

UNIVERZITA PARDUBICE  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

Analyzátor odporových čidel s neznámou charakteristikou  
Jaroslav Trojan

Bakalářská práce  
2022

---

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2021/2022

# ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jaroslav Trojan**  
Osobní číslo: **I19212**  
Studijní program: **B0714P060001 Aplikovaná elektrotechnika**  
Téma práce: **Analyzátor odporových čidel s neznámou charakteristikou**  
Zadávající katedra: **Katedra elektrotechniky**

## Zásady pro vypracování

Cílem práce je navrhnout a vytvořit analyzátor teplotního senzoru, u kterého není známá jeho závislost odporu na teplotě. Často zkoumanými čidly budou čidla automobilová, využitá ve vozzech pro měření následujících veličin: teplota chladicí kapaliny motoru, teplota oleje motoru, teplota oleje převodovky, teplota nasávaného vzduchu, teplota výfukových spalin a jiné. Systém bude schopen provést měření teplotního senzoru, na základě provedeného měření vytvoří výstupní charakteristiku teplotního senzoru. Systém bude provádět rozbor senzoru porovnáním neznámého senzoru s kalibračním senzorem (etalonem), jehož charakteristika je známá. Měření se bude provádět na senzorech ponořených ve vyhřívané a izolované olejové lázni, aby se zajistila konstantní teplota v průběhu testovacího měření.

V teoretické části si student nastuduje problematiku mikroprocesorů, programování GUI a teorii elektrických měření a teplotních čidel. V praktické části student navrhne, sestrojí a odzkouší systém pro analýzu a kalibraci teplotního čidla.

Rozsah pracovní zprávy: **40**  
Rozsah grafických prací:  
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- [1] ROUBALOVÁ, Eliška. Java bez předchozích znalostí. Brno: Computer Press, 2015. ISBN 9788025145722.
- [2] GOTHARD, Adolf a Tomáš MACHO. Implementace RTOS do mikrokontrolérů STM32 s jádrem ARM Cortex-M4F. 2014.
- [3] BRTNÍK, Bohumil. Elektrická měření pro bakaláře. Praha: BEN – technická literatura, 2011. ISBN 978-80-7300-405-7.
- [4] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřicí obvody. Praha: BEN – technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jan Pidanič, Ph.D.**  
Katedra elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: **15. listopadu 2021**  
Termín odevzdání bakalářské práce: **13. května 2022**

**Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.** v.r.  
děkan

L.S.

**Ing. Jan Pidanič, Ph.D.** v.r.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 31. ledna 2022

## **Prohlášení autora**

Prohlašuji:

Práci s názvem Analyzátor odporových čidel s neznámou charakteristikou jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Beru na vědomí, že v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a směrnici Univerzity Pardubice č. 7/2019 Pravidla pro odevzdávání, zveřejňování a formální úpravu závěrečných prací, ve znění pozdějších dodatků, bude práce zveřejněna prostřednictvím Digitální knihovny Univerzity Pardubice.

V Pardubicích dne 18. 4. 2022

Jaroslav Trojan

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Radku Vancovi za cenné profesionální rady a oporu při realizaci této práce. Dále pak panu Ing. Janu Pidaničovi, Ph.D. za pomoc při formální úpravě práce.

## **Anotace**

Předkládaná bakalářská práce se zabývá vybranými metodami měření teploty a samotným návrhem zařízení sloužícího k analýze neznámého odporového čidla. Toto zařízení je schopné tento snímač ohřevem olejové lázně změřit a vytvořit závislostní charakteristiku, která je následně uložena SD kartu. Dále byla k analyzátoru vytvořena podpůrná desktopová aplikace naprogramovaná v jazyce C#, která dokáže takto naměřená data analyzovat a vykreslit.

## **Klíčová slova**

Teplota, snímač, AVR, C#, analýza, měření, regulace

## **Title**

Resistive Sensor Analyzer with Unknown Characteristics

## **Annotation**

The bachelor thesis deals with selected methods of temperature measurement. The main purpose of the developed resistive sensor analyzer is analysis and determination of characteristics of the unknown resistive sensor. This device can automatically measure a resistive sensor in heating oil bath and produce a dependency characteristic which is then stored on an SD card. Furthermore, a supporting desktop application programmed in C# was created for the analyzer, which can analyze and plot the data measured in this way.

## **Keywords**

Temperature, sensor, AVR, C#, analysis, measurement, control

## Obsah

<b>Seznam zkratek.....</b>	<b>8</b>
<b>Seznam obrázků.....</b>	<b>9</b>
<b>Seznam tabulek.....</b>	<b>11</b>
<b>Úvod.....</b>	<b>12</b>
<b>1 Základní pojmy z oboru měření teplot.....</b>	<b>13</b>
1.1 Teplota.....	13
1.2 Teplotní stupnice .....	13
<b>2 Bezdotykové teploměry .....</b>	<b>14</b>
<b>3 Dotykové teploměry.....</b>	<b>14</b>
3.1 Dilatační teploměry .....	14
3.2 Kovové odporové teploměry RTD .....	15
<b>4 Polovodičové snímače teploty .....</b>	<b>19</b>
4.1 Negastory.....	19
4.2 Pozistory .....	19
<b>5 Termoelektrické snímače .....</b>	<b>20</b>
5.1 Seebeckův jev .....	20
5.2 Rozdělení termočlánků .....	22
<b>6 Metody měření teploty .....</b>	<b>23</b>
6.1 Měření odporových snímačů teploty .....	23
6.2 Měření termočlánků.....	25
<b>7 Návrh analyzátoru.....</b>	<b>27</b>
7.1 Periferie .....	28
7.2 Řídící jednotka.....	34
7.3 Výkonový stupeň.....	42
7.4 Nádoba s míchacím mechanismem .....	43
7.5 Držáky snímačů .....	44
7.6 Výběr média .....	44
7.7 Výběr etalonu .....	45
<b>8 Firmware .....</b>	<b>47</b>
<b>9 Datový soubor .....</b>	<b>48</b>
9.1 Soubor typu .mea.....	48

9.2 Soubor typu .cal.....	49
<b>10 Uživatelská aplikace .....</b>	<b>50</b>
10.1 Vzhled.....	50
10.2 Funkce aplikace .....	53
<b>11 Výsledky měření .....</b>	<b>56</b>
11.1 Vliv míchání na teplotní homogenitu .....	56
11.2 Reálné měření .....	60
<b>12 Finální sestava.....</b>	<b>72</b>
12.1 Stavba firmwaru a uživatelského rozhraní .....	72
12.2 Metodika měření.....	77
12.3 Výsledný vzhled zařízení.....	78
<b>Závěr .....</b>	<b>79</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>80</b>
<b>Seznam Příloh .....</b>	<b>82</b>



## Seznam zkratk

DPS	Deska plošných spojů
RTD	Resistance temperature detector
NTC	Negative temperature coefficient
PTC	Positive temperature coefficient
SPI	Serial Peripheral Interface
UART	Universal asynchronous receiver-transmitter
I <sup>2</sup> C	Inter integrated circuit

## Seznam obrázků

Obr. 3.1 Konstrukce bimetalových pásků (a – plochý nosník, b – disk, c – spirála) [1].....	15
Obr. 3.2 Bimetalový teploměr [2] .....	15
Obr. 3.3 Teplotní závislost kovových odporových snímačů [1] .....	16
Obr. 3.4 Tolerance tříd pro platinové snímače [1] .....	17
Obr. 3.5 Platinové čidlo PT1000 ve verzi Thin Film [3].....	18
Obr. 3.6 Tolerance Ni snímače dle DIN 43760 [1] .....	18
Obr. 4.1 Závislost odporu NTC snímače na teplotě .....	19
Obr. 4.2 Závislost odporu PTC snímače na teplotě [1] .....	20
Obr. 5.1 Seebeckův jev [4] .....	20
Obr. 5.2 Seebeckovo napětí [4] .....	21
Obr. 5.3 Charakteristiky vybraných termočlánků [1].....	23
Obr. 6.1 Zapojení měřících obvodů (a – dvou vodičové, b – třívodičové, c – čtyřvodičové) [1] .....	24
Obr. 6.2 Měřicí řetězec termočlánku [1] .....	25
Obr. 6.3 Princip kompenzační krabice [1].....	25
Obr. 6.4 Izotermická svorkovnice [1].....	26
Obr. 7.1 Blokové schéma analyzátoru .....	27
Obr. 7.2 Vývojový kit Arduino Nano Every [6] .....	28
Obr. 7.3 Schéma odporového děliče.....	29
Obr. 7.4 Závislost hodnoty A/D převodníku na teplotě senzoru NTC 10k.....	29
Obr. 7.5 Typické zapojení převodníku MAX31865 [7] .....	30
Obr. 7.6 Typické zapojení převodníku LTC2984 [8].....	31
Obr. 7.7 Schéma zapojení vstupního obvodu MCP3301 .....	32
Obr. 7.8 Topné těleso [11].....	33
Obr. 7.9 Displej Nextion [12].....	33
Obr. 7.10 Driver A4988 [13] .....	34
Obr. 7.11 Příklad zapojení driveru ve Full-Step módu [12].....	34
Obr. 7.12 Blokové schéma řídicí jednotky .....	34
Obr. 7.13 DPS řídicí jednotky .....	35
Obr. 7.14 Náhled napájecího konektoru C1 .....	35
Obr. 7.15 Náhled konektoru C2 .....	36
Obr. 7.16 Náhled konektoru C3 .....	36
Obr. 7.17 Náhled konektoru C4 .....	37
Obr. 7.18 Náhled konektorů C5 a C6 .....	37
Obr. 7.19 Náhled konektoru C7 .....	38
Obr. 7.20 Převodník napěťové úrovně komunikační linky displeje.....	39
Obr. 7.21 Náhled konektorů C8 a C9 .....	39
Obr. 7.22 Náhled konektoru C10 .....	40
Obr. 7.23 Schéma zapojení externího rezistoru.....	41
Obr. 7.24 Náhled konektoru C11 .....	41
Obr. 7.25 Schéma výkonového stupně .....	42

Obr. 7.26 DPS výkonového stupně .....	42
Obr. 7.27 Nádoba s míchacím mechanismem .....	43
Obr. 7.28 a) mechanismus v řezu, b) rotor pro míchání oleje, c) rotor pro přenos síly .....	43
Obr. 7.29 Držáky čidel a) s pružinkou, b) se stahovací páskou, c) pro referenční čidlo.....	44
Obr. 7.30 Etalonový snímač PT1000.....	46
Obr. 8.1 Zdrojový kód pro nastavení PWM signálu využívající atomicitu.....	47
Obr. 9.1 Datový soubor .....	48
Obr. 10.1 Uživatelská aplikace.....	50
Obr. 10.2 Náhled File toolbaru.....	50
Obr. 10.3 Náhled informací o měření.....	51
Obr. 10.4 Náhled grafu Linearity error.....	51
Obr. 10.5 Náhled grafu Value of sensor vs. Measured temperature .....	52
Obr. 10.6 Náhled tabulky hodnot .....	52
Obr. 10.7 Náhled verze FW.....	53
Obr. 10.8 Import okno .....	53
Obr. 10.9 Import referenčních čidel .....	54
Obr. 10.10 Příklad importu měřeného čidla PT1000 referenčního čidla PT100 .....	54
Obr. 11.1 Blokové schéma rozmístění snímačů – a) vedle sebe, b) diagonálně .....	56
Obr. 11.2 Test homogenity – zapnuté míchání a snímače vedle sebe .....	57
Obr. 11.3 Test homogenity – vypnuté míchání a snímače vedle sebe.....	57
Obr. 11.4 Test homogenity – zapnuté míchání a snímače diagonálně proti sobě .....	58
Obr. 11.5 Test homogenity – vypnuté míchání a snímače diagonálně proti sobě.....	58
Obr. 11.6 Průběh teplot jednotlivých testů .....	59
Obr. 11.7 Vzájemná poloha etalonu a snímače PT1000 .....	60
Obr. 11.8 Výsledek měření čidla PT1000 pomocí aplikace .....	60
Obr. 11.9 Vzájemná poloha etalonu a NTC 10K .....	61
Obr. 11.10 Výsledek měření čidla NTC 10K pomocí aplikace.....	62
Obr. 11.11 Vzájemná poloha etalonu a NTC 10K .....	63
Obr. 11.12 Výsledek měření čidla TCK typ K pomocí aplikace.....	63
Obr. 11.13 Vzájemná poloha etalonu a DS18B20 .....	65
Obr. 11.14 Výsledek měření čidla DS18B20 pomocí aplikace.....	65
Obr. 11.15 Tolerance DS18B20 [13].....	66
Obr. 11.16 Vzájemná poloha etalonu a AD22100 .....	67
Obr. 11.17 Výsledek měření AD22100 pomocí aplikace.....	67
Obr. 11.18 Výsledek měření AD22100 čidla .....	68
Obr. 11.19 Tolerance AD22100 [14] .....	69
Obr. 11.20 Vzájemná poloha etalonu a neznámého NTC čidla .....	70
Obr. 11.21 Výsledek měření neznámého NTC čidla pomocí aplikace .....	70
Obr. 12.1 Úvodní obrazovka .....	72
Obr. 12.2 Nastavení počáteční teploty měření .....	73
Obr. 12.3 Nastavení koncové teploty měření .....	73
Obr. 12.4 Nastavení měřicího kroku .....	74
Obr. 12.5 Chybová hláška nepřipojeného snímače .....	74

Obr. 12.6 Náhled okna průběhu měření .....	75
Obr. 12.7 Náhled okna a) dokončeného měření, b) přerušeno měření .....	75
Obr. 12.8 Náhled Emergency STOP .....	76
Obr. 12.9 Varovné okno vysoké teploty oleje .....	76
Obr. 12.10 Přejídnové charakteristiky (zelená – 10 %, červená – 20 %, žlutá – 30 %, modrá – 40 %, oranžová – metoda přepínání hladin).....	77
Obr. 12.11 Finální sestava .....	78

## Seznam tabulek

Tab. 3.1 Vlastnosti materiálů používaných pro kovové snímače teploty [1] .....	16
Tab. 3.2 Dovolené tolerance dle normy IEC-751 [1] .....	17
Tab. 5.1 Seebeckovy koeficienty pro vybrané kovy [4].....	21
Tab. 5.2 Inverzní polynomy ( $^{\circ}\text{C}/\mu\text{V}$ ) [1].....	22
Tab. 7.1 Shrnutí převodníků teploty .....	31
Tab. 7.2 Rozpis vývodů konektoru C2 .....	36
Tab. 7.3 Rozpis vývodů konektoru C3 .....	36
Tab. 7.4 Rozpis vývodů konektoru C4 .....	37
Tab. 7.5 Rozpis vývodů konektorů C5 a C6.....	38
Tab. 7.6 Rozpis vývodů konektoru C7 .....	38
Tab. 7.7 Rozpis vývodů konektoru C9 .....	39
Tab. 7.8 Rozpis vývodů konektoru C10 .....	40
Tab. 7.9 Hodnoty externích rezistorů .....	41
Tab. 7.10 Rozpis vývodů konektoru C11 .....	41
Tab. 7.11 Bodové porovnání parametrů vybraných čidel .....	45
Tab. 7.12 Porovnání parametrů vybraných čidel.....	45
Tab. 11.1 Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla PT1000 pomocí aplikace .....	61
Tab. 11.2 Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla NTC 10K pomocí aplikace .....	62
Tab. 11.3 Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla TCK typ K pomocí aplikace ....	64
Tab. 11.4 Tabulka hodnot měřeného čidla DS18B20 pomocí aplikace .....	66
Tab. 11.5 Tabulka hodnot měřeného AD22100 pomocí aplikace.....	68
Tab. 11.6 Tabulka porovnání změřených a vypočtených hodnoty snímače AD22100.....	69
Tab. 11.7 Tabulka hodnot měřeného neznámého NTC čidla pomocí aplikace.....	71

## Úvod

Měření teploty je jednou z nejčastěji měřených veličin, a to v mnoha oblastech lidské činnosti, jako například chemický průmysl, meteorologie a klimatologie, lékařství, potravinářství a v neposlední řadě v technice a průmyslu obecně. V praxi se můžeme setkat s nespočtem metod které měření teploty umožňují, a to jak kontaktních, tak i bezkontaktních. Může se jednat například o pokročilejší bezkontaktní měření pomocí termokamer, které snímají množství emitovaného infračerveného záření měřeným objektem nebo o měření jehož principem je přenos tepla při kontaktu čidla s měřeným předmětem. Všechna tato měření, jsou měření nepřímá. Teplota jako veličina nelze měřit přímým měřením. Pro kontaktní měření se z pravidla používají čidla ať už odporová kovová, polovodičová či čidla pracující na tzv. termoelektrickém jevu, tj. přeměně rozdílu teplot na elektrické napětí, známém jako Seebeckův efekt.

V praxi se můžeme často setkat s problémem, že sériově vyráběná čidla teploty nemají popsanou dokumentaci a jejich závislostní charakteristika není známá. Jedná se výhradně o čidla automobilová nejčastěji to jsou vzhledem k ceně odporová polovodičová čidla typu NTC, která slouží převážně k měření teploty chladící kapaliny a oleje v motoru, oleje v převodovce, či diferenciálu, teploty nasávaného vzduchu nebo teploty výfukových spalin. Pro řešení tohoto problému je v této práci navrhnout analyzátor teplotních čidel s podpůrnou aplikací, díky které můžeme vizualizovat závislostní charakteristiku měřeného čidla.

# 1 Základní pojmy z oboru měření teplot

Před vlastním návrhem analyzátoru je nezbytné se seznámit s vybranými pojmy z oboru měření teploty.

## 1.1 Teplota

„Teplota je stavová veličina určující stav termodynamické rovnováhy, tj. stav, kdy v izolované soustavě těles od okolního prostředí neprobíhají žádné makroskopické změny a všechny fyzikální veličiny, jimiž je stav soustavy popsán nezávisí na čase.“ [1]. Takovýto stav je popsán termodynamickou teplotou, pro kterou platí, že musí být ve všech částech izolované soustavy stejná.

Teplota jako fyzikální veličina bývá často zaměňována za fyzikální veličinu teplo, u které však není veličinou stavovou, jelikož nezávisí na aktuálním stavu soustavy, ale zohledňuje vývoj celé minulosti této soustavy. Teplota je jedna z mála veličin, která se nedá měřit přímo, ale pouze prostřednictvím jiných fyzikálních veličin. [1]. Měření teploty je tedy měření nepřímé.

Za nejnižší teplotu se považuje tzv. **absolutní nula**, při které ustává pohyb veškerých částic v hmotě, která je počátkem termodynamické stupnice a má hodnotu 0 K.

## 1.2 Teplotní stupnice

### Termodynamické teplotní stupnice

Počátek termodynamické stupnice je dán termodynamickou absolutní nulou. Základní jednotkou v termodynamické stupnici je **kelvin (K)**. Kelvin byl definován zvolením termodynamické teploty trojného bodu vody, tj. rovnovážného stavu tří skupenství vody (ledu, vody a syté páry) jako referenčního a dobře reprodukovatelného teplotního bodu termodynamické stupnice a přiřazením hodnoty termodynamické teploty trojného bodu na pevně stanovenou hodnotu  $T = 273,16$  K. Hodnota jeden kelvin je rovna 273,16 dílu termodynamické teploty trojného bodu vody. [1]

### Celsiova stupnice

Tato stupnice je odvozena od termodynamické stupnice posunutím o teploty o 273,15 K. Jednotkou Celsiovy stupnice je **stupeň celsia (°C)** platí tedy, že

$$t(^{\circ}\text{C}) = T - T_0 = T - 273,15 \quad (1.1)$$

pro teplotní rozdíl dále platí

$$\Delta t = \Delta T \quad (1.2)$$

## Fahrenheitova stupnice

V některých anglosaských státech se využívá rovnice Fahrenheitova s jednotkou **stupeň Fahrenheita (°F)**, pro kterou platí vztah

$$t(^{\circ}F) = \frac{9}{5}T - 459,67 = \frac{9}{5}t(^{\circ}C) - 32 \quad (1.3)$$

## 2 Bezdotykové teploměry

V praxi se často stává, že nemáme možnost změřit teplotu tělesa dotykovým snímačem, např. rotující objekty, objekty pod nebezpečným napětím, objekty s velmi vysokou teplotou apod.. V této situaci se využívají výhradně optické bezdotykové snímače teploty. [1]

Mezi nejznámější patří

- Vlákňové pyrometry, které fungují na principu tzv. „mizejícího vlákna“ (zastaralé)
- Termokamery, fungující na maticovém snímání objektů a vyobrazení na displej

Bezdotykové měření teploty má i svá úskalí. Princip měření spočívá ve snímání infračerveného záření, které se zvyšuje se vzrůstající teplotou. Měřený objekt musí být tedy viditelný v infračerveném spektru. Pevné přepážky nebo vysoké úrovně prachu či kouře přesnost měření výrazně snižují.

Obecně se bezdotykové teploměry používají pro měření rychlých změn teplot.

## 3 Dotykové teploměry

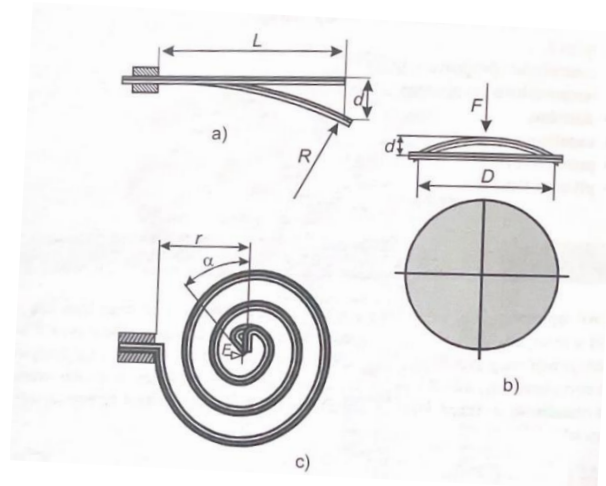
Při měření teploty dotykovými teploměry je měřicí element (teplotní čidlo) v přímém kontaktu s povrchem měřeného objektu. Uchycení a připevnění teplotního čidla k měřenému objektu se musí zvolit tak, aby došlo k co nejlepšímu přenosu tepla a tím získání nejpřesnějších výsledků.

### 3.1 Dilatační teploměry

Měření teploty u dilatačních teploměrů je na základě teplotní koeficientu délkové roztažnosti látek.

Mezi nejznámější teploměry tohoto typu se řadí teploměry bimetalové, které pracují na principu různé délkové roztažnosti dvou kovových pásků (nejčastěji z ocele a bronzu) mechanicky spojených. Při změně teploty se začnou tyto pásky rozdílně roztahovat, čímž dojde k ohybu bimetalového pásku na stranu s menší tepelnou roztažností. Tento ohyb obvykle bývá přenesen na ručičku přístroje nebo na spínací kontakt. [1].

Nejčastější využití je ochrana elektrických spotřebičů, např. v rychlovarné konvici.



Obr. 3.1 Konstrukce bimetalových pásků (a – plochý nosník, b – disk, c – spirála) [1]



Obr. 3.2 Bimetalový teploměr [2]

### 3.2 Kovové odporové teploměry RTD

Principem odporových kovových teploměrů je závislost odporu kovu na teplotě.

Teplotní závislost těchto teploměrů je v praxi obvykle vyjádřena lineárním vztahem

$$R_t = R_0 [1 + \alpha(t - t_0)] \quad (3.1)$$

kde  $R_0$  je odpor čidla při teplotě  $t_0 = 0 \text{ } ^\circ\text{C}$  a  $\alpha$  je teplotní koeficient odporu.

Střední hodnota součinitele odporu  $\alpha$  lze vyjádřit

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (3.2)$$

kde  $R_{100}$  je odpor čidla při teplotě  $100 \text{ } ^\circ\text{C}$ .

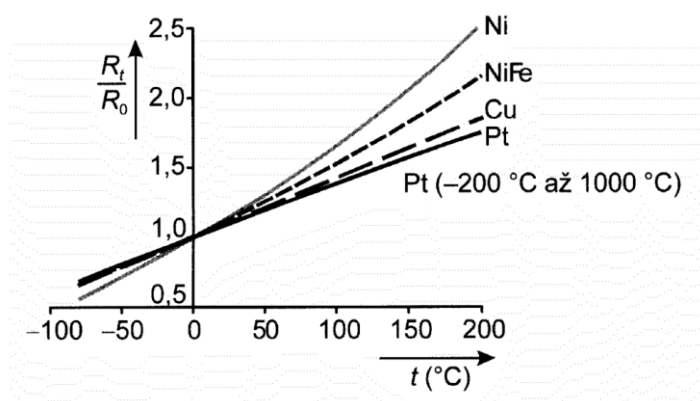
Jako materiály vhodné pro realizaci kovových snímačů teploty jsou nejrozšířenější platina (Pt), nikl (Ni), Balco (Ni-Fe), měď a pro velmi nízké teploty od 0,5K slitiny Rh-Fe, Pt-Co aj. [1]



Teplotní závislost nejrozšířenějších materiálů je v tabulce 3.1 a v obrázku 3.3.

Materiál	$\alpha \cdot 10^5$ [K <sup>-1</sup> ]	Teplotní rozsah [°C]
Platina	385 až 391	-20 až +850
Nikl	617 až 675	-70 až +150
Balco	518 až 525	-100 až +200
Měď	426 až 433	-50 až +150

Tab. 3.1 Vlastnosti materiálů používaných pro kovové snímače teploty [1]



Obr. 3.3 Teplotní závislost kovových odporových snímačů [1]

### Odporové platinové snímače teploty

Platinové odporové teploměry jsou v průmyslové oblasti jedny z nejrozšířenějších, a to díky jejich lineární charakteristice, velkému rozsahu provozních teplot a teplotní stálosti.

