = R_0 [1 + At + Bt^2 + Ct^3(t - 100)], \quad (3)$$

a pro rozsah teploty od 0 do $850 \text{ }^\circ\text{C}$ vztahem viz [1]:

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2), \quad (4)$$

kde

$$R_0 = 100 \Omega,$$

$$A = 3,90802 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$B = -5,80195 \cdot 10^{-7} \text{ K}^{-1},$$

$$C = -4,27350 \cdot 10^{-12} \text{ K}^{-1} \text{ pro } t < 0^\circ\text{C},$$

$$C = 0 \text{ pro } t > 0^\circ\text{C}.$$

Pro stanovení teploty ze změřeného odporu pro teplotu nižší než 0°C platí vztah [1]

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \delta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right] + \beta \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right], \quad (5)$$

a pro teplotu vyšší než 0°C dle [1]

$$t = \frac{(R_t - R_0)}{\alpha R_0} + \left[\left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right], \quad (6)$$

kde

$$\alpha = 3,85055 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$\beta = -0,108634 \text{ K}^{-3},$$

$$\delta = 1,499786 \text{ K}^{-2}.$$

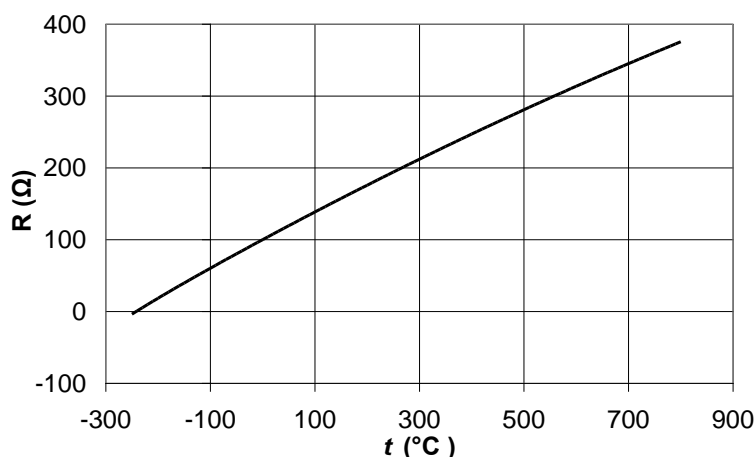
Prostřednictvím koeficientů lze vyjádřit vztahy (3) a (4) viz [1]

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} + \beta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \left(\frac{t}{100} \right)^3 \right] \right\}, \quad (7)$$

$$R_t = R_0 \left\{ 1 + \alpha \left[t - \delta \left(\frac{t}{100} - 1 \right) \frac{t}{100} \right] \right\}. \quad (8)$$

Tab. 1: Různé hodnoty koeficientů rovnic (3) a (4) viz [1]

standard	Teplotní součinitel odporu α (K^{-1})	A (K^{-1})	B (K^{-2})	C (K^{-4})
IEC-751	0,003850	$3,9080 \cdot 10^{-3}$	$-5,8020 \cdot 10^{-7}$	$-4,2735 \cdot 10^{-12}$
U.S.Industrial	0,003911	$3,9692 \cdot 10^{-3}$	$-5,8495 \cdot 10^{-7}$	$-4,2325 \cdot 10^{-12}$
ITS-90	0,003926	$3,9848 \cdot 10^{-3}$	$5,87000 \cdot 10^{-7}$	$-4,0000 \cdot 10^{-12}$



Obr. 1: Závislost odporu čidla Pt100 na teplotě

Platinové senzory se vyrábí se základní hodnotou odporu $100 \text{ } \Omega$ při $0 \text{ } ^\circ\text{C}$. Další typy vyráběných platinových senzorů mají odpory 50 , 200 , 500 , 1000 a $2000 \text{ } \Omega$. Tyto senzory se dělí dle mezinárodního doporučení IEC 751 do dvou tolerančních tříd. Třída A je určena pro teplotní rozsah od -200 do $650 \text{ } ^\circ\text{C}$ a třída B je pro teplotní rozsah -200 do $850 \text{ } ^\circ\text{C}$. Mimo

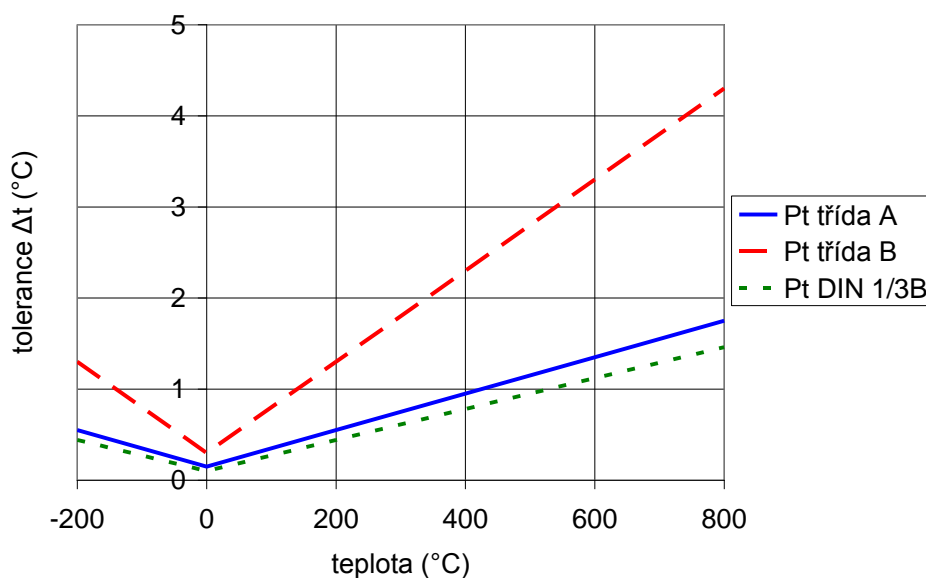
doporučení se dle IEC 751 se používá nejpřísnější kritérium označované DIN 1/3B.

Pro tyto třídy (kritéria) jsou dovolené tolerance platinových měřicích odporů viz [1]

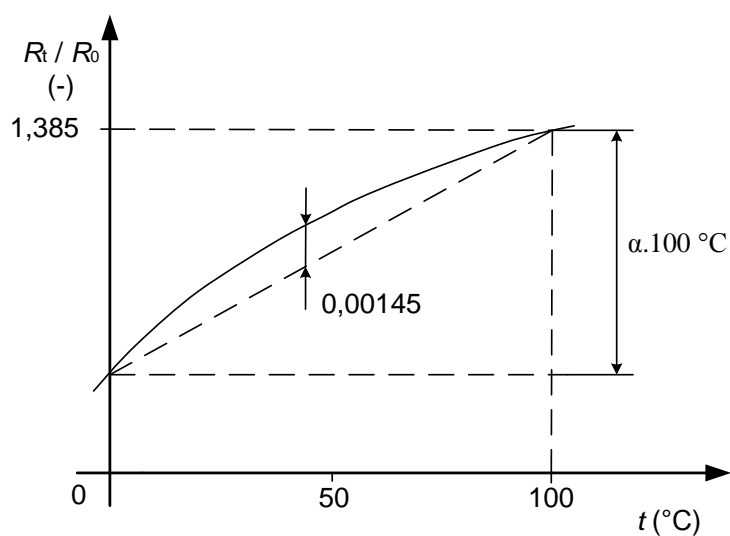
$$\text{pro třídu A: } \Delta t = \pm(0,150 + 0,002 \cdot |t|),$$

$$\text{pro třídu B: } \Delta t = \pm(0,300 + 0,005 \cdot |t|),$$

$$\text{pro kritérium DIN 1/3 B: } \Delta t = (0,100 + 0,0017 \cdot |t|). \quad (9)$$



Obr. 2: Tolerance platinových senzorů podle různých tříd dle IEC 751 viz [1].



Obr. 3: Nelinearita platinového čidla v teplotním rozsahu od 0 do 100 °C viz [1].

Při použití platinového senzoru v teplotním rozsahu od 0 do 100 °C lze nelinearitu senzoru zanedbat a výsledná chyba linearity je dle [1]

$$(\Delta t)_{\max} = \frac{\Delta \left(\frac{R_t}{R_0} \right)_{\max}}{\frac{R_{100} - R_0}{R_0}} \cdot 100 = \frac{1,45 \cdot 10^{-3}}{0,385} \cdot 100 = 0,38 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10)$$

Dlouhodobá stabilita platinových senzorů závisí na čistotě platiny a pohybuje se kolem 0,05 % /1000 h.

2.1.2 Niklové snímače

Niklové odporové senzory mají vysokou citlivost, rychlou časovou odezvu a malé rozměry. Vyrábí se většinou tenkovrstvou technologií na keramické podložce z jemnozrnného korundu. Niklová vrstva je zpracována fotolitograficky a jmenovitý odpor je nastaven laserem. Nevýhodou niklových senzorů je malý teplotní rozsah a větší nelinearita oproti platinovým senzorům, horší dlouhodobá stabilita a odolnost proti působení prostředí. Niklový senzor je vhodný pro teplotní rozsah od -60 do 180 °C (výjimečně od nižších teplot). Vyrábí se podobně jako platinové senzory v základní hodnotě odporu $R_0 = 100 \text{ } \Omega$ při teplotě 0 °C a dále v hodnotách odporu 200, 500, 1000 a 2000 Ω . Teplotní závislost odporu niklového čidla je vyjádřena polynomem dle [1]

$$R_t = R_0 (1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6), \quad (11)$$

kde

$$A = 5,485 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1},$$

$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-2},$$

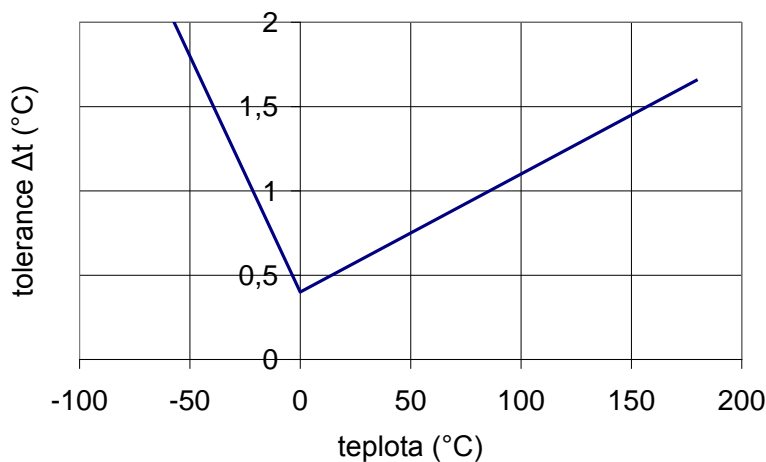
$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-4},$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-6}.$$

Dovolená tolerance odporu niklového senzoru je dle DIN 43760, je na obr. 4 a platí viz [1]

$$\Delta t = \pm(0,4 + 0,007 \cdot |t|) \text{ pro } t > 0 \text{ } ^\circ\text{C},$$

$$\Delta t = \pm(0,4 + 0,028 \cdot |t|) \text{ pro } t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (12)$$



Obr. 4: Závislost tolerance niklového senzoru na teplotě.

Dlouhodobá stabilita niklových teplotních senzorů je kolem 0,08 % / h při 150 °C. Na výrobu tohoto čidla se používá buď čistý nikl, nebo slitina niklu např. s manganem (pro teploty od -196 °C).

