

Systém sběru dat pro laboratorní úlohu na měření teploty bezdotykovým způsobem

Maxmilián Macháč

Bakalářská práce
2024



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav automatizace a řídicí techniky

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Maxmilián Macháč**
Osobní číslo: **A20757**
Studijní program: **B0714A150006 Aplikovaná informatika v průmyslové automatizaci**
Specializace: **Průmyslová automatizace**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Systém sběru dat pro laboratorní úlohu na měření teploty bezdotykovým způsobem**
Téma práce anglicky: **Data Acquisition System for Non-Contact Temperature Measurement Laboratory Tasks**

Zásady pro vypracování

1. Seznamte se s konstrukcí stávající laboratorní úlohy na měření teploty bezdotykovým způsobem a odstraňte případné nedostatky.
2. Nastudujte a popište principy měření použitých senzorů, popište současné možnosti řešení sběru naměřených dat v rámci dané úlohy.
3. Na základě získaných poznatků navrhňte a realizujte vhodný systém na sběr a monitorování naměřených dat.
4. Naměřená data zpracujte a vizualizujte pro výukové účely, tj. vypracování protokolu z měření.
5. Zpracujte vzorový protokol, a to včetně návodu pro ovládání systému.
6. Zhodnoťte Vámi zrealizovaný systém jako celek a navrhňte jeho další případné vylepšení.

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. FRADEN, Jacob. *Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications*. Fifth edition. Cham: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-19302-1.
2. HRUŠKA, František. *Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití (e-book)*. 2. rozš. vyd. Ve Zlíně: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2011, [202] s. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné také z: <http://hdl.handle.net/10563/18582>.
3. BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické řízení*. Praha: BEN – technická literatura, 2003. ISBN 80-7300-020-2.
4. DERENZO, Stephen E. *Practical interfacing in the laboratory: using a pc for instrumentation, data analysis, and control*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003, xvii, 610 s. ISBN 0521815274.
5. ANGUS, Robert B. a E. Thomas HULBERT. *VEE Pro: practical graphical programming*. London: Springer-Verlag, 2005. ISBN 1-85233-870-9.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Petr Skočík, Ph.D.**
Ústav elektroniky a měření

Datum zadání bakalářské práce: **8. prosince 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2024**

doc. Ing. Jiří Vojtěšek, Ph.D. v.r.
děkan



prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 8. prosince 2023

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen připouští-li tak licenční smlouva uzavřená mezi mnou a Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně s tím, že vyrovnání případného přiměřeného příspěvku na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše) bude rovněž předmětem této licenční smlouvy;
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

Ve Zlíně, dne

.....
podpis studenta

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce je zaměřena na návrh a realizaci systému sběru dat pro laboratorní úlohu zaměřenou na bezdotykové měření teploty, která je součástí laboratorních cvičení předmětu Senzory. Teoretická část práce se věnuje principům měření teploty pomocí použitých senzorů a vysvětluje základní pojmy související s touto problematikou. Praktická část popisuje aktuální stav laboratorní úlohy a navrhuje nezbytnou modernizaci, včetně implementace systému sběru dat. Dále se tato část věnuje návrhu a realizaci samotného systému sběru dat. Součástí práce je také praktické ověření funkčnosti modernizované úlohy. Kromě toho zahrnuje i úpravu stávajícího zadání úlohy a vytvoření ukázkového protokolu.

Klíčová slova: Teplota, Měření teploty, Senzory teploty, Bezdotykové měření, Sběr dat, Vee Pro

ABSTRACT

This bachelor's thesis focuses on the design and implementation of a data acquisition system for a laboratory task aimed at contactless temperature measurement, which is part of the Sensors course laboratory exercises. The theoretical part of the thesis addresses the principles of temperature measurement using the employed sensors and explains the basic concepts related to this topic. The practical part describes the current state of the laboratory task and proposes necessary modernization, including the implementation of the data acquisition system. Furthermore, this part focuses on the design and realization of the data acquisition system itself. The thesis also includes practical verification of the functionality of the modernized task. Additionally, it encompasses the revision of the existing task assignment and the creation of a sample protocol.

Keywords: Temperature, Temperature Measurement, Temperature Sensors, Contactless Measurement, Data Acquisition, Vee Pro

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Petru Skočíkovi, Ph.D., za jeho odborné vedení, cenné rady a podporu během celé práce na této bakalářské práci. Jeho trpělivost a ochota sdílet své znalosti byly pro mě nesmírně přínosné a motivující. Děkuji za všechny podnětné připomínky a pomoc, která mi umožnila úspěšně dokončit tento projekt.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	7
I TEORETICKÁ ČÁST	8
1 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty	9
1.1 TEPLOTA	9
1.2 TEPLOTNÍ STUPNICE	9
1.3 TEPELNÉ ZÁŘENÍ	11
1.3.1 Černé těleso	11
1.3.2 Planckův vyzařovací zákon.....	13
1.3.3 Wienův posunovací zákon	14
1.3.4 Stefan-Boltzmannův zákon	14
1.3.5 Pohltivost, propustnost, odrazivost	14
2 MĚŘENÍ TEPLoty BEZDOTYKOVÝM ZPŮSOBEM	16
2.1 SENZOR	16
2.2 SENZORY ZÁŘENÍ	17
2.2.1 Základní parametry senzorů zařízení	17
2.2.2 Tepelné detektory	18
Termoelektrické senzory.....	18
Bolometrické senzory	22
Pyroelektrické senzory.....	23
2.2.3 Kvantové senzory	24
II PRAKTICKÁ ČÁST	26
3 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI	27
4 STÁVAJÍCÍ STAV LEBORATONÍ ÚLOHY	28
5 NÁVRH ÚPRAVY LABORATORNÍ ÚLOHY	31
5.1 PID REGULÁTOR	31
5.1.1 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů.....	32
5.2 MIKROPOČÍTAČ	33
6 REALIZACE ÚPRAV LABORATORNÍ ÚLOHY	34
6.1 PID REGULÁTOR DIXELL XT141D 5C2TU.....	34
6.2 ARDUINO UNO - GEEKCREIT ATMEGA328.....	37
6.3 KEYSIGHT VEE PRO	40
6.4 VÝHODY VEE PRO [11]	41
7 REALIZACE SYSTÉMU PRO SBĚR DAT	42
8 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SYSTÉMU PRO SBĚR DAT	47
ZÁVĚR	54
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	56
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	58
SEZNAM OBRÁZKŮ	62
SEZNAM TABULEK	64
SEZNAM PŘÍLOH	65

ÚVOD

Měření teploty je jedním z nejdůležitějších procesů v mnoha průmyslových odvětvích, ale i ve vědeckém výzkumu, zdravotnictví a domácnostech. Přesné a spolehlivé měření teploty je klíčové pro zajištění kvality výrobků, bezpečnosti pracovního prostředí a ochrany lidského zdraví, atd. Tradiční metody měření teploty, jako je kontaktní měření, mají svá omezení a mohou být nevhodné pro některé aplikace, například při příliš vysokých teplotách, nebo u měření teploty pohybujících se těles a také v průmyslových procesech, kde je potřeba měřit teplotu rychle a často .

Cílem této práce je vyvinout moderní a efektivní systém sběru dat, který bude integrován do laboratorních cvičení předmětu Senzory. Implementace tohoto systému má za cíl usnadnit a zefektivnit proces měření teploty pro studenty, eliminovat potřebu ručního zapisování dat a umožnit studentům soustředit se více na analýzu výsledků a pochopení principů bezdotykového měření teploty.

Práce zahrnuje návrh a realizaci hardwarových a softwarových komponent systému, jeho integraci do stávající laboratorní úlohy a praktické ověření jeho funkčnosti. Důležitou součástí je také úprava existujících návodů a vytvoření ukázkového protokolu, který studentům poskytne jasný a strukturovaný návod k provedení měření.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIPY MĚŘENÍ TEPLoty

1.1 Teplota

Teplota je veličina, která charakterizuje stav termodynamické rovnováhy v izolované soustavě. Tento stav znamená, že žádné makroskopické změny neprobíhají mezi tělesy a okolím, a všechny fyzikální veličiny popisující stav soustavy zůstávají konstantní. Termodynamická teplota je klíčovým ukazatelem tohoto stavu a musí být stejná pro všechny části izolované soustavy. Důležité je rozlišovat mezi teplotou a teplem, protože teplota je stavovou veličinou, zatímco teplo je energetickou formou spojenou s pohybem částic v soustavě. Měření teploty probíhá nepřímo prostřednictvím jiných fyzikálních veličin [1].

Teplota patří mezi sedm základních veličin v systému SI. Je vyjádřena v jednotkách nazývaných kelvin. I přesto, že teplota těles může dosahovat zdánlivě libovolných hodnot, existuje definovaná spodní hranice známá jako absolutní nula, která byla zvolena jako nulový bod na Kelvinově stupnici [2].

1.2 Teplotní stupnice

Teplotní stupnice termodynamiky je definována z účinnosti vratného Carnotova cyklu. Účinnost vratných Carnotových cyklů pracujících mezi stejnými teplotami daných zón závisí pouze na těchto teplotách a není ovlivněna teploměrovou látkou. Pro $T_2 > T_1$ platí [1;3]:

$$\eta = \frac{Q_2 - Q_1}{Q_2} = \frac{T_2 - T_1}{T_2} \quad (1)$$

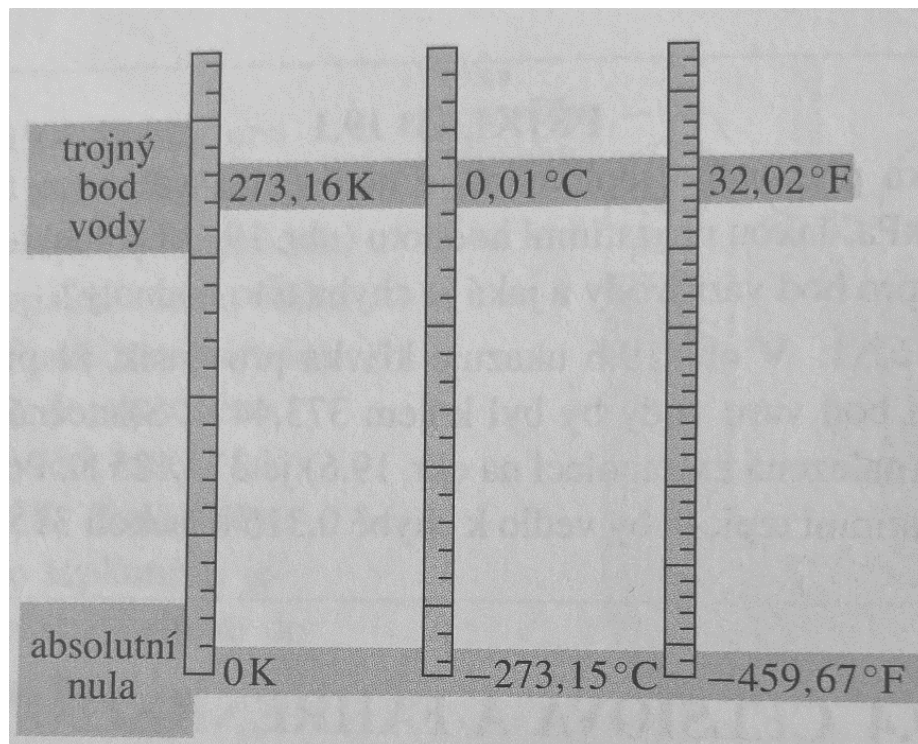
kde

η	je	účinnost cyklu,
T		termodynamická teplota [K],
Q_2		odebrané teplo teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_2 [J],
Q_1		odebrané teplo teploměrovou látkou z lázně s teplotou T_1 [J].

Ze vztahu (1) vyplývá vztah (2) [1;3]:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2)$$

Tento vztah (2) poskytuje termometrickou relaci, která umožňuje vytvořit termodynamickou stupnici. Měření poměru teplot se transformuje do kalorimetrického měření poměru tepla. Volbou základní teploty T_1 rovné teplotě trojného bodu vody a změřením poměru Q_2/Q_1 získáme Celsiovu stupnici, zatímco volbou $T_1 = 0$ získáme Kelvinovu stupnici [1;3]. Srovnání níže uvedených teplotních stupnic je znázorněno na obrázku (Obr. 1).



Obrázek 1. Srovnání Kelvinovy, Celsiovy a Fahrenheitovy stupnice [2]

Kelvinova stupnice

Termodynamická stupnice má svůj počátek u termodynamické absolutní nuly. Základní jednotkou teploty v této stupnici je kelvin (K), který je definován pomocí termodynamické teploty trojného bodu vody. Tento bod, představující rovnovážný stav tří skupenství vody, je zvolen jako referenční a dobře reprodukovatelný teplotní bod termodynamické stupnice s hodnotou termodynamické teploty trojného bodu pevně stanovenou na $T = 273,16$ K. Jeden kelvin odpovídá 273,16 dílům této termodynamické teploty trojného bodu vody [1].

Celsiova teplotní stupnice

Celsiova teplotní stupnice vychází z Kelvinovy termodynamické stupnice posunutím o hodnotu 273,15 K, což je o 0,01 K menší než termodynamická teplota trojného bodu vody. Stupeň Celsia (°C) představuje jednotku této stupnice. Celsiova teplota t je definována jako rozdíl mezi termodynamickou teplotou T a hodnotou 273,15 K, tudíž platí [1]:

$$t = T - T_0 = T - 273,15 \text{ K } [^{\circ}\text{C}] \quad (3)$$

Fahrenheitova teplotní stupnice

Fahrenheitova stupnice je nejvíce využívána v USA. Tato stupnice využívá menšího stupně s jinou hodnotu nuly než stupnice Celsiova. Převodní vztah mezi číselnými hodnotami mezi Fahrenheitovou a Celsiovou stupnicí je [2]:

$$T_F = \frac{9}{5}t + 32 \text{ } [^{\circ}\text{F}] \quad (4)$$

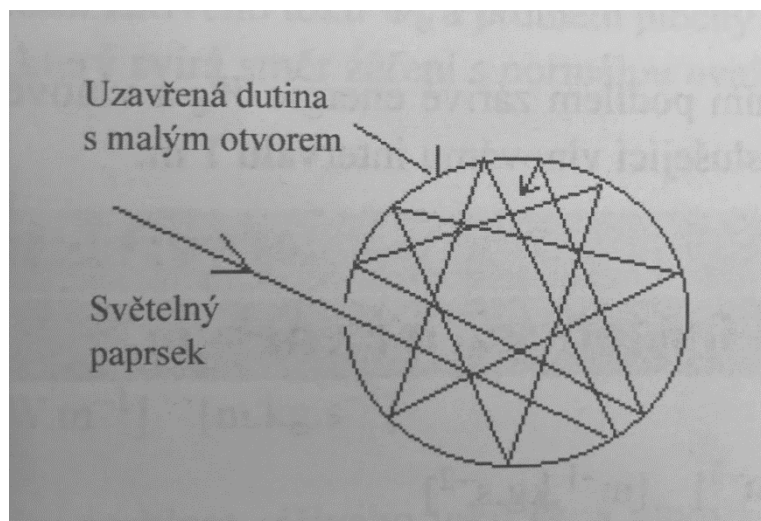
1.3 Tepelné záření

Zářením se myslí elektromagnetické vlnění, které přenáší energii. Tepelné záření, nesoucí tepelnou energii, vychází z povrchu těles s teplotou vyšší než 0 K. Tepelné záření má spojité spektrum, vyplývající z dějů v atomech a molekulách látek, které emitují čárové spektrum. Emitující těleso sestává z molekul, jež tvoří atomy, a ty vykonávají tepelný pohyb v silovém poli ostatních molekul a atomů. Energie tohoto pohybu se přenáší na sousední částice a rovněž přechází do okolního prostoru ve formě elektromagnetických vln. Vyzařovaná energie snižuje teplotu tělesa, protože představuje úbytek energie tepelného pohybu částic. Vyzařování je pro jednotlivé atomy náhodným jevem ovlivněným statistickými zákony, což odpovídá spojitému vyzařovanému spektru [3].

1.3.1 Černé těleso

Jedná se o objekt, jehož záření lze popsat Planckovým vyzařovacím zákonem. V praxi bývá vytvořeno dutým kulovitým tělesem s černým vnitřním povrchem, jak naznačuje přiložený obrázek. Při pozorování osvětlených těles, která sami světlo nevyzařují, ta s menší odrazivostí působí tmavší dojmem. Těleso, které odráží jen malou část dopadajícího světla, se jeví jako černé. Z obrázku (Obr. 2) je patrné, že paprsek (záření) musí během n odrazů v dutině procházet, než znovu opustí prostor. Pokud je odrazivost rovna ρ , odrazivost vstupního otvoru $R = \rho^n$, tudíž může být zanedbatelně malá. Těleso (zářič), které v ideálním případě má

odrazivost $R = 0$, tedy pohlcuje veškeré dopadající záření, je označováno jako "černé," případně absolutně černé [3].



Obrázek 2. Černé těleso [3]

Pro srovnání povrchu černého tělesa s povrchy ostatních těles byla zavedena fyzikální veličina nazývaná emisivita ε . Emisivita charakterizuje schopnost tělesa emitovat elektromagnetické záření a je definována jako poměr vyzařování konkrétního tělesa k vyzařování černého tělesa při stejné teplotě. Platí pro ni vztah [3]:

$$\varepsilon = \frac{M}{M_0} [-] \quad (5)$$

Kde,

M_0 je intenzita vyzařování černého tělesa [$W.m^{-2}$],

M je intenzita vyzařování daného tělesa [$W.m^{-2}$].

Emisivita tělesa je ovlivněna jeho termodynamickou teplotou T , materiálem, z něhož je vyrobeno, úpravou jeho povrchu, a také vlnovou délkou záření λ [m]. Z tohoto důvodu byla zavedena spektrální emisivita ε_λ (emisivita při určité vlnové délce), která se vztahuje k úzkému rozsahu vlnových délek. Spektrální emisivita je definována poměrem spektrální hustoty intenzity vyzařování konkrétního tělesa k spektrální hustotě intenzity vyzařování černého tělesa při jejich stejné teplotě. Spektrální emisivita je dána vztahem [3]:

$$\varepsilon_\lambda = \frac{M_\lambda}{M_{0\lambda}} [-] \quad (6)$$

kde,

M_λ je spektrální hustota intenzity vyzařování daného tělesa [$W.m^{-3}$]

$M_{0\lambda}$ je spektrální hustota intenzity vyzařování černého tělesa [$W.m^{-3}$].

Reálná tělesa mají hodnotu emisivity vždy menší než 1, tudíž vždy menší než černé těleso. Díky tomu jsou někdy označována, jako tělesa nečerná, která se v závislosti jejich emisivity na vlnové délce dělí na [3]:

- šedé zářiče – emisivita je konstantní,
- selektivní zářiče – emisivita se mění s vlnovou délkou.

1.3.2 Planckův vyzařovací zákon

Každé těleso za jakýchkoli okolností emituje záření na všech vlnových délkách, tudíž je jeho emisní spektrum vždy spojité. Spektrální hustota zářivého toku B černého tělesa je závislá na teplotě T tělesa a na vlnové délce λ , která je popsána v následující rovnici [5]:

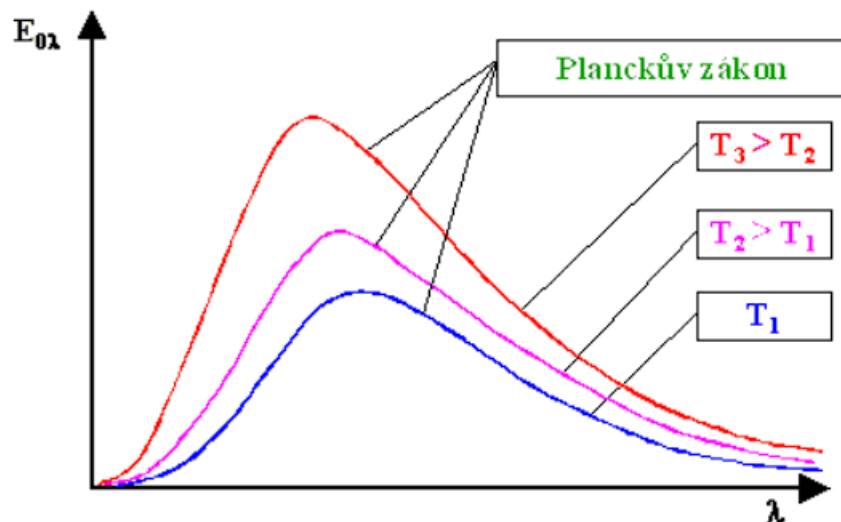
$$B = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad [W.m^{-3}] \quad (7)$$

kde

c je rychlost světla [$m.s^{-1}$]

k je Boltzmannova konstanta [$J.K^{-1}$]

h je Planckova konstanta [$J.s$]



Obrázek 3. Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče [6]

1.3.3 Wienův posunovací zákon

Vlnová délka λ_{max} , při které je spektrální hustota zářivého toku B maximální pro určitou teplotu T , je nepřímo úměrná teplotě T tělesa, jak je následně popsáno v rovnici [5]:

$$\lambda_{max} = \frac{b}{T} [m] \quad (8)$$

kde,

b je Wienova posunovací konstanta [$m.K$].

1.3.4 Stefan-Boltzmannův zákon

Celkový výkon P záření, které je emitováno tělesem, je přímo úměrný čtvrté mocnině teploty T a je dán vztahem [5]:

$$P = \sigma \varepsilon A T^4 [W.m^{-2}] \quad (9)$$

kde,

A je plocha daného tělesa [m^2],

σ je Stefan-Boltzmannova konstanta [$W.m^{-2}.K^{-4}$],

ε emisivita tělesa.

1.3.5 Pohltivost, propustnost, odrazivost

Pohltivost (absorpce) záření je dána jako poměr pohlceného toku a dopadajícího zářivého toku. Platí pro ni vztahy [3;7]:

$$\alpha_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda a}}{\Phi_{\lambda d}} \quad ; \quad \alpha = \frac{\Phi_a}{\Phi_d} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda a} \alpha_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (10)$$

kde,

α_{λ} je pohltivost pro danou vlnovou délku,

α je pohltivost v úhrnném spektru vlnových délek,

Φ_a je pohlcený tok [$W.m^{-l}$],

Φ_d je dopadající tok [$W.m^{-l}$].