Dle doporučení normy IEC-751 se tyto snímače dělí do dvou tolerančních tříd

- Třída přesnosti A:  $\Delta t = \pm(0,150 + 0,002 |t|)$  (°C), (3.3)

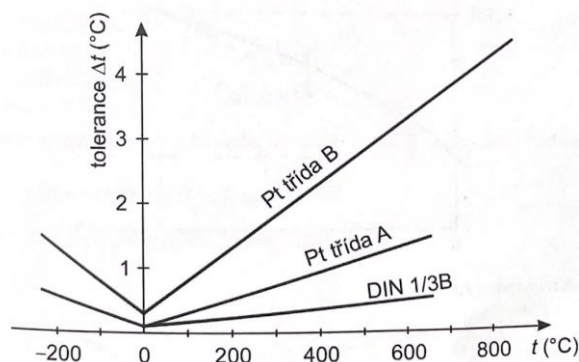
- Třída přesnosti B:  $\Delta t = \pm(0,300 + 0,005 |t|)$  (°C). (3.4)

Kromě doporučení normy IEC-751 existuje přísnější kritérium označované DIN 1/3 B, pro které platí

$$\Delta t = \pm(0,100 + 0,0017 |t|)$$
 (°C). (3.5)

Třída A je normou stanovena pro teplotní rozsah -200 °C až 650 °C, třída B pro teplotní rozsah -200 °C až 850 °C. [1]

Tolerance tříd jsou v tabulce 3.2 a obrázku 3.4



Obr. 3.4 Tolerance tříd pro platinové snímače [1]

Teplota [°C]	Třída přesnosti A		Třída přesnosti B	
	[Ω]	[°C]	[Ω]	[°C]
-200	±0,24	±0,55	±0,56	±1,3
-100	±0,14	±0,35	±0,32	±0,8
0	±0,06	±0,15	±0,12	±0,3
100	±0,13	±0,55	±0,48	±1,3
200	±0,20	±0,24	±0,24	±0,24
300	±0,27	±0,75	±0,64	±1,8
400	±0,33	±0,95	±0,79	±2,3
500	±0,38	±1,15	±0,93	±2,8
600	±0,43	±1,35	±1,06	±3,3
650	±0,46	±1,45	±1,13	±3,6
700	-	-	±1,17	±3,8
750	-	-	±1,28	±4,3
800	-	-	±1,34	±4,6

Tab. 3.2 Dovolené tolerance dle normy IEC-751 [1]

Pro teploty od 0 do 850 °C je dán vztah

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (3.6)$$

kde

$$A = 3,91 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}, \quad (3.7)$$

$$B = -0,588 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}. \quad (3.8)$$

Dále jsou pak platinové snímače děleny podle základní hodnoty odporu  $R_0$  při  $t_0$ , vyjmenujme si nejpoužívanější z nich:

- Pt100 ( $R_0 = 100\Omega$ ),
- Pt500 ( $R_0 = 500\Omega$ ),
- Pt1000 ( $R_0 = 1000\Omega$ ).



Obr. 3.5 Platinové čidlo PT1000 ve verzi Thin Film [3]

### Odporové niklové snímače teploty

Niklové snímače mají oproti platinovým snímačům menší teplotní rozsah a značnou nelinearitu. Výhodou je však stále vysoká citlivost a rychlá odezva, tj. malá časová konstanta. Vyrábějí se stejně jako platinové snímače v několika verzích základního odporu  $R_0$  - Ni100, Ni500, Ni1000, aj.

Pro vyjádření odporu platí vztah

$$R_t = R_0(1 + At + Bt^2 + Ct^4 + Dt^6), \quad (3.9)$$

kde

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

$$B = 6,65 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1},$$

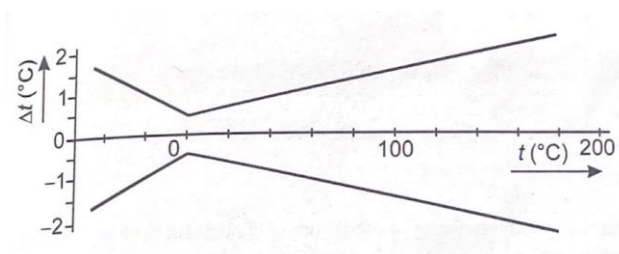
$$C = 2,805 \cdot 10^{-11} \text{ K}^{-1},$$

$$D = 2,0 \cdot 10^{-17} \text{ K}^{-1}.$$

Dovolené tolerance odporu Ni čidla dle normy DIN 43760 jsou na obr. 2.6 a platí vztah

- Pro  $t > 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ :  $\Delta t = \pm(0,4 + 0,007 |t|) \text{ } (^\circ\text{C})$ , (3.10)

- Pro  $t < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$ :  $\Delta t = \pm(0,4 + 0,0,28 |t|) \text{ } (^\circ\text{C})$ . (3.11)



Obr. 3.6 Tolerance Ni snímače dle DIN 43760 [1]

## 4 Polovodičové snímače teploty

Polovodičové snímače teploty neboli termistory fungují na stejném principu jako odporové snímače teploty, využívají teplotní závislost odporu na teplotě, avšak s mnohem větší změnou odporu, za cenu vyšší nelinearity.

Tyto snímače se dělí do dvou skupin

- Negastory (NTC) se záporným teplotním koeficientem
- Pozistory (PTC) s kladným teplotním koeficientem

### 4.1 Negastory

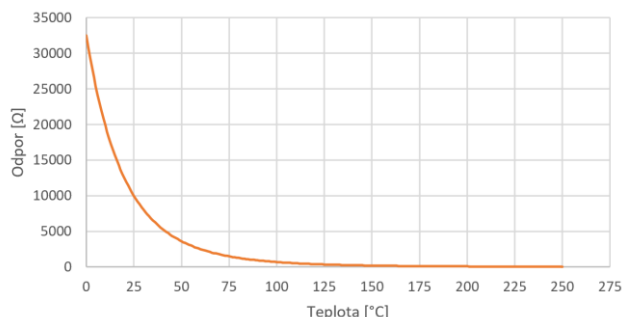
Negastory se v praxi využívají výhradně, stejně jako odporové snímače, k měření teploty. Ze vztahu (4.1) plyne, že charakteristika tohoto snímače je nelineární.

Steinhart – hartova rovnice:

$$R_T = R_0 e^{B\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)}, \quad (4.1)$$

kde  $R_0$  je odpor snímače při 25 °C a B je teplotní koeficient.

Rozsah teplot NTC snímače je běžně -50 °C až +250 °C. [1]. Na obrázku 4.1 je vidět nelineární teplotní charakteristika NTC snímače.



Obr. 4.1 Závislost odporu NTC snímače na teplotě

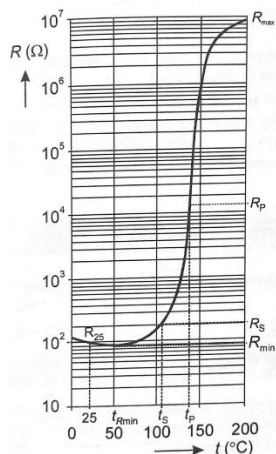
### 4.2 Pozistory

Obdobně jako u negastoru je teplotní charakteristika pozistorových (PTC) snímačů značně nelineární.

V praxi se tyto snímače používají jako tzv. PPTC pojistky, lépe známe jako PolyFuse. Obvykle se používají v aplikacích, kde je zapotřebí zajistit teplotní ochranu. Montáž pozistorů je zpravidla na desku plošných spojů, popř. na chladiče výkonových prvků.

Z obrázku 4.2 je vidět, že odpor pozistoru zprvu mírně klesá a následně při překročení teploty  $t_s$  jeho odpor skokově vzroste (řádově o  $10^3$  až  $10^4 \Omega$ ).

Teplotu  $t_s$  lze chemickým složením při výrobě ovlivňovat v rozsahu  $+60 \text{ }^\circ\text{C}$  až  $+120 \text{ }^\circ\text{C}$ . [1]



Obr. 4.2 Závislost odporu PTC snímače na teplotě [1]

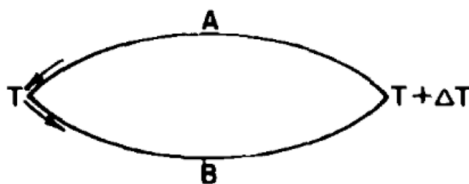
## 5 Termoelektrické snímače

Termoelektrické snímače, lépe známe jako termočlánky jsou snímače teploty pracující ve velmi velkém rozsahu teplot (max.  $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ ) založené na principu tzv. Seebeckova jevu.

### 5.1 Seebeckův jev

Seebeckův jev vzniká tím, že v teplejší části vodiče mají nositelé náboje větší energii, a proto difundují ve větším množství do chladnějších míst než nositelé z chladnějších míst do teplejších. Tím vzniká jednostranná převaha nábojů kladných nebo záporných. [1]

„Spojíme-li tedy dva různé vodiče A a B do uzavřeného obvodu, bude tímto obvodem protékat elektrický proud  $I$  za předpokladu rozdílných teplot těchto spojů. Nutno podotknout, že pro dané materiály je tento jev závislý pouze na rozdílu teplot mezi spoji těchto dvou různých, homogenních vodičů. Předpokládáme-li neměnné složení termočlánků A a B, nebude Seebeckův jev záviset na ostatních proměnných jako rozložení teplot nebo teplotním gradientu.“ [4]



Obr. 5.1 Seebeckův jev [4]

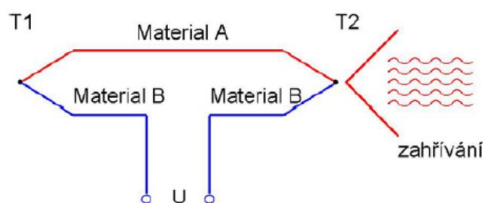
Na výstupních svorkách tohoto obvodu naměříme tzv. Seebeckovo napětí  $U_s$ , které lze vyjádřit vztahem

$$U_s = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT, \quad (5.1)$$

kde

$\alpha_A$ ,  $\alpha_B$  jsou Seebeckovy koeficienty vodiče A a B,

$T_1$ ,  $T_2$  jsou teploty vodičů A a B.



Obr. 5.2 Seebeckovo napětí [4]

Seebeckovy koeficienty se udávají vzhledem k olovu a jsou mj. závislé na přesném složení, struktuře materiálu a teplotě vodičů.

Kov	$\alpha$ [ $\mu\text{VK}^{-1}$ ]	$\beta$ [ $\mu\text{VK}^{-2}$ ]
Antimon	35,60	0,1450
Bizmut	-74,40	0,0320
Konstantan	-38,10	-0,0888
Měď	2,71	0,0079
Nikl	-19,10	-3,0200
Platina	-3,03	-3,2500
Železo	16,70	-0,0297

Tab. 5.1 Seebeckovy koeficienty pro vybrané kovy [4]

Pro vyjádření teploty pomocí hodnoty Seebeckova napětí se využívá polynom

$$t = \sum_{i=0}^n b_i U_s^i, \quad (5.2)$$

kde  $b_i$  je koeficient inverzního polynomu  $i$ -tého řádu pro daný rozsah teplot definovaný v tabulce 5.2. Polynom lze pak jednoduše využít při programovém výpočtu.

	E	J	K
rozsah	0 °C až 1000 °C	0 °C až 760 °C	0 °C až 500 °C
b0	0,0	0,0	0,0
b1	1,7057035E-2	1,978425E-2	2,508355E-2
b2	-2,3301759E-7	-2,001204E-7	7,860106E-8
b3	6,5435585E-12	1,036969E-11	-2,503131E-10
b4	-7,3562749E-17	-2,549687E-16	8,315270E-14
b5	-1,7896001E-21	3,585153E-21	-1,228034E-17
b6	8,4036165E-26	-5,344285E-26	9,804036E-22
b7	-1,3735879E-30	5,099890E-31	-4,413030E-26
b8	1,0629823E-35	1,057734E-30	-1,2607281E-22
b9	-3,2447087E-41	-1,052755E-35	3,1353611E-26
b10	-3,3187769E-30		
nejistota měření	±0,02 °C	±0,05 °C	±0,05 °C
	R	S	T
rozsah	-50 °C až +250 °C	-50 °C až +250 °C	0 °C až 400 °C
b0	0,0	0,0	0,0
b1	1,8891380E-1	1,84949460E-1	2,592800E-2
b2	-9,3835290E-5	-8,00504062E-5	-7,602961E-7
b3	1,3068619E-7	1,02237430E-7	4,637791E-11
b4	-2,2703580E-10	-1,52248592E-10	-2,165394E-15
b5	3,5145659E-13	1,88821343E-13	6,048144E-20
b6	-3,8953900E-16	-1,59085941E-16	-7,293422E-25
b7	2,8239471E-19	8,23027880E-20	
b8	-2,34181944E-23		
b9	2,79786260E-27		
b10			
nejistota měření	±0,02 °C	±0,02 °C	±0,03 °C

Tab. 5.2 Inverzní polynomy (°C/μV) [1]

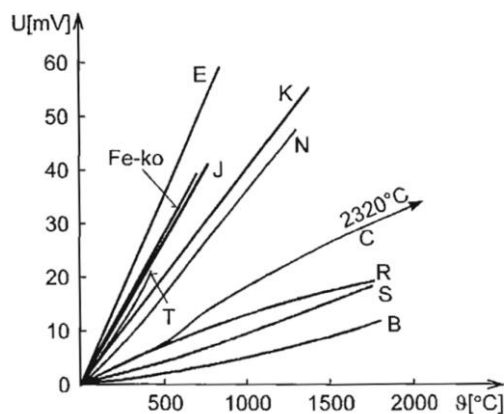
## 5.2 Rozdělení termočlánků

Jednotlivé páry termoelektrických materiálů pro výrobu termočlánků jsou ve světě normalizovány. Vybrány byly materiály zajišťující přijatelnou nelinearitu závislosti termoelektrického napětí na teplotě pro daný rozsah teplot, odolnost proti korozi, chemickým vlivům, záření, aj.

Označení typů termočlánků se dle normy IEC provádí velkými písmeny a dělí se na několik typů:

- Typ K: má složení NiCr-NiAl (označován jako chromel - alumel) a je vhodný pro oxidační a inertní atmosféru dlouhodobě v rozsahu 0 až 1100 °C.
- Typ T: má složení Cu-CuNi (měď – konstantan) a je nejlepší pro měření při velmi nízkých teplotách dlouhodobě v rozsahu -185 až 350 °C.
- Typ J: má složení Fe-CuNi (železo – konstantan) a je vhodný pro oxidační, redukční a inertní atmosféru a vakuum dlouhodobě v rozsahu +20 až 700 °C.
- Typ N: má složení NiCrSi-NiSiMg (nicosil – nisol) a má velmi stabilní charakteristiku až do 1300 °C.
- Typ E: má složení NiCr-CuNi (chromel – konstantan), má nejvyšší hodnotu termoelektrického koeficientu. Dlouhodobě použitelný v rozsahu 0 až 800 °C.
- Typ R: má složení PtRh13-Pt a je používán při měření velmi vysokých teplot až do 1780 °C.

- Typ S: má složení PtRh10-Pt a je použitelný ve stejné oblasti jako typ R.
- Typ B: má složení PtRh30-PtRh6 a je použitelný až od teploty 100 °C, do této teploty má velmi malou citlivost. Má obdobné vlastnosti jako typ R a S, ale při teplotách nad 1200 °C je stabilnější.
- Typ G: má složení W-WRh a je vhodný pro extrémně vysoké teploty, obvykle se nepoužívá pro rozsahy teplot pod 400 °C. Chemicky stabilní.
- Typ C: má složení WRh5-WRh26 má obdobné vlastnosti jako typ G. [1]



Obr. 5.3 Charakteristiky vybraných termočlánků [1]

## 6 Metody měření teploty

Jak již bylo zmíněno v Kapitole 1.1, teplota je jako veličina měřena nepřímou, k měření se tedy využívají vybrané metody převádějící teplotu na digitálně analyzovatelnou hodnotu (změna odporu, napětí), která je dále vyhodnocována např. mikrokontrolerem.

### 6.1 Měření odporových snímačů teploty

Na měřicí obvody jsou kladeny tyto požadavky:

- minimalizace vlivu měřicího proudu procházejícího čidlem, které by zapříčinilo vlastní ohřívání čidla bez vnějšího vlivu,
- minimální časová konstanta,
- minimální vliv odporu vedení k měřenému čidlu.

#### Vliv měřicího proudu

Elektrický ztrátový výkon  $P$  na měřicím odporu je dán součinem

$$P = R_t I^2, \quad (5.3)$$



kde  $I$  je měřící proud, který ohřívá měřící odpor. Takto ohříváný snímač sám indikuje vyšší teplotu, než je měřená teplota. Tuto vlastnost je potřeba zvláště respektovat u tenkovrstvých destičkových odporových senzorů. Běžná hodnota měřícího proudu je 0,3 až 1 mA.

### Vliv odporu vedení

$$R = \rho \frac{l}{S}, \quad (5.4)$$

kde  $R$  je odpor vodiče,  $\rho$  je měrný elektrický odpor materiálu,  $l$  je délka vodiče a  $S$  je průřez vodiče.

Vztah 6.2 pro výpočet odporu říká, že velikost odporu je přímo úměrná délce vodiče a materiálu ze kterého je vodič vyroben a nepřímo úměrná průřezu tohoto vodiče, tzn. čím delší vodič je, tím větší má odpor a naopak.

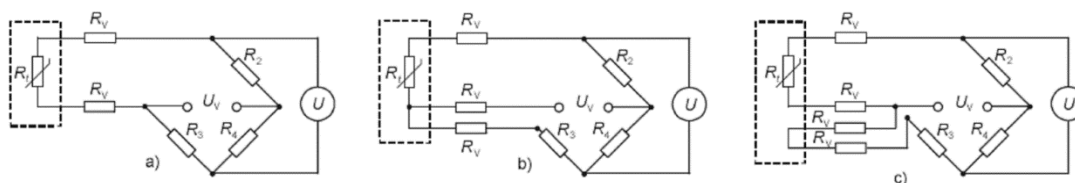
Pokud měříme pomocí odporových snímačů, musíme počítat s tím, že naměřená hodnota je ovlivněna odporem přívodního vedení, pomocí kterého je snímač teploty připojen s měřicímu přístroji.

Klasickým obvodem pro vyhodnocení odporových snímačů teploty je Wheatstoneův můstek.

Nejzákladnějším zapojením je zapojení dvou vodičové, které je zachyceno na obrázku 6.1a. V tomto zapojení vyvážíme můstek při teplotě  $t_0$ , jestliže se tato teplota změní, změní se nám i hodnota odporu  $R_v$ . Tato změna je pak příčinou vzniku chyby měření teploty. Z tohoto důvodu se toto zapojení používá při měření na krátkou vzdálenost vedení mezi můstkem a měřeným snímačem.

Dalším zapojením je zapojení tří vodičové, zachycené na obrázku 6.3b. Je zde vidět, že odpor vedení  $R_v$  se mění s teplotou v obou větvích můstku, a z toho důvodu se změny odporu vedení vzájemně vyruší. Tato kompenzace nám vliv teplotních změn odporu vedení zcela nevyruší, pouze zmenší. Využívá se pro kompenzaci vedení přívodních vodičů do desítek metrů délky vedení.

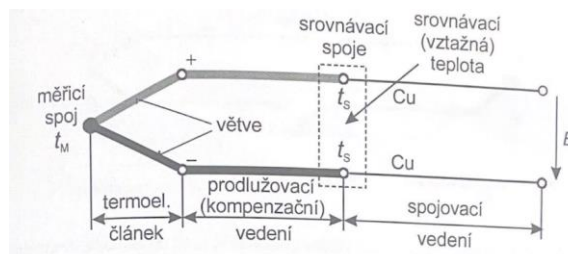
Nejlepší kompenzaci zajišťuje zapojení čtyřvodičové, viditelné na obrázku 6.3c. I v tomto zapojení se nám mění odpor vedení  $R_v$  s teplotou v obou větvích můstku a stejně jako u třívodičového zapojení se nám vliv odporu vedení  $R_v$  vyruší. Toto zapojení se využívá pro kompenzaci odporu vedení na dlouhé vzdálenosti. Podstatnou nevýhodou jsou oproti předchozím zapojením výrobní náklady. Při velmi dlouhém vedení rapidně narůstá cena celého výrobku, kvůli využití dalšího vodiče pro vytvoření kompenzační smyčky. [1]



Obr. 6.1 Zapojení měřících obvodů (a – dvou vodičové, b – třívodičové, c – čtyřvodičové) [1]

## 6.2 Měření termočlánků

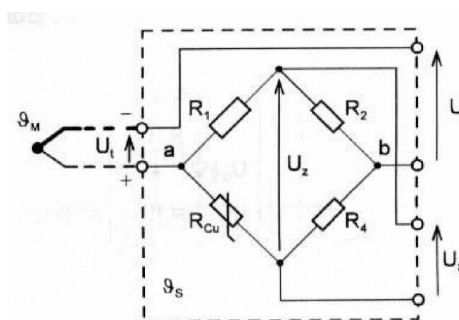
V první řadě je nutno použít terminologii měřicího řetězce termočlánku vyobrazeného na obrázku 6.2.



Obr. 6.2 Měřicí řetězec termočlánku [1]

- Srovnávací teplota je teplota srovnávacího spoje, tj teplota svorek spojovacího vedení, v literatuře často označována jako tzv. Cold Junction Temperature neboli teplota studeného konce, prodlužovací vedení je obvykle konstruováno ze stejných materiálů, jako jsou vyráběny větve termočlánku,
- kompenzační vedení je vedení (obvykle v provedení kabelu) z odlišných kovů, než jsou vyrobeny větve termočlánku, musí však mít v daném rozsahu teplot (0 až 200 °C) stejný termoelektrický koeficient jako připojený termočlánek.

Nejstarším typem kompenzačního zapojení je již téměř nepoužívaná kompenzační krabice dle obrázku 6.3.



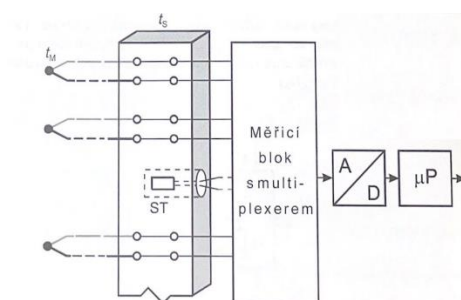
Obr. 6.3 Princip kompenzační krabice [1]

„Nerovná-li se srovnávací teplota  $t_s$  vztažné teplotě (u kompenzační krabice obvykle 20 °C), vznikne na měřicí diagonále můstku napětí  $U_{ab}$ , které koriguje systematickou odchylku  $\Delta t = t_M - t'_M$ . Pro dané zapojení platí vztah

$$\frac{dU_{ab}}{dt_s} = -U_z \frac{R_1}{(R_1 - R_{Cu})^2} \frac{dR_{Cu}}{dt_s} \quad (5.5)$$

Dalším kompenzačním zapojením je izotermická svorkovnice ( $\Delta t = 0$ ), v dnešní době jedna z nejpoužívanějších. Princip je patrný z obrázku 6.4. a spočívá v připojení teplotního,

buď odporového nebo polovodičového snímače do svorkovnice, ze kterého získáme informaci o teplotě studeného spoje. Díky čemuž se pak korekce odchylky srovnávací a vztažné teploty vyhodnotí číslicově. [1]



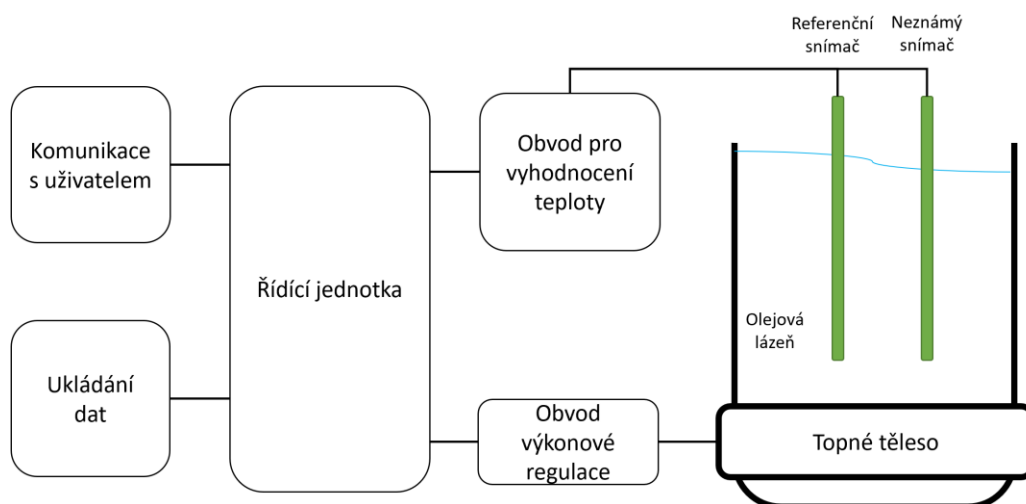
**Obr. 6.4** Izotermická svorkovnice [1]

## 7 Návrh analyzátoru

Původním požadavkem práce bylo změřit jedno neznámé odporové čidlo spolu s etalonem v olejové lázni, která je ohřívána topným tělesem. Hlavními měřenými čidly měla být dle požadavku firmy RV Electronic s. r. o. čidla automobilová. Vzhledem k výběru převodníku teploty popsaného v kapitole 7.1 a uživatelsky optimálnějšímu prostředí jsem se rozhodl stanovit si vyšší cíle.

Mezi tyto cíle patří

- Měření dalších typů teplotních čidel
  - Termočláanky
  - OneWire čidla
  - Čidla s analogovým výstupem
- Měření 2 ochranných odporových čidel na vyhřívané nádobě
- Ukládání dat na SD kartu
- Ovládání pomocí grafického displeje Nextion



Obr. 7.1 Blokové schéma analyzátoru

Vzhledem k faktu, že vybraný převodník nabízí mnoho volných vstupů, rozhodl jsem se implementovat ochranná čidla, která jsou namontovaná na topné těleso. Vybrané topné těleso dosahuje při plném zatížení až 500 °C, což by mohlo vést k problému, protože vybrané médium pro přenos tepla popsané v kapitole 7.6. má bod vzplanutí při teplotě 220 °C až 250 °C.

