



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

ELEKTRONICKÉ MĚŘENÍ TEPLoty PRO GRIL

ELECTRONIC TEMPERATURE MEASUREMENT FOR GRILL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

David Svoboda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Petr Fiedler, Ph.D.

BRNO 2023



Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: David Svoboda

ID: 23017

Ročník: 3

Akademický rok: 2022/23

NÁZEV TÉMATU:

Elektronické měření teploty pro gril

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navrhnout elektronický měřicí systém, který umožní měření teploty grilu.

1. Seznamte se se způsobem, kterým realizuje měření teploty grilu některý z velkých výrobců (Weber, Napoleon apod.), diskutujte výhody a nevýhody možných typů snímačů NTC, RTD, termočlánek (přesnost, teplotní rozsah) pro zamýšlené použití.
2. Pro zvolenou teplotní sondu identifikujte typ snímače a na základě měření odhadněte parametry snímače teploty, diskutujte výhody a nevýhody zvoleného typu snímače (přesnost, teplotní rozsah).
3. Navrhněte způsob připojení zvolené teplotní sondy k mikrokontroleru.
4. Realizujte připojení snímače ke zvolenému mikrokontroleru.
5. Ověřte funkčnost navrženého řešení.
6. Stručně diskutujte dosažené výsledky a praktickou využitelnost.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

1. Dokumentace výrobců grilů k teplotním sondám (Weber, Napoleon).
2. Measuring the temperature with NTCs: <https://www.giangrandi.ch/electronics/ntc/ntc.shtml>
3. NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation: <https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>
4. Temperature Sensing with NTC Circuit, TI Application Note SBOA323A, <https://www.ti.com/lit/an/sboa323a/sboa323a.pdf>

Termín zadání: 6.2.2023

Termín odevzdání: 22.5.2023

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

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor semestrální práce nesmí při vytváření semestrální 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

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Vysoké učení technické v Brně / Technická 3058/10 / 61

Abstrakt

Práce se zabývá způsoby měření teploty, elektrickými a neelektrickými. Diskutování nad výhodami a nevýhodami elektrických způsobů měření teploty pro použitelnost v grilu. Dále se zabývá výběrem vhodného snímače na měření teploty uvnitř grilu. Následným návrhem a realizací měřicího systému, kde je kladen důraz na přesnost.

Klíčová slova

Teplota, Snímače teploty, Teplotní rozsah, Citlivost, Gril

Abstract

The work deals with methods of temperature measurement, electrical and non-electrical. Discussing the advantages and disadvantages of electrical methods of temperature measurement for applicability in the grill. It also discusses the selection of a suitable sensor to measure the temperature inside the grill. Subsequent design and implementation of the measuring system where the emphasis is on accuracy.

Keywords

Temperature, Temperature sensors, Temperature range, Sensitivity, Grill

Bibliografická citace

SVOBODA, David. *Elektronické měření teploty pro gril* [online]. Brno, 2023 [cit. 2022-10.28]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/146453>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky.

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

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení studenta:	<i>David Svoboda</i>
VUT ID studenta:	<i>230177</i>
Typ práce:	<i>Bakalářská práce</i>
Akademický rok:	<i>2022/2023</i>
Téma závěrečné práce:	<i>Elektronické měření teploty pro gril</i>

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné 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 závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: 15.5.2022

podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce doc. Ing. Petru Fiedlerovi, Ph.D za příkladné vedení, všechny cenné rady a veškerou pomoc při zpracování mé bakalářské práce. Zároveň děkuji Ing. Jirímu Fialkovi, Ph.D za umožnění využití měřicí laboratoře a cenné rady. Na konec bych rád poděkoval rodině a kamarádům za veškerou podporu při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: *15.5.2022*

podpis autora

Obsah

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	15
SEZNAM OBRÁZKŮ	16
SEZNAM TABULEK.....	17
ÚVOD	18
1. TEORETICKÝ ÚVOD	19
1.1 KAPALINOVÉ TEPLoměRY	20
1.2 BIMETALOVÉ TEPLoměRY	20
1.3 BEZDOTYKOVÉ TEPLoměRY	22
1.4 KOVOVÉ ODPOROVÉ TEPLoměRY	23
1.5 POLOVODIČOVÉ ODPOROVÉ TEPLoměRY.....	25
1.5.1 NTC termistory.....	25
1.5.2 PTC termistory.....	27
1.6 TERMOČLÁNKY	29
1.7 SROVNÁNÍ JEDNOTLIVÝCH TYPŮ SNÍMAČŮ TEPLoty	32
2. POŽADAVKY NA MĚŘICÍ SYSTÉM.....	33
2.1 PRAKTICKÁ VYUŽITELNOST	33
2.2 TEPLotNÍ ROZSAH.....	33
2.3 PŘESNOST.....	33
2.4 TEPLotNÍ SONDA	33
2.5 ZPRACOVÁNÍ.....	33
2.6 NAPÁJENÍ	33
2.7 ZOBRAZENÍ	33
3. POUŽITÁ TEPLotNÍ SONDA	34
3.1 IDENTIFIKACE TYPu SNÍMAČE VE ZVOLENÉ TEPLotNÍ SONDĚ.....	35
3.2 KALIBRACE SNÍMAČE	37
3.2.1 Steinhart-Hartova aproximace.....	37
4. NÁVRH PŘIPOJENÍ SONDY K MIKROKONTROLÉRU.....	40
4.1 VÝPOČET HODNOT REZISTORŮ	41
4.2 VALIDACE FUNKČNOSTI SYSTÉMU.....	43
4.3 NÁVRH KOREKCE FUNKČNOSTI SYSTÉMU.....	46
4.4 KOREKCE FUNKČNOSTI SYSTÉMU.....	46
4.5 VALIDACE FUNKČNOSTI ZKORIGOVANÉHO SYSTÉMU	48
5. NÁVRH NAPÁJECÍ ČÁSTI.....	51
5.1 VOLBA KOMPONENT NAPÁJECÍ ČÁSTI.....	51
5.2 PRINCIP PWM	52
5.3 SCHÉMA NAPÁJECÍ ČÁSTI	53
6. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE.....	55
6.1 NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	55
6.2 PRAKTICKÁ REALIZACE DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	57

7. VALIDACE FUNKČNOSTI PRAKTICKÉ REALIZACE	59
8. ZÍSKÁNÍ HODNOT PRO LOOK-UP TABULKU.....	61
9. LOOK-UP TABULKA	63
10. MĚŘÍCÍ PROGRAM PRO MIKROKONTROLÉR.....	64
11. VALIDACE FUNKČNOSTI FINÁLNÍHO SYSTÉMU	65
11.1 NEJISTOTY MĚŘENÍ.....	67
12. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ	70
13. ZÁVĚR.....	71
LITERATURA.....	72
SEZNAM PŘÍLOH.....	75

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratky:

NTC	Negative temperature coefficient
PTC	Positive temperature coefficient
RTD	Resistance temperature detector
SI	International system of units
OZ	Operační zesilovač
VDC	Volts direct current
MCU	Microcontroller unit
PWM	Pulse width modulation
THT	True hole technology
SMD	Surface mount device
DPS	Deska plošného spoje
ADC	Analog-digital converter

Symboly:

U	napětí	[V]
I	proud	[A]
R	odpor	[Ω]
t	teplota	[$^{\circ}\text{C}$]
T	teplota	[K]
t'	teplota	[$^{\circ}\text{F}$]
L	délka	[m]
α	teplotní součinitel materiálu	[-]
α	teplotní součinitel odporu	[-]
α	Seebeckův koeficient	[$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$]
σ_0	Stefan-Boltzmannova konstanta	[$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
E_0	Hustota zářivého toku černého tělesa	[W/m^2]
ε	Emisivita	[-]
β	Teplotní koeficient	[K]
G	Zesílení	[-]

SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Schéma kapalinového teploměru.....	20
1.2	Schéma bimetalového pásku.....	20
1.3	Konstrukce bimetalového teploměru.....	21
1.4	Závislost hustoty zářivého toku černého tělesa na vlnové délce.....	22
1.5	Blokové schéma bezdotykového měřiče teploty.....	23
1.6	Závislost tolerance platinového teploměru na měřené teplotě.....	24
1.7	Detail na měřící hlavu RTD snímače, konkrétně PT1000.....	24
1.8	Symbol NTC a PTC termistoru.....	25
1.9	Závislost odporu NTC na teplotě ve srovnání s RTD snímačem.....	26
1.10	Graf srovnání chyby „klasické“ Steinhart-Hartovy rovnice a.....	27
1.11	Srovnání závislostí odporu na teplotě silistoru a polyswitchu.....	28
1.12	Princip Seebeckova jevu.....	29
1.13	Princip termočlánku.....	30
1.14	Srovnání závislostí jednotlivých typů termočlánků.....	31
1.15	Schéma termočlánku.....	31
3.1	Weber iGrill Pro ambient probe.....	34
3.2	Uchycení teplotní sondy Weber ke grilu.....	34
3.3	Graf závislosti odporu na teplotě naší sondy.....	35
3.4	Graf chyby Steinhart-Hartovy aproximace.....	39
3.5	Graf teplotní závislosti odporu pro Steinhart-Hartovu aproximaci.....	39
4.1	Zapojení termistoru do systému.....	40
4.2	Srovnání charakteristik pro $R_1 = 4,7 \text{ k}\Omega$ (vlevo) a $R_1 = 3 \text{ k}\Omega$ (vpravo).....	41
4.3	Vypočtená teplotní závislost výstupního napětí systému.....	43
4.4	Vypočtená závislost výstupního napětí systému na odporu termistoru.....	44
4.5	Modelovací schéma v programu LTspice.....	44
4.6	Vypočtená teplotní závislost výstupního napětí zkorigovaného systému.....	49
4.7	Vypočtená závislost výstupního napětí zkorigovaného systému na odporu termistoru.....	49
4.8	Modelovací schéma zkorigovaného systému v programu LTspice.....	50
5.1	Princip pulzně šířkové modulace.....	52
5.2	Typické zapojení napěťového měniče v obvodu.....	53
5.3	Navržené zapojení napěťového měniče v obvodu.....	53
5.4	Průběh výstupního napětí napájecí části na osciloskopu.....	54
6.1	Blokové schéma celého systému.....	55
6.2	3D vizualizace návrhu plošného spoje.....	56
6.3	Osazená deska plošného spoje.....	57
6.4	Osazená deska plošného spoje s připojeným mikrokontrolérem a displejem.....	58
6.5	Schéma připojení displeje k mikrokontroléru.....	58
7.1	Naměřené hodnoty výstupního napětí realizovaného systému.....	60
7.2	Vzorky hodnot AD převodníku pro teplotu $200 \text{ }^\circ\text{C}$	60
8.1	Závislost průměrované hodnoty AD převodníku na teplotě.....	62
11.1	Srovnání obou teploměrů na plynulou změnu teploty (Zahřívání).....	65
11.2	Srovnání obou teploměrů na plynulou změnu teploty (Ochlazování).....	66

SEZNAM TABULEK

1.1	Typy termočlánků.	30
1.2	Srovnání jednotlivých typů snímačů teploty.	32
3.1	Naměřené teploty pro identifikaci snímače.	35
4.1	Porovnání výsledných hodnot výstupního napětí.	45
4.2	Maximální přípustná hodnota vstupního napětí OZ.	45
5.1	Rozsah napájecího napětí mikrokontroléru.	51
5.2	Tabulka základních parametrů napěťového měniče.	51
7.1	Naměřené hodnoty pro ověření funkčnosti.	59
8.1	Naměřené hodnoty pro look-up tabulku.	61
11.1	Chyba přístroje multimetru Agilent 34401A.	67
11.2	Chyba AD převodníku mikrokontroléru ESP-32S.	68
11.3	Vypočítané nejistoty měření pro hodnoty look-up tabulky.	69

ÚVOD

Měření teploty patří mezi jedno z nejzákladnějších měření v dnešní době. Měřit teplotu je prakticky nutné všude. Ať už ve výrobních závodech, domácnostech, na lidském těle i v chytrých zařízeních atd.

Bimetalové teploměry a kapalinové teploměry už jsou zastaralá technologie. Nelze jimi měřit teploty např. na procesoru, proto s postupem času došlo k pokroku i u měření teploty, například bezdotykové snímání teploty.

Cílem této práce je návrh teplotního měřicího systému pro gril, který nabízí efektivní a spolehlivý způsob monitorování teploty.

Prvním úkolem bude výběr vhodného teplotního snímače, kterých je na trhu spousta, některé jsou pro mojí práci více vhodné a některé méně vhodné. Budu muset zohledňovat teplotní rozsah, citlivost, přesnost, odolnost a časovou odezvu.

Samotnému návrhu bude předcházet volba teplotního rozsahu a kalibrace na přesné hodnoty. Poté bude následovat výběr vhodných komponent. Zde bude kladen důraz na přesnost jednotlivých komponent.

Posléze se bude muset navržený systém otestovat, jestli změřené výsledky odpovídají teoretickým předpokladům. V této části se ověří důslednost při návrhu a výběru komponent.

Po otestování budu diskutovat dosažené výsledky s praktickou využitelností, která může být například budoucí návaznost na regulaci teploty v grilu. Nebo čistě jen na zobrazení teploty uvnitř grilu.

1. TEORETICKÝ ÚVOD

Teplota je jednou ze základních jednotek soustavy SI a její základní jednotka je Kelvin. Přepočet na stupně Celsia se provádí pomocí konstanty $k = 273,15$.

$$t = T - k \quad [^{\circ}C] \quad (1.1)$$

$$T = t + k \quad [K] \quad (1.2)$$

Kde: t – Teplota [$^{\circ}C$]
 T – Teplota [K]

Teplota $T = 0 K$ ($t = -273,15 ^{\circ}C$) se jinak nazývá absolutní nula. Je to teplota při které se úplně zastaví pohyb částic.

V anglicky mluvících zemích se používá jednotka stupeň Fahrenheita ($^{\circ}F$). Její přepočet je pak:

$$t = \frac{t' - 32}{1,8} \quad [^{\circ}C] \quad (1.3)$$

Kde: t' – Teplota [F]

Teplotu nejde měřit přímou metodou, měří se na základě známých fyzikálních jevů a principů.

Vlastnosti látek se mění s měnící se teplotou, tudíž se neměří přímo teplota, ale změna vlastností materiálu.

Mezi úplně základní princip měření teploty patří princip teplotní roztažnosti, kde se měřená teplota zjistí způsobem: „o kolik daná látka expandovala“. Teplotní roztažnost se dělí na:

- Teplotní objemová roztažnost (Kapalinové teploměry)
- Délková roztažnost pevných látek (Bimetalové teploměry)

Protože se ví, že teplota ovlivňuje nejen vlastnosti mechanické, ale i elektrické, může se teplota měřit i pomocí elektronických teploměrů. Tam patří:

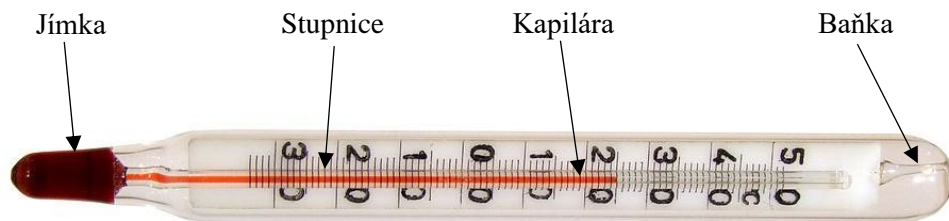
- Bezdotykové teploměry
- Kovové odporové teploměry
- Polovodičové odporové teploměry
- Termočlánky

U kovových odporových teploměrů a termistorů dochází se změnou teploty ke změně elektrického odporu. Termočlánek pracuje na principu rozdílné práce dvou různých kovů při různé teplotě. Speciální třídou teploměrů jsou teploměry bezdotykové. Každý způsob měření teploty je popsán v příslušné kapitole.

1.1 Kapalinové teploměry

Kapalinové teploměry jsou dilatační teploměry. Využívají teplotní objemové roztažnosti kapaliny pro měření teploty. Kapalina je uzavřena v jímce, napojená na kapiláru a celý systém je opatřen stupnicí. Zahříváním jímky kapalina uvnitř začne expandovat cestou nejmenšího odporu, tudíž dále do kapiláry. Výsledek expanze se odečte ze stupnice. Přesnost je dána poloměrem kapiláry a obsahem jímky.

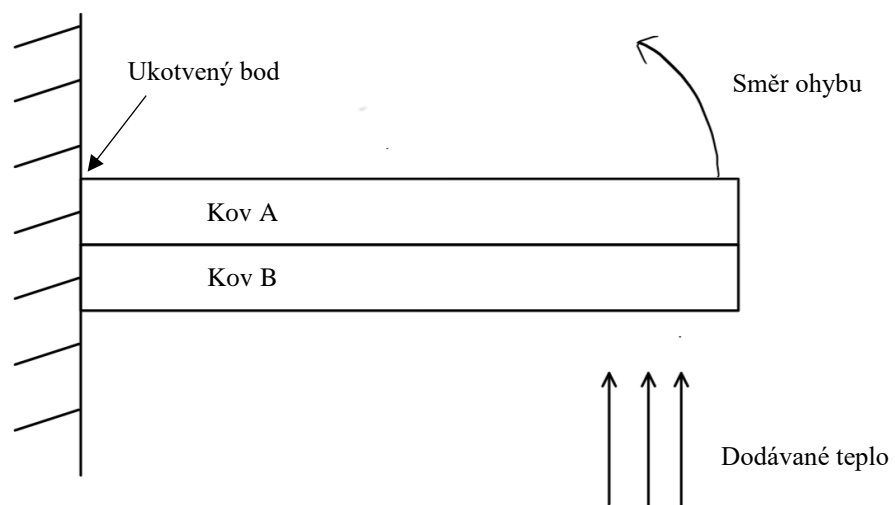
Nejrozšířenějším druhem kapalinových teploměrů byly rtuťové teploměry, které se nacházeli téměř v každé domácnosti, ale existují i jiné kapalinové teploměry, např. lihové. Ty se většinou využívaly hlavně v průmyslu, protože dokáží měřit teploty od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$. V dnešní době jsou ve velkém nahrazovány elektronickými teploměry.



Obrázek 1.1 Schéma kapalinového teploměru.

Rozsah teplot ve kterém měří rtuťový teploměr je od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až do $+900\text{ }^{\circ}\text{C}$. Měřicí rozsah teplot lihového teploměru je od $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $+260\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1].

1.2 Bimetalové teploměry



Obrázek 1.2 Schéma bimetalového pásku.

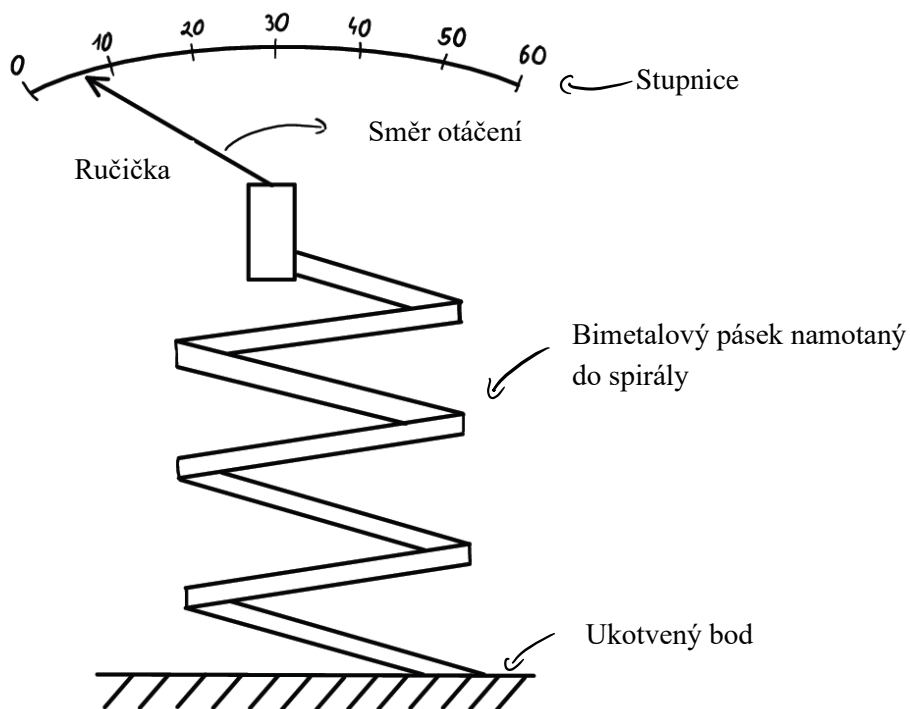
Bimetalové teploměry využívají principu délkové teplotní roztažnosti látek. Je to jev, při kterém se mění délka tělesa v závislosti na teplotě.

Na obrázku 1.2 jsou vidět 2 pásy kovů A, B. Kov B má větší délkovou teplotní roztažnost. Tím pádem dodáním tepla na oba kovy se začne kov B roztahovat víc než kov A a dojde k roztažení ve směru ohybu. Přidáním cejchované stupnice zjistíme velikost dodávaného tepla.

Změna délky se může vypočítat:

$$\Delta L = \alpha \cdot \Delta T \quad [m] \quad (1.4)$$

Kde: ΔL – Změna délky [m]
 α – Teplotní součinitel materiálu [–]
 ΔT – Změna teploty [K]



Obrázek 1.3 Konstrukce bimetalového teploměru.

1.3 Bezdotykové teploměry

Věda, která se zabývá bezdotykovým měřením teploty se nazývá pyrometrie a zařízení pyrometry [3].

Měření probíhá na základě Stefan-Boltzmannova zákona, který zní: „Každé těleso, které má nenulovou absolutní teplotu emituje záření, přičemž hustota zářivého toku je úměrná čtvrté mocnině absolutní teploty“ [5].

Hustota zářivého toku dokonale černého tělesa [5]:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot T^4 \quad [W/m^2] \quad (1.5)$$

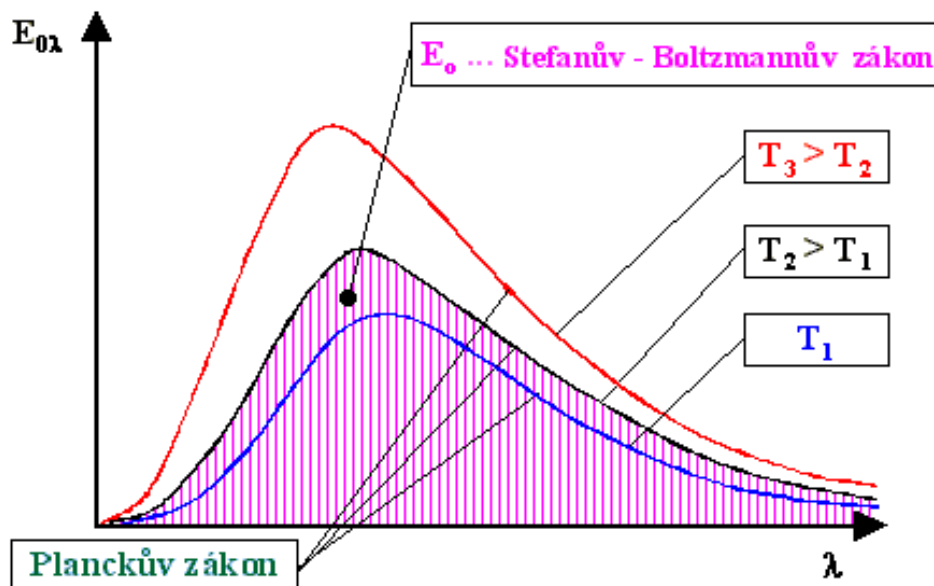
Kde: σ_0 – Stefan-Boltzmannova konstanta [$5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
 E_0 – Hustota zářivého toku černého tělesa [W/m^2]
 T – Teplota [K]

Pro nedokonalé zářiče, označovány jako šedé povrchy, se pak hustota zářivého toku vypočítá následovně [5]:

$$E_0 = \sigma_0 \cdot \varepsilon \cdot T^4 \quad [W/m^2] \quad (1.6)$$

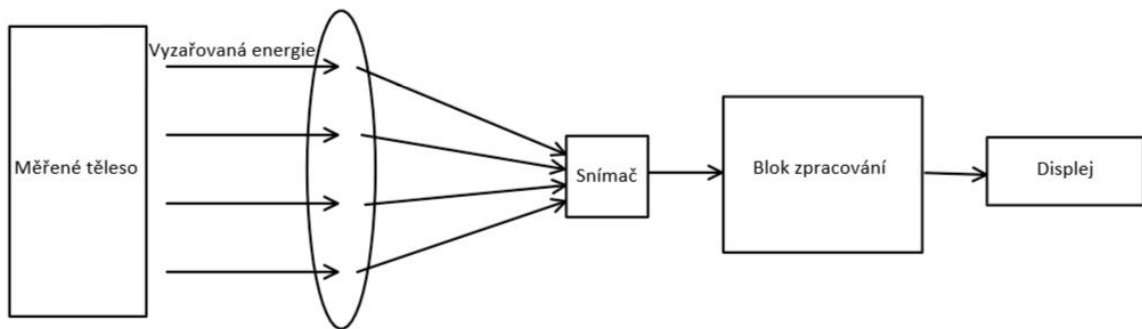
Kde: ε – Emisivita [–]

Černé těleso je nejdokonalejší zářič, protože má $\varepsilon = 1$, jak lze vidět ve vzorci 1.5. Šedá tělesa mají $\varepsilon = (0 - 1)$ a bílé tělesa mají $\varepsilon = 0$, tzn. jejich hustota zářivého toku je nulová.



Obrázek 1.4 Závislost hustoty zářivého toku černého tělesa na vlnové délce. [5]

Bezdotykové měřiče teploty pak pracují na principu, kdy zářivý tok ovlivňuje snímač pod optikou, která soustřeďuje dopadající zářivý tok na snímač.



Obrázek 1.5 Blokové schéma bezdotykového měřiče teploty.

Snímač, do kterého je soustřeďován dopadající zářivý tok, může být např. termočlávková baterie, což jsou sériově řazené termočlánky, nebo bolometr. To je tenkovrstvý odporový snímač teploty [2].

1.4 Kovové odporové teploměry

Kovové odporové teploměry neboli RTD (podle anglického výrazu resistance temperature detector), jsou elektrické součástky využívající teplotní závislost odporu kovu pro měření teploty.

Odpor se s rostoucí teplotou mění téměř lineárně a jelikož snímače typu RTD mají kladný teplotní koeficient, tak s rostoucí teplotou roste i odpor [6].