Propustnost (transmittance) je hodnota, která vyjadřuje schopnost materiálu propouštět (přenášet) infračervené záření. Je dána vztahy [3;7]:

$$\tau_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda t}}{\Phi_{\lambda d}} \quad ; \quad \alpha = \frac{\Phi_t}{\Phi_d} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda t} \tau_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (11)$$

kde,

τ_{λ} je propustnost pro danou vlnovou délku,

τ je propustnost v úhrnném spektru vlnových délek,

Φ_t je prostupující tok [$W.m^{-1}$],

Φ_d je dopadající tok [$W.m^{-1}$].

Odrazivost (reflektance) je míra, která vyjadřuje schopnost materiálu odrazit elektromagnetické záření. Tato vlastnost závisí na teplotě, povrchu a materiálu samotném. Obvykle jsou leštěné a hladké povrchy schopné vykazovat vyšší odrazivost než hrubé a matné povrchy vyrobené ze stejného materiálu. Reflektance je definována vztahy [3;7]:

$$\rho_{\lambda} = \frac{\Phi_{\lambda r}}{\Phi_{\lambda d}} \quad ; \quad \alpha = \frac{\Phi_r}{\Phi_d} = \frac{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda r} \rho_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} \Phi_{\lambda d} d\lambda} \quad (12)$$

kde,

ρ_{λ} je odrazivost pro danou vlnovou délku,

ρ je odrazivost v úhrnném spektru vlnových délek,

Φ_r je odražený tok [$W.m^{-1}$],

Φ_d je dopadající tok [$W.m^{-1}$].

Při provádění měření těleso nejenom vyzařuje zářivý tok, který je určen jeho teplotou a emisivitou povrchu, ale také vyzařuje záření absorbované od okolních objektů a odražené od povrchu měřeného tělesa [7].

Vzájemné vztahy mezi uvedenými parametry, které jsou závislé i na vlnové délce λ [7]:

$$\alpha_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1, \quad \varepsilon_{\lambda} + \rho_{\lambda} + \tau_{\lambda} = 1 \quad (13)$$

Pro reálná tělesa potom platí [7]:

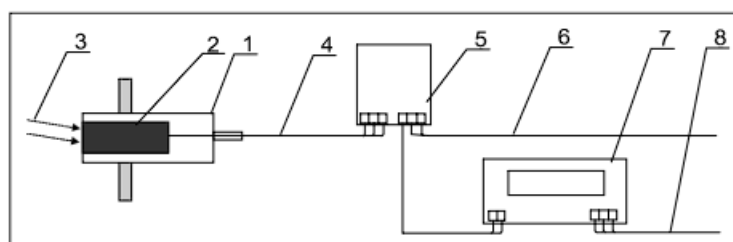
$$\alpha + \rho + \tau = 1, \quad \varepsilon + \rho + \tau = 1 \quad (14)$$

2 MĚŘENÍ TEPLoty BEZDOTYKOVÝM ZPŮSOBEM

2.1 Senzor

Senzor je funkční prvek tvořící vstupní blok měřicího řetězce, který je v přímém styku s měřeným prostředím. Pojem senzor je ekvivalentní pojmu snímač, převodník nebo detektor. Citlivá část senzoru se občas označuje jako čidlo. Senzor jako primární zdroj informace snímá sledovanou fyzikální, chemickou nebo biologickou veličinu a dle určitého definovaného principu ji transformuje na měřicí veličinu nejčastěji na veličinu elektrickou. Dále existují senzory, u nichž je neelektrická veličina přímo transformována na číslicový signál [7].

V obecném schématu měřicího okruhu se senzor skládá ze tří hlavních částí: snímače, převodníku a případně vyhodnocovací jednotky, viz (Obr. 4). Snímač (1) obsahuje senzor (2), který přeměňuje vnější fyzikální podnět (3) na signál (4), který není obvykle standardizován. Senzor je základním prvkem, který spojuje vnější podnět s dalšími obvody pro zpracování informací. Druhou částí snímače je mechanická nebo elektronická konstrukce. Převodník (5), elektronický obvod, zpracovává primární signál od senzoru a přeměňuje ho na standardizovaný elektrický signál (6) měřené veličiny. V případě dalšího zpracování signálů měřené veličiny, jako je integrace dávkovaného množství nebo měření dodávky tepla, se používá vyhodnocovací jednotka (7) s odpovídajícím výstupem (8) [8].



Obrázek 4. Schéma měřicího řetězce [8]

2.2 Senzory záření

Senzor záření je zařízení, které dokáže rozpoznat a případně i kvantifikovat elektromagnetické záření vyzařované různými objekty [1].

Na základě toho, jak fotonové záření reaguje s materiálem tělesa, můžeme detektory rozdělit do dvou kategorií [1]:

- tepelné detektory,
- kvantové detektory.

Výhody bezdotykového měření teplot [7]:

- měřicí technika nepříznivě neovlivňuje měřený objekt,
- možnost měření teploty pohybujících nebo rotujících se těles,
- možnost měření rychlých teplotních změn,
- je možné snímat i zobrazovat povrchy těles (termovize).

Nevýhody bezdotykového měření teplot [7]:

- neznalost správné hodnoty emisivity povrchu měřeného tělesa,
- chyba způsobená neznalostí propustnosti prostředí,
- odražené záření z okolního prostředí může způsobit chybu v měření.

2.2.1 Základní parametry senzorů záření

Integrální citlivost K senzoru je vyjádřena jako poměr mezi elektrickým signálem U na výstupu senzoru a zářivým tokem Φ dopadajícím na citlivou plochu senzoru tj. [1;7]:

$$K = \frac{U}{\Phi} \quad [V \cdot W^{-1}] \quad (15)$$

Spektrální citlivost K_λ je udávána závislostí citlivosti K na vlnové délce λ , neboli

$$K = \frac{U}{\Phi_\lambda} \quad [V \cdot W^{-1}] \quad (16)$$

Relativní spektrální citlivost S_λ je dána vztahem

$$S_\lambda = \frac{K}{K_{\lambda_{max}}} \quad (17)$$

Noise Equivalent Power (NEP) (tzv. výkonový ekvivalent) udává zářivý tok, u kterého hodnota výstupního signálu U je rovná právě efektivní hodnotě spektrální hustoty šumového napětí [1;7]:

$$NEP = \Phi \frac{\sqrt{\bar{u}_s^2}}{U} [W \cdot Hz^{-\frac{1}{2}}] \quad (18)$$

kde,

$$\sqrt{\bar{u}_s^2} = \sqrt{\frac{\bar{U}_s^2}{\Delta f}} \quad \text{je spektrální hustota napětí } [V^2 \cdot Hz^{-1}]$$

$$\sqrt{\bar{U}_s^2} \quad \text{je efektivní hodnota integrálního šumového napětí } [V],$$

Detektivita D (detekční schopnost, měrná detektivita) je definovaná jako obrácená hodnota NEP u ($1/NEP$). V praxi bývá tato jednota obvykle vztažena k odmocnině citlivé ploše senzoru záření, je značena D^* [1;7].

$$D^* = \frac{\sqrt{S}}{NEP} \quad (19)$$

2.2.2 Tepelné detektory

U tepelných detektorů dochází k zahřátí citlivých částí detektoru při absorpci fotonů, a následně je pohlcená energie vyhodnocována nepřímo pomocí teplotních snímačů. Tepelné detektory jsou dále rozděleny na [1]:

- termoelektrické (termočláňkové baterie),
- bolometrické,
- pyroelektrické.

Termoelektrické senzory

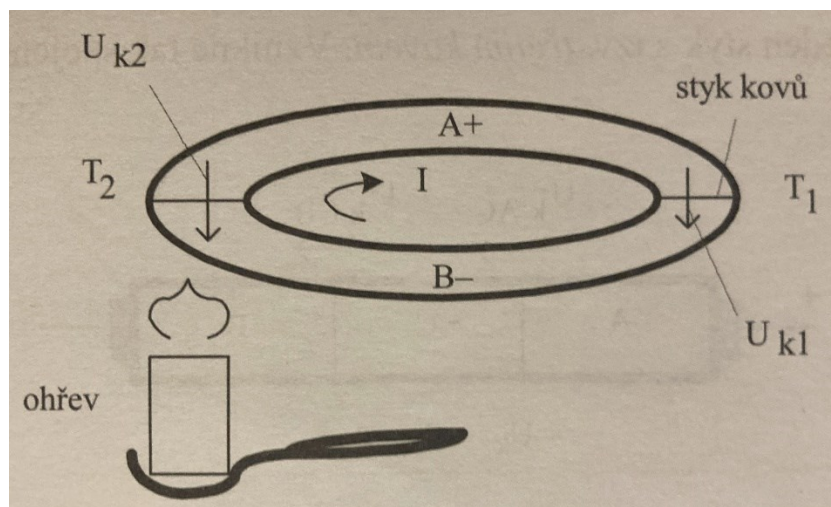
Termoelektrické senzory fungují na principu Seebeckova jevu, který spočívá v generování napětí v důsledku teplotního rozdílu mezi dvěma různými vodiči spojenými na dvou místech.

Seebeckův jev

Pokud umístíme jeden konec vodiče do chladného prostředí a druhý konec do teplého prostředí, energie bude proudit z teplého konce do chladného ve formě tepla. Intenzita tohoto tepelného toku je úměrná tepelné vodivosti vodiče. Kromě toho teplotní gradient vytváří

uvnitř vodiče elektrické pole. Toto tepelně indukované elektrické pole vede ke vzniku přírůstkového napětí. [20]

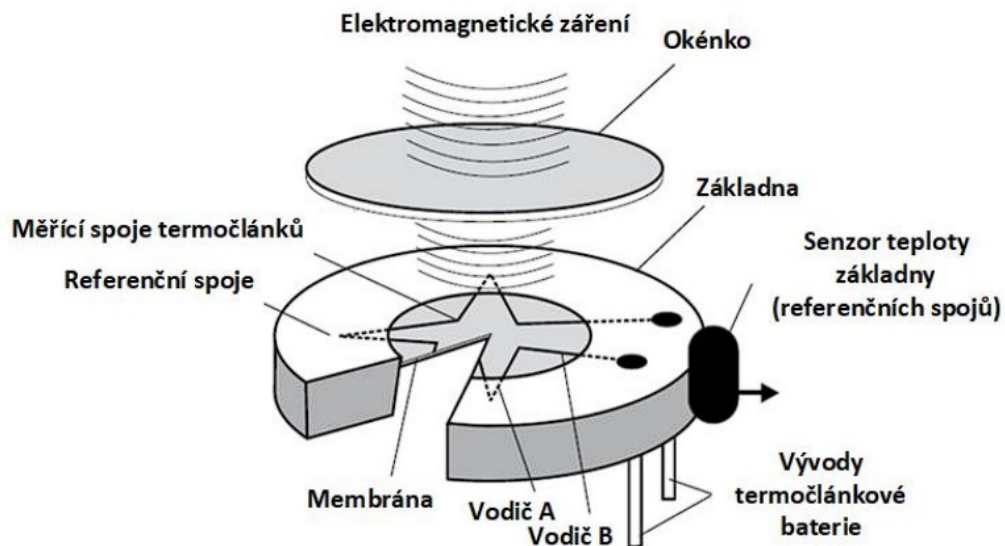
Dva kovy označené jako A a B jsou spojeny na obou koncích (viz Obr. 5). Za předpokladu, že jsou vybrány kovy, jejichž kontaktní potenciály splňují podmínku $\varphi_A > \varphi_B$. Pokud nedojde k ohřevu, platí zjevně $T_2 = T_1$, a kov A se nabije kladně vzhledem ke kovu B . Nicméně pokud se jeden konec ohřeje tak, aby platilo $T_2 > T_1$, bude kmitání krystalové mřížky na teplejší straně intenzivnější než na straně chladnější. Díky vzájemným srážkám iontů s elektrony se zvýší střední hodnota rychlosti neuspořádaného pohybu elektronů, což způsobí, že elektronový plyn se bude ohřívat stejně jako ionty krystalové mřížky. V důsledku zvýšeného tepelného pohybu se elektrony budou difundovat směrem k chladnějšímu konci, což způsobí proudění tepla. Přesun elektronů z teplejšího konce směrem k chladnějšímu také způsobí, že teplejší konec se bude nabíjet kladně a chladnější záporně. Z toho plyne, že na chladnějším spoji bude elektronový plyn hustší než na teplejším spoji. Tento rozdíl v koncentraci elektrického náboje je příčinou vzniku kontaktního potenciálu [3].



Obrázek 5. Seebeckův jev [3]

Při absorpci fotonů se citlivá část senzoru zahřívá a pohlcená energie je nepřímo vyhodnocována pomocí teplotních senzorů pro kontaktní měření teploty [7]. Typický infračervený senzor pro bezdotykové měření teploty je vybaven teplotním senzorem umístěným v hermeticky uzavřeném pouzdru, které absorbuje elektromagnetické záření procházející vstupním okénkem. Toto okénko je propustné pouze pro elektromagnetické záření určitých vlnových délek, konkrétně pro infračervené záření. Z tohoto důvodu může být okénko vybaveno do-

datečným filtrem. Absorbované elektromagnetické (tepelné) záření se přeměňuje na elektrický signál [19]. K tomuto účelu se v praxi nejčastěji používají termoelektrické senzory, zejména termočlánky, viz Obr. 6.



Obrázek 6. Konstrukce termočlánkové baterie

Termoelektrické senzory využívají změny termoelektrického napětí, které vzniká ve dvojici vodičů v důsledku rozdílu teploty mezi měřicím (osvětleným) spojem a referenčním (nezářivým) spojem. Jsou využívány tepelné jevy jako je například Seebeckův, Peltierův a Thomsonův jev, přičemž obvykle jeden z těchto jevů převažuje nad ostatními. Základem těchto jevů je existence kontaktního potenciálu u každého kovu [3].

Termočlánkové baterie se skládají z řady termočlánků, které mohou být vyrobeny jako tenké kovové pásy s tloušťkou přibližně 0,03 mm (Obr. 7), pomocí technologií vytváření tenkých vrstev nebo technologií z křemíku (Obr. 8). Citlivá část senzoru, tj. měřicí spoje, je obvykle pokryta černým nátěrem. Termočlánková baterie (Obr. 7) je často umístěna ve vakuové nádobě. Monolitické termočlánkové baterie vyrobené z křemíku jsou realizovány na extrémně tenké membráně (v rozmezí 5 až 10 mikrometrů), aby se minimalizoval tepelný tok mezi měřicími a srovnávacími spoji. Měřicí termoelektrické spoje jsou umístěny uprostřed membrány, zatímco srovnávací spoje jsou na jejím okraji. Jako větve termoelektrického článku jsou používány kombinace materiálů jako jsou dvojice Bi-Sb, Si/p-Al, Si/n-Au, Si/p-Au. Při výběru materiálů jednotlivých větví je důležitým kritériem hodnota parametru Z [7]:

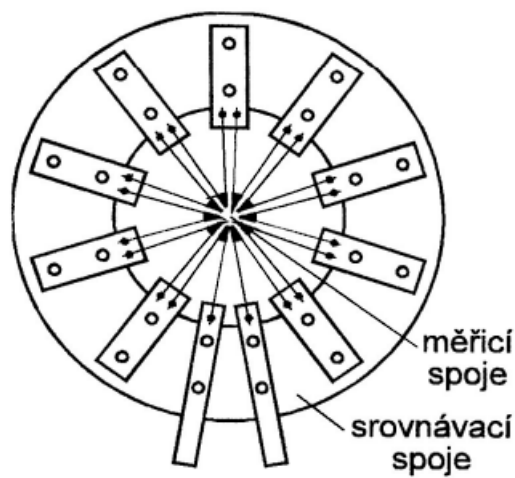
$$Z = \frac{\alpha^2 \sigma}{\lambda} [V^2 \cdot \Omega^{-1} \cdot K^{-1} \cdot W^{-1}] \quad (20)$$

Kde

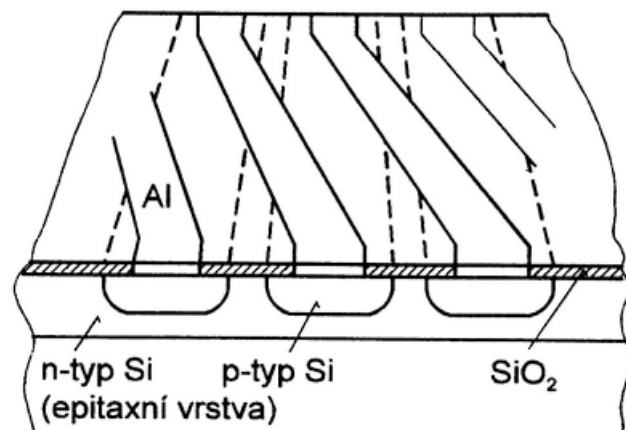
α je Seebeckův koeficient [$V \cdot K^{-1}$],

σ je konduktivita [$\Omega^{-1} \cdot m^{-1}$],

λ je tepelná vodivost [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$].



Obrázek 7. Thermočláňková baterie [7]

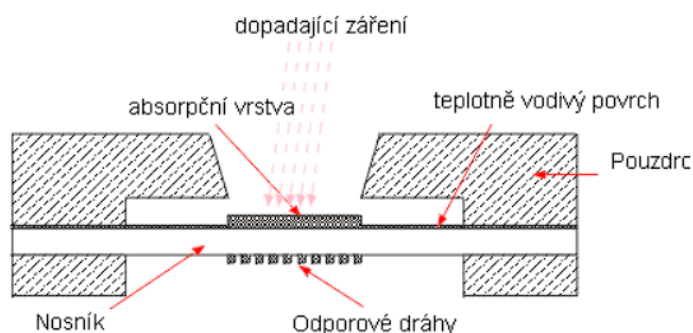


Obrázek 8. Monolitický Si termoelektrický blok [7]

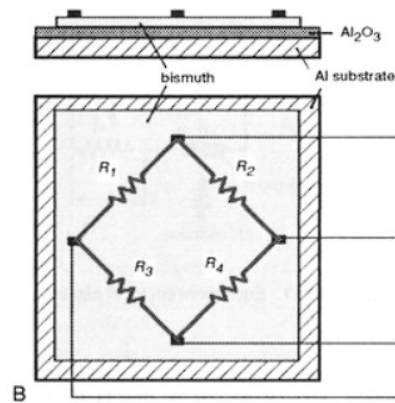
Bolometrické senzory

Princip fungování bolometrického detektoru infračerveného záření byl znám již od 80. let 19. století a jeho základní princip činnosti lze považovat za podobný kovovým odporovým sensorům teploty. Elektrický odpor bolometru se také mění v závislosti na jeho teplotě, která je ovlivněna množstvím absorbovaného infračerveného záření. Množství dopadajícího záření lze tedy odvodit z pozorované změny odporu bolometru. Pro zajištění toho, aby změna teploty bolometru byla přímo úměrná pouze absorbovanému infračervenému záření, musí být samotný bolometr tepelně izolován od svého okolí [9].

Struktura základního bolometru je znázorněna na obrázku (Obr. 9). Infračervené záření dopadá na vrstvu absorpční senzoru, který je tvořen zlatou fólií, jež absorbuje až 95 % záření. Toto záření pak způsobuje zahřívání tepelně vodivého povrchu a nosníku. Na spodní straně nosníku je napařena odporová dráha ve tvaru meandru, jejíž odpor se mění lineárně s teplotou. Na obrázku (Obr. 10) je představena modernější realizace v integrovaných bolometrech, kde je hliníkový substrát izolován oxidem hlíníku Al_2O_3 . Na tepelně vodivé podložce z bismutu jsou napařeny odporové dráhy z různých kysličníků jako MgO , MnO , NiO , TiO_2 (tzv. termistorové bolometry) nebo ze chalkogenidového skla $\text{Tl}_2\text{SeAs}_2\text{Te}_3$ (tzv. vrstevné bolometry). V případě jednoduchých bolometrů jsou často využívány čtyři odporové dráhy (označené R_1 až R_4), které jsou vzájemně propojeny do klasického Wheatstonova můstku. Některé z těchto drah mohou být využívány jako kompenzační nebo referenční (chráněné proti záření) [9].



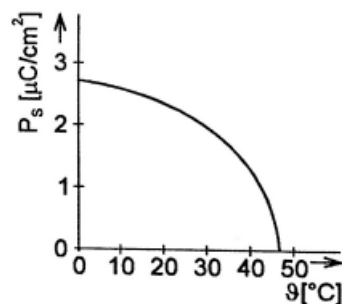
Obrázek 9. Provedení jednoduchého bolometru



Obrázek 10. Struktura integrovaného můstku z bolometrů [9]

Pyroelektrické senzory

Pyroelektrické senzory fungují na základě pyroelektrického jevu, což znamená, že dochází ke změně spontánní polarizace P_s v reakci na změnu teploty (Obr. 11) [3].



Obrázek 11. Závislost spontánní polarizace na teplotě [3]

Pyroelektrický jev se projevuje u materiálů s trvalou polarizací nebo u některých feroelektrik, kde se orientace domén indukuje silným elektrickým polem. Typické materiály zahrnují TGS (triglycin-sulfát), PZT keramiku, LiTaO₃ (lithium-tantalát) a PVDF (polyvinylfluorid). Základní charakteristikou pyroelektrického senzoru teploty je pyroelektrický koeficient p , který je definován vztahem [3;7]:

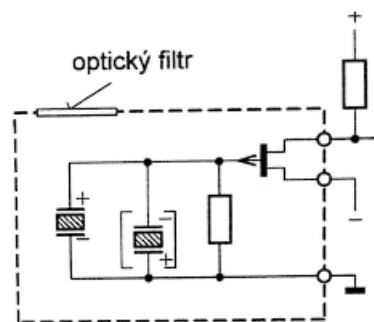
$$p = \left(\frac{\partial P_s}{\partial T} \right)_T \quad (20)$$

Pyroelektrický senzor se skládá ze dvou elektrod, z nichž první elektroda, umístěná přední stranou, musí být průhledná pro infračervené záření. Tento senzor lze tedy přirovnat ke kondenzátoru, kde dochází k indukci elektrického náboje na elektrodách v pyroelektrickém materiálu při změně jeho polarizace. Naindukovaný náboj na elektrodách je odváděn přes odpor

pyroelektrického materiálu a vstupní odpor předzesilovače. Před každým měřením náboje (nebo proudu nebo napětí) je nezbytné přerušit dopadající záření na senzor pomocí automatického přerušovače, a následně jej opět otevřít. Tento postup je nezbytný pro udržení tepelné rovnováhy. Pro tepelnou rovnováhu platí [3;7]:

$$\text{absorbovaný tok} + \text{akumulovaná teplota} = \text{přestup tepla ze senzoru}.$$

V materiálech, ve kterých dochází k pyroelektrickému jevu, je vždy přítomen parazitní piezoelektrický jev, který při deformaci pyroelektrického materiálu (například při otřesech) způsobuje systematické chyby při měření teploty. Proto jsou vyráběny integrované senzory s kompenzací, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 12). Tato kompenzace spočívá v připojení druhého pyrosenzoru s opačnou polaritou, jehož detekční plocha je pokryta tenkou vrstvou zlata [3;7].