2.1.3 Měděné snímače

Měď se používá pro měření teploty v rozsahu od -200 do 260 °C. Pro rozsah měření od -50 do 150 °C (max. 200 °C) lze použít jednodušší vztah dle [1]

$$R_t = R_0(1 + A_1 t), \quad (13)$$

kde

$$A_1 = 4,26 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}.$$

Pro teplotní rozsahy pod -50 °C nebo nad 150 °C platí pro odpor měděného senzoru složitější vztahy viz [1]

$$R_t = A_1 R_0 \left[1 + A_2 (t + 200) + A_3 (t + 200)^2 \right] \quad \text{pro } t \text{ od } -200 \text{ do } -50 \text{ °C},$$

$$R_t = A_5 R_0 \left[1 + A_6 (t - 150) + A_7 (t - 150)^2 \right] \quad \text{pro } t \text{ od } 150 \text{ do } 260 \text{ °C}. \quad (14)$$

Nevýhodou mědi je malá rezistivita (asi 6krát menší než u platiny) a snadná oxidace. Z těchto důvodů se měděné senzory prakticky nevyrábí. Měď lze ale s výhodou použít pro přímé měření teploty, např. vinutí elektromotorů nebo jiných elektrických strojů (při vypnutém napájení).

2.2 Polovodičové odporové senzory

Polovodičové odporové senzory pracují na principu změny elektrického odporu v závislosti na teplotě, což je podobné jak u senzorů kovových. Obecně mají větší citlivost, ale menší teplotní rozsah než senzory kovové. U polovodičových senzorů je hlavní závislostí koncentrace nosičů náboje n na teplotě podle vztahu viz [1]

$$n = e^{-\frac{\Delta E}{2kT}}, \quad (15)$$

kde je

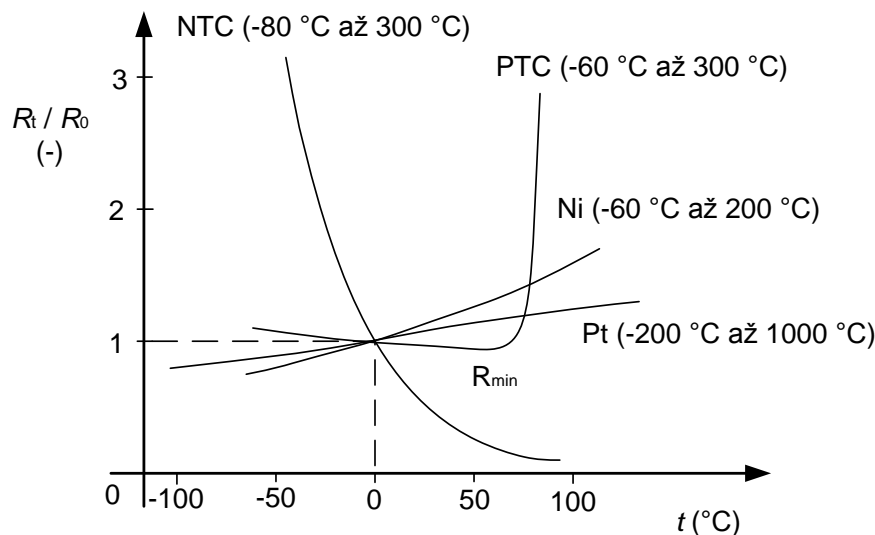
ΔE šířka mezery mezi energetickými hladinami,
 k Boltzmannova konstanta.

Pro teplotní součinitel odporu platí vztah viz [1]

$$\alpha \approx \frac{d(\ln n)}{dT} \approx -\frac{\Delta E}{2kT^2}. \quad (16)$$

Teplotní součinitel je tedy záporný a je o $\Delta E / (2kT)$ hodnotu větší než o kovů.

Nejdůležitější skupinou polovodičových odporových senzorů jsou monokrystalické polovodičové odporové senzory, nazývané termistory. Jsou to nejpoužívanější senzory teploty v elektronice. Dělí se na dva druhy: negastory (NTC termistory) a pozistory (PTC termistory) – s kladným teplotním součinitelem. Termistor je slovo složené z anglického popisu **thermally sensitive resistor**, což v překladu znamená teplotně citlivý rezistor. Mezi výhody termistorů patří velká teplotní citlivost, malé rozměry, jednoduchý převod na elektrické napětí nebo proud a nezanedbatelnou výhodou je i možnost přímého měření odporu termistoru na velkou vzdálenost. Nevýhodou termistoru je značně nelineární charakteristika.



Obr. 5: Porovnání teplotních závislostí termistorů (negastorů a pozistorů) s některými kovovými senzory viz [1].

2.2.1 Negastory – NTC termistory

Jsou to termistory se záporným teplotním součinitelem odporu. Běžné teplotní rozsahy jsou od -50 do 150 °C, v extrémních případech v oblasti velmi nízkých teplot už od $4,2$ K a v oblasti vysokých teplot až do 1000 °C. Negastory se vyrábí práškovou technologií ze směsi oxidů kovů (např. $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2$, nebo $\text{MnO} + \text{CoO}$, apod.). Vylisované negastory (ve tvaru tyčinek nebo destiček) se zpevňují slinováním za vysokých teplot. Protože se pro měření teplot termistory většinou používá právě negastor (NTC termistor), je tento druh termistoru často nesprávně nazýván pojmem jen termistor.

Teplotní závislost odporu negastoru je dána vztahem viz [1]

$$R_t = A_n e^{\frac{B}{T}}, \quad (17)$$

neboli po logaritmování dostaneme přibližně lineární vztah viz [1]

$$\ln R_t = A_n + \frac{B}{T}, \quad (18)$$

kde je

- A_n konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu negastoru,
- B teplotní konstanta daná materiálem negastoru,
- T termodynamická teplota.

V teplotním rozsahu od 0 do 50 °C je nelinearita dle vztahu (17) $\pm 0,3$ °C.

Teplotní součinitel α je definován vztahy dle [1]:

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} \text{ (K}^{-1}\text{)}; & \alpha &= \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dT} 100 \text{ (\%}\cdot\text{K}^{-1}\text{)}, \\ \alpha &= \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt} \text{ (}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}; & \alpha &= \frac{1}{R_t} \frac{dR_t}{dt} 100 \text{ (\%}\cdot\text{}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}, \end{aligned} \quad (19)$$

Po derivaci funkce $R_T = f(T)$ podle vztahu (19) dostaneme důležitý výraz

$$\alpha = -\frac{B}{T^2} \text{ (K}^{-1}\text{)}; \quad \text{respektive } \alpha = -\frac{B}{T^2} \cdot 100 \text{ (\%}\cdot\text{}^\circ\text{C}^{-1}\text{)}. \quad (20)$$

Typická hodnota teplotního součinitele odporu α v procentech je pro 25 °C (-3 až -6) $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, pro -60 °C ($-6,4$ až $-11,3$) $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$, pro 100 °C ($-2,1$ až $-3,7$) $\% \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$.

Pro podstatné zmenšení nelinearity se dají použít polynomické vztahy. Pro většinu aplikací postačuje polynom 3. stupně neboli tzv. Steinhart-Hart vztahy viz [1]

$$T = [a + b \ln R_t + c(\ln R_t)^2]^{-1},$$

$$\ln R_t = \sqrt[3]{\beta - \frac{\alpha}{2}} - \sqrt[3]{\beta + \frac{\alpha}{2}},$$

$$\alpha = \frac{a - \frac{1}{T}}{c}; \quad \beta = \sqrt{\left(\frac{b}{3c}\right)^3 + \frac{\alpha^2}{4}},$$

$$\ln R_T = A_0 + \frac{A_1}{T} + \frac{A_3}{T^3}. \quad (21)$$

Z těchto vztahů lze odvodit výraz pro teplotní součinitel α viz [1]

$$\alpha = -\frac{\beta}{T^2} = -\left(\frac{A_1}{T^2} + \frac{3A_3}{T^4}\right) (\text{K}^{-1}). \quad (22)$$

Podle závislosti dle vztahů (21) lze měřit teplotu v rozsahu od 0 do 200 °C s nejistotou měření způsobenou nelinearitou $\pm 0,1$ °C a pro rozsah od -50 do 150 °C s nejistotou $\pm 0,15$ °C. V teplotním rozsahu od 0 do 70 °C jsou nejistoty měření $\pm 0,001$ °C. Konstanty jsou stanoveny měřením při teplotách 25 °C, 40 °C a 70 °C.

2.2.2 Pozistory – PTC termistory

Jsou to termistory s kladným teplotním součinitelem odporu. Jsou vyráběny z polykrystalické feroelektrické keramiky, např. z titaničitanu barnatého (BaTiO_3). Zvláštností je nejprve mírně klesající odpor pozistoru s rostoucí teplotou, který poté po dalším zvýšení teploty strmě roste. V klesající části je teplotní součinitel kolem 1 % · K⁻¹. Strmý nárůst se objeví od tzv. Curieovy teploty. Po nárůstu odporu o několik řádů pak odpor opět mírně klesá. Důležitým parametrem pozistoru je spínací teplota t_s , jejíž hodnota je dána teplotou, při níž je hodnota odporu pozistoru $R_s = 2 \cdot R_{\min}$. Tuto spínací teplotu t_s je možné měnit při výrobě chemickým složením materiálu v rozmezí od 60 do 180 °C. Teplotní součinitel ve strmé části je dán dle [2]

$$\alpha = \frac{\ln R_P - \ln R_S}{t_P - t_S}, \quad (23)$$

kde je

- R_P odpor pozistoru ve strmé části v inflexním bodě,
- t_P teplota pozistoru ve strmé části v inflexním bodě,
- R_S odpor pozistoru při spínací teplotě,
- t_S spínací teplota.

Kromě standardních pozistorů se vyrábí i pozistory dopované křemíkem. Ty mají

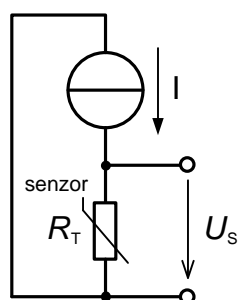
pracovní část charakteristiky přibližně lineární. Teplotní součinitel je u tohoto pozistoru je $(0,7 - 0,8) \% \cdot K^{-1}$.

Pozistory se používají hlavně jako teplotní ochrany (tzn. jako dvoustavové senzory), omezovače proudu, pro teplotní regulaci, nebo také jsou používány v obvodech pro odmagnetování obrazovek.

2.3 Měřicí obvody odporových snímačů

První možností je zapojení odporového snímače ke zdroji proudu. Na senzoru vzniká úbytek napětí, který se měří, viz obr. 6. Toto napětí se často vyhodnocuje např. pomocí A/D převodníku s následným číslicovým zpracováním, nebo je možné přímo měřit úbytek napětí i analogovým přístrojem (voltmetrem). Tento měřicí obvod je vhodný pouze pro čidla s malou nelinearitou. U teploměřů je nutné linearizovat charakteristiku senzoru. To se dá provádět buď analogově (např. pomocí specializovaného obvodu XTR103, nebo pomocí zpětných vazeb v zesilovačích), nebo číslicově použitím mikrokontroléru s naprogramovanými inverzními polynomy daných senzorů, popř. s uloženou tabulkou hodnot, kde každému napětí odpovídá konkrétní teplota. Jelikož velikost procházejícího proudu I je konstantní a tuto hodnotu známe, platí dle Ohmova zákona pro měřené napětí U_s na senzoru

$$U_s = R_T \cdot I. \quad (24)$$



Obr. 6: Jednoduchý měřicí obvod vhodný pro odporové senzory s malou nelinearitou

Použitý A/D převodník musí mít dostatečnou rozlišovací schopnost. Jelikož senzorem prochází malý proud, vzniká na něm malý úbytek napětí. Jako příklad je použit platinový senzor Pt100. Pro zvolený teplotní rozsah teploměru od -200 do 300 °C je jeho odpor v rozsahu od $19,524 \Omega$ do $212,052 \Omega$ viz [1]. Při proudu senzorem $I = 1\text{mA}$ bude napěťový úbytek v rozmezí

$$\text{od } U_{\min} = R_{T_{\min}} \cdot I = 19,524 \cdot 0,001 = 0,019524 \text{ V}$$

$$\text{do } U_{\max} = R_{T_{\max}} \cdot I = 212,052 \cdot 0,001 = 0,212052 \text{ V}. \quad (25)$$

