



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**

ÚSTAV MIKROELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF MICROELECTRONICS

NEKONVENČNÍ APLIKACE HYBRIDNÍCH INTEGROVANÝCH OBVODŮ

NON CONVENTIONAL APPLICATIONS OF HIC'S

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. MARTIN KLÍMA

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. IVAN SZENDIUCH, CSc.

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav mikroelektroniky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Mikroelektronika

Student: Bc. Martin Klíma

ID: 98521

Ročník: 2

Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Nekonvenční aplikace hybridních integrovaných obvodů

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte a s pomocí tlustovrstvé technologie realizujte termodynamickou sondu pro monitorování tepelné radiace a jí odpovídající bilanční zapojení. U tohoto zapojení ověřte základní parametry, kterými jsou citlivost a rychlost odezvy. Dále také prozkoumejte nežádoucí vliv deformace (tenze) substrátu na užitečný signál této termodynamické sondy.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

Szendiuch, I.: Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů, VUTIUM, 2007

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 26.5.2011

Vedoucí práce: doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

prof. Ing. Vladislav Musil, CSc.

Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

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

Anotace

Práce se zabývá oblastí nekonvenčních aplikací tlustovrstvé technologie, především problematikou snímání teploty s pomocí termodynamické senzorky. Je zde shrnuta teorie termodynamických senzorů a je navržen a realizován na keramickém substrátu univerzální termodynamický senzor, u něhož jsou proměřeny jeho vlastnosti včetně zjištění tepelné radiace.

Abstract

This thesis deals with non-conventional applications in the area of thick film technology, especially with indication of the temperature by thermodynamic sensors. The work summarizes thermodynamic sensors theory and also contains production data of the universal thermodynamic sensor realized on ceramic substrate, including measurement of its parameters and heat radiation.

Klíčová slova

Hybridní integrovaný obvod, tlustovrstvá technologie, nekonvenční aplikace, termodynamický senzor tepelné radiace.

Key words

Hybrid integrated circuit, thick film technology, non-conventional applications, heat radiation thermodynamic sensor.

Bibliografická citace díla

KLÍMA, M. *Nekonvenční aplikace hybridních integrovaných obvodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 69 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc..

Prohlášení autora o původnosti díla

Prohlašuji, že jsem tuto vysokoškolskou kvalifikační práci vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce, s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury. Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 26. 5. 2011

.....

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce doc. Ing. Ivanu Szendiuchovi, CSc. za metodické a cílené vedení při plnění úkolů realizovaných v návaznosti na diplomovou práci. Dále děkuji panu Ing. Michalu Řezníčkovi za velice cennou odbornou pomoc.

Obsah

| | |
|---|-----------|
| ÚVOD | 6 |
| 1 TERMODYNAMIKA | 7 |
| 1.1 DISTRIBUCE TEPLA..... | 8 |
| 1.1.1 Důsledky plynoucí z termodynamiky pro TDS | 10 |
| 1.2 TERMODYNAMICKÉ SOUSTAVY | 11 |
| 1.2.1 Základní stavy aktivních termodynamických soustav..... | 11 |
| 1.2.2 Pravidla chování termodynamických soustav | 12 |
| 2 SNÍMÁNÍ TEPLoty | 13 |
| 2.1 SNÍMAČE..... | 13 |
| 2.1.1 Odporové snímače teploty (RTD - Resistive Temperature Detector) 14 | |
| 2.1.2 Kovová měřicí čidla..... | 14 |
| 2.1.3 Platinové měřicí čidlo..... | 15 |
| 2.2 TLUSTOVRSTVÉ SENZORY | 15 |
| 2.3 MĚŘENÍ TEPLoty S VYUŽITÍM PRVKŮ TLUSTOVRSTVÝCH TECHNOLOGIÍ..... | 16 |
| 2.3.1 Tlustovrstvé senzory teploty | 16 |
| 2.3.2 Tlustovrstvé termistory..... | 16 |
| 2.3.3 Tlustovrstvé odporové teploměry | 17 |
| 2.3.4 Tlustovrstvé termoelektrické články | 17 |
| 2.3.5 Další možnosti tlustých vrstev pro měření teploty | 18 |
| 3 TERMODYNAMICKÝ SENZOR | 19 |
| 3.1 BILANČNÍ TOPIDLO..... | 19 |
| 3.2 TDS 1. DRUHU V MŮSTKOVÉM (SYMETRICKÉM) ZAPOJENÍ | 20 |
| 3.3 TDS 1. DRUHU V ROZDÍLOVÉM (ASYMETRICKÉM) ZAPOJENÍ | 21 |
| 3.4 TDS 1. DRUHU S KONSTANTNÍ TEPLotOU POUZE V DEFINOVANÉM ŘEZU..... | 21 |
| 3.5 TDS 2. DRUHU | 22 |
| 3.5.1 Klady a zápory TDS 2. řádu..... | 23 |
| 3.6 MOŽNÉ APLIKACE TDS | 24 |
| 4 NÁVRH TERMODYNAMICKÉHO SENZORU | 24 |
| 4.1 TDS PRO UNIVERZÁLNÍ POUŽITÍ | 24 |
| 4.1.1 Návrh zapojení TDS..... | 26 |
| 4.1.2 Seznam součástí..... | 26 |
| 4.1.3 Návrh topologie..... | 27 |
| 4.1.4 Technická řešení..... | 27 |
| 4.2 NÁVRH TDS TEPELNÉ RADIACE | 28 |
| 4.2.1 Uspořádání můstku..... | 29 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 4.2.2 | Nastavení TDS tepelné radiace | 30 |
| 4.2.3 | Realizace senzoru | 30 |
| 4.2.4 | Postup výroby desky TDS..... | 32 |
| 4.2.5 | Návrh čidla | 33 |
| 4.2.6 | Postup výroby čidla | 34 |
| 4.2.7 | Výroba síť pro šablonový tisk | 35 |
| 5 | MĚŘENÍ VLASTNOSTÍ TDS | 38 |
| 5.1 | MĚŘENÍ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY UNIVERZÁLNÍHO TDS.. | 38 |
| 5.2 | MĚŘENÍ ODEZVY TDS NA JEDNOTKOVÝ SKOK | 40 |
| 5.3 | MĚŘENÍ ODEZVY NA JEDNOTKOVÝ SKOK TDS TEPELNÉ RADIACE | 44 |
| 5.4 | MĚŘENÍ PŘEVODNÍ CHARAKTERISTIKY TDS TEPELNÉ RADIACE 52 | |
| 5.5 | MĚŘENÍ VLIVU TENZE NA TDS TEPELNÉ RADIACE..... | 53 |
| 5.5.1 | Závěr..... | 57 |
| 5.6 | MĚŘENÍ ROZLOŽENÍ TEPLoty TERMOKAMEROU | 59 |
| 6 | ZÁVĚR..... | 65 |
| 7 | POUŽITÁ LITERATURA..... | 66 |
| 8 | SEZNAM ZKRATEK..... | 68 |

Úvod

Diplomová práce navazuje na ročníkové projekty, jejichž cílem bylo provést rešerši vhodných aplikací pro integraci nekonvenčních aplikací na anorganický substrát. Byla zvolena a specifikována aplikace univerzálního termodynamického senzoru (TDS), který byl navržen, realizován a měřením byla rovněž ověřena jeho funkce.

TDS je aktivní senzor, který sám sebe udržuje na konstantní teplotě. Jakoukoli změnu kompenzuje zvýšením nebo snížením výstupního napětí. Tato změna výstupního napětí je zároveň výstupním signálem senzoru. Pole možností použití TDS je opravdu široké. Senzor nalézá uplatnění vždy při snímání takových veličin, které vedou k narušení jeho rovnováhy – dodání/odebrání tepla, změna termodynamické soustavy. Vhodnou konstrukcí pak lze selektovat snímanou veličinu a potlačit ostatní nežádoucí vlivy. Na rozdíl ostatních měřících přístrojů dokáže TDS pracovat nejen s teplotou, ale i s tepelným tokem.

Cílem této práce je návrh termodynamické sondy realizované relativně levnou a dostupnou tlustovrstvovou technologií na keramickém substrátu. Sonda je určena pro monitorování tepelné radiace a základním principem je její bilanční zapojení. Předmětem práce je dále změření citlivosti, rychlosti odezvy a prozkoumání parazitních vlivů tenze na užitečný signál.

Výstupem práce je funkční termodynamický senzor tepelné radiace s termodynamickou sondou s popisem jeho funkce, technickými podklady a technologickým postupem výroby včetně výsledků měření.

V průběhu realizace sondy je řešena v této práci také optimalizace metody ovrstvování sít pro sítotisk pomocí přípravků firmy Autotype, což lze chápat jako inovační krok v technologii vytváření tlustých vrstev.