Obrázek 12. Kompenzovaný integrovaný pyroelektrický senzor

Pyroelektrické senzory v bezpečnostních infračervených systémech mají podobné kompenzované uspořádání. V tomto uspořádání není kompenzační senzor překryt, což znamená, že oba senzory jsou vystaveny infračervenému záření. Výstupní signál má impulzní charakter při pohybu živého objektu, protože infračervený tok postupně dopadá na první a pak druhý senzor, který má opačnou polaritu [3;7].

2.2.3 Kvantové senzory

Tato skupina senzorů není předmětem v praktické části této práce, každopádně je vhodné je alespoň krátce popsat.

Kvantové senzory využívají fyzikálních jevů, které vznikají při přímé interakci dopadajících fotonů se strukturou senzoru. Pro bezkontaktní měření teploty se obvykle využívají fotodiody pracující v režimu fotonapětí. Výběr polovodiče je určen podmínkou pro šířku zakázaného pásma, která by měla být $W_g \approx 1,24 / \lambda$, kde λ je vlnová délka záření. Pro dosažení vyšší

odolnosti signálu proti šumu je nutné chladit senzory. Kvantové senzory jsou využívány podobně jako pyroelektrické senzory pro termovizní snímání obrazu. Na rozdíl od CCD senzorů založených na křemíkových strukturách pro viditelné světlo, technologické obtíže stále přetrvávají při výrobě monolitického obvodu s kvantovými senzory infračerveného záření. Proto se v infračervených plošných strukturách používá hybridní technologie spojující plošné senzory s obvody CCD a CMOS. Současný vývoj se zaměřuje na využití tzv. Shottkyho bariéry mezi křemíkem a platinovým disilicidem (PtSi). V oblasti PtSi se generují elektrony, které překonávají Shottkyho bariéru a indukují ve vrstvě křemíku vznik nosičů náboje. Tento princip lze aplikovat v pásmu infračerveného záření od 1 μm do 5 μm . Rozšíření pásma až do 9 μm lze dosáhnout využitím materiálu IrSi. Jednotlivé citlivé prvky mají rozměry 25 μm x 25 μm nebo 17 μm x 17 μm . Tyto obvody s rozlišením 1040 x 1040 prvků jsou chlazeny tekutým dusíkem [7].

II. PRAKTICKÁ ČÁST

3 ÚVOD DO PRAKTICKÉ ČÁSTI

Hlavním cílem praktické části práce bylo navrhnout a následně realizovat systém sběru dat u laboratorní úlohy pro měření teploty bezdotykovým způsobem. Stávající úloha je využívána jako výukový nástroj v předmětu Senzory pro studenty Fakulty aplikované informatiky na Univerzitě Tomáše Bati ve Zlíně. Díky této úloze jsou studenti seznámeni s teorií a vlastnostmi senzorů bezdotykového měření teploty, tj. termočlánekových baterií.

Pro vyšší efektivitu a lepší praktické využití této úlohy bylo nutné provést zmodernizování některých měřicích a přístrojových zařízení. Následné vytvoření funkčního systému pro sběr naměřených dat. Důležitým kritériem při modernizaci bylo zachování přímého kontaktu studentů s měřicí a přístrojovou technikou. Dále bylo nutné dodržet časovou dotaci pro dané cvičení, dobrou ovladatelnost používaných periférií a z toho důvodu také zajištění dostatečně rychlé a přesné regulace teploty měřeného tělesa. Automatický systém pro sběr dat zajistí efektivnější způsob ke zpracování protokolu do cvičení a studenti tím získají více času ke studiu dané problematiky měření teploty bezdotykovým způsobem.

4 STÁVAJÍCÍ STAV LABORATORNÍ ÚLOHY

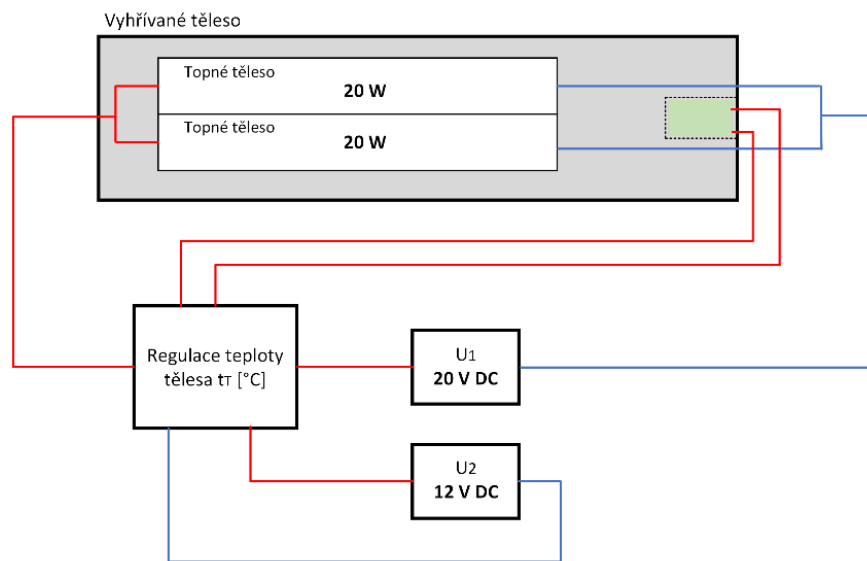
Před vytvořením systému pro sběr dat pro tuto laboratorní úlohu je potřeba se nejprve seznámit s jejím stávajícím stavem. K tomuto účelu bylo využito i dostupného návodu k laboratorní úloze, který je uveden jako literární zdroj č.13. Následným krokem bude navrhnutí úprav a jejich následná realizace a poté vytvoření systému pro sběr dat.

Původní konfigurace laboratorní úlohy zaměřené na měření teploty bezdotykovým způsobem je ilustrována na obrázku (Obr. 13). Obrázek zobrazuje zapojení a konfiguraci přístrojů s použitím dvoupolohového regulátoru teploty vyhřívaného (měřeného) tělesa.



Obrázek 13. Stávající stav laboratorní úlohy

Hliníkové těleso, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 14), je ohříváno v rozmezí teplot od 30 do 70 °C pomocí dvou paralelně zapojených odporových topných těles, z nichž každé má výkon 20 W. Tato topná tělesa jsou tvořena metal oxidovými rezistory ROYAL OHM – 281 (20 W, 22 Ω). Regulace teploty je prováděna pomocí dvoupolohového regulátoru DIXELL - XT120C. Z obrázku (Obr. 14) je patrné, že výstupní kanál prvního zdroje ARRAY – 3645 A je nastaven na 20 V DC a napájí odporová topná tělesa přes relé regulátoru. Druhý zdroj ARRAY – 3645 A má výstup nastavený na 12 V DC a napájí samotný regulátor teploty. Tento regulátor monitoruje teplotu vyhřívaného tělesa pomocí stávajícího odporového senzoru teploty Pt100, jak je znázorněno na obrázku (Obr. 14). Regulátor zároveň zobrazuje požadovanou (nastavenou) i aktuální (referenční) teplotu tělesa t_T .

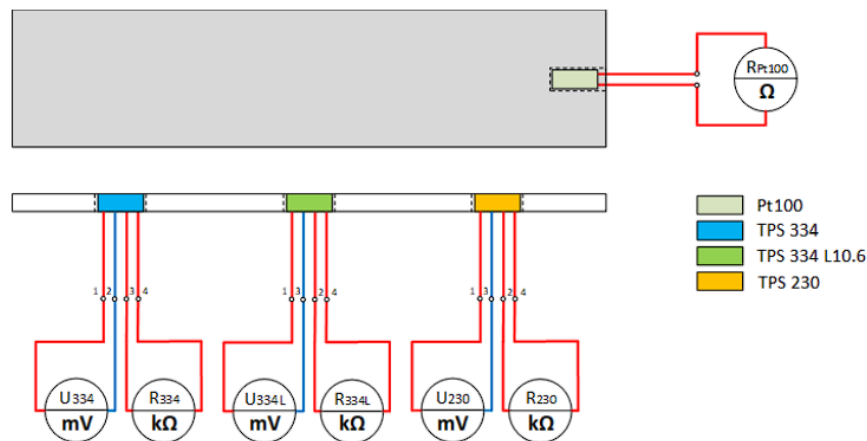


Obrázek 14. Vyhřívání měřeného tělesa s regulací teploty [13]

Hlavním cílem této úlohy je měřit statické charakteristiky vybraných senzorů infračerveného záření. K tomuto účelu jsou v úloze použity tři různé typy termočláňkových baterií, jak je uvedeno na obrázku (Obr. 15):

- Tepelné senzory infračerveného záření,
 - Termočláňkové baterie,
 - TPS 334, TPS 334 L10.6 a TPS 230 od společnosti PerkinElmer.

Jejich způsob zapojení je zřejmý na obrázku (Obr. 15), kde se jedná o pohled na měřené těleso ze shora. Principy daných senzorů jsou popsány v teoretické části této práce ve 2. kapitole. Výstupní veličiny termočláňkových baterií, označené na obrázku (Obr. 15) jako termoelektrická napětí U_{334} [mV], U_{334L} [mV] a U_{230} [mV], jsou měřeny pomocí digitálních stolních multimetrů HMC 8012 od ROHDE & SCHWARZ, které jsou zobrazeny na obrázku vlevo (Obr. 13). Kromě toho jsou termočláňkové baterie vybaveny vývody z odporových polovodičových senzorů teploty, konkrétně NTC termistorů, které slouží k měření teploty základny těchto baterií. Odpovídající veličiny, tedy elektrické odpory R_{334} [k Ω], R_{334L} [k Ω] a R_{230} [k Ω], jsou pak měřeny digitálními ručními multimetry CEM – DT-9602 (Obr. 13).



Obrázek 15. Osazené termočláňkové baterie a jejich výstupní veličiny [13]

Vyučující zadá studentovi dva měřené senzory. Ruční multimetry CEM – DT-9602 student zapojí k vývodům odporových senzorů teploty NTC, které mají za účel měřit teplotu referenčních spojů zvolených termočláňkových baterií. Stolní multimetry HMC 8012 od ROHDE & SCHWARZ nastaví student na měření napětí a připojí je přímo na vývody termočláňků.

Měření poté probíhá v rozmezí od pokojové teploty a následně od 30 °C až do 70 °C vždy po kroku 5 °C. Podle dosavadního návodu k úloze si student na regulátoru nastaví žádanou teplotu. Důležitým aspektem při nastavování regulátoru je vypnutí výstupního kanálu zdroje, využívaného k vyhřívání tělesa. Po úspěšném nastavení žádané teploty student zapne výstupní kanál zdroje. Pokud je aktuální teplota tělesa nižší než teplota žádaná, dojde k „topení“. Po dokončení procesu „topení“ však díky vlastnostem dvupolohového regulátoru dojde k překmitu teploty vyhřívajícího tělesa až o 5 °C. Pokud se jedná o první nastavenou žádanou teplotu, k jejímu ustálení dochází až po cca 15 minutách od jejího nastavení. Pro další žádané hodnoty s krokem 5 °C je doba ustálení 7 až 9 minut. Následně žák pro každou ustálenou teplotu musí 10x zaznamenat naměřené hodnoty z měřících přístrojů ručně.

Z výše uvedeného je tedy patrné, že takový postup pro zpracování dat zabere více než 90 minut. Tato časová náročnost měření tedy způsobuje nedostatečnou možnost se studentovi podrobněji seznámit s měřením teploty bezdotykovým způsobem na cvičení.

Zaznamenávání měřených dat probíhá ručně do předem stanovených tabulek. Následně jsou data zpracována do protokolu z měření.

5 NÁVRH ÚPRAVY LABORATORNÍ ÚLOHY

Ze závěru kap. 4 lze usoudit, že je nutné modernizovat stávající způsob měření dat, a také je nutné provést změnu regulátoru za účelem nižších překmitů žádané teploty při regulaci v této úloze. Hlavním cílem této kapitoly je navrhnout úpravu úlohy jako je vytvoření systému pro automatický sběr dat a zvýšení přesnosti regulace teploty za účelem snížení časové náročnosti měření. Aby bylo dosaženo požadovaných vlastností regulace, je potřeba vyměnit dvoupolohový regulátor za regulátor typu PID. Dalším důležitým krokem je výměna ručních multimetrů za stolní multimetry, které disponují propojením s počítačem. Následně je nutné provést výběr softwaru, který dokáže data z měřicích přístrojů zpracovat a následně spolupracovat s některým z programů obsaženým v MS Office, například s MS Excel. Pro získání aktuální teploty vyhřívaného tělesa bylo po konzultaci s vedoucím práce dohodnuto použití také adekvátního mikrokontroleru, který bude zapotřebí zprovoznit pro komunikaci s počítačem, aby mohla být data zpracována ve stejném programu jako ostatní měřicí zařízení použité v laboratorní úloze. Použití mikropočítače v této úloze je z ekonomických důvodů, kdy je možné se vyhnout nákupu dalšího měřicího přístroje.

5.1 PID regulátor

PID v řídicí technice označuje proporcionální, integrační a derivační složku chování univerzálního regulátoru (tzv. PID regulátor). Regulátory jsou navrženy tak, aby řízení procesu nevyžadovalo neustálou pozornost a ruční zásahy operátora. Regulátor automaticky upravuje akční veličinu $u(t)$ tak, aby regulovaná veličina $y(t)$ dosáhla požadované hodnoty $w(t)$, kde t představuje čas. Regulátor a řízený systém tvoří regulační obvod (smyčku): na vstup regulátoru je přiváděna požadovaná hodnota $w(t)$ spolu se skutečnou hodnotou regulované veličiny $y(t)$ (výstup řízeného systému) a výstup regulátoru $u(t)$ ovlivňuje, po případné transformaci, vstup do systému [15].

Žádaná hodnota regulované veličiny je bod na stupnici, kde by se měla nacházet skutečná hodnota regulované veličiny. Regulační odchylka neboli chyba $e(t)$, je rozdíl mezi požadovanou a skutečnou hodnotou regulované veličiny [15]:

$$e(t) = w(t) - y(t) \quad (21)$$

Nenulová hodnota $e(t)$ může vzniknout kvůli poruše nebo cílené změně žádané hodnoty. Regulátor na základě této odchylky upravuje akční veličinu. PID regulátor reaguje na regulační odchylku třemi způsoby: proporcionálním, integračním a derivačním. Každou z těchto

reakcí lze nastavit pomocí konkrétních parametrů, což je úkolem projektanta regulačního obvodu [14;15].

Parametry PID regulátoru jsou [14;15]:

- zesílení K (-): ovládá proporcionální složku P ,
- integrační časová konstanta T_I (s): ovládá integrační složku I ,
- derivační konstanta T_D (s): ovládá derivační složku D .

Tyto složky (P , I , D) se sčítají do výsledné akční veličiny, která ovlivňuje regulační proces. Vzhledem k tomu, že jde o uzavřený regulační obvod, je průběh tohoto procesu závislý i na vlastnostech regulované soustavy. Většina technických systémů má charakter dynamického systému prvního nebo druhého řádu, nekmitavého, s možným dopravním zpožděním. Pro tyto systémy jsou úvahy o použití PID regulátoru následující [15].

5.1.1 Charakteristika činnosti spojitých regulátorů

P regulátor: V uzavřeném regulačním obvodu pracuje s trvalou regulační odchylkou při regulaci proporcionálních soustav a má dobré stabilitní vlastnosti [14].

I regulátor: V uzavřeném regulačním obvodu pracuje s přechodnou regulační odchylkou. Regulační proces se ustálí, když je regulační odchylka $e(t) = 0$. Není vhodný pro regulaci integračních soustav z hlediska stability [14].

D-člen: Samostatně nemůže fungovat jako regulátor, protože reaguje na derivaci regulační odchylky, aniž by znal její hodnotu $e(t)$. Umožňuje libovolně velkou ustálenou regulační odchylku, ale v kombinovaném regulátoru zlepšuje stabilitu regulačního obvodu, natáčí fázi amplitudové fázové charakteristiky o $+90^\circ$ a informuje regulátor o změně regulační odchylky [14].

PI regulátor: V uzavřeném regulačním obvodu eliminuje trvalou regulační odchylku, kterou by měl P regulátor. Zlepšuje stabilitu ve srovnání s čistým I regulátorem a může být stabilní i pro integrační soustavy. Na začátku regulačního procesu dominuje proporcionální složka, zatímco s časem převládá integrační složka [14].

PD regulátor: Zlepšuje stabilitu regulačního obvodu ve srovnání s čistým P regulátorem, umožňuje vyšší zesílení regulátoru, a tím menší trvalou regulační odchylku při regulaci proporcionálních soustav. Na začátku regulačního procesu dominuje derivační složka, zatímco

s časem převládá proporcionální složka; regulátor pracuje s přechodným zvýšeným zesílením [14].

PID regulátor: V uzavřeném regulačním obvodu eliminuje díky integrační složce trvalou regulační odchylku a zlepšuje stabilitu obvodu pomocí derivační složky. Na začátku přechodového děje dominuje derivační složka, zatímco s postupujícím časem převládá integrační složka [14].

5.2 Mikropočítač

Obvykle je mikropočítač vybaven řadou standardních komponent: mikroprocesorovým čipem a příslušnými obvody, paměťovými čipy s náhodným přístupem, vyměnitelnými disky (floppy a cartridge), magnetickými pevnými disky, optickými disky, klávesnicemi, obrazovkami, sériovými rozhraními, tiskárnami a vstupními zařízeními x-y, jako jsou myš, trackball, joystick, touchpad a dotyková obrazovka. Pro sběr a řízení dat jsou však potřeba další součásti, například digitální a analogové vstupy/výstupy (I/O porty) a čítače/časovače. Analogové vstupní porty obsahují analogové multiplexory, zesilovače vzorkování a podržení (S/H) a analogově-digitální převodníky (A/D). Analogové výstupní porty obsahují digitálně-analogové převodníky (D/A). I pro návrhy, které vyžadují pouze mikroprocesor a několik dalších obvodů, je výhodné využít zdroje mikropočítače během fáze vývoje. Tyto zdroje zahrnují editory a překladače programového kódu, operační systém pro ukládání a manipulaci s kódem a datovými soubory a dostatečnou paměť s náhodným přístupem. [16]

6 REALIZACE ÚPRAV LABORATORNÍ ÚLOHY

V této kapitole je provedena modernizace laboratorní úlohy pro měření teploty bezdotykovým způsobem. První změnou byla výměna dvoupolohového regulátoru teploty DIXELL XT120C za vhodnější typ regulátoru, tj. PID regulátor, který disponuje rychlejší a přesnější regulací teploty. Po konzultaci s vedoucím práce byl pro tuto úlohu zvolen regulátor DIXELL XT141D 5C2TU, jelikož byl již součástí dostupných zařízení v laboratoři senzorů. Jedná se atypické provedení regulátoru, resp. se jedná o kombinovaný regulátor s PID a ON/OFF regulací. Výhodou nově použitého regulátoru je stejný výrobce jako u předešlého dvoupolohového regulátoru. Díky tomu je ovládání menu regulátoru na podobné způsob jako u předešlého regulátoru. Další výhodou tohoto regulátoru je možnost instalace na DIN (Deutsches Institut für Normung) lištu.

6.1 PID regulátor Dixell XT141D 5C2TU

Řada regulátorů Dixell XT141D jsou regulátory PID určené k řízení teploty, vlhkosti a tlaku s možností volby přímého nebo inverzního režimu (uživatelsky nastavitelného, například topení nebo chlazení). Tyto regulátory disponují dvěma regulačními výstupy pro chlazení, topení a také jedním alarmovým relé. Výstup 1 lze nastavit na PID, PD nebo ON/OFF regulaci, zatímco výstup 2 je vždy pouze s ON/OFF regulací, což znamená, že tento regulátor není vhodný pro ovládání servopohonů. Regulátory Dixell XT141D mohou být také nastaveny pro dvoustupňovou regulaci. Kromě toho tento model disponuje analogovým proudovým výstupem 4...20 mA. Všechny regulátory řady XT jsou vybaveny digitálním vstupem a volitelně mohou obsahovat bzučák. Jsou snadno a rychle programovatelné pomocí programovacího klíče HOT KEY. V základním provedení mají také výstup TTL pro připojení regulátoru k sériové komunikaci pomocí převodníku TTL-RS485 [12]. Použitý regulátor je uveden na níže uvedeném obrázku (Obr. 16.) a jeho elektronické schéma je přiloženo taktéž níže na obrázku (Obr. 17)

Technicky je regulace realizována na výstupním relé, kde se teoreticky vypočítaný signál s vhodným vzorkováním převede na pulzy. U tohoto typu regulátorů je měřítkem velikosti signálu délka trvání a četnost pulzů. Četnost pulzů lze ovlivnit nastavením doby cyklu výstupu, kterou si regulátor rozdělí na dobu zapnutí a vypnutí [17].

Příklad PID regulace regulátoru DIXELL

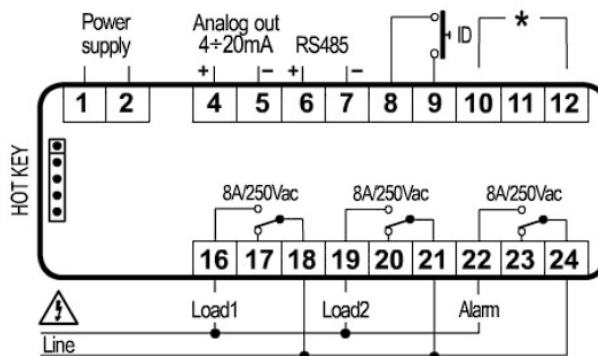
Ohřev na žádanou hodnotu 50 °C, $P_b = 10$ °C (pásmo proporcionality) leží obvykle pod žádanou hodnotou, čas cyklu výstupu $c_{yt} = 10$ s.