Aplikace tedy obsahuje dva stupně ochrany. Prvním stupněm je etalonové čidlo, podle kterého se reguluje celá aplikace. Dalším stupněm jsou zmíněná ochranná čidla, která v případě vysoké teploty topného tělesa omezí topný výkon.

## 7.1 Periferie

### Mikrokontroler

Ačkoliv bylo původním plánem využít 32bit mikrokontroler STM, rozhodl jsem se, že vzhledem ke špatné dostupnosti těchto mikrokontrolerů využiji vývojový kit Arduino Nano Every od firmy Arduino, osazený 8bitový mikrokontrolerem ATmega4809 řady megaAVR od firmy Microchip. Jedná se o mikrokontroler taktovaný na frekvenci interního oscilátoru 16MHz nebo 20MHz, kterou si může uživatel programově definovat. S ohledem na potřebný výpočetní výkon byla zvolena frekvence 16 MHz.

Tento mikrokontroler oproti mikrokontroleru ATmega328P osazeném na předchozí řadě Arduino Nano nabízí 48KB Flash Paměti, 6kB paměti SRAM, 256B paměti EEPROM a větší počet jednotlivých periférií. Jednou z těchto periférií je UART. Mikrokontroler ATmega4809 obsahuje celkem 4 linky UART, z nichž 2 využiji pro svou aplikaci. Při použití mikrokontroléru ATmega328P bych musel použít UART implementovaný softwarově, což by snižovalo dostupný výpočetní výkon. [5]



Obr. 7.2 Vývojový kit Arduino Nano Every [6]

Mezi základní periferie, které ve své aplikaci využiji patří:

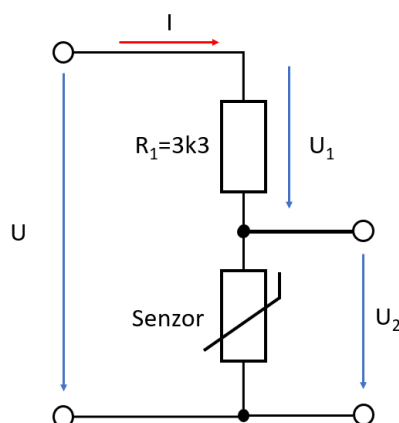
- 16bit časovač sloužící pro časování událostí a generaci PWM signálu pro regulaci topného tělesa,
- sběrnici SPI využívanou pro komunikaci s převodníkem teploty, externím A/D převodníkem a SD kartou
- 4 sběrnice UART, z nichž jsou 2 využity pro:
  - komunikaci s displejem Nextion,
  - programování mikrokontroleru a vypisování informací v debug módu sloužícího pro ladění programu,
- GPIO pro obsluhu Chip Selectů jednotlivých komponent komunikujících přes sběrnici SPI a dále pak pro komunikaci s OneWire čidly,
- interní A/D převodník s rozlišením 10bit.

## Obvod pro vyhodnocení teploty

Při výběru převodníku pro převod teploty byl brán zřetel na několik parametrů:

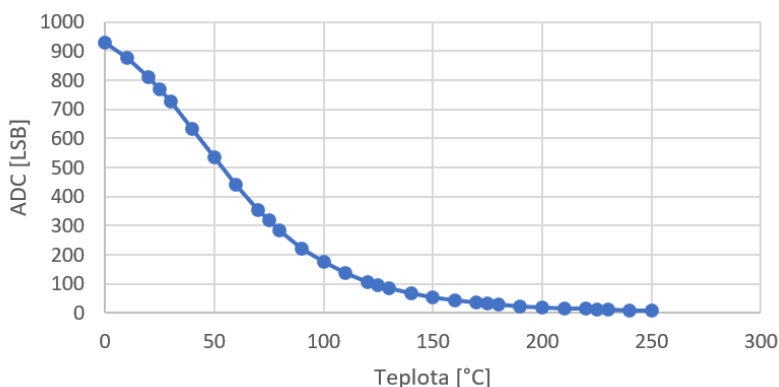
- počet vstupů,
- přesnost měření,
- cena.

První možnost nabízí využít základní zapojení – odporový dělič připojený na vstup integrovaného A/D převodníku mikrokontroleru ATmega4809 zobrazený na obrázku 7.3.



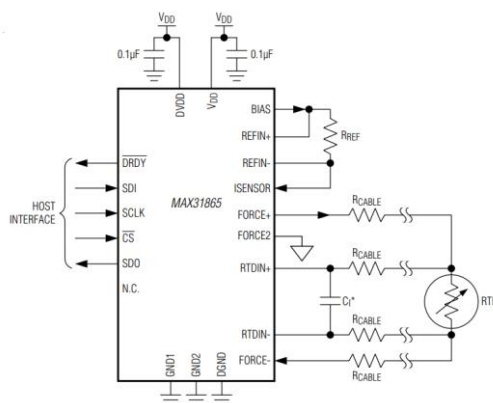
Obr. 7.3 Schéma odporového děliče

Na obrázku 7.4. je vidět příklad závislosti A/D převodníku na teplotě snímače NTC 10k s připojeným Pull-Up rezistorem 3k3. Volba tohoto rezistoru zásadně ovlivňuje přesnost měření. Je zde vidět, že hodnota A/D převodníku dosahuje při teplotách nad 150 °C velmi malých změn. Např. při změně teploty ze 140 °C na 150 °C se hodnota A/D převodníku změní o 14 LSB, rozlišení v tomto rozsahu je tedy 0,7°C. Horší situace nastává při změně teploty z 230 °C na 240 °C, kdy se hodnota A/D převodníku změní o 1 LSB, což nám dává rozlišení 10 °C. Vlastní chyba A/D převodníku je 3 LSB, což nám v uvedeném rozsahu 230 °C až 240 °C způsobí chybu měření 30 °C.



Obr. 7.4 Závislost hodnoty A/D převodníku na teplotě senzoru NTC 10k

Jedním z výtípaných převodníků byl převodník MAX31865 od firmy Maxim Integrated. Jedná se o jednocanálový převodník odporových čidel RTD a NTC. O převod se stará 15bit sigma-delta A/D převodník. Výrobce zaručuje přesnost měření 0,5 °C a výstupní frekvenci 16 Hz. Obvod nabízí připojení dvou, tří a čtyř vodičové s výstupní hodnotou poměru odporů mezi referenčním odporem a odporem měřeného snímače. Komunikace probíhá po sběrnici SPI. [7]



**Obr. 7.5** Typické zapojení převodníku MAX31865 [7]

Další převodníkem vhodným pro účel aplikace je integrovaný obvod LTC2984 od firmy Analog Devices. Tento obvod je zkonstruován výhradně pro převod široké škály teplotních snímačů do digitální podoby. Mezi přípustné senzory patří kovové odporové snímače Pt a Ni, polovodičové odporové snímače NTC, termočlánky a diodové snímače. Připojení snímačů lze provést u RTD dvou, tří i čtyř vodičové bez nutnosti použití dalších přídavných obvodů, ve všech případech lze měřit buď diferenčně (mezi 2 vstupy převodníku) nebo single-ended (mezi 1 vstupem a COM pinem obvodu).

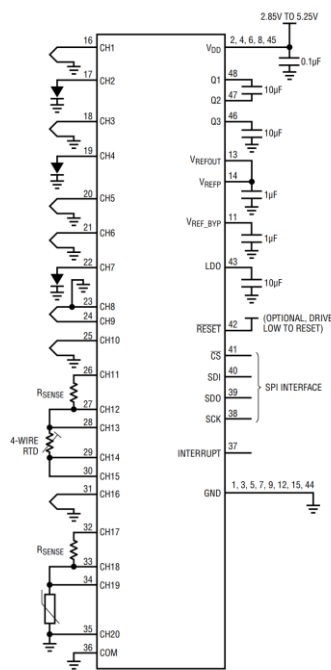
Pro vybrané snímače je v obvodu implementována převodní tabulka, díky které je výstupní veličinou teplota. Tuto převodní tabulku nelze měnit. Snímače, které jsou obsaženy v tabulce jsou sepsány níže:

- Termočlánky – typ J, K, E, N, R, S, T, B,
- Kovová odporová čidla – PT10, PT100, PT200, PT500, PT1000, NI120,
- Termistory NTC – 2,252K, 3K, 5K, 10K, 30K,
- Diodové snímače.

O převod do digitální podoby se starají 3 integrované 24bit sigma-delta A/D převodníky, díky kterým máme možnost měřit i malé změny napětí typické např. u termočlánků. Díky takto velkému rozlišení je výrobcem pro všechny vyjmenované typy snímačů zaručována vysoká přesnost měření. Jedním z limitů tohoto obvodu je výstupní frekvence 4 Hz, tudíž není vhodný pro zaznamenávání rychlých změn teplot. Výstupní hodnota převodníku je uživatelsky definovatelná podle typu snímače:

- odpor [ $\Omega$ ] – pro odporová čidla,
- napětí [mV] – pro termočlánky a diodové snímače,
- teplota [ $^{\circ}\text{C}$  nebo  $^{\circ}\text{F}$ ] – pro odporová čidla, termočlánky a diodové snímače.

Převodník dále obsahuje interní diagnostiku chyb, která je spolu s výstupní hodnotou předávána po SPI sběrnici. [8]



Obr. 7.6 Typické zapojení převodníku LTC2984 [8]

Shrňme si tedy vybrané obvody pro měření teploty.

Obvod pro měření teploty	Cena (Kč)	Přesnost (°C)	Počet vstupů	Výstupní frekvence (Hz)
Odporový dělič	<10	0,7	16*	115k*
MAX31865	180	0,5	1	16
LTC2984	950	0,1	20	4

Tab. 7.1 Shrnutí převodníků teploty

\*Hodnoty jsou relevantní pro mikrokontroler ATmega4809 v naší aplikaci.

Jak je z tabulky 7.1 patrné, cena LTC2984 několikanásobně převažuje cenu MAX31865, ale má daleko širší možnosti využití. U LTC2984 nejsme omezeni pouze na odporová čidla teploty. Nutno dodat, že vzhledem k potřebě snímání minimálně 4 snímačů najednou (referenční, neznámý a dva ochranné snímače) jsme při využití MAX31865 téměř na stejné ceně. Výstupní frekvence MAX31865 je sice 4x větší, ale vzhledem k dlouhému cyklu měření nám 4 Hz převodníku LTC2984 je dostačující.

Vzhledem k vlastním cílům práce jsem se rozhodl použít integrovaný obvod LTC2984. Tento obvod obsahuje dostatek vstupů pro obsluhu celé aplikace.

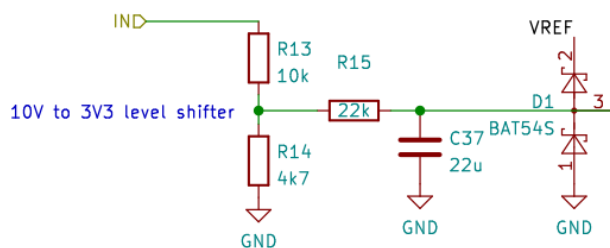


## A/D převodník

Vzhledem k faktu, že mým cílem bylo snímat širší škálu čidel, rozhodl jsem se využít externí A/D převodník MCP3301 pro snímání čidel s analogovým výstupem. Tento převodník disponuje jedním diferenciálním vstupem. Převodník je 13bitový s výstupní frekvencí 100 kHz. [7]

Důvodem, proč není využít interní A/D převodník mikrokontroleru ATmega4809, je nízké rozlišení tohoto převodníku – 10bit. Jelikož většina průmyslových čidel pracuje v rozsahu 0 až 10 V. Bylo by rozlišení 10bit nedostačující. Rozlišení při použití tohoto převodníku v celém rozsahu je přibližně 10 mV. Při použití MCP3301 v celém rozsahu je rozlišení přibližně 1,2 mV. Ani jeden ze zmíněných převodníků není schopen měřit v požadovaném rozsahu, a proto bylo nutné zapojení dodatečného odporového děliče.

Díky děliči jsme schopni měřit napětí až do požadovaných 10 V. V případě poruchy je vstup ochráněn přepětíovou ochranou realizovanou obvodem BAT54S. Pro filtraci je využit filtr typu dolní propust s mezní frekvencí 0,3 Hz.



Obr. 7.7 Schéma zapojení vstupního obvodu MCP3301

## Výkonová regulace

Pro výkonovou regulaci je využít optotriak MOC3061 v kombinaci s triakem BTA24-600B.

Optotriak MOC3061 slouží ke galvanickému oddělení řídicí a výkonové části a lze jej využít až do napětí 600 V. Zároveň obsahuje obvod se spínáním v nule (anglicky **ZCC** = **Z**ero **C**ross **C**ircuit), který sepne triak pouze ve chvíli, kdy je okamžitá hodnota napájecího střídavého napětí nulová. Tím předejdeme proudovému nárazu. [9]

Triak BTA24-600B pracuje do max. závěrného napětí 600V a dokáže vést max. souvislý proud 25A s adekvátním chlazením. [10]

## Topné těleso

Jako topné těleso byl využit 250 W topný kroužek se sponou o průměru 80 mm využívaný např. v cínových lázních. [11]



Obr. 7.8 Topné těleso [11]

### Slot pro SD kartu

V aplikaci je využit slot pro SD karty typu MH-SD, jedná se o standardní typ karet. Pro využití microSD karty je nutné kartu vložit do adaptéru. Podporovaný souborový formát karet je FAT16 a FAT32.

### Grafický displej

Jako ovládací panel je využit grafický dotykový displej Nextion, komunikující s mikrokontrolerem přes rozhraní UART. Pomocí jednoduchých příkazů lze docílit uživatelsky přívětivého ovládání či vizualizace hodnot. Grafika displeje se nastavuje v prostředí Nextion Editor. Rychlost komunikace displeje s mikrokontrolerem je 9600bps.



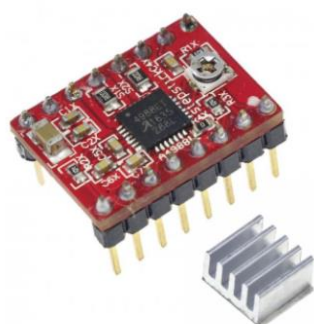
Obr. 7.9 Displej Nextion [12]

## Driver krokového motoru A4988

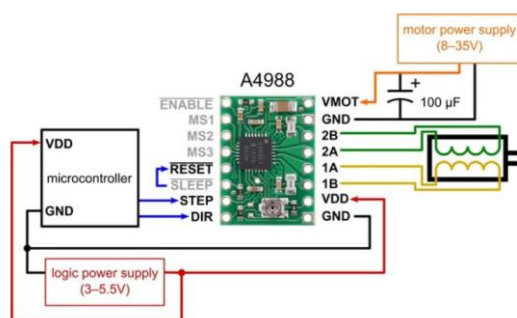
Vývojový kit s driverem A4988 je využíván k jednoduchému ovládání krokových motorů. Schéma zapojení je zobrazeno na obrázku 7.11.

Napájecí napětí motoru	8-35 V
Max. proud vinutím motoru	2 A
Napájecí napětí řídicí části	3 V - 5,5 V
Módy krokování	Full-Step, 1/2-Step, 1/4-Step, 1/8-Step, 1/16-Step

Tab 7.2 Parametry driveru A4988



Obr. 7.10 Driver A4988 [13]

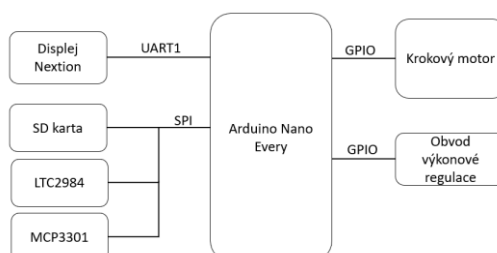


Obr. 7.11 Příklad zapojení driveru ve Full-Step módu [12]

Pro ovládání krokového modulu je nutné na STEP pin přivést obdélníkový signál. Změnou frekvence tohoto signálu dokážeme měnit rychlost otáčení motoru. Změna směru otáčení je závislá na logické úrovni na DIR pinu driveru.

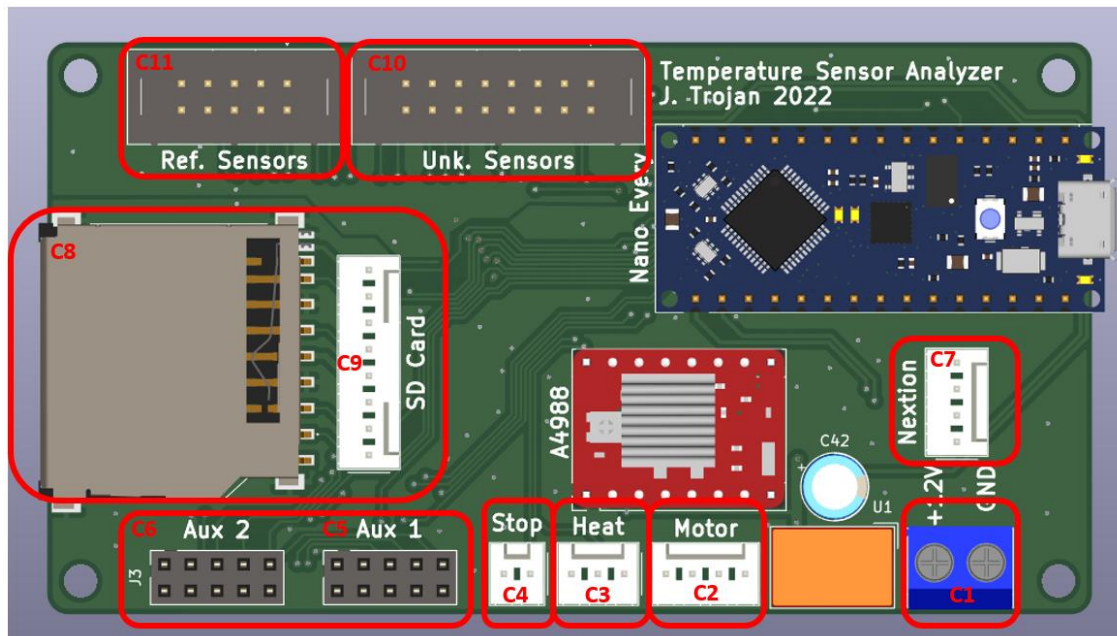
## 7.2 Řídicí jednotka

Z požadavků rozepsaných v úvodu této kapitoly vzešlo blokové schéma zobrazené na obrázku 7.12.



Obr. 7.12 Blokové schéma řídicí jednotky

Pro měření byla tedy navržena a vyrobena deska plošných spojů (dále jen „DPS“), na které jsou implementovány všechny periferie. DPS byla navržena tak, aby se dala namontovat přímo pod displej, a tím se zařízení stalo kompaktní. Náhled je viditelný na obrázku 7.13.



Obr. 7.13 DPS řídicí jednotky

Schéma řídicí jednotky je přiložené v příloze.

Při samotném designu byl kladen důraz na dostatečně silné cesty napájení (proudová spotřeba displeje je 150 mA). Samozřejmě je brán zřetel i na kvalitní oddělení analogové a digitální části. Tento problém je řešen rozdělenou analogovou a digitální zemí a umístěním měřících integrovaných obvodů mimo digitální cesty.

### Popis konektorů:

#### Napájecí konektor C1

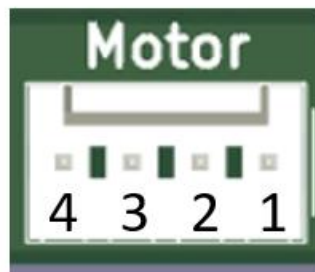
Šroubovací Terminal Block konektor



Obr. 7.14 Náhled napájecího konektoru C1

## Konektor C2 pro připojení krokového motoru

Konektor NS25-W4P



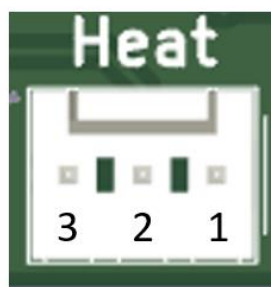
Obr. 7.15 Náhled konektoru C2

Pin	Popis funkce
1	Vinutí 2B
2	Vinutí 2A
3	Vinutí 1A
4	Vinutí 1B

Tab. 7.2 Rozpis vývodů konektoru C2

## Konektor C3 pro připojení výkonového stupně

Konektor NS25-W3P



Obr. 7.16 Náhled konektoru C3

Pin	Popis funkce
1	5 V
2	PWM Signál
3	GND

Tab. 7.3 Rozpis vývodů konektoru C3

Vývod č.2 je typu Push-Pull. Není galvanicky oddělený a má definované logické úrovně 0 - 3,3 V.

## Konektor C4 pro připojení STOP tlačítka

Konektor NS25-W2P



Obr. 7.17 Náhled konektoru C4

Pin	Popis funkce
1	Button Signal
2	GND

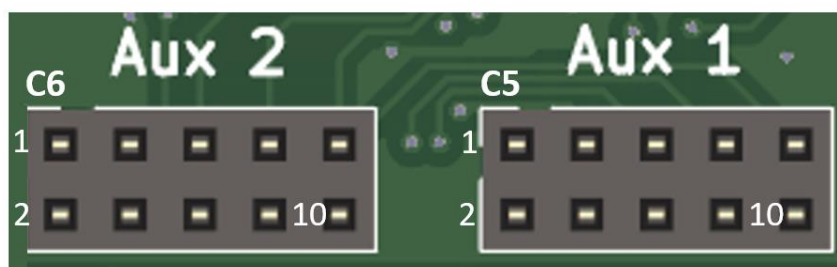
Tab. 7.4 Rozpis vývodů konektoru C4

K vývodu č. 2 je na desce připojený Pull-Up rezistor o hodnotě 4k7, kterým zajistíme, že na vstupu mikrokontroleru je definovaná logická úroveň HIGH, dále je zde filtr typu dolní propust s mezní frekvencí 400 Hz, který filtruje zákmity tlačítka při stisknutí.

## Konektory C5 a C6

Tyto konektory slouží výhradně pro připojení rozšiřujících desek.

Většina vývodů těchto konektorů je společná, především napájecí a komunikační vývody pro SPI a I<sup>2</sup>C sběrnici. Pro I<sup>2</sup>C sběrnici jsou na DPS již implementovány Pull-Up rezistory 4k7 připojené na 3,3 V. Každý konektor má vlastní Chip Select vývod pro využití SPI sběrnice, dále pak jeden GPIO vývod pro každý konektor. Tyto GPIO piny jsou připojeny přímo na vývody mikrokontroleru a mohou fungovat buď jako analogové vstupy nebo jako digitální vstupy/výstupy.



Obr. 7.18 Náhled konektorů C5 a C6

Pin	Popis funkce	
	C5	C6
1	3,3 V	
2	SCL (I <sup>2</sup> C)	
3	5 V	
4	SDA (I <sup>2</sup> C)	
5	MISO (SPI)	
6	AUX1_CS	AUX2_CS
7	SCK (SPI)	
8	AUX1_GPIO	AUX1_GPIO
9	MOSI (SPI)	
10	GND	

Tab. 7.5 Rozpis vývodů konektorů C5 a C6

## Konektor C7 pro připojení displeje Nextion

Konektor NS25-W4K

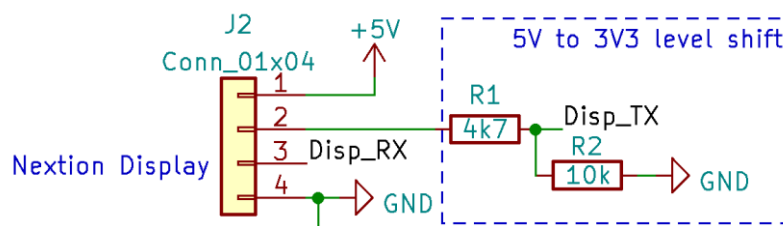


Obr. 7.19 Náhled konektoru C7

Pin	Popis funkce
1	5 V
2	Display Tx
3	Display Rx
4	GND

Tab. 7.6 Rozpis vývodů konektoru C7

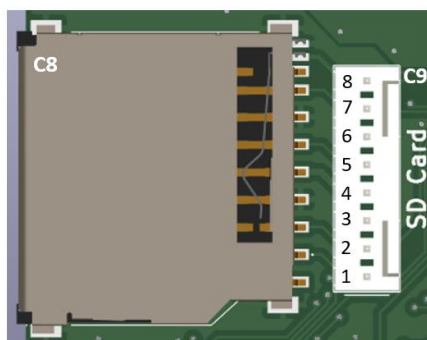
K vývodu č. 2 je na DPS připojen odporový dělič, který zajišťuje změnu napěťové úrovně z 5 V na 3,3 V.



Obr. 7.20 Převodník napěťové úrovně komunikační linky displeje

## Konektory C8 a C9 pro připojení displeje SD karty

Na DPS je přímo připájen slot pro SD kartu typu SDHC (C8), který je napojen na SPI sběrnici. Navíc je zde připraven 8pinový konektor (C9) paralelně spojený se slotem, který lze využít v případě, kdy montáž řídicí jednotky neumožní přímý přístup ke slotu SD karty a bude nutné mít kartu připojenou externě pomocí modulu s kabeláží. Vývod č. 8 (Connection Flag) slouží k indikaci připojení a je uzemněn v případě, že je vložena SD karta.