1 Termodynamika

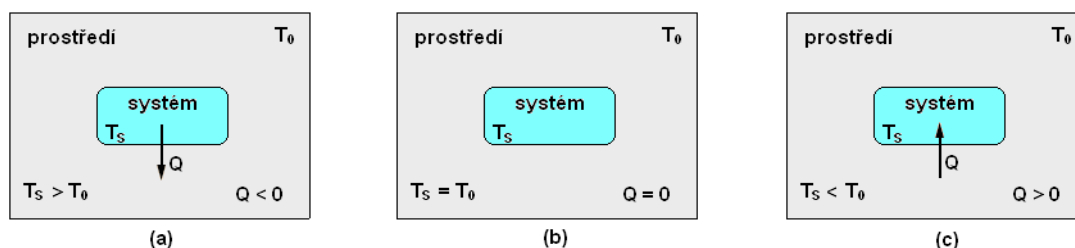
Pro správné pochopení funkce a možností termodynamického senzoru je nutné ujasnit si některé základní zákonitosti termodynamiky, což je fyzikální obor zabývající se vnitřní (tepelnou) energií systémů. Častými pojmy termodynamiky jsou teplota a teplo. Ty je třeba od sebe odlišit. Teplo je dějovou veličinou popisující změnu termodynamického stavu systému, nikoli stav samotný. Je to energie vyměněná mezi systémem a okolím v důsledku rozdílných teplot. Protože je teplo, stejně jako např. práce, přenesenou energií, jeho jednotkou je jednotka energie - joule [J].

Oproti tomu teplota je veličinou stavovou. Veličinou, která charakterizuje stav systému v ustáleném stavu – v tepelné rovnováze, resp. každé těleso v tepelné rovnováze lze charakterizovat jeho teplotou.

Tepelná rovnováha je stav těles, systémů, kdy tato tělesa mají stejnou teplotu, nevytváří žádný teplotní gradient a není mezi nimi vytvořen žádný tepelný tok. Pokud platí, že tělesa A a B i B a C jsou v tepelné rovnováze, pak jsou v tepelné rovnováze i tělesa A a C. Tepelnou rovnováhu lze popsat jediným spojitě proměnným parametrem – teplotou.

Vložení tělesa do prostředí s konstantní teplotou se toto těleso začne oteplovat (příp. ochlazovat). Změna jeho teploty je z počátku rychlá, postupně se zpomaluje až do vyrovnání se teploty s prostředím. Protože teplota tělesa konverguje k teplotě prostředí s exponenciální závislostí, těleso teoreticky nikdy nemůže dosáhnout teploty prostředí. Za ustálení je obvykle považován stav, kdy již od sebe nejsme schopni rozlišit současnou a předchozí teplotu tělesa. Vkládané těleso je systémem, který interaguje se svým okolím. Existují v zásadě tři případy, jež mohou nastat:

- (a) – dodání energie systémem prostředí – systém je zdrojem tepla,
- (b) – tepelné rovnováha – systém i prostředí mají stejnou teplotu,
- (c) – absorbování tepla z okolí systémem – systém spotřebovává teplo. [11]



Obr. 1-1 Interakce systému s prostředím z hlediska jejich teploty

kde T_s teplota systému, T_0 teplota prostředí a Q předávané teplo.

Je třeba zmínit, že materiály se změnou teploty mění své vlastnosti, čehož se využívá při měření teploty, avšak ne vždy je teplotní závislost parametrů materiálů žádoucí. V elektronických systémech je hlavní příčinou vzniku tepla přeměna elektrické energie na energii tepelnou, z čehož vyplývá, že jsou veškeré el. obvody tepelně ovlivňovány. [13]

Teplo působí:

- změny parametrů elektronických prvků,
- teplotní namáhání materiálu,
- zvýšený šum.

1.1 Distribuce tepla

Při interakci systému s okolím, případně mezi dvěma systémy, která vede k nastolení tepelné rovnováhy, dochází k výměně tepla. Tu popisuje veličina tepelný tok H [$W = J \cdot s^{-1}$], který je definován jako přenesené teplo Q za čas t . Dalšími veličinami důležitými pro popis přenosu tepla jsou součinitel tepelné vodivosti k [$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$], což je veličina charakterizující schopnost materiálu šířit teplo, případně tepelný odpor R [$W^{-1} \cdot m^2 \cdot K$], který již není vázán pouze na materiál, ale i na jeho rozměry – tloušťku, a také tepelná kapacita C [$J \cdot K^{-1}$], jež je konstantou úměrnosti dodaného tepla vlivem změny teploty. Tepelná kapacita může být vztažena na hmotnost materiálu, pak hovoříme o měrné tepelné kapacitě c [$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$], nebo na mol látky, což je molární tepelná kapacita c_{mol} [$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$]. Prostředí nemusí teplo vždy jen přenášet, ale může je i spotřebovávat, např. spotřeba energie látkou při změně jejího skupenství.

$$H = \frac{Q}{t} \quad [J \cdot s^{-1}], \quad k = \frac{H \cdot d}{S \cdot (T_2 - T_1)} \quad [W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}], \quad R = \frac{d}{k} \quad [W^{-1} \cdot m^2 \cdot K], \quad (1-1)$$

Výpočet: teplotní tok, součinitel tepelné vodivosti, tepelný odpor

kde H - tepelný tok, Q - teplo, t - čas, k - součinitel tepelné vodivosti, d - tloušťka prostředí, S - plocha prostředí, T_1 - teplota chladnějšího rozhraní, T_2 - teplota teplejšího rozhraní, R - tepelný odpor

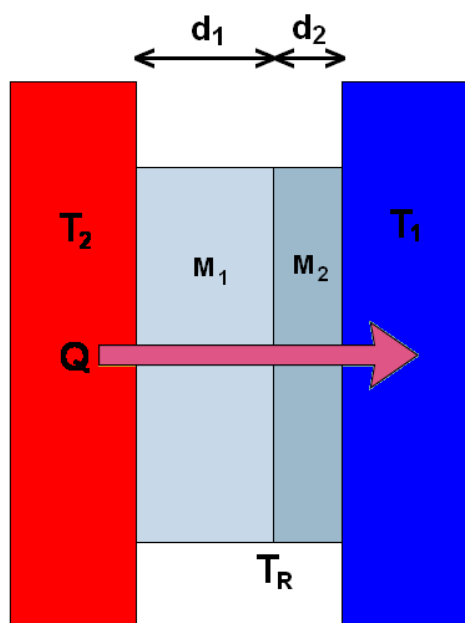
Základními způsoby, jak k výměně tepla dochází jsou:

- a) kondukce (vedení),
- b) konvekce (proudění),
- c) radiace (vyzařování).

a) Konduktce – přenos tepla vedením

Aby k tomuto způsobu přenosu tepla mohlo dojít, musí být systémy spojeny hmotným pevným prostředím. Tepelná energie se v tomto případě šíří prostřednictvím tepelných kmitů atomů a elektronů látky, které dosahují v místě s vyšší teplotou větší amplitudy a rozkmitávají sousední částice. Takto se šíří teplo dále do míst s nižší teplotou. Tepelný tok přenosu lze vyjádřit z rovnice pro součinitel tepelné vodivosti 1-1.

V případě vedení tepla za ustáleného stavu prostředím složeným z více materiálů s různou tepelnou vodivostí a rozměry protéká stejný tok všemi vrstvami. Toho lze dosáhnout, pokud platí T_1 i $T_2 = \text{konst.}$ V této situaci dojde na jednotlivých rozhraních k nastavení konkrétní teploty T_R . Viz obr. 1-2.



Obr. 1-2 Konduktivní šíření tepla soustavou dvou materiálů

$$H = \frac{k_2 S (T_2 - T_R)}{d_2} = \frac{k_1 S (T_R - T_1)}{d_1} \quad (1-2)$$
$$\Rightarrow H = \frac{S \cdot (T_2 - T_1)}{\sum R}$$

Tepelný tok soustavou dvou materiálů při ustáleném stavu

$$T_R = \frac{k_1 d_2 T_1 + k_2 d_1 T_2}{k_1 d_2 + k_2 d_1} \quad (1-3)$$

Výpočet teploty rozhraní dvou materiálů při konst. teplotním toku

b) Konvekce – přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním nastává u kapalin a plynů. Celý princip přenosu je založen na skutečnosti, že kapalina a plyny s teplotou zvětšují svůj objem, čímž klesá jejich hustota a stoupají vzhůru, případně dochází k vyrovnání tlaku s jejich okolím prouděním.

Proudění bývá často vyvoláno uměle, např. čerpáním. Tím se dosáhne zvýšení schopnosti média odebírat teplo, což vychází z exponenciální závislosti vyrovnání teploty systému s jeho prostředím.

c) Radiace – přenos tepla zářením (sáláním)

K přenosu tepla dochází prostřednictvím elektromagnetických vln – tepelné záření, a přenos nevyžaduje hmotné prostředí. Vyzářený výkon P_R vyzařujícího předmětu je dán jeho plochou S [m²] a teplotou T [K]. Odvíjí se také od struktury povrchu. Ten popisuje emisivita ε nabývající hodnot $\langle 0,1 \rangle$, přičemž $\varepsilon = 1$ odpovídá teoretickému černému zářiči, nebo černému tělesu, jež vyzáří/absorbuje veškerou energii. Posledním chybějícím parametrem je Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma = 5,6703 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$.

$$P_R = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T^4 \quad [W] \qquad P_A = \sigma \cdot \varepsilon \cdot S \cdot T_Z^4 \quad [W] \quad (1-4)$$

Výpočet vyzářeného výkonu P_R a absorbovaného výkonu P_A

Z rovnice 1-4 vyplývá, že jakékoli těleso s teplotou vyšší než $T = 0$ K vyzařuje energii. Obdobný vztah platí pro pohlcený (absorbovaný) výkon tělesem P_A . Jediným rozdílem zde je to, že se uplatňuje teplota zdroje T_Z a nikoli teplota povrchu absorbujícího tělesa.