Pro teplotní rozsah od 0 °C do +100 °C platí [2]: (1.7)

$$R = R_0 \cdot (1 + \alpha \cdot T) \quad [\Omega]$$

Kde: α – Teplotní součinitel materiálu [-]
 R_0 – Odpor při 0°C [Ω]
 T – Teplota [K]
 R – Odpor [Ω]

Pro teplotní rozsah od -200 °C až do +850 °C platí [2]: (1.8)

$$R = R_0 \cdot (1 + A \cdot t + B \cdot t^2 + C \cdot t^3 \cdot (t - 100)) \quad [\Omega]$$

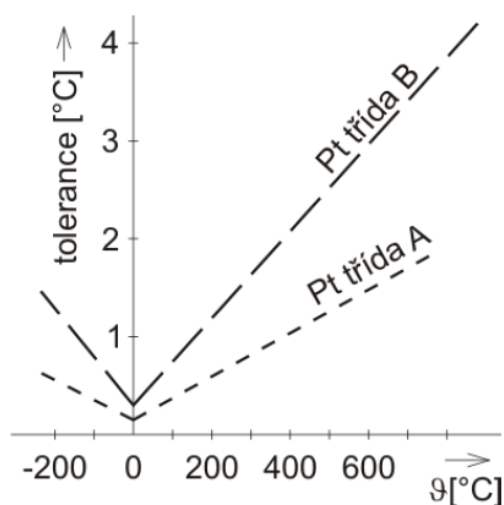
Kde: A, B, C – Koeficienty IEC 60751 standardu [-]
 R_0 – Odpor při 0°C [Ω]
 t – Teplota [°C]
 R – Odpor [Ω]

Jako nejčastější materiál se používá platina, nikl, měď a molybden. V tenkovrstvém provedení je kovová vrstva nanášena na izolační podložku nebo drátkový odpor, kde je kovový drátek namotaný na izolační materiál ve tvaru válce [2]. Celý systém je pak zapouzdřen do izolační vrstvy, ochranného pouzdra a nakonec opatřen vývody.

Asi nejrozšířenějším teploměrem tohoto druhu je PT100. Používá se velmi čistá platina pro dosažení vysoké citlivosti. Je to platinový odporový snímač teploty, který má při teplotě 0 °C odpor 100 Ω.

Platinové teploměry mají 2 toleranční třídy [2]:

- Třída A – od -200 °C do + (650±0,125) °C při 0 °C.
- Třída B – od -200 °C do + (850±0,25) °C při 0 °C.



Obrázek 1.6 Závislost tolerance platinového teploměru na měřené teplotě. [2]



Obrázek 1.7 Detail na měřící hlavu RTD snímače, konkrétně PT1000.

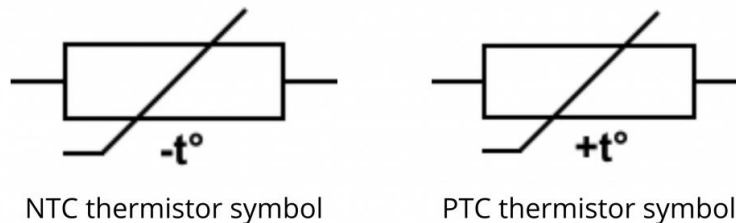
1.5 Polovodičové odporové teploměry

Polovodičové odporové teploměry, jinak termistory (od anglického slova thermistor, nebo thermal resistor), jsou elektrické součástky, konkrétně druhy rezistorů, u kterých je v ideálním případě rezistivita závislá jen na okolní teplotě.

Jsou obvykle vyrobeny z oxidů kovů, stlačeny do určitého tvaru, opatřeny vývody a zapouzdřeny do nepropustného materiálu (epoxid, sklo, keramika). Dle potřeby jsou vloženy do ochranného kovového pouzdra [7].

Termistory se dělí na 2 druhy:

- PTC - Positive temperature coefficient
- NTC - Negative temperature coefficient



Obrázek 1.8 Symbol NTC a PTC termistoru. [8]

NTC termistory (dále už jen NTC) jsou termistory s negativním teplotním koeficientem, tzn. s rostoucí teplotou klesá odpor.

PTC termistory (dále už jen PTC) jsou termistory s pozitivním teplotním koeficientem, tzn. s rostoucí teplotou stoupá odpor.

Velkou výhodou je nízká pořizovací cena, robustnost a odolnost vůči mechanickému namáhání.

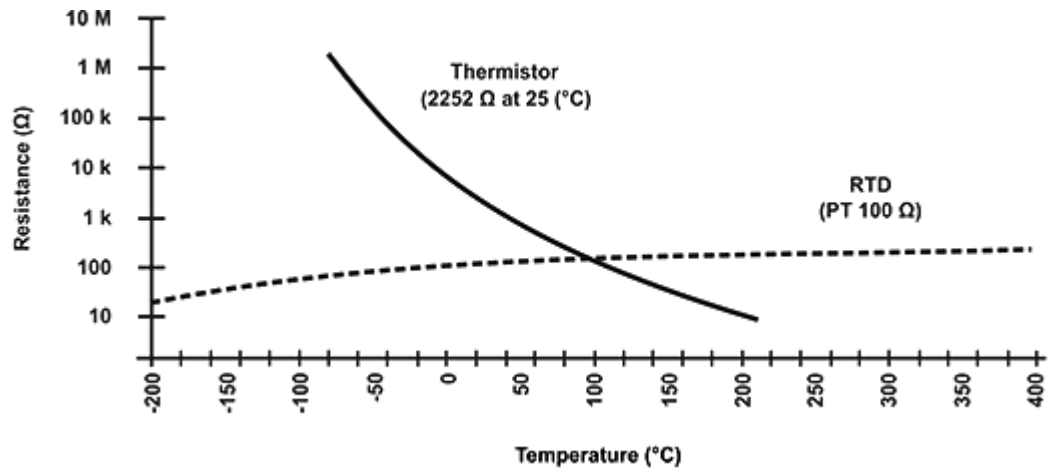
Nevýhodou je velká nelinearita a malý rozsah měřících teplot, typicky -20 °C až $+200\text{ °C}$. Někdy se lze setkat s typy, které mají rozsah až do $+250\text{ °C}$. Oproti tomu nejběžnější platinový RTD snímač PT100 má rozsah měřících teplot od -200 °C až do $+850\text{ °C}$. Termistory mají delší časovou odezvu (RTD 1-7 s, termistory 6-14 s) [7].

1.5.1 NTC termistory

Jak již bylo zmíněno výše, jsou to druhy polovodičových snímačů teploty, u kterých s rostoucí teplotou klesá elektrický odpor. Na rozdíl od RTD snímačů, kde je závislost odporu na teplotě skoro lineární, u NTC je závislost exponenciální.

Teplotní citlivostní koeficient je přibližně 5krát větší než u jejich PTC ekvivalentů (Silistorů) a 10krát větší než u RTD snímačů [8].

Označení NTC ---k udává, jaký je odpor při pokojové teplotě 25 °C. NTC 100K má při teplotě 25 °C odpor 100 kΩ, NTC 50K má při pokojové teplotě odpor 50 kΩ, atd.



Obrázek 1.9 Závislost odporu NTC na teplotě ve srovnání s RTD snímačem. [8]

Jak jde vidět z obrázku 1.9, závislost odporu na teplotě u NTC je klesající exponenciála. Tudiž bude značně náročnější přepočítání odporu na výslednou teplotu.

Na přepočet z odporu na teplotu se nejčastěji používá Steinhart-Hartova rovnice [3]:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R^3) \quad [K^{-1}] \quad (1.9)$$

Kde: A, B, C – Koeficienty odvozené z měření [-]
 T – Teplota [K]
 R – Odpor [Ω]

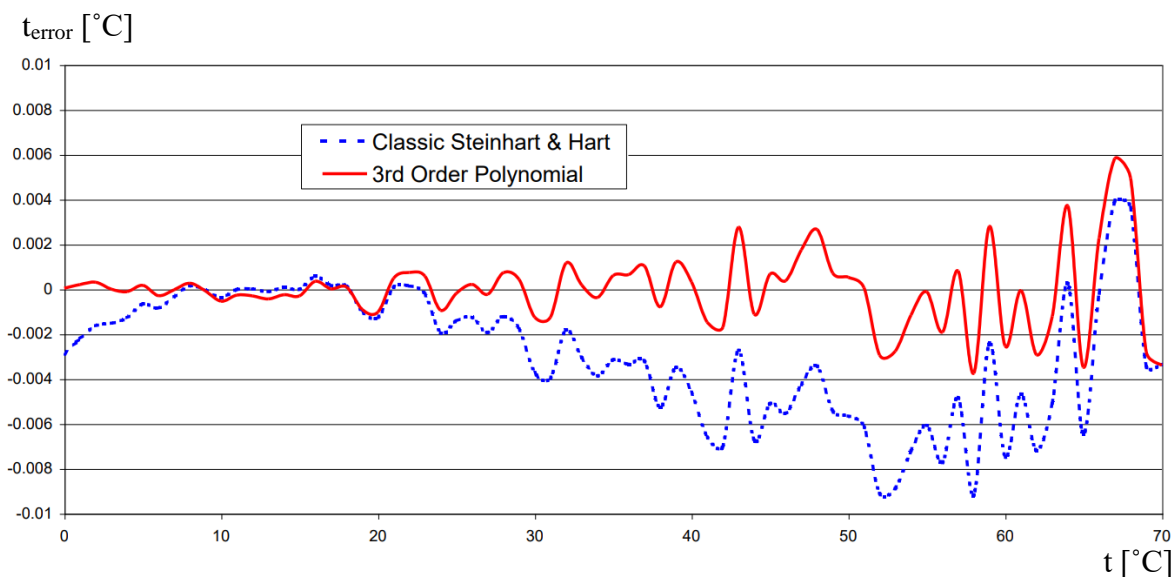
Tahle forma Steinhart-Hartovy rovnice se označuje jako „klasická Steinhart-Hartova rovnice“. Pro použití téhle rovnice je potřeba změření 3 známých teplot. Obvykle 2 krajní hodnoty rozsahu a střední hodnota, protože použití hodnot dál od sebe zajistí větší přesnost [4].

Steinhart-Hartova rovnice se může také zapsat ve tvaru [3]:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R^2) + D \cdot \ln(R^3) + E \cdot \ln(R^4) + \dots \quad [K^{-1}] \quad (1.10)$$

Kde: A, B, C, D, E – Koeficienty odvozené z měření [-]
 T – Teplota [K]
 R – Odpor [Ω]

Tento tvar se ve označuje jako „3rd order polynomial“ (Česky „polynom 3. řádu“) [3]. Takhle by rovnice mohla pokračovat teoreticky až do nekonečna. Dostali bychom přesnější výsledek, ale už po použití rovnice 1.9 je chyba natolik malá, že používání rovnice 1.10 bylo zbytečné a kladlo to extra nárok na výpočetní výkon.



Obrázek 1.10 Graf srovnání chyby „klasické“ Steinhart-Hartovy rovnice a „Polynomu 3. řádu“ Steinhart-Hartovy rovnice. [3]

Z obrázku 1.10 lze vidět, že chyba je v řádech tisícín, což je pro běžé použití více než dostatečná přesnost.

1.5.2 PTC termistory

Jsou to druhy polovodičových snímačů teploty, u kterých s rostoucí teplotou stoupá elektrický odpor.

Dělí se na 2 skupiny:

- Silistory
- Polyswitche

Obě skupiny se liší materiálem ze kterého jsou vyrobeny, vnitřní strukturou a způsobem jakým jsou vyrobeny [8].

Silistory

Silistory jsou první skupinou PTC.

Obsahují křemík jako polovodičový materiál. Jsou používány pro svojí lineární závislost odporu na teplotě. Sklon lineární charakteristiky je ale relativně malý skrz celý měřicí rozsah, ten je typicky od -20°C do $+150^{\circ}\text{C}$. Mohou vykazovat záporný teplotní koeficient nad teplotou větší jak $+150^{\circ}\text{C}$. Jejich teplotní koeficient je v rozsah $0,7 - 0,8 \text{ } \%/^{\circ}\text{C}$ [8].

U silistorů s teplotou nad $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ dojde k tepelnému průrazu. Tzn., teplo akumulované na polovodičovém materiálu se nestíhá odvádět, v důsledku čehož dochází k uvolňování elektronů z krystalické mřížky a vzniku volného elektronu a díry, což vede ke zvýšení vodivosti a snížení odporu.

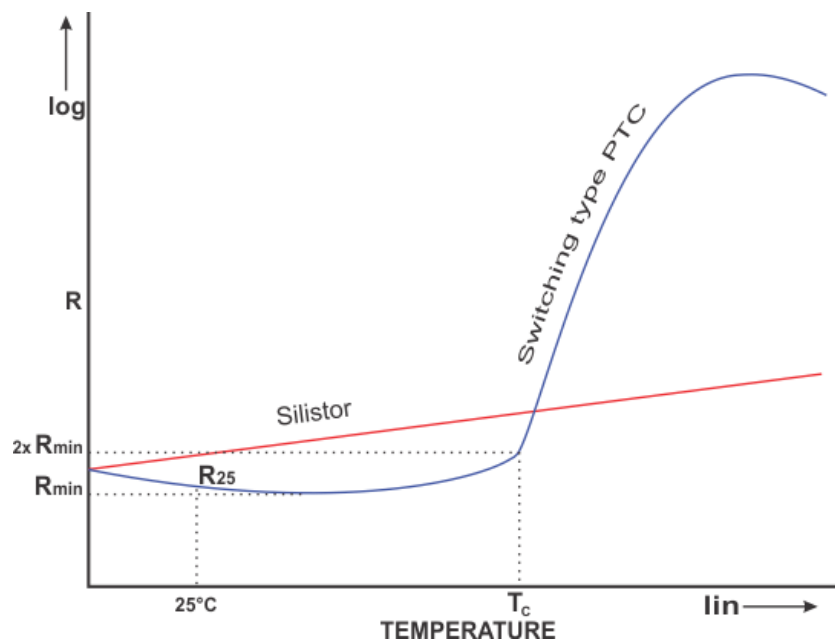
Polyswitche

Druhou skupinou PTC jsou polyswitche. Na trhu se lze setkat s názvy jako polyfuse, semifuse, multifuse, resetable fuse (Česky „vratná pojistka“). Nepoužívají se jako snímače teploty, ale spíše jako tepelné pojistky (proto některé názvy „-fuse“).

Podle materiálu se mohou dělit na keramické a polymerové. Vodivou vrstvu tvoří jemný uhlík a ta je zabalena v ochranném polymeru / keramice. Z obrázku 1.11 lze vidět, jak charakteristika polyswitchů do určité teploty klesá. To je způsobeno tím, že se nejprve začne zahřívat uhlíková vrstva, což vede ke zvýšení vodivosti a poklesu odporu.

Od určité teploty T_c (Tranzitní teplota) [8] se začne keramika/polymer rozpínat a začíná přecházet do amorfního stavu, tedy kdy nemá pravidelnou krystalickou mřížku. Rozpínající keramika/polymer způsobí, že se uhlíková vrstva přeruší a dojde k nárůstu odporu. Po ochlazení se keramika/polymer vrátí do původního stavu a dojde k poklesu odporu a obnovení vodivosti. Od toho název „resetable fuse“ (vratná pojistka).

Používají se jako PTC ohřivače. Není potřeba je nijak regulovat, protože se regulují sami. Od určité teploty přestanou vést proud a tudíž dojde k zastavení ohřívání a ohřivač se začne ochlazovat.

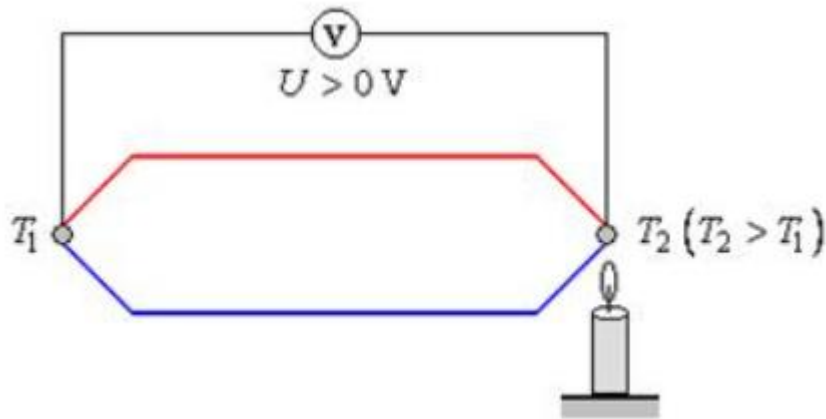


Obrázek 1.11 Srovnání závislostí odporu na teplotě silistoru a polyswitche. [8]

1.6 Termočlánky

Snímače teploty založené na Seebeckově jevu, tedy jevu kdy se tepelná energie převádí na elektrickou.

„V uzavřeném obvodu realizovaném ze dvou materiálů různých vodičů nebo polovodičů protéká elektrický proud tehdy, mají-li spoje rozdílnou teplotu. Jestliže obvod kdekoliv rozpojíme, bude na vzniklých svorkách měřitelné elektrické stejnosměrné napětí“ [2].



Obrázek 1.12 Princip Seebeckova jevu. [9]

Pro malé rozdíly teplot obou spojů je závislost napětí na teplotě lineární a lze ji vyjádřit vztahem [2]:

$$U = \alpha_{12} \cdot (T_1 - T_2) \quad [V] \quad (1.11)$$

Kde: $\alpha_{1,2}$ – Seebeckův koeficient [$\mu\text{V} / ^\circ\text{C}$]

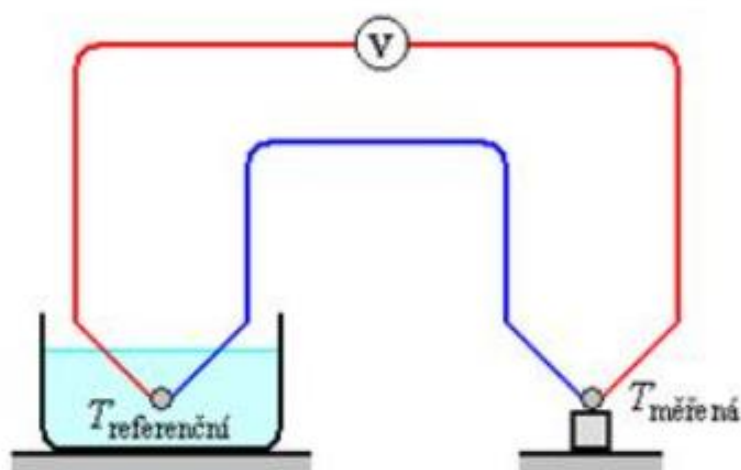
$T_{1,2}$ – Teplota obou spojů [K]

U – Napětí [V]

Termoelektrické napětí, jak je vidět z rovnice 1.11, nezávisí na vedení tepla nebo rychlosti ohřevu. Závisí jen na rozdílu teplot a na daných materiálech. Hodnota Seebeckova koeficientu pro kovy je v rozmezí 10^{-6} až 10^{-5} a pro polovodiče v rozmezí 10^{-5} až 10^{-3} [9].

Pro jednoduchost je lepší udržet rozdíly teplot v desítkách $^\circ\text{C}$. Kdyby byl rozdíl teplot větší, mohly by se nám objevit i kvadratické a kubické členy.

Aby termočlánek fungoval pořádně, musí se mezi oběma spoji vytvořit teplotní rozdíl. Toho lze dosáhnout způsobem, který je uveden na obrázku 1.13. Jeden konec se přivede na referenční teplotu, která je známá, a druhý konec se bude zahřívat. Termoelektrické napětí bude rovno jen jejich rozdílu a jelikož je známá jedna teplota, tak tu druhou nebude problém dle rovnice 1.11 dopočítat.



Obrázek 1.13 Princip termočlánku. [9]

Opačný jev k Seebeckově jevu je Peltierův jev. Ten se používá primárně v Peltierových článcích, které slouží jak k ohřevu, tak chlazení.

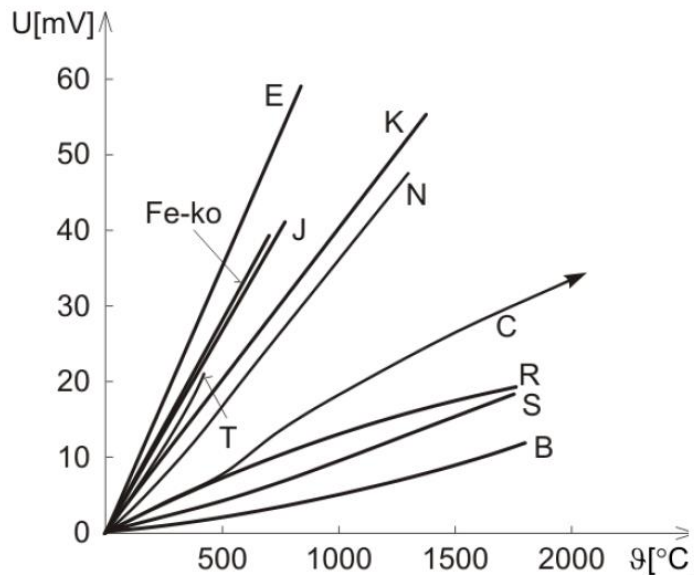
Když se do obvodu realizovaného ze dvou materiálově rozdílných kovů připojí stejnosměrné napětí, bude se nám jeden spoj ochlazovat a druhý oteplovat v závislosti na polaritě.

Tabulka 1.1 Typy termočlánků. [2]

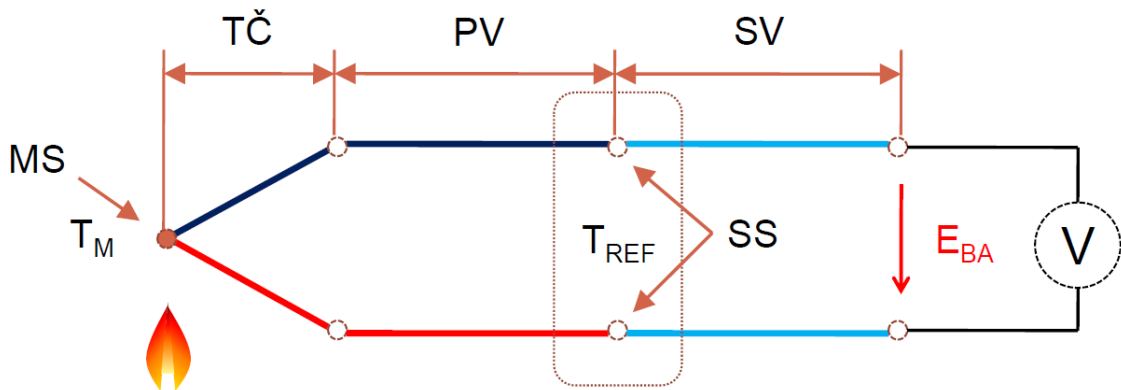
Typ	Kladná větev	Záporná větev	Rozsah [°C]
B	Pt (70,4%), Rh (70,4%)	Pt (94%), Rh (6%)	100 - 1000
E	Ni (90%), Cr (10%)	Ni (55%), Cu (45%)	0 - 800
J	Fe (99,5%)	Ni (55%), Cu (45%)	20 - 700
K	Ni (90%), Cr (10%)	Ni (95%), Al (2%), Mg (2%), Si (1%)	0 - 1100
N	Ni (88,4%), Cr (14,2%), Si (1,4%)	Ni (95,5%), Si (4,4%), Mg (0,1%)	0 - 1100
R	Pt (87%), Rh (13%)	Pt (100%)	0 - 1600
S	Pt (90%), Rh (10%)	Pt (100%)	0 - 1550
T	Cu (100%)	Ni (55%), Cu (45%)	-185 - 1350

Srovnání jednotlivých typů termočlánků viz obrázek 1.14.

Kladná větev má vyšší výstupní práci elektronu než záporná větev. Proto se v záporné větvi uvolní více elektronů a stává se zápornější. Tzn. elektrický potenciál působí ve směru od kladné větve k záporné větvi.



Obrázek 1.14 Srovnání závislostí jednotlivých typů termočlánků. [2]



Obrázek 1.15 Schéma termočlánku. [2]

$T_{\check{C}}$ – termoelektrický článek, P_V – prodlužovací vedení, S_V – spojovací vedení, S_S – srovnávací vedení, M_S – měřicí spoj, T_M – měřená teplota, T_{REF} – referenční teplota, E_{BA} – termoelektrické napětí [2].

Prodlužovací vedení a termoelektrický článek jsou vyrobeny ze stejné dvojice kovů. Referenční teplota je známá teplota. Spojovací vedení je vyrobeno z jednoho materiálu (např. měď). Voltmetr ukazuje napětí přímo úměrné rozdílu teplot.

Největší nevýhodou termočlánků je kalibrace. Jak již bylo řečeno, termočlánky neměří přímo teplotu měřeného objektu ale pouze rozdíl teplot mezi referenčním uzlem a uzlem měřeným. Proto je nutno termočlánek správně zkalibrovat.

1.7 Srovnání jednotlivých typů snímačů teploty

Tabulka 1.2 Srovnání jednotlivých typů snímačů teploty.

Typ	RTD	NTC	Silistor	Termočlánek
Teplotní rozsah [°C]	-200 – 850	-20 – 250	-20 – 150	-185 – 1600
Citlivost	+	++	+++	–
Časová odezva [s]	1 – 7	6 – 14		
Linearita	++	–	++	+

U termočláneků časová odezva závisí na velikosti měřené teploty. V nižších teplotách bude časová odezva v jednotkách sekund. Ve vyšších teplotách už to budou desítky sekund. U silistorů to záleží na velikosti disipační energie (disipace je nevratná změna energie na jinou).

RTD snímač má zbytečně velký rozsah a bylo by jej obtížné kalibrovat pro důležitý teplotní rozsah, který je od +100 °C do 250 °C. Silistor nemá dostatečný teplotní rozsah. A termočlánek má opět zbytečně velký rozsah, takže by jej bylo opět složité zkalibrovat na náš rozsah.

Maximální teplota v grilech bývá 300 °C. To je ale mezní případ, který nastane pouze když budeme dlouho držet zavřené víko a měli naplno otevřené průduchy na palivo. Takový případ nemůže v podstatě nikdy nastat. Proto bych jako nejvhodnější snímač zvolil NTC termistor, který má vyhovující teplotní rozsah a citlivost. Nevýhodou je velká nelinearita. Dlouhá časová odezva v grilech nevádí, protože teplota v grilech nestoupá natolik rychle aby se výrazně projevila chyba mezi teplotou skutečnou a naměřenou.

2. POŽADAVKY NA MĚŘÍCÍ SYSTÉM

Kapitola popisující požadavky, kterých by měl navrhovaný měřicí systém dosáhnout.

2.1 Praktická využitelnost

Jedním z nejdůležitějších parametrů je praktická využitelnost, která by měla být ve všech grilech, jak na pevná paliva, tak na plyn. V udírnách by navrhovaný měřicí systém taktéž mohl najít využitelnost.

2.2 Teplotní rozsah

Teplotní rozsah by měl být uzpůsoben podle typických hodnot uvnitř grilu. Ty jsou typicky 100-250 °C. Pro udírny pak 60-150 °C. Pro tuto práci volím teplotní rozsah od 20 °C do 260 °C z důvodu možnosti měřitelnosti teploty i při zahřívání grilu.

2.3 Přesnost

Přesnost by měla být zvolena vzhledem k využitelnosti. Jelikož praktická využitelnost je měření teploty uvnitř grilu, tak není nutné měřit teplotu s přesností na 0,01 °C. Pro tuto práci jsem zvolil přesnost do 1 °C.

2.4 Teplotní sonda

Nejvhodnější sonda bude komerčně dostupná sonda uzpůsobená na rozsah teplot uvnitř grilu.

2.5 Zpracování

Pro zpracování naměřených hodnot musí být zvolen mikrokontrolér s AD převodníkem o minimálním rozlišení 12 bitů pro zajištění požadované přesnosti.