Do 40 °C je topení trvale sepnuto. Nad 40 °C se začne střídavě vypínat a zapínat. Zapnutí a vypnutí je úměrné regulační odchylce. Např. při 42,5 °C (čtvrtina pásma proporcionality) je poměr zapnutí /vypnutí roven 3:1, což znamená, že z doby c_{yt} (10 sekund) se výstup zapne na 7,5 sekund a 2,5 sekundy vypne [17].



Obrázek 16. PID regulátor Dixell XT141D [12]

XT141D * 4÷20mA, 0÷1V, 0÷10V= 11(In); 10(gnd); 12(+)
 * Pt100= 11 - 10(12) * NTC, PTC= 11(In); 12(gnd)
 * TcK, TcJ, TcS= 11(+)- 10(-)

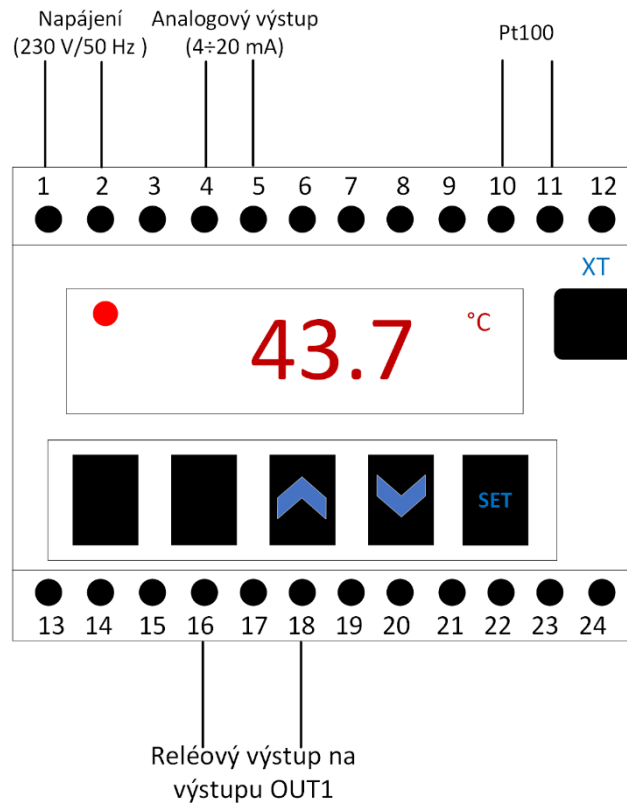


Obrázek 17. Schéma svorkovnic pro zapojení regulátoru Dixell XT141D [12]

Tabulka 1 Technické parametry PID Regulátoru Dixell XT141D [12]

Napájení	230 Vstř ± 10 %, 50/60 Hz
Příkon	Cca 3VA
Přesnost při 25 °C	± 0,5 °C
Vzorkovací čas	1 s
Krytí čelního panelu	IP65 s těsněním
Vstup	Teplotní (PTC, NTC, Pt100, TcJ, TcK, TcS)
Další vstupy	Digitální vstup – beznapěťový kontakt
Výstup	2x přepínací relé 8(3) A /250 V 1x spínací alarmové relé 8(3) A / 250 V 1x analogový výstup 4..20 mA
Další výstupy	TTL výstup pro sériovou komunikaci (výstup pro programovací klíč HOT KEY) Bzučák pro hlášení alarmových stavů

Při prvotním připojení regulátoru k napájení bylo potřeba nastavit v menu jeho parametry, aby bylo dosaženo správné funkčnosti pro laboratorní úlohu. Nejprve byl nastaven vstup regulátoru pro senzor Pt100 k získávání aktuální teploty vyhřívaného tělesa. Jelikož se nejedná o spojitý PID regulátor, byly PID parametry nastaveny metodou doporučenou výrobcem. Tato metoda spočívá v tom, že výstup OUT1 se nejprve nastavil na ON/OFF regulaci, a následně probíhalo zaznamenávání provozní teploty v pravidelném cyklu, zaznamenával se čas a kmitající hodnoty teploty, tj. nejnižší a nejvyšší hodnoty teploty do grafu. Tímto způsobem bylo možné určit časový interval mezi dvěma po sobě jdoucími maximy teploty a také rozdíl maxima a minima. Tyto hodnoty následně byly vloženy do vzorců, které dodává výrobce regulátoru, a tím došlo k získání všech parametrů PID. Poté bylo nutné ověřit správnou funkčnost regulace pro laboratorní úlohu. Díky několika experimentům a následným drobným úpravám PID parametrů bylo dosaženo uspokojivých výsledků, kdy celkové měření teplot v laboratorní úloze nepřesáhlo 70 minut a žádaná teplota nedosahovala vysokých překmitů.



Obrázek 18. Zapojení regulátoru DIXELL XT141D 52CTU

Jako poslední byl nastaven analogový unifikovaný výstup na zobrazování aktuální teploty vyhřívaného tělesa. Tento výstup byl přiveden na převodník proudové smyčky na napětí. Výstup převodník byl následovně připojen na vstupní pin mikropočítače. Výše uvedené zapojení regulátoru je zobrazeno na obrázku (Obr. 18).

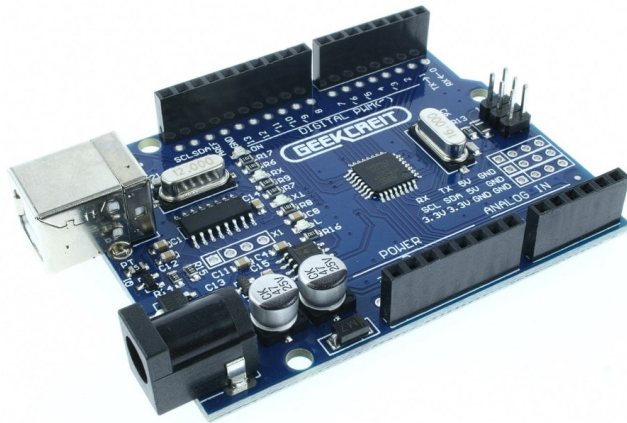
6.2 Arduino UNO - Geekcreit ATmega328

Tato mikropočítačová vývojová deska, znázorněna na obrázku (Obr. 19), byla pro tuto práci zvolena po konzultaci s vedoucím práce kvůli dostupnosti v laboratoři senzorů. Funkce mikropočítače v této práci spočívá v převedení napětí z převodníku na aktuální teplotu vyhřívaného tělesa, a poté jsou tato data posílána přes sériovou linku do počítače, kde jsou zpracována s dalšími daty z ostatních měřicích zařízení.

Parametry mikropočítače [18]:

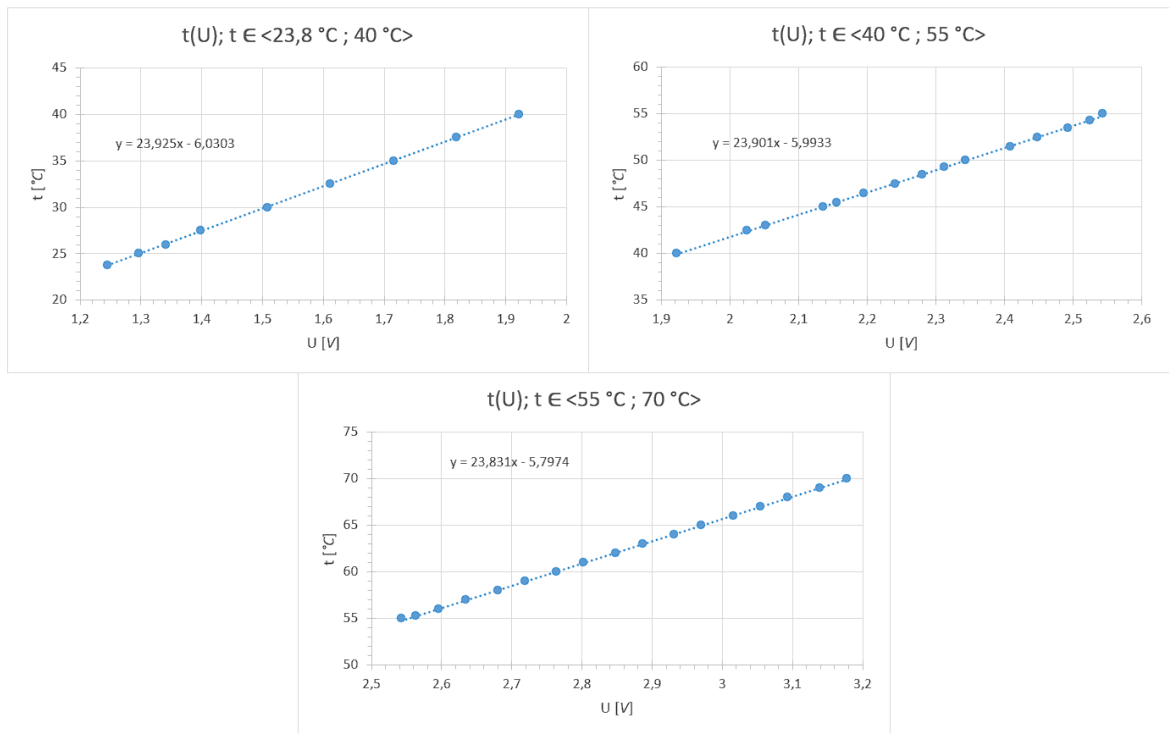
- Krystal 16 MHz
- Připojení k PC přes USB
- Napájení 7-9V

- Výstupní napětí: 5V, 3,3V
- Paměť programu Flash 32 kB, 0.5 kB použito bootloaderem
- Paměť dat SRAM 2 kB
- Paměť dat EEPROM 1 kB



Obrázek 19. GEEKCREIT ATmega 328 [18]

Z důvodu co nejpřesnějšího převodu aktuální teploty s využitím tohoto mikropočítače bylo potřeba zjistit vzájemný vztah mezi zobrazovanou aktuální teplotou na displeji regulátoru a výstupním napětím na převodníku proudu na napětí. K získání tohoto vztahu bylo potřeba vytvořit tabulku z hodnot napětí na výstupu převodníku proudu na napětí a z aktuální teploty měřeného tělesa pro dané napětí.



Obrázek 20. Grafy závislosti teploty na napětí

Hodnoty napětí byly měřeny jedním ze stolních multimetrů dostupných v laboratoři senzorů a byly ručně zapisovány do prvního sloupce tabulky. Hodnoty teploty zobrazené na displeji regulátoru byly také zapisovány ručně do druhého sloupce tabulky. Z těchto získaných dat byly vytvořeny tři grafy, znázorněné na obrázku (Obr. 20), rozdělené podle tří intervalů teploty pro vyšší přesnost převodu. Veškerá data i grafy jsou přiloženy v elektronické příloze P VII.


```
1  const int analogInPin = A0;
2  const int numSamples = 100; // Počet vzorků pro průměrování
3  float t;
4  float U;
5
6  void setup() {
7      Serial.begin(9600);
8  }
9
10 void loop() {
11     // Inicializace proměnné pro uložení sumy vzorků
12     float sum = 0;
13     // Čtení a sumování více vzorků
14     for (int i = 0; i < numSamples; i++) {
15         sum += analogRead(analogInPin);
16         delay(10); // Čekání mezi vzorky (10 ms)
17     }
18     // Výpočet průměrné hodnoty z převodníku
19     float averageValue = sum / (float)numSamples;
20
21     // Převod zpět na napětí
22     U = averageValue * (5.0000 / 1023.0);
23     //Převod napětí na teplotu
24     if (U < 1.923){
25         t = (23.925 * U) - 6.0303;
26     }
27     else if (U >= 1.923 && U < 2.54){
28         t = (23.901 * U) - 5.9933;
29     }
30     else
31         t = (23.831 * U) - 5.7974;
32
33     Serial.println(t, 2); // Výpis teploty na 2 desetinná místa na sériový port
34
35     // Zpoždění pro stabilitu čtení
36     delay(500); // Celkové zpoždění 1000 ms
37 }
```

Obrázek 21. Program implementovaný do mikropočítače

Následně byly využity rovnice lineárních regresí v kódu nahraném do mikropočítače (Obr. 21) pro zpětný převod napětí na teplotu. Kód nahraný do mikropočítače je také součástí elektronické přílohy P VI. Důvodem pro vytvoření tří grafů byla po několika experimentech vyšší přesnost přepočtu napětí na teplotu, jelikož průběh napětí na výstupu není ideálně lineární vůči teplotě.

6.3 Keysight VEE Pro

Tento software byl pro tuto práci vybrán z důvodu funkční komunikace se všemi použitými měřicími zařízeními a mikropočítačem, které jsou využívány v laboratorní úloze. Velkou výhodou také je, že práce s tímto softwarem je součástí cvičení předmětu *Instrumentace a měření*, který studenti absolvují v dřívějším studiu před předmětem senzory, a tudíž je tento software dobře využitelný.

Softwarová rodina Keysight VEE nabízí uživatelsky přívětivé grafické programovací prostředí, které zaručuje rychlé zpracování výsledků analýzy měření. Keysight VEE Pro je navržen pro rozsáhlé projekty s více vývojáři. Zvládá běžné programovací úkoly spojené s řízením přístrojů, zpracováním měření a tvorbou testových protokolů. Usnadňuje vývoj testů pomocí vylepšení pro integraci systému, ladění, strukturovaný návrh programu a dokumentaci. VEE automatizuje nastavení přístrojů, zrychluje tvorbu uživatelských rozhraní, zjednodušuje sekvencování testů a usnadňuje vývoj aplikací a programů přes internet [10;11].

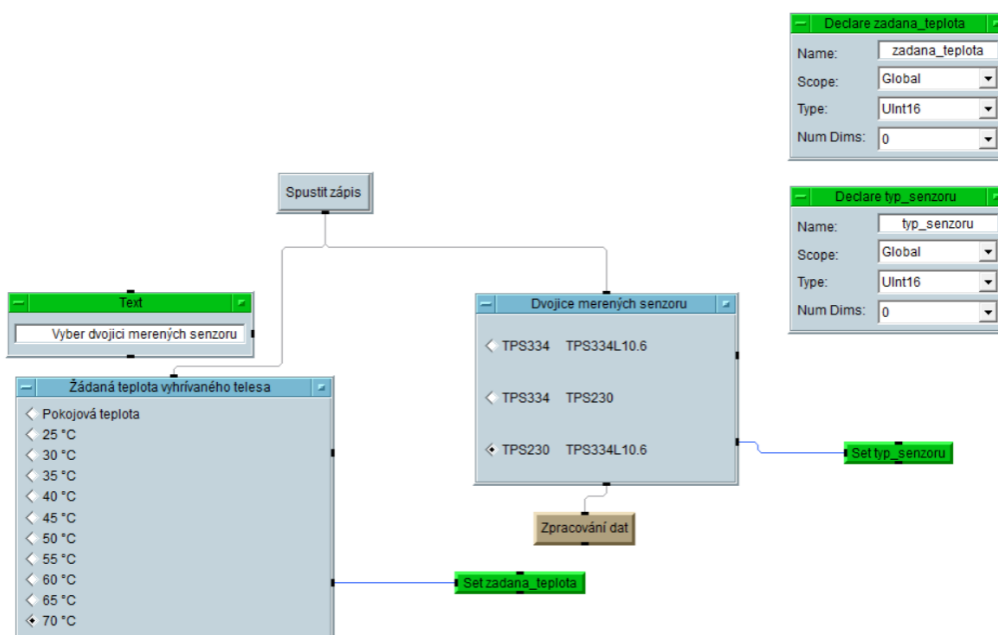
6.4 Výhody VEE Pro [11]

- Zvyšuje efektivitu práce, přičemž uživatelé zaznamenávají až 80% zkrácení doby potřebné k vytvoření programu.
- Nabízí široké možnosti využití, jako je testování funkcionality, ověřování návrhů, kalibrace, sběr dat a jejich kontrolu.
- Poskytuje nástroje pro vstupně-výstupní přenos, které umožňují komunikaci přes sériovou linku, LAN a PC plugin karty, a umožňuje importovat knihovny od mnoha výrobců měřících přístrojů.
- Používá prvek ActiveX pro automatizované ovládání jiných programů, jako jsou například MS Word, Excel a Access, pro export a ukládání získaných dat a jejich další využití.
- Zvyšuje výkon a usnadňuje tvorbu rozsáhlejších programů, přičemž obsahuje vlastní kompilační program a pokročilé profesionální vývojové nástroje určené pro tvorbu rozsáhlých programů.

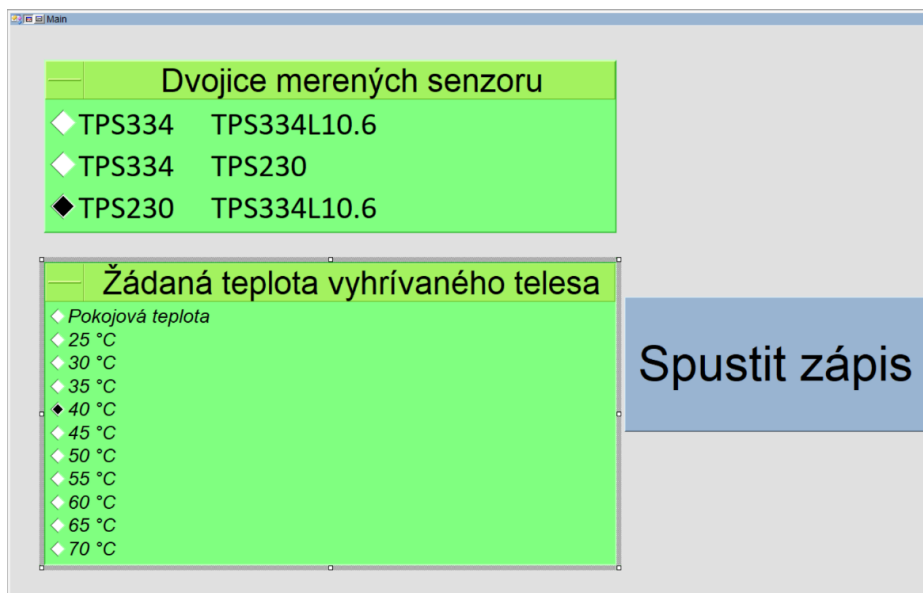
7 REALIZACE SYSTÉMU PRO SBĚR DAT

V této kapitole je popsáno vytvoření systému pro sběr dat pro laboratorní úlohu na měření teploty bezdotykovým způsobem.

Nejprve bylo nutné si vymezit části programu, funkci *main* a následně vytvoření *uživatelských objektů* (User Object) podle jejich funkcionality. Na obrázku (Obr. 22) lze vidět, že funkce *main* byla vytvořena tak, aby nabízela uživateli možnost volby aktuálně měřené žádané teploty vyhřívaného tělesa, a také určení dvojice použitých senzorů pro bezdotykové měření teploty zadané před začátkem měření vyučujícím. Obě možnosti jsou zároveň uloženy jako hodnoty indexů do globálních proměnných, se kterými program dále pracuje a využívá je k zápisu do určitých buněk v MS Excel. Funkce *main* je zároveň pro uživatele dostupná k zobrazení v panelu, kde slouží jako ovládací menu a je zde k dispozici pouze volba výše uvedených možností a možnost spuštění zápisu měřených dat, viz obrázek (Obr. 23).

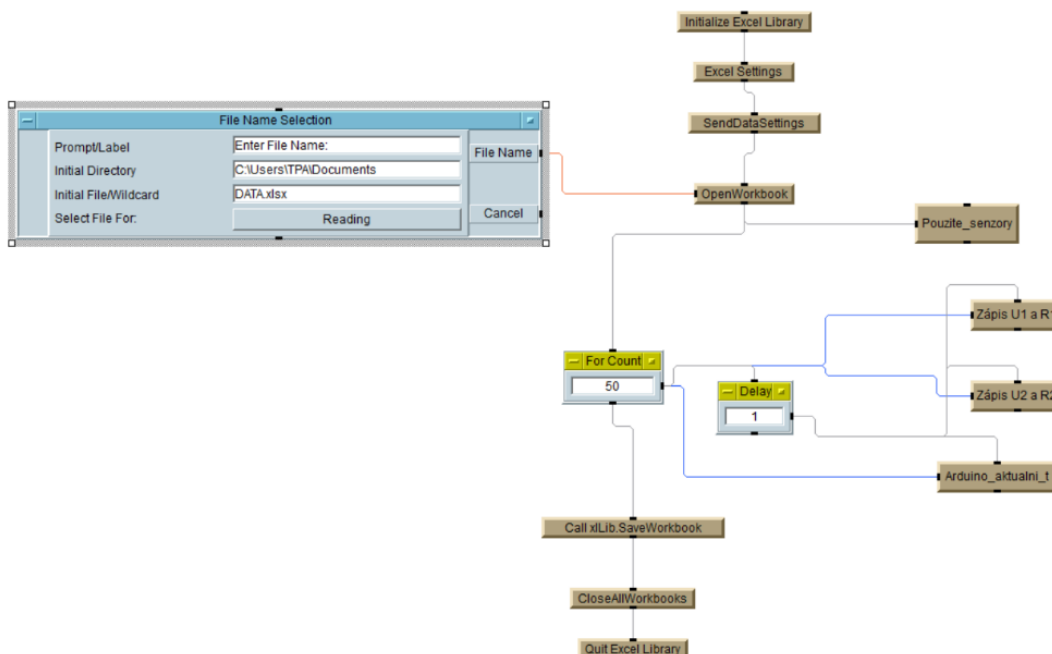


Obrázek 22. Funkce main

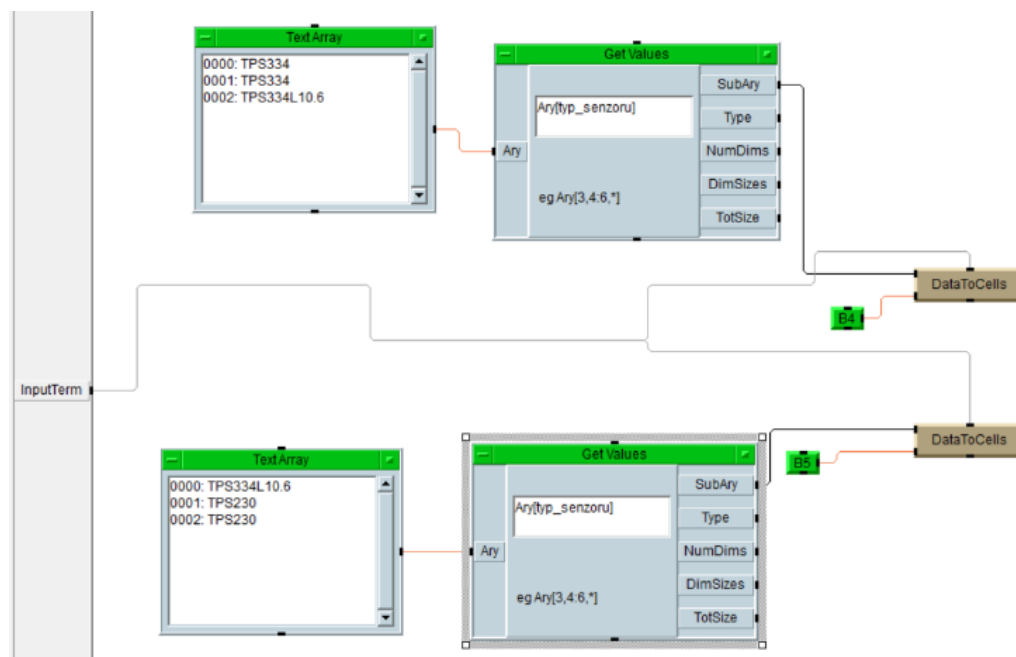


Obrázek 23 Funkce main v zobrazení v panelu

Další částí programu je uživatelský objekt nazvaný *Zpracování dat*. Lze ho vidět na obrázku (Obr. 24). Zde je použita inicializace Excelové knihovny a další funkce potřebné pro práci s MS Excel, tyto funkce byly použity z knihovny funkcí nabízených výrobcem softwaru. Tato část programu otevře předem připravený vzor v MS Excell a zapíše do něj hned dva typy měřených senzorů pomocí uživatelského objektu *Pouzite senzory*, kde podle hodnoty globální proměnné *typ_senzoru* vybere z textových polí název měřených senzorů a následně je zapíše do buněk předem otevřeného excelového souboru, viz obrázek (Obr. 25).