Absorpce a vyzařování jsou děje, které probíhají současně u každého tělesa s teplotou vyšší $T = 0$ K. Pokud nebudeme uvažovat odraz tepelného záření, je úhrnný výkon rozdílem výkonu vyzářeného a absorbovaného.

1.1.1 Důsledky plynoucí z termodynamiky pro TDS

Protože termodynamické senzory, především 2. druhu (viz kapitolu 3.5) snímají tepelný tok a jeho změny, vyplývá z předchozích poznatků několik podstatných faktů:

- pakliže má být mezi teplotními čidly vytvořen tepelný tok, nutně mezi nimi musí být teplotní gradient,
- protože TDS pracuje i bez hmotného média mezi čidly, k přenosu tepla také dochází radiací,
- protože se teplo mezi čidly šíří radiací, obě čidla jsou jeho zářiči i absorbery,
- tepelná kapacita čidla snižuje citlivost senzoru,
- k rozvážení můstku senzoru dochází změnou tepelného toku, a tím ke zvýšení, resp. snížení, spotřeby energie z výstupu operačního zesilovače na udržení rovnováhy. Změna může být vyvolána buď dodáním/odebráním tepelné energie vnějším zdrojem, nebo změnou tepelné vodivosti prostředí mezi teplotními čidly. [11]

1.2 Termodynamické soustavy

Reálná aktivní neizolovaná termodynamická soustava je tvořena konečným počtem termo-aktivních prvků, neomezeným, avšak známým, počtem pasivních prvků a bezprostředním okolím.

Aktivními prvky soustavy jsou prvky, které dokáží převádět danou formu energie na tepelnou, příp. opačně. Podle toho se dělí na pozitivní a negativní, přičemž pozitivním aktivním prvkem je takový prvek, který energii přivedenou zvenčí mění na tepelnou a je schopen ji dále šířit uvnitř soustavy – topidlo. Negativní aktivní prvek naopak odebírá teplo ze soustavy, mění jej na jinou formu energie, kterou odvádí mimo soustavu - chladič.

Termo-aktivní prvky, které teplo soustavě dodávají či odebírají a mění při tom trvale svoje chemické, nebo fyzické vlastnosti, jsou zvláštním případem. Jejich typickým zástupcem je topivo.

Termo-pasivními prvky chápeme veškeré prvky soustavy, které nejsou aktivní.

Posledním členem termodynamické soustavy je její okolí. To může být jak aktivní, ať už pozitivně či negativně, tak pasivní.

1.2.1 Základní stavy aktivních termodynamických soustav

Termodynamická soustava se může nacházet pouze v ustáleném stavu, nebo v přechodovém či přechodném ději. Je třeba od sebe odlišit tepelnou rovnováhu, tj. stav soustavy, kdy dojde k vyrovnání teplot jejích elementů a ustanou veškeré teplotní toky, a ustálený stav, což znamená, že jsou teploty elementů soustavy v čase neměnné, avšak ne stejné, a teplotní toky jsou konstantní nenulové.

Přechodový děj – Je to stav termodynamické soustavy, kdy tato soustava přechází z původního ustáleného stavu do nového, nebo se z nového ustáleného stavu vrací do původního. Původní a nový stav jsou od sebe vzájemně odlišitelné.

Přechodný děj – Jde o stav soustavy, který začíná i končí vzájemně neodlišitelnými ustálenými stavy. Lze chápat jako vychýlení soustavy z ustáleného stavu.

Ustálený stav – Za tohoto stavu jsou v soustavě teplotní poměry ve všech místech soustavy časově neměnné, resp. libovolné místo soustavy setrvává na konstantní teplotě. V soustavě s aktivními prvky se navíc ustálí i tepelné toky.

1.2.2 Pravidla chování termodynamických soustav

Jak již bylo dříve řečeno, termodynamické soustavy se dělí na pasivní a aktivní. Každý typ soustavy se ve výše uvedených stavech chová specificky.

Pasivní termodynamická soustava

Protože v soustavě složené pouze z pasivních prvků není žádný zdroj tepla, tato soustava bude vždy pouze vyrovnávat tepelné spády, tedy bude směřovat k tepelné rovnováze - ustálení. V tomto případě mají všechny prvky stejnou teplotu a nedochází k žádnému směňování tepla ať už uvnitř soustavy, nebo s jejím okolím. Izolovaná pasivní soustava v tepelné rovnováze setrvává, u neizolované je rovnováha podmíněna setrváním okolí na konstantní teplotě.

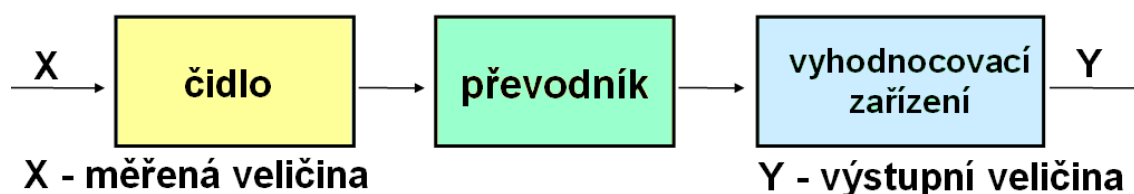
Aktivní termodynamická soustava

V soustavě s aktivními prvky nastává ustálení v případě, že termo-aktivní vlastní i nevlastní prvky setrvají na konstantní teplotě. Její ostatní prvky mohou mít různou teplotu, avšak v čase neměnnou, navíc zde dojde i k ustálení veškerých tepelných toků vztažených k ploše libovolného řezu soustavou, nebo k libovolně zvolenému výseku povrchu soustavy. Lze mluvit o stabilizované bilanční rovnováze systému. Ustálený stav je porušen až tepelnou aktivitou termo-aktivního prvku vlastního, nebo nevlastního. Platí, že mezi dvěma ustálenými stavy je vždy stav neustálený.

Celkové teplo libovolně zvolenou uzavřenou plochou odpovídá tepelné aktivitě touto plochou ohraničenému systému. Za neustáleného stavu soustavy pak platí, že integrální součet tepla, které prošlo touto plochou za libovolně zvolený časový úsek je ekvivalentní integrálnímu součtu aktivit prvků uvnitř plochy. [19][20]

2 Snímání teploty

Tato kapitola je shrnutím informací o problematice snímání teploty z hlediska měřícího řetězce. Ten je zpravidla tvořen čidlem, převodníkem a vyhodnocovacím zařízením (viz obr. 2-1).



Obr. 2-1 Struktura měřícího řetězce

Čidlo je vstupním blokem měřícího řetězce. Je v přímém styku s měřeným objektem, resp. prostředím. Čidlo je primárním zdrojem informace, snímá sledovanou veličinu a převádí ji na měřicí veličinu – elektrickou.

Převodník je člen měřícího řetězce, který transformuje měřicí veličinu obvykle na unifikovaný signál. Vyhodnocovací zařízení pak tvoří koncový blok řetězce. Jeho výstupem je indikace, zápis nebo signál pro vstup regulátoru. [18]

2.1 Snímače

Snímačem obecně je převodník měřené veličiny na veličinu, kterou lze vyhodnotit, resp. změna hodnoty měřené veličiny na vstupu senzoru vyvolá změnu hodnoty výstupní veličiny vyhodnocované. Výstupní veličina snímačů používaných v elektronice je veličina elektrická, konkrétně: napětí, proud, rezistivita, kapacity nebo náboj.

Senzory používané pro měření teploty:

Tab. 2-1 Přehled snímačů teploty a jejich výstupních veličin

| Typ senzoru | Výstupní veličina |
|--------------------------------|-------------------|
| Termočlánek | Napětí |
| Odporové snímače teploty (RTD) | Rezistivita |
| Termistor | Rezistivita |
| IC | Napětí |
| Infračervený | Proud |
| Soustava termočlánků | Napětí |
| Piezoelektrický | Frekvence |

2.1.1 Odporové snímače teploty (RTD - Resistive Temperature Detector)

Odporové snímače teploty patří mezi kontaktní snímače (snímač je v přímém kontaktu s měřeným prostředím - médiem) používané k dálkovému měření teploty. Jejich čidlo (měřicí odpor) převádí teplotní změnu prostředí na změnu elektrického odporu. Využívá se přitom toho, že materiály mění svůj elektrický odpor v závislosti na změně své teploty.

RTD slouží jako snímače pro velmi přesná a opakovatelná teplotní měření. Aplikace s tímto druhem senzoru vyžadují odolné přístrojové struktury, viz teplotní management lékařské elektroniky.