2.6 Napájení

Jestliže chci docílit nejlepší praktické využitelnosti musí být řešeno napájení z integrovaného zdroje (například baterie). Celý systém musí být navržen tak, aby byl schopen provozu i několik hodin.

2.7 Zobrazení

Pro zobrazení bude postačovat jakýkoli obyčejný displej, na který se budou vypisovat hodnoty teploty uvnitř grilu.

3. POUŽITÁ TEPLOTNÍ SONDA

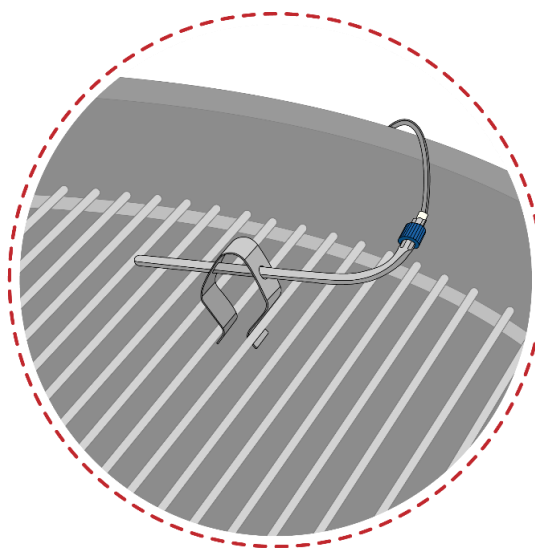
Kapitola, ve které zvolím teplotní sondu, udělám identifikaci snímače uvnitř zvolené sondy a provedu kalibraci.

Po konzultaci s vedoucím práce jsem se rozhodl použít teplotní sondu Weber iGrill Pro ambient probe. Výrobce udává měřící rozsah teplot od $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $300\text{ }^{\circ}\text{C}$. Teplotní sonda je zakončena 2,5mm 2-pólovým konektorem. Další parametry výrobce neuvádí.



Obrázek 3.1 Weber iGrill Pro ambient probe.

Podle výrobce slouží zvolená teplotní sonda na měření teploty roštu díky přidanému plíšku, který se při zamáčknutí uchytí mezi 2 tyčky roštu (jak je předvedeno na obrázku 3.2).



Obrázek 3.2 Uchycení teplotní sondy Weber ke grilu. [4]

3.1 Identifikace typu snímače ve zvolené teplotní sondě

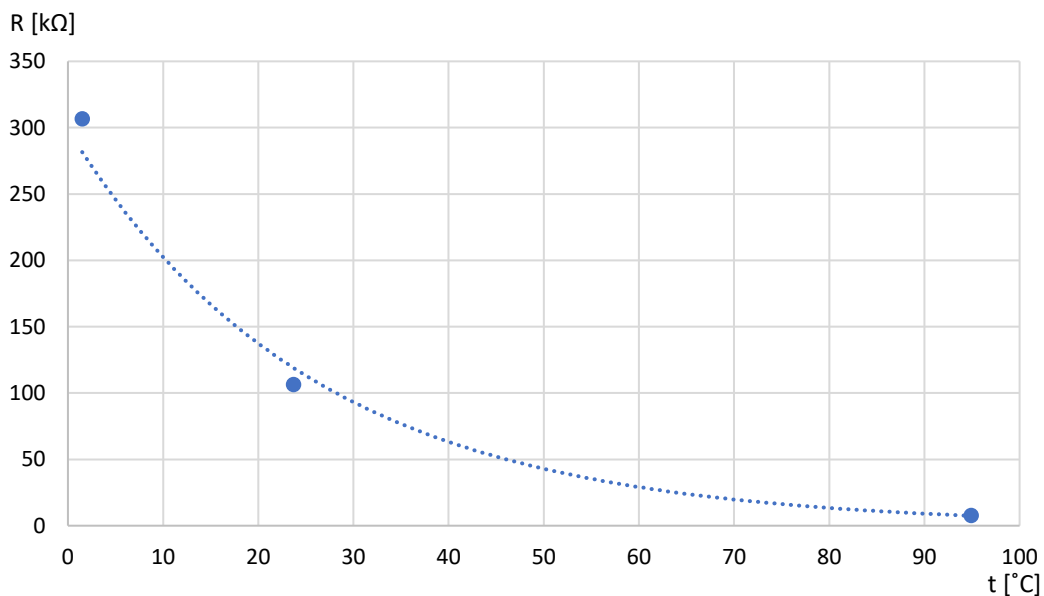
Protože výrobce nikde neuvádí typ teplotního snímače, tudíž i jakékoliv další parametry, musel jsem typ teplotního snímače určit na základě měření.

Proměřil jsem si snímač na třech teplotách. V okolí 0 °C, pokojová teplota a v okolí +100 °C. Jako měřenou veličinu jsem si prvně zvolil odpor, protože v případě, že by se odpor nijak moc neměnil, bylo by zřejmé, že se jedná o termočlánek.

Prvně jsem do termosky nalil směs vody a ledu a chvíli jsem počkal, aby se teplota vody ustálila. Jako referenční teploměr jsem použil lékařský (rtuťový) teploměr. Dále jsem vložil do vody zkoumaný snímač (snímač je vybaven kovovým ochranným krytem, tudíž voda by jej neměla poškodit) a odečetl jsem hodnotu odporu. Poté jsem do termosky nalil vodu těsně pod bodem varu a znovu jsem odečetl hodnotu odporu. Nakonec jsem jen odečetl hodnotu odporu při pokojové teplotě.

Tabulka 3.1 Naměřené teploty pro identifikaci snímače.

t [°C]	R [kΩ]
1,5	306,70
23,7	106,40
94,9	7,72



Obrázek 3.3 Graf závislosti odporu na teplotě naší sondy.

Po odměření a vynesení do grafu jsem zjistil, že odpor exponenciálně klesá se stoupající teplotou. Lze také vidět, že v okolí pokojové teploty je odpor snímače 100 kΩ. Tudíž můžu se 100% jistotou říci, že se jedná o snímač NTC 100K.

Teplotní koeficient β lze vypočítat podle následující rovnice [11]:

$$\beta = \frac{\ln(R_1) - \ln(R_2)}{\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}} \quad [K] \quad (3.2)$$

Kde: $T_{1,2}$ – 2 různé teploty [K]
 $R_{1,2}$ – Hodnoty odporů při $T_{1,2}$ [$\mu V / ^\circ C$]
 β – Teplotní koeficient [K]

Po dosazení teplot dostatečně daleko od sebe zjistím teplotní koeficient β . Pro výpočet teplotního koeficientu β , pro zvolenou sondu, jsem využil zkalibrované hodnoty naměřené v kapitole 3.2 *Kalibrace snímače*.

$$\beta = \frac{\ln(125\,264) - \ln(525)}{\frac{1}{(19,94 + 273,15)} - \frac{1}{(200,18 + 273,15)}} = 4213,86 \text{ K}$$

Výrobce udává teplotní rozsah od $-30 \text{ }^\circ C$ do $+300 \text{ }^\circ C$. Teplotní sonda Weber je tedy speciálním druhem NTC 100K s větším teplotním rozsahem.

Výhody námi zvolené teplotní sondy jsou:

- Vyhovující teplotní rozsah
- Dostatečná přesnost
- Relativně nízká cena

3.2 Kalibrace snímače

Aby snímač fungoval přesně, je potřeba jej proměřit na přesné hodnoty odporu a teploty pro celý teplotní rozsah.

Při první měření jsem testoval vliv teplot v okolí 0 °C. Měření probíhalo v teplotní komoře Ametek ETC 125A na multimetru Agilent 34410A.

Druhé měření probíhalo od 20 °C do 200 °C. Pro tyto teploty jsem použil kalibrátor AOIP thermys 150 (přesnost 0,006 % ze zobrazované hodnoty + 0,03 °C) a snímač teploty PT100/3850 s přesností ($\pm 0,15 + 0,002$) °C. Měření probíhalo v teplotní komoře VOLTCRAFT TC-150 kvůli tomu, že teplotní komora Ametek ETC 125A pracuje na bázi Peltierova jevu, která má rozsah měřících teplot od -20 °C do 120 °C. Z toho důvodu jsem jí nemohl na měření teplot kolem 200 °C použít. Proto jsem od 20 °C vyměnil teplotní komoru abych dostal výsledky z jedné instance měření pro rozsah teplot, který je pro danou problematiku důležitý.

Naměřené hodnoty se nacházejí v příloze A. V příloze B se nacházejí proměřené hodnoty v okolí 0 °C. Vynesené grafy se nachází v příloze C.

3.2.1 Steinhart-Hartova aproximace

Podle naměřených dat jsem udělal Steinhart-Hartovu aproximaci, pomocí které budu schopen určit teplotu při jakékoliv hodnotě odporu. Steinhart-Hartova aproximace je blíže popsána v kapitole 1.5.1 *NTC termistory*.

Následující vzorce ukazují postup při zpracování Steinhart-Hartovy aproximace [13]:

- Vybral jsem hodnoty odporů při teplotách:
 - 19,94 °C \approx 125 264 Ω
 - 75,33 °C \approx 14 181 Ω
 - 200,18 °C \approx 525 Ω
- Pro zjištění koeficientů A,B a C se využije následující postup:

$$L_1 = \ln(R_1); L_2 = \ln(R_2); L_3 = \ln(R_3) \quad [-] \quad (3.3)$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1}; Y_2 = \frac{1}{T_2}; Y_3 = \frac{1}{T_3} \quad [-] \quad (3.4)$$

$$\gamma_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1}; \gamma_2 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} \quad [-] \quad (3.5)$$

$$C = \left(\frac{\gamma_3 - \gamma_1}{L_3 - L_1} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} \quad [-] \quad (3.6)$$

$$B = \gamma_2 - C \cdot (L_1^2 + L_1 \cdot L_2 + L_2^2) \quad [-] \quad (3.7)$$

$$A = Y_1 - L_1 \cdot (B + C \cdot L_1^2) \quad [-] \quad (3.8)$$

- Pro zjištění teploty z hodnoty odporu využiji vztah z kapitoly 1.5.1 NTC termistory:

$$\frac{1}{T} = A + B \cdot \ln(R) + C \cdot \ln(R^3) \quad [K^{-1}] \quad (1.9)$$

- Při opačném procesu, tedy, když znám teplotu a neznám hodnotu odporu, využiji následujících vztahů [13]:

$$x = \frac{1}{C} \cdot \left(A - \frac{1}{T} \right) \quad [-] \quad (3.9)$$

$$y = \sqrt{\left(\frac{B}{3 \cdot C} \right)^3 + \left(\frac{x}{2} \right)^2} \quad [-] \quad (3.10)$$

$$R = e^{\left(\sqrt[3]{(y - \frac{x}{2})} - \sqrt[3]{(y + \frac{x}{2})} \right)} \quad [\Omega] \quad (3.11)$$

Dále jsem si potřeboval určit teplotní rozsah, který je pro moji problematiku relevantní. Ten jsem zvolil od 20 °C do 260 °C. V kapitole 3. *Použitá teplotní sonda* jsem ukázal přichycení sondy k roštu grilu. Jenže teplota na roštu může dosáhnout v některých případech i 300 °C. Takové teploty se ale na roštu grilu objevují velmi zřídka a pro jejich dosažení bychom museli držet víko grilu zavřené relativně dlouho.

Výpočet koeficientů A, B a C s dosazením do vzorců 1.9, 3.3 – 3.11 se nachází v příloze D. V příloze A jsou hodnoty odporů zjištěné pomocí Steinhart-Hartovy aproximace.

Koeficienty A, B a C odvozené pro moji práci:

$$A = 795,68 \cdot 10^{-5}$$

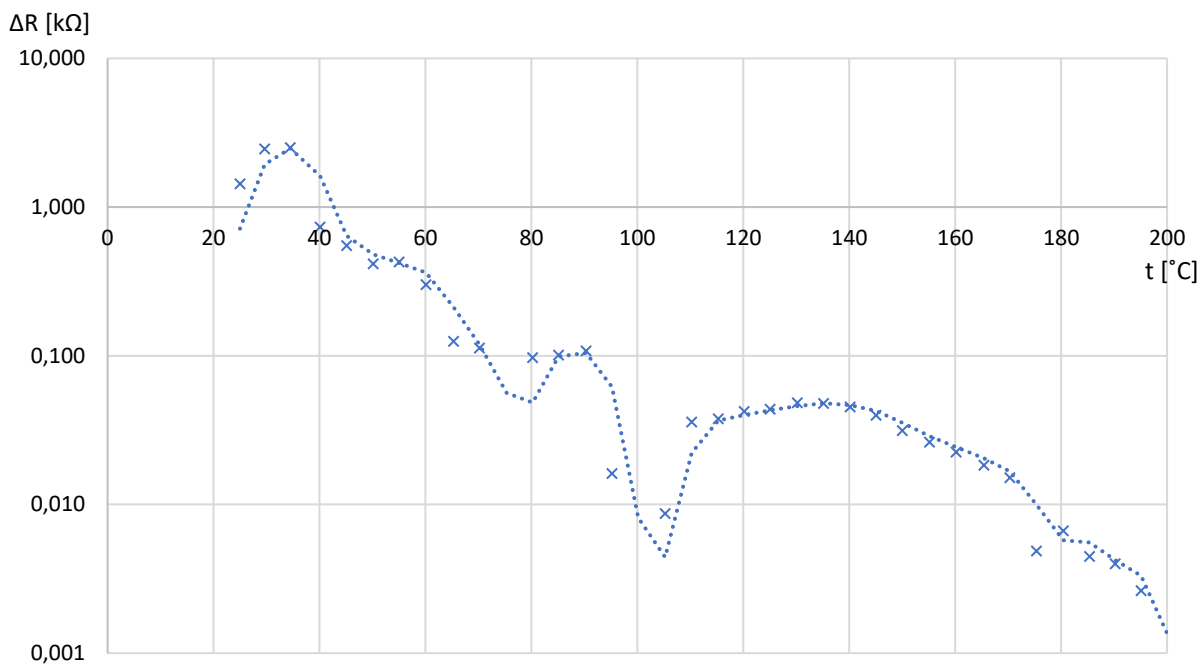
$$B = 205,25 \cdot 10^{-5}$$

$$C = 127,97 \cdot 10^{-9}$$

Krajním bodům mého teplotního rozsahu přísluší hodnoty odporu:

- 20 °C ≈ 124 925,59 Ω

- 260 °C ≈ 176,84 Ω

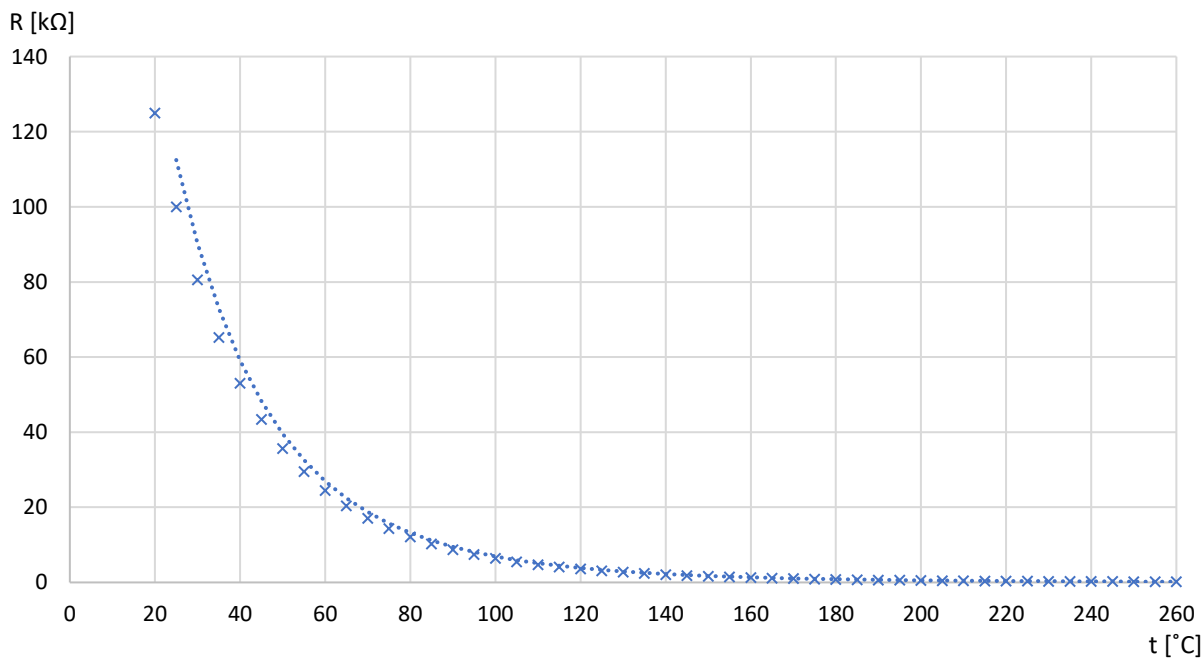


Obrázek 3.4 Graf chyby Steinhart-Hartovy aproximace.

Obrázek 3.4. zachycuje chybu mezi daty naměřenými a daty získanými pomocí Steinhart-Hartovy aproximace podle rovnice:

$$\Delta R = R_{NAMĚŘENÉ} - R_{VYPOČÍTANÉ} \quad (3.12)$$

Pro osu y je zvoleno logaritmické měřítko, jelikož ve vyšších teplotách, kde se hodnota pohybuje řádově v nižších stovkách Ω , by nebyla vidět žádná chyba.



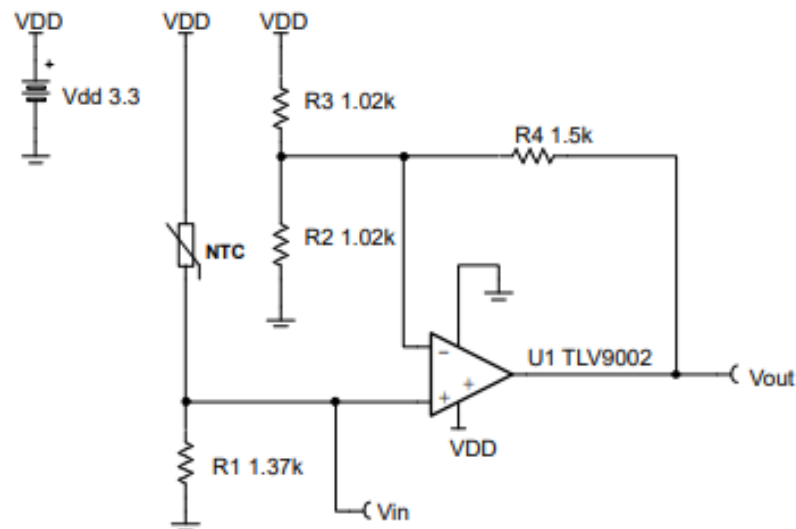
Obrázek 3.5 Graf teplotní závislosti odporu pro Steinhart-Hartovu aproximaci.

4. NÁVRH PŘIHOJENÍ SONDY K MIKROKONTROLÉRU

V této kapitole budu řešit výběr mikrokontroléru a následný návrh připojení zvolené teplotní sondy k mikrokontroléru.

Nyní jsem schopen, díky Steinhart-Hartově aproximaci (kapitola 3.2 *Kalibrace snímače*) získat pro jakoukoliv hodnotu odporu odpovídající hodnotu teploty. Je potřeba tuhle změnu hodnoty odporu převést na změnu hodnoty napětí. Tu provedu pomocí zapojení na obrázku 4.1. Pro zpracování v mikrokontroléru, který jsem zvolil ESP-32S. Má integrovaný 12-bitový AD převodník s rozsahem 0-3,3 V s rozlišením 0,806 mV. Výhoda mikrokontroléru je cenová dostupnost, dostatečný výkon a jednoduchost při programování.

Zapojení na obrázku 4.1 vychází ze zapojení operačního zesilovače jako diferenční zesilovač. Termistor je společně s odporem R1 zapojen jako napěťový dělič, který přes celý měřicí rozsah termistoru dá změnu napětí v rozmezí 0-3,3 V. Napěťový dělič R2+R3 slouží k offsetu a celkovému přizpůsobení měřicího rozsahu termistoru. Zkráceně, nebude zapotřebí měřit na rozsahu od -30 °C do 300 °C, ale na rozsahu od 20 °C do 260 °C, který je pro tuto práci zcela dostačující.



Obrázek 4.1 Zapojení termistoru do systému. [12]

Výhodou tohoto zapojení, jak již bylo zmíněno, je možnost nastavit měřicí rozsah na požadovaný bez nutnosti kupovat si NTC termistor o požadovaném rozsahu.

Zapojení uvedené na obrázku 4.1 i s hodnotami rezistorů jsou převzaty ze stránek Texas Instruments [12]. Pro mou teplotní sondu je nutné si spočítat nové hodnoty rezistorů, protože od termistoru uvedeného na obrázku 4.1 se můj termistor liší typem a požadovaný teplotní rozsah je taktéž jiný.

4.1 Výpočet hodnot rezistorů

Všechny použité vzorce jsou převzaty ze stránek Texas Instruments [12].

$$R_1 = \sqrt{R_{NTC-MAX} \cdot R_{NTC-MIN}} \quad [\Omega] \quad (4.2)$$

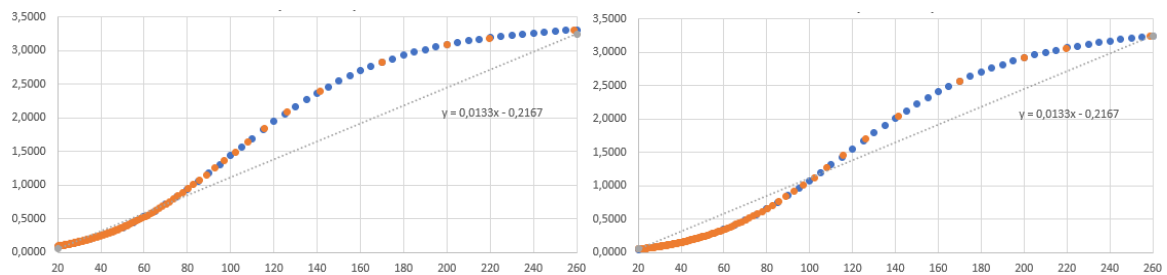
$R_{NTC-MAX}$ a $R_{NTC-MIN}$ získám pomocí vypočítané Steinhart-Hartovy aproximace. Určil jsem si, že měřící rozsah bude od 20 °C do 260 °C. Obě hodnoty odporů pro tyto teploty si určím pomocí Steinhart-Hartovy aproximace vyjádřenou dříve (rovnice 3.9, 3.10 a 3.11).

$$R_{NTC-MAX} = 124\,925,58 \, \Omega$$

$$R_{NTC-MIN} = 176,84 \, \Omega$$

$$R_1 = \sqrt{124\,925,58 \cdot 176,84} = 4700,24 \, \Omega$$

R_1 volím 3 k Ω , protože výsledné zapojení s rezistorem 4,7 k Ω má větší rozdíl od ideální lineární křivky ve vyšších teplotách.



Obrázek 4.2 Srovnání charakteristik pro $R_1 = 4,7 \, \text{k}\Omega$ (vlevo) a $R_1 = 3 \, \text{k}\Omega$ (vpravo).

Napájecí napětí: $V_{dd} = 3,3 \, \text{V}$

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MIN}} \quad [\text{V}] \quad (4.3)$$

$$V_{IN-MIN} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MAX}} \quad [\text{V}] \quad (4.4)$$

Napětí V_{IN} je napětí, které bude za napěťovým děličem $R_1 + R_{NTC}$. V případě, že bych prohodil R_1 a R_{NTC} , tak výsledná změna napětí nebude mít potenciál klesající exponenciály, ale bude mít tvar logaritmické závislosti. Oba grafy jsou vyobrazeny v příloze F.

$$V_{IN-MAX} = 3,3 \cdot \frac{3000}{4700 + 176,84} = 3,12 \, \text{V}$$

$$V_{IN-MIN} = 3,3 \cdot \frac{3000}{4700 + 124\,925,58} = 0,08 \, \text{V}$$

V ideálním případě budou na výstupu v zapojení na obrázku 4.1 hodnoty napětí v rozsahu od 0,05 V do 3,25 V. To jsou hodnoty výstupního rozsahu napětí pro operační zesilovač TLV9002, který je doporučován v design notes od Texas Instruments [12].

$$G_{IDEAL} = V_{dd} \cdot \frac{V_{OUT-MAX} - V_{OUT-MIN}}{V_{IN-MAX} - V_{IN-MIN}} \quad [-] \quad (4.5)$$

G_{IDEAL} je ideální zesílení potřebné k získání maximálního výstupního výkyvu [12].

$$G_{IDEAL} = \frac{3,25 - 0,05}{3,12 - 0,08} = 1,05$$

Nyní si na základě toho vypočítám ideální paralelní kombinaci odporů R_2 a R_3 , které spolu tvoří napěťový dělič. Je ale třeba si zvolit zpětnovazební odpor R_4 .

Hodnotu R_4 volím 1,6 k Ω .

$$(R_{2||3})_{IDEAL} = \frac{R_4}{G_{IDEAL} - 1} \quad [\Omega] \quad (4.6)$$

$$(R_{2||3})_{IDEAL} = \frac{1600}{1,0530 - 1} = 30\,805,34 \, \Omega$$

$$R_3 = \frac{R_4 \cdot V_{dd}}{V_{IN-MAX} \cdot G_{IDEAL} - V_{OUT-MAX}} \quad [\Omega] \quad (4.7)$$

$$R_3 = \frac{1600 \cdot 3,3}{3,1163 \cdot 1,0530 - 3,25} = 167\,667,04 \, \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_{2||3} \cdot R_3}{R_3 - R_{2||3}} \quad [\Omega] \quad (4.8)$$

$$R_2 = \frac{30805,3445 \cdot 167667,0401}{167667,0401 - 30805,3445} = 36\,810,78 \, \Omega$$

R_3 volím 150 k Ω

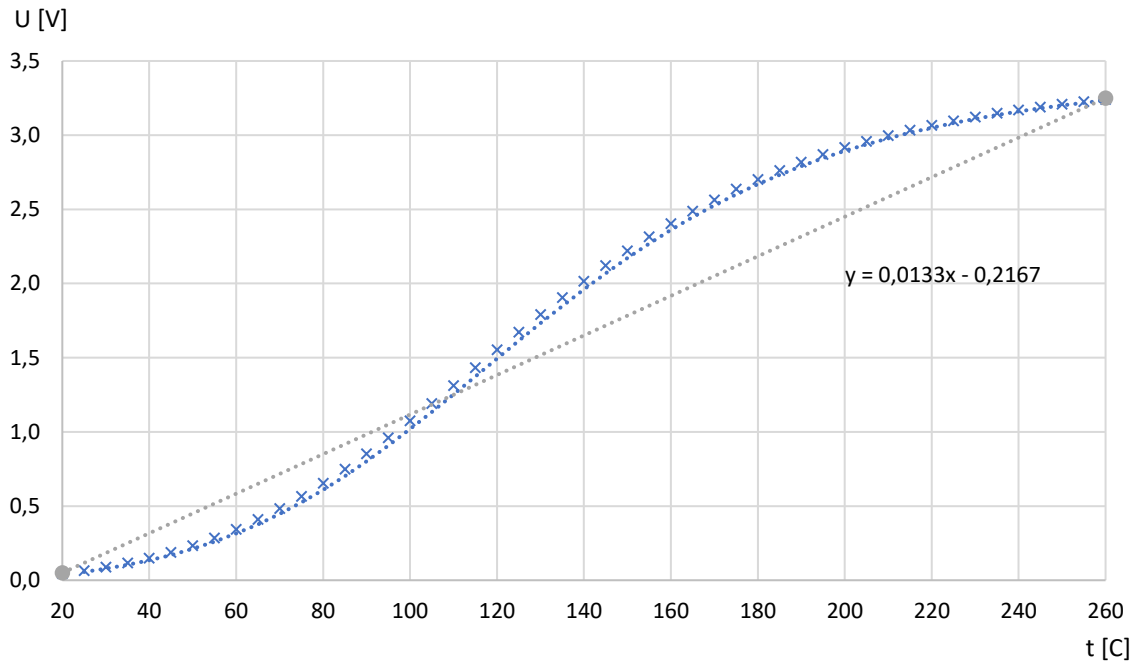
R_2 volím 39 k Ω

Dalším bodem bude spočítat si hodnoty výstupního napětí pro celý teplotní rozsah pomocí vzorce [12]:

$$V_{OUT} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1} \cdot \frac{R_{2||3} + R_4}{R_{2||3}} - \left(\frac{R_4}{R_3} \cdot V_{dd} \right) \quad [V] \quad (4.9)$$

Výstupní napětí budu zaokrouhlovat na 4 desetinná místa kvůli rozlišení AD převodníku mikrokontroléru EPS-32S (kapitola 4. *Návrh připojení sondy k mikrokontroléru*).