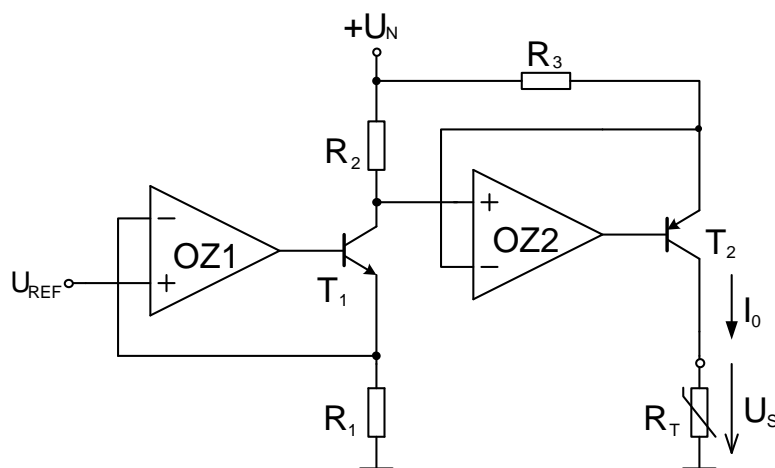
Tomu odpovídá rozsah měřeného napětí $\Delta U = U_{\max} - U_{\min} = 0,192528 \text{ V}$. Pokud chceme teploměr s přesností $0,5$ °C, budeme tedy potřebovat rozlišit minimálně 1000 napěťových hodnot v uvedeném napěťovém rozsahu (teplotní rozsah je

$300 + |-200| = 500$ °C, z toho 2 hodnoty na každý stupeň). Pokud má převodník referenční (a většinou i maximální vstupní) napětí $U_{\text{ref}} = 5$ V, budeme tedy potřebovat převodník s minimálním počtem rozlišovacích hodnot z viz rovnice (26). Ve skutečnosti ale musí být kvůli nelinearitě senzoru rozlišovacích hodnot z více.

$$z \geq 1000 \cdot \frac{U_{\text{ref}}}{\Delta U} \geq 25\,971 \quad (26)$$

Tuto hodnotu splňuje 15bitový převodník ($z = 2^{15} = 32\,768$).

Nevýhodou tohoto měřicího obvodu je nutnost použití přesného zdroje proudu, který je teplotně a časově stálý. Jeho tolerance ovlivňuje výslednou přesnost měření teploty. Jako zdroj proudu lze použít buď specializovaný obvod, např. LM334, jehož nevýhodou je ale poměrně velká tolerance (minimálně 6 %) v rozsahu proudů od 10 μA do 1 mA, viz [4], nebo zapojení proudového zdroje s operačními zesilovači, které může být přesnější. Příklad takového proudového zdroje s uzemněnou zátěží (senzorem) je na obr. (7) viz [5]. Zapojení s uzemněnou zátěží je vhodné kvůli dalším připojeným obvodům, které měří napěťový úbytek U_T (jsou připojené na společnou zem).



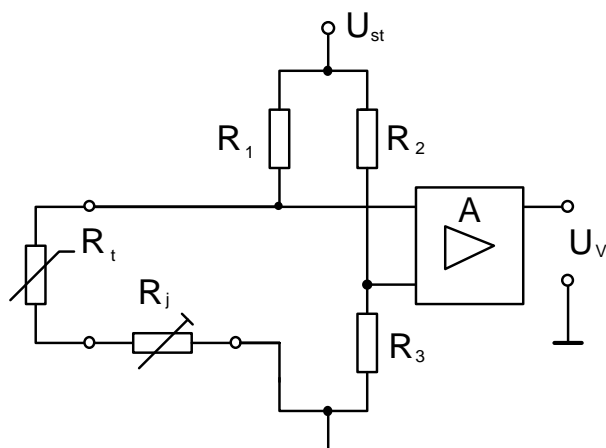
Obr. 7: Zapojení proudového zdroje s operačními zesilovači viz [5]

Pro výstupní proud s ideálními součástkami dle schématu na obr. 7 platí vztah viz [5]

$$I_0 = U_{\text{REF}} \cdot R_2 / (R_1 \cdot R_3). \quad (27)$$

Další možností je použití můstkového zapojení. Můstek je často Wheatstoneova typu. Pro vyvážený můstek viz obr. 8 platí vztah viz [2]

$$U_v = AU_{\text{st}} = \left[\frac{R_{i0} + \Delta R_t + R_j}{R_{i0} + \Delta R_t + R_j + R_1} - \frac{R_3}{R_2 + R_3} \right]. \quad (28)$$



Obr. 8: Můstkové zapojení měřícího obvodu viz [2]

Odpor R_j slouží k nastavení definované hodnoty odporu vedení, R_{t0} je základní hodnota teploty daná počátkem měřícího rozsahu.

2.4 Polovodičové monokrystalické senzory

Tyto senzory mohou být vyráběny z křemíku, germania, india aj. a z jejich slitin. Pro průmyslovou aplikaci se vyrábí z křemíku.

2.4.1 Monokrystalické křemíkové senzory

Pro průmyslovou praxi se vyrábí křemíkové senzory pro měření teplot v rozsahu od -50 do 150 °C. Je tvořen z nevlastního polovodiče N, tzn. má dominantní elektronovou vodivost, pro kterou platí viz [2]

$$n \cdot p = n_i^2, \quad (29)$$

$$\sigma = e(\mu_n \cdot n + \mu_p \cdot p), \quad (30)$$

kde je

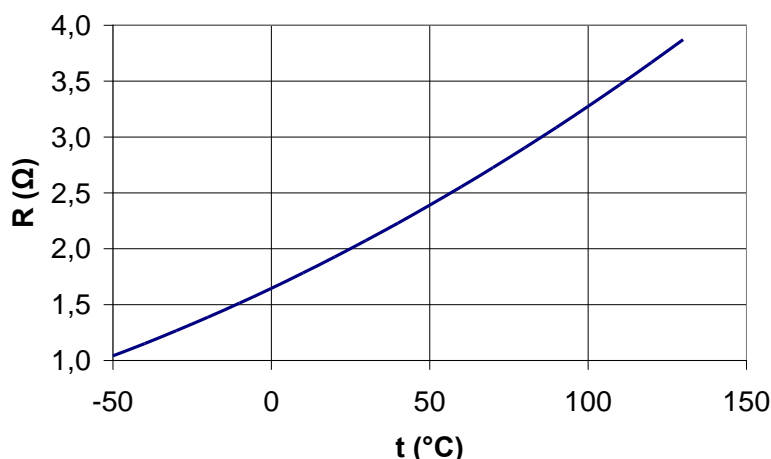
- σ konduktivita,
- e elementární náboj,
- n koncentrace elektronů,
- p koncentrace děr,
- n_i intrinzičná (vlastní) koncentrace nosičů nábojů,
- μ_n, μ_p pohyblivost elektronů, děr.

V uvedeném teplotním rozsahu je závislost rezistivity křemíku na teplotě dle dotační koncentrace příměsí dána teplotní závislostí pohyblivosti nosičů. Při zvyšující se teplotě dochází vlivem rozptylu nosičů náboje na mřížce polovodiče ke zmenšování pohyblivosti těchto nosičů a proto rezistivita polovodiče roste.

Pro většinu případů je teplotní závislost křemíkového senzoru dána vztahem viz [2]

$$R_t = R_0 + k(t - t_0)^2, \quad (31)$$

kde je R_0 odpor při vztažné teplotě t_0 . Typické hodnoty pro monokrystalický křemíkový senzor jsou $t_0 = -241,52 \text{ °C}$, $R_0 = 16 \text{ } \Omega$, $k = 2,7931 \cdot 10^{-2} \text{ } \Omega \cdot \text{K}^{-2}$. Střední součinitel odporu vychází $0,01 \text{ K}^{-1}$ viz [2].



Obr. 9: Závislost odporu křemíkového senzoru na teplotě dle vztahu (31)

2.5 Monolitické PN senzory

Jsou to integrované senzory teploty, které jsou nejčastěji založeny na teplotní závislosti napětí PN přechodu v propustném směru. Použitelný teplotní rozsah je od -55 do 150 °C . Nejistota měření se pohybuje v rozmezí od $0,6$ do 2 % . K měření se využívá změn vlastností diod a tranzistorů v závislosti na teplotě.

2.5.1 Diodové PN senzory

Senzorem je v podstatě obyčejná křemíková dioda. Je ale možné použít také polovodičovou strukturu galium-arsenid. Ze Shockleyovy rovnice viz [1]

$$I_D = I_S \left(e^{\frac{U_D}{mU_T}} - 1 \right) \quad (32)$$

vyplývá vztah dle [1]

$$U_D = mU_T \ln \left(\frac{I_D}{I_S} + 1 \right),$$

$$U_T = \frac{kT}{e}, \quad (33)$$

kde je

- U_D napětí na PN přechodu diody v propustném směru,
- I_S saturační proud PN přechodu diody v závěrném směru,
- I_D saturační proud PN přechodu diody v propustném směru,
- m rekombinační koeficient polovodiče ($1 \leq m \leq 2$),
- U_T teplotní napětí ($J \cdot C^{-1}$),
- k Boltzmannova konstanta $k = 1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$,
- T termodynamická teplota (K),
- e elementární náboj.

Pro teplotní závislost saturačního proudu platí viz [1]

$$I_S = AT^n e^{-\frac{U_{g0}}{U_T}}, \quad (34)$$

kde je

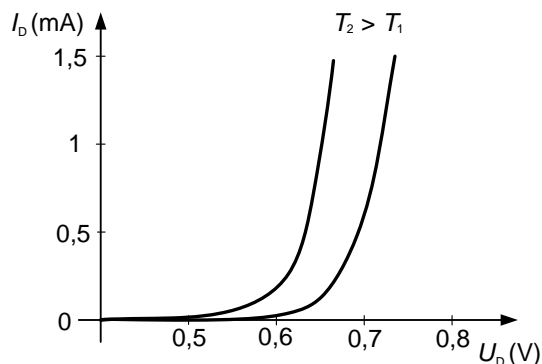
- A technologická konstanta,
- n koeficient teplotní závislosti pohyblivosti minoritních nosičů ($1,5 \leq n \leq 3$)
- U_{g0} napětí zakázaného pásu polovodiče extrapolovaného pro teplotu 0 K
(pro křemík je $U_{g0} = 205$ mV).

Protože poměr $I_D / I_S \gg 1$, vyplývá ze vztahu (33) rovnice viz [1]

$$U_D = mU_T \ln \frac{I_D}{I_S}. \quad (35)$$

V rovnici (39) jsou veličiny m , U_T , I_S teplotně závislé, přičemž hlavní složkou je přibližně exponenciální závislost $I_S = f(T)$ podle vztahu (41), a proto napětí U_D s rostoucí teplotou klesá. Pro teplotní závislost $U_D = f(T)$ lze odvodit vztah (36), kde T_0 je vztažná teplota a I_{s0} je odpovídající saturační proud viz [1]

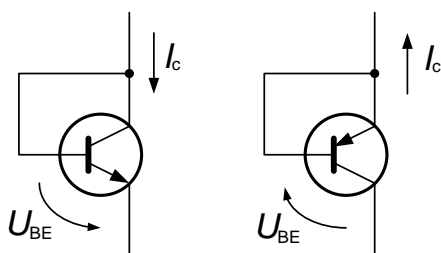
$$\left(\frac{dU_D}{dT} \right)_{I_D} = m \frac{k}{e} \ln \left(\frac{I_D}{I_{s0}} \right) - \frac{U_{g0}}{T_0}. \quad (36)$$



Obr. 10: Ampér - voltové charakteristiky diody v závislosti na teplotě viz [1]

2.5.2 Tranzistorové PN senzory

Pracují na podobném principu jako p-n diody. Využívá se také teplotní závislosti přechodu p-n v propustném směru (zde mezi bází a editorem tranzistoru). Tranzistor má spojena bázi s kolektorem a tudíž se tomuto zapojení říká často tranzistorová dioda, viz obr. 11.