Základními parametry odporového čidla jsou:

- $R_0, R_{0,01}$ – základní odpor – elektrický odpor čidla při teplotě 0 °C a 0,01 °C (trojný bod vody),
- R_{100} – hodnota el. odporu čidla při teplotě 100 °C,
- R_t – el. odpor čidla při teplotě t °C ,
- W_{100}, W_t – poměr odporů při teplotě 100 °C, resp. t °C, a 0 °C.

$$W_{100} = \frac{R_{100}}{R_0}, \quad \text{resp.} \quad W_t = \frac{R_t}{R_0}, \quad (2-1)$$

Výpočet poměru odporů při různých teplotách odporového čidla

Použité čidlo KTY-81 210 má teplotní rozsah -55 – 150 °C. Nominální hodnota jeho odporu při 25 °C je 2000 Ω, což s $W_{150/25} = 1,696$ a $W_{25/-55} = 0,490$ znamená rozsah odporu čidla od 980 do 4280 Ω. KTY-81 110 má stejné poměry odporů na různých teplotách a jeho odpor se pohybuje v rozmezí od 490 do 2211 Ω.

2.1.2 Kovová měřicí čidla

Průmyslová odporová čidla lze v zásadě rozdělit na čidla vinutá z platinového, niklového nebo měděného drátu. Dále mezi tato čidla patří vrstevná čidla nejčastěji realizovaná platinovou či niklovou pastou.

Tab. 2-2 Základní vlastnosti kovových materiálů čidel

| Materiál čidla | Základní odpor R_0 [Ω] | Poměr odporů W_{100} | Měřicí rozsah [°C] |
|----------------|--------------------------|------------------------|--------------------|
| Pt | 100 | 1,3850 | -200 až +850 |
| N | 100 | 1,6180 | -60 až +180 (+250) |
| Cu | 100 | 1,4260 | -200 až +200 |

2.1.3 Platinové měřící čidlo

Protože měření teploty termodynamickým senzorem probíhá vyhodnocováním rozvážení odporového můstku, který mohou tvořit i platinové TLV rezistory, kvůli své výrazné teplotní závislosti, zařazují obecně platinové odporové senzory do své práce. Hlavními výhodami použití platiny v odporových teploměrech je její chemická odolnost, vysoká teplota tavení a dosažitelná čistota (až 99,03 % Pt + nečistoty Fe a Ir). Platina je použitelná na měřicím rozsahu teplot -200 až 850 °C.

Její měrný odpor při teplotě 20 °C je $0,098 \cdot 10^{-6}$ [Ωm^{-1}]. Teplotní součinitel platiny je $0,00385$ [K^{-1}], tzn. 3850 [ppm·K⁻¹]. Změna odporu v závislosti na teplotě je dána funkcí (dle IEC):

$$R = R_0(1 + At + Bt^2), \quad (2-2)$$

Výpočet odporu platinového čidla pro danou teplotu

kde je: R_0 odpor při 0 °C, t teplota [°C], koeficienty $A = 3,90802 \cdot 10^{-3}$ a $B = -5,802 \cdot 10^{-7}$

Senzory s platinovým odporovým čidlem jsou nejčastěji tvořeny drátkem s průměrem 0,045 mm. Využívají se hodnoty odporu R_0 při 0 °C z řady 100, 500 a 1000 Ω . Samotné uspořádání vinutí je bifilární, jednoduché nebo dvojité. Substrát je pak často plochý či válcový z keramiky, skla, slídy nebo umělé hmoty. Proudové zatížení PT senzoru má hodnotu kolem 1mA. Jeho dlouhodobá stabilita závisí na čistotě kovu a má hodnotu $0,05 \% \cdot 10^{-3} \text{ h}^{-1}$.

2.2 Tlustovrstvé senzory

Tlustovrstvé senzory se vyznačují jednoduchým principem, výrobou, vysokou spolehlivostí a relativně nízkou cenou. Mají vysokou mechanickou, chemickou i výkonovou odolnost. V základu se dělí podle části obvodu, ve které je zaznamenávána změna příslušného parametru. Konkrétně jsou to tedy:

- senzory založené na obvodovém principu – u těchto senzorů se využívá změny parametrů elektrického prvku v obvodu realizovaném tlustovrstvými pastami rezistivními, vodivými nebo dielektrickými,
- senzory založené na vlastnostech past – využívají změny parametrů elektrického prvku tvořeného pastou speciální (termorezistivní, piezorezistivní, enzymové atd.) nebo pastou standardní, která je výrazně citlivá na snímanou veličinu.

Dále je možné rozlišovat senzory podle vstupní veličiny, druhu převodu, metody snímání a podle chování výstupu. [4]

2.3 Měření teploty s využitím prvků tlustovrstvých technologií

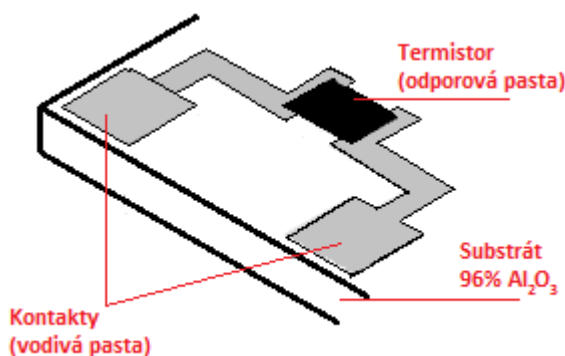
Protože jednou z podstatných částí termodynamického senzoru, kterými se budu ve svojí práci zabývat níže, je i odporové teplotní čidlo, rozhodl jsem se zařadit srovnání možností měření teploty pomocí prvků realizovaných tlustovrstvou technologií.

2.3.1 Tlustovrstvé senzory teploty

TLV technologie je vhodná především pro realizaci termistorů, termoelektrických článků a odporových teploměrů. Výhodou je pak fakt, že snímání tepelného působení probíhá celou plochou materiálu. To ovšem platí pouze v případě, že je senzor vytvořený přímo TLV a nejedná se o diskrétní součástku.

2.3.2 Tlustovrstvé termistory

Tlustovrstvé termistory jsou tvořené termorezistivní pastou s rozměry v řádech milimetrů. Malé rozměry zajišťují dobré prohrátí, proto bývají velmi rychlé a dokážou zaznamenat i teplotní šoky a vibrace. Jejich měřicí rozsah je $-50 \div 300 \text{ }^\circ\text{C}$. Lze je použít i jako teplotní převodníky. Podle použité pasty jsou termistory s kladným i se záporným teplotním součinitelem s téměř lineární teplotní závislostí a srovnatelným nominálním odporem R_V a součinitelem α_T . Takto vytvořené termistory lze zapojovat do PTC/NTC můstků pro vysoce citlivá měření. Tím je možné získat vyšší citlivost při zachování linearity, oproti použití jednoho termistoru realizovaného vysoce teplotně citlivou pastou, která se obecně vyznačuje i vyšší nelinearitou.



Obr. 2-2 TLV termistor [16]

2.3.3 Tlustovrstvé odporové teploměry

Zpravidla jsou tyto teploměry tvořeny tenkou dlouhou vodivou cestou. Princip měření je založený na změně odporu kovu, která je kladná a téměř lineární, v závislosti na teplotě. Pasty použité pro tento typ senzoru jsou zpravidla cermetové platinové pasty, nebo niklové pro méně náročné aplikace. Pracovní rozsah snímačů je $-50 \div 500$ °C. Při návrhu takového snímače je nutné brát v potaz zahřívání a tím změnu odporu vodiče vlivem průchodu proudu. Díky vysoké odolnosti může takovýto TLV senzor plnit funkci topného prvku, což např. využívají termodynamické teplotní senzory.

2.3.4 Tlustovrstvé termoelektrické články

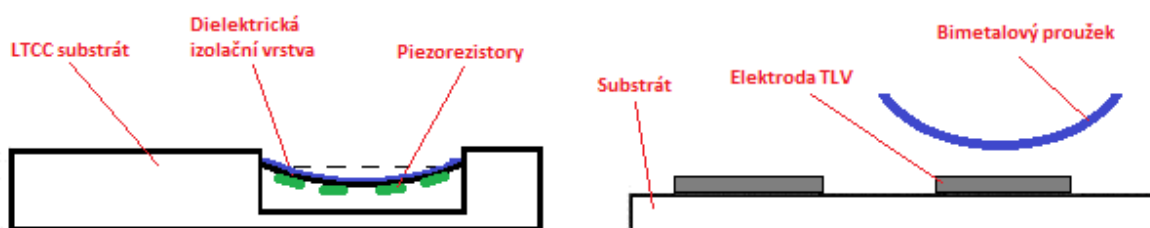
Tlustovrstvé termoelektrické články jsou vytvořeny nanesením dvou past (obvykle jako série termoelektrických párů). K výrobě nejsou potřeba speciální materiály, což se odráží na ceně. Používají se běžné vodivé a odporové pasty nanášené na korundový substrát. Po vytvoření termočlánku je třeba provést měření pro stanovení převodní charakteristiky. Nevýhodnější kombinací past je použití vodivé a odporové pasty. Stanovení přesnosti měření termočlánkem je značně obtížné, protože se vzájemně projevují vlivy jednotlivých komponent článku. Navíc termočlánek funguje zároveň jako anténa a vzhledem k tomu, že jeho výstupní napětí je malé, může být vliv šumu na přesnost měření značný. Oproti tomu je výhodou mechanická, elektrická a chemická odolnost. Termočlánky nacházejí uplatnění v aplikacích méně náročných na přesnost, typickým použitím je např. kalorimetrický chemický senzor. [5]