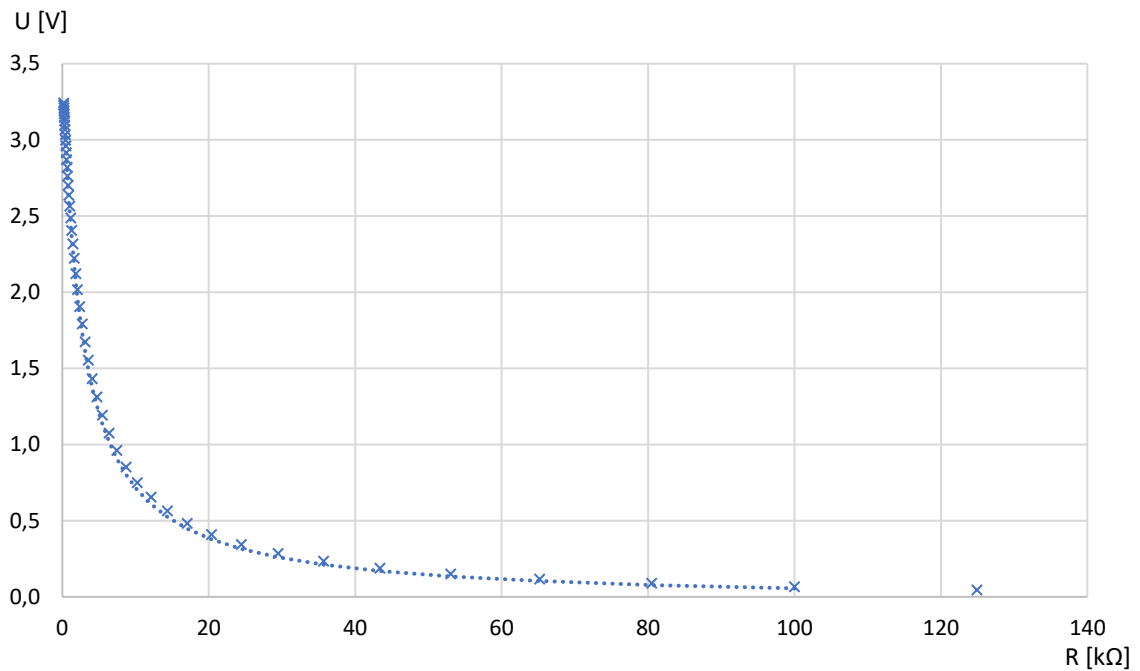
4.2 Validace funkčnosti systému



Obrázek 4.3 Vypočtená teplotní závislost výstupního napětí systému.

V příloze F je tabulka obsahující výstupní hodnoty napětí pro vybrané teploty z teplotního rozsahu. Z obrázku 4.3 je patrné, že při určitých teplotách je velký rozdíl mezi ideální hodnotou výstupního napětí a reálnou hodnotou napětí. V rozmezí mezi 180 °C a 200 °C se rozdíl hodnoty výstupního napětí blíží k 0,5 V, což je u 12-bitového AD převodníku integrovaného do ESP-32S chyba téměř 18 % z celkového rozlišení AD převodníku.

Řešení se nabízí Look-Up tabulkou, kde si vypíšete hodnoty napětí převedené AD převodníkem na číslo v rozsahu 0-4095 pro teploty po 10 °C ve zvoleném rozsahu a výsledná teplota se bude hledat na základě výstupního napětí převedeného pomocí AD převodníku na číslo v rozsahu 0-4095. V případě, že by se hledaná teplota nacházela mezi dvěma hodnotami, nabízí se řešení pomocí částečné linearizace lineární interpolací mezi dvěma hodnotami.



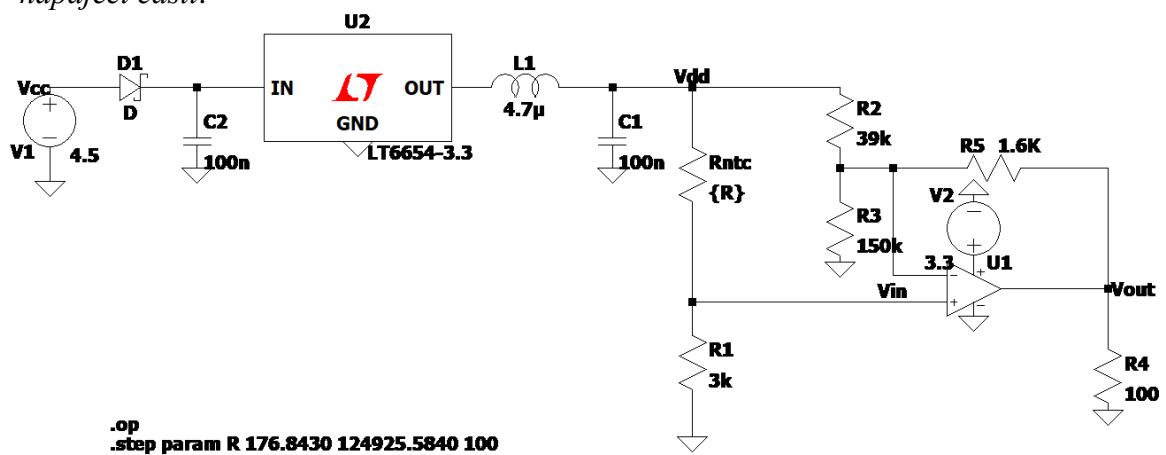
Obrázek 4.4 Vypočtená závislost výstupního napětí systému na odporu termistoru.

Výsledné navržené hodnoty rezistorů ověřím v programu LTspice od výrobce Analog Devices, zda výstupní hodnota napětí odpovídá vypočítaným hodnotám. Také zjistím velikosti proudů, které protékají obvodem. Modelovací schéma je na obrázku 4.5.

Simulace je zvolena DC operating point, která počítá chování obvodu po připojení stejnosměrného napětí. Rntc je nastavený tak, aby po každém vzorku inkrementoval svoji hodnotu o 100 Ω. To je v obrázku 4.5 vyjádřeno výrazem:

```
.step param R 176.8430 124925.5840 100
```

Prvky v obvodu, které nejsou řešeny v této části a jejichž neznalost prozatím není žádným nedostatkem, jako například V1, D1, C1, C2, L1 a U2 budou popsány v kapitole 5. *Návrh napájecí části.*



Obrázek 4.5 Modelovací schéma v programu LTspice.

Grafy získané ze simulace budou v příloze F. Z obrázku 1 přílohy F získaného pomocí simulace v programu LTspice lze vidět, že výsledná hodnota napětí je zmenšena v celém rozsahu o cirká 100 mV. Pro krajní hodnoty to je:

Tabulka 4.1 Porovnání výsledných hodnot výstupního napětí.

t [C]	U_{VYP} [V]	U_{SIM} [V]	ΔU [V]
20	0,0462	-0,0311	0,0773
260	3,2422	3,1334	0,1088

Kde U_{VYP} je napětí získané výpočtem (příloha E) a U_{SIM} je napětí získané ze simulace v programu LTspice.

Další problém vzniklý autorovou chybou je, že operační zesilovač MCP601-I/P od firmy Microchip Technology [14], který byl pro tuto práci vybrán, má přípustný rozsah vstupních hodnot napětí podle následujícího vzorce:

$$V_{in} = V_{dd} - 1,2 \quad [V] \quad (4.10)$$

Vzorec 3.10 pochází z datasheetu operačního zesilovače [14].

Tabulka 4.2 Maximální přípustná hodnota vstupního napětí OZ. [14]

Common Mode						
Common Mode Input Range	V_{CMR}	$V_{SS} - 0.3$	—	$V_{DD} - 1.2$	V	
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	75	90	—	dB	$V_{DD} = 5.0V, V_{CM} = -0.3V \text{ to } 3.8V$

Napájecí napětí operačního zesilovače je 3,3 V, tudíž podle rovnice 4.10 je maximální přípustné napětí na vstupech operačního zesilovače jen 2,1 V.

Další problém, který nastal, je že ESP-32S má efektivní rozsah AD převodníku od 150 mV do 2450 mV [16]. Lze měřit i hodnotu nad 2450 mV ale z hlediska závislosti na vstupním napětí začíná být charakteristika nelineární a na procesoru začíná vznikat teplo, které může časem procesor poškodit. Během testování jsem zjistil, že AD převodník začíná převádět už v okolí hodnot vstupního napětí 75 mV. Této informace se dá využít, protože předpokládám, že nepřesnost při této hodnotě napětí bude relativně vysoká, což vůbec nevádí, protože mým cílem není měřit nízké hodnoty teploty. Po konzultaci s vedoucím práce jsme se shodli, že mým cílem je přesně měřit teploty až nad 100 °C.

4.3 Návrh korekce funkčnosti systému

Byl zvolen následující postup korekce:

- Přepočítám hodnoty rezistorů pro získání splnění požadovaných kritérií:
 - o Teplotní rozsah od 60 °C do 260 °C.
 - o Hodnota výstupního napětí OZ v rozsahu od 75 mV do 2450 mV.
 - o Maximální hodnota napětí na neinvertujícím vstupu 2,1 V

4.4 Korekce funkčnosti systému

Pro správnou funkci měřícího systému musím zajistit, aby systém dodržel podmínky stanovené v kapitole 4.3 *Návrh korekce funkčnosti*. Z toho důvodu přepočítám hodnoty rezistorů podle výše zmíněných požadavků.

Krajní hodnoty odporu termistoru, tedy pro 60 °C a 260 °C, získám stejným způsobem jako v kapitole 4.1 *Výpočet hodnot rezistorů*, a to pomocí rovnic Steinhart-Hartovy aproximace pro neznámý odpor 3.9, 3.10 a 3.11.

$$R_{NTC-MAX} = 24\,451,8972 \, \Omega$$

$$R_{NTC-MIN} = 176,8435 \, \Omega$$

Rezistor R_1 vypočítám podle rovnice 4.2:

$$R_1 = R_1 = \sqrt{R_{NTC-MAX} \cdot R_{NTC-MIN}} = \sqrt{24\,451,8972 \cdot 176,8435} = 2\,079,46 \, \Omega$$

Nyní podle rovnice 4.3 vypočítám maximální napětí na neinvertujícím vstupu:

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MIN}} = 3,3 \cdot \frac{2\,079,4612}{2\,079,4612 + 176,8435} = 2,62 \, V$$

Napětí V_{IN-MAX} překračuje maximální povolené napětí na neinvertujícím vstupu. Rovnici 4.3 zkusím spočítat pro neznámou hodnotu odporu R_1 a známou hodnotu napětí V_{IN-MAX} :

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MIN}} \rightarrow$$
$$\rightarrow R_1 = \frac{R_{NTC-MIN} \cdot V_{IN-MAX}}{V_{dd} - V_{IN-MAX}} = \frac{176,8435 \cdot 2,1}{3,3 - 2,1} = 309,48 \, \Omega$$

R_1 volím 300 Ω .

Zpětně dopočítám hodnoty V_{IN-MAX} a V_{IN-MIN} z rovnic 4.3 a 4.4, pro ověření zda opravdu nepřekračují povolené meze stanovené v kapitole 4.3 *Návrh korekce funkčnosti*.

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MIN}} = 3,3 \cdot \frac{300}{300 + 176,8435} = 2,08 \text{ V}$$

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MAX}} = 3,3 \cdot \frac{300}{300 + 24\,451,8972} = 0,04 \text{ V}$$

Krajní hodnoty napětí V_{IN} se pohybují v povoleném rozmezí. Spočítám ideální zesílení celého systému z rovnice 4.5.

$$G_{IDEAL} = V_{dd} \cdot \frac{V_{OUT-MAX} - V_{OUT-MIN}}{V_{IN-MAX} - V_{IN-MIN}} = \frac{2,45 - 0,075}{2,0762 - 0,04} = 1,17$$

Z rovnic 4.6 , 4.7 a 4.8 si spočítám hodnoty rezistorů R_2 a R_3 . R_4 volíme stejné jako R_1 , tudíž 300Ω

$$(R_{2||3})_{IDEAL} = \frac{R_4}{G_{IDEAL} - 1} = \frac{300}{1,1664 - 1} = 1\,803,74 \Omega$$

$$R_3 = \frac{R_4 \cdot V_{dd}}{V_{IN-MAX} \cdot G_{IDEAL} - V_{OUT-MAX}} = \frac{300 \cdot 3,3}{2,0762 \cdot 1,1664 - 2,45} = -34\,924,29 \Omega$$

$$R_2 = \frac{R_{2||3} \cdot R_3}{R_3 - R_{2||3}} = \frac{-34\,924,2917 \cdot 1803,7371}{-34\,924,2917 - 1803,7371} = 1\,714,25 \Omega$$

R_3 vyšel záporný odpor, to je prakticky nerealizovatelné. Pro R_3 a R_2 zvolím stejné hodnoty abych dosáhl plného využití vstupu a výstupu.

R_3 volím $68 \text{ k}\Omega$.

R_2 volím $68 \text{ k}\Omega$.

Podle rovnice (4.9) ověřím, zdali je výstupní napětí v mezích zvolených v kapitole 4.3 *Návrh korekce funkčnosti*. Dosadím krajní hodnoty odporu termistoru:

$$V_{OUT-MIN} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1} \cdot \frac{R_{2||3} + R_4}{R_{2||3}} - \left(\frac{R_4}{R_3} \cdot V_{dd} \right) = \dots = 0,0258 \text{ V}$$

$$V_{OUT-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1} \cdot \frac{R_{2||3} + R_4}{R_{2||3}} - \left(\frac{R_4}{R_3} \cdot V_{dd} \right) = \dots = 2,0799 \text{ V}$$

Výstupní napětí systému při nejvyšším odporu termistoru pro zkorigovaný teplotní rozsah je pod úrovní minimální hodnoty rozsahu AD převodníku. Korekci provedu přidáním 200Ω rezistoru do série s termistorem. Pro tuhle změnu bude nutné znovu přepočítat rezistor R_1 pomocí vyjádřené rovnice 3.3, protože bych na neinvertující vstup operačního zesilovače nikdy nedostal napětí větší než $V_{dd}/2$.

$$R_1 = \frac{R_{NTC-MIN} \cdot V_{IN-MAX}}{V_{dd} - V_{IN-MAX}} = \frac{376,8435 \cdot 2,1}{3,3 - 2,1} = 659,47 \Omega$$

R_1 volím 680Ω .

Opět provedeme kontrolní výpočet V_{IN-MAX} a V_{IN-MIN} z rovnic 4.3 a 4.4:

$$V_{IN-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MIN}} = 3,3 \cdot \frac{300}{300 + 376,8435} = 2,1233 \text{ V}$$

$$V_{IN-MIN} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{NTC-MAX}} = 3,3 \cdot \frac{300}{300 + 24\,651,8972} = 0,0886 \text{ V}$$

V_{IN-MAX} nabývá větší hodnoty než 2,1 V. Ale při bližším pohledu je vidno, že se jedná o chybu 1,1%, což můžeme zanedbat.

Z rovnice 4.9 ověřím pro krajní hodnoty odporu termistoru, jestli je výstupní napětí ve zvolených mezích:

$$V_{OUT-MIN} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1} \cdot \frac{R_{2||3} + R_4}{R_{2||3}} - \left(\frac{R_4}{R_3} \cdot V_{dd} \right) = \dots = 0,0748 \text{ V}$$

$$V_{OUT-MAX} = V_{dd} \cdot \frac{R_1}{R_{NTC} + R_1} \cdot \frac{R_{2||3} + R_4}{R_{2||3}} - \left(\frac{R_4}{R_3} \cdot V_{dd} \right) = \dots = 2,1275 \text{ V}$$

Napětí je se zanedbatelnou chybou u $V_{OUT-MIN}$ v mezích pro výstupní napětí stanovené v kapitole 4.3 *Návrh korekce funkčnosti*.

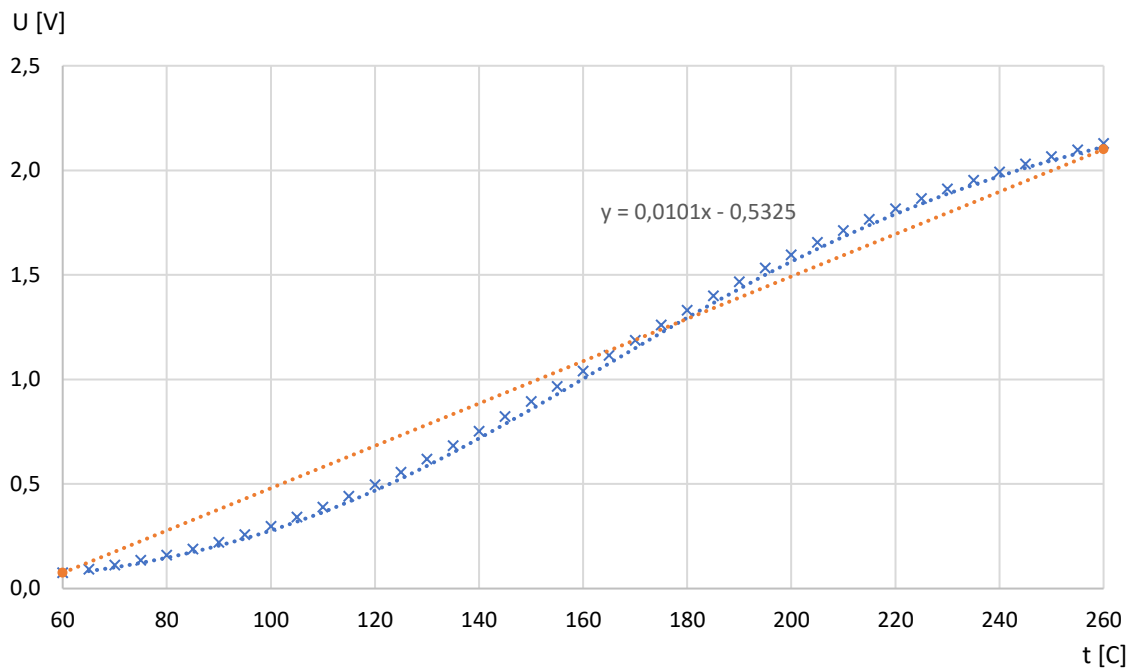
Bude potřeba ověřit podobně jako v kapitole 4.1 *Výpočet hodnot rezistorů* správnost vypočítaných hodnot vnesením závislosti výstupního napětí na teplotě z vypočítaných hodnot a rovněž provést simulaci v programu Ltspice, jehož modelovací schéma bude obdobné jako v kapitole 4.2 *Validace funkčnosti systému*.

4.5 Validace funkčnosti zkorigovaného systému

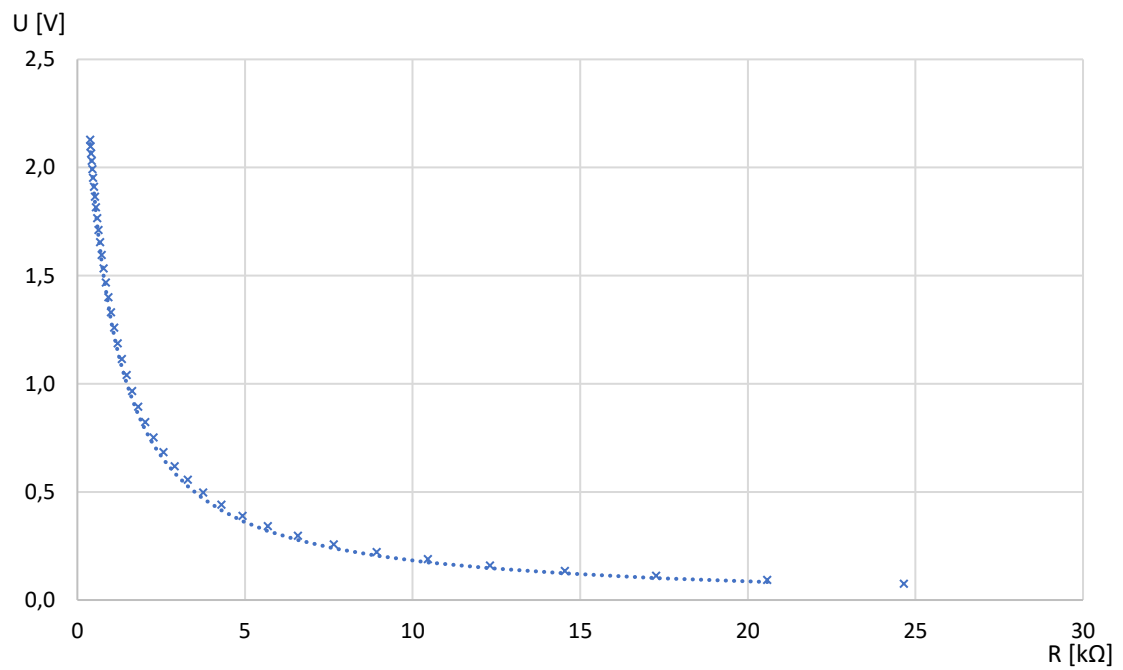
V příloze G je tabulka obsahující výstupní hodnoty napětí zkorigovaného systému pro vybrané teploty z upraveného teplotního rozsahu.

Opět z obrázku 4.6 vidíme, že podobně jako v prvním případě se výsledná závislost od ideální lineární závislosti při určitých hodnotách výstupního napětí liší až o 18 °C. Největší chybu můžeme vidět v rozmezí 100-120 °C a 200-220 °C. Řešení bude stejné jako v kapitole 4.2 *Validace funkčnosti systému*, a to Look-Up tabulkou a mezi jednotlivými body Look-Up tabulky budu částečně linearizovat lineární interpolací.

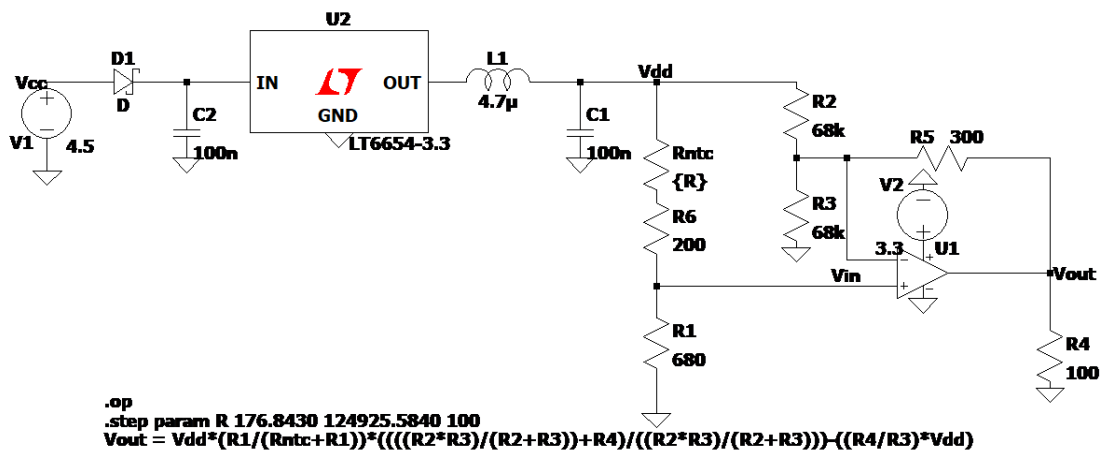
Stejně jako v kapitole 4.2 *Validace funkčnosti systému* budu provádět simulaci v programu Ltspice. Simulace se až na hodnoty rezistorů lišit nebude.



Obrázek 4.6 Vypočtená teplotní závislost výstupního napětí zkorigovaného systému.



Obrázek 4.7 Vypočtená závislost výstupního napětí zkorigovaného systému na odporu termistoru.



Obrázek 4.8 Modelovací schéma zkorigovaného systému v programu LTSpice

V příloze H se nachází grafy získané simulací z programu LTSpice. Z grafů je zřejmé, že odpovídají hodnotám vypočítaným z přílohy G. Tudiž lze zkorigovaný systém prohlásit za hotový. Hodnoty výstupních napětí z přílohy G označím za teoreticky přesné hodnoty, ke kterým se budu snažit dostat při praktické realizaci.

V další části se budu zabývat řešením napájecí části pro mikrokontrolér a zkorigovaný měřicí systém.

5. NÁVRH NAPÁJECÍ ČÁSTI

V této části se budu zabývat řešením napájecí části mikrokontroleru, měřícího systému a výstupních periférií jako například displej. Na výstupu napájecí části potřebuji stabilizovaných 3,3 V jakožto napájení měřícího systému a i mnou zvolený mikrokontrolér ESP-32S potřebuje ke své činnosti napětí v rozsahu vyobrazené v tabulce 5.1.

Tabulka 5.1 Rozsah napájecího napětí mikrokontroleru. [16]

Name	No.	Type	Function
Analog			
VDDA	1	P	Analog power supply (2.3 V ~ 3.6 V)
LNA_IN	2	I/O	RF input and output
VDD3P3	3	P	Analog power supply (2.3 V ~ 3.6 V)
VDD3P3	4	P	Analog power supply (2.3 V ~ 3.6 V)

5.1 Volba komponent napájecí části

Stabilizovaný zdroj napětí budu řešit pomocí napěťového měniče, konkrétně Step-Down, MCP1603T-330I/OS [15].