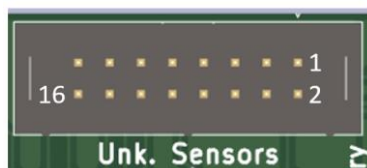
Obr. 7.21 Náhled konektorů C8 a C9

Pin	Popis funkce
1	CS
2	MOSI (SPI)
3	GND
4	3,3 V
5	SCK (SPI)
6	GND
7	MISO (SPI)
8	Connection Flag

Tab. 7.7 Rozpis vývodů konektoru C9



## Konektor C10 pro připojení neznámých čidel



Obr. 7.22 Náhled konektoru C10

Pin	Popis funkce
1	GND
2	12 V
3	GND
4	5 V
5	GND
6	3,3 V
7	GND
8	R-ID
9	OneWire
10	SnsrADC
11	SnsrRTD/NTC_2
12	SnsrRTD/NTC_1
13	SnsrTCK_2
14	SnsrTCK_1
15	SnsrNTC_CJ_1
16	SnsrNTC_CJ_2

Tab. 7.8 Rozpis vývodů konektoru C10

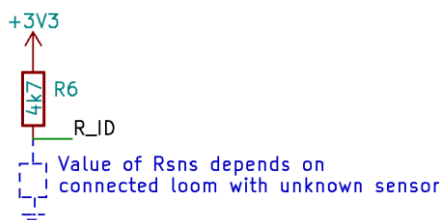
Tento konektor slouží k připojení neznámých čidel a obsahuje kromě napájecích napětí i vstupy pro odporové snímače, vstupy pro termočlánek a vstup pro NTC snímač měřící teplotu studeného konce při měření termočlátku. Tyto vstupy jsou připojeny na převodník LTC2984.

Další vstup č. 10 (SnsrADC) je připojen přes napěťový dělič a vstupní RC filtr na převodník MCP3301.

Vstup č. 9 slouží pro připojení digitálního OneWire čidla a je připojen přímo na vstup Arduina. K tomuto vstupu je zároveň připojený Pull-Up rezistor o hodnotě 4k7, vyžadovaný pro komunikaci s OneWire čidly.

Vstup č. 8 (R\_ID) je připojen na A/D vstup Arduina a je využíván pro připojení externího rezistoru sloužícího k vyhodnocení připojeného snímače. Externí rezistor je implementován v konektoru každého testovacího snímače. Při připojení konektoru k řídicí jednotce se vytvoří kombinací odporu R6 a externího R\_ID odporu napěťový dělič, jehož napěťová úroveň je pomocí A/D převodníku převedena do digitální podoby a vyhodnocena v programu. Na základě této hodnoty dochází k rozlišení typu měřeného čidla.

Zapojení tohoto vstupu můžeme vidět na obrázku 7.23.



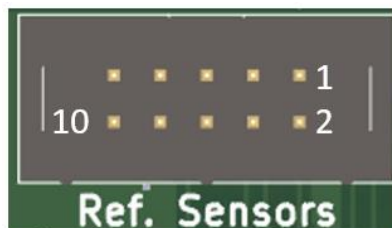
Obr. 7.23 Schéma zapojení externího rezistoru

V tabulce 7.9 můžeme vidět hodnoty jednotlivých rezistorů podle připojeného snímače.

Připojený snímač	Hodnota rezistoru
OneWire	47k
Analog	10k
Termočlánek	4k7
Thermistor	2k2
Odporový kovový	510R

Tab. 7.9 Hodnoty externích rezistorů

### Konektor C11 pro připojení referenčních čidel



Obr. 7.24 Náhled konektoru C11

Pin	Popis funkce
1	Etalon_1
2	Etalon_2
3	Junction 1_1
4	Junction 1_2
5	Junction 2_1
6	Junction 2_2
7	GND
8	GND
9	GND
10	GND

Tab. 7.10 Rozpis vývodů konektoru C11

Vstupy č. 1 a 2 slouží k připojení etalonového čidla PT1000. Dále pak dvojice vstupů 3,4 a 5,6 slouží k připojení ochranných PT1000 čidel přimontovaných na topné těleso.

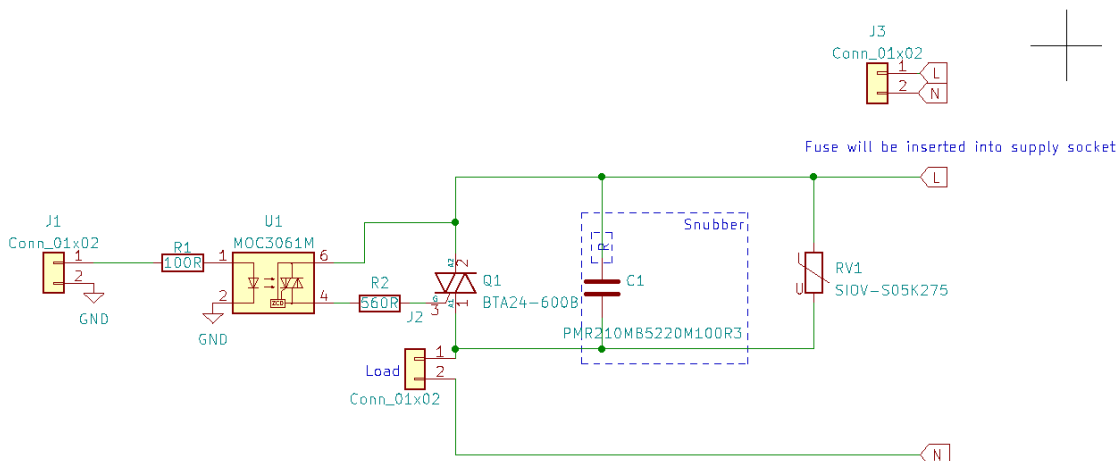
### 7.3 Výkonový stupeň

O výkonovou regulaci se stará DPS s výkonovým stupněm v podobě spínacího optotriaku a výkonového triaku. Jako ochrana proti rušení je zde integrovaný tzv. „Snubber“. Jedná se o RC článek, který spolu s varistorem eliminuje vysokonapěťové špičky.

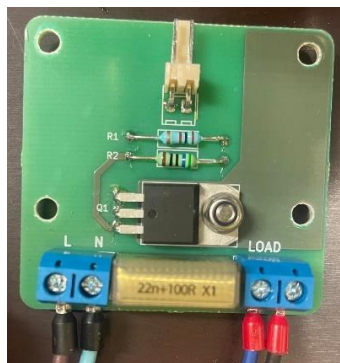
Původním plánem bylo tento stupeň implementovat přímo na řídicí jednotku, ale kvůli bezpečnosti a galvanickému oddělení síťového napětí je tento stupeň navrhnut na samotnou desku a s řídicí jednotkou propojen pomocí dvou vodičového svazku. Dalším benefitem externí výkonové DPS je možnost připojit řídicí jednotku na jiný výkonový stupeň dimenzovaný na vyšší výkony. To nám dává možnost využít řídicí jednotku i v jiných aplikacích.

DPS byla navržena a vyrobena tak, aby se dodržely doporučené izolační mezery mezi vodivými cestami. Chlazení triaku je řešeno montáží přímo na DPS, kde se teplo odvádí pomocí rozlité měděné plochy pod pouzdrem triaku.

Pouzdro triaku dosahuje při proudové spotřebě 1,8A teploty 40 °C (při pokojové teplotě 18 °C). Podle technického listu je maximální přípustná teplota polovodičového přechodu 125 °C. Pro tuto aplikaci je tedy chlazení dostačující.



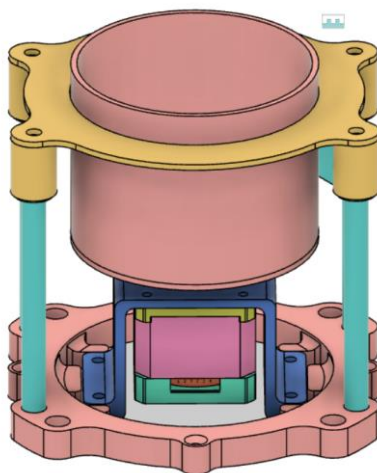
Obr. 7.25 Schéma výkonového stupně



Obr. 7.26 DPS výkonového stupně

## 7.4 Nádoba s míchacím mechanismem

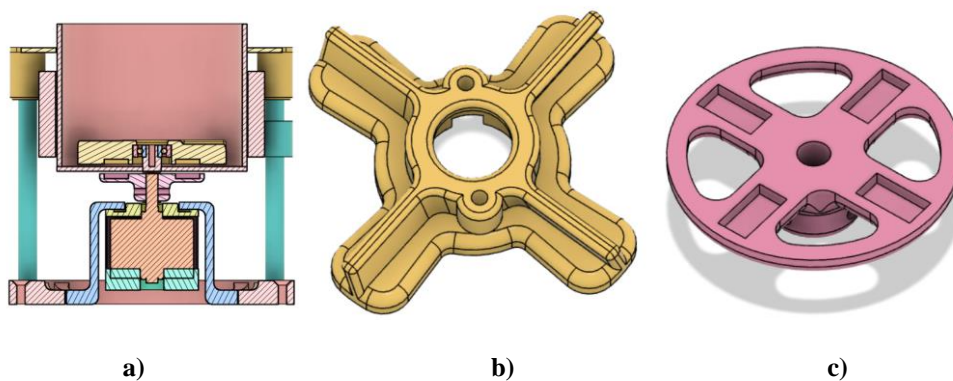
Pro měření byla navržena nerezová nádoba o objemu 280ml s bezkontaktním mícháním, která je zobrazena na obrázku. 7.27.



Obr. 7.27 Nádoba s míchacím mechanismem

Tělo nádoby je z nerezové trubky, na kterou je přivařený, laserem vypálený držák s montážními dírami a dno do kterého je zavařený vysoustružený díl držící ložisko. Dále je zde navržena výpust pro snadnější čištění samotné nádoby, ale jelikož se jedná o prototyp, výpust byla zavařena. Samotný rotor je usazen na valivém ložisku, které je přichyceno pomocí šroubu na dno nádoby. Rotor míchající olej je vytisknutý na 3D tiskárně FormLabs Fuse 1, která nabízí tisk z Nylonu pomocí metody SLS (= vytvrzování jednotlivých vrstev pomocí laserového paprsku) snášejícího teploty dosahující 170 °C bez deformačních následků.

Pod míchací nádobou je na hřídeli krokového motoru usazen další nylonový výtisk. Bezkontaktní rotaci zajišťují neodymové magnety usazené tak, aby se výtisky vzájemně přitahovaly. Nerezové dno nemá zásadní vliv na přenos magnetické síly, a i přes vyšší viskozitu oleje jej dokážeme dostatečně rozmíchat.



Obr. 7.28 a) mechanismus v řezu, b) rotor pro míchání oleje, c) rotor pro přenos síly

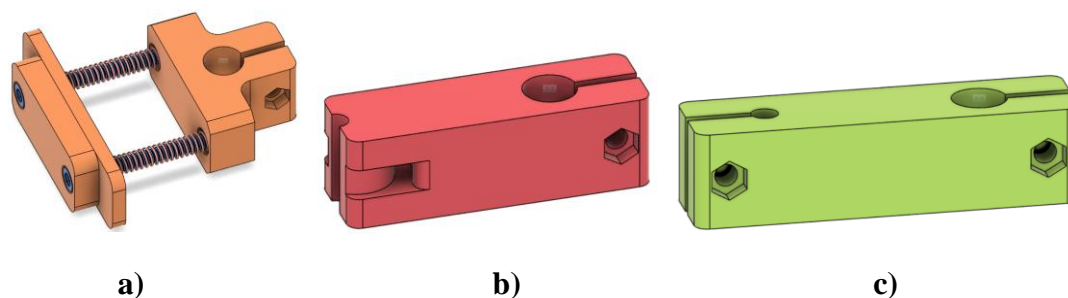
## 7.5 Držáky snímačů

Pro jednoduchou obsluhu jsem navrhnul několik druhů držáků vytištěných z polykarbonátu na 3D tiskárně. Jedná se celkem o tři různé držáky.

- Držák referenčního čidla
- Držák neznámého čidla s pružinkami
- Držák neznámého čidla se stahovací páskou

Držák referenčního čidla je zkonstruovaný přímo pro etalonový snímač, nejedná se tedy o univerzální držák. Držák neznámého čidla s pružinkami nám dává možnost přidržet si čidla různých tvarů a průměrů. Délka pružinek je vybrána tak, aby bylo zajištěno dostatečné předpětí a snímače z držáku nevypadávaly. Poslední držák se stahovací páskou dokáže stáhnout objekty do průměru 5 mm.

Na obrázků 7.29 můžeme vidět 3D modely držáků.



Obr. 7.29 Držáky čidel a) s pružinkou, b) se stahovací páskou, c) pro referenční čidlo

## 7.6 Výběr média

Jelikož je kladen důraz na homogenitu prostředí, bylo nutné vybrat vhodné médium pro přenos tepla, v praxi se obvykle setkáme právě s olejem, který je využit i při této aplikaci. Jako další adept byla destilovaná voda, která by s vyšší tepelnou kapacitou a tím i delší dobou ohřátí byla vhodnější pro pomalé měření, ale vzhledem k nízké teplotě varu být využita nemohla. Při výběru oleje byla dalším aspektem zdravotní závadnost.

Na výběr jsem měl potravinářský olej (slunečnicový či řepkový) a olej motorový. Motorový olej vznikající rafinací ropy je bezpochyby rizikovější a při ohřátí odpařuje značné množství škodlivých a karcinogenních látek. Nehledě na to, že zápach tohoto oleje je velmi nepříjemný.

Ve finální aplikaci je využit olej slunečnicový. Jedná se o potravinářský produkt, který splňuje požadavky na zdravotní nezávadnost. Dalším faktorem byl kouřový bod, kterého dosahuje tento typ oleje až při 220-250 °C.

## 7.7 Výběr etalonu

Při výběru referenčního etalonu jsem se rozhodoval mezi několika čidly, a to:

- OneWire čidlo DS18B20,
- Termočlánek typu K,
- Termistor NTC 10k,
- RTD čidlo PT100,
- RTD čidlo PT1000.

V tabulce 7.11. porovnání jednotlivých požadovaných parametrů sestupně podle priority s bodovým hodnocením: 0 – nevyhovuje, 5- vyhovuje.

V tabulce 7.12 pak najdeme výsledky vyjádřené reálnými hodnotami.

Snímač	DS18B20	TCK typ K	NTC 10k	PT100	PT1000
Rozsah teplot	0	5	5	5	5
Přesnost	3	2	3	5	5
Linearita	4	5	0	5	5
<b>Výsledek</b>	<b>7</b>	<b>12</b>	<b>8</b>	<b>15</b>	<b>15</b>

Tab. 7.11 Bodové porovnání parametrů vybraných čidel

Snímač	DS18B20	TCK typ K	NTC 10k	PT100	PT1000
Rozsah teplot	-55 °C až 125 °C	0 °C až 1100 °C	-40 °C až 250 °C	-50 °C až 500 °C	-50 °C až 500 °C
Přesnost	±0.5 °C	±2,2 °C	±0.5 °C	±0.3 °C	±0.3 °C
Linearita	Lineární	Lineární	Nelineární	Lineární	Lineární

Tab. 7.12 Porovnání parametrů vybraných čidel

Výsledkem porovnání je využití PT100 nebo PT1000 čidla. Jelikož je ale změna odporu při změně teploty u PT1000 větší než u PT100, použito je v aplikaci čidlo PT1000.

Vybráno bylo čidlo v dlouhém kovovém pouzdře, které lze pomocí vymodelovaného držáku lehce uchytit. Zároveň kovové pouzdro dobře převádí teplo a zabraňuje oleji vniknutí do okolí čidla.



**Obr. 7.30 Etalonový snímač PT1000**

## 8 Firmware

Veškerý firmware měřicí soustavy je vytvářen v programovacím prostředí Arduino IDE, a to z několika důvodů. Jedním z nich byla jednoduchá obsluha a snadné nahrání kódu do mikrokontroleru. Dalším důvod byla již zmíněná realizace pomocí kitů Arduina s využitím podpůrných komunitou nebo výrobcem vytvořených knihoven pro snadnou komunikaci Arduina s periferiemi.

Pro komunikaci s SD kartou a OneWire čidly se využily původní Arduino knihovny, které se nikterak neupravovaly, protože plní svoji funkci v požadovaném rozsahu.

Knihovna pro LTC2984 stažitelná ze stránek výrobce tohoto integrovaného obvodu nabízí řadu užitečných funkcí, ale pro potřebu této aplikace jsem řadu z nich upravil. Z valné většiny jsem funkce upravil tak, aby předávaly hodnotu snímače pomocí pointeru na strukturu, kterou jsem si definoval. Upravil jsem zároveň způsob inicializace i vyčítání samotných dat. Tím se mi zásadně ulehčila práce s daty, kterou bych při použití původních funkcí obtížně optimalizoval.

Ačkoliv je FW sestaven z nadstavbových knihoven, kladl jsem důraz na využívání nízko úrovněvého jazyka C. Například PWM regulace a řízení krokového motoru je řešena na pozadí pomocí časovače a jeho přerušování. Jelikož knihovna Wiring, která zaštiťuje všechny uživatelské funkce známé z prostředí Arduino IDE využívá i jednotlivé periferie, např. již zmíněný časovač pro aktivitu na pozadí, nemohl jsem si dovolit tento časovač nastavit volně dle vlastních potřeb, ale musel jsem se přizpůsobit této knihovně. Kdybych tak neučinil, přišel bych o funkčnost OneWire, UART, a především SPI knihovny, tzn. hlavního pilíře celé aplikace. Je zde možnost napsat si knihovny vlastní, ale zrovna v případě SPI knihovny, která je dále používána v knihovně pro komunikaci s SD kartou, bych také musel přepsat celou knihovnu pro SD kartu, tak aby byla kompatibilní s mnou vytvořenou SPI knihovnou. To samé platí i u knihovny pro LTC2984. Využil jsem tedy přizpůsobení časovače knihovně Wiring.

Z důvodu využití přerušování je brán zřetel i na atomicitu, tj. znemožnění vyvolání přerušování, které by mohlo změnit danou hodnotu při jejím nastavování v hlavní smyčce. Tato atomicita je využita hlavně při nastavování hodnoty PWM signálu pro regulaci výkonového stupně.

```
void pwm_setHeat(uint8_t duty)
{
    if (duty > 100) duty = 100;

    ATOMIC_BLOCK(ATOMIC_FORCEON)
    {
        heaterDuty = duty/10;
    }
}
```

Obr. 8.1 Zdrojový kód pro nastavení PWM signálu využívající atomicitu



## 9 Datový soubor

Důvodem vytvoření vlastních souborových přípon je odlišení těchto souborů od standardních textových souborů s příponou .txt. V uživatelské aplikaci je pak zajištěno, že nelze otevírat jiné soubory než soubory typu **.mea** a **.cal**, čímž předcházíme chybám spojeným se špatným formátem dat.

Dva typy souborů jsem vytvořil kvůli oddělení dat.

Účel souborových typů:

- .mea – předání dat mezi měřicím zařízením a aplikací,
- .cal – správa dat s doplněnými informacemi o časové značce měření a poznámkami.

### 9.1 Soubor typu .mea

Jelikož jsou veškerá data ukládána na SD kartu, bylo zapotřebí vytvořit formát, kterým předáme data z měření uživatelské aplikaci. Prvním kritériem je vytvoření vlastního typu souboru s příponou **.mea**, jehož vnitřní stavbu můžeme vidět na obrázku 9.1

```
Measurement file for calibration run
<type>0</type>
<startTemp>15</startTemp>
<stepTemp>5</stepTemp>
<endTemp>80</endTemp>
<ver>1</ver>
<data>
15;13.98;1053.72;14.02;
15;13.98;1053.73;14.04;
15;13.95;1053.67;14.03;
15;13.95;1053.66;14.02;
15;13.95;1053.61;14.06;
15;13.96;1053.55;14.04;
15;13.95;1053.61;14.05;
15;14.00;1053.60;14.03;
</data>
```

**Obr. 9.1** Datový soubor

Datový soubor obsahuje hlavičku s popisem samotného souboru a pak také indexy s důležitými informacemi o měření:

- **<type> </type>** - index obsahující informaci o typu čidla
  - 0 = Kovové odporové čidlo (RTD),
  - 1 = Polovodičové odporové čidlo (Thermistor),
  - 2 = Termočláňkové čidlo (TCK),
  - 3 = Analogové čidlo (ANALOG),
  - 4 = OneWire čidlo,

- `<startTemp> </startTemp>` - index obsahující počáteční hodnotu měření,
- `<stepTemp> </stepTemp>` - index obsahující měřicí krok,
- `<stopTemp> </stopTemp>` - index obsahující konečnou hodnotu měření,
- `<ver></ver>` - index obsahující informaci o verzi FW měřícího zařízení
- `<data></data>` - index obsahující samotná data ve formátu **csv** (hodnoty oddělené středníkem) v následujícím posloupnosti: **PT;NT;NH;CJT;** , kde
  - PT je požadovaná teplota měření [°C],
  - NT je naměřená teplota etalonem [°C],
  - NH je naměřená hodnota neznámého čidla {[Ω], [mV], [°C]} v závislosti na typu čidla,
  - CJT je teplota studeného konce termočlásku.

## 9.2 Soubor typu .cal

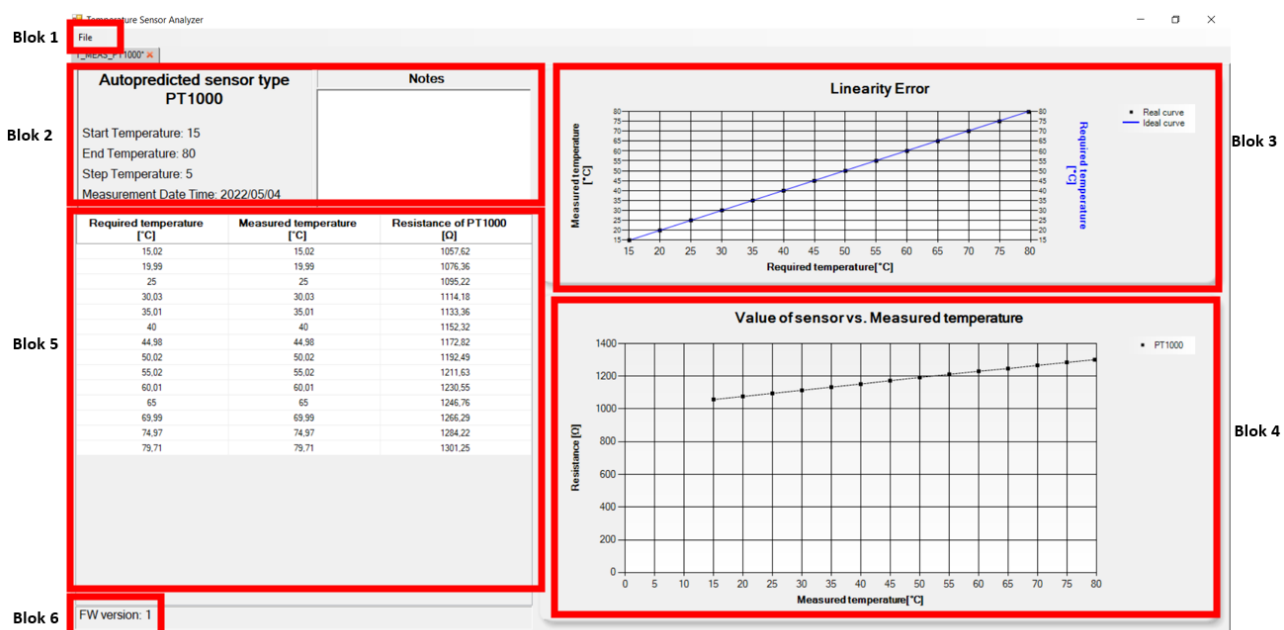
Tento typ souboru je vytvářen uživatelskou aplikací a obsahuje kromě parametrů a dat měření převzatých z .mea souboru také časovou značku a poznámky přidané v aplikaci. Při opětovném otevření aplikací se všechna tato data zobrazí.

## 10 Uživatelská aplikace

Uživatelská aplikace pro zobrazení a analýzu dat je psaná v jazyce C#, která obsahuje funkce pro práci s daty jako otevírání a ukládání měřicího souboru, vizualizaci hodnot v podobě grafů a tabulky, grafické porovnání neznámého čidla s referenčními tabulkovými čidly NTC, RTD a TCK a autopredikci neznámého čidla.

### 10.1 Vzhled

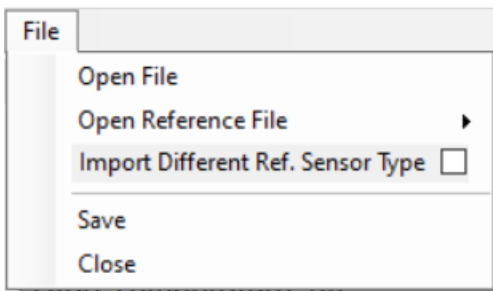
Vzhled aplikace je koncipován tak, aby uživateli předal dostatečné informace o měření. Na obrázku 10.1 můžeme vidět rozložení jednotlivých bloků.



Obr. 10.1 Uživatelská aplikace

#### Blok 1 - File toolbar

Pro obecnou práci s daty (otevírání, ukládání, import referenčního čidla) a práci s referenčními čidly slouží File toolbar v levém horním rohu.



Obr. 10.2 Náhled File toolbaru

## Blok 2 - Informace o měření

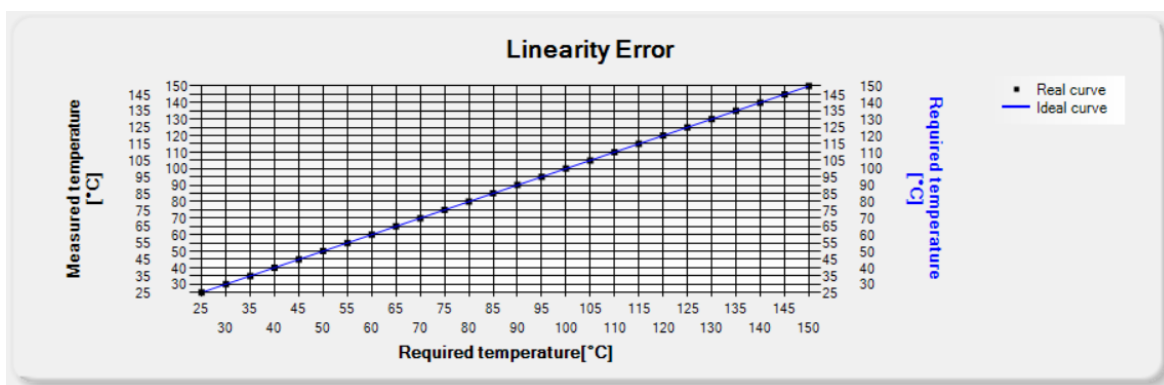
V levém horním rohu jsou zobrazeny veškeré informace o měření, tj. počáteční teplota, měřicí krok, koncová teplota měření a časová značka otevření souboru .mea v aplikaci. Pro práci s jednotlivými soubory aplikace obsahuje textové pole pro přidání vlastních poznámek (např. sériové či výrobní číslo měřeného čidla). Zároveň je zde zobrazen typ čidla predikovaný programem, který bude vysvětlen níže.