Tab. 2-3 Srovnání vlastností TLV snímačů teploty [5]

| | Termistory | Odporové teploměry | Termočlánky |
|------------------------|---|--|--|
| Oblast použití | Běžné měření okolní teploty, teplotní spínače, převodníky | Přesnější měření teploty, převodníky, topné prvky | Měření v širokém teplotním rozsahu, převodníky |
| Měřicí rozsah | -50 ÷ 150 (max. 300 °C) | -50 ÷ 500 °C | -50 ÷ 650 °C |
| Rozlišení | ±0,2 °C | ±0,1 °C | ±10 °C |
| Citlivost | NTC: $-0,5 \div -10 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ PTC: $1,0 \div 5,0 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ | Platinové: $3,5 \cdot 10^{-3} \text{ K}^{-1}$ | $10 \div 20 \mu\text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ |
| Výhody | nízká cena, rychlá odezva, malé rozměry, robustnost | Velká přesnost, vysoká odolnost v agresivním prostředí, robustnost | Široký teplotní rozsah, rychlá odezva, samonapájení, robustnost |
| Nevýhody | Nelinearita pro NTC, relativně úzká teplotní rozsah | Pomalejší odezva, samozahřívání, vliv odporu přívodů | Nutná kompenzace teploty studeného konce, náchylné na šum, nelinearita |
| Orientační cena | \$1000 / 50 g pasty | \$1000 ÷ 2000 / 50 g pasty (platina) | odporová pasta: \$500 / 100 g vodivá pasta: \$500 / 100 g |

2.3.5 Další možnosti tlustých vrstev pro měření teploty

Technologie tlustých vrstev skýtá i další metody měření teploty, např. kombinace bimetalového pásku s TLV, nebo piezorezistivní převodník. Je možné také vytvořit kapacitní senzor, který detekuje změnu kapacity prohnutím kovového pásku vlivem teploty, který tvoří jednu z elektrod. Podobně funguje i piezorezistivní převodník, kdy je přes piezorezistivní element natažen kovový pásek. Ten se vlivem teploty natahuje/smršťuje a mění tak tlak na piezorez. element v důsledku čehož se mění rezistivita prvku.



Obr. 2-3 Kapacitní a piezoelektrický TLV snímač teploty [16]

3 Termodynamický senzor

Protože měřením teploty lze objektivně měřit pouze ustálené stavy soustav a během neustálených stavů měření ukazuje pouze na vývojový trend, vyvstala potřeba najít prvek, který by neustálený stav systému dokázal monitorovat. Základním předpokladem je, že měřící prvek nebude ovlivňovat své okolí. Toto termodynamický senzor (TDS) splňuje.

Termodynamický senzor v bilančním zapojení je tvořen reálným tělesem ohříváným ztrátovými rezistory. Tvoří jej tedy soubor ztrátových rezistorů v bilančním zapojení na reálném tělese senzoru napájených příkonem, který závisí na teplotě tělesa senzoru. Je nutné brát na vědomí, že na reálný senzor působí i vlivy okolního prostředí.

TDS snímá změny teploty prvku, resp. tepelného toku, zkoumaného systému v důsledku působení měřeného vnějšího vlivu. Obecně žádoucí funkcí je sledování odchylek od očekávané aktivity. Měření má dvě fáze, a to ustalovací, což je první etapa, kdy se nastavuje tepelná rovnováha systému (v našem případě uvedení měřícího odporového můstku do rovnováhy), a fázi udržovací. V této fázi je do systému přiváděn výkon potřebný k udržení systému v tepelné rovnováze. Narušení rovnováhy systému je detekováno rozvážením můstku. To je následně vyhodnoceno komparátorem, jež zvýší/sníží svoje výstupní napětí a přes zpětnou vazbu je do měřícího můstku přiveden odpovídající proud. Tím se zvýší/sníží ztrátový výkon odporů a úměrně tomu se změní tepelné ztráty na odporech, do systému je tak dodáváno potřebné teplo k opětovnému nastavení rovnovážného stavu. Tento princip udržování systému v tepelné rovnováze je reprezentován bilančním topidlem. [9] [7]

3.1 *Bilanční topidlo*

Bilanční topidlo tvoří odporový můstek. Je to takové topidlo, které má při běžných napájeních dostatečný příkon k udržení bilanční rovnováhy mezi zkoumaným vzorkem a okolím. Kryje tedy tepelné ztráty vzorku do okolí a změny teploty vyvolané zkoumaným faktorem.

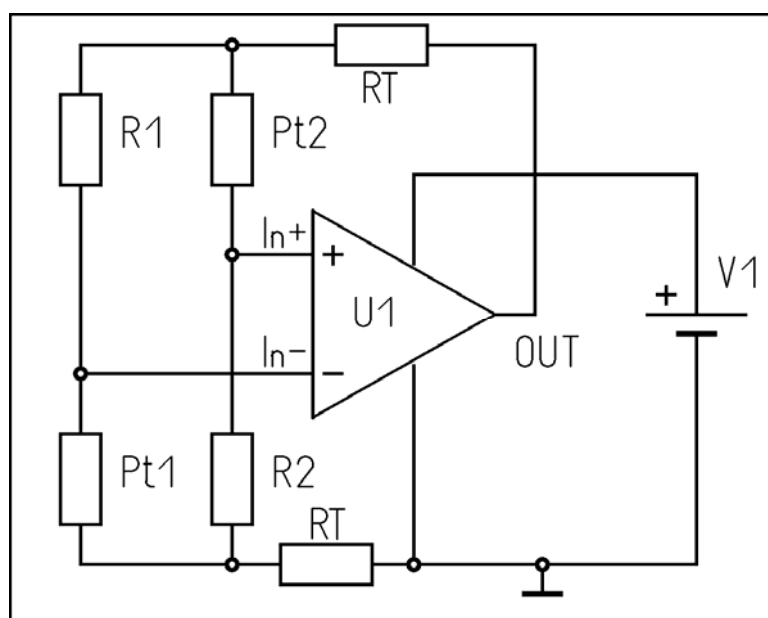
Musí být zajištěno, aby maximální přísun tepla vlivem zkoumaného faktoru nepřevýšil teplotní ztráty vzorku při minimálním dodávaném výkonu bilančním topidlem, a zároveň, aby teplotní ztráty vzorku byly dostatečně malé, a tak šly nahradit příkonem topidla menším než je maximální možný. I tak je vhodnější, aby ztráty vzorku byly kompenzovatelné malou částí možného příkonu pro další udržování systému v rovnováze za působení vnějšího faktoru. [7]

3.2 TDS 1. druhu v můstkovém (symetrickém) zapojení

Odporový můstek je u tohoto druhu senzoru napájen jednou úrovní výkonu, tj. P_{MAX} , až do dosažení vlastní teploty t_V . Po ustálení na této teplotě bude dodávaný příkon roven tepelným ztrátám způsobeným vlivem okolí. Termodynamickou bilanční rovnováhu indikuje interval dodávaného příkonu, pro který platí $P_{MIN} < P < P_{MAX}$. Přitom je tepelná energie akumulovaná v tělese trvale konstantní. Vlastní teplota senzoru se volí tak, aby byla shodná s pracovní teplotou sledovaného procesu.

TDS je tvořen rezistory R, Pt a RT, přičemž rezistory RT jsou topné a ztrácí se na nich převážná část výkonu. Rozlohou zabírají převážnou část na desce senzoru při realizaci TLV technologií a obklopují snímací rezistory. Rozmístění všech rezistorů je osově symetrické. Příčinou reálné odchylky je u tohoto typu zapojení okamžitá aktivita sledovaného objektu.

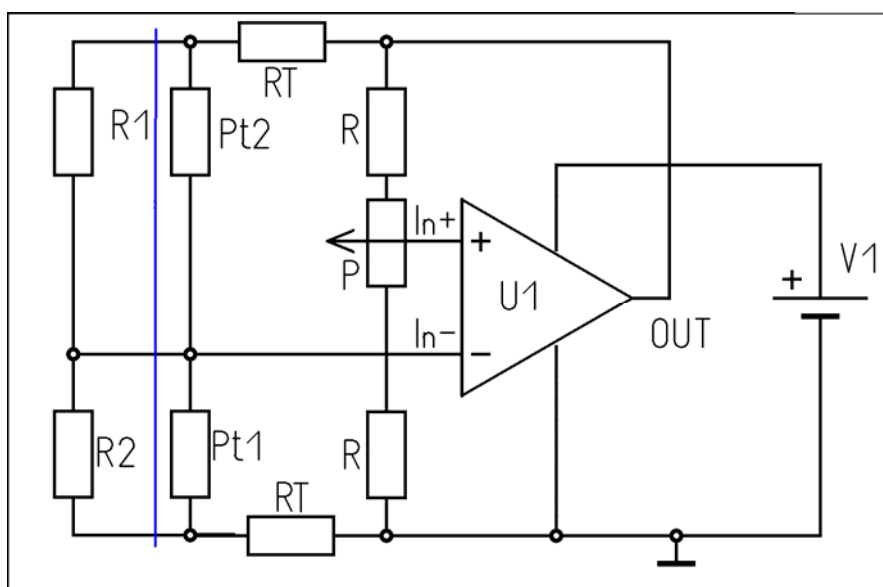
K ustálení výstupního napětí senzoru dojde na hodnotě $0,7 \cdot (V_1)$, senzor i sledovaný objekt mají současně stejnou pracovní teplotu. Odchylka z rovnovážného stavu je kompenzována zvýšením nebo snížením příkonu, resp. výstupního napětí operačního zesilovače (OZ). Intenzita aktivity, jež způsobila odchylku, odpovídá čtverci odchylky, jehož integrál na sledovaném časovém intervalu ukazuje na celkovou dodanou/spotřebovanou energii. [9]