Obr. 11: Zapojení tranzistorové diody viz [1]

Při tomto zapojení je rekombinační koeficient $m = 1$ a není závislý ani na proudu I_C ani na termodynamické teplotě T . Platí dle [1]

$$U_{BE} = U_T \ln \frac{I_C}{I_S} \quad (37)$$

Dále dle [2] platí pro vliv pracovního bodu

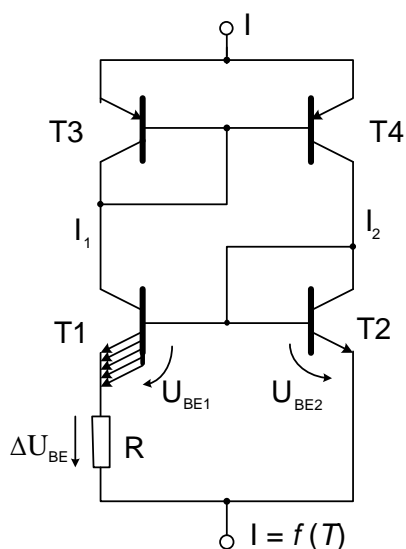
$$\frac{d\left(\frac{dU_{BE}}{dT}\right)}{dI_C} = \frac{k}{e} \frac{1}{I_C}, \quad (38)$$

to znamená, že např. pro $\Delta I_C / I_C = 0,01$ je změna citlivosti $0,86 \mu\text{V/K}^{-1}$ viz [2].

Mezi nevýhody tranzistorové diody patří parazitní vliv teplotní závislosti proudu I_S . Výhodou je skoro lineární funkce $U_{BE} = k \cdot t$ viz [1].

2.5.3 Monolitické (integrované) PN senzory

Jsou to integrované obvody sloužící k měření teploty. Jsou tvořeny vlastním senzorem, většinou je jím soustava bipolárních tranzistorů, a elektronickým obvodem pro analogové zpracování. Nejčastěji je teplotní čidlo založeno na dvou bipolárních tranzistorech napájených buď ze 2 zdrojů různých proudů, nebo z proudového zrcadla s různými hustotami proudů tranzistory, podle obr. 12. Teplotně citlivé jsou přechody báze – emitor tranzistorů T1 a T2. Těmito tranzistory prochází stejné proudy I_1 a I_2 z proudového zrcadla (T3 a T4). Tranzistor T1 je tvořen paralelně spojenými tranzistory o počtu r ($r < 20$), které mají stejnou plochu emitorového přechodu jakou má tranzistor T2. Výhodou tohoto zapojení je pak potlačení vlivu teplotní závislosti proudu I_S a chyby způsobené ohřevem polovodiče vlastním ztrátovým výkonem. Toto zapojení se někdy označuje jako PTAT obvod, což je zkratka proportional to absolute temperature. Také se používají mimo bipolární technologie i jiné, a to CMOS technologie nebo CMOS s n-p přechody, nebo s bipolárními laterálními tranzistory. Základem je ale technologie bipolární.



Obr. 12: Vnitřní zapojení obvodu PTAT obvodu (součást integrovaného PN senzoru) viz [1]

Pro saturační proud tranzistoru T1 platí viz [2] $I_S = f(S_E)$ a tím pádem platí i pro poměr proudů I_2 / I_1 vztah dle [2]

$$\frac{I_2}{I_1} = \frac{S_{E2} e^{\frac{U_{BE2}}{U_T}}}{S_{E1} e^{\frac{U_{BE1}}{U_T}}} \quad (39)$$

Pokud platí předpoklad, že tranzistory T_1 a T_2 jsou shodné, platí viz [2]

$$\frac{J_2}{J_1} = e^{\frac{U_{BE2} - U_{BE1}}{U_T}} = e^{\frac{\Delta U_{BE}}{U_T}} = r, \quad (40)$$

kde je

- J_1 proudová hustota tranzistoru T_1 ,
- J_2 proudová hustota tranzistoru T_2 ,
- S_{E1} plocha tranzistoru T_1 ,
- S_{E2} plocha tranzistoru T_2 ,
- U_{BE1} napětí mezi bází a emitorem tranzistoru T_1 ,
- U_{BE2} napětí mezi bází a editorem tranzistoru T_2 ,
- U_T teplotní napětí dané vztahem $U_T = kT/e$, kde k je Boltzmannova konstanta, e je elementární náboj.

Pro ΔU_{BE} ve vztahu (47) platí viz [1]

$$\Delta U_{BE} = U_T \ln r = \frac{kT}{e} \ln r = KT = KT, \quad K = \frac{k}{e} \ln r. \quad (41)$$

Speciálním druhem monolitických (integrovaných) PN senzorů je senzor teploty s integrovaným zesilovačem, chovající se jako Zenerova dioda s definovanou závislostí napětí na teplotě. Také i schematická značka je totožná se značkou Zenerovy diody. Příkladem je obvod LM35 od firmy National Semikonduktor, který má v základním zapojení výstupní napětí dáno vztahem viz [3]

$$U_{out} = 0 + 10 \cdot t, \quad (42)$$

V základním zapojení je tedy prahové napětí této „Zenerovy“ diody 0 V a napětí je větší jak tato hodnota v případě teplot nad 0 °C. Tolerance senzoru je $\pm 0,5^\circ\text{C}$. Senzor je standardně umístěn v pouzdře TO-92. Je možné zapojit ho různými způsoby a tím docílit různých vlastností. Viz [3].

Dalším druhem jsou tzv. digitální monolitické senzory s číslicovým výstupem s proměnnou střídou. Výstupní signál je tedy dvoustavový. Mají zabudovaný A/D převodník a další obvody.

A poslední druhem z této skupiny jsou tzv. SMART senzory, které obsahují kromě samotného teplotního senzoru a dalších podpůrných obvodů i mikroprocesor. Výhodou je přímé připojení čidla k mikroprocesoru v daném zařízení bez potřeby dalších obvodů.

2.6 Termoelektrické články

Termoelektrické senzory pracují na principu Seebeckova jevu, tj. na převodu tepelné energie na elektrickou. Pokud vytvoříme uzavřený obvod se dvěma materiálově jinými vodiči nebo polovodiči, prochází tímto obvodem proud tehdy, mají-li oba spoje rozdílnou teplotu

$T = T_A - T_B$. Jestliže tento obvod rozpojíme, bude v místě rozpojení na vodičích elektrické napětí dané Seebeckovými vztahy viz [2]

$$dU_{A,B} = S_{A,B} dT; \quad U_{A,B} = \int_{T_B}^{T_A} S_{A,B} dT, \quad (43)$$

kde

$$S_{A,B} = S_A - S_B,$$

a pro Seebeckovy koeficienty S_A, S_B platí dle [2]

$$S_A = \int \frac{\sigma_A}{T} dT; \quad S_B = \int \frac{\sigma_B}{T} dT, \quad (44)$$

kde jsou

σ_A, σ_B Thomsonovy koeficienty.

Dále dle [2] platí pro kovy

$$S = -\frac{\pi^2 k^2 T}{2eW_F} (\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}), \quad (45)$$

a pro polovodiče

$$S = -\frac{\pi^2 k^2 T}{6e(W_0 - W_F)} (\mu\text{V}\cdot\text{K}^{-1}), \quad (46)$$

kde je

W_F Fermiho hladina,

W_0 maximální energetická hladina pro teplotu T ,

k Boltzmannova konstanta.

Pro Seebeckovy koeficienty u polovodičů platí také viz [2]

$$S \approx -\frac{k}{e} \left(2,5 + \ln \frac{N}{n} \right), \quad (47)$$

kde je

N efektivní stavová hustota,

n koncentrace nosičů náboje.

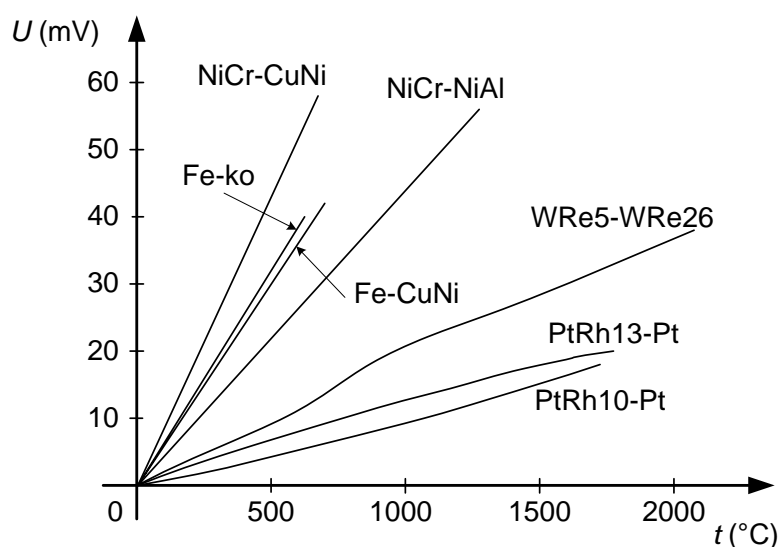
V technické praxi se často Seebeckovy koeficienty označují symboly α a nazývají se

termoelektrickými koeficienty. Jestliže je teplotní rozdíl malý, můžeme použít vztahy viz [2]

$$U_{te} = \alpha_1(t_1 - t_2) - \alpha_2(t_1 - t_2) = (\alpha_1 - \alpha_2)(t_1 - t_2) = \alpha_{12}(t_1 - t_2). \quad (48)$$

Koeficienty α_1, α_2 se dají zjistit měřením oproti referenčnímu materiálu, většinou olovu nebo platině. Termoelektrický koeficient α_{12} má u vodičů velikost řádově jednotky až desítky mikrovolt na stupeň a u polovodičů dosahuje hodnot vyšších než $100 \mu\text{V} / ^\circ\text{C}$. Pro přesné vyjádření závislosti $U_{te} = f(t)$ je nutné použít polynom dle [2]

$$U_{te} = \sum_{i=0} a_i \Delta t^i. \quad (49)$$



Obr. 13: Statické charakteristiky jednotlivých typů termoelektrických článků viz [1]

Termočlánky jsou normalizovány. Dle IEC se značí jednotlivé typy velkými písmeny. Na obr. 13 jsou uvedeny charakteristiky některých článků podle jejich materiálového složení.

Termočlánek může pracovat i jako spolehlivý zdroj elektrické energie, avšak s malým výkonem a malou účinností. Takové využití je např. v napájecích zdrojích v kosmických družicích. Termočlánky jsou nejlevnějšími teplotními snímači.

3 NÁVRH KONSTRUKCE TEPLoměRU

Cílem je navrhnout zapojení zařízení, které má dle zadání měřit teplotu v rozsahu -200 až 300 °C s přesností 0,5 °C. K měření má být použit senzor Pt100. Protože napájení má být především bateriové (je zvolena destičková baterie 9V), je nutné dbát na malý příkon zařízení. Zapojení je pro popis rozděleno do 2 částí, a to na analogovou část a na digitální část.