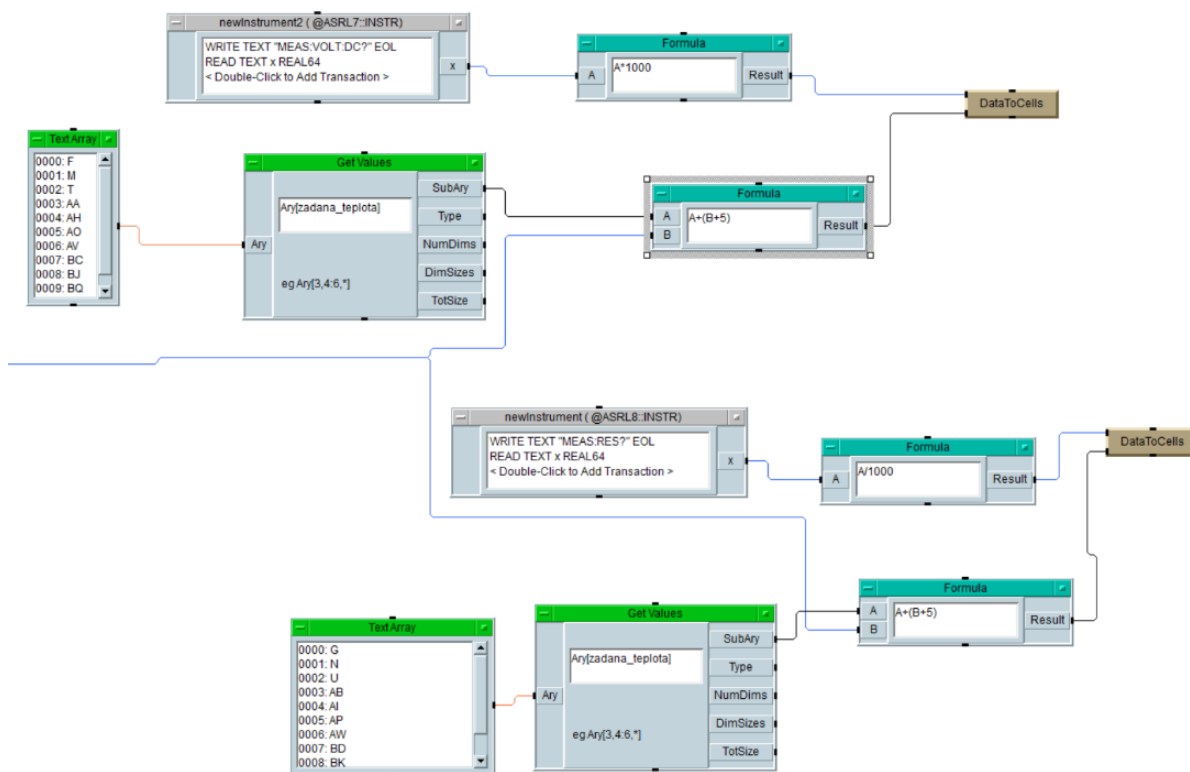


Obrázek 24. Uživatelský objekt *Zpracování dat*

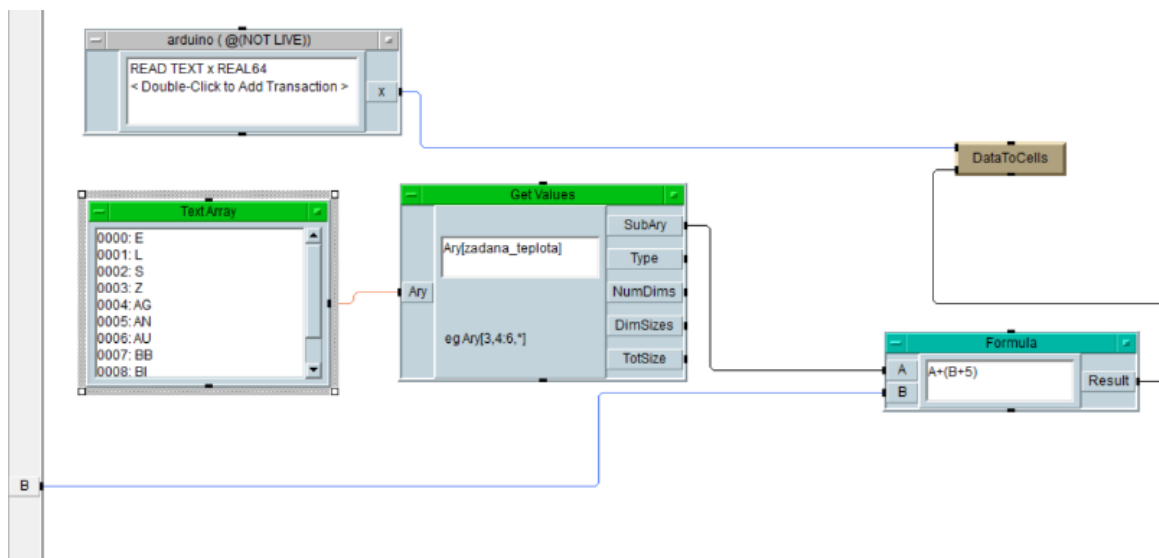
Obrázek 25. Uživatelský objekt *Pouzite_senzory*

Při spuštění programu se provede zápis padesáti hodnot (funkce *For cycle*) se sekundovým zpožděním (funkce *Delay*) mezi jednotlivým zápisem z měřicích zařízení. K jednomu měřenému senzoru náleží dva stolní multimetry, jeden z nich měří hodnoty odporu referenčních spojů zvolených termočlávkových baterií a druhý měří hodnoty napětí přímo na vývodu termočlátku. Zapojení jednotlivých stolních multimetrů musí být vždy stejné pro zajištění správné funkčnosti programu. Přesné adresy USB konektorů pro zapojení všech měřicích zařízení jsou všechny zmíněny v příloze P I, která je součástí této práce. Na obrázku (Obr. 26) lze vidět implementaci pro získání dat ze stolních multimetrů v uživatelském objektu *Zápis UI a RI*. Tento uživatelský objekt je spuštěn při zapnutí programu padesátkrát s jedno sekundovým zpožděním mezi jednotlivým zápisem. Při jednom spuštění tohoto uživatelského objektu dojde k přečtení požadovaný hodnoty ze stolních multimetru připojených k počítači. Jelikož je čtení hodnot z multimetrů vždy v základní jednotce, tak je následná hodnota vynásobena nebo vydělena hodnotou 1000 za účelem zapsání hodnot napětí v jednotkách mV a hodnot odporu v $k\Omega$ do excelového souboru. Podle hodnoty proměnné *zadaná_tepłota* je vybrán v textovém poli název sloupce v excelovém souboru, do kterého je hodnota zapsána. V bloku *formula*, jehož výstup je následně přiveden do spodního vstupu uživatelského objektu *DataToCells*, kde dochází k určení sloupce (hodnota získána na základě globální proměnné *zadaná_tepłota*) a řádku (hodnota získána na základě jedné z 50 aktuálních hodnot *for cyklu*) v excelovém souboru, kde se má daná hodnota zapsat.

Identickým způsobem funguje také uživatelský objekt *Zápis U2 a R2*, ve kterém jsou pouze rozdílné bloky dalších stolních multimetrů použitých u druhého měřeného senzoru.



Obrázek 26. Získání dat napětí U_1 a odporu R_1 ze stolních multimetrů



Obrázek 27. Uživatelský objekt *Arduino_aktualni_t*

Na obrázku (Obr. 27) je zobrazen poslední vytvořený uživatelský objekt *Arduino_aktualni_t*, jehož funkčnost spočívá v čtení aktuální teploty z mikropočítače, který je připojen k počítači. Princip funkčnosti tohoto uživatelského objektu je podobný jako u uživatelských

objektů, které mají za úkol číst hodnoty z použitých měřicích zařízení. Blok *arduino* čte hodnoty získané z mikropočítače, a následně je jeho výstup přiveden na horním vstupu uživatelského objektu *DataToCells*. Na spodní vstup *DataToCells* je přiveden výstup z bloku *Formula*, který nese informaci o sloupci a řádku na který se má hodnota zapsat do excelového souboru na základě globální proměnné *zadana_teplota* a aktuální hodnotou *For cyklu*. Kompletní program je uveden v elektronické příloze P V.

8 OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI SYSTÉMU PRO SBĚR DAT

V této kapitole je cílem ověření správné funkčnosti vytvořeného systému pro sběr dat pro laboratorní úlohu měření teploty bezdotykovým způsobem, která byla viz kap. 6 aktualizována za účelem rychlejšího a přesnějšího měření, a také dodržení časové dotace cvičení předmětu Senzory, ve kterém je laboratorní úloha zpracovávána.

Nejprve bylo nutné pro inovaci stávající laboratorní úlohy zapojení nově použitého PID regulátoru, výměna některých měřicích zařízení v podobě stolních multimetrů a následné propojení všech komponent zajišťujících správný průběh měření a získávání naměřených dat. Tento proces byl velmi zásadní pro další vývoj laboratorní úlohy. Veškerá kabeláž byla upravována a zapojována pod dohledem vedoucího práce přímo v laboratoři.

V této kapitole budou zhodnoceny veškeré výstupy z měření, kterým předcházelo zapojení a nastavení všech měřicích přístrojů do systému pro sběr dat. Kompletní naměřená data, včetně grafických výstupů, jsou dostupné v elektronických přílohách P III a P IV, které jsou zpracovány ve vzorovém protokolu z měření, jenž je taktéž součástí příloh této práce, viz příloha P II.

V následujících tabulkách (Tab. 2, Tab. 3 a Tab. 4) jsou zobrazeny průměrné hodnoty, včetně kombinované standardní nejistoty. Tato nejistota byla získána na základě následujícího vztahu:

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} \quad (22)$$

kde,

U_A je standardní nejistota typu A, resp. směrodatná odchylka naměřených dat,

U_B je standardní nejistota typu B, přesnost měření použitých stolních multimetrů.

Nejistota U_B byla zjištěna z dokumentace přiložené výrobcem multimetrů. Ostatní výpočty jsou součástí přílohy P III a P IV.

- Příklad výpočtu průměrné hodnoty t_T pro žádanou pokojovou teplotu z naměřených dat senzoru TPS 334 L10.6:

$$\sigma_{t_T} = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} (t_{Ti} - \bar{t}_T)^2} = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} (t_{Ti} - 23,60)^2} = 0,08 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (23)$$

- Příklad výpočtu kombinované standardní nejistoty pro žádanou pokojovou teplotu z naměřených dat napětí senzoru TPS 334 L10.6:
 - Výpočet pro standardní nejistotu typu A:

$$U_A = \sigma_{U_1} = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} (U_{1i} - \bar{U}_1)^2} = \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} (U_{1i} - (-0,002))^2} = 0,000 \text{ [mV]} \quad (24)$$

- Výpočet pro standardní nejistotu typu B na základě technické dokumentace od výrobce použitého stolního multimetru HMC 8012:

$$U_B = (0,015 \% \text{ z měřené hodnoty} + 0,002\% \text{ z rozsahu}) \quad (25)$$

$$U_B = (0,00015 * (-0,002) + 0,00002 * 400) = -0,0080003 \text{ [mV]} \quad (26)$$

$$U_C = \sqrt{U_A^2 + U_B^2} = \sqrt{0,000^2 + (-0,0080003)^2} = 0,0080003 \quad (27)$$

Tabulka 2. Naměřená data pro senzor TPS 334 L10.6

Teplota tělesa		Použité senzory			
		TPS 334 L10.6			
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_1 [mV]	U_{CU1} [mV]	R_1 [kΩ]	U_{CR1} [kΩ]
23,60	0,08	-0,002	0,008	32,652	0,092
25,09	0,16	0,006	0,008	31,927	0,001
30,98	0,87	0,051	0,009	30,973	0,181
35,36	0,25	0,081	0,008	29,765	0,158
40,79	0,56	0,125	0,009	28,663	0,147
45,58	0,30	0,161	0,008	27,581	0,129
50,75	0,40	0,206	0,010	26,577	0,135
55,67	0,23	0,251	0,008	25,530	0,106
60,55	0,10	0,295	0,008	24,694	0,058
65,42	0,10	0,333	0,008	23,890	0,042
70,21	0,02	0,376	0,008	23,449	0,056

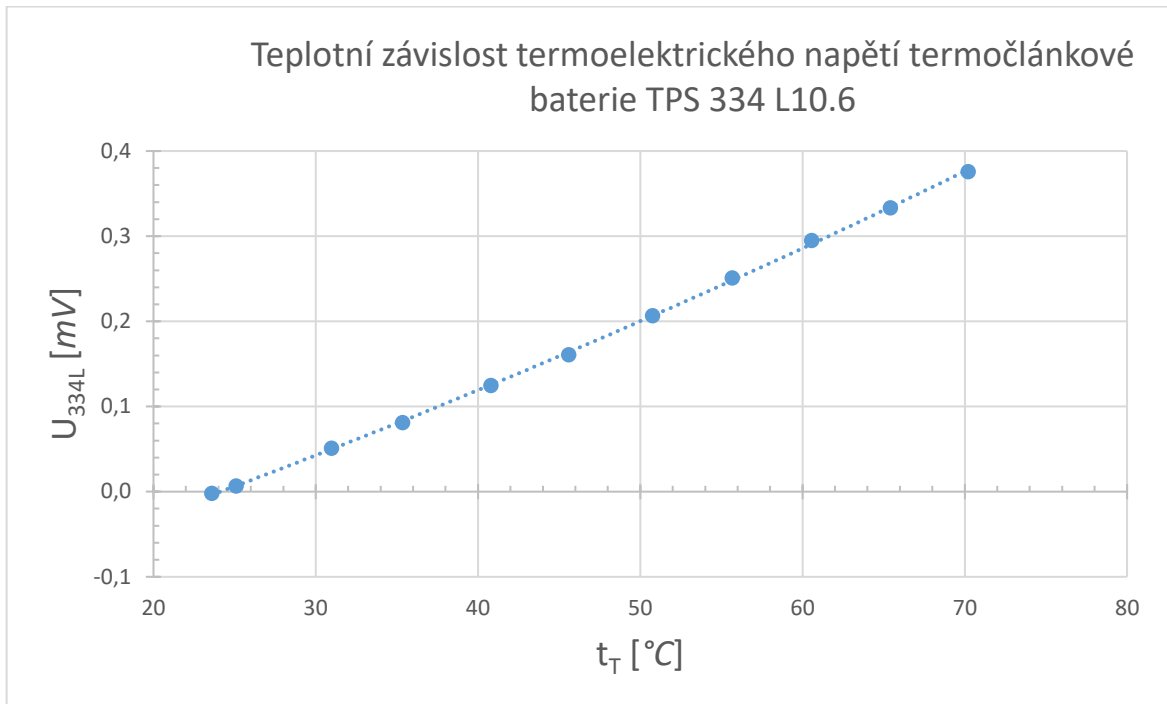
Tabulka 3. Naměřená data pro senzor TPS 230

Teplota tělesa		Použité senzory			
		TPS 230			
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_2 [mV]	U_{CU2} [mV]	R_2 [kΩ]	U_{CR2} [kΩ]
23,60	0,08	-0,012	0,008	106,337	0,333
25,09	0,16	0,011	0,009	104,140	0,277
30,98	0,87	0,147	0,019	102,083	0,397
35,36	0,25	0,250	0,011	99,163	0,390
40,79	0,56	0,395	0,015	96,559	0,348
45,58	0,30	0,524	0,010	93,808	0,335
50,75	0,40	0,674	0,016	91,273	0,337
55,67	0,23	0,819	0,008	88,649	0,292
60,55	0,10	0,979	0,009	86,210	0,267
65,42	0,10	1,142	0,008	82,998	0,121
70,21	0,02	1,320	0,013	81,506	0,050

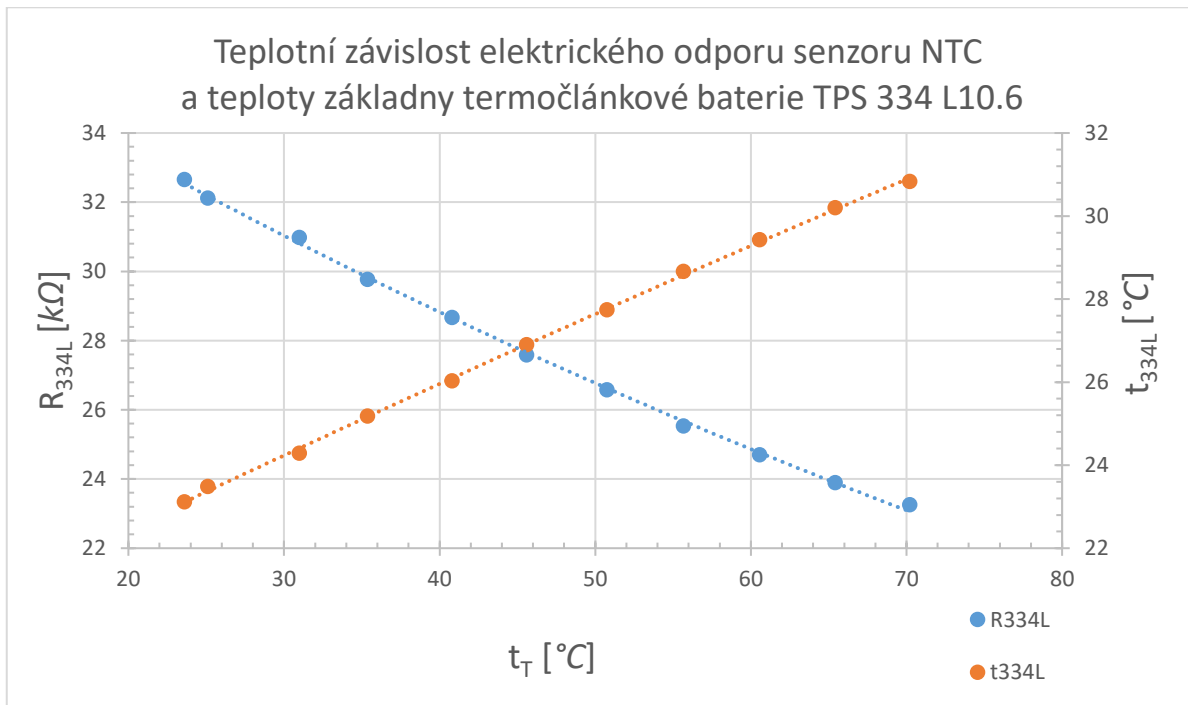
Tabulka 4. Naměřená data pro senzor TPS 334

Teplota tělesa		Použité senzory			
		TPS 334			
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_3 [mV]	U_{CU3} [mV]	R_3 [kΩ]	U_{CR3} [kΩ]
24,32	0,01	-0,013	0,008	30,488	0,015
24,97	0,04	0,014	0,008	30,353	0,019
31,07	0,80	0,249	0,029	29,937	0,135
35,41	0,33	0,403	0,009	29,177	0,109
40,74	0,47	0,613	0,019	28,392	0,141
45,56	0,34	0,808	0,012	27,629	0,091
50,69	0,33	1,027	0,014	26,926	0,095
55,33	0,08	1,234	0,009	26,105	0,100
60,69	0,34	1,488	0,008	25,363	0,106
65,27	0,08	1,709	0,014	24,404	0,124
70,61	0,12	1,975	0,010	23,618	0,068

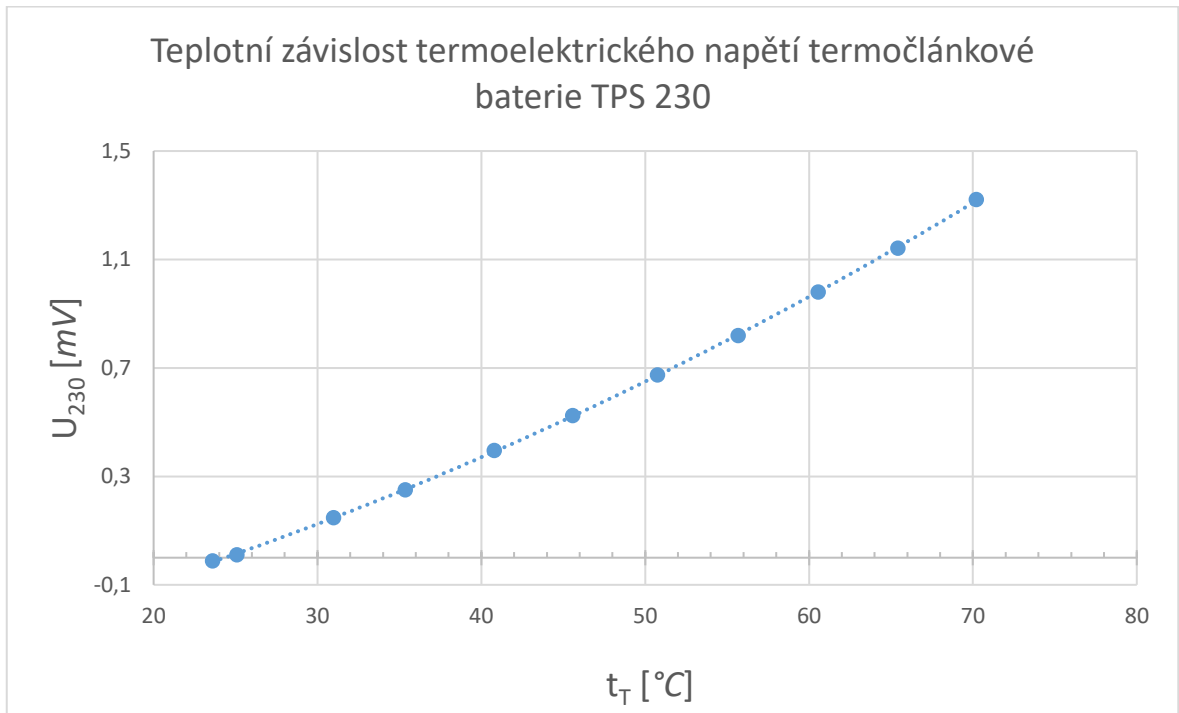
Z dat, které se nachází ve výše uvedených tabulkách, byly vytvořeny grafy statických charakteristik použitých tepelných senzorů, které jsou zobrazeny na následujících grafech, tj. Obr. 28, Obr. 29, Obr. 30, Obr. 31, Obr. 32, Obr. 33.