Autopredicted sensor type PT1000	Notes
Start Temperature: 25 End Temperature: 150 Step Temperature: 5 Measurement Date Time: 2022/05/10	

Obr. 10.3 Náhled informací o měření

## Blok 3 - Graf Linearity error

Tento graf nám poskytuje informaci o tom, jak přesně měřené teplotní body etalonu korespondují s požadovanou teplotou měření.



Obr. 10.4 Náhled grafu Linearity error

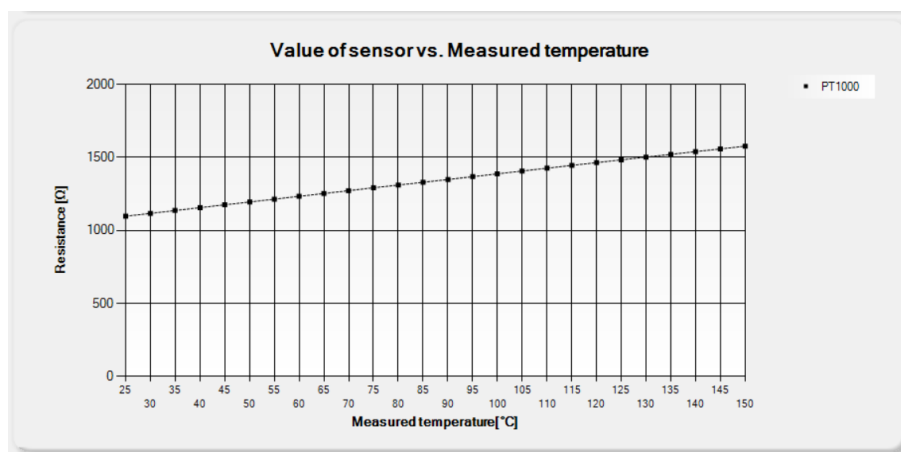
## Blok 4 - Graf Value of sensor vs. Measured temperature

Tento graf zobrazuje průběh hodnot neznámého čidla v závislosti na naměřené teplotě na etalonu. Název a hodnoty Y osy se dynamicky změní podle toho, které čidlo chceme zobrazit.

Popisy Y osy:

- Odporová čidla - „Resistance [ $\Omega$ ]“,
- Termočlánek a analogová čidla - „Voltage [mV]“,
- OneWire čidla - „Temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]“.

Měřená data jsou zobrazována bodově (černé body) a jsou interpolovány černou čárkovanou čarou pro přehledné zobrazení přibližných hodnot mezi měřenými body.



Obr. 10.5 Náhled grafu Value of sensor vs. Measured temperature

## Blok 5 - Tabulka hodnot

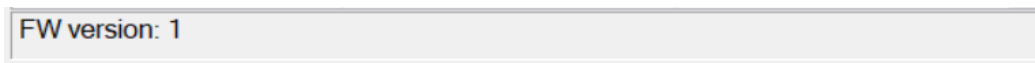
Data v levé tabulce korespondují s daty grafu zmíněného v předchozím bodu. Ve třetím sloupci se hlavička opět dynamicky mění v závislosti na připojeném čidle.

Required temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Measured temperature [ $^{\circ}\text{C}$ ]	Resistance of PT1000 [ $\Omega$ ]
25	25,01	1097.59
30	29,99	1116.79
35	34,94	1136.01
40	40,02	1156.09
45	44,98	1175.49
50	50,04	1194.91
55	55,01	1213.97
60	59,98	1233.64
65	64,99	1252.63
70	69,97	1272.2
75	75,01	1291.89
80	80,03	1310.47
85	85,02	1329.67
90	90,04	1348.46
95	95,03	1367.91
100	99,98	1387.19
105	104,99	1406.63
110	110,03	1425.74
115	115,03	1445.06
120	120,01	1463.87
125	125,01	1483.06
130	129,99	1501.97
135	134,99	1520.32
140	139,98	1539.24

Obr. 10.6 Náhled tabulky hodnot

## Blok 6 - Verze FW

V levém dolním rohu je vyobrazena verze FW měřicího zařízení, aktuálně nemá žádný význam, ale v případě dalšího vývoje tohoto zařízení nám může usnadnit práci s daty.



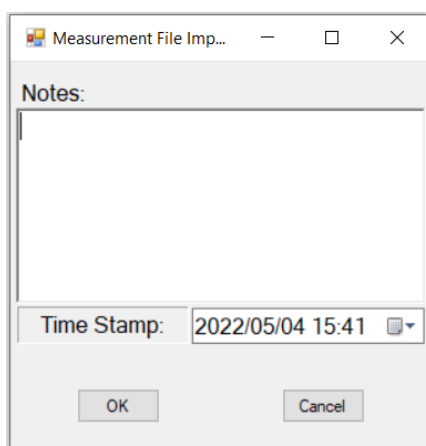
Obr. 10.7 Náhled verze FW

## 10.2 Funkce aplikace

### Práce s daty

Jak je již zmíněno, aplikace dokáže otevírat pouze soubory uložené měřicím zařízením ve formátu **.mea** nebo v **.cal** formátu, který lze vytvořit uložením souboru v aplikaci. V toolbaru nejste jako uživatel schopni využívat další funkce, dokud neotevřete alespoň jeden soubor s měřenými daty.

Při kliknutí na „Open“ se první otevře standardní dialogové okno pro výběr souboru. Poté se otevře okno aplikace pro import, ve kterém si můžete definovat časovou značku a poznámky k otevřenému souboru, jak je vidět na obrázku 10.3.

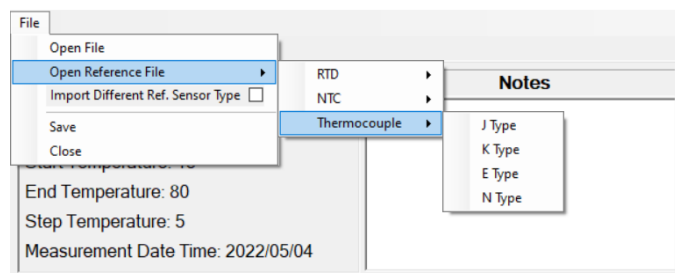


Obr. 10.8 Import okno

Při potvrzení importu se vygeneruje karta s informacemi o otevřeném souboru. Aplikace zároveň umožňuje otevírat více souborů najednou.

Jestliže máme otevřený více než jeden soubor, jsme schopni mezi kartami přepínat kliknutím na název karty, který se zobrazuje pod toolbarem. Karty můžeme samozřejmě libovolně zavírat a pokud je nemáme uložené, aplikace nás vyzve k uložení dat ve formátu **.cal**.

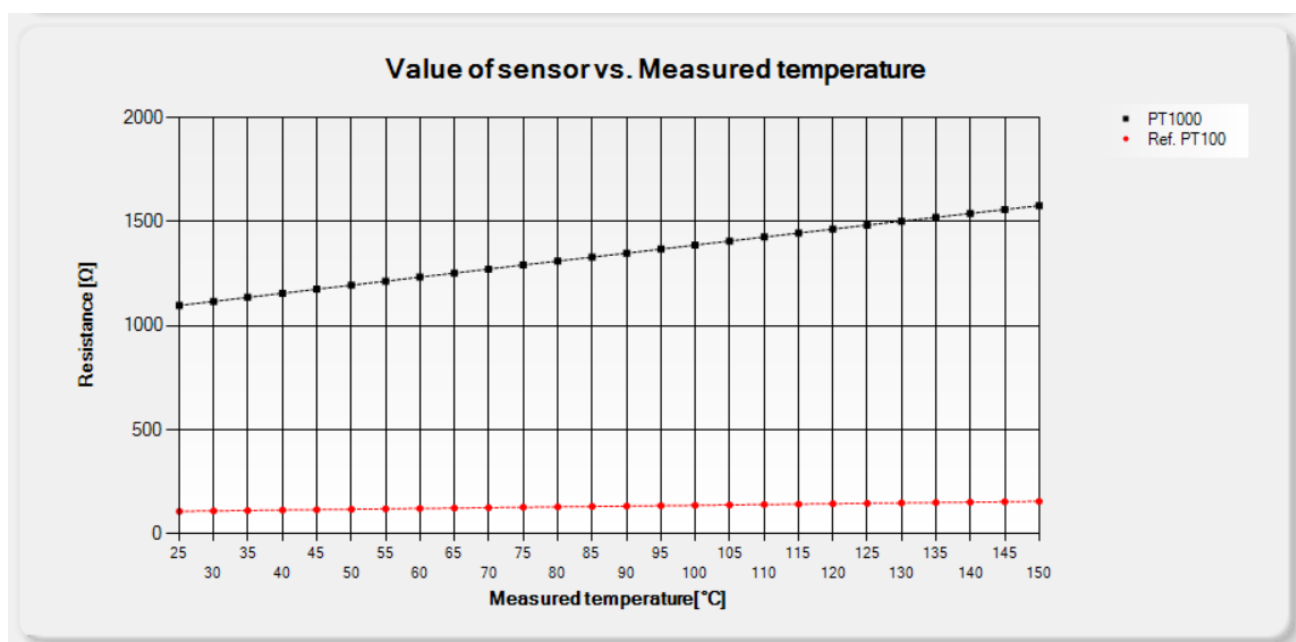
Při otevření alespoň jednoho souboru máme možnost importovat referenční čidlo, jehož charakteristika odpovídá tabulkovým hodnotám. Prozatím jsou v aplikaci uložena referenční čidla PT100, PT1000, NTC 10K a termočláanky J, K, E, N.



**Obr. 10.9 Import referenčních čidel**

Pokud nemáme zakliknutý checkbox „Import Different Ref. Sensor Type“ aplikace nám neumožní importovat jiný typ čidla než, který predikovala. Pokud checkbox aktivujeme a importujeme např. termočlánek, do spodního grafu se přidá sekundární osa Y s jednotkami pro termočlánek, tj. v mV. Všechna data se pak zobrazí do grafu a tabulky, viz obrázek 10.5. Aplikace nás zároveň upozorní na fakt, že jsme importovali referenční čidlo jiného typu.

Pro správné zobrazení hodnot referenčního čidla jsou všechna body před zobrazením softwarově interpolovány (třída Interpolate a její metoda GetInterpolation), tím pádem není aplikace omezena počtem dat a grafy se stávají přehlednější.



**Obr. 10.10 Příklad importu měřeného čidla PT1000 referenčního čidla PT100**

Další zajímavou funkcí je „**Autopredicted sensor type**“. Tato funkce pracuje na pozadí a v případě, že máme daný snímač přidáný v databázi, dokáže predikovat typ měřeného snímače.

Aktuálně jsou v databázi tyto snímače:

- PT100
- PT1000
- NTC 10K
- TCK J
- TCK K
- TCK E
- TCK N

Každý snímač v databázi má přiřazený vlastní polynom pro přepočtení teploty. Hodnota neznámého čidla se pro každý změřený bod přepočte na teplotu podle polynomů všech databázových čidel. Poté se tato vypočtená teplota pro každý bod v cyklu porovnává s naměřenou teplotou etalonem. Pokud je rozdíl těchto teplot nižší než 2 °C, funkce inkrementuje čítač počtu shod daného databázového snímače.

Po přepočítání a porovnání všech dat jsou výsledkem hodnoty čítačů jednotlivých čidel v databázi obsahující počet shod při přepočtu. Čítač, který má nejvíce shod je s největší pravděpodobností čítač čidla, které je aplikací měřeno. Tento údaj je následně zobrazen uživateli. Pokud hodnoty jednotlivých čítačů nenabýly při porovnání alespoň 2 shod, funkce vyhodnotí měřený snímač jako neznámý.

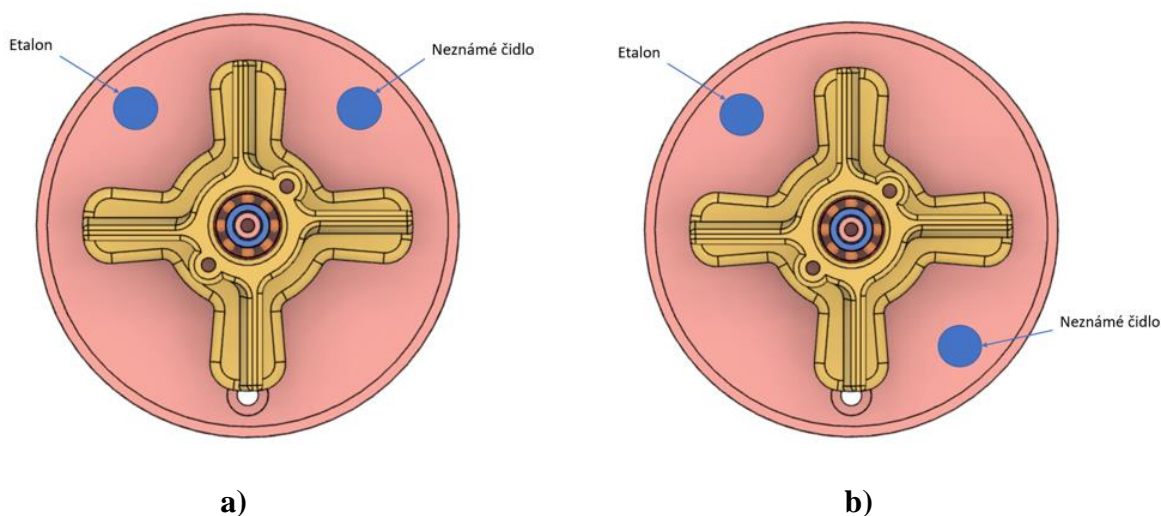


## 11 Výsledky měření

### 11.1 Vliv míchání na teplotní homogenitu

Jednou z funkcí, která by mohla ovlivnit homogenitu teploty oleje je jeho míchání. Provedl jsem tedy celkem 4 testy, kde jsem použil dvě totožná čidla PT1000, která jsem vyhodnocoval stejným způsobem, tím pádem můžeme zanedbat minimální rozdíly těchto čidel.

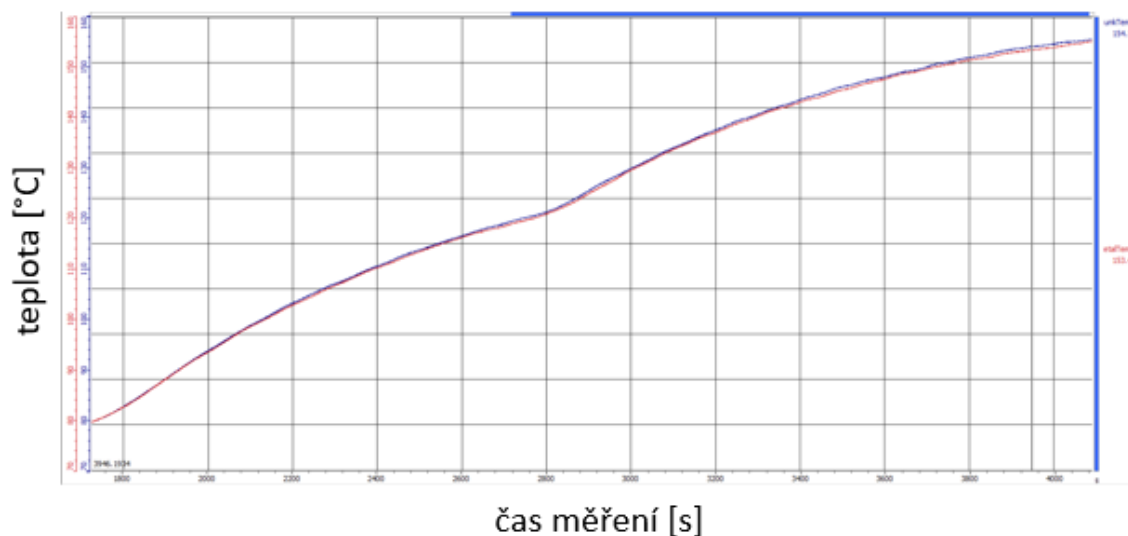
Blokové schéma rozmístění čidel můžeme vidět na obrázku 11.1.



Obr. 11.1 Blokové schéma rozmístění snímačů – a) vedle sebe, b) diagonálně

Většinou se rozdíly teplot projevovaly až při teplotách nad 100 °C, tudíž si nebudeme zobrazovat celý průběh teploty, ale pouze intervaly od přibližně 80 °C do 150 °C. Jednotlivé grafy jsou zobrazeny ve stejném měřítku.

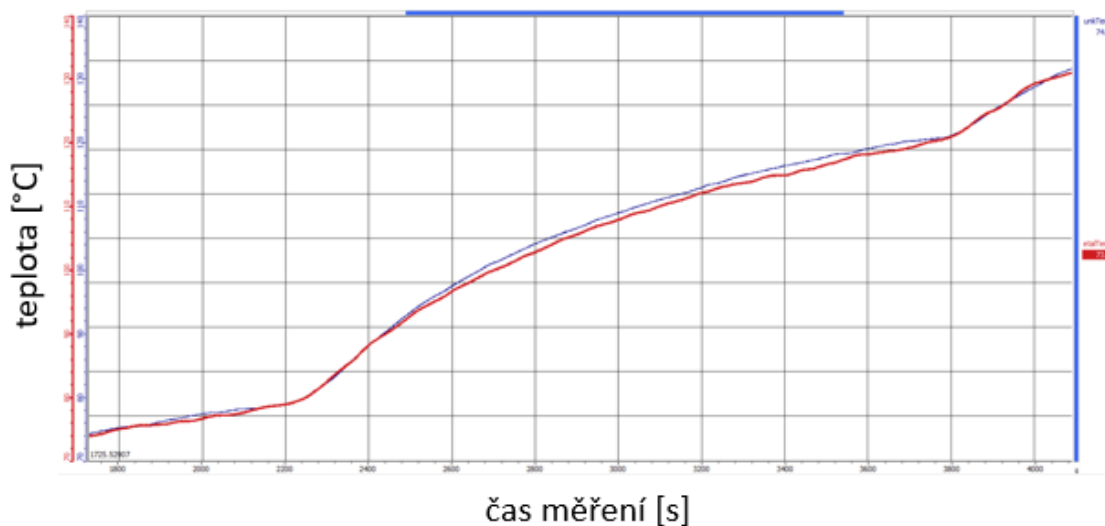
## Test 1 – Snímače vedle sebe se zapnutým mícháním



Obr. 11.2 Test homogenity – zapnuté míchání a snímače vedle sebe

Jak je z obrázku 11.2 patrné, teplotní rozdíly obou čidel byly minimální, přičemž se teploty začaly rozcházet až při 120 °C o řádově 0,5 °C.

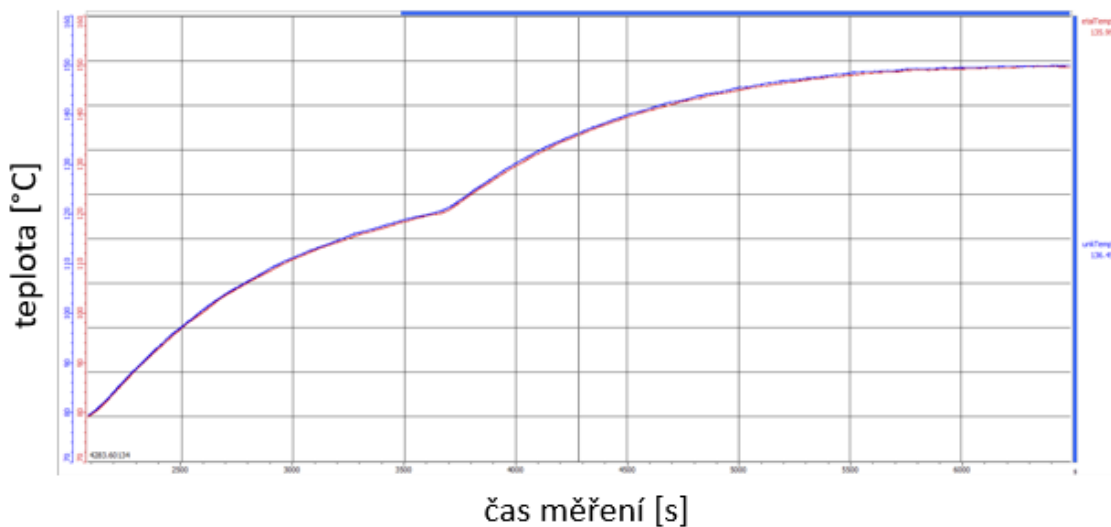
## Test 2 – Snímače vedle sebe s vypnutým mícháním



Obr. 11.3 Test homogenity – vypnuté míchání a snímače vedle sebe

Při vypnutém míchání, jak je vidět na obrázku 11.3, že rozdíl teplot dosahuje 1-1,5 °C a zároveň má křivka jiný průběh než na obrázku 11.2. Je zde zřetelně vidět změna regulace při 80 °C a 120 °C. Křivka je méně lineární než při předchozím testu.

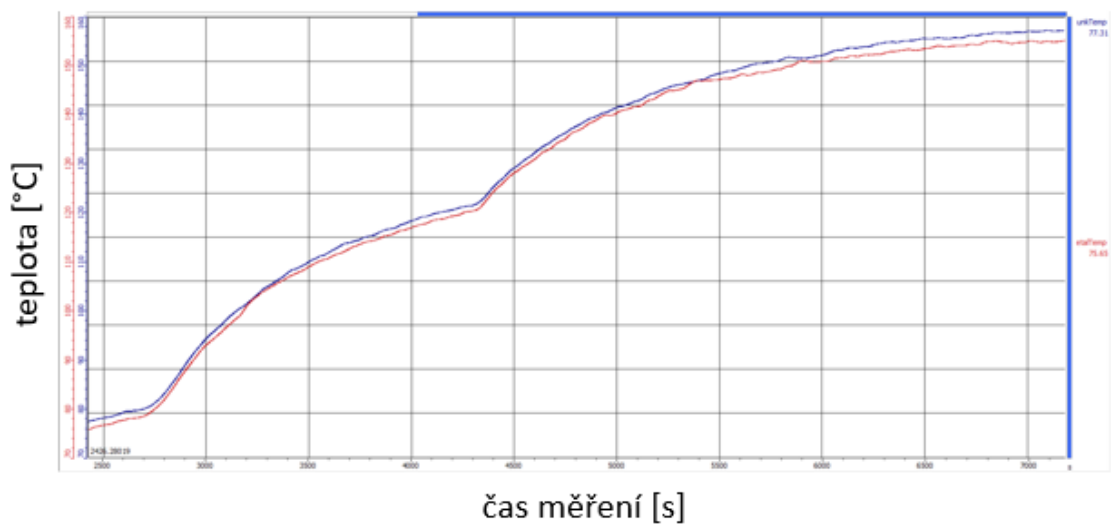
### Test 3 – Snímače diagonálně proti sobě se zapnutým mícháním



Obr. 11.4 Test homogenity – zapnuté míchání a snímače diagonálně proti sobě

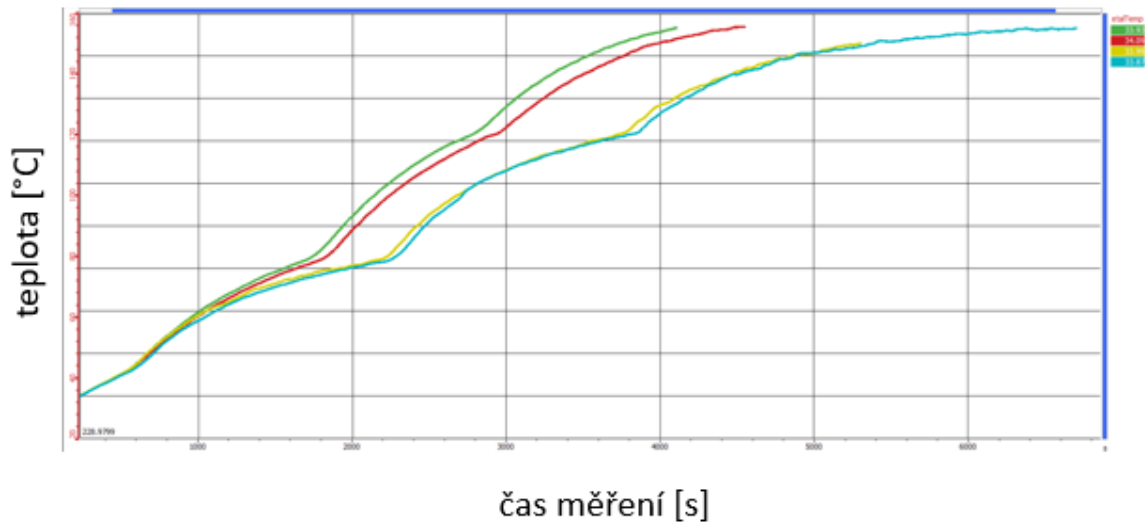
Výsledek tohoto testu je obdobný jako u testu 1. Rozdíl teplot dosahuje max 0,5 °C.

### Test 4 – Snímače diagonálně proti sobě s vypnutým mícháním



Obr. 11.5 Test homogenity – vypnuté míchání a snímače diagonálně proti sobě

Jak je vidět na obrázku 11.5, tato situace je ze všech nejhorší. Nejenže je rozdíl teplot ztelný v celém zobrazeném průběhu, ale i samotná křivka je značně nelineární.