3.1 Analogová část teploměru

Slouží pro správnou generaci signálu ze senzoru, který se následně zpracovává v digitální části teploměru. Senzor Pt100 je třeba napájet konstantním proudem o velikosti 0,5 až 1 mA – musí být dostatečně malý pro zanedbání ohřevu senzoru. Zdroj proudu musí být stabilní a přesný. Vhodné zapojení proudového zdroje je na obr. 7, které je zvoleno pro konstrukci. Operační zesilovač č.1 (OZ1) s tranzistorem T1 vytváří pomocí napěťové reference U_{REF} a rezistoru R_1 konstantní proud. Jeho velikost je dána přibližně vztahem

$$I_1 = \frac{U_{REF}}{R_1}. \quad (50)$$

Referenční napětí U_{REF} se přivádí z A/D převodníku, kde je napěťová reference integrována a slouží pro samotnou činnost převodníku (k dispozici byl typ s touto vlastností). Je vyvedena na pin pro externí využití. Použití jediné reference pro zdroj proudu a převodník má výhodu v odstranění vlivu krátkodobé nestability napěťové reference. Stabilita hodnoty odporu rezistoru R_1 je důležitá. Proud I_1 prochází rezistorem R_2 , který je součástí proudového zrcadla (tvořeného ještě OZ2, T2 a R_3). Zrcadlený proud I_0 teče druhou větví a napájí senzor Pt100. Jestliže použijeme stejné rezistory R_2 a R_3 , bude vztah (50) přibližně platit i pro výstupní proud I_0 zdroje. Také stabilita rezistorů R_2 a R_3 je nutná. Místo bipolárních tranzistorů jsou ve zdroji proudu použity tranzistory MOSFET, které mají prakticky nulový vstupní proud – ten by způsoboval chybu proudového zdroje. Skutečný proud zdroje při použití reálných součástek je tedy dle [5] dán vztahem

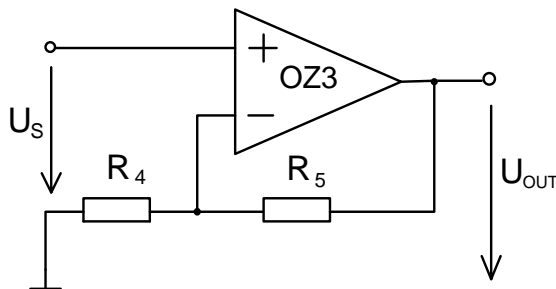
$$I_0 = (U_{REF} / R_1) \cdot (1 + U_{IO} / U_{REF} + I_{B-} R_1 / U_{REF}). \quad (51)$$

Pokud by byly použity ideální součástky, platí jednoduchý vztah dle [5]

$$I_0 = U_{REF} \cdot R_2 / (R_1 \cdot R_3). \quad (52)$$

Na senzoru pak vzniká úbytek napětí U_s , který je přímo úměrný měřené teplotě. Viz obr. 6. Toto napětí je poměrně malé (odpor senzoru je v řádu desítek až stovek ohmů a

proud pod 1mA) a je proto nutné jej zesílit. Zesilovač musí mít konstantní zesílení a musí být lineární. Je zvoleno neinvertující zapojení s operačním zesilovačem dle obr.14.



Obr. 14: Zesilovač napětí ze senzoru Pt100

Zesílení ideálního neinvertujícího zesilovače je dáno vztahem

$$A = 1 + (R_4 / R_5), \quad (53)$$

a tedy pro výstupní napětí platí

$$U_{OUT} = U_S \cdot (1 + R_4 / R_5). \quad (54)$$

Při reálném OZ a zanedbání vlivu vstupního proudu se vztah pro zesílení upraví na tvar

$$A = (1 + R_4 / R_5) / \left(1 + \frac{1 + R_5 / R_4}{A_u} \right). \quad (55)$$

Kvůli omezení vlivu vstupních proudů OZ je vhodné, aby odpory napěťových zdrojů připojených na vstupy OZ měly podobnou velikost, nebo aby vstupní odpor zdroje byl malý (platí pro každý OZ). Odpor čidla Pt100 je maximálně ve stovkách ohmů, proto se vliv vstupního proudu zanedbává. Napětí z reference se ale přivádí do zdroje proudu (neinvertující vstup OZ1) přes rezistor s podobným odporem jako je hodnota R1 (zpětná vazba do invertujícího vstupu OZ1).

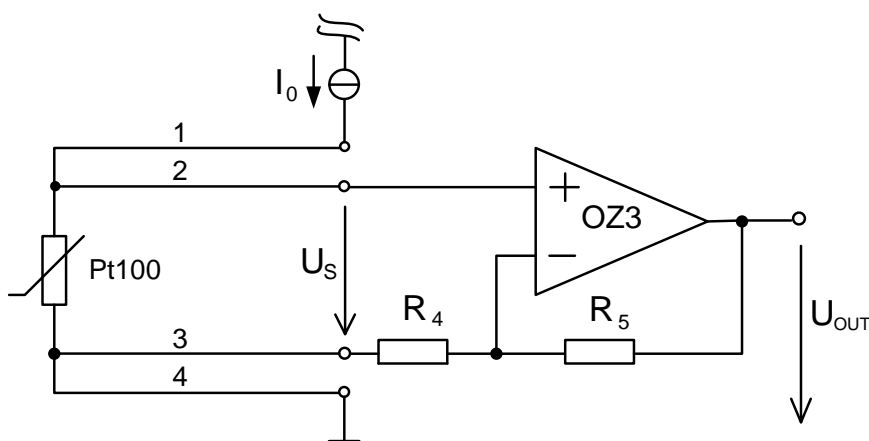
Všechny použité OZ by měli být precizní s nízkou napěťovou nesymetrií U_{I0} , nízkou proudovou nesymetrií I_{I0} a nízkým vstupním proudem I_B (vysoká vstupní impedance). Nesymetrie vstupních proudů je oproti vstupnímu proudu malá (cca 10 až 20% z I_B) a tudíž se v tomto návrhu zanedbává.

Na výstup zesilovače bude připojen citlivý A/D převodník. Je proto vhodné, aby přiváděné napětí do A/D převodníku bylo vyfiltrované dolní propustí kvůli potlačení šumu. Dolní propust bude realizovaná RC filtrem. Před vstup zesilovače nemůže být filtr připojen, protože by proudový zdroj s kapacitní zátěží mohl kmitat. Proto je nejjednodušší zapojit kondenzátor C7 paralelně k rezistoru R5 a zesilovač se bude chovat i jako Millerův integrátor – dolní propust. Volba časové konstanty se určí podle potřebné rychlosti měření.

Pro napájení analogové části nemusí být použito stabilizované napětí (na napájecím napětí závisí pouze napěťové zesílení otevřené smyčky OZ, závislost není velká – záleží na konkrétním OZ). Při použití děliče pro stanovení zesílení A se chyba vlivem kolísání napětí zmenšuje na zanedbatelnou hodnotu. OZ mají minimální napájecí napětí většinou větší jak $\pm 3\text{ V}$ symetrických (např. OP-07), v tomto zapojení je použito nesymetrické napájení, takže by to bylo minimálně 6V. Vzhledem k napájení baterií 9V (napětí v rozsahu 6 – 9,5 V) je tedy vhodnější použít nestabilizované napětí.

Pro napájení se používá 2 různých zdrojů - baterie 9 V, nebo externího zdroj. V případě připojení obou zdrojů se nesmí tyto zdroje vzájemně ovlivňovat. Proto se napětí z každého zdroje přivádí přes schottkyho diody (s malým úbytkem napětí), které brání průtoku proudu z jednoho zdroje do druhého. Další výhodou je, že zařízení je odolné proti špatné polaritě napájecích zdrojů. Závěrný proud vybraného typu diod by měl být co nejmenší.

Senzor Pt100 bude připojený k teploměru pomocí kabelu s délkou přes 1m. Vedení o takové délce by vnášelo do měření nezanedbatelnou chybu a z tohoto důvodu musí být použito 4vodičové zapojení senzoru pro minimalizaci chyby. Kabel musí být stíněný.

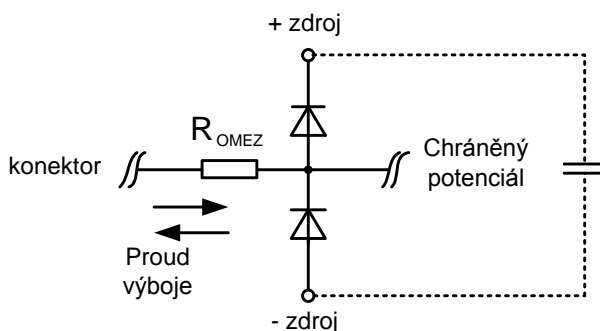


Obr. 15: 4vodičové zapojení senzoru

Při 4vodičovém zapojení dle obr. 15 se zmenšuje chyba vlivem odporu vedení k čidlu. Odpor přívodu proudu od zdroje (vodič 1) se neuplatňuje, ale na odporu vývodu proudu ze senzoru (vodič 4) vzniká úbytek napětí, který o tuto hodnotu posunuje výstupní napětí ze zesilovače U_{OUT} nahoru – vzniká chyba. Je proto vhodné vodič 4 volit o dostatečném průřezu. Odpor vodiče č. 2 pro snímání napětí se neuplatňuje (vstupní proud zesilovače je zanedbatelný). Druhým snímacím vodičem č. 3 teče výstupní proud ze zesilovače (přes dělič napětí R_4 a R_5), tzn. že na něm vznikající úbytek napětí rovněž posunuje výstupní napětí U_{OUT} nahoru. Tento proud je ale několikanásobně menší než proud senzorem (vodičem č. 4).

Senzor Pt100 bude připojen kabelem pomocí konektorů. Je tedy nutné brát zřetel při návrhu zapojení na možnost odpojení senzoru při zapnutí přístroji. Zesilovač se bude potom chovat jako sledovač napětí s nedefinovaným vstupním napětím.

Rovněž je důležité kvůli možnému elektrostatickému výboji do konektoru chránit k němu bezprostředně připojené obvody. Jedná se o ochranu vstupů napěťového zesilovače OZ3 a výstupního tranzistoru T2 proudového zdroje. Jako ochranu lze použít 2 sériově spojené diody zapojené k napájecímu napětí v závěrných směrech. Jejich střed je spojen s chráněným potenciálem, viz obr. 16. Případný výboj pak prochází jednou z těchto diod do filtračních kondenzátorů a do napájecího zdroje. K omezení velikosti proudu výboje je vhodné do cesty zařadit omezovací rezistor R_{OMEZ} .



Obr. 16: Ochrana proti elektrostatickému výboji

Celkem bude zapotřebí třech těchto ochranných obvodů (jeden pro T2 a dva pro OZ3). Diody by měly mít co nejmenší závěrný proud, aby nepříznivě neovlivňovaly okolní obvody a nevnášely velkou chybu do měření teploty. Diody také musí být dostatečně rychlé.

3.1.1 Volba součástek analogové části

Všechny operační zesilovače by měli být precizní. Po procházení této kategorie v elektronickém katalogu gme.cz jsem objevil pro proudový zdroj typ OP-07 s příznivou cenou a dobrými parametry (malý šum, malé napětí U_{I0}, \dots). Ještě lepším typem je OP-27, ale nebyl skladem ve verzi SMD, takže jsou použity OP-07 SMD (pro zdroj proudu 2x uvedený typ). Protože senzor Pt100 je připojen jedním vývodem na potenciál 0V, musí použitý napěťový zesilovač pracovat od nízkých hodnot napětí. OZ pro neinvertující zesilovač bude tedy typu rail to rail input (vstupní rozsah napětí je roven napájecímu napětí). Nalezený vhodný typ je OP-184 SMD - Tento typ má vlastnost rail to rail na vstupu i výstupu. Takový OZ není skladem ve firmě GM-ELECTRONIC [6] a byl proto objednáno z TME [7].

Většina rezistorů v analogové části musí být stabilní. Časová stabilita metalizovaných rezistorů je velká, teplotní stabilita také, konkrétně 50ppm/°C. Standardní výrobní tolerance je 1%. Kvůli přesnějšímu nastavení proudu zdroje (a tím menší korekci v digitální části teploměru úpravou programu) jsou voleny přesnější rezistory s tolerancí 0,1% pokud není uvedeno jinak. Tyto rezistory mají navíc lepší teplotní stabilitu 25 ppm/°C. Pouzdro je vždy vel. 0207 s max. výkonovým zatížením 0,6 W.