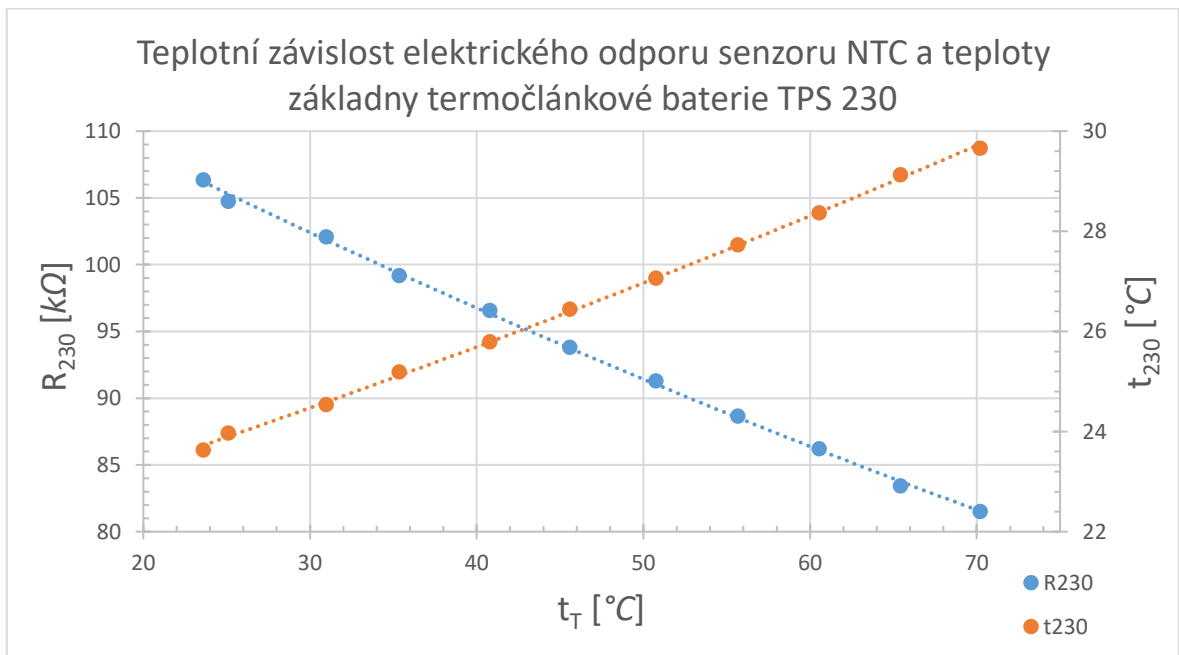
Obrázek 28. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334 L10.6



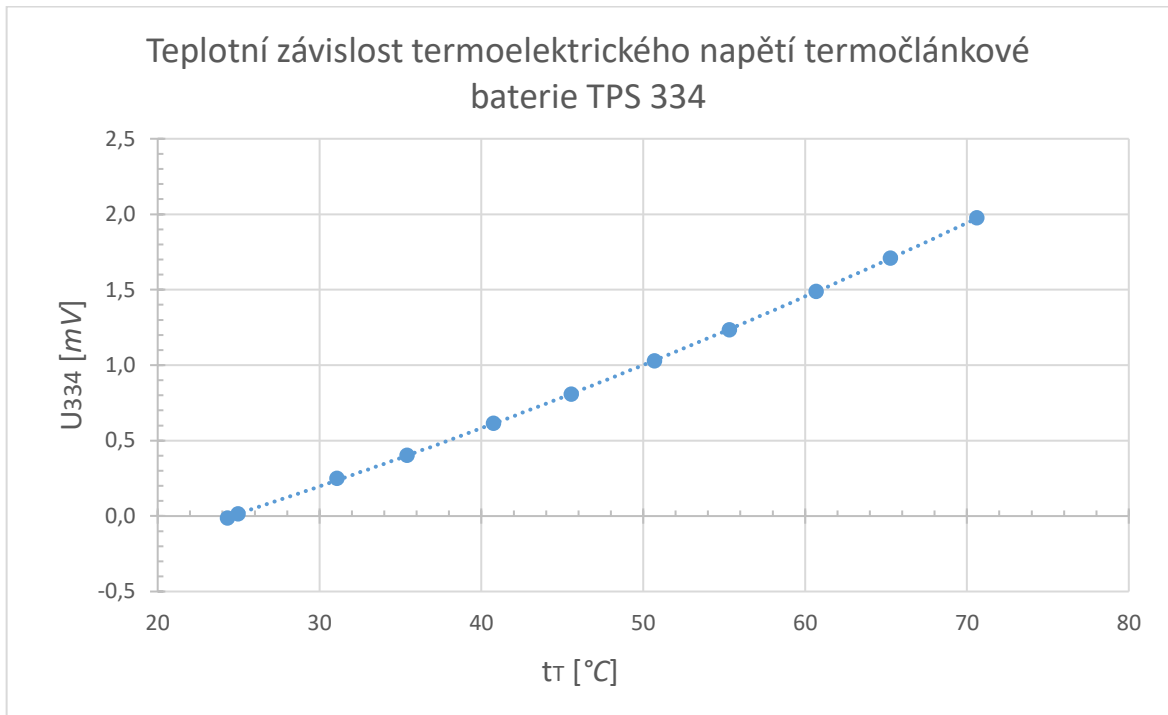
Obrázek 29. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334 L10.6



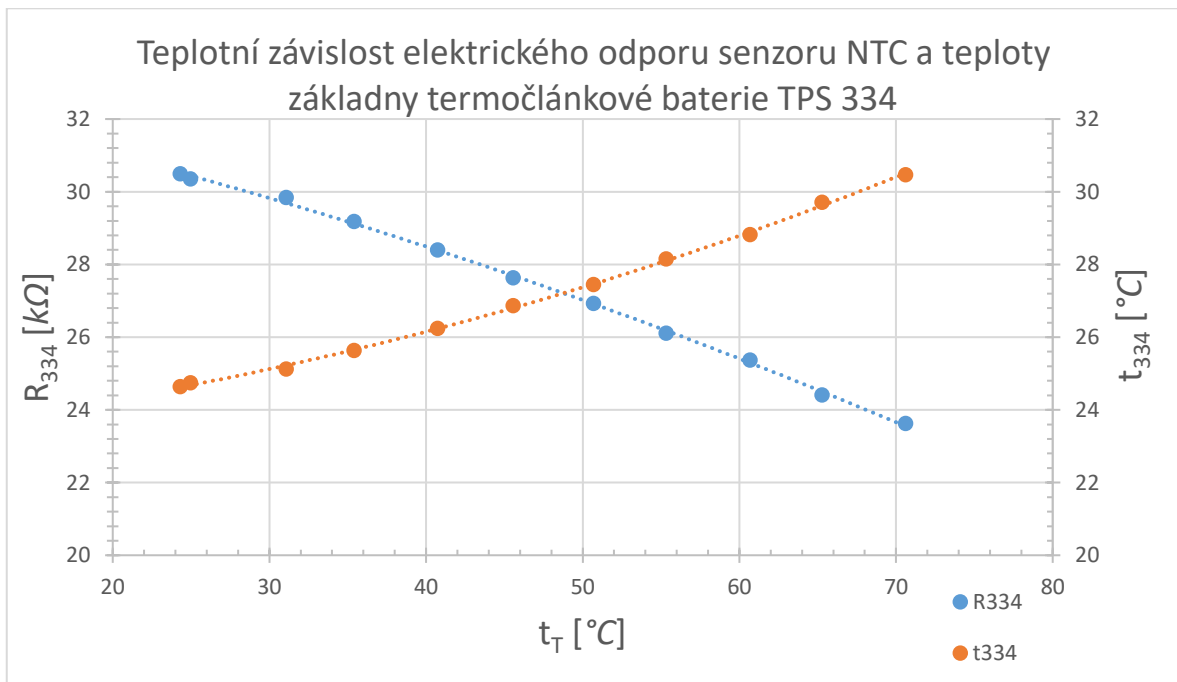
Obrázek 30. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 230



Obrázek 31. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 230



Obrázek 32. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334



Obrázek 33. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334

Z výše uvedených statických charakteristik vyplývá, že jejich průběhy odpovídají teoretickým předpokladům. U teplotních závislostí termoelektrických napětí všech použitých termočláňkových baterií se jedná o kladný exponenciální růst. Z grafů teplotní závislosti

(Obr. 29, Obr. 31, Obr. 33), je zřejmé, že se s rostoucí teplotou dochází k exponenciálnímu klesání hodnot odporu.

ZÁVĚR

Cílem této práce bylo navrhnout a vytvořit systém pro sběr dat pro laboratorní úlohu měření teploty bezdotykovým způsobem. Tato úloha je dostupná jako podpůrný výukový nástroj předmětu Senzory, který je vyučován na Fakultě aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně. Práce obsahuje dvě části, tj. teoretickou a praktickou.

Teoretická část práce se zabývá popisem základních pojmů souvisejících s řešenou problematikou a principy měření teploty bezdotykovým způsobem.

V praktické části je hlavním cílem návrh a realizace modernizace laboratorní úlohy a následné vytvoření funkčního systému pro sběr měřených dat. Po seznámení se stávajícím stavem úlohy bylo zjištěno, že způsob měření teploty je z důvodu použití dvupolohového regulátoru časově neefektivní. Z výše uvedeného bylo tedy nezbytné provést modernizaci laboratorní úlohy, a to z pohledu výměny přístrojové a měřicí techniky a vytvoření systému pro sběr dat. První provedenou změnou byla výměna dvupolohového regulátoru teploty za kombinovaný PID regulátor s dvupolohovým. Dále byla úloha rozšířena o další dva stolní multimetry, které oproti stávajícím ručním multimetrům disponují možností propojení s počítačem. K úloze byl také pro sledování aktuální hodnoty měřeného tělesa přidán mikropočítač, jenž byl také připojený k počítači. Program pro převod napětí na teplotu je implementovaný v použitém mikropočítači je součástí elektronické přílohy P VI.

Pro propojení všech používaných měřicích zařízení je vytvořen program v softwaru Vee Pro. Tento software je pro studenty fakulty známý z důvodu využití v jednom z předmětů, který studenti absolvují dříve než předmět Senzory. Cílem vytvořeného programu bylo nahradit zapisování měřených dat ručně za automatický zápis do předem připraveného souboru v MS Excel. Výstupem z uvedeného programu pro sběr dat jsou zpracované výsledné tabulky a grafy statických závislostí měřených veličin na teplotě v MS Excel. Tyto výstupy byly následně zpracovány v požadovaném rozsahu cvičení předmětu Senzory a slouží pro vypracování protokolu z měření. Na závěr bylo provedeno ověření správné funkčnosti systému pro sběr dat, včetně zmodernizované části laboratorní úlohy. Kompletní naměřená data jsou k dispozici v elektronických přílohách P III a P IV. Nedílnou součástí této práce je i aktualizovaná část návodu pro laboratorní úlohu, která je k dispozici v příloze P I. Rozsah provedených úprav odpovídá pouze zmodernizované části laboratorní úlohy.

Do budoucna by podle mého názoru mohlo dojít k rozšíření úlohy o více měřitelných senzorů, kdy by stačila v programové části pouze drobná změna pro zajištění správné funkčnosti. K současnému stavu úlohy by bylo dobré přidat ještě dva další stolní multimetry, které by zajistily změření měřených hodnot všech tří dostupných senzorů najednou.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] KREIDL, Marcel. Měření teploty: senzory a měřící obvody. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.
- [2] HALLIDAY, David, Robert RESNICK a Jearl WALKER. Fyzika: vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN isbn80-214-1868-0.
- [3] LYSENKO, Vladimír. Detektory pro bezdotykové měření teplot. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN isbn80-7300-180-2.
- [4] BRYNDA, Petr. Úvod do teorie termovizního měření. Cvut. cz [online]. [cit. 2015-09-28]. Available from: < [http://www. fd. cvut. cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda. pdf](http://www.fd.cvut.cz/projects/k611x1s/doc/works/teorie_brynda.pdf).
- [5] WALKER, Jearl, David HALLIDAY a Robert RESNICK. Fundamentals of physics: [extended]. 10th ed. Hoboken: Wiley, c2014. ISBN 978-1-118-23072-5.
- [6] 2.2 PLANCKŮV VYZAŘOVACÍ ZÁKON. In: Fakulta strojího inženýrství, Vysoké učení technické v Brně [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/file/vomm/0202.htm>
- [7] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. Senzory a měřící obvody. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1996. ISBN 80-01-01500-9.
- [8] HRUŠKA, František. Senzory: fyzikální principy, úpravy signálů, praktické použití [online]. Druhé, rozšířené. Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2010, 202 s. [cit. 2024-03-19]. ISBN 978-80-7454-096-7. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/10563/18582>
- [9] VOJÁČEK, Antonín. Co jsou BOLOMETRY a MIKROBOLOMETRY ? In: Automatizace.hw.cz [online]. [cit. 2024-03-20]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/clanek/2005111601>
- [10] ANGUS, Robert B. a Thomas E. HULBERT. VEE Pro: practical graphical programming. London: Springer, c2005. ISBN 1852338709.
- [11] Agilent VEE Pro User's Guide [online]. 8. vydání. USA: Agilent Technologies, 2004 [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.keysight.com/zz/en/assets/9018-41106/user-manuals/9018-41106.pdf?success=true>

- [12] LOGITRON S.R.O. PID regulátor Dixell XT141D 5C2TU s teplotním vstupem, analogovým výstupem a třemi relé [online]. [cit. 2024-03-27]. Dostupné z: <https://www.az4.shop/pid-regulator-dixell-xt141d-5c2tu-s-teplotnim-vstupem-analogovym-vystupem-a-tremi-rele-p2737/>
- [13] SKOČÍK, Petr, ed., 2020. SENZORY: Návodů pro zmodernizovanou část úloh laboratorních cvičení.
- [14] BALÁTĚ, Jaroslav, 2003. Automatické řízení. Praha: BEN - technická literatura. ISBN 80-7300-020-2.
- [15] Co znamená PID, 2003. AUTOMA - časopis pro automatizační techniku [online]. 4(3), 1 [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: https://automa.cz/cz/casopis-clanky/co-znamen-pid-2003_03_28768_3811/
- [16] DARENZO, Stephen E. Practical interfacing in the laboratory: using pc for instrumentation, data analysis and control. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003, xvii, 610 s. ISBN 0521815274
- [17] DIXELL. Základy teorie ON/OFF a PID regulace. Elektronické měřicí a regulační přístroje [online]. [cit. 2024-05-15]. Dostupné z: <https://www.dixell.cz/teorie-regulace/>
- [18] Arduino UNO - Geekcreit ATmega328. RaseL spol. s r.o. [online]. [cit. 2024-05-16]. Dostupné z: <https://www.rasel.cz/arduino-uno-geekcreit-p14565/>
- [19] Senzor infračerveného záření SMTIR9901/9902. In: OMNITRON.cz: *Omnitron s.r.o.* [online], [cit 2024-05-22]. Dostupné z: https://www.omnitron.cz/download/SMARTEC%20SMT_IR_CZ_30042004_2012.pdf
- [20] FRADEN, Jacob. Handbook of modern sensors: physics, designs, and applications. Fifth edition. Cham: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-19302-1.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Tzv.	Takzvaně
Tj.	To jest
Např.	Například
Kap.	Kapitola
cca	přibližně, asi
η	Účinnost
T	Termodynamická teplota
Q	Teplo
J	Joule
K	Kelvin
°C	Stupně Celsia
t	Celsiova teplota
°F	Stupeň Fahrenheita
ρ	Odrazivost
ε	Emisivita
M	Intenzita vyzařování
λ	Vlnová délka; Tepelná vodivost
B	Spektrální hustota zářivého toku; Byte
π	Ludolfovo číslo
c	Rychlost světla
W	Watt
m	Metr
k	Boltzmannova konstanta, Zesílení, Kilo
h	Planckova konstanta

e	Eulerovo číslo
b	Wienova posunovací konstanta
P	Výkon záření
σ	Stefan-Boltzmannova konstanta; Směrodatná odchylka, Konduktivita
A	Plocha
S	Plocha; Relativní spektrální citlivost
α	Pohlivost; Seebeckův koeficient
Φ	Zářivý tok
\int	Integrál
τ	Propustnost
Obr.	Obrázek
K	Integrální citlivost
V	Volt
U	Elektrické napětí
R	Elektrický odpor
NEP	Noise Equivalent Power
D	Detektivita
Hz	Hertz
φ	Kontaktní potenciál
Ω	Ohm
p	Pyroelektrický koeficient
∂	Parciální derivace
CCD	Charge Couple Device
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
DC	Stejnosměrný proud

Pt100	Platinový odporový snímač
PID	Proporcionální, Integrační, Derivační
MS	Microsoft
u	Akční veličina
y	Regulovaná veličina
w	Žádaná hodnota
e	Regulační odchylka
I/O	Vstup/Výstup
S/H	Vzorkování/Podržení
A/D	Analogově/Digitální
DIN	Deutsches Institut für Normung
ON	Zapnuto
OFF	Vypnuto
A	Ampér
m	Mili
M	Mega
HOT KEY	Programovací klíč
TTL	Tranzistorově tranzistorová logika
Pb	Pásmo proporcionality
cyt	Čas cyklu
PTC	Positive temperature coefficient
NTC	Negative temperature coefficient
TcJ	Termočlánek typu J
Tck	Termočlánek typu K
TcS	Termočlánek typu S

EEPROM	Elektricky mazatelná programovatelná paměť pouze pro čtení
SRAM	Statická paměť s přímým přístupem
€	Leží na (náleží)
LAN	Lokální/Místní síť
PC	Osobní počítač
USB	Univerzální sériová sběrnice
Σ	Suma

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1. Srovnání Kelvinovy, Celsiovy a Fahrenheitovy stupnice [2]	10
Obrázek 2. Černé těleso [3]	12
Obrázek 3. Spektrální hustota zářivého toku dokonale černého tělesa v závislosti na vlnové délce záření a teplotě zářiče [6]	13
Obrázek 4. Schéma měřicího řetězce [8]	16
Obrázek 5. Seebeckův jev [3]	19
Obrázek 6. Konstrukce termočláňkové baterie	20
Obrázek 7. Termočláňková baterie [7]	21
Obrázek 8. Monolitický Si termoelektrický blok [7].....	21
Obrázek 9. Provedení jednoduchého bolometru	22
Obrázek 10. Struktura integrovaného můstku z bolometrů [9]	23
Obrázek 11. Závislost spontánní polarizace na teplotě [3]	23
Obrázek 12. Kompenzovaný integrovaný pyroelektrický senzor.....	24
Obrázek 13. Stávající stav laboratorní úlohy	28
Obrázek 14. Vyhřívání měřeného tělesa s regulací teploty [13].....	29
Obrázek 15. Osazené termočláňkové baterie a jejich výstupní veličiny [13].....	30
Obrázek 16. PID regulátor Dixell XT141D [12]	35
Obrázek 17. Elektronické schéma pro zapojení regulátoru Dixell XT141D [12]	35
Obrázek 18. Zapojení regulátoru DIXELL XT141D 52CTU.....	37
Obrázek 19 GEEKCREIT ATmega 328 [18]	38
Obrázek 20 Grafy závislosti teploty na napětí	39
Obrázek 21. Program implementovaný do mikropočítače	40
Obrázek 22. Funkce main	42
Obrázek 23 Funkce main v zobrazení v panelu	43
Obrázek 24. Uživatelský objekt <i>Zpracování dat</i>	43
Obrázek 25. Uživatelský objekt <i>Pouzite_senzory</i>	44
Obrázek 26. Získání dat napětí U_1 a odporu R_1 ze stolních multimetrů.....	45
Obrázek 27. Uživatelský objekt <i>Arduino_aktualni_t</i>	45
Obrázek 28. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334 L10.6	50
Obrázek 29. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334 L10.6	50
Obrázek 30. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 230.....	51
Obrázek 31. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 230.....	51