Tabulka 5.2 Tabulka základních parametrů napěťového měniče. [15]

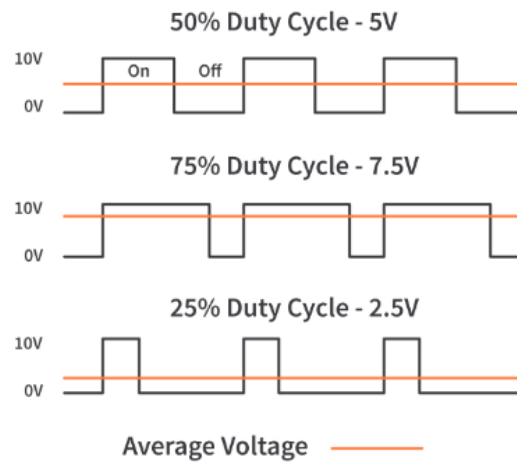
DC CHARACTERISTICS

Electrical Characteristics: Unless otherwise indicated, MCP1603/L, $V_{IN} = \overline{SHDN} = 3.6V$, $C_{OUT} = C_{IN} = 4.7 \mu F$, $L = 4.7 \mu H$, $V_{OUT}(ADJ) = 1.8V$, $I_{OUT} = 100 mA$, $T_A = +25^\circ C$. Boldface specifications apply over the T_A range of $-40^\circ C$ to $+85^\circ C$.						
Parameters	Sym	Min	Typ	Max	Units	Conditions
Input Characteristics						
Input Voltage	V_{IN}	2.7	—	5.5	V	Note 1
Maximum Output Current	I_{OUT}	500	—	—	mA	Note 1
Shutdown Current	$I_{IN} \overline{SHDN}$	—	0.1	1	μA	$\overline{SHDN} = GND$
Quiescent Current - PFM	I_Q	—	45	60	μA	$\overline{SHDN} = V_{IN}$, $I_{OUT} = 0 mA$, device switching
Quiescent Current - PWM	I_Q	1.0	2.7	4	mA	$\overline{SHDN} = V_{IN}$, $I_{OUT} = 0 mA$, device switching (MCP1603B)
Shutdown/UVLO/Thermal Shutdown Characteristics						
\overline{SHDN} , Logic Input Voltage Low	V_{IL}	—	—	15	% V_{IN}	$V_{IN} = 2.7V$ to $5.5V$
\overline{SHDN} , Logic Input Voltage High	V_{IH}	45	—	—	% V_{IN}	$V_{IN} = 2.7V$ to $5.5V$
\overline{SHDN} , Input Leakage Current	$I_L \overline{SHDN}$	-1.0	± 0.1	1.0	μA	$V_{IN} = 2.7V$ to $5.5V$
Undervoltage Lockout	UVLO	2.12	2.28	2.43	V	V_{IN} Falling
Undervoltage Lockout Hysteresis	UVLO _{HYS}	—	140	—	mV	
Thermal Shutdown	T_{SHD}	—	150	—	$^\circ C$	Note 4, Note 5
Thermal Shutdown Hysteresis	$T_{SHD-HYS}$	—	10	—	$^\circ C$	Note 4, Note 5

Výstupní napětí je podle datasheetu výrobce [15] nastavené na 3,3 V. Výrobce rovněž doporučuje držet vstupní napětí větší než je napětí výstupní, protože v případě větší zátěže na výstupu je na vstupu potřeba většího napětí pro správnou regulaci.

5.2 Princip PWM

Napěťový měnič pracuje na principu pulzně šířkové modulace (PWM) s frekvencí 2MHz. PWM funguje na principu přepínání napěťových úrovní mezi logickou úrovní 0 a logickou úrovní 1 v určité periodě. Výsledná hodnota napětí je pak dána procentuálně (tzv. Střída nebo Duty cycle). Střída je procentuální hodnota signálu v logické úrovni 1. [17].



Obrázek 5.1 Princip pulzně šířkové modulace.

Střída nebo Duty cycle se počítá následovně [17]:

$$D = \frac{T_{on}}{Period} * 100 \quad [\%] \quad (4.1)$$

Kde: D - Střída v procentech [%]

T_{on} - Čas, kdy je signál v logické úrovni 1. [s]

Period - Perioda signálu [s]

Výsledná hodnota napětí se pak spočítá následovně [17]:

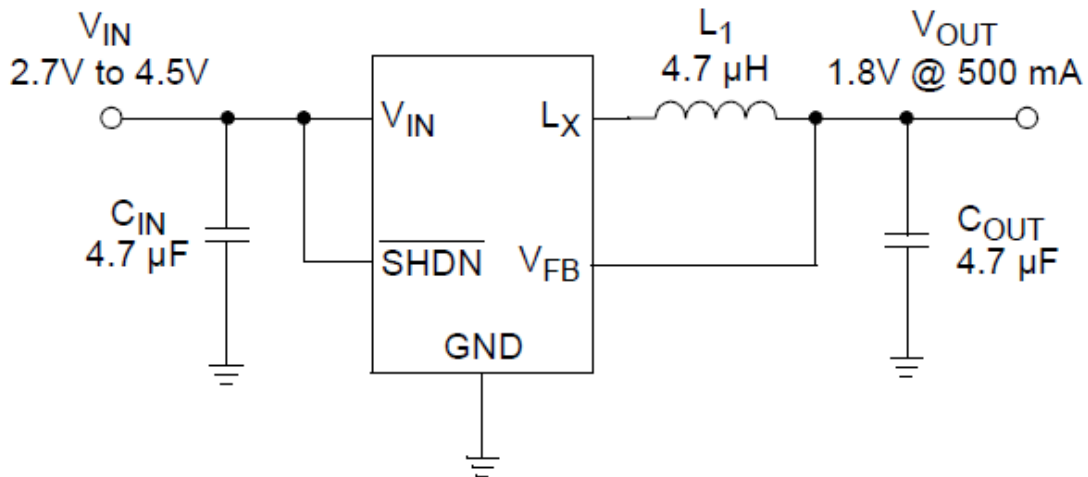
$$V_{avg} = \frac{D}{100} * V_{max} \quad [V] \quad (4.2)$$

Kde: D - Střída v procentech [%]

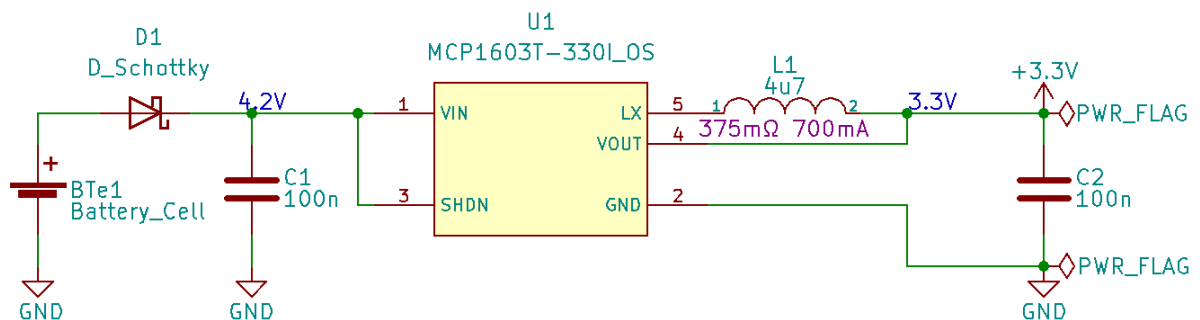
V_{max} - Maximální napětí signálu [V]

5.3 Schéma napájecí části

Doporučené zapojení výrobce napěťového měniče z datasheetu [15] je vyobrazeno na obrázku 5.2.



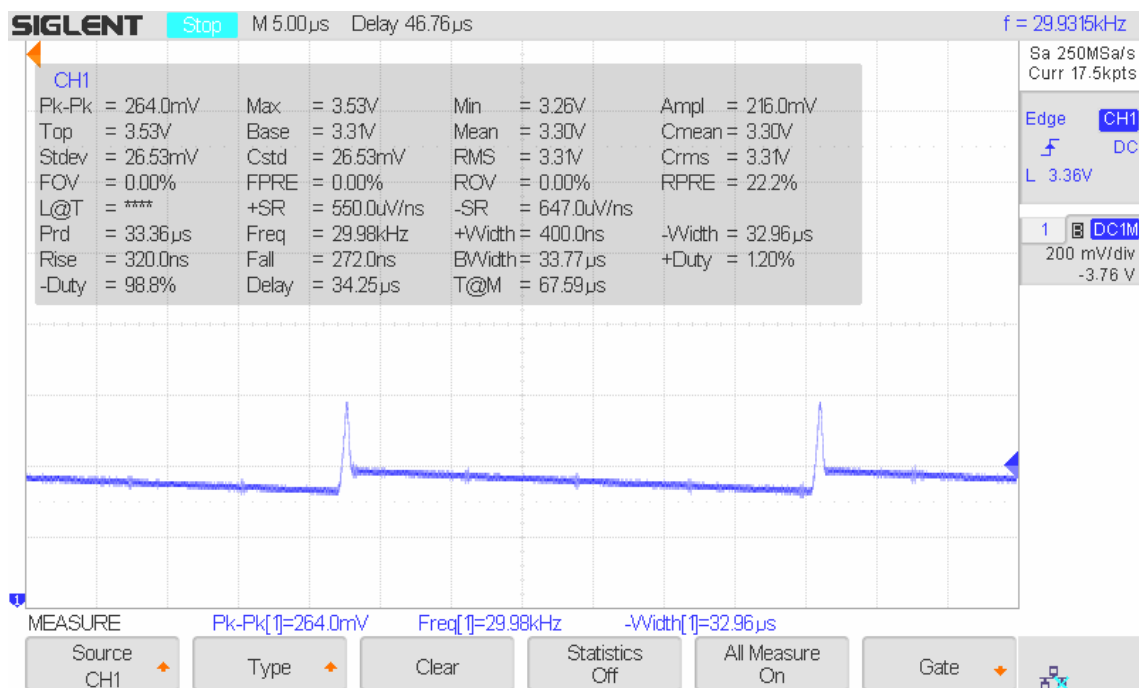
Obrázek 5.2 Typické zapojení napěťového měniče v obvodu. [16]



Obrázek 5.3 Navržené zapojení napěťového měniče v obvodu.

Z obrázku 5.3 lze vidět rozdíl od typického zapojení napěťového měniče MCP1603T-330I/OS. Zapojení použité v této práci obsahuje Schottkyho diodu jako ochranu proti přepólování baterie. Battery cell bude tvořen socketem na 3xAAA 1,5V baterie. Schottkyho dioda má nižší úbytek napětí v dopředném směru, a to 0,3 V. Na vstupu napěťového měniče bude napětí 4,2 V.

Filtrační kondenzátory jsem zvolil pouze 100nF keramické kondenzátory. Cívku jsem zvolil 4,7 μH s feritovým jádrem, které slouží pro potlačení vysokofrekvenčního šumu.



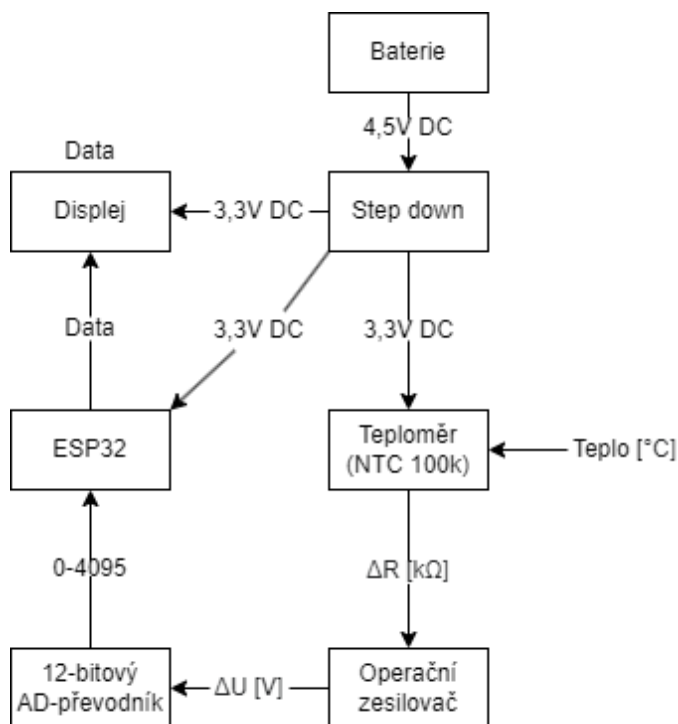
Obrázek 5.4 Průběh výstupního napětí napájecí části na osciloskopu.

Na obrázku 5.4 lze vidět vliv kondenzátorů v obvodu, protože neustálým přepínáním PWM se kondenzátor v logické úrovni 1 nabíjí a při přepnutí do logické úrovně 0 se vybíjí. To se děje tak rychle, že se kondenzátor nestáčí úplně vybit.

6. DESKA PLOŠNÉHO SPOJE

V téhle části budu řešit jak návrhovou část DPS, tak praktickou realizaci DPS pro možnost fyzické ověření funkcionality.

Blokové schéma desky plošného spoje (dále už jen DPS) je vyobrazeno na obrázku 6.1.



Obrázek 6.1 Blokové schéma celého systému.

6.1 Návrh desky plošného spoje

V této části se budu zabývat návrhem desky plošného spoje. Hlavní požadavek na desku je, aby pasovala rozměrově i pinově k mikrokontroléru ESP-32S. K návrhu jsem použil program KiCad 6.0. Dále jsem využil již známých schémat, které se nachází v kapitole 4. *Návrh připojení sondy k mikrokontroléru* a v kapitole 5.3. *Schéma napájecí části*.

GND na desce je ve formě rozlité mědi po desce, pro dosažení menšího množství tras. Rozlité GND není pod anténou mikrokontroléru protože bych se v budoucnu připravil o možnost bezdrátové přenosu informace, protože rozlitém země pod anténu by se snížil dosah bezdrátového připojení na desítky centimetrů

Návrh desky a návrh plošného spoje se nachází v příloze I. V návrhu plošného spoje se nenachází 200Ω rezistor, který byl dodatečně přidán v kapitole 4.4. *Návrh korekce systému*. Deska byla odeslaná do výroby dřív než jsem tuto korekci provedl. Tento dodatečný rezistor budu řešit pomocí THT rezistoru situovaný u 2,5mm 2-pólového konektoru.

Baterie není součástí desky plošného spoje, kvůli rozměrům a bude řešena separátně. Vývody socketu na baterie budou opatřeny kabely a ty budou připájeny na desku na Vcc a GND díru.



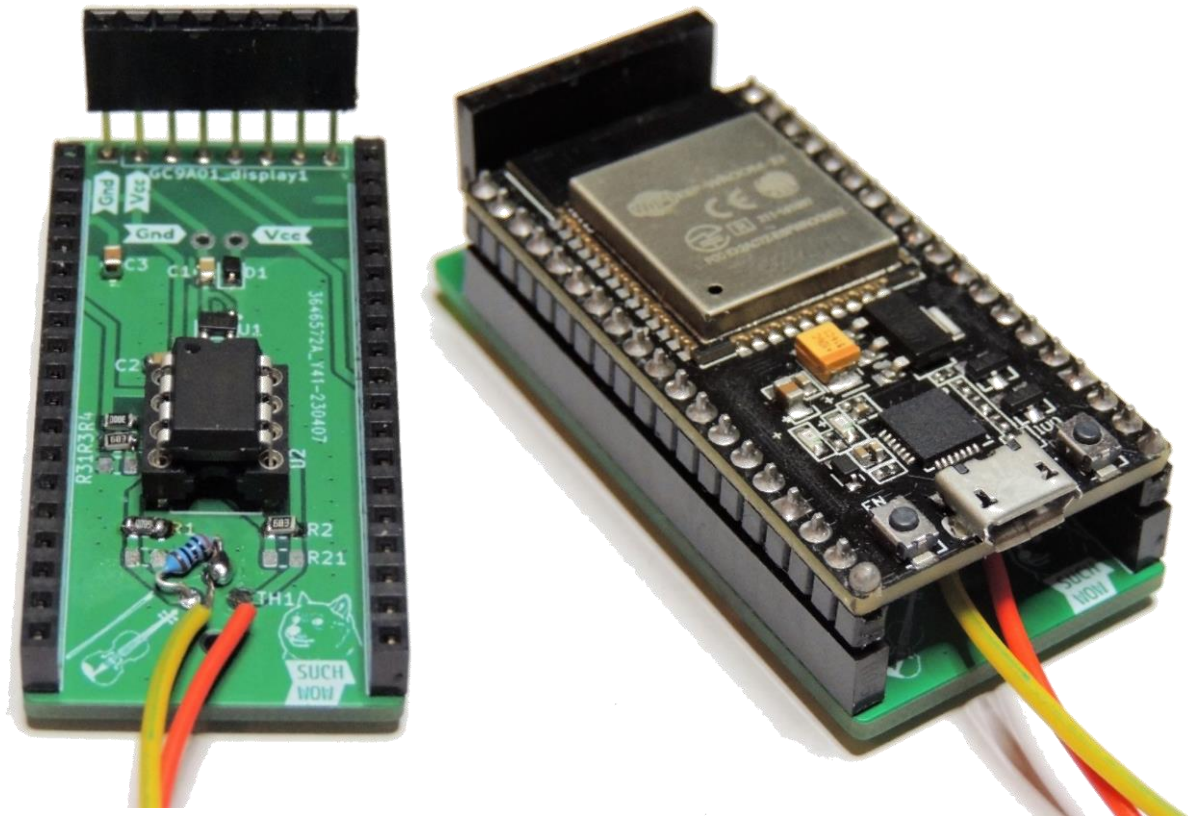
Obrázek 6.2 3D vizualizace návrhu plošného spoje.

Na obrázku 6.2 můžeme vidět 3D vizualizaci výsledné DPS (desky plošného spoje) vygenerovanou programem KiCad 6.0.

Výsledný návrh je vybaven paralelními ploškami ke všem rezistorům o velikosti pouzdra osazované součástky 0805, z důvodů možnosti korekce v případě velké chyby od jmenovité hodnoty zakoupených rezistorů.

6.2 Praktická realizace desky plošného spoje

Seznam součástek potřebný k osazení DPS se nachází v příloze J.



Obrázek 6.3 Osazená deska plošného spoje.

Vpravo na obrázku 6.3 je osazená deska s připojeným mikrokontrolérem ESP-32S. Vlevo se nachází čistě osazená deska.

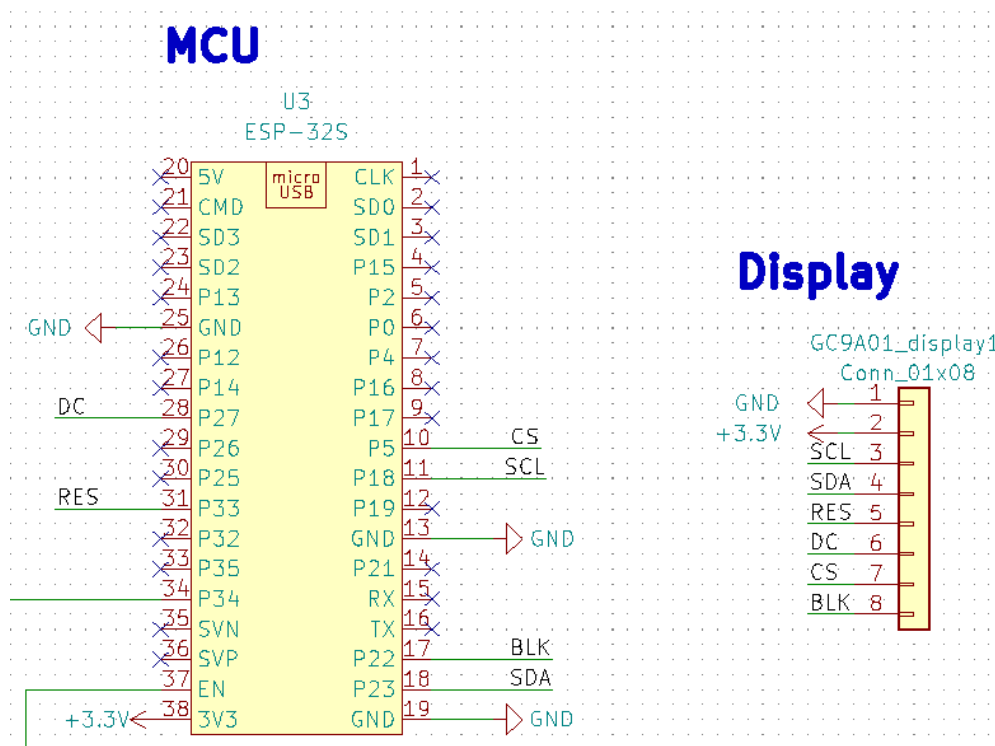
Z obrázku 6.3 lze vidět, že na desce není situován 2,5mm konektor FC68102. Z důvodu, že byl objednan pouze 1 kus, který byl poškozen chybou při pájení. Proto jsou na desce operativně připájeny 2 kabely pro možnost ověření funkčnosti praktické realizace.

V předchozí kapitole jsem se zmínil o paralelních ploškách ke všem rezistorům v případě velké chyby od jmenovité hodnoty zakoupených rezistorů. Po proměření hodnot všech použitých rezistorů jsem nebyl nucen osazovat ani jednu plošku, protože všechny rezistory měly maximálně 1% chybu od jmenovité hodnoty.

8-pinová kolíková zásuvka, situována na horní straně desky je pro možnost připojení displeje. Displej, pro který je navrženo připojení, je GC9A01 [22]. Funkce displeje je na zobrazení výsledné teploty.



Obrázek 6.4 Osazená deska plošného spoje s připojeným mikrokontrolérem a displejem.



Obrázek 6.5 Schéma připojení displeje k mikrokontroléru.

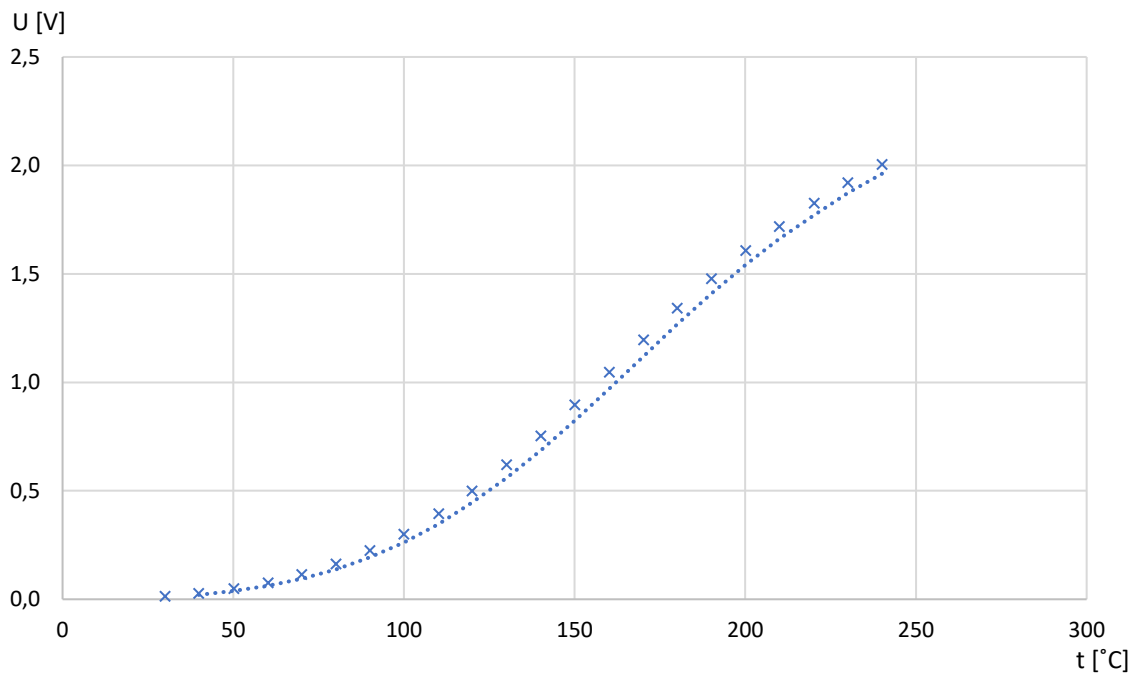
7. VALIDACE FUNKČNOSTI PRAKTICKÉ REALIZACE

V této kapitole budu zjišťovat reálné vlastnosti praktické realizace mého systému. Budu proměřovat zda-li naměřené hodnoty odpovídají teoretickým hodnotám z přílohy G. Zároveň budu zjišťovat minimální a maximální hodnotu AD převodníku při ustálených hodnotách teploty.

Tabulka 7.1 Naměřené hodnoty pro ověření funkčnosti.

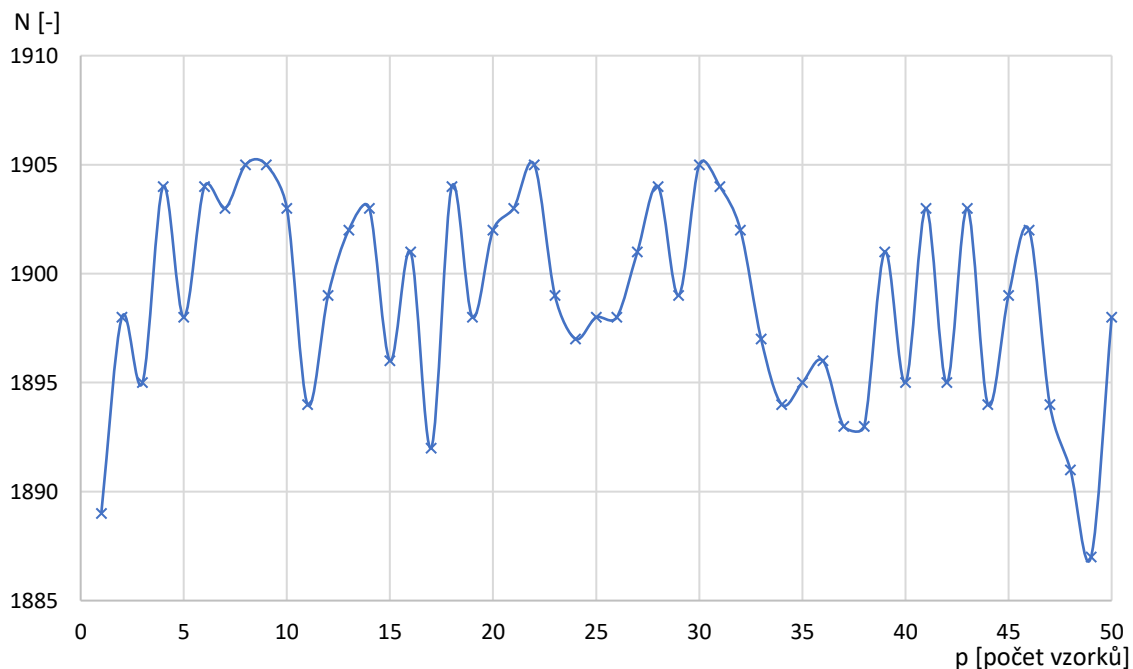
t [°C]	U [mV]	N _{MIN} [-]	N _{MAX} [-]
30,0	13,08	0	0
39,9	27,62	0	0
50,2	48,56	0	0
60,2	76,28	0	2
70,1	113,37	0	21
80,1	162,17	57	95
90,1	224,18	135	160
100,0	299,91	222	251
110,2	394,06	341	374
120,0	498,66	455	502
130,1	620,09	626	674
140,1	752,49	795	823
150,1	895,71	967	1018
160,2	1046,01	1171	1199
170,2	1195,93	1362	1394
180,1	1341,30	1557	1587
190,1	1477,50	1726	1748
200,1	1607,00	1885	1913
210,0	1717,80	2028	2065
220,2	1825,70	2160	2192
230,1	1919,90	2288	2307
240,1	2004,00	2391	2407

Při porovnání hodnoty výstupních napětí v tabulce 7.1 s tabulkou v příloze G, lze zjistit, že naměřené hodnoty odpovídají teoretickým hodnotám výstupního napětí. Drobné chyby mohou být zapříčiněny chybou jmenovitých hodnot rezistorů R₁, R₂, R₃ a R₄.