Výpočet R1 dle vztahu (57):

(Zrcadlený proud do čidla bude mít stejnou velikost jako proud R1; 2,5V napěťová

reference ADS8513; proud čidla z povoleného rozsahu je volen 0,6 mA – blíže ke spodnímu okraji rozsahu kvůli menší spotřebě).

$$R_1 = \frac{2,5}{0,6} = 4,167 \text{ k}\Omega, \quad \text{Z řady E12 je volen rezistor } R_1 = 3\text{k}9.$$

Proud rezistorem R1 tedy bude

$$I = \frac{2,5}{3,9} = 0,641 \text{ mA}.$$

Rezistory R2 a R3 v proudovém zrcadle budou mít pro jednoduchost stejný odpor, a tudíž i zrcadlený proud bude stejně velký. Úbytek napětí by neměl být malý, zhruba 1 V až 2 V kvůli použití uvedeného typu OZ2 (není schopen zpracovávat napětí blízko napájecímu napětí). Výpočet odporu R2 a R3 je tedy:

$$R_2, R_3 = \frac{1,5}{0,641} = 2,34 \text{ k}\Omega. \quad \text{Z řady E12 je volena hodnota } R_2, R_3 = 2\text{k}2. \quad (56)$$

Jako ochranné diody jsem vybral typ 1N4148 SMD z [6]. Tyto diody snesou maximální špičkový proud 4 A (do 100 ns) a jejich zpoždění je 4 ns.

Velikost odporu omezovacího rezistoru u ochrany pro T2 se musí volit s ohledem na celkový úbytek odporů ve větvi proudového zrcadla se senzorem Pt100. Vycházím z úbytku napětí na rezistorech max. 4,5 V, jelikož musí zůstat při minimálním napájecím napětí baterie (cca 6,5V - zmenšené ještě ochrannou schottkyho diodou na vstupu napájení) dostatečné napětí mezi vývody drain – source regulačního tranzistoru T2. Hodnota odporu R3 je 2,2 kΩ a při proudu větvi asi 0,65 mA bude velikost odporu ochranného rezistoru R6 maximálně

$$R_6 \leq \left(\frac{4,5}{0,65} - 2,2 \right) = 4,723 \text{ k}\Omega. \quad \text{Z řady E12 volím hodnotu } R_6 = 4\text{k}7 \quad (57)$$

Tolerance všech ochranných rezistorů (s výjimkou R4) je 1%.

U ochrany invertujícího vstupu OZ3 plní funkci omezení proudu výboje rezistor R4 (sloužící mimochodem hlavně pro stanovení zesílení A zesilovače). Jeho velikost 4,7 kΩ je vhodná i pro omezení proudu výboje.

Další omezovací rezistor je R7 a je součástí ochrany neinvertujícího vstupu OZ3. Procházející proud je velmi malý, můžeme proto opět pro jednoduchost použít rezistor o stejné velikosti odporu $R_7 = 4\text{k}7$ (tolerance 1%).

Při výběru tranzistoru rozhodovala spíše velikost pouzdra než jeho parametry, které nejsou až tak kritické. V pouzdře SOT-23 (SMD) jsem v katalogu [6] našel vhodný typ BSS138. Jedná se o MOSFET s vodivostí N, maximální proud je $I_D = 0,2 \text{ A}$ a maximální napětí $U_{DS} = 50 \text{ V}$. Podle jeho charakteristik je odhadnuto pracovní napětí

$$U_{GS} \cong 1 \text{ V.}$$

Tranzistor T2 jsem hledal ve stejném pouzdře jako T1. Vybral jsem typ BSS84. Jde o MOSFET vodivosti P. Maximální proud je $I_D = -0,13 \text{ A}$, maximální napětí $U_{DS} = -50 \text{ V}$. Pracovní napětí je kolem $U_{GS} \approx -1 \text{ V}$.

Při stanovování zesílení A neinvertujícího zesilovače jsem vycházel z poměrně mnoha použitelných napěťových rozsahů A/D převodníku (volí se různým zapojením 3 vstupních pinů). Omezujícím parametrem je minimální napájecí napětí zesilovače a s tím související maximální napětí na jeho výstupu. Jedná se o typ s možným rozsahem vstupního i výstupního napětí rovným napájecímu napětí (rail to rail input and output). Po zvážení možností jsem se rozhodl pro rozsah převodníku 0 až 10 V. Jelikož jde o 16bitový převodník, tak při tomto vstupním rozsahu odpovídá jedna rozlišitelná velikost napětí přibližně 153 μV . Teploměr bude zobrazovat teplotu s přesností na 1 desetinné místo a rozsah je -200 až 300 $^{\circ}\text{C}$. Z toho plyne, že je potřeba rozlišit 5000 hodnot. Jedna desetina $^{\circ}\text{C}$ bude odpovídat zhruba 3 rozlišovacím hodnotám převodníku (lepší z důvodu možného přeskokování měřených hodnot způsobeného šumem), tj. cca 460 μV . Vynásobením potřebných rozlišitelných hodnot (5000) s napětím odpovídajícím 1 dílku (460 μV) dostaneme maximální napětí na výstupu zesilovače při maximální teplotě 300 $^{\circ}\text{C}$. To je 2,3 V. Z toho plyne, že zesílení A zesilovače je poměr max. výstupního napětí (2,3 V) a max. napětí na senzoru (při $R = 212 \Omega$ a $I = 0,641 \text{ mA}$ je to cca 140 mV). Potřebné zesílení A je stejné nebo větší jak

$$A \geq \frac{2,3}{0,14} \geq 16,43. \quad (58)$$

Pro jednoduchost a také kvůli odstranění vlivu vstupních proudů OZ3 je volen rezistor R4 stejný jako R7 – 4,7 k Ω . Dle převráceného vztahu (53) je velikost odporu rezistoru R5

$$R_5 = (A - 1) \cdot R_4 = (16,43 - 1) \cdot 4,7 = 72,521 \text{ k}\Omega. \quad (59)$$

Velikost rezistoru může být větší jak tato hodnota (větší zesílení není na škodu), proto volím z řady E12 rezistor $R_5 = 82\text{k}$.

Výpočet velikosti kapacity kondenzátoru C7 pro Millerův integrátor:

(Jako dostatečná časová konstanta je odhadnuta doba $\tau = 0,1 \text{ s}$).

$$C_7 = \frac{\tau}{R_5} = \frac{0,1}{82000} = 1,22 \mu\text{F}. \quad \text{Volím keramický kondenzátor } C_7 = 1\mu\text{0} \quad (60)$$

A/D převodník bude tedy využíván jen asi v $\frac{1}{4}$ rozsahu. V případě potřeby je možné zvětšit teplotní rozsah teploměru nahoru pouhou změnou programu.

Jako ochranné schottkyho diody v přívodu napájení jsem z [6] vybral typ BAT42 SMD. Tento typ má malý úbytek napětí v propustném směru kolem 0,4 V, maximální proud je 0,2 A, maximální napětí v závěrném směru 30 V a závěrný proud je při 25 $^{\circ}\text{C}$

kolem $0,5 \mu\text{A}$.

3.2 Digitální část teploměru

Jejím úkolem je provést linearizaci senzoru Pt100 a zobrazení měřené teploty na displeji. Kvůli malému příkonu je vhodné použít displej s tekutými krystaly. Protože na trhu se běžně vyskytují lcd s integrovanými řadiči (jsou alfanumerické) a jejich komunikace s mikrokontrolérem je poměrně jednoduchá, bude použit tento druh. Stačí základní jednořádkový s osmi znaky (8x1). Měl by být typu reflective nebo transreflective aby nemusel být podsvícený pomocí LED (velký příkon). Použitý mikrokontrolér musí mít dostatečnou paměť pro program a jeho příkon má být malý. Další nepostradatelnou součástí je A/D převodník. K dispozici byl vhodný typ ADS8513, takže je v zapojení použit (jedná se o 16bitový převodník se sériovou komunikací a má vyvedenu vnitřní napěťovou referenci 2,5 V na pin). V uvedeném mikrokontroléru je sice integrováno několik A/D převodníků, ale všechny jsou maximálně 10bitové, což je nedostatečná rozlišovací schopnost.

3.2.1 Volba součástek digitální části

Jednořádkový displej s osmi znaky (8x1) je v podstatě nestandardní a nebývá skladem v prodejnách. Snad jediný dostupný typ byl od firmy Electronics assembly [9] EA-DOGM081, který má navíc velmi malou spotřebu – dle výrobce $0,25 \text{ mA}$.

Další součástí je mikrokontrolér, podle zadání má být rodiny AVR. Kvůli minimálním rozměrům desky je v provedení SMD. Výběr této součástky není tak kritický. Je odhadnuto, že programová paměť bude dostatečná o velikosti 8 kB. Mikrokontrolér by měl mít dostatek volných pinů (a portů) pro komunikaci s displejem a převodníkem. Je vybrán z [6] typ ATmega8L. Tento mikrokontrolér má napájecí napětí v rozsahu 2,7 až 5,5 V a maximální frekvenci 8 MHz. Ke generaci hodinového taktu je jednodušší a spolehlivější použít krystal místo integrovaného RC oscilátoru (přesnost a stabilita není důležitá). Je vybrán z [6] SMD krystal 4 MHz – stačil by menší kmitočet, ale s nižší frekvencí není skladem. Ke krystalu jsou připojeny 2 keramické kondenzátory 22pF – dle doporučení výrobce mikrokontroléru.

Převodník ADS8513 je také ve verzi SMD. Podle jeho datasheetu [8] jsem zapojil vstupní piny pro rozsah 0 až 10 V. Pro správnou funkci je nutné blokovat některé piny externími kondenzátory. Jsou také všechny SMD. Keramické kondenzátory jsou v pouzdru vel. 1206 (kvůli snadnému pájení) a elektrolytické v pouzdře SMC A. Hodnoty jsou podle doporučení výrobce.

Displej, mikrokontrolér i A/D převodník musí být napájeny ze stabilizovaného napětí. U mikrokontroléru i displeje to může být stabilizátor 3,3 V nebo 5 V. Převodník potřebuje napětí 5 V, takže se použije jeden stabilizátor 5 V, proud stačí do 100 mA. Klasický stabilizátor 78L05 není vhodný, jelikož má dle datasheetu (dostupného ze stránek prodejny GM electronic [6]) poměrně velký vlastní odběr 6 mA (tvořil by významnou část celkového příkonu) a také má minimální vstupní napětí 7 V. Stabilizace a i správná funkčnost zařízení by nebyla možná ještě při ne zcela vybité baterii. Vybral jsem tedy low drop stabilizátor LE50ABZ z [6]. Mezi jeho přednosti patří minimální napájecí napětí 5,2 V a vlastní odběr 0,5 mA. Malou nevýhodou je, že

v prodejně GM electronic [6] je pouze v pouzdře TO-92 pro klasickou montáž. Stabilizátor potřebuje ke své činnosti jeden tantalový a jeden keramický kondenzátor (oba SMD).

3.2.2 Program pro mikrokontrolér

Program byl napsán v AVR Studiu v jazyku C. Je k dispozici v příloze na CD. Při návrhu komunikace A/D převodníku jsem vycházel z jeho datasheetu [8]. Ovládání displeje je v podstatě standardní, použitý řadič ST7036 má jen drobné změny oproti nejpoužívanějšímu řadiči HD44780, viz [10].