Obr. 3-1 TDS 1. druhu v můstkovém (symetrickém) zapojení

3.3 TDS 1. druhu v rozdílovém (asymetrickém) zapojení

Toto zapojení má antiparalelně spojené asymetrické dvojice teplotně závislých a asymetrické dvojice teplotně nezávislých rezistorů. Rezistory R_1 a R_2 jsou voleny tak, aby při teplotě t_{VS} měli stejnou hodnotu jako rezistory Pt_1 a Pt_2 . Při teplotě t_{VS} platí, že napětí přiváděné na vstup zesilovače In_+ odpovídá napětí $V_1/2$. Hodnoty rezistorů musí také zároveň splňovat podmínku $k = R_1/R_2 = Pt_1/Pt_2$, kde k je koeficient nesymetrie. Hodnoty R a P se volí s ohledem na co nejmenší spotřebu. Na teplotě t_{VS} se při nastaveném potenciometru P do střední polohy dostaví napětí In_+ také na $V_1/2$, platí, že $t_{VS} = t_V$. Oproti předešlému zapojení se toto liší především možností nastavení vlastní teploty senzoru t_V pomocí potenciometru P v širokém rozsahu hodnot. [9]



Obr. 3-2 TDS 1. druhu v rozdílovém (asymetrickém) zapojení

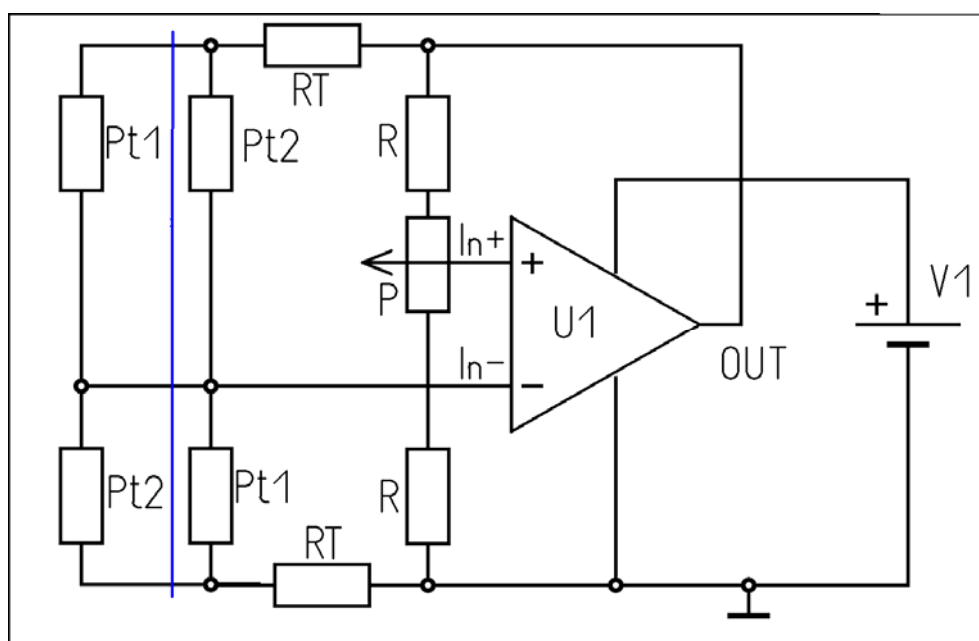
3.4 TDS 1. druhu s konstantní teplotou pouze v definovaném řezu

Zapojení tohoto senzoru je totožné s předchozím, liší se v uspořádání jednotlivých prvků na substrátu. Topné rezistory již nejsou umístěny kolem snímacích, ale pouze na jedné straně senzoru. Ten je pak vystavován vlivu okolí pouze částí, ve které jsou na okraji umístěny snímací rezistory, nikoli celou svou plochou.

Spojité záznam čtverce odchylky výstupního napětí průběh intenzity pouze charakterizuje, nikoli určuje, stejně tak jeho integrál. Pro toto zapojení lze určit konstantu pro přepočítání objektivní převodní konstanty. Bilanční termodynamická rovnováha je pro toto uspořádání senzoru rozložena v příčném řezu tělem senzoru, který leží na ekvitermně pro kterou platí, že teplo přijímané od sledovaného objektu je rovno teplu dodávanému ztrátovými rezistory a je zároveň nejchladnějším místem senzoru. [9]

3.5 TDS 2. druhu

Na rozdíl od TDS 1. druhu nepracují s konstantní teplotou, ale s konstantním rozdílem teplot, resp. s konstantním tepelným tokem. V rovnovážné poloze (při potenciometru nastaveném na střední polohu jezdc) tento se senzor ustálí podobně jako senzor 1. druhu, s tím rozdílem, že se neutvoří ekvitermní řez, ale plocha mezi dvěma řezy. Mezi nimi neproudí žádný tepelný tok, mají stejnou, nikoli však konstantní teplotu. To umožňuje sledovat nežádoucí, ale i žádoucí procesy sledovaného objektu. Veškerá narušení teplotní rovnováhy se indikují stejně, jako v předešlých případech. TDS 2. druhu je univerzálně použitelný pro celou řadu aktivit sledovaného objektu. Navíc potenciometrem P lze nastavit polohu řezů se stejnou teplotou, a tím v širokém rozsahu zvolit citlivost sledování žádoucích i nežádoucích procesů zvláště. [9]



Obr. 3-3 TDS 2. druhu

Je nutné zmínit, že vlastnosti TDS se odvíjí od uspořádání soustavy. Zejména je třeba dát pozor na:

- Pracovní teplota senzoru musí být vyšší, než maximální dosažitelná teplota termodynamické soustavy, aby nedošlo k poklesu vlastní aktivity senzoru,
- Maximální příkon senzoru musí být dostatečný i při nejvyšším možném požadavku na krytí výkonu nutného pro zachování rovnováhy,
- Termodynamické zapojení musí mít odpovídající citlivost pro požadovaný rozsah a zároveň dostačující výkonovou ztrátu pouzdra,

- Umístění senzoru pro dosažení dostatečné převodní citlivosti. Senzor musí být umístěn dostatečně blízko měřenému objektu a konstrukčně uspořádán tak, aby bylo měření reprodukovatelné.

Pro zajištění tepelného spádu, a tím vzniku tepelného toku, je nutné volit teplotní čidla s různou velikostí. Jedno z čidel vykazuje menší citlivost (např. při osvětlování laserem). Je vhodné toto čidlo umístit na chladič, nebo pouzdro senzoru, pro lepší odvod tepla při přehřívání soustavy. S tím je také spojeno lepší sledování změn teplot prostředí, čímž se zmenší chyba měření.

Časová konstanta TDS je určena fyzickým uspořádáním, tj. tepelnými kapacitami a vodivostmi.

3.5.1 Klady a zápory TDS 2. řádu

Hlavní výhodou TDS, jak plyne z jeho principu, je vyhodnocování tepelného toku. Měření teploty je totiž možné pouze ve stavu ustálení systému a vyhodnocováním chování systému v přechodovém stavu pomocí běžného teploměru je možné zjistit pouze trend změny. U běžných teploměrů se daleko víc uplatňuje jejich tepelná kapacita a zatěžování systému spotřebou tepla k vlastní činnosti, což je u TDS potlačeno zvýšením/snížením výkonu pro udržení rovnováhy. Optimálně vyvážený senzor rovněž dosahuje značné citlivosti.

TDS také umožňuje bezkontaktní měření. K rozvážení můstku stačí změny v tepelné vodivosti v prostředí mezi čidly, případně ovlivnění čidel vyzářeným tepelným tokem externího aktivního prvku. Za změny tepelné vodivosti lze považovat např. zvýšení průtoku, vkládání překážky mezi čidla apod.

Univerzálnost TDS je do jisté míry výhodou, avšak nutnost jeho nastavení – nalezení optimálního výchozího rovnovážného stavu, může značně komplikovat některé aplikace TDS. To je dáno tím, že TDS je vázán na měřenou soustavu a jakákoli změna v této soustavě vede k přechodu do nového ustáleného stavu. Jelikož pro optimální měření je vhodné, aby při výchozím ustáleném stavu bylo výstupní napětí rovno polovině napětí napájecího, je třeba výchozí ustálený stav nastavovat pro výchozí uspořádání měřené soustavy.