Obrázek 32. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334.....52

Obrázek 33. Statická charakteristika tepelného senzoru TPS 334.....52

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Technické parametry PID Regulátoru Dixell XT141D [12]	36
Tabulka 2. Naměřená data pro senzor TPS 334 L10.6	48
Tabulka 3. Naměřená data pro senzor TPS 230.....	49
Tabulka 4. Naměřená data pro senzor TPS 334.....	49

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha P I: Aktualizovaný návod k laboratorní úloze pro bezdotykové měření teploty

Příloha P II: Vzorový protokol z měření

Příloha P III: Kompletní tabulky pro senzory TPS334 L10.6, TPS 230

Příloha IV: Kompletní tabulky pro senzory TPS 230, TPS 334

Příloha V: Vytvořený program pro sběr dat ve Vee Pro

Příloha VI: Vytvořený program pro mikropočítač

Příloha VII: Tabulka pro převod napětí zpět na teplotu

PŘÍLOHA P I: AKTUALIZOVANÝ NÁVOD K LABORATORNÍ ÚLOZE PRO DOTYKOVÉ MĚŘENÍ TEPLoty

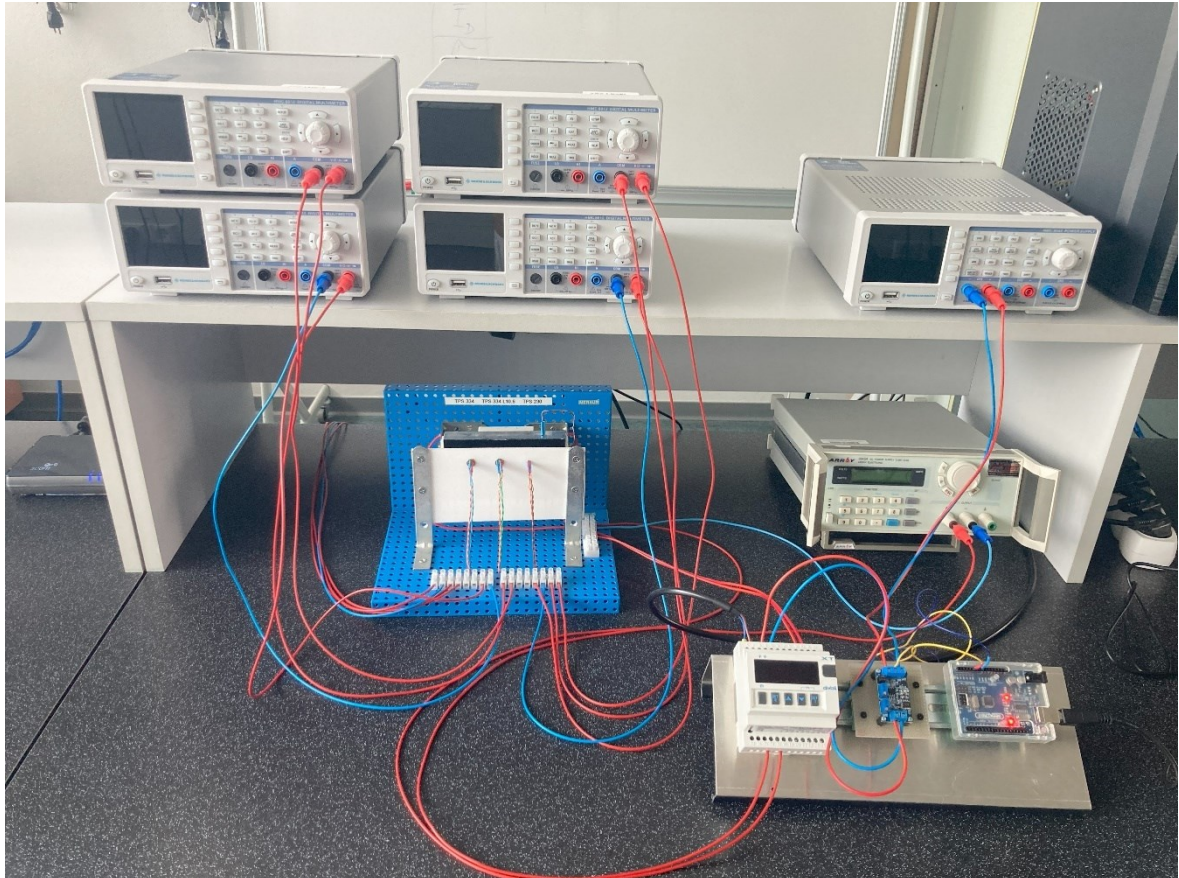
V této příloze je zaměřeno na aktualizaci návodu pro úlohu „Měření teploty bezdotykovým způsobem“. Níže jsou uvedeny pouze kapitoly 2.2, 2.3 a 2.5 z původního návodu [13], ve kterých byly provedeny změny. Upravené části textu jsou označeny červenou barvou. V kapitole 2.2 byla provedena aktualizace seznamu použité měřicí a přístrojové části vybavení úlohy. Konfigurace laboratorní úlohy a popis prvotního nastavení PID regulátoru byly upraveny v kapitole 2.3. Poslední úprava byla provedena v části kapitoly 2.5, tj. Konfigurace úlohy s regulátorem teploty.

2.2 Seznam použitých přístrojů

Rohde & Schwarz - HMC 8043	3 – kanálový programovatelný napájecí zdroj <ul style="list-style-type: none">Napájení převodníku I/U
4x Rohde & Schwarz - HMC 8012	Digitální stolní multimetry <ul style="list-style-type: none">Měření U_{230} [mV], U_{334} [mV] a U_{334L} [mV]Měření R_{230} [kΩ], R_{334} [kΩ] a R_{334L} [kΩ]
Arduino UNO - Geekcreit ATmega328	Mikropočítač <ul style="list-style-type: none">Slouží pro převod napětí U [V] na teplotu t [°C]
Dixell XT141D 5C2TU	PID regulátor teploty <ul style="list-style-type: none">Referenční teplota tělesaRegulace teploty měřeného tělesaOdporový senzor teploty – Pt100
Převodník I/U	Převodník unifikovaného proudového signálu (4 ÷ 20 mA) na napětí (0 ÷ 5 V)
ARRAY 3645A	Programovatelný napájecí zdroj <ul style="list-style-type: none">Napájení topných těles

2.3 POPIS A ZJEDNODUŠENÉ SCHÉMA ZAPOJENÍ LABORATORNÍ ÚLOHY

Provedení laboratorní úlohy zaměřené na měření teploty bezdotykovým způsobem je ukázáno na obr. 2.1, kde se nachází ve výchozím zapojení a se základní přístrojovou konfigurací.



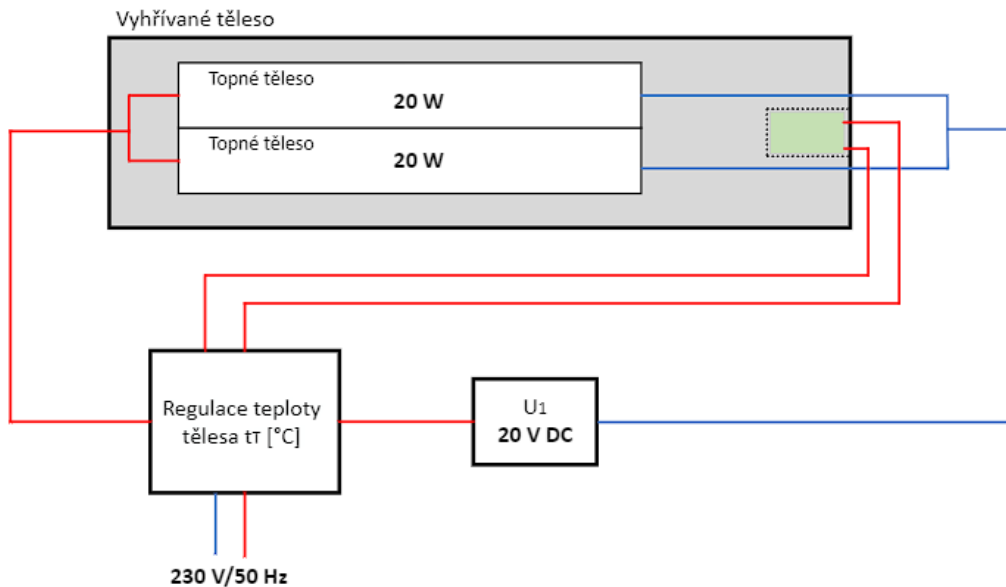
Obrázek 2.1: Měření teploty bezdotykovým způsobem

Měřené hliníkové těleso, viz obr. 2.2 je vyhříváno v rozsahu teplot od 25 do 70 °C prostřednictvím dvou paralelně zapojených odporových topných těles, každé o výkonu 20 W. Topná tělesa jsou realizována metal oxidovými rezistory ROYAL OHM – 281 (20 W, 22 Ω), která jsou přes reléový výstup regulátoru napájena z programovatelného zdroje ARRAY - 3645A (0-36 V DC, 0-3 A). Z provozních důvodů je vhodné napájecí zdroj napětově omezit na hodnotu 20 V DC. Programovatelný napájecí zdroj Rohde & Schwarz - HMC 8043, viz obr. 2.1, má výstupní kanál č.1 nastaven na 7,5 V, a zajišťuje napájení převodníku. Výstupní signál převodníku je připojen na PIN A0 mikropočítače Arduino UNO - Geekcreit ATmega328. Napájení mikropočítače je zajištěno pomocí USB kabelu připojenému k PC. Regulace teploty měřeného tělesa je v tomto případě prováděna automaticky pomocí PID regulátoru DIXEL XT141D 5C2TU, který je napájen ze sítě nízkého napětí 230 V/50 Hz.

Regulátor sleduje teplotu vyhříváného tělesa pomocí stávajícího odporového senzoru teploty Pt100, viz obr. 2.2. Regulátor současně zobrazuje požadovanou (nastavenou) i aktuální (referenční) teplotu tělesa t_T .

Poznámka:

vyhřívané hliníkové těleso je od nosné kovové konstrukce, viz obr. 2.1, tepelně izolováno.



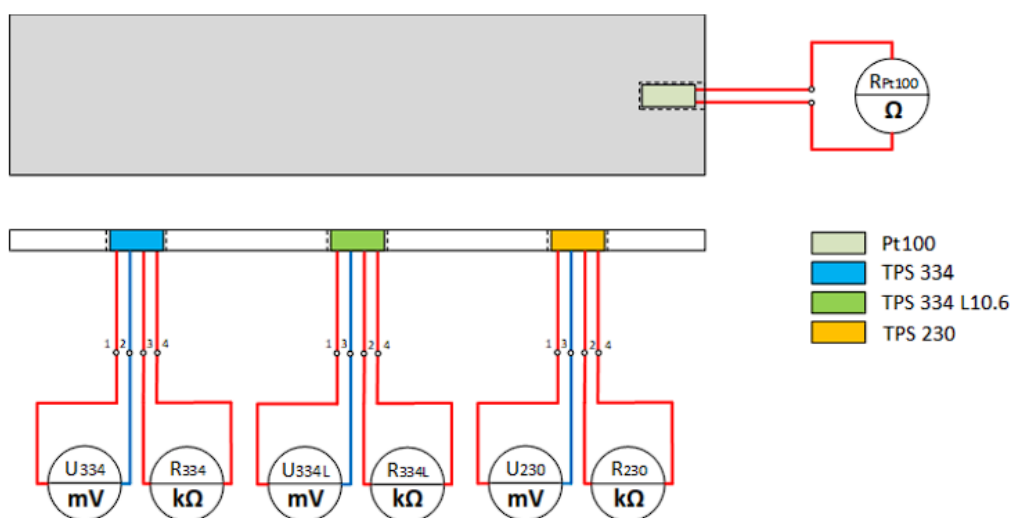
Obrázek 2.2 Vyhřívání měřeného tělesa

Hlavním cílem úlohy je měření statických charakteristik vybraných senzorů infračerveného záření. Za tímto účelem je úloha osazena celkem 3 různými typy termočláňkových baterií, viz obr. 2.3:

- Tepelné senzory infračerveného záření
 - Termočláňkové baterie
 - TPS 230, TPS 334 a TPS 334 L10.6 od společnosti PerkinElmer

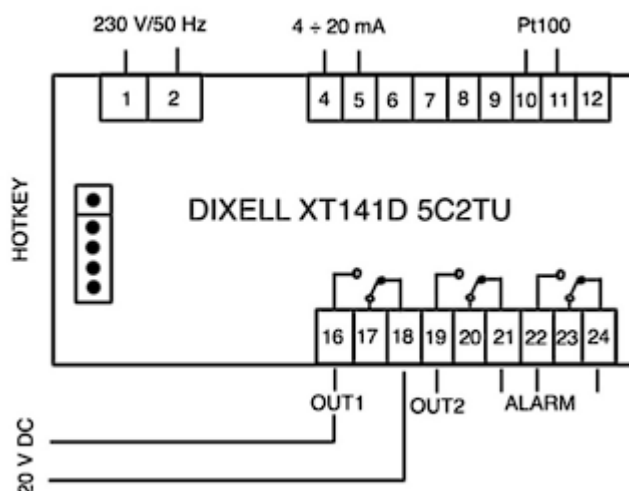
Jejich rozmístění a způsob osazení je patrný z obr. 2.3, jedná se o pohled na měřené těleso shora. Podrobná technická specifikace jednotlivých senzorů je uvedena v elektronické příloze E-P2.1 až E-P2.3 a po stránce teoretické jsou popsány v kap. 2.4.4. **Vyhřívané těleso je osazeno odporovým senzorem teploty Pt100, který slouží k měření aktuální teploty měřeného tělesa, viz obr. 2.2.**

Výstupní veličiny termočlávkových baterií, které jsou označeny na obr. 2.3, konkrétně termoelektrická napětí U_{334} [mV], U_{334L} [mV] a U_{230} [mV], jsou měřena pomocí digitálních stolních multimetrů HMC 8012 od ROHDE & SCHWARZ, viz obr. 2.1, nahoře. Mimo uvedené jsou termočlávkové baterie opatřeny i vývody z odporových polovodičových senzorů teploty, konkrétně termistorů typu NTC, které jsou využívány pro měření teploty základny popisovaných baterií, viz kap. 2.4.4. Odpovídající veličiny, tj. elektrický odpor R_{334} [kΩ], R_{334L} [kΩ] a R_{230} [kΩ] jsou také měřeny stolními multimetry HMC 8012.



Obrázek 2.3: Osazené termočlávkové baterie a jejich výstupní veličiny

Na obr. 2.4 je schematicky zobrazena a označena svorkovnice regulátoru teploty DIXELL XT141D 5C2TU pro možné připojení napájení, odporového senzoru teploty Pt100 a pro výstup napájecího zdroje ARRAY 3645A pro výhřev topných těles.



Obrázek 2.4: Schéma svorkovnice regulátoru DIXEL XT141D 5C2TU

2.4 Postup měření

- Konfigurace úlohy s PID regulátorem teploty
 - a) Podle obr. 2.2 uvedeného v kap. 2.3 zapojte PID regulátor teploty DIXELL – XT141D - 5C2TU. Schéma zapojení svorkovnice regulátoru je zobrazeno na obr. 2.4 v téže kapitole. Správnost zapojení nechte ověřit vyučujícím.
 - b) Z provozních důvodů výstupní kanál zdroje ARRAY - 3645A (0-36 V DC, 0-3 A), který je určený pro napájení odporových topných těles, nastavte na 20 V DC, dále napájení regulátoru připojte do zásuvky sítě nízkého napětí 230 V/50 Hz. Výstup 1 programovatelného napájecího zdroje Rohde & Schwarz - HMC 8043 nastavte na hodnotu 7,5 V. Požadované nastavení proveďte v režimu OFF, tj. s vypnutými výstupy u všech tří kanálů zdroje. Zdroj v tomto režimu startuje automaticky. Stav výstupů je signalizován na displeji, konkrétně v levém horním rohu je uvedeno M OFF a současně podsvícením tlačítka MASTER (ON/OFF). Pokud tlačítko nesvítí, tak jsou výstupy zdroje vypnuty, v opačném případě zapnuty. MASTER se nachází na předním panelu zdroje a plní funkci hlavního vypínače pro výstupy všech tří kanálů zdroje, které lze podle potřeby ovládat i jednotlivě. K tomu účelu slouží tlačítka CH1 (ON/OFF), CH2 (ON/OFF) a CH3 (ON/OFF), aktivace je opět signalizována podsvícením.
 - c) Zapněte výstup kanálu zdroje určený pro vyhřívání topných těles přes regulátor, tj. pouze tlačítko ON/OFF.
- Uvedené nastavení se provádí při první instalaci regulátoru a na pokyn vyučujícího:
 - V menu regulátoru proveďte výběr a nastavení senzoru teploty, který bude využíván pro regulaci teploty vyhřívajícího tělesa. V tomto případě bude zpětnou vazbu regulace zajišťovat odporový senzor teploty Pt100, viz obr. 2.2, kap. 2.3. Pro vstup do programovacího menu regulátoru použijte tlačítka **SET1 + ▼** (šipka směrem dolů). Obě tlačítka stiskněte a podržte po dobu **3 s**. Pomocí tlačítek **▲▼** pak vyberte parametr **Pbc** (konfigurace senzoru teploty) a stiskněte tlačítko **SET1**. Prostřednictvím **▲▼** nastavte požadovaný typ senzoru teploty, tj. **Pt** (= Pt100). Výběr opět potvrďte stiskem tlačítka **SET1**. Dále přejděte pomocí **▲▼** na **Pr2** a výběr potvrďte pomocí **SET1**. Regulátor po vás bude vyžadovat zadání hesla, tj. **321**. Nastavení hesla provedete pomocí **▲▼** a následný stisk tlačítka **SET1** vás posune na další cifru, po zadání poslední číslice vás stisk tlačítka **SET1** přesune do programovacího menu

Pr2. V programovacím menu **Pr2** pomocí **▲▼** nastavte jednotlivé parametry takto: **Pb = 10, int = 350, dEt = 4, Sr = 0, rS = 0, Ar = 0, cyt = 10, drb = 0**. Pro opuštění programovacího menu regulátoru použijte tlačítka **SET1 + ▲** (šipka směrem nahoru) nebo vyčkejte **10 s** a opuštění uvedeného menu se provede automaticky. Regulátor teploty vypněte a znovu zapněte.

- Dále v programovacím menu regulátoru nastavte hystereze u obou jeho výstupů na minimální hodnotu, tj. **0,0 °C**. Pro vstup do menu opět stiskněte a podržte po dobu **3 s** tlačítka **SET1 + ▼**. Pomocí tlačítek **▲▼** nejprve vyberte parametr Hy1 (nastavení hodnoty hystereze pro **OUT1**) a stiskněte tlačítko **SET1**. Změnu hodnoty proveďte prostřednictvím **▲▼** a nastavení opět potvrďte stiskem **SET1**. Nastavení opakujte i pro parametr Hy2. Po dokončení opusťte programovací menu regulátoru stiskem tlačítek **SET1 + ▲** nebo vyčkejte po dobu **10 s** a požadovaná operace se provede automaticky.
- d) Dále postupujte propojením zadaných senzorů s měřicími přístroji. Pro měření U_{334} použijte vždy digitální stolní multimetr č. 29034 a připojte k počítači na USB (COM7) a pro měření R_{334} použijte vždy digitální stolní multimetr označený č. 29035 a připojte k počítači na USB(COM8). Pro měření termoelektrického napětí U_{230} použijte vždy digitální stolní multimetr označený č. 29038 a připojte k počítači na USB(COM9). Pro měření R_{230} použijte vždy digitální stolní multimetr označený č. 29037 a připojte k počítači na USB(COM3). Pro měření U_{334L} a R_{334L} využijte dvojici stolních multimetrů, která aktuálně není obsazena jedním z výše zmíněných senzorů. Napájecí kabel mikropočítače připojte k počítači vždy na USB(COM5). Spusťte program pro automatizovaný sběr dat. Funkci main přepněte do zobrazení „v panelu“ a zobrazí se vám volitelné menu. Zvolte dvojici senzorů, pro kterou chcete provést sběr dat. Vyberte požadovanou teplotu pro měření. Při dosažení žádané teploty zobrazené na displeji regulátoru klikněte na „Spustit zápis“ a následně potvrďte výběr předem vytvořeného souboru v Excelu pro tuto laboratorní úlohu. Vždy pro následující měření změňte pouze výběr požadované teploty, není nutné opakovat výběr použitých senzorů.
- e) Prostřednictvím regulátoru teploty vyhřívejte měřené těleso v rozsahu teploty od **25** do **70 °C** a to po **5 °C**.
- f) Změnu žádané hodnoty, resp. nastavení teploty vyhřívaného tělesa proveďte podle následujícího postupu:

- Na regulátoru stiskněte tlačítko **SET1** a podržte po dobu **2 s**. Následně pomocí tlačítek **▲▼** proveďte změnu nastavení teploty na požadovanou hodnotu a potvrďte opět stiskem **SET1**. V případě nečinnosti po dobu **10 s** se nově nastavená hodnota uloží automaticky.
- Poznámka: postup je platný pro použitý výstup regulátoru **OUT1**, viz obr. 2.4 v kapitole 2.3. Pro výstup **OUT2** je změna prováděna pomocí tlačítka **SET2**. Oba výstupy umožňují nezávislé nastavení i použití.

g) Dále postupujte podle bodu zadání č. 5 až 6 uvedených v postupu měření stanoveného pro základní, tj. výchozí konfiguraci úlohy.

PŘÍLOHA P II: VZOROVÝ PROTOKOL Z MĚŘENÍ

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta aplikované informatiky			
Předmět:		Senzory - AP4SE	
Název úlohy:		Bezdotykové měření teploty	
Datum měření/odevzdání:		14.05.2024/21.05.2024	
Jméno:		Maxmilián Macháč	
Skupina:		X	
Číslo měření:	2	Hodnocení:	

1. Popis úlohy:

U většiny technologických procesů patří teplota mezi nejdůležitější a tudíž nejčastěji měřené veličiny. Teplotu lze stanovit více způsoby, resp. různými principy měření. Předmětná úloha je zaměřená na měření teploty bezdotykovým způsobem, který má především uplatnění tam, kde nelze použít dotykový způsob měření, např. u pohybujiících nebo rotujících těles. K tomu účelu se v praxi nejvíce používají tepelné senzory infračerveného záření. Typickým představitelem uvedené skupiny senzorů jsou termočláňkové baterie, které jsou součástí i této úlohy.