Obrázek 7.1 Naměřené hodnoty výstupního napětí realizovaného systému.

Nejde si nepovšimnout, že rozdíl mezi minimální a maximální hodnotou AD převodníku se pro některé teploty liší až o 50 z celkového rozsahu AD převodníku. Příklad hodnot získaných z AD převodníku je ukázan na obrázku 7.2, kde jsou vzorky hodnot AD převodníku pro nastavenou teplotu 200 °C.



Obrázek 7.2 Vzorky hodnot AD převodníku pro teplotu 200 °C.

8. ZÍSKÁNÍ HODNOT PRO LOOK-UP TABULKU

V této kapitole se budu zabývat získáním hodnot z AD převodníku pro teploty ze zkorigovaného teplotního rozsahu (kapitola 4.3 *Návrh korekce systému*) po 10 °C pro zajištění přesných hodnot pro look-up tabulku.

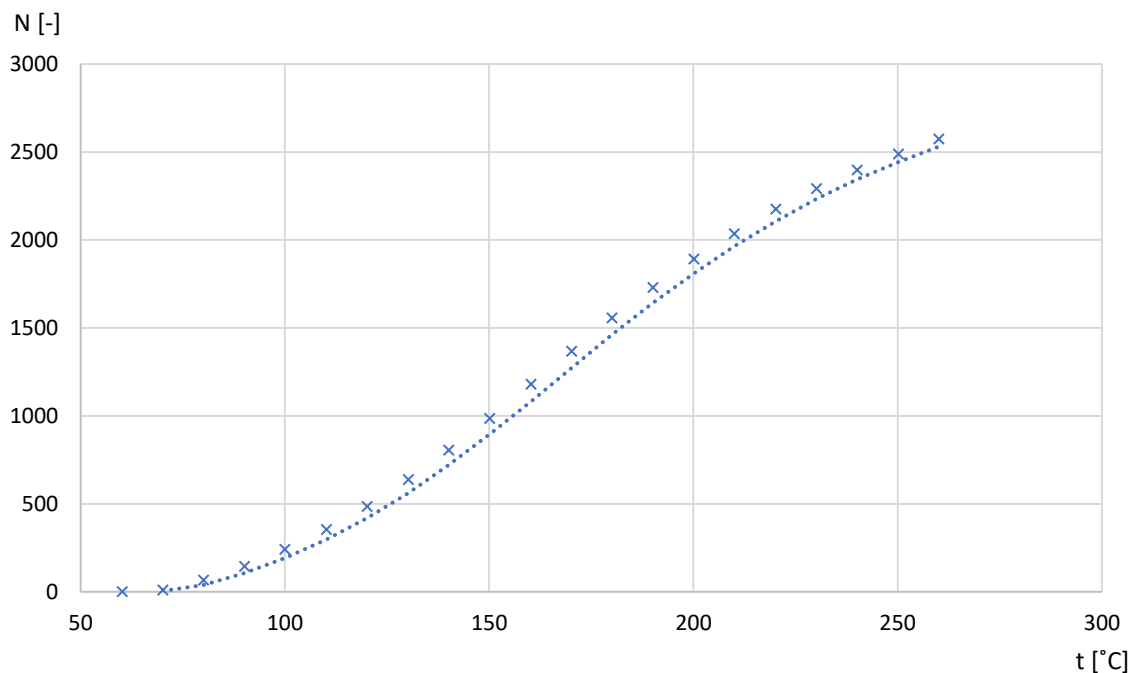
Pro každou hodnotu teploty si odečtu dostatečný počet hodnot z AD převodníku, které následně zprůměruji, a tuhle průměrnou hodnotu prohlásím za hodnotu AD převodníku při dané teplotě.

Tabulka 8.1 Naměřené hodnoty pro look-up tabulku.

t [°C]	t _{AVG} [°C]	N _{AVG} [-]	U _{AVG} [V]
60,2	59,3	0	0,0748
70,1	69,6	9	0,1136
80,1	79,7	67	0,1625
90,1	89,6	144	0,2234
100,0	99,7	240	0,2996
110,2	110,1	354	0,3925
120,1	120,2	485	0,4975
130,2	130,6	637	0,6174
140,1	140,9	805	0,7503
150,1	151,0	986	0,8935
160,2	161,5	1179	1,0436
170,2	171,8	1368	1,1918
180,1	181,9	1557	1,3367
190,1	192,0	1729	1,4730
200,1	202,1	1891	1,6011
210,0	212,0	2036	1,7180
220,2	222,2	2176	1,8149
230,1	232,0	2292	1,9177
240,1	242,2	2398	2,0024
250,2	252,2	2489	2,0763
260,1	262,2	2573	2,1391

První sloupec tabulky 8.1 obsahuje teploty nastavené na teplotní komoře Voltracft TC-150. Zatímco ve druhém sloupci tabulky 8.1 jsou zprůměrované hodnoty získané z měřicí karty NI cDAQ-9171, ke které byl připojený termočlánek TC091.5P „K“. Referenční uzel termočlánu je v měřicí kartě NI cDAQ-9171. Hodnoty teploty získané z termočlánu označím za referenční, které použiji pro look-up tabulku. Ve třetím sloupci tabulky 8.1 jsou hodnoty průměrné hodnoty získané z AD převodníku pro každou teplotu. Ve čtvrtém sloupci tabulky 8.1 pak jsou zprůměrované hodnoty výstupního napětí získané z multimetru Agilent 34401A.

K získání hodnot teploty a napětí z teplotní komory a multimetru jsem využil hotových data loggerů do programu LabView 2020 od společnosti National Instruments. Oba data loggery se musely spouštět separátně, protože nebyly v jednom programu. Vzorkování dat bylo synchronizováno v rámci 1 sekundy.



Obrázek 8.1 Závislost zprůměrované hodnoty AD převodníku na teplotě.

9. LOOK-UP TABULKA

Look-up tabulka obsahuje přesné hodnoty teploty a AD převodníku (tabulka se nachází v kapitole 7. *Získání hodnot pro look-up tabulku*). Ty jsou změřené po 10 °C. V případě, že by se hodnota AD převodníku měřené teploty rovnala přímo některé z už známých hodnot, tak v tom případě není problém. Problém nastane, když se hodnota AD převodníku pro měřenou teplotu nachází mezi 2 známými hodnotami. Pro tyto hodnoty provedu částečnou linearizaci podle rovnice lineární interpolace [18]:

$$t_{m\check{e}r} = t_{min} + (t_{max} - t_{min}) \cdot \frac{(N_{m\check{e}r} - N_{min})}{(N_{max} - N_{min})} \quad (9.1)$$

$t_{m\check{e}r}$ je hledaná hodnota teploty a $N_{m\check{e}r}$ je hodnota AD převodníku odpovídající hledané teplotě. t_{max} a t_{min} jsou nejbližší známé hodnoty teploty z look-up tabulky a N_{max} a N_{min} jsou odpovídající hodnoty AD převodníku z look-up tabulky.

Pro zvýšení přesnosti budu průměrovat posledních 10 hodnot z AD převodníku. Tímto způsobem dostanu přesnější výsledek, ale delší časovou odezvu na změnu teploty.

10. MĚŘÍCÍ PROGRAM PRO MIKROKONTROLÉR

V této kapitole se budu zabývat napsáním programu pro mikrokontrolér ESP-32S tak, aby už byly na sériovou konzoli vypisovány finální hodnoty teploty zjištěné pomocí look-up tabulky (kapitola 9. *Look-up tabulka*) a lineární interpolace mezi 2 body look-up tabulky.

Využil jsem programového prostředí Arduino IDE 1.8.19, do kterého jsem si doinstaloval knihovnu obsahující firmware update pro ESP32.

Look-up tabulku jsem v programovém prostředí Arduino IDE realizoval pomocí 2 polí o velikosti 21 hodnot (jedno pro teplotu a druhé pro hodnotu AD převodníku). Pole jsou zapsány ve tvaru:

```
FLOAT temp[21] = { 59.3 ,
                   69.6 ,
                   79.7 ,
                   89.6 ,
                   99.7 ,
                   110.1 ,
                   120.2 ,
                   130.6 ,
                   140.9 ,
                   151.0 ,
                   161.5 ,
                   171.8 ,
                   181.9 ,
                   192.0 ,
                   202.1 ,
                   212.0 ,
                   222.2 ,
                   232.0 ,
                   242.2 ,
                   252.2 ,
                   262.2 };

FLOAT ad[21] = { 0,
                  9 ,
                  67 ,
                  144 ,
                  240 ,
                  354 ,
                  485 ,
                  637 ,
                  805 ,
                  986 ,
                  1179 ,
                  1368 ,
                  1557 ,
                  1729 ,
                  1891 ,
                  2036 ,
                  2176 ,
                  2292 ,
                  2398 ,
                  2498 ,
                  2573 };
```

Průměrování hodnot jsem řešil pomocí fronty, kde se na konec vždy uloží nově navzorkovaná hodnota („push“) a z čela první hodnota vypadne („pop“). Vzorkování probíhá s periodou 100 ms.

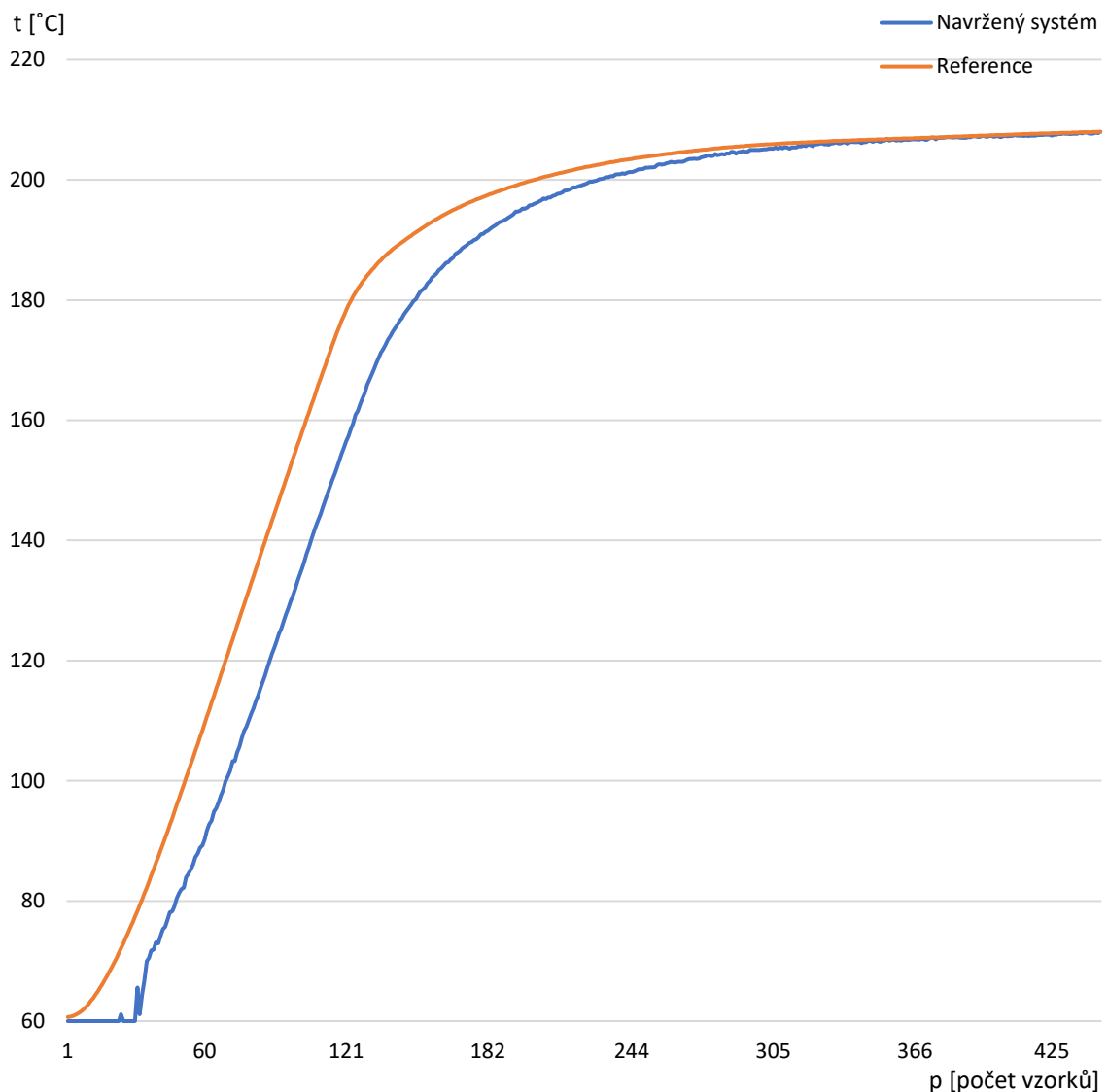
V případě, že výsledná hodnota AD převodníku neodpovídá žádné hodnotě z look-up tabulky (kapitola 8. *Získání hodnot pro look-up tabulku*) využijí lineární interpolaci (kapitola 9. *Look-up tabulka*). Vyhledávání hodnot, mezi kterými se nachází hodnota AD převodníku pro měřenou teplotu, probíhá následovně:

```
FOR (j=0; j<21; j++)
{
    IF (Average >= ad[j])
    {
        index_dolni = j;
        index_horni = j+1;
    }
}
```

11. VALIDACE FUNKČNOSTI FINÁLNÍHO SYSTÉMU

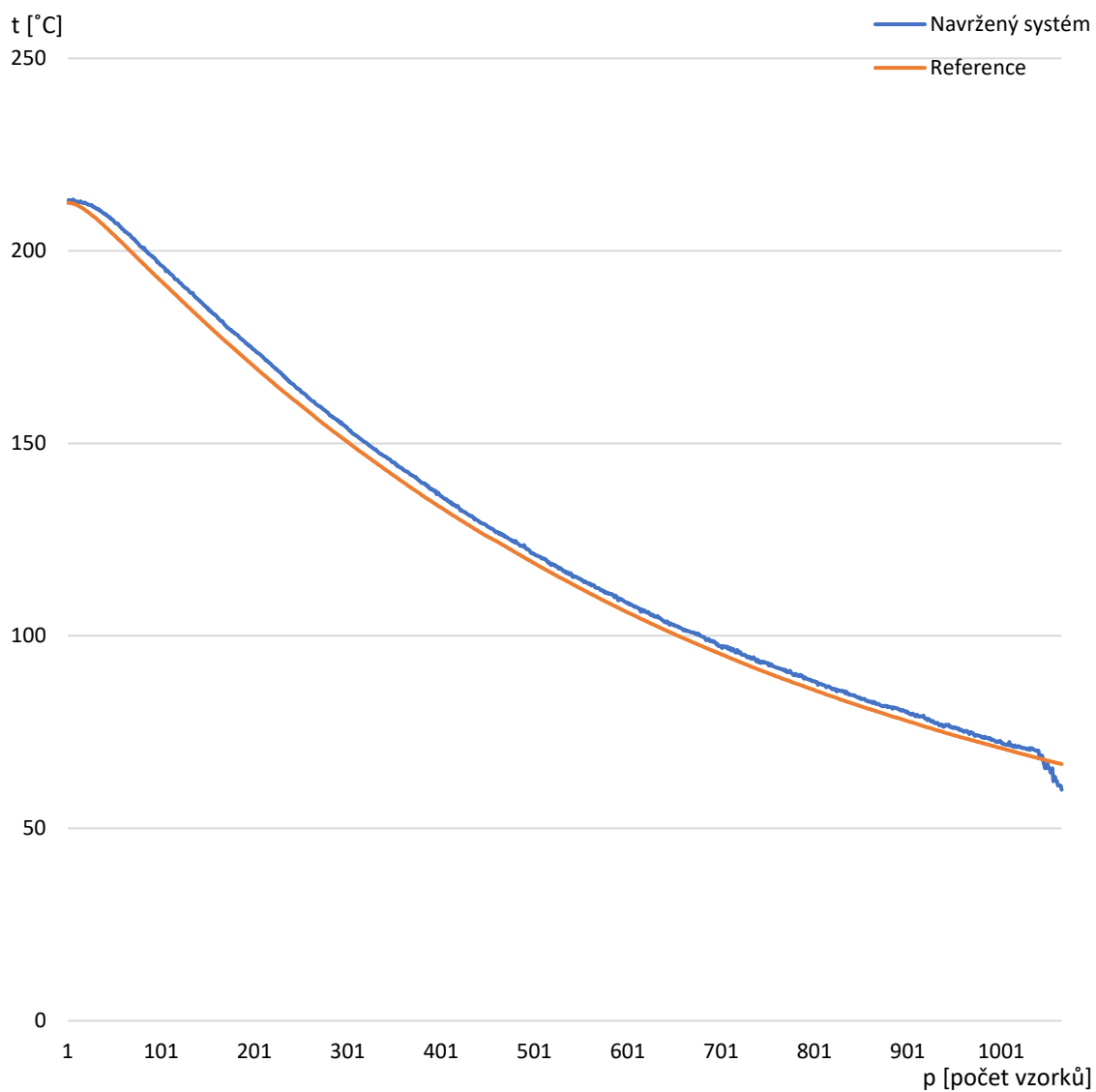
V této části budu řešit finální proměření systému. Finální systém proměřím na to, jak reaguje na změnu teploty vůči referenci. Referenční teploměr bude termočlánek TC091.5P „K“ připojený k měřicí kartě NI cDAQ-9171 jež bude zároveň sloužit jako referenční uzel termočlánu.

Oba teploměry vložím do teplotní komory Voltcraft TC-150, kde prvně nastavím teplotu 60 °C a po ustálení obou teploměrů nastavím teplotu 210 °C. Teplota v komoře bude plynule stoupat k nastavené teplotě. Teplotu 210 °C jsem zvolil proto, že je při ní největší chyba od linearity mého systému (obrázek 4.6 v kapitole 4.5 *Validace funkčnosti zkorigovaného systému*).



Obrázek 11.1 Srovnání obou teploměrů na plynulou změnu teploty (Zahřívání).

Nyní měření zinvertuji. Tzn. budu měřit teplotu od 210 °C do 60 °C. Tím získám charakteristiku plynulého ochlazování.



Obrázek 11.2 Srovnání obou teploměrů na plynulou změnu teploty (Ochlazování).

11.1 Nejistoty měření

Tato kapitola slouží na výpočet nejistot. Nejistotu měření budu počítat pro výstupní napětí zkorigovaného měřicího systému (kapitola 4.4 *Korekce funkčnosti systému*), které slouží jako vstupní napětí do AD převodníku.

Naměřené data k vypočtení nejistoty měření se nachází v příloze L.

Pro rozšířenou nejistotu typu A jsem provedl opakované měření napětí při nastavené teplotě 210 °C, kde je největší chyba od linearity (obrázek 4.6 v kapitole 4.5 *Validace funkčnosti zkorigovaného systému*). Jenže z referenčního termočlánu byla změřena hodnota 212 °C.

Rozšířenou typu A spočítám jako výběrovou směrodatnou odchylku výběrového průměru [19]:

$$u_a(U) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n - 1)} \cdot \sum_{i=1}^n (U_i - \bar{U})^2} \quad [V] \quad (11.1)$$

Kde n je počet měření. Pro můj případ je $n = 15$.

Průměrná hodnota měření je:

$$\bar{U} = 1,7247 \text{ V}$$

Rozšířená nejistota po dosazení do rovnice 10.1 je:

$$u_a = 0,11 \text{ mV}$$

Rozšířená nejistota typu B je nejistota stanovena ze všech zdrojů nejistot měření (např. chyba přístroje, hystereze a zanedbané systematické chyby). Pro moje měření budu uvažovat jen chybu přístroje [20].

Tabulka 11.1 Chyba přístroje multimetru Agilent 34401A. [20]

Accuracy Specifications ± (% of reading + % of range) [1]						
Function	Range [3]	Test Current or Burden Voltage	24 Hour [2] 23°C ± 1°C	90 Day 23°C ± 5°C	1 Year 23°C ± 5°C	Temperature Coefficient /°C 0°C – 18°C 28°C – 55°C
DC Voltage	100.0000 mV		0.0030 + 0.0030	0.0040 + 0.0035	0.0050 + 0.0035	0.0005 + 0.0005
	1.000000 V		0.0020 + 0.0006	0.0030 + 0.0007	0.0040 + 0.0007	0.0005 + 0.0001
	10.00000 V		0.0015 + 0.0004	0.0020 + 0.0005	0.0035 + 0.0005	0.0005 + 0.0001
	100.0000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0006	0.0045 + 0.0006	0.0005 + 0.0001
	1000.000 V		0.0020 + 0.0006	0.0035 + 0.0010	0.0045 + 0.0010	0.0005 + 0.0001

Rozšířenou nejistotu spočítám následovně [19]:

$$u_b(U) = \frac{\delta_H \cdot V_{OUT} + \delta_R \cdot U_R}{X} \quad [V] \quad (11.2)$$

Kde δ_H je chyba z hodnoty a δ_R je chyba z rozsahu. U_R je měřicí rozsah. X je tvar rozložení. Pro moje měření uvažuji $X = 2$ [19].

Nejistotu typu B zjistím pro průměrnou hodnotu naměřených dat z přílohy L. Po dosazení do rovnice 10.2 zjistím nejistotu B:

$$u_b = 5,52 \text{ mV}$$

Kombinovanou standardní nejistotu získám geometrickým sloučením nejistoty typu A a nejistoty typu B [19].

$$u_c(U) = \sqrt{u_a^2 + u_b^2} \quad [V] \quad (11.3)$$

Po dosazení získám:

$$u_c(U) = 5,53 \text{ mV}$$

Kombinovaná standardní nejistota odpovídá intervalu, ve kterém by se výsledky nacházeli se 68% pravděpodobností.

Celková standardní nejistotu vynásobím koeficientem rozšíření $k_r = 2$.

$$U(U) = k_r \cdot u_c(U) \quad [V] \quad (11.4)$$

$$U(U) = 11,06 \text{ mV}$$

Nejistoty se vždy zaokrouhlují nahorů [19].

Rozšířená nejistota měření pro teplotu 212 °C je:

$$V_{OUT} = (1724,70 \pm 11,06) \text{ mV}$$

Na vstupu AD převodníku bude napětí s nejistotou uvedenou výše. Když k tomu připočítáme chybu AD převodníku. Je potřeba zahrnout 2 typy chyb. Chybu diferenční nelinearity (Anglicky DNL – Differential nonlinearity) a chybu integrální nelinearity (Anglicky INL – Integral nonlinearity) [21].

Tabulka 11.2 Chyba AD převodníku mikrokontroléru ESP-32S. [16]

Parameter	Description	Min	Max	Unit
DNL (Differential nonlinearity)	RTC controller; ADC connected to an external 100 nF capacitor; DC signal input;	-7	7	LSB
INL (Integral nonlinearity)	ambient temperature at 25 °C; Wi-Fi&BT off	-12	12	LSB

Tabulka 11.3 Vypočítané nejistoty měření pro hodnoty look-up tabulky

t [°C]	U _{AVG} [V]	U _c (U) [mV]	U(U) [mv]
60,2	0,0748	0,36	0,73
70,1	0,1136	0,58	1,16
80,1	0,1625	0,68	1,36
90,1	0,2234	0,80	1,60
100	0,2996	0,95	1,91
110,2	0,3925	1,14	2,28
120,1	0,4975	1,35	2,70
130,2	0,6174	1,58	3,18
140,1	0,7503	1,85	3,71
150,1	0,8935	2,14	4,28
160,2	1,0436	4,33	8,66
170,2	1,1918	4,59	9,18
180,1	1,3367	4,84	9,69
190,1	1,473	5,08	10,17
200,1	1,6011	5,30	10,61
210	1,718	5,51	11,02
220,2	1,8149	5,68	11,36
230,1	1,9177	5,86	11,72
240,1	2,0024	6,00	12,02
250,2	2,0763	6,13	12,28
260,1	2,1391	6,24	12,50

12. ZHODNOCENÍ DOSAŽENÝCH VÝSLEDKŮ

Hlavním cíle mojí práce bylo navrhnout měřicí systém pro měření teploty grilu. Jako nejvhodnější teplotní sondu jsem zvolil už hotovou sondu od společnosti Weber, u které jsem nevěděl, jaký typ sondy je uvnitř. To jsem musel zjistit na základě měření, pomocí kterých jsem zjistil, že se jedná o NTC 100K termistor (kapitola 3.1 *Identifikace typu snímače*).

Pro tuto sondu jsem následně navrhl připojení k mikrokontroléru, který byl vybrán ESP-32S (kapitola 4. *Návrh připojení sondy k mikrokontroléru*).

Poté bylo nutné navrhnut napájecí část celého systému, kde byl kladen důraz na stabilitu výstupního napětí napájecí části pro správnou funkci měřicího systému (kapitola 5. *Návrh napájecí části*).

Následoval návrh desky plošného spoje, kde bylo nutné aby 2x19 kolíkové zásuvky pasovaly na zvolený mikrokontrolér. Také bylo potřeba aby pod anténou mikrokontroléru, situovanou na horní straně u 8 kolíkové zásuvky pro displej, který zároveň slouží pro zobrazení výsledné teploty. Baterie se nenachází na DPS z důvodů rozměrů a budou řešeny samostatně. Na desce se pouze nachází díry na Vcc a GND pro připojení kabelů od baterie.

Výsledná realizace systému odpovídá teoretickým předpokladům (kapitola 7. *Validace funkčnosti praktické realizace*). Pro získání teploty z napětí převedené AD převodníkem na diskretní číslo, jsem použil look-up tabulku (kapitola 9. *Look-up tabulka*). Poté jsem napsal jednoduchý měřicí program pro mikrokontrolér, kde jsem využil rovnici lineární interpolace 9.1, pro získání teploty i mimo jakoukoliv hodnotu look-up tabulky.

Dosažené výsledky (kapitola 11. *Validace funkčnosti finálního systému*) jsou na delší časovou odezvu přesné. Lze vidět z obrázku 11.1, že navržený systém začíná měřit, až když je reference v okolí 70 °C. To samé jde vidět i z obrázku 11.2, kde při teplotě 68 °C spadne teplota navrženého systému na 60 °C. To může být zapříčiněno chybně zvolených rozsahem výstupního napětí. Viditelná časová odezva mezi referencí a navrženým systémem může být způsobena průměrováním posledních 10 hodnot AD převodníku pro získání výsledné teploty. Také to může být zapříčiněno jinou časovou odezvou referenčního teploměru.

V kapitole 11.1 *Nejistoty měření* jsem vypočítal velikost nejistoty napětí, ve které by se na 95% měla nacházet měřená hodnota výstupního napětí [19].