3.6 Možné aplikace TDS

Na základě vytvoření tepelného gradientu mezi čidly podle principu funkce TDS dochází k vytvoření tepelného toku, jež je udržován operačním zesilovačem, který se jej snaží zachovat konstantní a jakoukoli jeho změnu kompenzuje změnou dodávaného výkonu. Konstantní tepelný tok lze narušit všemi třemi způsoby přenosu tepla, tj. kondukcí, konvekcí i radiací, nebo změnou tepelné vodivosti prostředí mezi čidly. Při požadavku na měření změny některé z výše uvedených příčin narušení tep. toku jsou ostatní příčiny považovány za parazitní a je nutné je vhodnou konstrukcí čidla a jeho umístěním v soustavě eliminovat. Lze tedy zkonstruovat TDS, který bude měřit změnu dodaného tepla jedním ze tří možných způsobů (aktivní prvky soustavy) nebo změnu tepelné vodivosti prostředí (pasivní prvky soustavy).

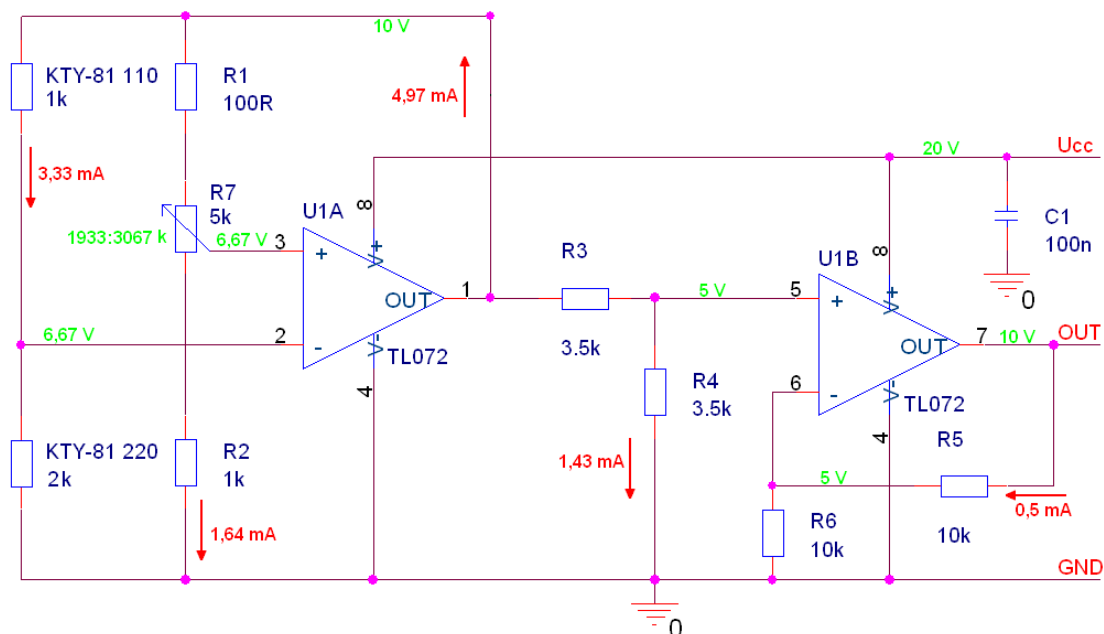
TDS tedy nabízí širokou škálu aplikací, které se odvíjejí od konstrukce čidla a nastavených parametrů senzoru. Například, při tepelném odizolování čidla od jeho okolí a ponechání otvoru pro průchod světla lze sledovat teplo šířené radiací. Konkrétně se může jednat o senzor slunečního svitu, bezkontaktní signalizátor nadproudu apod. Čidla tepelně vodivě spojená s měřenou soustavou pak mohou signalizovat přehřátí motoru, mohou monitorovat a řídit spalování. Zajímavým konstrukčním řešením je uspořádání čidel tak, aby mezi nimi mohla procházet tělesa, případně protékat kapalina. Tímto způsobem lze realizovat průtokoměry, čidla pro sledování výskytu vody v oleji, počítadlo prošlých kusů výrobků, řízení kvasných procesů aj.

4 Návrh termodynamického senzoru

4.1 TDS pro univerzální použití

Termodynamický senzor v můstkovém zapojení je tvořen v zásadě dvěma bloky (viz obr. 4-1). Prvním je operační zesilovač U1A v můstkovém zapojení (KTY-81 210, KTY-81 110, R1 a R2). Protože proud do vstupu zesilovače U1A můžeme zanedbat, protéká oběma čidly stejný proud. Vzhledem k tomu, že KTY-81 210 má dvojnásobný odpor oproti KTY-81 110, vzniká na něm dvojnásobná výkonová ztráta, čidlo se více zahřívá a mezi čidly vznikne teplotní gradient - utvoří se tepelný tok, který je udržován operačním zesilovačem (OZ). Při nastolení rovnováhy a ustálení můstku je mezi vstupy OZ nulové napětí a OZ dodává právě takový výkon, který udržuje tep. tok neměnný. Po rozvážení můstku OZ zvyšuje, případně snižuje, výstupní napětí pro opětovné dosažení rovnováhy. Právě změna výstupního napětí OZ U1A je indikací změny na vstupu senzoru.

Druhý blok tvoří OZ U1B v rozdílovém zapojení. Zařazen je především pro posílení výstupu senzoru a nastavení úrovně výstupního napětí. Kvůli odrušení je použit blokovací kondenzátor C1.



Obr. 4-1 Schéma univerzálního zapojení TDS s vypočtenými napětími a proudy ve vyváženém stavu

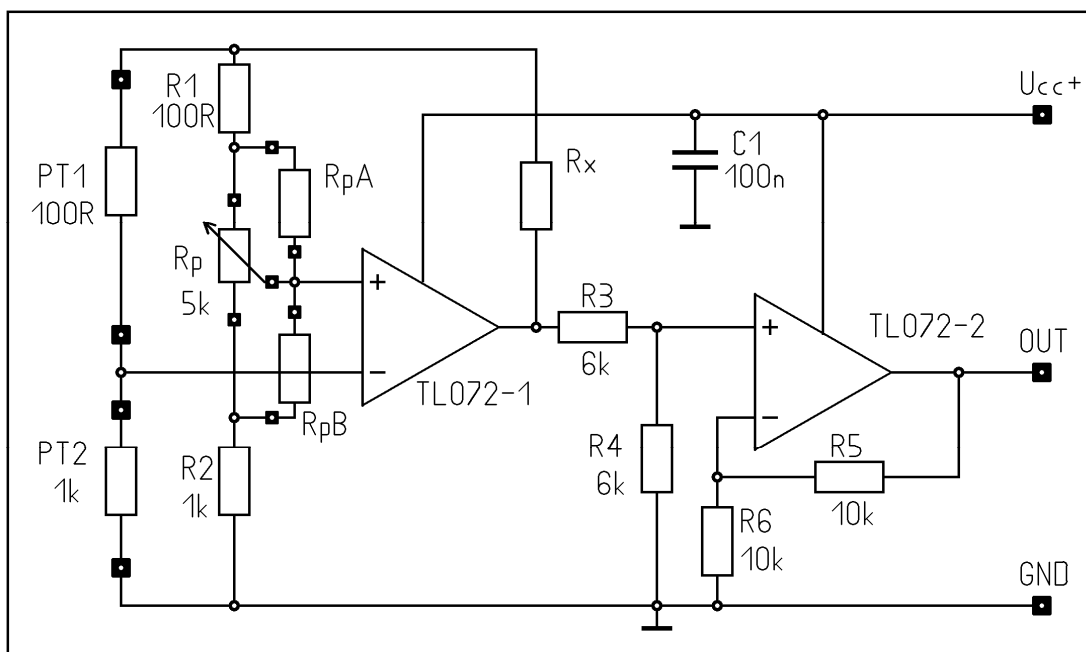
Uvedení do provozu

Předpokládejme plošný spoj i součástky bez vad. Prvním krokem při uvádění do provozu bude připojení napájecího napětí a kontrola stavu součástek. V druhé fázi je nutné nastavit na výstupu napětí odpovídající polovině napájecího napětí – to je kvůli využití celého měřicího rozsahu a nastavení největší citlivosti. Před vyvážením senzoru je nutné umístit čidla tam, kde budou měřit. Při další manipulaci s nimi by se můstek rozvážil.

Nastavení optimálního výstupního napětí probíhá potenciometrem R7. Je možné, že se při nastavování projeví hystereze, přesto by mělo nastavení proběhnout relativně snadno. V naprosté většině případů je na výstupu U1B saturační napětí. Po vyvážení senzoru lze změřit napětí a proudy 2. bloku. Naměřené údaje by měly odpovídat údajům na obr. 4-1 s přihlédnutím ke zidealizování při výpočtech. Napětí 1. bloku jsou neměřitelná. Přiložením sondy měřicího přístroje dochází k rozvážení můstku a tím k uvedení výstupu U1B do saturace.

4.1.1 Návrh zapojení TDS

Úkolem při realizaci bylo vytvořit univerzální modul TDS s možností externího připojení snímacích rezistorů. Dále možnost připojení potenciometru, nebo odporů R_{pA} a R_{pB} , s hodnotami odpovídajícími konkrétnímu nastavení potenciometru R_p . Schéma zapojení vychází z praktických poznatků dřívějšího zkoumání.