**Obr. 11.6 Průběh teplot jednotlivých testů**

**(Zelená – Test 1, Žlutá – Test 2, Červená – Test 3, Modrá – Test 4)**

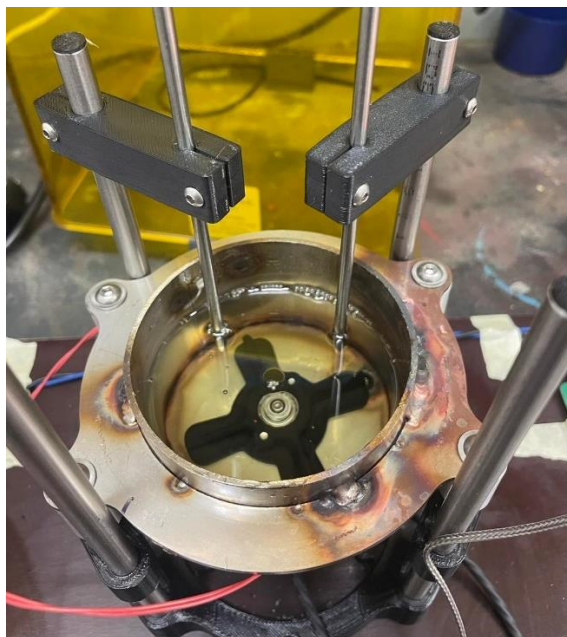
Z uvedených testů a obrázku 11.6 můžeme vidět, že míchání má zásadní vliv na průběh a homogenitu teploty. Bez míchání se značně snižuje linearita nárůstu teploty. Zároveň se zdatelně prodlužuje doba, za kterou se olej v okolí čidla ohřeje na požadovanou teplotu, což by v této aplikaci bylo zajisté přínosem, protože bychom měli mnohem více dat. Jelikož se ale bez míchání zvětšuje chyba měření kvůli rozdílu teplot jednotlivých čidel, je pro nás daleko přínosnější olej míchat i za cenu kratší doby regulace a menšího počtu dat. Poloha snímače v míchané olejové lázni neovlivňuje výsledné měření.

## 11.2 Reálné měření

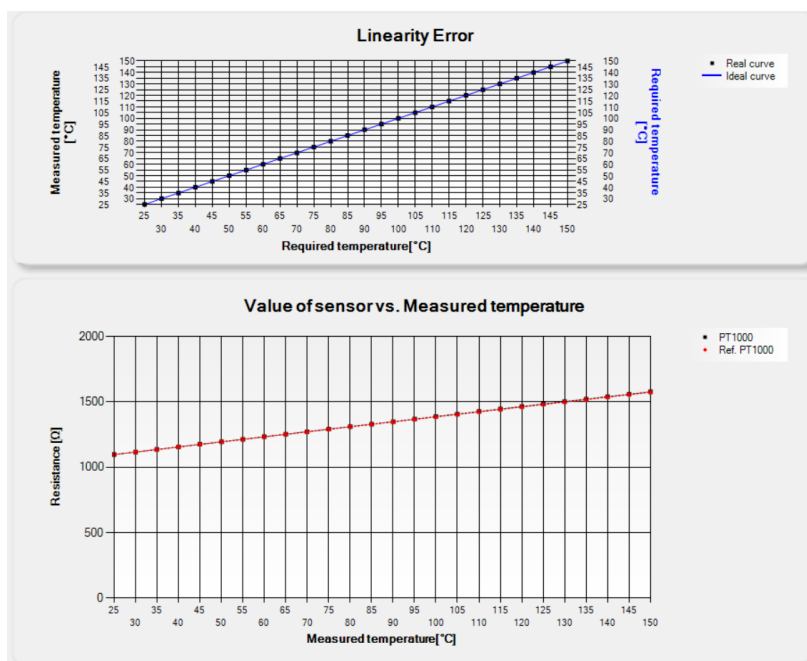
Po sestavení celé aplikace jsem naměřil celkem 6 snímačů a jejich výsledky si zobrazil v aplikaci.

### Snímač PT1000

Jedná se o totožný snímač jako snímač etalonový. Vzájemná poloha a výsledek měření můžeme vidět na obrázcích 11.7, 11.8 a tabulce 11.1.



Obr. 11.7 Vzájemná poloha etalonu a snímače PT1000



Obr. 11.8 Výsledek měření čidla PT1000 pomocí aplikace

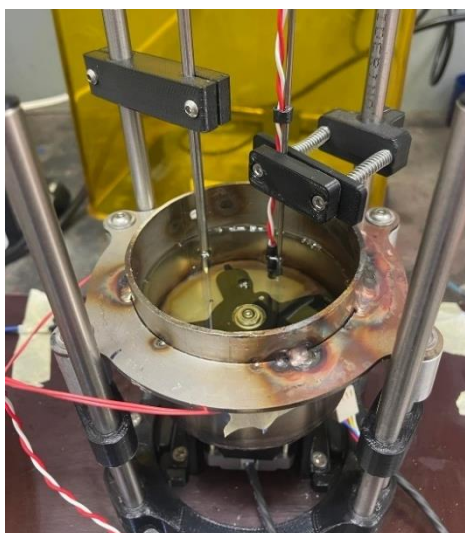
Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Resistance of PT1000 [Ω]	Ref. PT1000 [Ω]
25	25.01	1097.59	1097.37878
30	29.99	1116.79	1116.68226
35	34.94	1136.01	1135.84092
40	40.02	1156.09	1155.47422
45	44.98	1175.49	1174.61388
50	50.04	1194.91	1194.111
55	55.01	1213.97	1213.23244
60	59.98	1233.64	1232.32522
65	64.99	1252.63	1251.54267
70	69.97	1272.2	1270.61716
75	75.01	1291.89	1289.89121
80	80.03	1310.47	1309.06045
85	85.02	1329.67	1328.0852
90	90.04	1348.46	1347.19616
95	95.03	1367.91	1366.16394
100	99.98	1387.19	1384.95114
105	104.99	1406.63	1403.93713
110	110.03	1425.74	1423.00743
115	115.03	1445.06	1441.89822
120	120.01	1463.87	1460.68369
125	125.01	1483.06	1479.51663
130	129.99	1501.97	1498.24541
135	134.99	1520.32	1517.02047
145	145	1557.64	1554.521
150	149.99	1576.5	1573.17165

**Tab. 11.1** Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla PT1000 pomocí aplikace

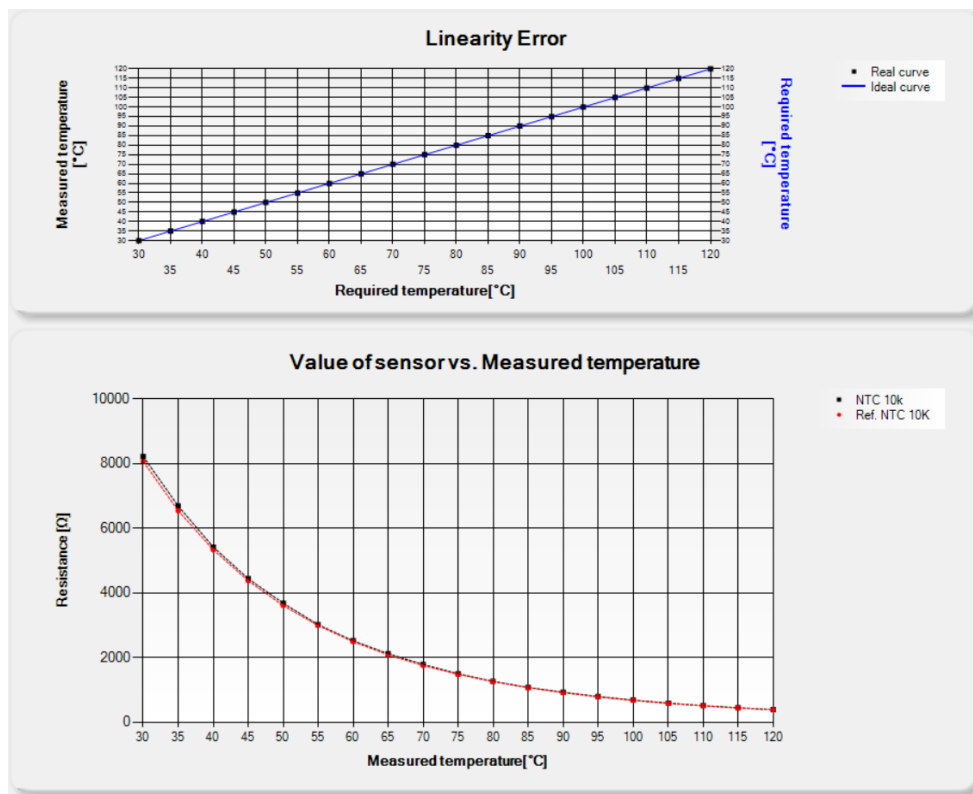
Ze spodního grafu na obrázku 11.8 a obrázku 11.9 můžeme pozorovat rozdíly velikostí odporů (max.  $3\Omega$ ) mezi těmito dvěma čidly, což odpovídá teplotnímu rozdílu  $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$

### Snímač NTC 10K

Měřený snímač je termistor s nominálním odporem  $10000\ \Omega$ . Výsledky jsou zobrazeny níže. Vzhledem k faktu, že jsem čidlo izoloval smršťovací bužírkou s teplotním rozsahem do  $125\text{ }^{\circ}\text{C}$ , rozhodl jsem se provést měření pouze do  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Obr. 11.9** Vzájemná poloha etalonu a NTC 10K



Obr. 11.10 Výsledek měření čidla NTC 10K pomocí aplikace

Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Resistance of NTC 10k [Ω]	Ref. NTC 10K [Ω]
30	30	8212,5	8060
35	35	6682,36	6536
40	40,01	5415,32	5329,9
45	45	4438,27	4374
50	50	3681,11	3607
55	54,96	3022,97	2994,52
60	59,99	2520,32	2491,92
65	65	2120,84	2085
70	70	1790,75	1753
75	75,01	1500,14	1480,52
80	79,95	1270,5	1258,1
85	85	1080,21	1070
90	90	932,4	915
95	94,98	798,97	785,5
100	99,99	688,83	677,2
105	105,04	596,4	584,36
110	109,99	517,83	508,14
115	114,98	451,67	442,24
120	119,99	395,33	386,11

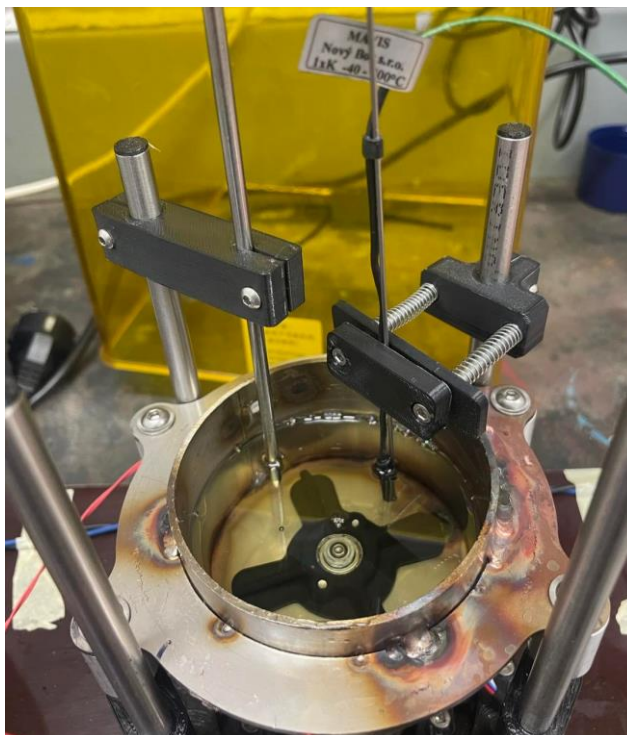
Tab. 11.2 Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla NTC 10K pomocí aplikace

Jak je vidět na obrázku 11.10 a tabulce 11.2, na začátku měření je rozdíl hodnot odporů měřeného a referenčního čidla téměř 100 Ω (při převodu na teplotu se jedná o rozdíl 0,8 °C). Tento rozdíl se snižuje se vzrůstající teplotou. Při 120 °C je přepočtený teplotní rozdíl mezi čidly 0,5 °C

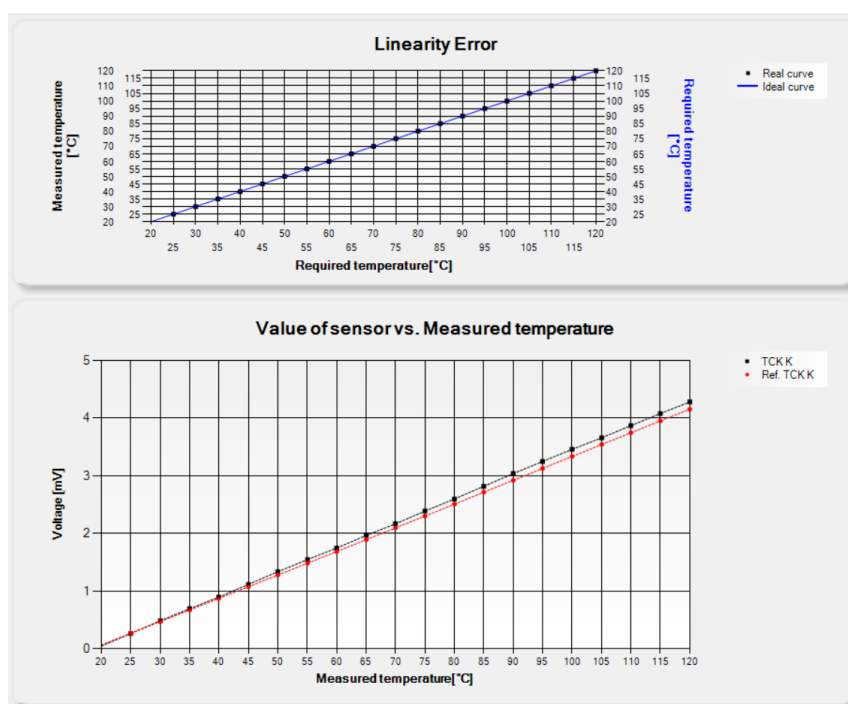


## Snímač TCK typ K

Tento typ snímače je také zaizolovaný smršťovací bužírkou, měření tedy opět probíhá do 120 °C.



Obr. 11.11 Vzájemná poloha etalonu a NTC 10K



Obr. 11.12 Výsledek měření čidla TCK typ K pomocí aplikace



Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Voltage of TCK K [mV]	Ref. TCK K [mV]
20	19,99	0,05	0,0714
25	25,01	0,27	0,27349
30	30,02	0,49	0,4762
35	35,01	0,7	0,6766
40	39,96	0,9	0,87695
45	45	1,12	1,0794
50	49,99	1,34	1,28213
55	55,04	1,55	1,48777
60	60	1,75	1,69031
65	65,03	1,97	1,89531
70	69,99	2,17	2,09928
75	75	2,39	2,30462
80	80,01	2,6	2,51121
85	85	2,82	2,71734
90	90	3,04	2,92334
95	94,98	3,25	3,12856
100	100,01	3,46	3,33656
105	105,04	3,66	3,54388
110	110	3,87	3,74568
115	114,99	4,08	3,95314
120	119,99	4,28	4,1544

**Tab. 11.3** Tabulka hodnot měřeného a referenčního čidla TCK typ K pomocí aplikace

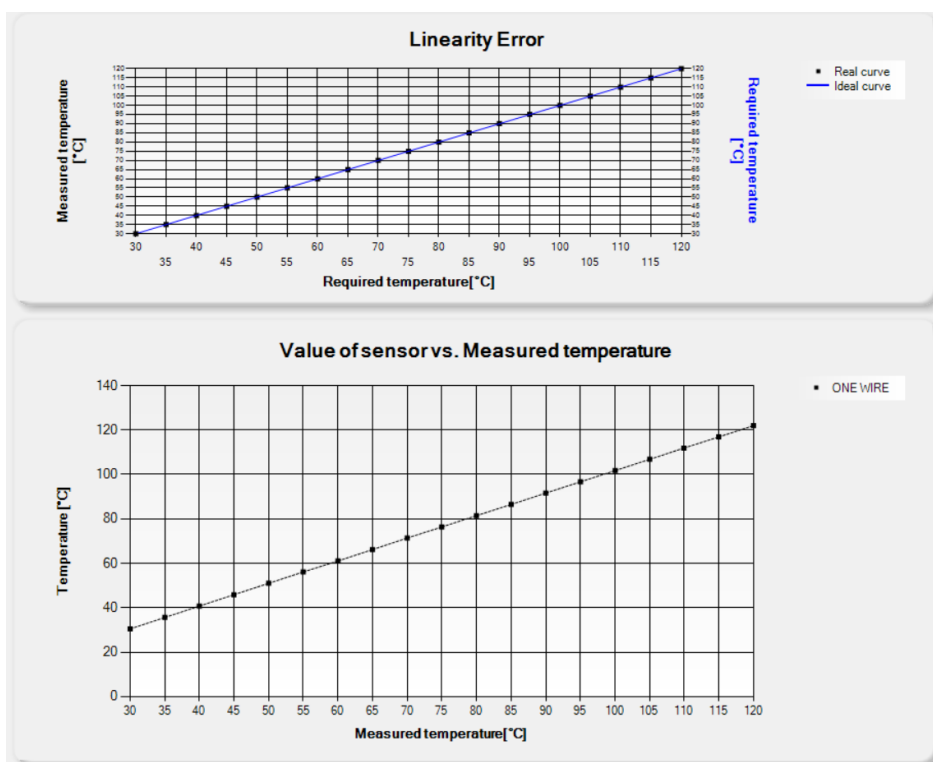
V tabulce 11.3 a na obrázku 11.14 můžeme vidět, že rozdíl napětí měřeného a referenčního termočláčku se ve vyšších teplotách zvětšuje. Při teplotě 120 °C se jedná o rozdíl teplot 2-3 °C.

## Snímač OneWire DS18B20

Tento snímač má provozní teplotu do 125 °C, měření jsem tedy provedl do 120 °C.



Obr. 11.13 Vzájemná poloha etalonu a DS18B20



Obr. 11.14 Výsledek měření čidla DS18B20 pomocí aplikace

Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Temperature of ONE WIRE [°C]
30	30,01	30,5
35	35	35,63
40	39,99	40,75
45	44,98	45,88
50	50	51
55	55	56,13
60	60,01	61,06
65	64,99	66,19
70	70	71,37
75	75	76,37
80	79,99	81,44
85	85,02	86,5
90	90,01	91,62
95	95,03	96,69
100	100,03	101,75
105	105,02	106,81
110	109,95	111,87
115	114,98	116,87
120	120	122

**Tab. 11.4** Tabulka hodnot měřeného čidla DS18B20 pomocí aplikace

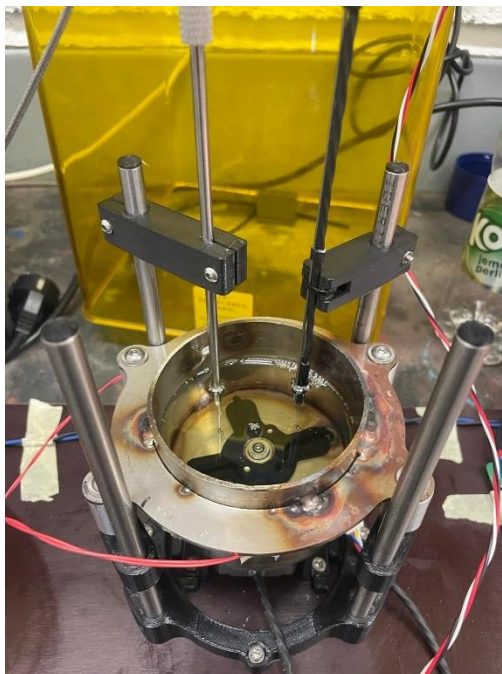
Obrázek 11.14 je zde spíše pro ilustraci, protože nemáme v databázi čidlo k porovnání. Zajímavější je tabulka 11.4, ze které zjistíme, že maximální rozdíl teplot je při 120 °C a to 2 °C, který je v porovnání s katalogovým listem v toleranci dané výrobcem.

Thermometer Error	t <sub>ERR</sub>	-10°C to +85°C	(Note 3)	±0.5	°C
		-30°C to +100°C		±1	
		-55°C to +125°C		±2	

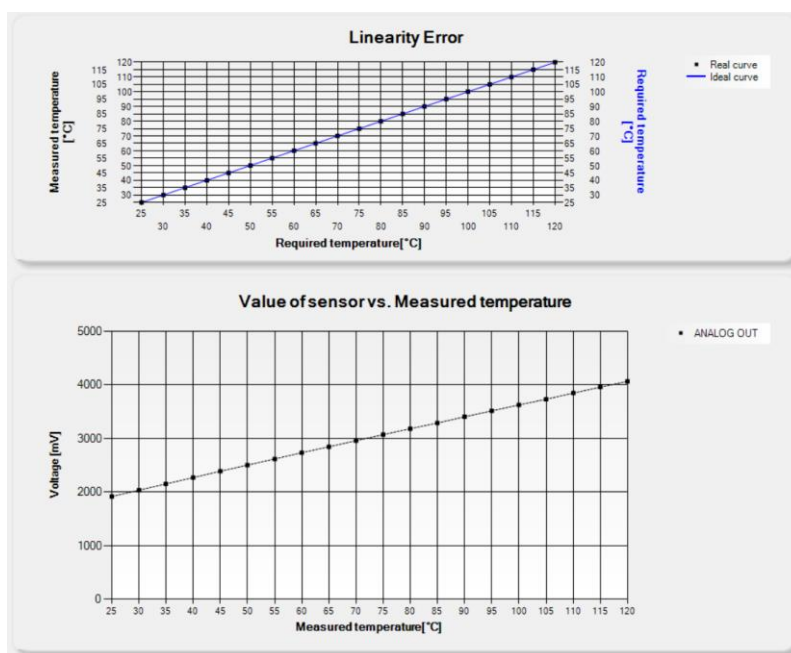
**Obr. 11.15** Tolerance DS18B20 [13]

## Snímač AD22100 s ratiometrickým výstupem

Výstupem tohoto snímače je analogová hodnota v rozsahu 0,25 – 4,75V, při teplotním rozsahu -50 °C až 150 °C. Tyto informace použijeme při porovnávání výsledků. Měření bylo opět provedeno do 120 °C.



Obr. 11.16 Vzájemná poloha etalonu a AD22100

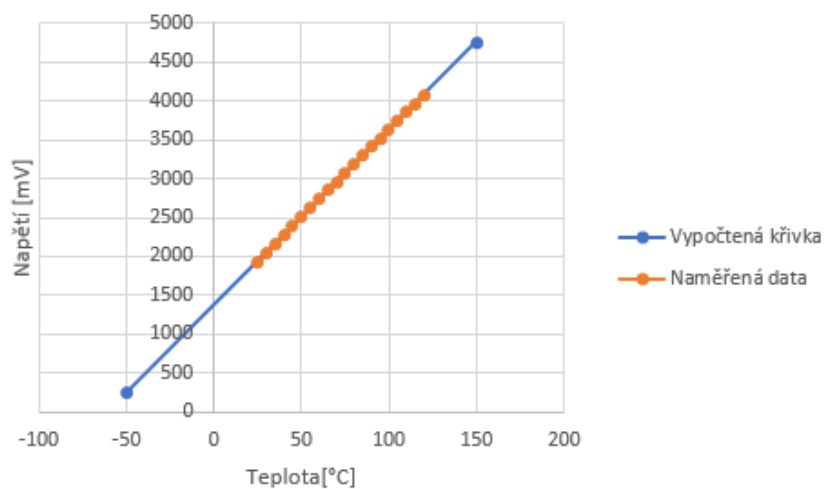


Obr. 11.17 Výsledek měření AD22100 pomocí aplikace

Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Voltage of ANALOG OUT [mV]
25	25,01	1920
30	30,02	2039
35	34,96	2155
40	39,99	2273
45	45,01	2392
50	49,98	2505
55	55,02	2621
60	60	2737
65	64,99	2848
70	70,01	2961
75	75,01	3074
80	79,99	3185
85	84,97	3290
90	90	3406
95	95	3517
100	100	3627
105	105,01	3733
110	110,03	3849
115	115	3959
120	120	4067

**Tab. 11.5** Tabulka hodnot měřeného AD22100 pomocí aplikace

Z poznatku o rozsahu napětí a teploty tohoto analogového čidla jsme schopni vytvořit přímku představující průběh napětí v závislosti na měřené teplotě a z ní dopočítat teplotu snímače.



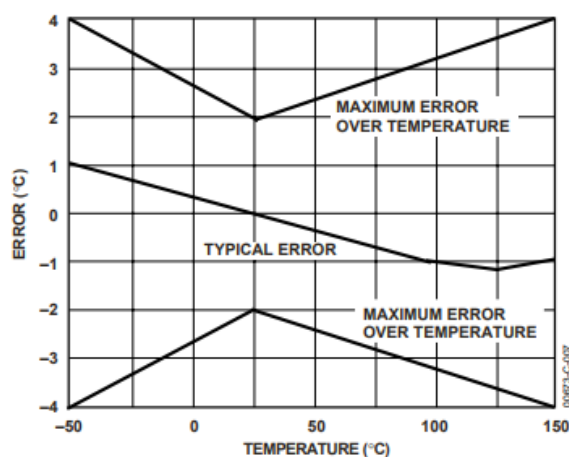
**Obr. 11.18** Výsledek měření AD22100 čidla

Napětí na snímači [mV]	Změřená teplota [°C]	Vypočtená teplota [°C]
1920	25,01	24,825
2039	30,02	29,4206
2155	34,96	34,571
2273	39,99	39,8102
2392	45,01	45,0938
2505	49,98	50,111
2621	55,02	55,2614
2737	60	60,4118
2848	64,99	65,3402
2961	70,01	70,3574
3074	75,01	75,3746
3185	79,99	80,303
3290	84,97	84,965
3406	90	90,1154
3517	95	95,0438
3627	100	99,9278
3733	105,01	104,6342
3849	110,03	109,7846
3959	115	114,6686
4067	120	119,4638

Tab. 11.6 Tabulka porovnání změřených a vypočtených hodnoty snímače AD22100

Z výsledků je patrné, že teplota analogového snímače se neliší od vypočtené teploty o více než 0,5 °C.