13. ZÁVĚR

Tato práce se zabývá výběrem teplotního snímače a návrhem měřicího systému pro měření teploty grilu. Praktická využitelnost měřicího systému umožňuje spolehlivé monitorování teploty uvnitř grilu a poskytuje přesnost a kontrolu nad procesem grilování. Používání navrženého měřicího systému uvnitř udírny není doporučeno, z důvodu navrženého teplotní rozsahu, který měří přesně teploty nad 100 °C, zatímco v udírnách jsou teploty často v rozmezí 60-100 °C

Možné budoucí vylepšení je například zajištění bezdrátového přenosu informace díky bluetooth a wifi modulu integrovaného do ESP-32S a vytvoření mobilní aplikace pro získání informace o vnitřní teplotě grilu z pohodlí domova.

Další možné vylepšení je možnost zajištění regulace na požadované hodnotě teploty v grilu. Teplota by se mohla regulovat přívodem vzduchu přes průduchy k palivu grilu.

LITERATURA

- [1] OSTADFAR, Ali. Chapter 8 - Real Time Measurement Techniques of Biofluids. In: *Biofluid Mechanics*. Simon Fraser University: Academic Press, 2016, s. 295-322. ISBN 978-0-12-802408-9.
Dostupné z:
<https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/glass-thermometer#:~:text=Industrial%20versions%20of%20the%20liquid,Figure%2014.18>.
- [2] BENEŠ, Petr. BPC-SNI: Snímače. *BPC-SNI*. Ústav automatizace a měřicí techniky FEKT VUT v Brně, 2020, 2020(220919), 135-171.
- [3] Comments on the Steinhart-Hart Equation: Application Note. [online]. 750 North Royal Avenue, Gays Mills WI 54631 USA, 2015, Nov 11 2015, 1-4, [cit. 2022-11-25].
Dostupné z:
https://www.bapihvac.com/wp-content/uploads/SHH_Equation_Comments.pdf
- [4] AMBIENT PROBE PLACEMENT. Weber Grills [online]. Weber, 2022, [cit. 2022-12-26].
Dostupné z:
<https://consumer-care.weber.com/hc/en-us/articles/4404682608276-Ambient-Probe-Placement>
- [5] STEFANŮV - BOLTZMANNŮV ZÁKON. [online]. Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně: Odbor termomechaniky a techniky prostředí, [cit. 2022-12-26].
Dostupné z:
<https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0204.htm>
- [6] BHATIA, A. Principles and Methods of Temperature Measurement. Continuing Education and Development, Inc. [online]. Continuing Education and Development, Inc. 22 Stonewall Court Woodcliff Lake, NJ 07677.(E02-012), 1-22 [cit. 2022-11-12].
Dostupné z:
<https://www.cedengineering.com/userfiles/Principles%20and%20Methods%20of%20Temperature%20Measurement-R1.pdf>
- [7] Thermistor Basics. Wavelength electronics [online]. 2013, May 2013. (Application Note AN-TC11 Rev. A), 1-6 [cit. 2022-12-27].
Dostupné z:
<https://www.teamwavelength.com/download/applicationtechnotes/an-tc11.pdf>
- [8] Thermistor: Chapter 3 - Resistor Types [online]. EEPower. [cit. 2022-12-27].
Dostupné z:
<https://eepower.com/resistor-guide/resistor-types/thermistor/>
- [9] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Seebeckův jev. Encyklopedie Fyziky [online]. 1-2 [cit. 2022-12-28].
Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/pdf/910-seebeckuv-jev>

- [10] REICHL, Jaroslav a Martin VŠETIČKA. Peltierův jev. Encyklopedie Fyziky [online]. 1-4 [cit. 2022-12-28].
Dostupné z:
<http://fyzika.jreichl.com/main.article/pdf/911-peltieruv-jev>
- [11] Measuring the temperature with NTCs. Giangrandi [online]. 2009, August 2009 [cit. 2022-12-29].
Dostupné z:
<https://www.giangrandi.org/electronics/ntc/ntc.shtml>
- [12] Temperature Sensing with NTC Circuit. TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED. Analog Engineer's Circuit Amplifiers [online]. Dallas (Texas), 2018, June 2021, 1-4 [cit. 2023-01-03].
Dostupné z:
<https://www.ti.com/lit/an/sboa323a/sboa323a.pdf>
- [13] NTC Thermistors Steinhart and Hart Equation. *AMETHERM* [online]. 961 Fairview Drive ,Carson City, Nevada 89701 U.S.A.: Ametherm, [cit. 2023-04-09].
Dostupné z:
<https://www.ametherm.com/thermistor/ntc-thermistors-steinhart-and-hart-equation>
- [14] MCP601/1R/2/3/4: 2.7V to 6.0V Single Supply CMOS Op Amps. *Microchip* [online]. Microchip Technology, 2007, December 2007, 1-34 [cit. 2023-05-08].
Dostupné z:
https://www.tme.eu/Document/045012967a639b4c60caa005375ed495/mcp601_2_4.pdf
- [15] MCP1603/B/L: 2.0 MHz, 500 mA Synchronous Buck Regulator. *Microchip*. [online]. Microchip Technology, 2007-2012. [cit. 2023-05-13].
Dostupné z:
https://www.tme.eu/Document/de7d38f249f36fadffea0e6430703bcf/_LDO_SG.pdf
- [16] ESP32 Series: Datasheet. [online]. Espressif Systems, 2016, 2016. [cit. 2023-05-13].
Dostupné z:
https://www.espressif.com/sites/default/files/documentation/esp32_datasheet_en.pdf
- [17] *CircuitBread: What is a PWM signal?* [online]. CircuitBread, 2022 [cit. 2023-05-14].
Dostupné z:
<https://www.circuitbread.com/ee-faq/what-is-a-pwm-signal>;
- [18] SIAUW, Timmy a Alexandre BAYEN. Chapter 14 - Interpolation. In: *An introduction to MATLAB programming and numerical methods for engineers*. Amsterdam: Elsevier, [2015], s. 211-223. ISBN 9780124202283.
Dostupné také z:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780124202283000142>
- [19] ŠEDIVÁ, Soňa. Měření v elektrotechnice. *BPC-MVE. Ústav automatizace a měřicí techniky*: VUT v Brně, 2015, 1-31.
- [20] Keysight 34401A: 6½ Digit Multimeter. *Keysight Technologies: 34401A Service Guide*. 815 – 14th St. SW Loveland, Colorado 80537 USA: Agilent Technologies, Incorporated, 18 July 2001n. 1., 19.

[21] ARAR, Steve. Understanding ADC Differential Nonlinearity (DNL) Error. *All About Circuits* [online], 2022, December 09, 2022 [cit. 2023-05-17].

Dostupné z:

<https://www.allaboutcircuits.com/technical-articles/understanding-analog-to-digital-converter-differential-nonlinearity-dnl-error/>

[22] ER-TFTM1.28-1: TFT LCD Module Datasheet. '. [online]. Eastrising Technology Co., Limited, May-20-2020, 1-20 [cit. 2023-05-18].

Dostupné z:

https://www.laskakit.cz/user/related_files/er-tftm1-28-1_datasheet.pdf

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA A - NAMĚŘENÉ HODNOTY PRO KALIBRACI.....	76
PŘÍLOHA B - NAMĚŘENÉ HODNOTY V OKOLÍ 0°C.....	77
PŘÍLOHA C - GRAFY PRO ZMĚŘENÉ HODNOTY	78
PŘÍLOHA D - STEINHART-HARTOVA APROXIMACE.....	79
PŘÍLOHA E - TABULKA VÝSTUPNÍCH HODNOT	80
PŘÍLOHA F - GRAFY ZÍSKANÉ Z PROGRAMU LTSPICE.....	82
.....	83
.....	84
PŘÍLOHA G - TABULKA VÝSTUPNÍCH HODNOT PRO ZKORIGOVANÝ SYSTÉM	85
PŘÍLOHA H - GRAFY Z PROGRAMU LTSPICE PRO ZKORIGOVANÝ SYSTÉM	87
.....	88
PŘÍLOHA I - NÁVRH DESKY PLOŠNÉHO SPOJE	89
.....	90
PŘÍLOHA J - SEZNAM SOUČÁSTEK	91
PŘÍLOHA K - SEZNAM POUŽITÝCH PŘÍSTROJŮ	92
PŘÍLOHA L - DATA PRO VÝPOČET NEJISTOT	93
PŘÍLOHA M - SEZNAM ELEKTRONICKÝCH PŘÍLOH	94

Příloha A - Naměřené hodnoty pro kalibraci

Změřené	
x [°C]	y [kΩ]
19,94	125,264
24,98	98,665
29,64	79,317
34,48	64,105
40,10	52,101
45,13	42,622
50,17	35,025
55,03	29,007
60,13	24,035
65,34	20,009
70,22	16,818
75,33	14,181
80,25	12,101
85,11	10,321
90,31	8,745
95,21	7,414
100,18	6,344
105,24	5,453
110,24	4,732
115,28	4,097
120,16	3,578
125,09	3,128
130,22	2,732
135,14	2,403
140,17	2,112
145,07	1,864
150,04	1,643
155,17	1,448
160,17	1,284
165,41	1,134
170,31	1,012
175,34	0,895
180,44	0,802
185,39	0,719
190,21	0,649
195,11	0,585
200,18	0,525

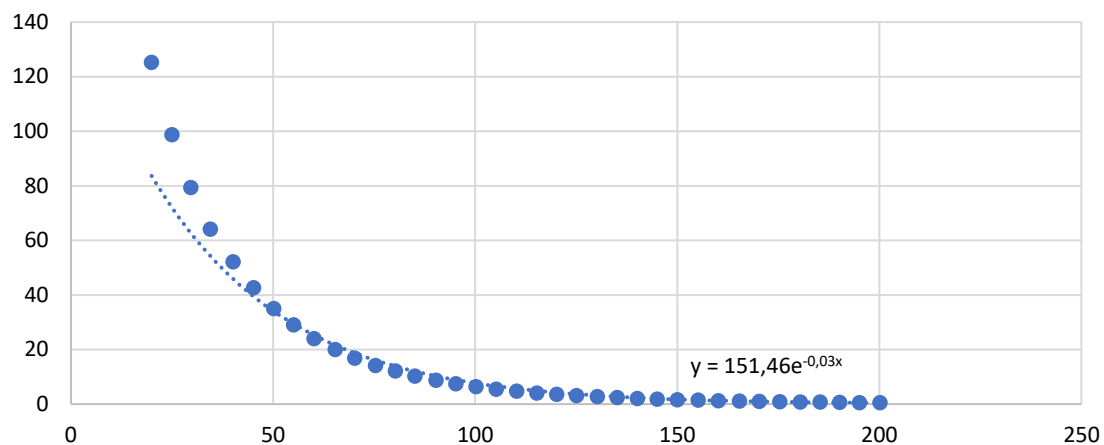
Steinhart-Hart	
x [°C]	y [kΩ]
19,94	120,627
24,98	96,764
29,64	79,317
34,48	64,835
40,10	51,614
45,13	42,309
50,17	34,836
55,03	29,011
60,13	24,052
65,34	19,953
70,22	16,818
75,33	14,120
80,25	11,978
85,11	10,219
90,31	8,654
95,21	7,426
100,18	6,380
105,24	5,484
110,24	4,738
115,28	4,102
120,16	3,578
125,09	3,126
130,22	2,723
135,14	2,393
140,17	2,102
145,07	1,858
150,04	1,643
155,17	1,451
160,17	1,289
165,41	1,141
170,31	1,020
175,34	0,912
180,44	0,815
185,39	0,733
190,21	0,662
195,11	0,598
200,18	0,540

Příloha B - Naměřené hodnoty v okolí 0°C

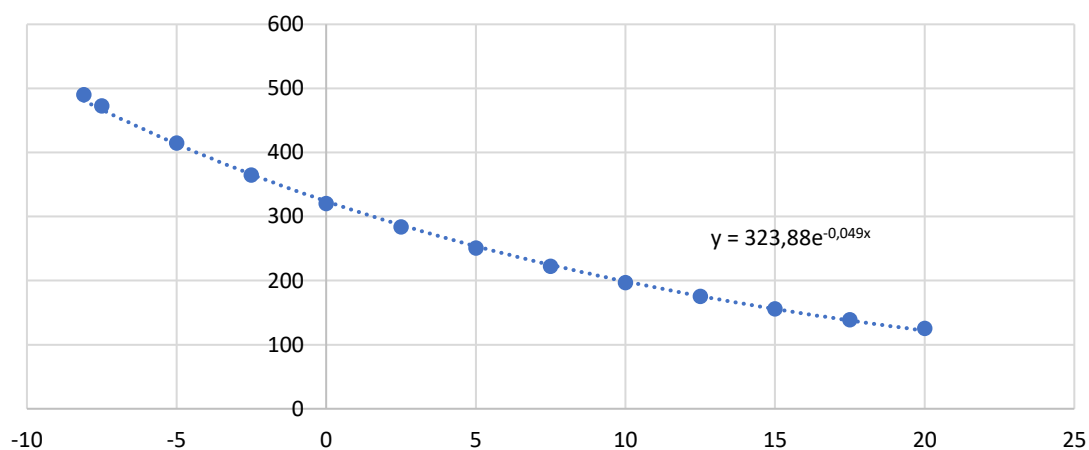
R vodičů	0,160kΩ
x [°C]	y [kΩ]
-8,1	489,848
-7,5	472,747
-5	414,613
-2,5	364,832
0	320,229
2,5	283,569
5	250,841
7,5	222,112
10	196,945
12,5	175,014
15	155,575
17,5	138,538
20	125,264

Příloha C - Grafy pro změřené hodnoty

20 - 200 stupňů Celsia



V okolí 0 stupňů Celsia



Příloha D - Steinhart-Hartova aproximace

$$L_1 = \ln(R_1) = \ln(125264) = 11,7382 \quad (2.3)$$

$$L_2 = \ln(R_2) = \ln(14181) = 9,5597$$

$$L_3 = \ln(R_3) = \ln(525) = 6,2634$$

$$Y_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{(19,94 + 273,15)} = 0,0034 \quad (2.4)$$

$$Y_2 = \frac{1}{T_2} = \frac{1}{(75,33 + 273,15)} = 0,0029$$

$$Y_3 = \frac{1}{T_3} = \frac{1}{(200,18 + 273,15)} = 0,0021$$

$$\gamma_1 = \frac{Y_2 - Y_1}{L_2 - L_1} = \frac{0,0029 - 0,0034}{9,5597 - 11,7382} = 0,0002 \quad (2.5)$$

$$\gamma_2 = \frac{Y_3 - Y_1}{L_3 - L_1} = \frac{0,0021 - 0,0034}{6,2634 - 11,7382} = 0,0002$$

$$C = \left(\frac{\gamma_3 - \gamma_1}{L_3 - L_1} \right) \cdot (L_1 + L_2 + L_3)^{-1} = \dots = 1,2797 \cdot 10^{-7} \quad (2.6)$$

$$B = \gamma_2 - C \cdot (L_1^2 + L_1 \cdot L_2 + L_2^2) = \dots = 2,0525 \cdot 10^{-4} \quad (2.7)$$

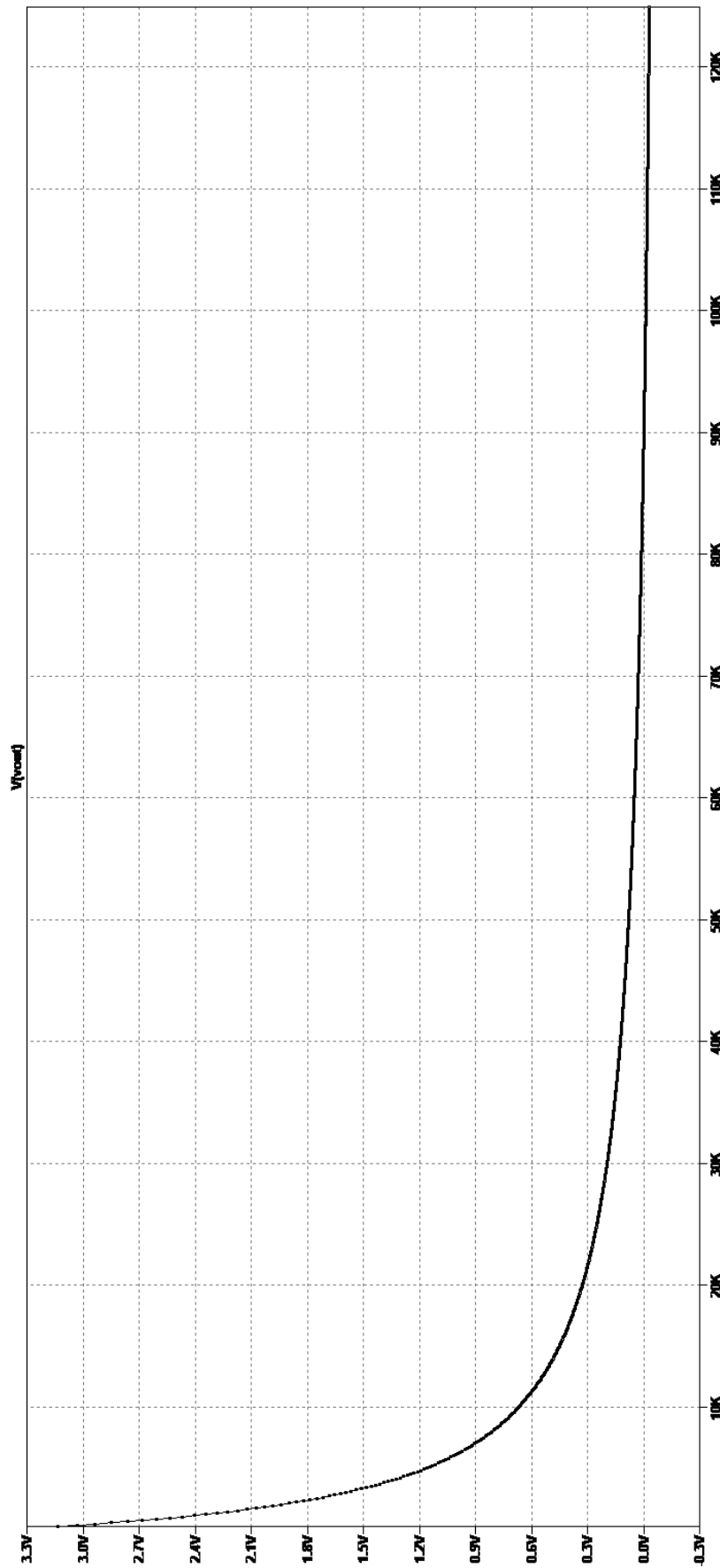
$$A = Y_1 - L_1 \cdot (B + C \cdot L_1^2) = \dots = 7,9568 \cdot 10^{-4} \quad (2.8)$$

Příloha E - Tabulka výstupních hodnot

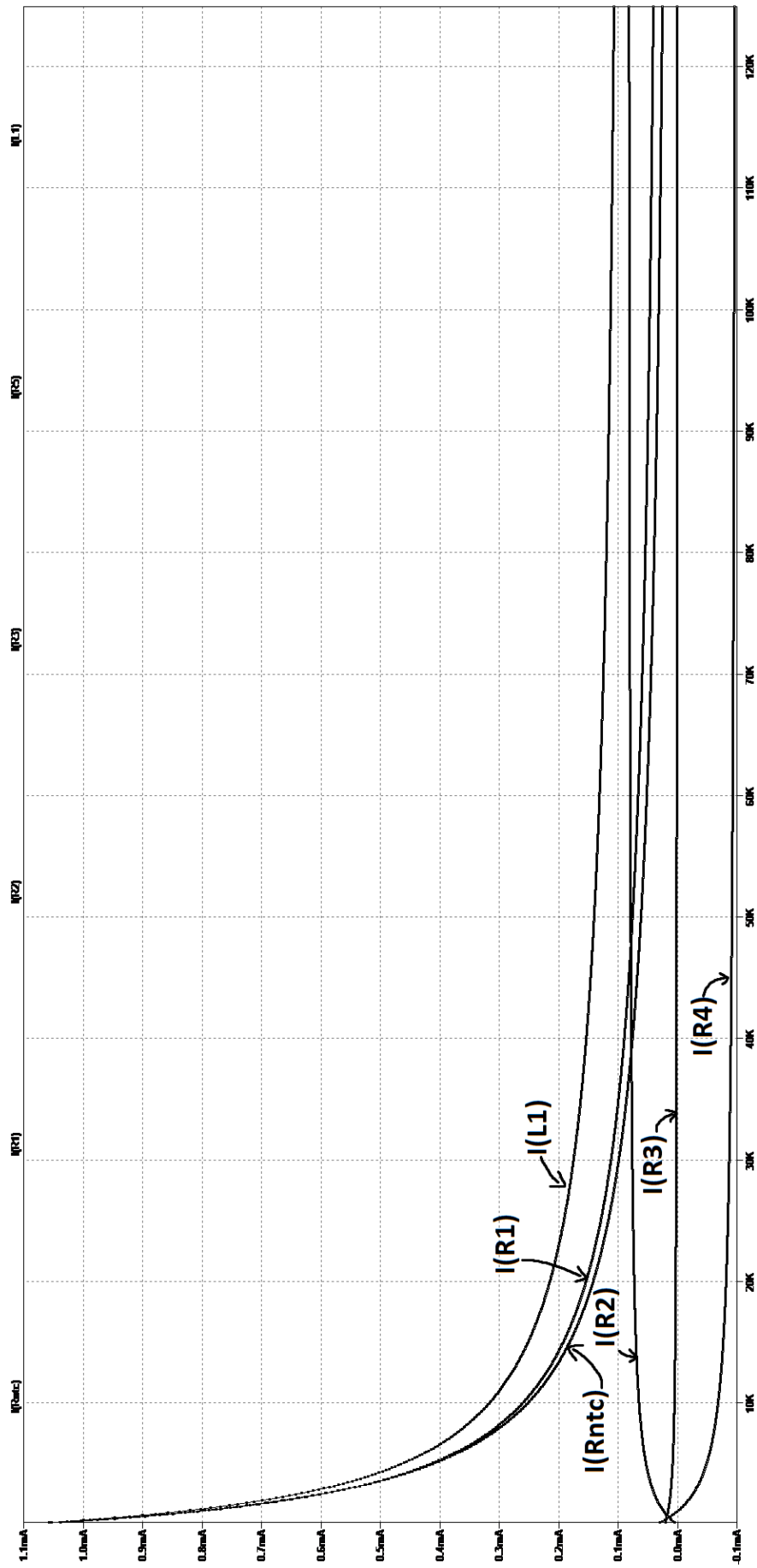
t [C]	t [K]	x	y	R [Ω]	Vout [V]	Lineární [V]	ΔU [V]	Δt [C]
20	293,15	-20438,7092	16039,0128	124925,5836	0,0462	0,0493	-0,0031	-0,2333
25	298,15	-19991,6790	15897,5322	100006,4954	0,0659	0,1158	-0,0499	-3,7441
30	303,15	-19559,3950	15762,5254	80515,8402	0,0895	0,1823	-0,0928	-6,9624
35	308,15	-19141,1394	15633,6345	65181,1546	0,1175	0,2488	-0,1313	-9,8470
40	313,15	-18736,2401	15510,5254	53047,6103	0,1506	0,3153	-0,1647	-12,3550
45	318,15	-18344,0675	15392,8856	43394,2333	0,1892	0,3818	-0,1926	-14,4436
50	323,15	-17964,0309	15280,4229	35673,3316	0,2340	0,4483	-0,2143	-16,0708
55	328,15	-17595,5755	15172,8637	29466,4128	0,2855	0,5148	-0,2293	-17,1980
60	333,15	-17238,1797	15069,9514	24451,8972	0,3441	0,5813	-0,2372	-17,7921
65	338,15	-16891,3532	14971,4454	20381,3229	0,4101	0,6478	-0,2377	-17,8273
70	343,15	-16554,6338	14877,1200	17061,7044	0,4838	0,7143	-0,2305	-17,2885
75	348,15	-16227,5860	14786,7630	14342,3777	0,5652	0,7808	-0,2156	-16,1726
80	353,15	-15909,7991	14700,1752	12105,1354	0,6541	0,8473	-0,1932	-14,4911
85	358,15	-15600,8853	14617,1690	10256,7887	0,7502	0,9138	-0,1636	-12,2707
90	363,15	-15300,4779	14537,5679	8723,5302	0,8529	0,9803	-0,1274	-9,5544
95	368,15	-15008,2305	14461,2057	7446,6385	0,9615	1,0468	-0,0853	-6,4004
100	373,15	-14723,8150	14387,9257	6379,1905	1,0749	1,1133	-0,0384	-2,8807
105	378,15	-14446,9207	14317,5802	5483,5307	1,1921	1,1798	0,0123	0,9218
110	383,15	-14177,2532	14250,0298	4729,3171	1,3118	1,2463	0,0655	4,9160
115	388,15	-13914,5332	14185,1430	4092,0021	1,4329	1,3128	0,1201	9,0073
120	393,15	-13658,4956	14122,7954	3551,6491	1,5540	1,3793	0,1747	13,1010
125	398,15	-13408,8887	14062,8695	3092,0052	1,6739	1,4458	0,2281	17,1064
130	403,15	-13165,4732	14005,2542	2699,7719	1,7915	1,5123	0,2792	20,9397
135	408,15	-12928,0217	13949,8444	2364,0289	1,9058	1,5788	0,3270	24,5274
140	413,15	-12696,3174	13896,5407	2075,7785	2,0161	1,6453	0,3708	27,8072
145	418,15	-12470,1543	13845,2487	1827,5812	2,1215	1,7118	0,4097	30,7292
150	423,15	-12249,3360	13795,8792	1613,2663	2,2217	1,7783	0,4434	33,2562
155	428,15	-12033,6752	13748,3475	1427,6989	2,3163	1,8448	0,4715	35,3628
160	433,15	-11822,9932	13702,5733	1266,5928	2,4051	1,9113	0,4938	37,0348
165	438,15	-11617,1198	13658,4806	1126,3596	2,4880	1,9778	0,5102	38,2672

170	443,15	-11415,8919	13615,9969	1003,9859	2,5651	2,0443	0,5208	39,0635
175	448,15	-11219,1543	13575,0536	896,9340	2,6366	2,1108	0,5258	39,4336
180	453,15	-11026,7583	13535,5854	803,0612	2,7025	2,1773	0,5252	39,3922
185	458,15	-10838,5616	13497,5304	720,5530	2,7632	2,2438	0,5194	38,9582
190	463,15	-10654,4284	13460,8296	647,8686	2,8190	2,3103	0,5087	38,1526
195	468,15	-10474,2283	13425,4269	583,6969	2,8701	2,3768	0,4933	36,9983
200	473,15	-10297,8368	13391,2690	526,9187	2,9169	2,4433	0,4736	35,5187
205	478,15	-10125,1344	13358,3049	476,5768	2,9596	2,5098	0,4498	33,7372
210	483,15	-9956,0064	13326,4864	431,8503	2,9987	2,5763	0,4224	31,6770
215	488,15	-9790,3431	13295,7673	392,0336	3,0343	2,6428	0,3915	29,3604
220	493,15	-9628,0391	13266,1037	356,5188	3,0668	2,7093	0,3575	26,8088
225	498,15	-9468,9932	13237,4538	324,7812	3,0964	2,7758	0,3206	24,0420
230	503,15	-9313,1084	13209,7775	296,3667	3,1234	2,8423	0,2811	21,0791
235	508,15	-9160,2912	13183,0367	270,8815	3,1480	2,9088	0,2392	17,9373
240	513,15	-9010,4521	13157,1952	247,9834	3,1704	2,9753	0,1951	14,6329
245	518,15	-8863,5047	13132,2181	227,3746	3,1909	3,0418	0,1491	11,1807
250	523,15	-8719,3663	13108,0723	208,7950	3,2096	3,1083	0,1013	7,5941
255	528,15	-8577,9570	13084,7262	192,0177	3,2266	3,1748	0,0518	3,8857
260	533,15	-8439,2000	13062,1494	176,8435	3,2422	3,2413	0,0009	0,0667