2. Cíl měření:

Seznamte se v rámci základní konfigurace úlohy s používaným přístrojovým vybavením. Příslušná specifikace a manuály jsou k dispozici na měřicím pracovišti.

Naměřte, zpracujte a vyhodnoťte statické charakteristiky zadaných senzorů infračerveného záření, konkrétně termočláňkových baterií, viz postup uvedený v kap. 2.5. Cílem je tedy stanovit teplotní závislost termoelektrického napětí termočláňkových baterií a současně elektrického odporu termistorů typu NTC, které v tomto případě slouží k měření teploty základen popisovaných baterií, viz kap. 2.4.4.

3. Vypracování:

3.1 Použité přístroje:

Napájecí zdroj: ARRAY 3645A 0 - 36 V/0 – 3 A DC

Digitální stolní multimetry: 4x HMC 8012 od ROHDE & SCHWARZ

Napájecí zdroj pro převodník: HMC 8043

Mikropočítač: Arduino UNO - Geekcreit ATmega328

Převodník I/U: Převodník proudu (4 – 20 mA) na napětí (0 – 5 V)

3.2 Tabulky naměřených a vypočítaných hodnot:

Tabulka 3.2.1 Naměřené a vypočítané hodnoty pro TPS 334

Teplota tělesa		Použité senzory				
		TPS 334				
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_{344} [mV]	U_{Cu344} [mV]	R_{344} [kΩ]	U_{CR3} [kΩ]	t_{334} [°C]
24,32	0,01	-0,013	0,008	30,488	0,015	24,639
24,97	0,04	0,014	0,008	30,353	0,019	24,738
31,07	0,80	0,249	0,029	29,937	0,135	25,047
35,41	0,33	0,403	0,009	29,177	0,109	25,625
40,74	0,47	0,613	0,019	28,392	0,141	26,240
45,56	0,34	0,808	0,012	27,629	0,091	26,858
50,69	0,33	1,027	0,014	26,926	0,095	27,444
55,33	0,08	1,234	0,009	26,105	0,100	28,152
60,69	0,34	1,488	0,008	25,363	0,106	28,814
65,27	0,08	1,709	0,014	24,404	0,124	29,703
70,61	0,12	1,975	0,010	23,618	0,068	30,462

Tabulka 3.2.2 Naměřené a vypočítané hodnoty pro TPS 334 L10.6

Teplota tělesa		Použité senzory				
		TPS 334 L10.6				
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_{334L} [mV]	U_{Cu334L} [mV]	R_{334L} [kΩ]	U_{CR334L} [kΩ]	t_{334L}
23,60	0,08	-0,002	0,008	32,652	0,092	23,112
25,09	0,16	0,006	0,008	31,927	0,001	23,610
30,98	0,87	0,051	0,009	30,973	0,181	24,286
35,36	0,25	0,081	0,008	29,765	0,158	25,176
40,79	0,56	0,125	0,009	28,663	0,147	26,026
45,58	0,30	0,161	0,008	27,581	0,129	26,897
50,75	0,40	0,206	0,010	26,577	0,135	27,742
55,67	0,23	0,251	0,008	25,530	0,106	28,662
60,55	0,10	0,295	0,008	24,694	0,058	29,430
65,42	0,10	0,333	0,008	23,890	0,042	30,196
70,21	0,02	0,376	0,008	23,449	0,056	30,629

Tabulka 3.2.1 Naměřené a vypočítané hodnoty pro TPS 230

Teplota tělesa		Použité senzory				
		TPS 230				
t_T [°C]	σ_{t_T} [°C]	U_{230} [mV]	U_{CU230} [mV]	R_{230} [kΩ]	U_{CR230} [kΩ]	t_{230} [°C]
23,60	0,08	-0,012	0,008	106,337	0,333	23,629
25,09	0,16	0,011	0,009	104,140	0,277	24,093
30,98	0,87	0,147	0,019	102,083	0,397	24,538
35,36	0,25	0,250	0,011	99,163	0,390	25,189
40,79	0,56	0,395	0,015	96,559	0,348	25,787
45,58	0,30	0,524	0,010	93,808	0,335	26,440
50,75	0,40	0,674	0,016	91,273	0,337	27,062
55,67	0,23	0,819	0,008	88,649	0,292	27,727
60,55	0,10	0,979	0,009	86,210	0,267	28,365
65,42	0,10	1,142	0,008	82,998	0,121	29,238
70,21	0,02	1,320	0,013	81,506	0,050	29,658

Tabulka s konstantami při teplotě 25 °C :

Termočláneková baterie	T_{25} [K]	β	R_{25} [kΩ]
TPS 334	298,15	3964	30
TPS 230	298,15	3964	100
TPS 334L10.6	298,15	3964	30

R_{25} – Odpor NTC při teplotě 25 °C

β – Teplotní koeficient

T_{25} – teplota v Kelvinech při 25 °C

Ukázkový výpočet pro TPS 230 $t_T = 40,79$ °C :

$$t_{230} = \frac{\beta \cdot T_{25}}{T_{25} \cdot \ln\left(\frac{R_{230}}{R_{25}}\right) + \beta} - 273,15 = \frac{3964 \cdot 298,15}{298,15 \cdot \ln\left(\frac{96,559}{100}\right) + 3964} - 273,15$$

$$t_{230} = 298,757 - 273,15 = 25,787 \text{ [°C]}$$

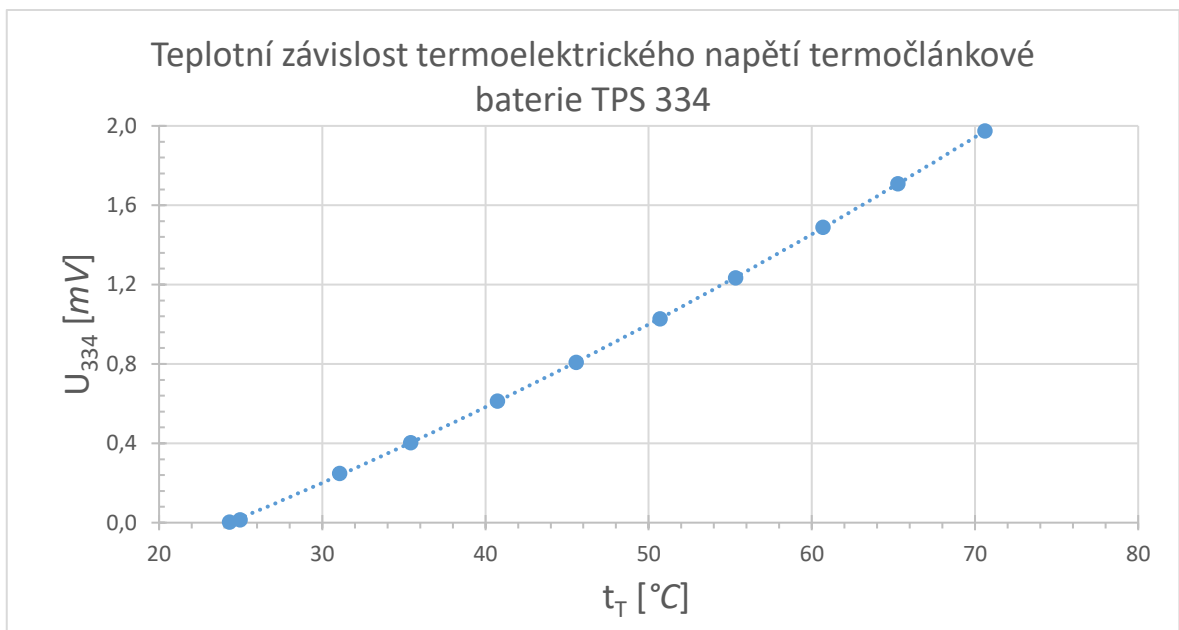
Ukázkový výpočet pro průměrnou teplotu měřeného tělesa při pokojové teplotě :

$$\bar{t}_T = \frac{t_{T1} + t_{T2} + \dots + t_{T50}}{50} = \frac{23,52 + 23,53 + \dots + 23,68}{50} = 23,60 \text{ [°C]}$$

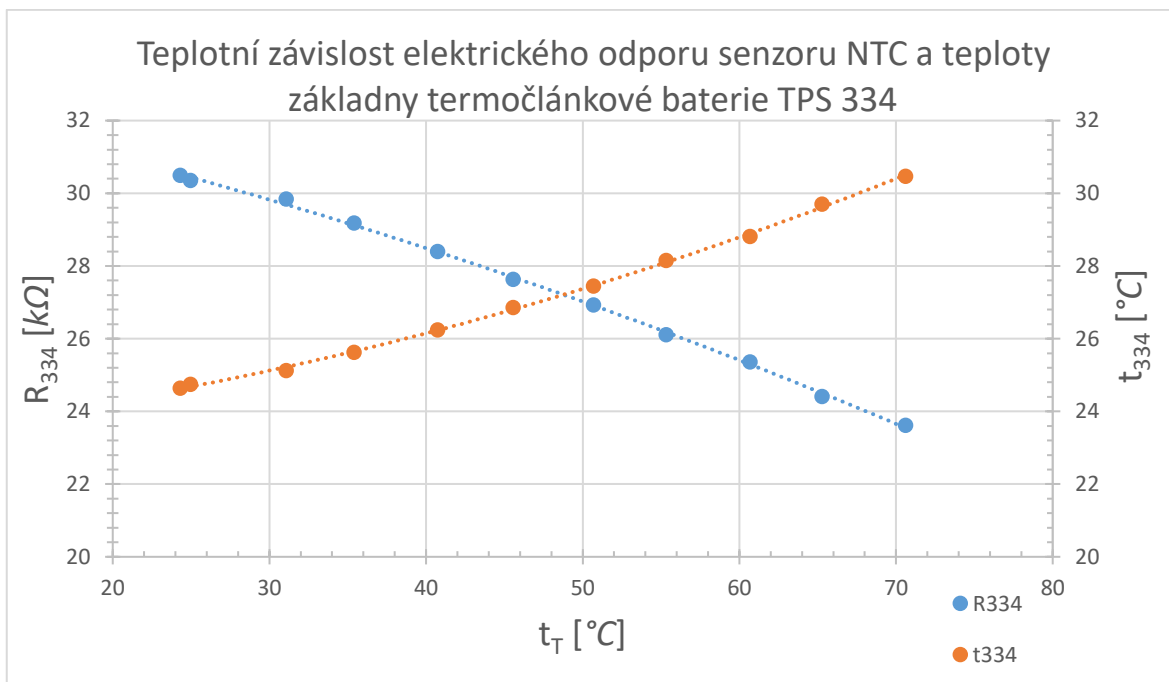
Ukázkový výpočet pro průměrné napětí termočládku při pokojové teplotě :

$$\bar{U}_1 = \frac{U_{1_1} + U_{1_2} + \dots + U_{1_{50}}}{50} = \frac{-0,003 + (-0,002) + \dots + (-0,002)}{50} = -0,002 \text{ [mV]}$$

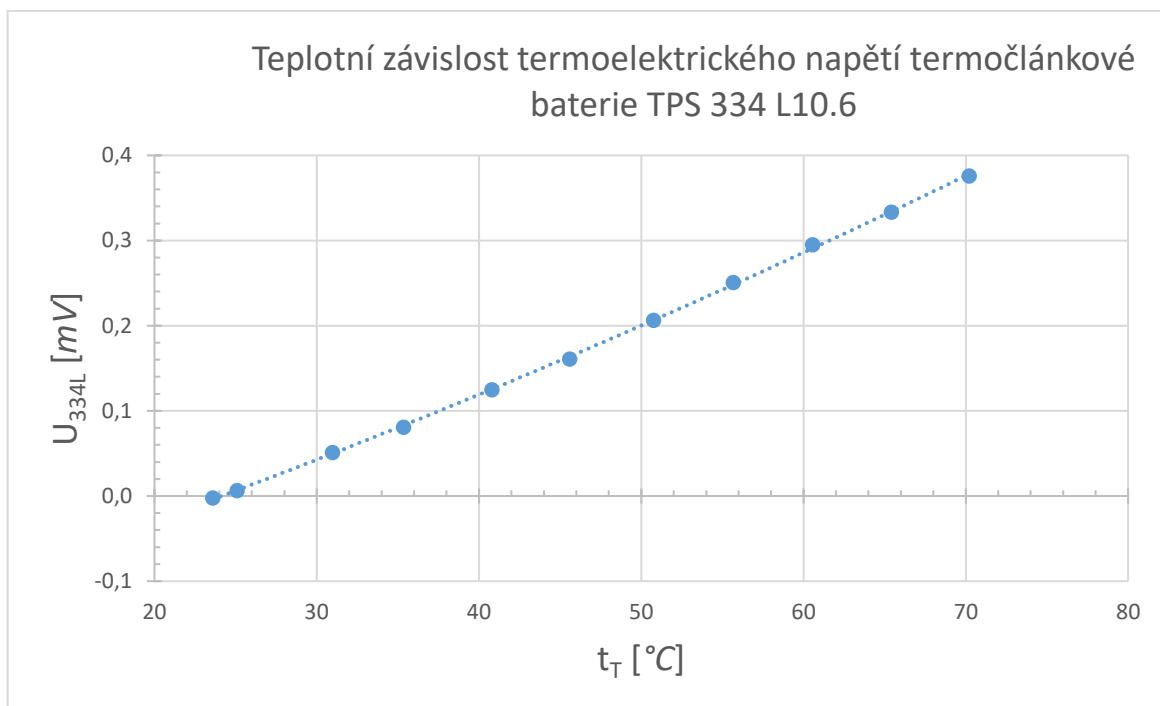
3.3 Grafy:



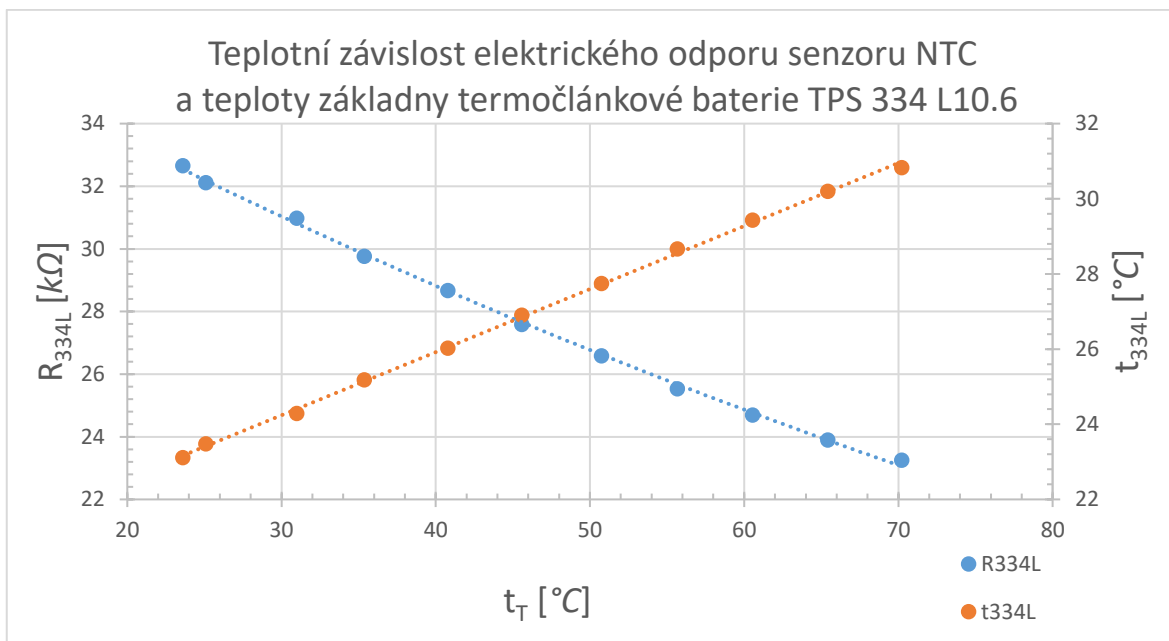
Obrázek 3.3.1 Teplotní závislost termoelektrického napětí termočládkové baterie TPS 334



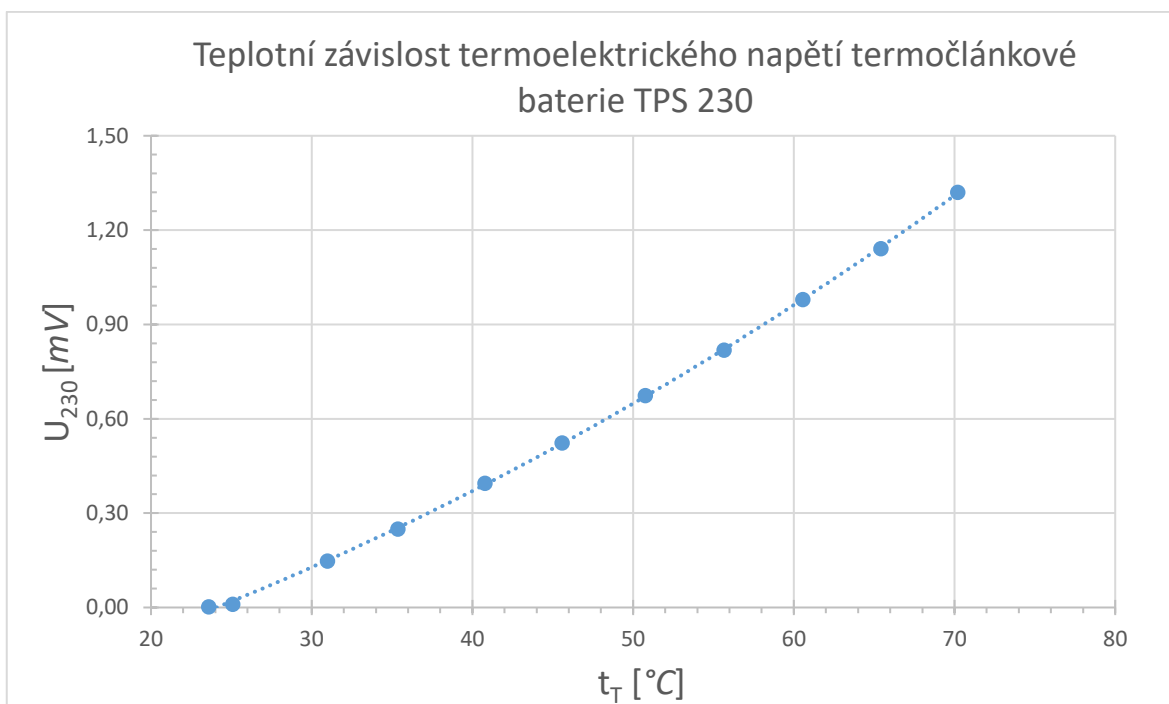
Obrázek 3.3.2 Teplotní závislost elektrického odporu senzoru NTC a teploty základny termočláňkové baterie TPS 334



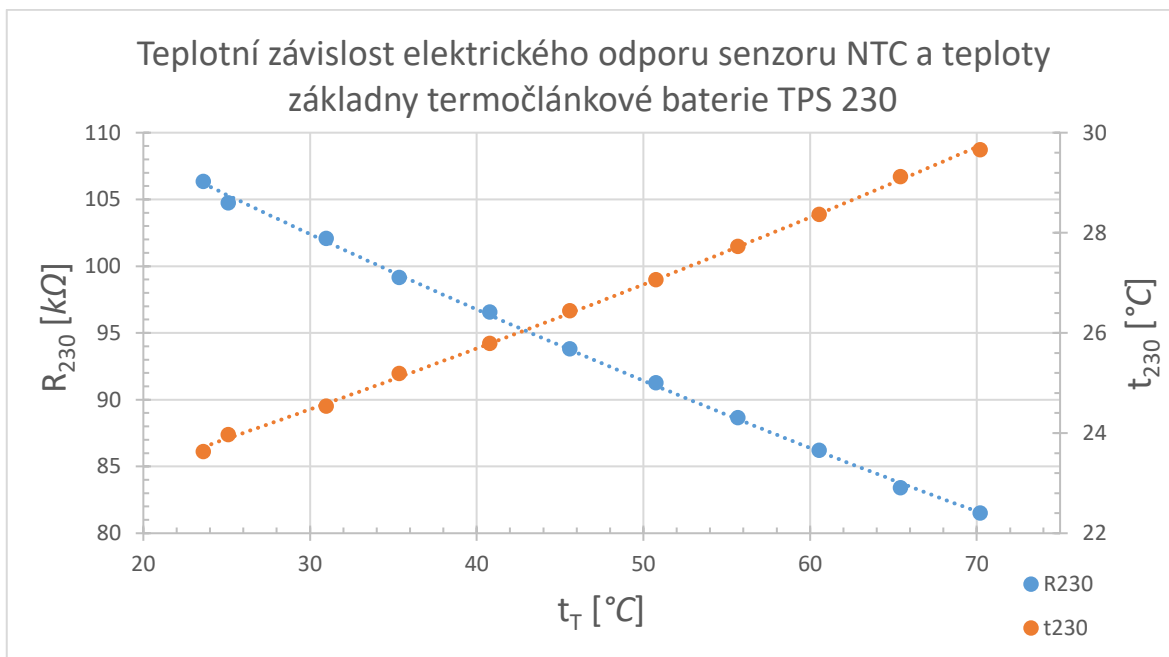
Obrázek 3.3.3 Teplotní závislost termoelektrického napětí termočláňkové baterie TPS 334 L10.6



Obrázek 3.3.4 Teplotní závislost elektrického odporu senzoru NTC a teploty základny termočláňkové baterie TPS 334 L10.6



Obrázek 3.3.5 Teplotní závislost termoelektrického napětí termočláňkové baterie TPS 230



Obrázek 3.3.6 Teplotní závislost elektrického odporu senzoru NTC a teploty základny termočláňkové baterie TPS 230

4. Závěr:

Z naměřených dat pro napětí vyplývá, že se u všech senzorů nejedná o lineárně rostoucí závislost. Z přiložených grafů teplotní závislosti elektrického odporu senzoru NTC a teploty základny termočláňkové baterií (Obr. 3.3.2, Obr. 3.3.4 a Obr. 3.3.6) jasně vyplývá, že odpor termistorů NTC s rostoucí teplotou měřeného tělesa exponenciálně klesá. V případě napětí na termočláňcích, tj. výše uvedené grafy (Obr. 3.3.1, Obr. 3.3.3 a Obr. 3.3.5) je závislost na teplotě exponenciálně rostoucí.