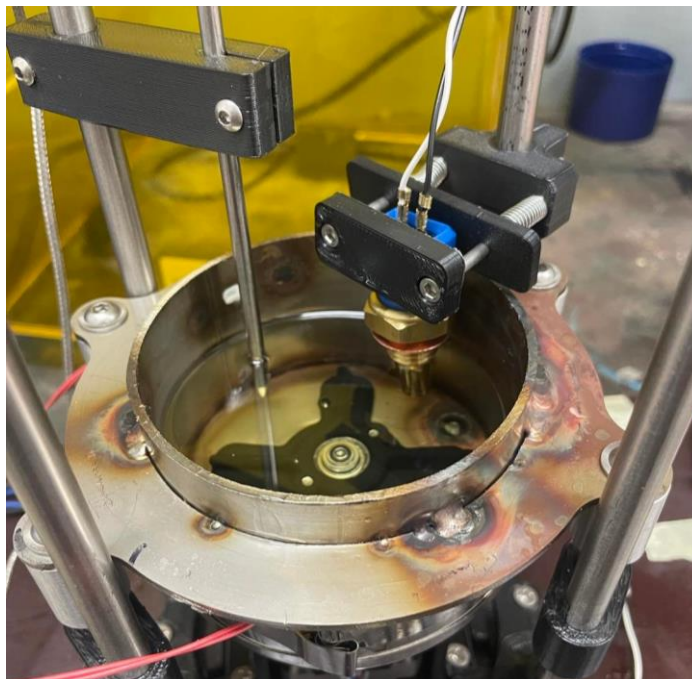
Na obrázku 11.19 můžeme vidět, že v měřeném teplotním rozsahu výsledky nepřesahují chybu danou výrobcem.



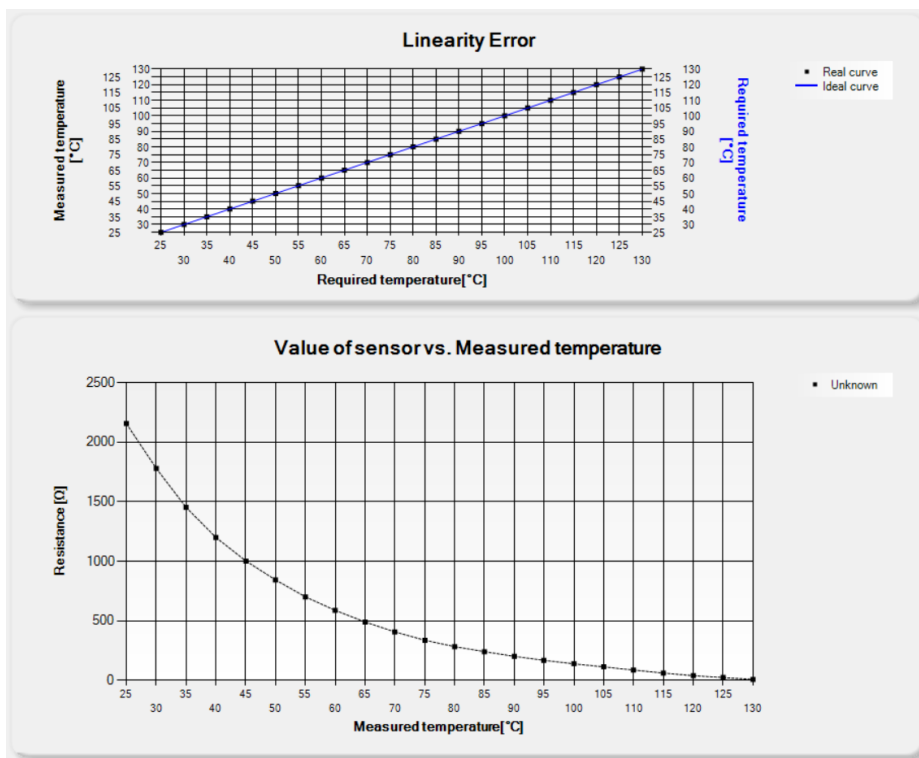
Obr. 11.19 Tolerance AD22100 [14]

## Neznámý automobilový snímač

Při posledním měření byl využit neznámý automobilový snímač, který se při kontrolním měření mu jevil jako snímač NTC. Provedl jsem tedy celé měření až do teploty 130 °C.



Obr. 11.20 Vzájemná poloha etalonu a neznámého NTC čidla



Obr. 11.21 Výsledek měření neznámého NTC čidla pomocí aplikace

Required temperature [°C]	Measured temperature [°C]	Resistance of Unknown [Ω]
25	25	2155,34
30	30,02	1778,85
35	35	1453,38
40	40,01	1200,2
45	45,04	1002,56
50	49,99	844,7
55	55,01	702,28
60	59,99	589,18
65	65,03	490,97
70	69,99	408,29
75	75,04	338,02
80	80,03	284,59
85	85,01	242,62
90	90,02	203,13
95	94,96	170,11
100	100	140,6
105	105	114,92
110	109,98	88,31
115	114,98	63,19
120	120,03	41,02
125	125	26,07
130	130	9,08

**Tab. 11.7** Tabulka hodnot měřeného neznámého NTC čidla pomocí aplikace

Dle naměřených se pravděpodobně jedná o snímač NTC 2,252K, který funkce autopredikce nedokázala odhalit, což je zřejmé, protože v databázi tento typ snímače není implementován. Při porovnání dat s tabulkou NTC snímače 2,252K se naměřené hodnoty neliší o více než 1 °C. Můžeme tedy říct, že se opravdu jedná o snímač NTC 2,252K.

## Shrnutí

Výsledky měření jednotlivých snímačů se ve většině případů shodují s hodnotami referenčních čidel v rámci svých tolerancí. Občasné chyby přesahující toleranci čidel jsou dány součtem vlastní chyby snímače, rozdílem teplot vlivem homogenity a chybou etalonového snímače.



## 12 Finální sestava

Po testování zbývalo vše zkompletovat a vytvořit uživatelské rozhraní na displeji. Kód je koncipován tak, aby byla obsluha co nejjednodušší.

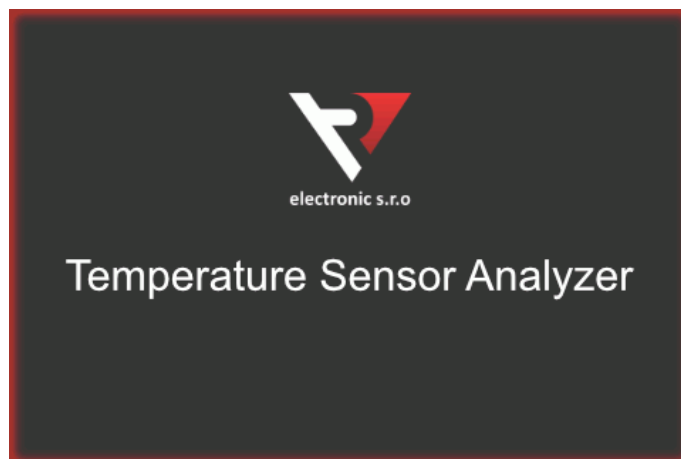
### 12.1 Stavba firmwaru a uživatelského rozhraní

V setup funkci programu se inicializují všechny potřebné periferie jako převodníky LTC2984, MCP3301, SD karta, UART, Čítač pro nastavení PWM a některé proměnné potřebné pro běh programu. Zároveň se povolí přerušení, která umožní využít čítače na pozadí.

V loop funkci je základem celého programu stavový automat, který běží ve smyčce s periodou 50ms. Tento automat má několik case bloků, které jsou rozděleny podle fáze programu, ve kterém se měřicí soustava nachází:

- úvodní obrazovka,
- nastavení počáteční teploty,
- nastavení konečné teploty,
- nastavení kroku měření,
- průběh měření,
- indikace dokončeného měření,
- indikace přerušného měření,
- indikace stisknutí Emergency STOP tlačítka,
- indikace horkého oleje,
- indikace nepřípojeného snímače

Každý blok má svůj příslušný obraz na displeji.



Obr. 12.1 Úvodní obrazovka

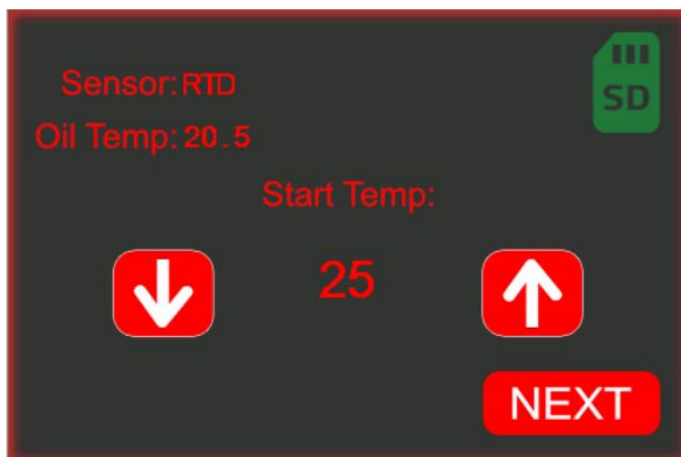
Po inicializaci všech periférií se úvodní obrazovka přepne do nastavení počáteční teploty.

Bloky pro nastavení počáteční teploty, koncové teploty a kroku měření jsou si podobné. Šipkami si uživatel navolí požadovaný parametr a tlačítkem „NEXT“, popř. „BACK“ se přesune v nastavení. Stav připojení karty je barevně indikován v pravém horním rohu.

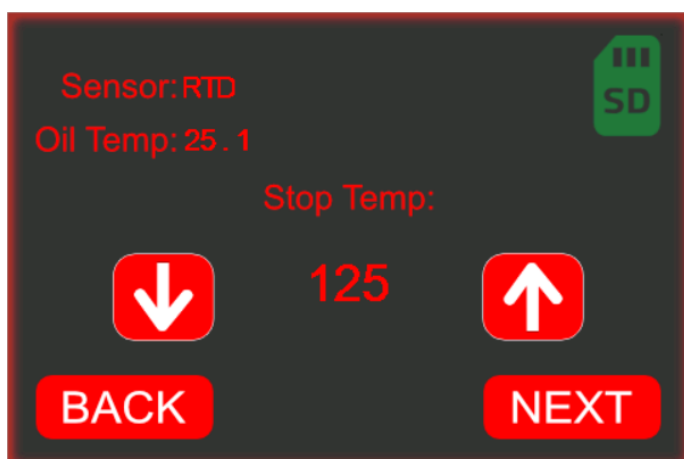
Při samotném nastavování je pro každou nastavovanou proměnnou určená dolní, horní mez a krok, o který se proměnná změní stiskem šipek. Všechny tyto hranice jsou definované v knihovně Def.h. V této knihovně jsou také definovaná makra pro inicializaci proměnných při startu programu.

Při nastavování počáteční teploty nám program nedovolí nastavit hodnotu nižší, než je aktuální teplota oleje.

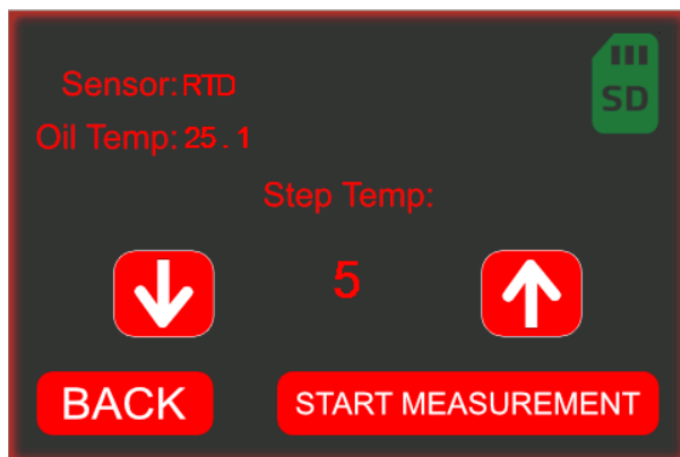
Na obrázcích 12.2, 12.3 a 12.4 můžeme vidět jednotlivé náhledy obrazovek.



Obr. 12.2 Nastavení počáteční teploty měření



Obr. 12.3 Nastavení koncové teploty měření



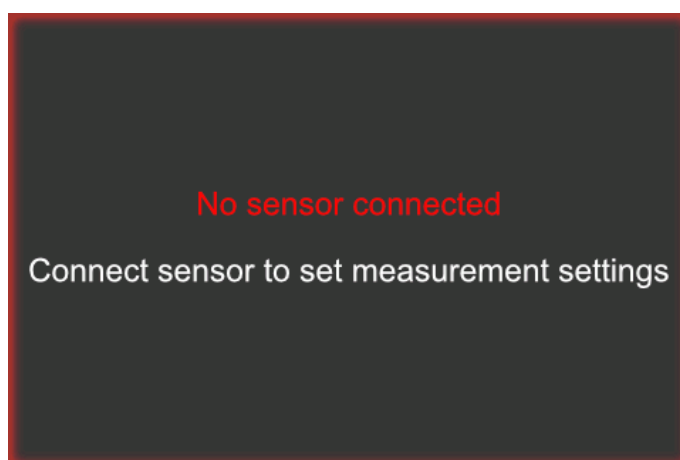
Obr. 12.4 Nastavení měřicího kroku

Pro spuštění měření musí být splněno několik podmínek:

- vložená SD karta,
- připojený neznámý snímač.

Pokud není jedna z těchto podmínek splněna, program se nespustí.

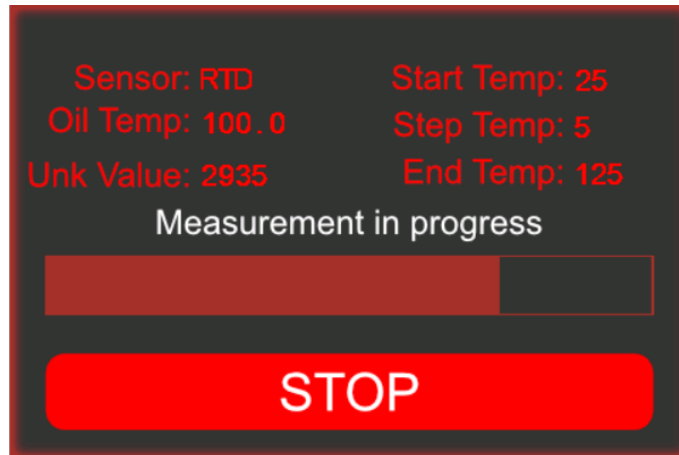
Ve chvíli, kdy není připojen snímač, program na displeji zobrazí chybovou hlášku:



Obr. 12.5 Chybová hláška nepřipojeného snímače

Po opětovném připojení neznámého snímače se displej přepne do prvního okna pro nastavení počáteční teploty.

Při splnění všech podmínek pro start měření se po stisku tlačítka „START MEASUREMENT“ program přepne do metodiky měření a obrazovka displeje se změní následovně.

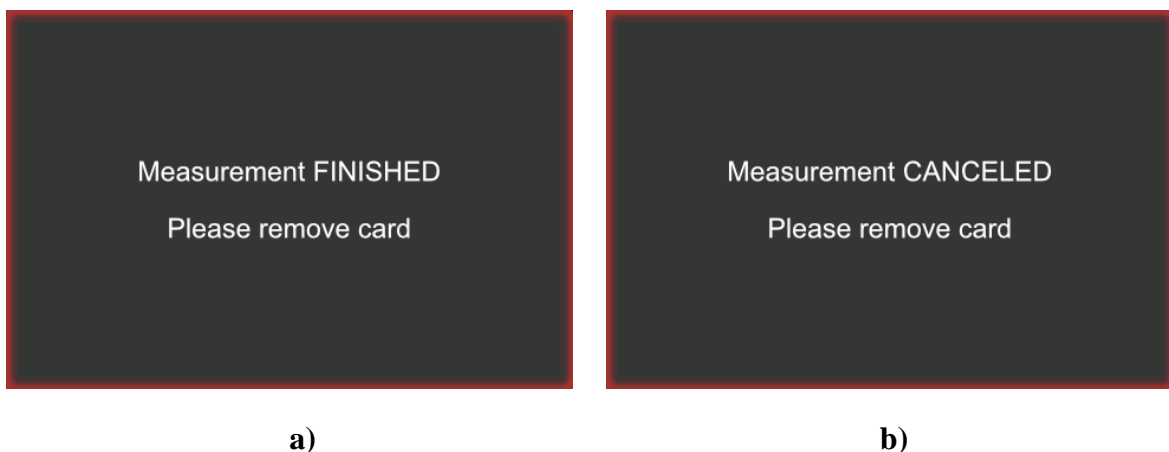


**Obr. 12.6** Náhled okna průběhu měření

Na obrazovce můžeme vidět pomocí bar grafu procentuální průběh měření. Dále zde můžeme vidět nastavené parametry a údaje o snímačích, které jsou vzorkovány na frekvenci 1 Hz. Měření probíhá pomocí metodiky zmíněné v kapitole 12.2 a lze jej ukončit třemi způsoby:

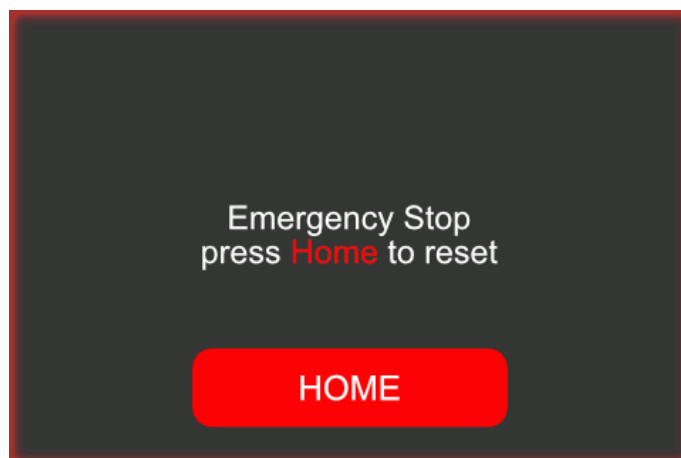
- Teplota oleje dosáhne koncové teploty
- Uživatel stiskne STOP tlačítko na displeji
- Uživatel stiskne Emergency STOP

V prvních dvou případech je uživateli zobrazeno okno s požadavkem na vysunutí karty, liší se pouze informací o tom, zda bylo měření dokončeno nebo přerušeno.



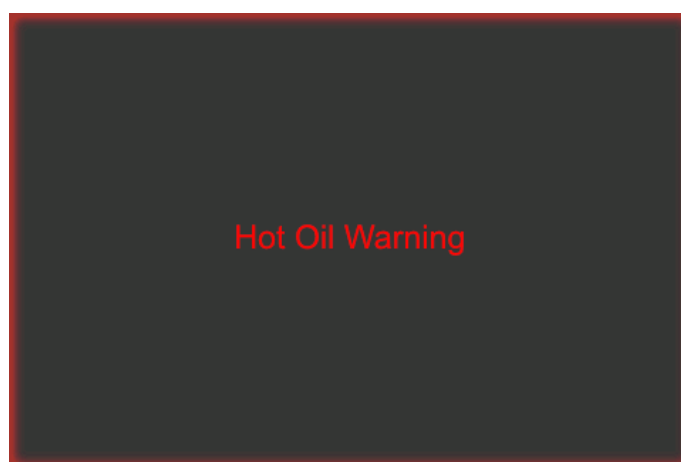
**Obr. 12.7** Náhled okna a) dokončeného měření, b) přerušného měření

Pokud uživatel stiskne Emergency STOP, zobrazí se následující okno s požadavky. Po stisku tlačítka „HOME“ se program přepne do nastavení počáteční teploty měření.



**Obr. 12.8** Náhled Emergency STOP

Další informačním oknem které se zobrazí je okno upozorňující na vysokou teplotu oleje. Mezní teplota, při kterém se okno zobrazí je definovaná v knihovně Def.h, aktuálně na hodnotu 60 °C.



**Obr. 12.9** Varovné okno vysoké teploty oleje

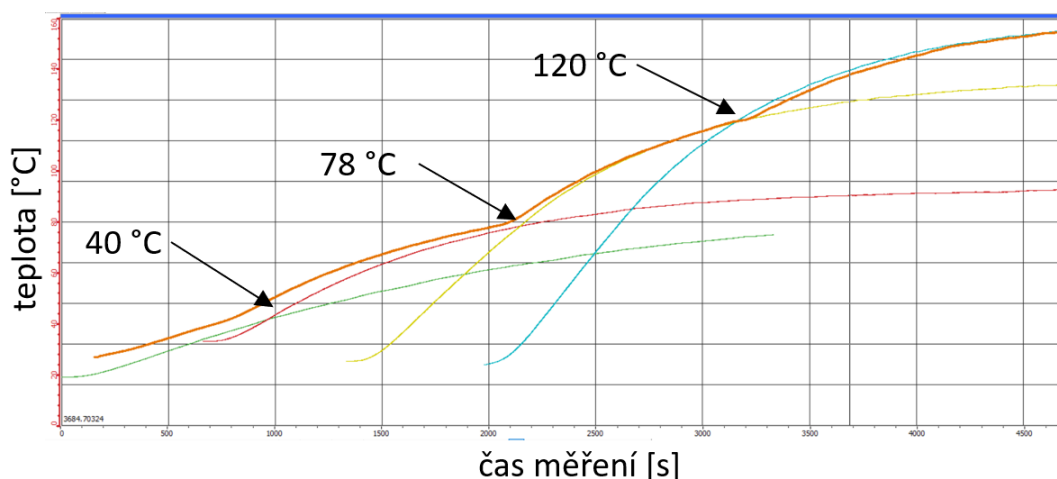
## 12.2 Metodika měření

Vzhledem k požadovanému účelu měření automobilových čidel během krátké doby (aktuálně 80 min) se využila metoda rampy, při které v ideálním případě roste teplota lineárně. Pro přesnější dlouhodobé měření by bylo vhodné využít PID metodu s regulací v bodě.

Regulace topného tělesa se přepíná mezi 4 hladinami PWM, přepínání probíhá při překročení dané teplotní hladiny oleje:

- 40 °C – změna PWM z 10 % na 20 %,
- 78 °C – změna PWM z 20 % na 30 %,
- 120 °C – změna PWM z 30 % na 40 %.

Teplotní hladiny oleje byly vybrány z výsledků měření přechodových charakteristik pro střidu PWM signálu 10, 20, 30 a 40 %, viz obrázek 12.1, na kterém je vidět, že metoda přepínání kopíruje přechodové charakteristiky jednotlivých stříd.



Obr. 12.10 Přechodové charakteristiky (zelená – 10 %, červená – 20 %, žlutá – 30 %, modrá – 40 %, oranžová – metoda přepínání hladin)

Pokud dosáhne teplota oleje požadované koncové teploty, PWM výstup se vypne.

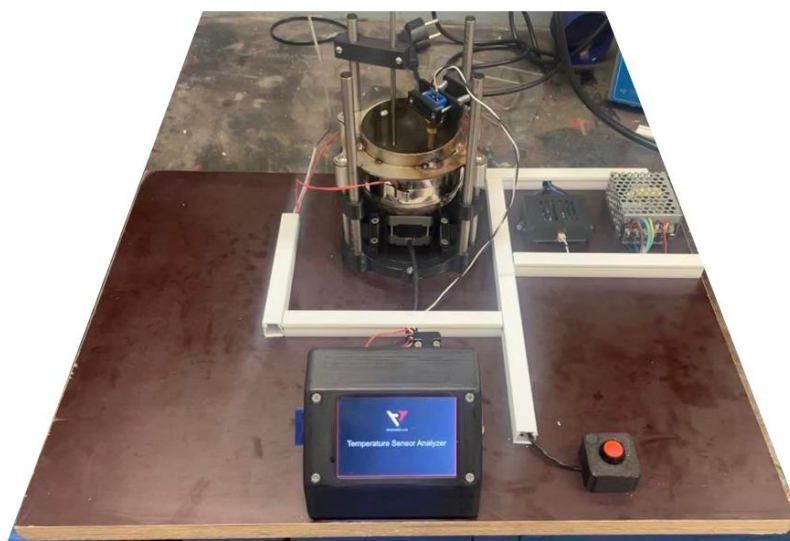
Kvůli bezpečnosti je definována maximální teplota topného tělesa snímaná ochrannými senzory. Pokud topné těleso překročí tuto teplotu, PWM výstup se vypne a opět se zapne na požadovanou PWM až ve chvíli, kdy jsou teploty obou ochranných čidel pod maximální povolenou teplotou topného tělesa.

### 12.3 Výsledný vzhled zařízení

Po úspěšném odladění programu zbývalo elektroniku zakrýt do casingu, který je vytisknut na 3D tiskárně. Byly vytvořeny 3 komponenty do kterých je elektronika schována:

- Casing pro řídicí elektroniku a displej,
- Casing pro zdroj a výkonový stupeň,
- Casing pro Emergency STOP tlačítko.

Na zadní straně casingu pro řídicí elektroniku jsou standardní konektory řady D-SUB pro připojení snímačů, Emergency STOP tlačítka a výkonového stupně se zdrojem. Tyto komponenty jsou následně propojeny kabeláží, která je schovaná do elektroinstalačních lišt.



Obr. 12.11 Finální sestava

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo zhotovit analyzátor odporových čidel, jehož hlavním požadavkem bylo změřit neznámé odporové čidlo a vykreslit jeho charakteristiku v aplikaci na počítači.

Teoretická část se v prvních šesti kapitolách zabývá metodami měření a druhy teplotních čidel, které se nejčastěji vyskytují v průmyslové oblasti.