Mikrokontrolér periodicky spouští měření napětí pomocí A/D převodníku. Po skončení měření mikrokontrolér generuje hodinový signál pro A/D převodník, který v tomto taktu posílá 16b číslo reprezentující změřenou hodnotu (v intervalu od -32768 – odpovídá 0 V, do 32768 – odpovídá 10 V). Toto číslo se přímo převádí na velikost odporu přičtením 32768 (posunutí do intervalu 0 až 65535) a vydělením 77. Pomocí programu Matlab je vygenerovaná tabulka teplot z odporů. Hodnoty teplot v jednotlivých řádcích odpovídají zlomům aproximace charakteristiky senzoru Pt100 lomenou přímkou. Program vybere hodnotu teploty na tom řádku tabulky, který má nejbližší nižší teplotu. Program řádky vybírá porovnáváním změřeného odporu s odpory v jednotlivých řádcích tabulky. Tak se vytvoří hrubý výsledek teploty. Rozdíl mezi změřeným odporem a odporem na vybraném řádku se násobí se směrnici jednotlivé přímkou uložené také v příslušném řádku. Tento výsledek se pak přičítá ke hrubě určené teplotě odpovídající teplotě vybraného řádku a celkovým výsledkem je relativně přesná hodnota měřené teploty. Tímto způsobem program provádí linearizaci charakteristiky senzoru. Nepřesnost popsané aproximace je zhruba 0,05 °C. Výslednou měřenou teplotu mikrokontrolér posílá do displeje. K zobrazené hodnotě se ještě přidává za číslo jednotka – °C. Program měří a zobrazuje hodnotu na displeji asi 8x za vteřinu.

3.3 Návrh desky plošných spojů

Deska plošných spojů je navržena v programu EAGLE 5.8.0. Při návrhu bylo dbáno na vytvoření zvláštní země pro A/D převodník (pro malý šum v napájení). Na obou stranách desky je vylita měď. Na straně top má potenciál země (0 V) a na straně bottom je rozlité rozděleno na 2 části, přičemž pod digitálními obvody je plocha s potenciálem 5 V a pod analogovými obvody s potenciálem 9 V. Při návrhu se počítalo s umístěním zařízení do krabičky U-KM33C (s otvorem pro displej a s prostorem pro 9 V baterii). Deska je dvojvrstvá a všechny součástky (i rezistory vel. 0207) jsou umístěny ze strany top. Jedinou součástkou umístěnou ze strany bottom je displej, který je tak vhodně situován k otvoru v krabičce. Strana top desky a všechny součástky (kromě displeje) jsou pak po otevření krabičky snadno přístupné. Soubory pro schéma a desku jsou v příloženém CD, klišé pro desku z obou pohledů a také osazovací plán jsou uvedeny v příloze.

4 REALIZACE TEPLoměRU

Podle navržené konstrukce jsem realizoval jeden kus teploměru, na kterém je ověřena funkčnost obvodu. Deska plošných spojů teploměru je umístěna spolu s dalšími částmi (konektory a vypínačem) do plastové přístrojové krabičky uvedeného typu.

4.1 Zabudování do krabičky

Na horní straně desky plošných spojů je nutné vybrousit 2 zářezy, kterými prochází sloupky v krabičce sloužící pro její sešroubování. Deska je zalepena ke stěnám krabičky tavnou pistolí. V krabičce jsou vyvrtány popř. vybroušeny otvory pro vypínač (posuvný typ P-B140B), napájecí konektor (typ K3716A – průměr 2,1 mm) a pro konektor pro čidlo Pt100 (zásuvka JACK 4-pól 2,5 mm) - k dostání v prodejnách je pouze JACK do DPS, takže je použit kousek kuprextitu s proškrábnutými spoji, ve kterém je konektor zapájen a kuprextit je do krabičky zalepen tavnou pistolí.

Připojení konektoru pro čidlo k DPS je pomocí dvojice tenkých stíněných kabelů, propojení napájecího konektoru k DPS a vypínače k DPS je řešeno dvojlinkou 2 x 0,15 mm². Pro lepší mechanickou odolnost jsou vodiče v místě připájení k desce přilepeny tavnou pistolí.

4.2 Měřicí senzor

Samotné čidlo Pt100 existuje v různých variantách. Zakoupil jsem z firmy GES-Electronics [11] jediný typ čidla Pt100, který byl skladem. Toto čidlo je poměrně malé. Je tvořeno keramickou destičkou s napařenou platinovou vrstvou. Drátové vývody jsou přivařeny a poté zality ochrannou pryskyřicí. Teplotní rozsah čidla je -80 až 500 °C. Kvůli mechanické odolnosti je čidlo vhodné umístit do kovové trubičky a zalít pryskyřicí. Uvnitř trubičky je také vhodné provést redukci ze 4vodičového vedení na 2vodičové vývody čidla. 4vodičové vedení je realizováno dvojitým koaxiálním kabelem, zakončeným konektorem JACK 4-pól 2,5 mm vidlice. Takto zhotovený senzor ale nesplňuje teplotní rozsah dle zadání (-200 až 300 °C) kvůli použití pryskyřice.

4.3 Testování přístroje

Teploměrem jsem měřil nejprve teplotu vroucí vody a poté teplotu tajícího ledu. Voda v kovové nádobě byla přivedena k varu v nadmořské výšce přibližně 180 m. To odpovídá teplotě asi 99,5 °C. Přístroj ukazoval hodnoty od 98,9 do 99,7 °C. Záleželo na poloze čidla, které bylo nutné přesně držet pod vodou co největším objemem, ale tak, aby nebyly ponořeny přírodní neizolované vodiče (měřeno nezapouzdřeným čidlem). Při měření nízké teploty bylo v nádobě umístěno velké množství tajícího ledu s vodou. Po ponoření čidla se teplota ustálila na hodnotě 0,8 °C.

5 ZÁVĚR

V první části bakalářské práce jsou shrnuty základní poznatky o elektrických teplotních senzorech. Seznámil jsem se s problematikou kovových senzorů, které jsou nevhodnější k přesnému měření s velkým teplotním rozsahem. Zaměřil jsem se na platinový odporový senzor a na měřicí obvody pro tento snímač. Zjistil jsem, že jako měřicí obvod k platinovému snímači lze využít jednoduchý obvod se zdrojem proudu s přímým měřením úbytku napětí na senzoru např. pomocí A/D převodníku, jenž bývá součástí mikrokontrolérů. Pro přesnější měření s větším teplotním rozsahem se požadavky na obvodové zapojení zvětšují. Je nutné provádět linearizaci charakteristiky senzoru, zdroj proudu pro čidlo musí být přesný a stabilní. Získal jsem přehled i o ostatních skupinách teplotních senzorů, které se používají pro různá elektronická měření teplot.

Po prostudování kovového senzoru Pt100 jsem se v další části bakalářské práce zabýval návrhem zapojení digitálního teploměru. Nejdříve byla navrhována analogová část, jejíž funkčnost jsem vyzkoušel zkušebním sestavením na nepájivém kontaktním poli. Měřil jsem úbytky napětí na senzoru i na výstupu zesilovače při různých odporech „senzoru“ – sada různých rezistorů. Poté byla navržena a vyrobena deska celého zařízení. Po osazení a opětovném vyzkoušení analogové části byl vytvářen a laděn program pro mikrokontrolér. Funkční zařízení bylo instalováno do krabičky.

Vyzkoušel jsem i přesnost měření teploměru. Při varu vody teploměru kolísala zobrazovaná hodnota kolem 95,5 °C, což podle nadmořské výšky odpovídá skutečné teplotě. Při ponoření do vody s tajícím ledem se hodnota ustálila na 0,8 °C. Tato hodnota je mírně odlišná od skutečné hodnoty. Nepřesnost je ale částečně způsobena i tolerancí platinového čidla (třída B).

LITERATURA

- [1] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřící obvody*. Praha: Vydavatelství BEN, 2005. 240 s. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřící obvody*. 2. vyd. Praha: ČVUT, 1999. 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
- [3] NATIONAL SEMICONDUCTORS. *LM35 Precision centigrade temperature sensors* [online]. 2000. [cit. 2010-12-26]. Datasheed. Dostupný z WWW: < <http://www.gme.cz/dokumentace/dokumenty/313/313-909/dsh.313-909.1.pdf> >.
- [4] SGS-THOMSON ELECTRONICS. *LM334 Three terminal adjustable current sources* [online]. [cit. 2010-12-28]. Datasheed. Dostupný z WWW: < <http://www.gme.cz/dokumentace/dokumenty/339/339-003/dsh.339-003.1.pdf> >.
- [5] PUNČOCHÁŘ, J. *Operační zesilovače v elektronice*. Praha: Vydavatelství BEN, 2005. 496 s. ISBN 80-7300-059-8.
- [6] GM ELECTRONIC, *Sortiment nabídky GM-Electronic* [online]. [cit. 20. 4. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://gme.cz/> >.
- [7] TME, *Sortiment nabídky TME electronic components* [online]. [cit. 20. 4. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://tme.cz/> >.
- [8] ALLDATASHEET, *Datasheet obvodu ADS8513* [online]. [cit. 20. 5. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/210728/TI/ADS8513.html> >.
- [9] SOS ELECTRONIC, *Sortiment nabídky SOS electronic* [online]. [cit. 25. 4. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://www.soselectronic.cz/> >.
- [10] SITRONIX, *Datasheet řadiče ST7036 displeje EA-DOGMO81*. [online]. [cit. 20. 5. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://www.lcd-module.de/eng/pdf/zubehoer/st7036.pdf> >.
- [11] GES-ELECTRONICS, *Sortiment nabídky GES-Electronics* [online]. [cit. 25. 5. 2011]. Dostupný z WWW: < <http://www.ges.cz/cz/eshop/> >.

SEZNAM SYMBOLŮ A VELIČIN

α	teplotní součinitel odporu
$\alpha_{1,2,12}$	teplotní koeficienty termistoru
σ	konduktivita
τ	relaxační čas elektronů
μ_n, μ_p	pohyblivost elektronů, děr
A	zesílení zesilovače
A_n	konstanta závislá na geometrickém tvaru a materiálu negastoru
B	teplotní konstanta daná materiálem negastoru
e	elementární náboj
ΔE	šířka mezery mezi energetickými hladinami
I_D	proud diodou v propustném směru
I_S	saturační proud diodou v závěrném směru
I_0	výstupní proud
$I_{1,2}$	proudy emitorem tranzistorů T1, T2
$J_{1,2}$	proudové hustoty tranzistorů T1, T2
k	Boltzmannova konstanta
m	hmotnost nosiče náboje
N	efektivní stavová hustota
n	počet elektronů v jednotkovém objemu,
n	koncentrace nosičů náboje (elektronů)
n_i	intrinzická (vlastní) koncentrace nosičů nábojů
p	koncentrace děr
r	poměr proudových hustot
R_j	teplotně nezávislý odpor (nastavení definovaného odporu vedení)
R_m	molární plynová konstanta
R_p	odpor pozistoru ve strmé části v inflexním bodě
R_S	odpor pozistoru při spínací teplotě
R_t	odpor senzoru