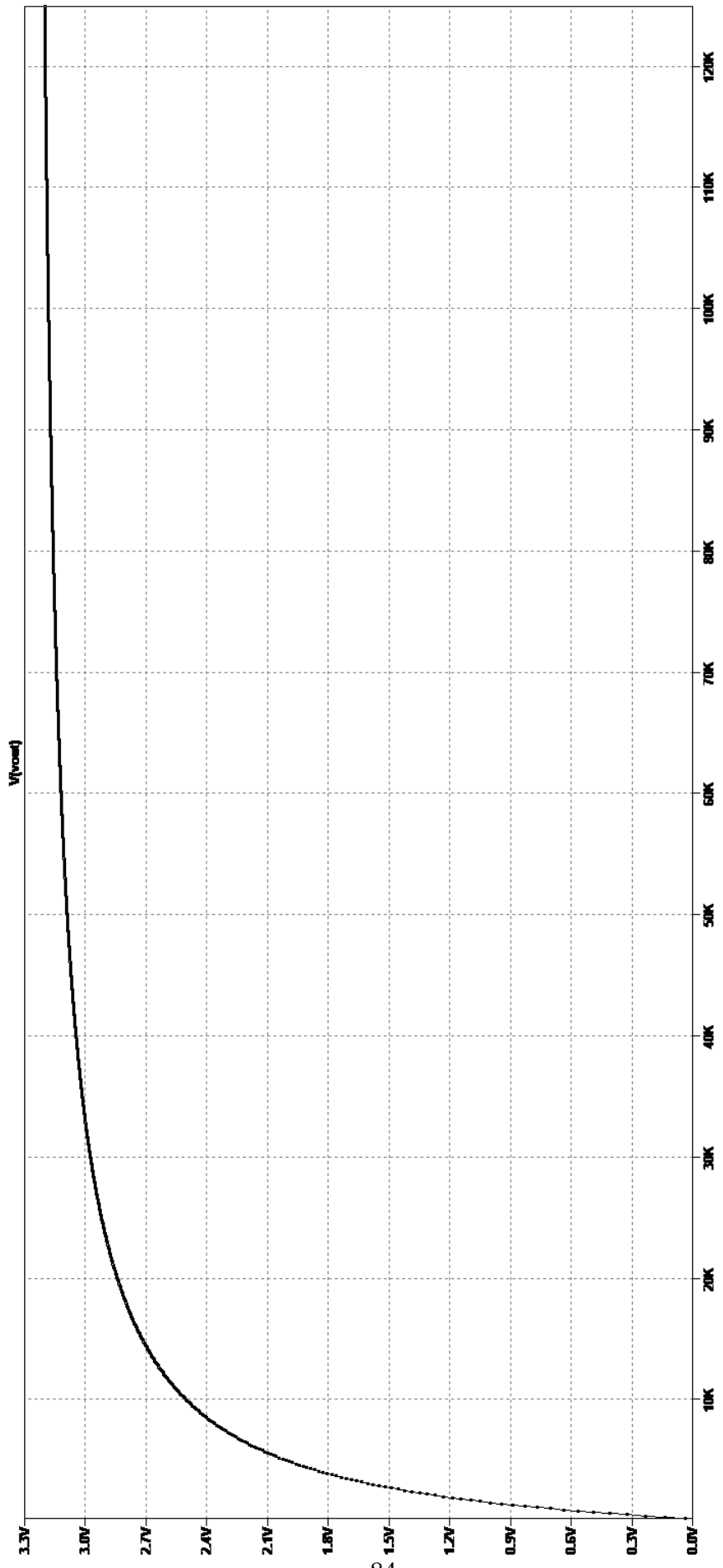
Příloha F - Grafy získané z programu Ltspice



Obrázek 1. Závislost výstupního napětí systému na odporu termistoru.



Obrázek 2. Závislost velikosti proudů na odporu termistoru.



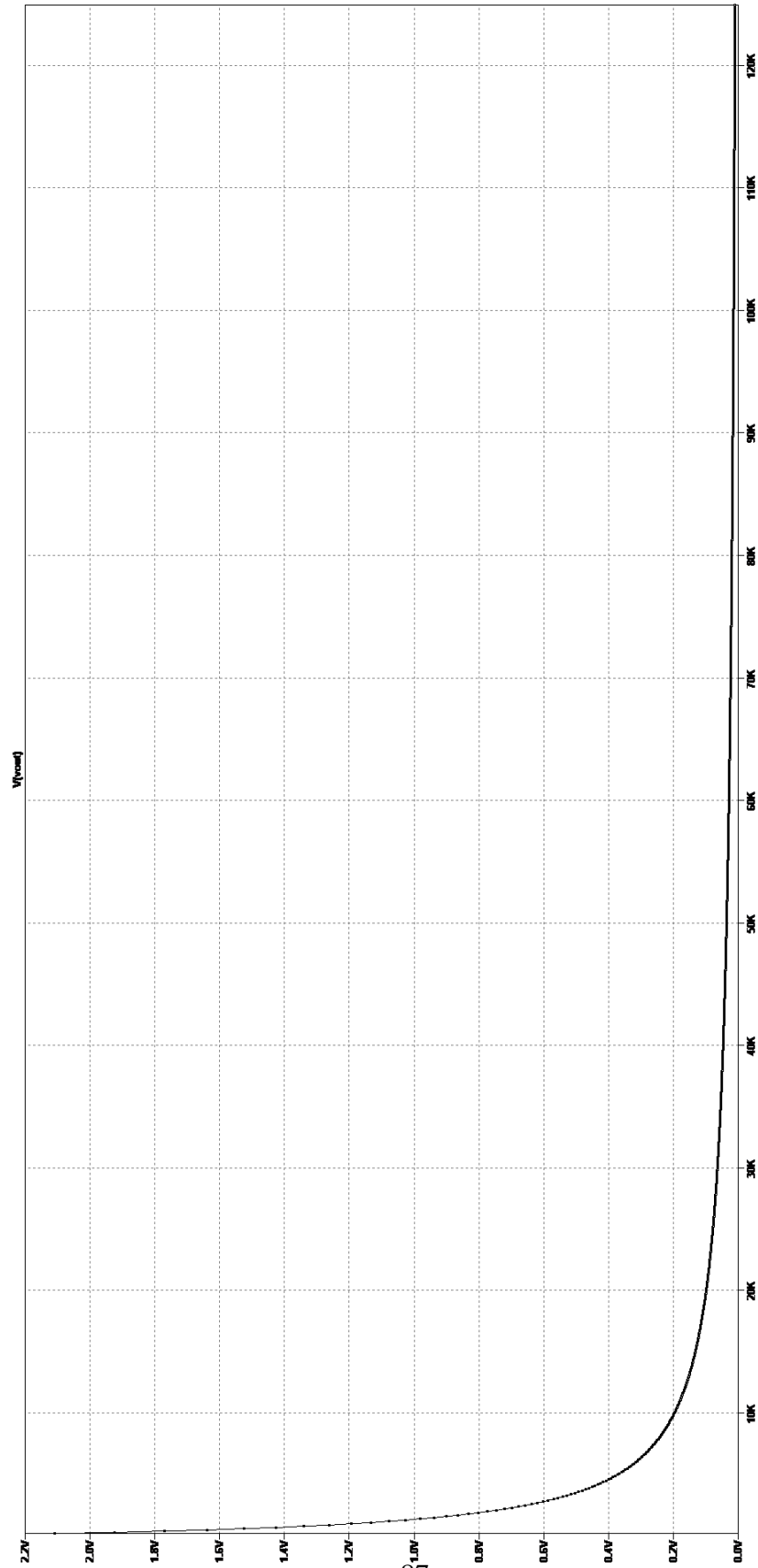
Obrázek 3. Závislost výstupního napětí systému na odporu termistoru v případě prohození R1 a termistoru.

Příloha G - Tabulka výstupních hodnot pro zkorigovaný systém

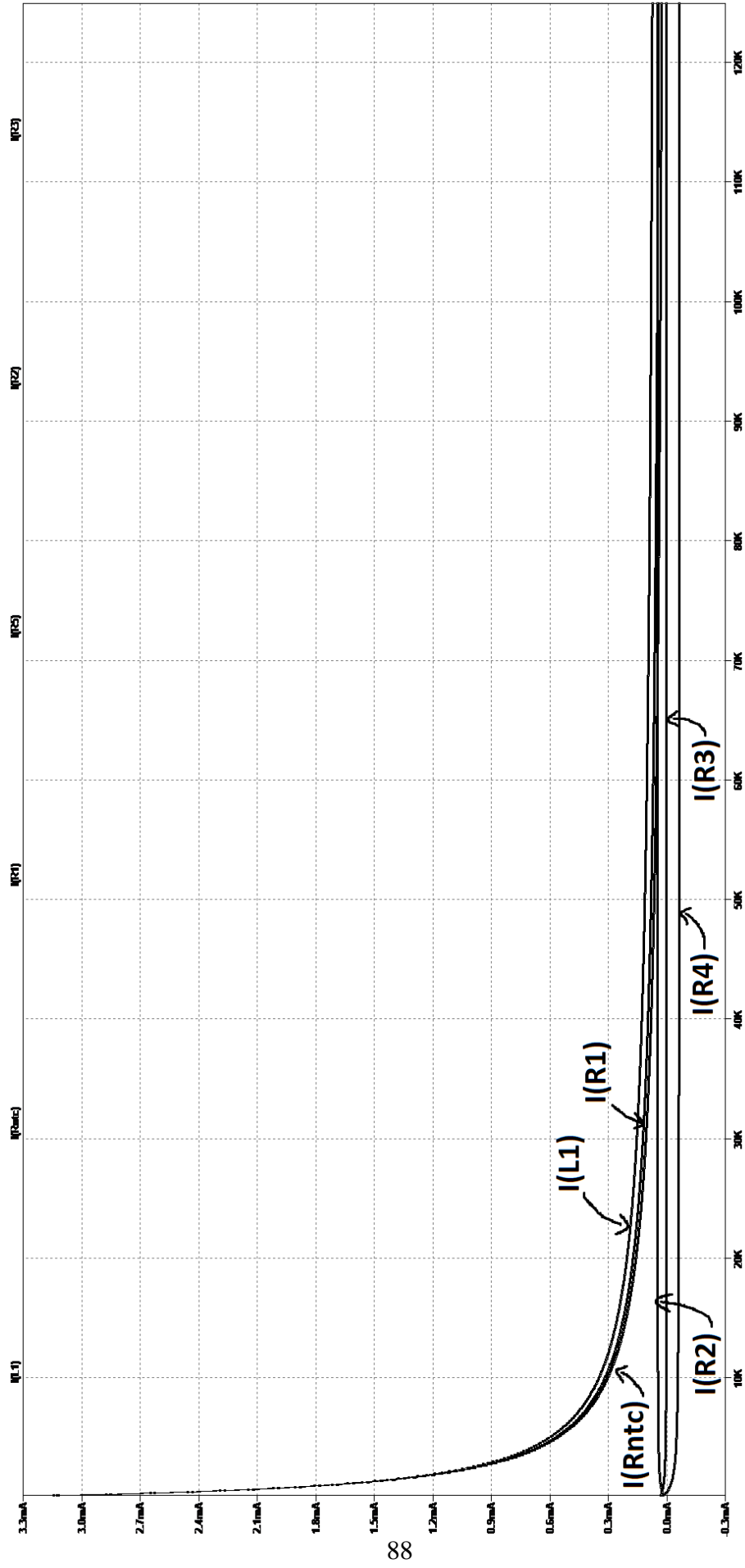
t [C]	t [K]	x	y	R [Ω]	Vout [V]	Lineární	ΔNonlinearity	Δt [C]
60	333,15	-17238,1797	15069,9514	24651,8972	0,0748	0,0735	0,0013	0,1291
65	338,15	-16891,3532	14971,4454	20581,3229	0,0919	0,1240	-0,0321	-3,1688
70	343,15	-16554,6338	14877,1200	17261,7044	0,1116	0,1745	-0,0629	-6,2107
75	348,15	-16227,5860	14786,7630	14542,3777	0,1342	0,2250	-0,0908	-8,9722
80	353,15	-15909,7991	14700,1752	12305,1354	0,1598	0,2755	-0,1157	-11,4292
85	358,15	-15600,8853	14617,1690	10456,7887	0,1887	0,3260	-0,1373	-13,5592
90	363,15	-15300,4779	14537,5679	8923,5302	0,2212	0,3765	-0,1553	-15,3415
95	368,15	-15008,2305	14461,2057	7646,6385	0,2573	0,4270	-0,1697	-16,7590
100	373,15	-14723,8150	14387,9257	6579,1905	0,2973	0,4775	-0,1802	-17,7981
105	378,15	-14446,9207	14317,5802	5683,5307	0,3412	0,5280	-0,1868	-18,4507
110	383,15	-14177,2532	14250,0298	4929,3171	0,3890	0,5785	-0,1895	-18,7141
115	388,15	-13914,5332	14185,1430	4292,0021	0,4408	0,6290	-0,1882	-18,5925
120	393,15	-13658,4956	14122,7954	3751,6491	0,4963	0,6795	-0,1832	-18,0971
125	398,15	-13408,8887	14062,8695	3292,0052	0,5554	0,7300	-0,1746	-17,2464
130	403,15	-13165,4732	14005,2542	2899,7719	0,6178	0,7805	-0,1627	-16,0664
135	408,15	-12928,0217	13949,8444	2564,0289	0,6833	0,8310	-0,1477	-14,5899
140	413,15	-12696,3174	13896,5407	2275,7785	0,7513	0,8815	-0,1302	-12,8562
145	418,15	-12470,1543	13845,2487	2027,5812	0,8215	0,9320	-0,1105	-10,9098
150	423,15	-12249,3360	13795,8792	1813,2663	0,8934	0,9825	-0,0891	-8,7993
155	428,15	-12033,6752	13748,3475	1627,6989	0,9664	1,0330	-0,0666	-6,5760
160	433,15	-11822,9932	13702,5733	1466,5928	1,0400	1,0835	-0,0435	-4,2921
165	438,15	-11617,1198	13658,4806	1326,3596	1,1138	1,1340	-0,0202	-1,9997
170	443,15	-11415,8919	13615,9969	1203,9859	1,1870	1,1845	0,0025	0,2511
175	448,15	-11219,1543	13575,0536	1096,9340	1,2594	1,2350	0,0244	2,4132
180	453,15	-11026,7583	13535,5854	1003,0612	1,3305	1,2855	0,0450	4,4435
185	458,15	-10838,5616	13497,5304	920,5530	1,3998	1,3360	0,0638	6,3039
190	463,15	-10654,4284	13460,8296	847,8686	1,4671	1,3865	0,0806	7,9618
195	468,15	-10474,2283	13425,4269	783,6969	1,5321	1,4370	0,0951	9,3899
200	473,15	-10297,8368	13391,2690	726,9187	1,5945	1,4875	0,1070	10,5669

205	478,15	-10125,1344	13358,3049	676,5768	1,6542	1,5380	0,1162	11,4766
210	483,15	-9956,0064	13326,4864	631,8503	1,7111	1,5885	0,1226	12,1082
215	488,15	-9790,3431	13295,7673	592,0336	1,7651	1,6390	0,1261	12,4554
220	493,15	-9628,0391	13266,1037	556,5188	1,8162	1,6895	0,1267	12,5162
225	498,15	-9468,9932	13237,4538	524,7812	1,8645	1,7400	0,1245	12,2918
230	503,15	-9313,1084	13209,7775	496,3667	1,9098	1,7905	0,1193	11,7868
235	508,15	-9160,2912	13183,0367	470,8815	1,9525	1,8410	0,1115	11,0079
240	513,15	-9010,4521	13157,1952	447,9834	1,9924	1,8915	0,1009	9,9640
245	518,15	-8863,5047	13132,2181	427,3746	2,0297	1,9420	0,0877	8,6653
250	523,15	-8719,3663	13108,0723	408,7950	2,0646	1,9925	0,0721	7,1230
255	528,15	-8577,9570	13084,7262	392,0177	2,0972	2,0430	0,0542	5,3491
260	533,15	-8439,2000	13062,1494	376,8435	2,1275	2,0935	0,0340	3,3561

Příloha H - Grafy z programu LTspice pro zkorigovaný systém

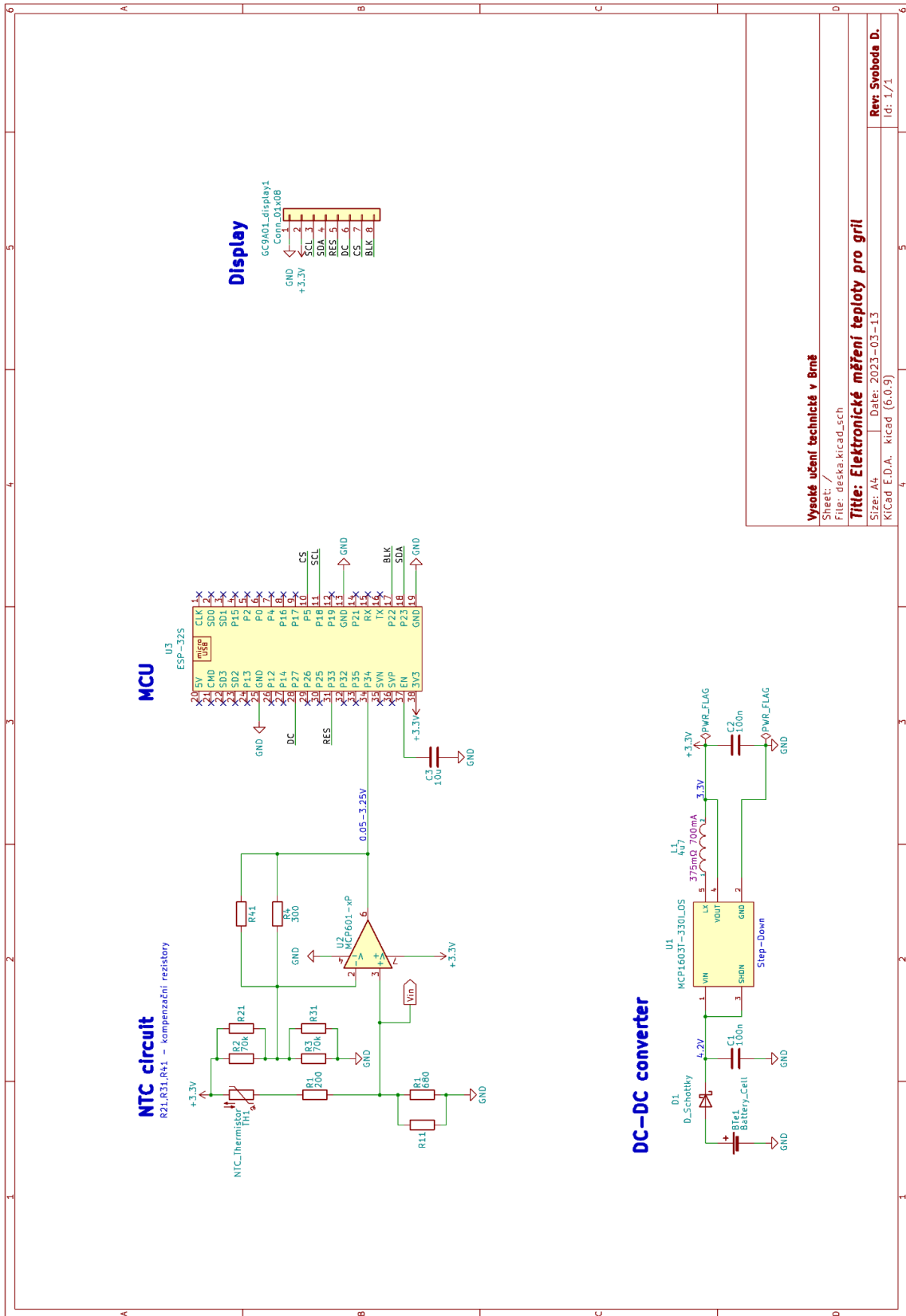


Obrázek 1. Závislost výstupního napětí zkorigovaného systému na odporu termistoru.



Obrázek 2. Závislost velikosti proudů na odporu termistoru pro zkorigovaný systém.

Příloha I - Návrh desky plošného spoje



Vysoké učení technické v Brně

Sheet: /
File: deska.kicad_sch

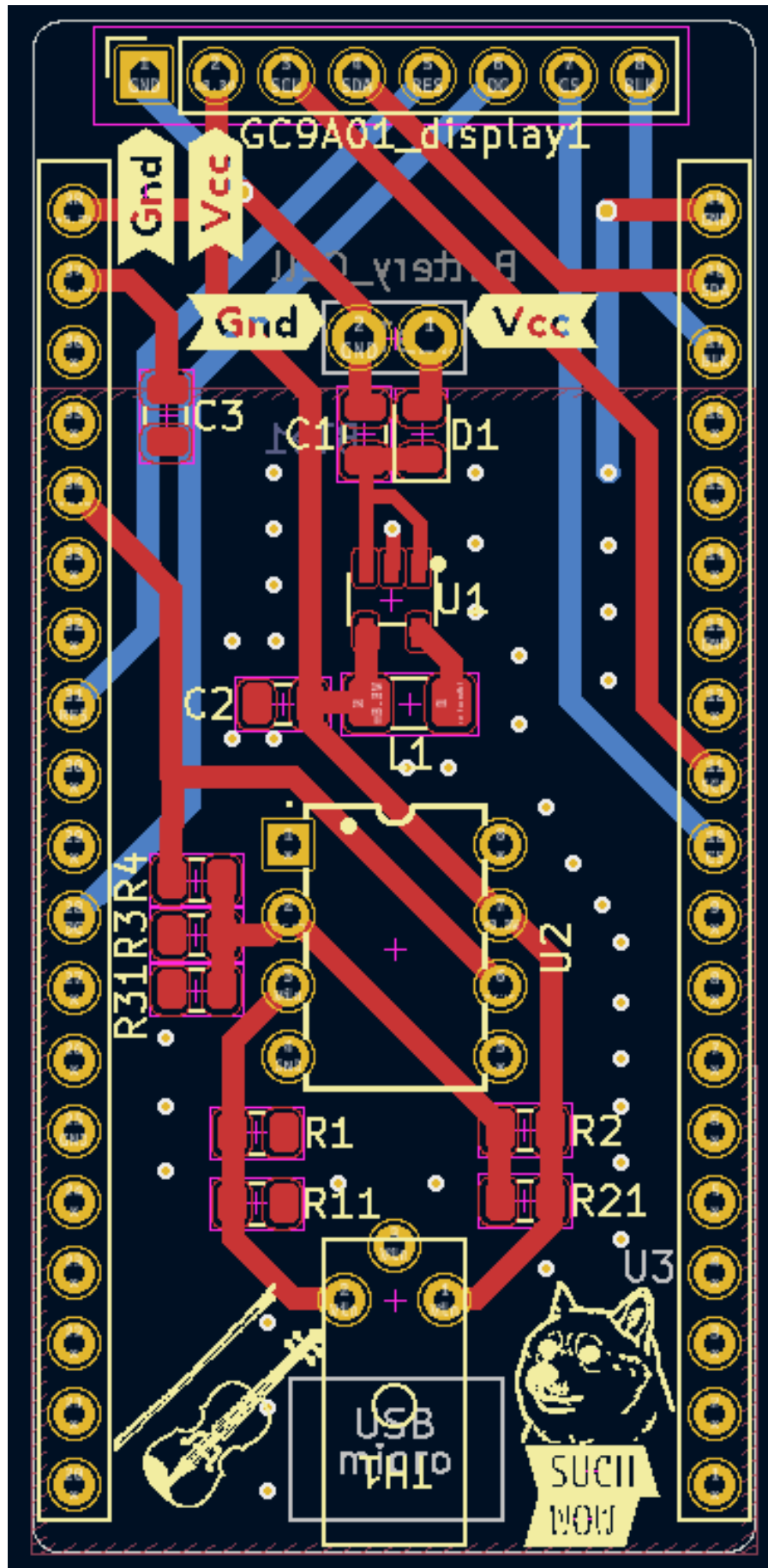
Title: Elektronické měření teploty pro grill

Size: A4 Date: 2023-03-13

KiCad E.D.A. kicad (6.0.9)

Rev: Svobeda D.

Id: 1/1



Příloha J - Seznam součástek

Název	Označení	Výrobní označení	Pouzdro
Operační zesilovač	U2	MCP601-I/P	DIP8
Napěťový měnič	U1	MCP1603T-330I/OS	TSOT23-5
Schottkyho dioda	D1	BAT60JFILM	SOD323
2x 100 nF keramický kondenzátor	C1,C2	HITANO CKS0805	0805
10 μ F keramický kondenzátor	C3	0805X106K100CT	0805
Tlumivka s feritovým jádrem	L1	LQM31PN4R7M00L	1206
4x Rezistor	R-	R0805	0805
2,5mm konektor	TH1	FC68102	-
2x Kolíková zásuvka 2,54mm	-	ZL305-20	THT 1x20
Kolíková zásuvka 2,54mm	-	ZL262-8SG	THT 1x8
Socket na baterie	-	KEYS2480CN	-

Příloha K - Seznam použitých přístrojů

Typ	Název	Sériové číslo
Teplotní komora	Ametek ETC 125A	581461-00590
Teplotní komora	Voltcraft TC-150	200414197
Multimetr	Agilent 34401A	MY47001218
Kalibrátor	AOIP thermys 150	-
Teplotní čidlo	PT100	-
Termočlánek	TC091.5P „K“	-
Měřicí karta	NI cDAQ-9171	01A2AD43

Příloha L - Data pro výpočet nejistot

t_avg [C]	U [V]
212	1,7247
	1,7251
	1,7252
	1,7250
	1,7249
	1,7248
	1,7250
	1,7251
	1,7250
	1,7247
	1,7244
	1,7242
	1,7240
	1,7241
	1,7242

Příloha M - Seznam elektronických příloh

- Naměřená data
 - Kalibrace sondy.xlsx
 - Bakalářka-Domací měření.xlsx
- Look-up tabulka
 - LookUp_Table.xlsx
 - LookUp_Table_vol.2.xlsx
- Data loggery
 - Agilent 34401 Read Single Measurement_edit.vi
 - Data logger teploty
 - Main.vi
- Návrh desky
 - Deska.zip
- Ltspice
 - Draft.asc
- ESP program
 - Final.ino