Praktická část zahrnuje vlastní návrh analyzátoru teplotních čidel, kdy bylo nutné nejdříve navrhnout celý koncept měřícího řetězce. Je zde podrobně popsána řídicí elektronika a výkonový stupeň. Obě tyto komponenty jsou vyrobeny ve formě desky plošných spojů. Dále byla navržena nádoba s míchacím mechanismem, v níž se o bezkontaktní přenos točivé síly starají neodmagnetizované magnety. Díky tomuto mechanismu jsme schopni pomocí krokového motoru míchat s olejem. Celá soustava byla doplněna dotykovým displejem pro snadnou obsluhu uživatelem. Pro vizualizaci dat na počítači byla naprogramována aplikace v jazyce C#.

Na konci práce je uvedena série měření, která testovala vliv míchání na teplotní homogenitu oleje v nádobě. Dále jsou zde uvedeny výsledky měření několika typických teplotních čidel jako jsou odporová čidla, termočlánky aj. V neposlední řadě je uveden test neznámého automobilového teplotního čidla.

Budoucí rozšíření práce spatřuji zejména v oblasti úpravy firmwaru řídicí jednotky, ve které chci zobrazovat více chybových stavů, které mohou nastat. Tím chci dosáhnout vyšší ochrany analyzátoru a uživatele při neočekávané poruše. Také bych rád zlinearizoval průběh teplotní rampy zjemněním kroku PWM střídavy. Mým plánem v budoucnu je i rozšíření aplikace na počítači. Chtěl bych přidat export dat do souboru typu PDF a zobrazení dalších důležitých hodnot jako je např. chyba měření.

Finální představa celé měřící soustavy je kovový box, který by analyzátor udělal kompaktnější a lépe přenosný. Zároveň by ochránil uživatele před možností dotyku horkých částí soustavy a předešlo by se i úniku odpařovaných par a mastnoty do okolí.



## Literatura

- [1] KREIDL, Marcel. *Měření teploty - senzory a měřicí obvody*. 1. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] Bimetalový teploměr. In: *MAR Systems* [online]. 2019 [cit. 2022-04-16]. Dostupné z: <https://www.marsystems.cz/levne-bimetalove-teplomery>
- [3] PT1000 ThinFilm. In: *Farnell* [online]. [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: [https://cz.farnell.com/labfacility/dm-504/sensor-pt1000-thin-film-1-0-x/dp/2081263?gclid=Cj0KCQjw0umSBhDrARIsAH7FCod\\_RO5Bf3oWirPyAowRxeqL7U1wNOEbVs5w74JuBvcgvzblHOhSGIMaAtIcEALw\\_wcB&mckv=\\_dc|pcrid|581375953418|plid||keyword||match||slid||product|2081263|pgrid|133535039415|ptaid|pla-363010435644|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-SMART&gross\\_price=true](https://cz.farnell.com/labfacility/dm-504/sensor-pt1000-thin-film-1-0-x/dp/2081263?gclid=Cj0KCQjw0umSBhDrARIsAH7FCod_RO5Bf3oWirPyAowRxeqL7U1wNOEbVs5w74JuBvcgvzblHOhSGIMaAtIcEALw_wcB&mckv=_dc|pcrid|581375953418|plid||keyword||match||slid||product|2081263|pgrid|133535039415|ptaid|pla-363010435644|&CMP=KNC-GCZ-GEN-SHOPPING-SMART&gross_price=true)
- [4] BEDNÁŘ, Zdeněk. *Analýza vlastností soustavy peltierových článků*. Praha, 2016. Dostupné také z: [https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64755/F3-BP-2016-Bednar-Zdenek-%5bAnalýza\\_vlastnosti\\_soustavy\\_Peltierovych\\_clanku%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64755/F3-BP-2016-Bednar-Zdenek-%5bAnalýza_vlastnosti_soustavy_Peltierovych_clanku%5d.pdf?sequence=1&isAllowed=y). Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Ing. Lubor Jirásek, CSc.
- [5] Atmega4809. In: *Microchip.com* [online]. 2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.microchip.com/en-us/product/ATMEGA4809>
- [6] Arduino Nano Every. In: *Laskakit.cz* [online]. 2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.laskakit.cz/arduino-nano-every--original/>
- [7] MAX31865. In: *Maxim Integrated* [online]. 2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.maximintegrated.com/en/products/interface/sensor-interface/MAX31865.html#tech-docs>
- [8] LTC2984. In: *Analog Devices* [online]. 2022 [cit. 2022-04-17]. Dostupné z: <https://www.analog.com/en/products/ltc2984.html#product-overview>
- [9] Optotriak MOC3061. In: *Onsemi* [online]. 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.onsemi.com/pdf/datasheet/moc3163m-d.pdf>
- [10] Triak BTA24-600B. In: *TME* [online]. 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/Document/5f3a010eb428e7b4b0b8851610683b5a/bta24.pdf>

- [11] Topné těleso. In: *Hadex* [online]. 2022 [cit. 2022-04-18]. Dostupné z: <https://hadex.cz/p664b-topne-teleso-250w-pro-pajeci-lazne-zb-80/>
- [12] Schéma A4988. In: *Pololu* [online]. 2022 [cit. 2022-05-09]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1182>
- [13] DS18B20. In: *Maxim Integrated* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/DS18B20.pdf>
- [14] AD22100. In: *Analog Devices* [online]. 2022 [cit. 2022-05-10]. Dostupné z: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD22100.pdf>

## **Seznam Příloh**

Příloha A – Návrh obvodu řídicí jednotky

Příloha B – Návrh obvodu s měničem a stabilizátorem napětí

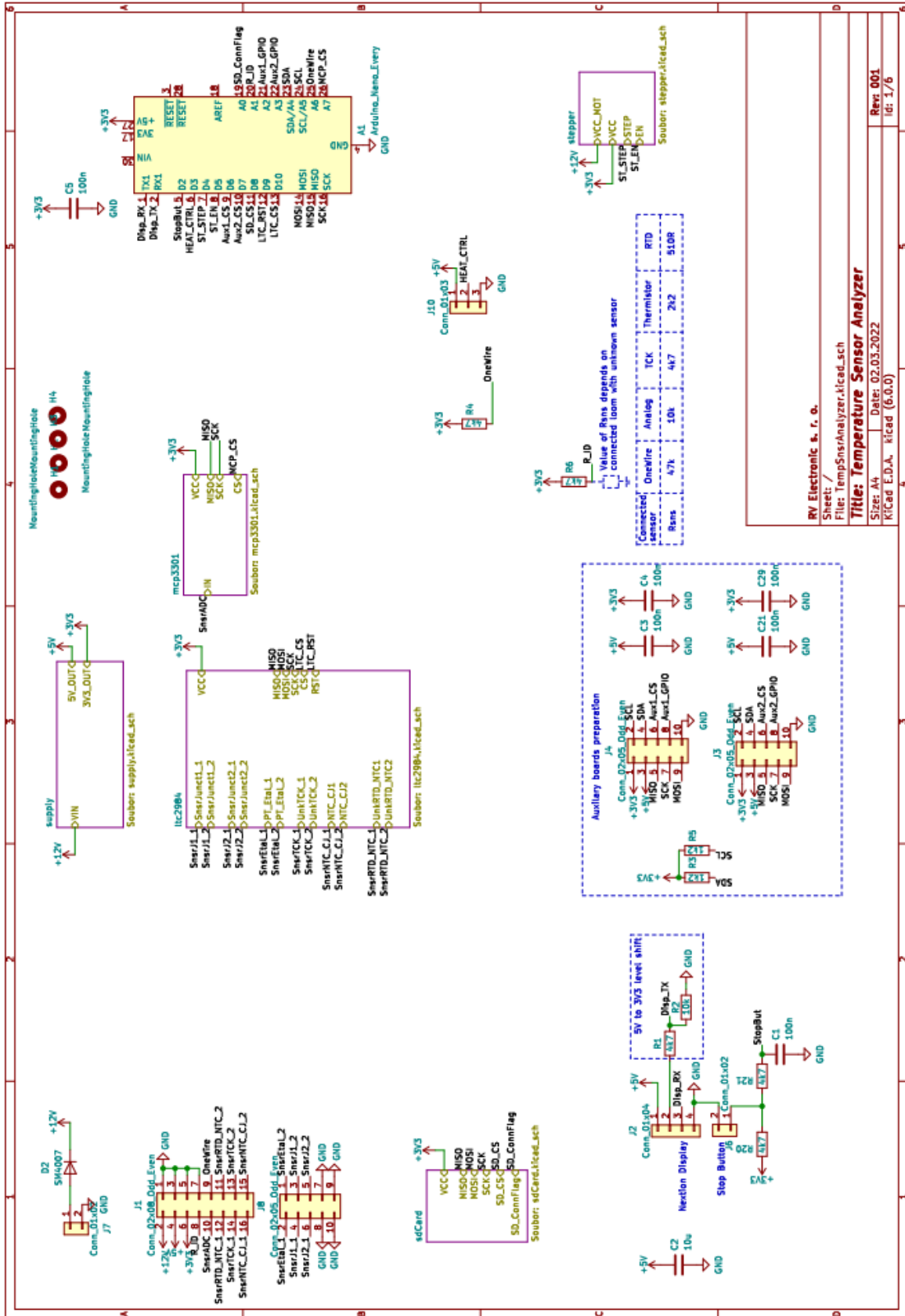
Příloha C – Návrh obvodu převodníku LTC2984

Příloha D – Návrh obvodu A/D převodníku MCP3301

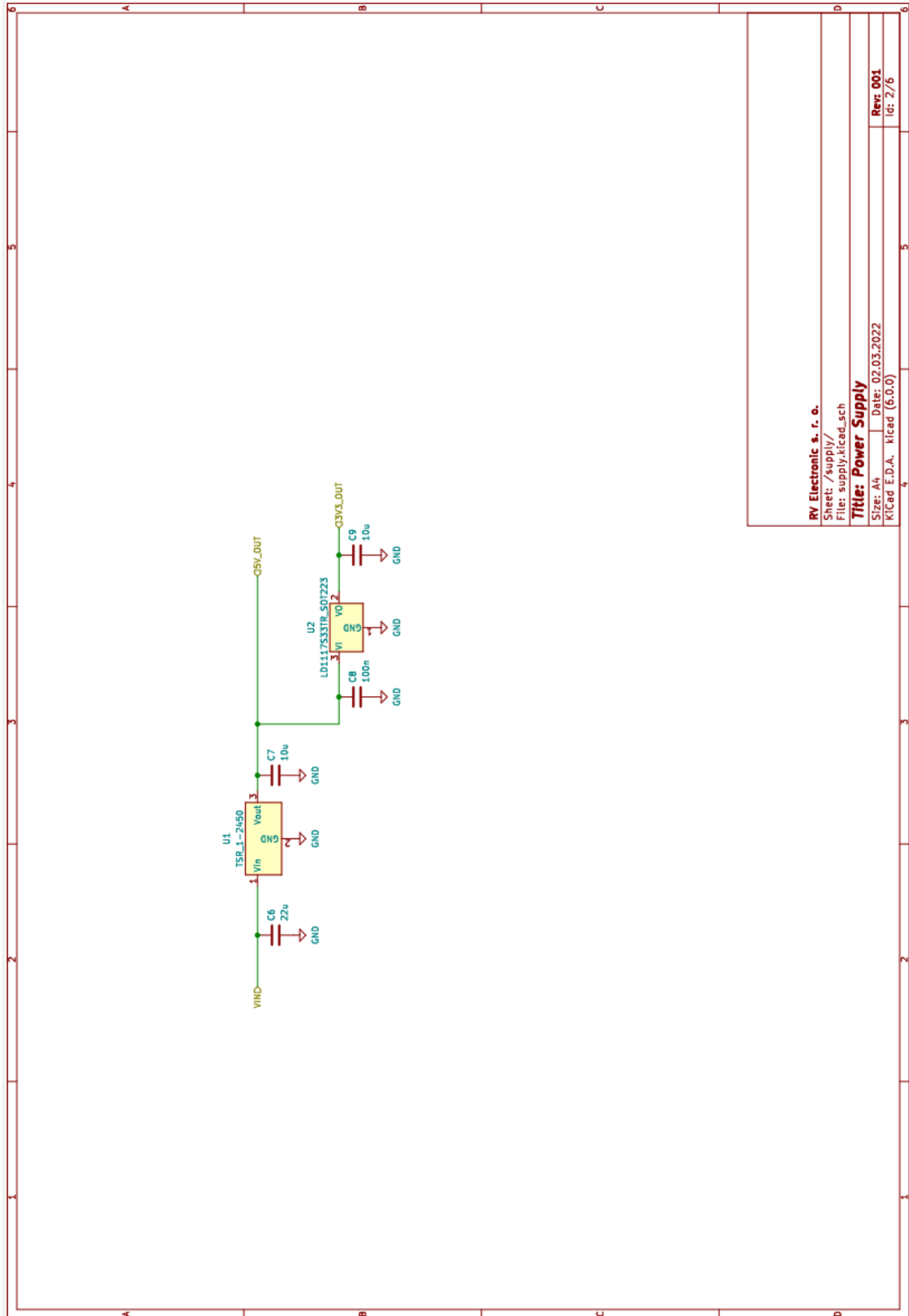
Příloha E – Návrh obvodu driveru krokového motoru

Příloha F – Návrh obvodu konektorů pro SD kartu

# Příloha A – Návrh obvodu řídicí jednotky



## Príloha B - Návrh obvodu s měničem a stabilizátorem napětí



RV Electronic s. r. o.

Sheet: /supply/

File: supply.kicad\_sch

Title: Power Supply

Size: A4

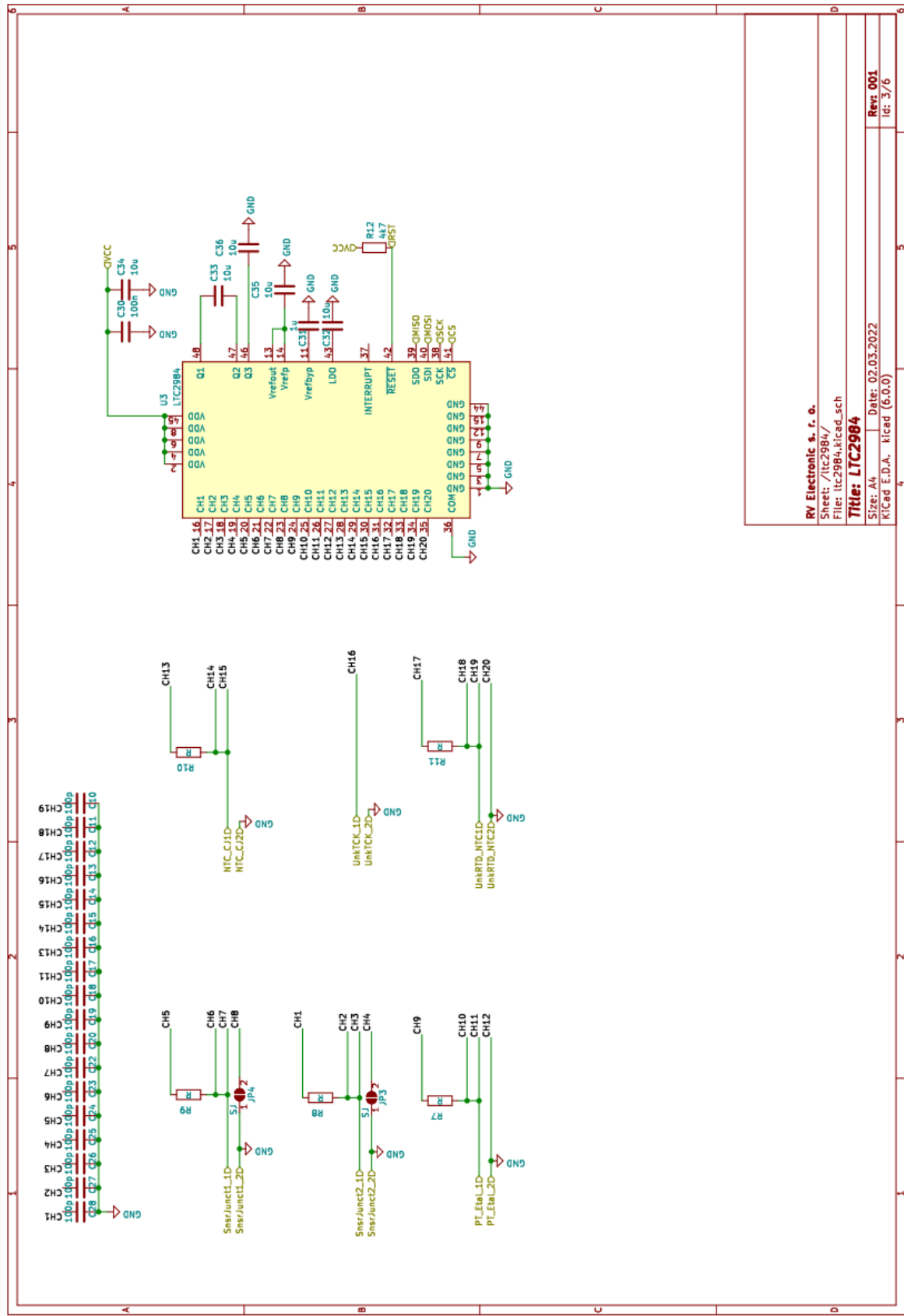
Date: 02.03.2022

Rev: 001

KiCad E.D.A. kicad (6.0.0)

Id: 2/6

# Příloha C - Návrh obvodu převodníku LTC984



RY Electronic s. r. o.

Sheet: /ltc2984/

File: ltc2984.kicad\_sch

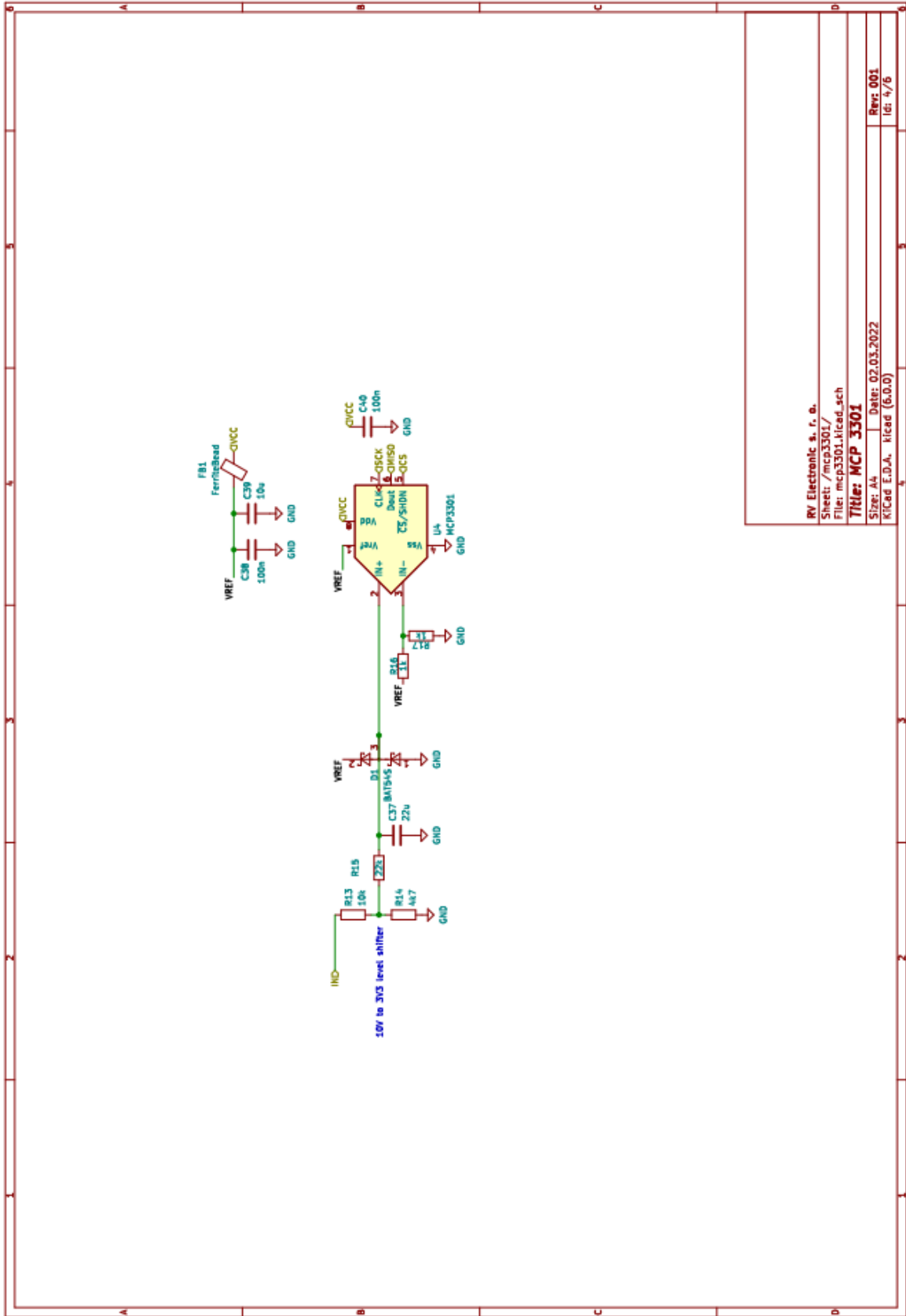
Title: LTC2984

Size: A4 Date: 02.03.2022

KiCad E.D.A. KiCad (6.0.0)

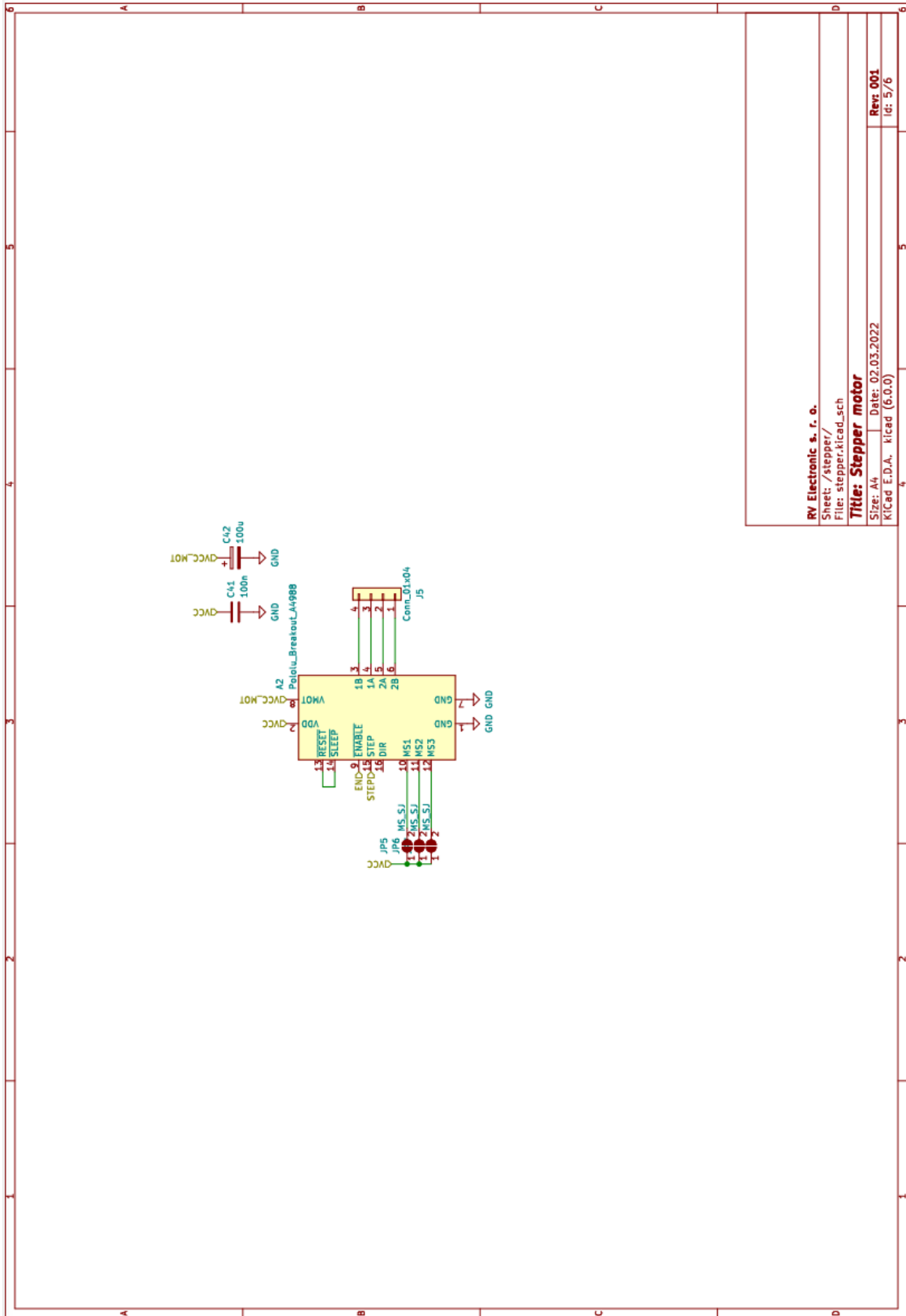
Rev: 001  
fig: 3/6

# Příloha D - Návrh obvodu A/D převodníku MCP3301



RV Electronic s. r. o.  
 Sheet: /mcp3301/  
 File: mcp3301.kicad\_sch  
**Title: MCP 3301**  
 Size: A4 Date: 02.03.2022  
 KICad E.D.A. Kicad (6.0.0) Rev: 001  
 Id: 4/6

## Příloha E – Návrh obvodu driveru krokového motoru



RV Electronic s. r. o.

Sheet: /stepper/

File: stepper.kicad\_sch

**Title: Stepper motor**

Size: A4 Date: 02.03.2022

KiCad E.D.A. kicad (6.0.0)

Rev. 001

Id: 5/6