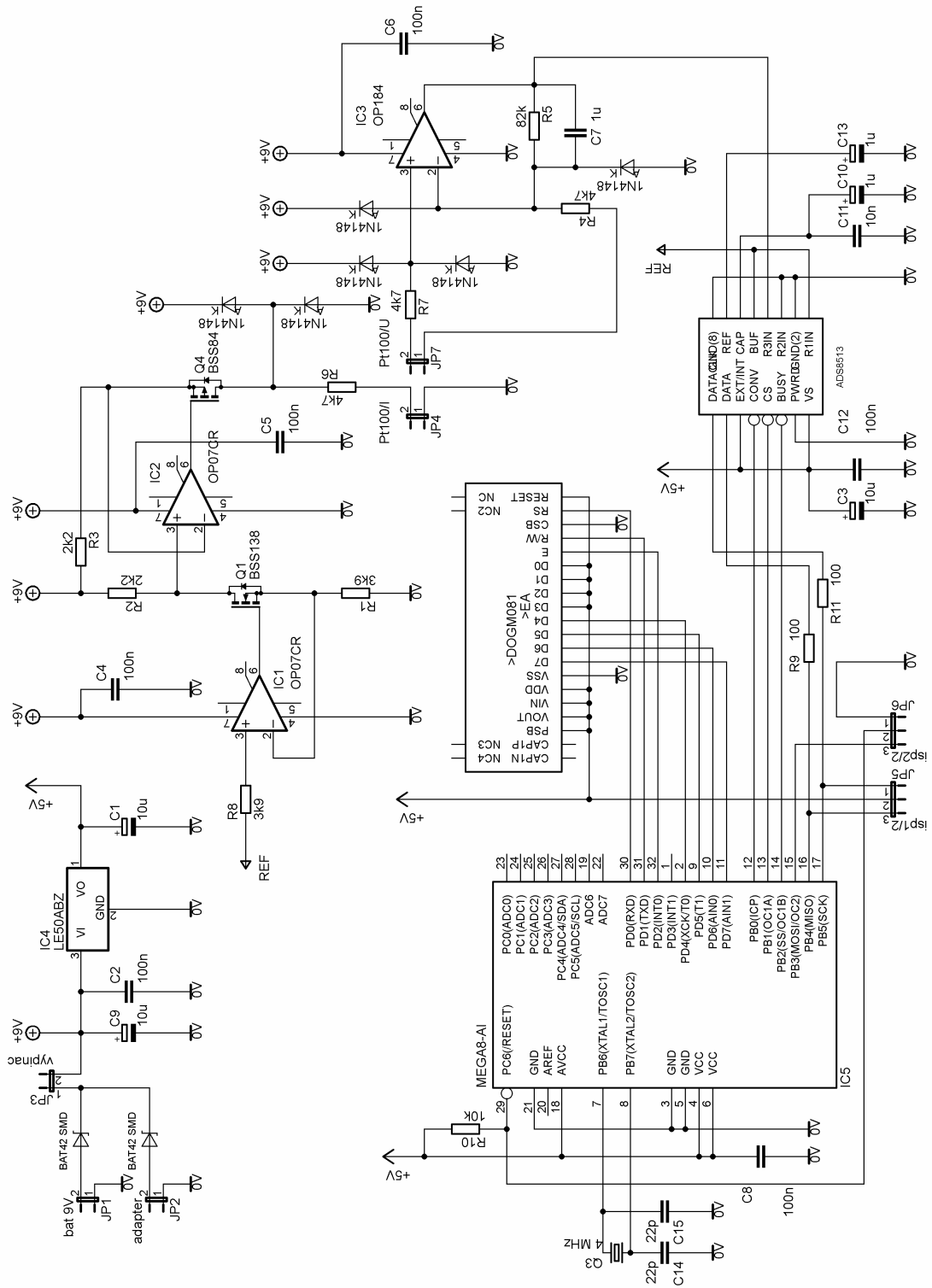
R_{i0}	základní teplota na počátku měřicího rozsahu
R_0	odpor senzoru při vztažné teplotě
$S_{A,B}$	Seebeckovi koeficienty
S_{E1}	plocha tranzistoru T1
S_{E2}	plocha tranzistoru T2
t	teplota (°C)
t_p	teplota pozistoru ve strmé části v inflexním bodě
t_s	spínací teplota
$t_{1,2}$	okrajové teploty
T	termodynamická teplota (K)
U_{BE1}	napětí mezi bází a editorem tranzistoru T1
U_{BE2}	napětí mezi bází a editorem tranzistoru T2
U_D	napětí na diodě v propustném směru
U_{g0}	napětí zakázaného pásu polovodiče extrapolovaného pro teplotu 0 K
U_{out}	výstupní napětí obvodu LM35
U_{REF}	referenční napětí zdroje
U_s	napětí na snímači
U_{st}	stejnoseměrné napájení můstku
U_{te}	termoelektrické napětí
U_T	teplotní napětí
U_V	napětí na výstupu můstku
W_F	Fermiho hladina
W_0	maximální energetická hladina pro teplotu T
W_{100}	redukovaný odpor
z	počet rozlišovacích úrovní A/D převodníku

SEZNAM PŘÍLOH

A	Návrh zařízení	43
A.1	Obvodové zapojení	43
A.2	Deska plošného spoje – top (strana součástek).....	44
A.3	Osazovací plán.....	45
B	Seznam součástek	46
C	Přiložené CD	47

A NÁVRH ZAŘÍZENÍ

A.1 Obvodové zapojení

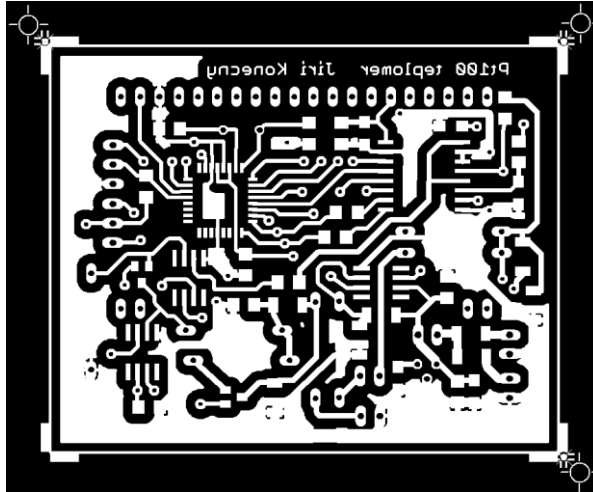


A.2 Deska plošného spoje – top (strana součástek)

Oba pohledy jsou zrcadlené (potisk na průhledné fólii je přitisknutý k mědi).

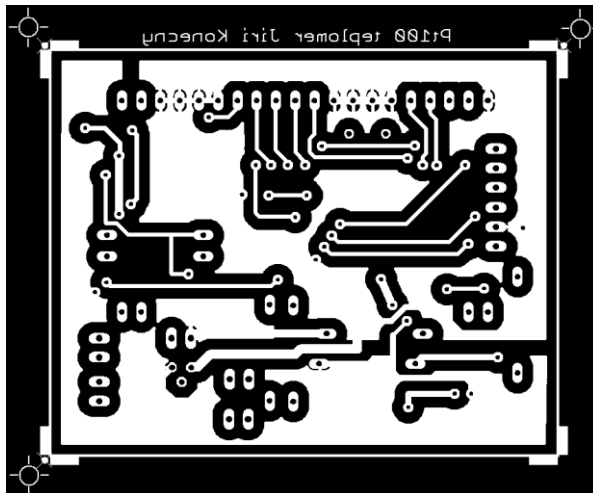
Barvy jsou invertovány – pro pozitivní fotocitlivý lak.

Deska plošného spoje – top (strana SMD součástek)



Rozměr desky 67 x 53,5 [mm], měřítko M1:1

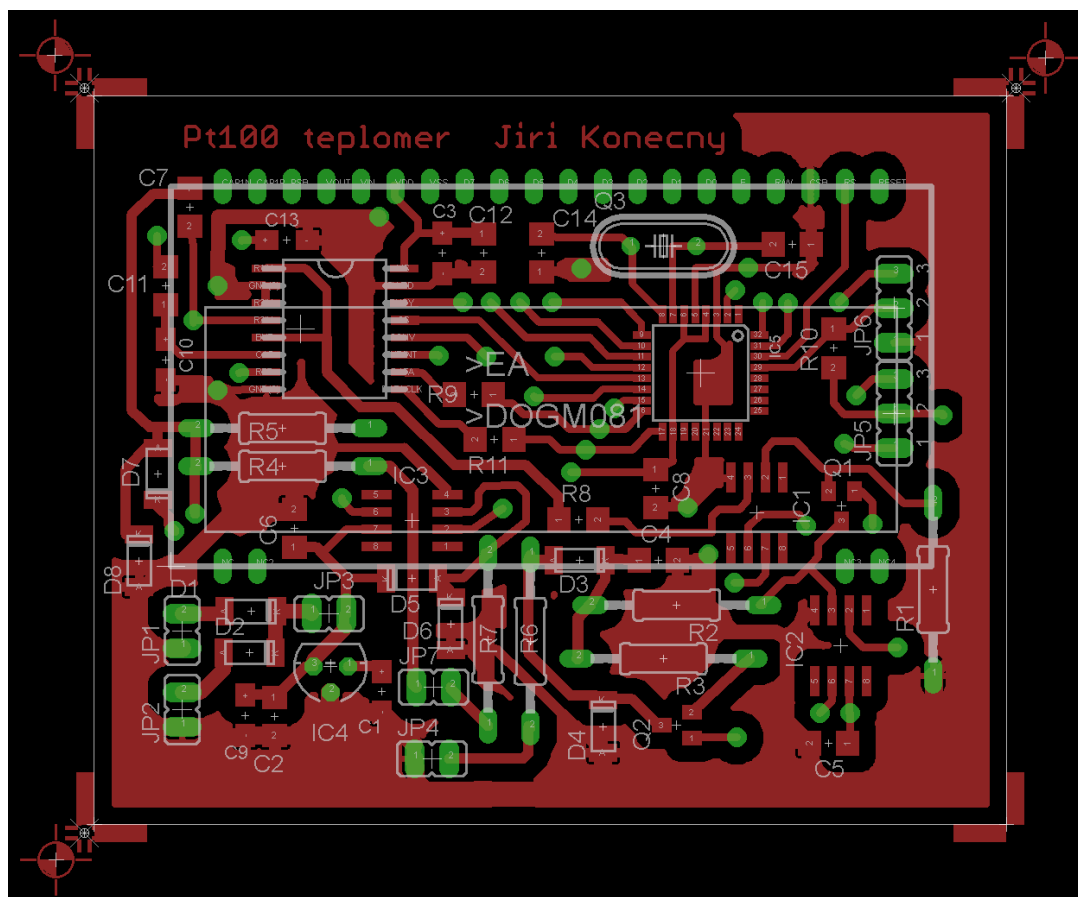
Deska plošného spoje – bottom (strana displeje)



Rozměr desky 67 x 53,5 [mm], měřítko M1:1

A.3 Osazovací plán

Displej je osazen ze strany bottom. Všechny ostatní součástky jsou osazeny z pohledu top. Osazovací plán zobrazuje pohled ze strany top.



B SEZNAM SOUČÁSTEK

Označení	Hodnota/Typ	Pouzdro	Popis
D1	BAT42 SMD	MINIMELF	schottkyho dioda
D2	BAT42 SMD	MINIMELF	schottkyho dioda
D3	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
D4	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
D5	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
D6	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
D7	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
D8	1N4148 SMD	MINIMELF	dioda
IC1	OP07CR	SO8	operační zesilovač
IC2	OP07CR	SO8	operační zesilovač
IC3	OP184ESZ	SO8	operační zesilovač
IC4	LE50ABZ	TO-92	stabilizátor
IC5	MEGA8L-AI	TQFP32-08	mikrokontrolér
IC6	ADS8513	SO16	A/D převodník
C1	10u	SMC_A	tantalový kondenzátor
C2	100n	C1206	keramický kondenzátor
C3	10u	SMC_A	tantalový kondenzátor
C4	100n	C1206	keramický kondenzátor
C5	100n	C1206	keramický kondenzátor
C6	100n	C1206	keramický kondenzátor
C7	1u	C1206	keramický kondenzátor
C8	100n	C1206	keramický kondenzátor
C9	10u	SMC_A	tantalový kondenzátor
C10	1u	SMC_A	tantalový kondenzátor
C11	10n	C1206	keramický kondenzátor
C12	100n	C1206	keramický kondenzátor
C13	1u	SMC_A	tantalový kondenzátor
C14	22p	C1206	keramický kondenzátor
C15	22p	C1206	keramický kondenzátor
R1	3k9	0207	rezistor 0,1 %
R2	2k2	0207	rezistor 0,1 %
R3	2k2	0207	rezistor 0,1 %
R4	4k7	0207	rezistor 0,1 %
R5	82k	0207	rezistor 0,1 %
R6	4k7	0207	rezistor 1%
R7	4k7	0207	rezistor 1%
R8	3k9	R1206	rezistor
R9	100	R1206	rezistor
R10	10k	R1206	rezistor
R11	100	R1206	rezistor
Q1	BSS138	SOT23	MOSFET
Q2	BSS84	SOT23	MOSFET
Q3	4 MHz	HC49/S	krystal
JP5 JP6	ISP	JP2	dutinková lišta

C PŘILOŽENÉ CD