Obr. 4-2 Schéma zapojení univerzálního TDS

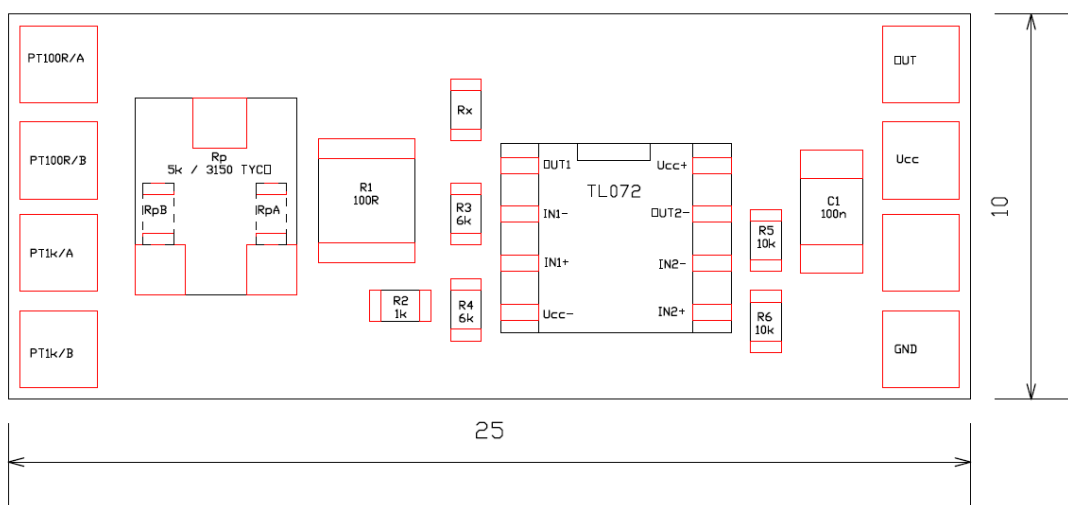
4.1.2 Seznam součástek

| Součástka | Hodnota | Pouzdro |
|--------------------|---------------|-----------|
| Operační zesilovač | TL072 | SO8 |
| R_p | 5 k Ω | 3150 Tyco |
| R_1 | 100 Ω | 1210 |
| R_2 | 1 k Ω | 0603 |
| R_3, R_4 | 6 k Ω | 0603 |
| R_5, R_6 | 10 k Ω | 0603 |
| R_x | | 0603 |
| C_1 | 100 nF | 1204 |

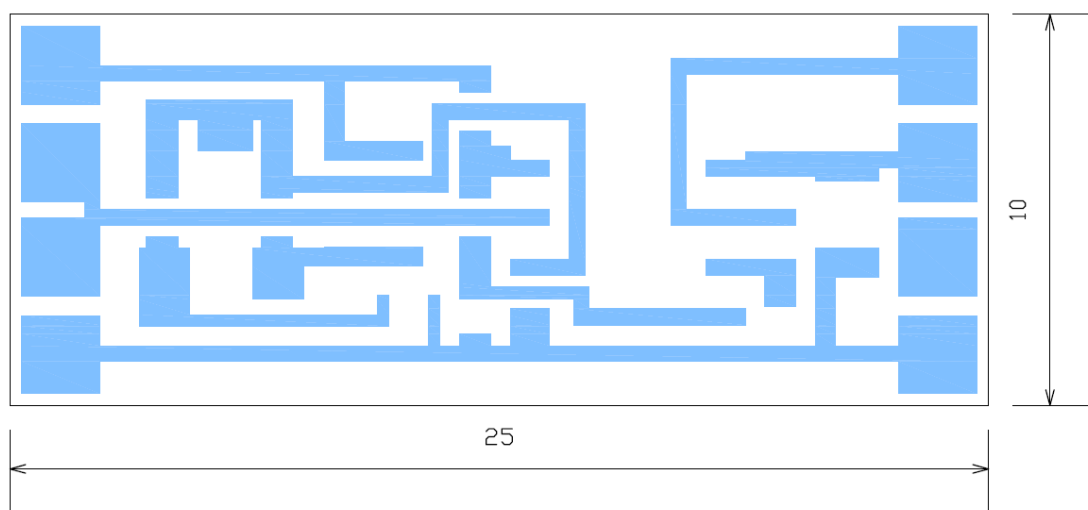
Zadané parametry TDS

Napájecí napětí: 24 V

4.1.3 Návrh topologie



Obr. 4-3 Osazení univerzálního TDS součástkami



Obr. 4-4 Vodivý motiv univerzálního TDS

4.1.4 Technická řešení

Protože navrhovaný termodynamický senzor má být univerzální, bylo nutné tuto skutečnost zohlednit při návrhu hybridního obvodu. Proto jsem zvolil následující řešení:

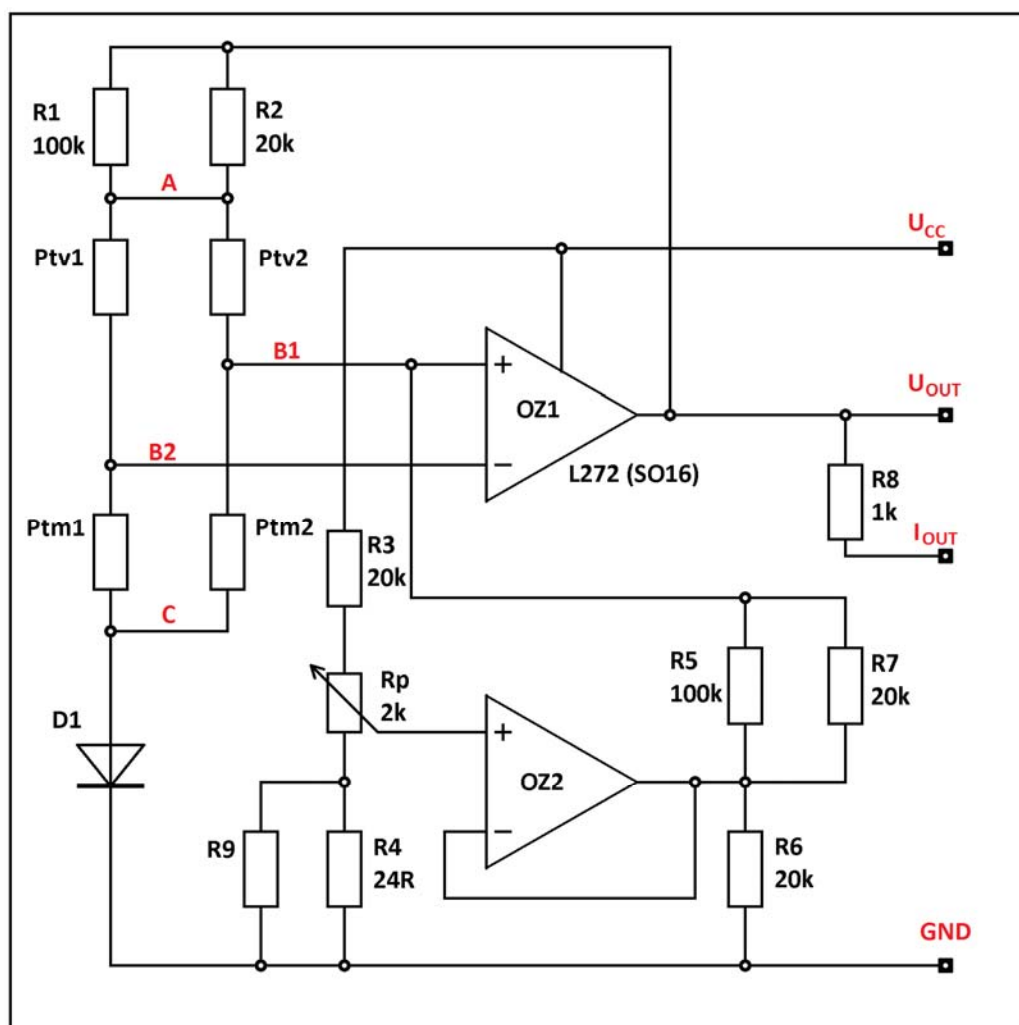
- 1) Možnost připojení potenciometru pro dovážení můstku. Po vlastním nastavení, je možné tento potenciometr vyjmout z obvodu a nahradit jej odpovídajícími hodnotami rezistorů R_{pA} a R_{pB} (Pozn. Dle získaných zkušeností je senzor třeba vždy vyvážit a nahrazení potenciometru dvěma odpory se dále jeví jako nevhodné).

2) Deska hybridního obvodu má modulový charakter, výstupy a vstupy jsou proto vyvedeny pomocí konektorů.

- konektory bude tvořit konektorový hřebínek
- v případě nutnosti kvůli zvýšení mechanické pevnosti je možné konektor připevnit k substrátu pomocí lepidla, např. epoxidového [22]

4.2 Návrh TDS tepelné radiace

Funkcí termodynamického senzoru tepelné radiace je převod absorbovaného tepelného záření na napětí. K tomu dochází na základě narušení tepelné rovnováhy odporových děličů tvořených platinovými elementy P_{TV1} , P_{TM1} , P_{TV2} a P_{TM2} a následnému přizpůsobení výstupního výkonu operačního zesilovače za účelem udržení konstantního tepelného toku mezi platinovými elementy.



Obr. 4-5 Schema TDS tepelné radiace

Hlavní částí obvodu jsou odporové děliče $Pt_{V1} - Pt_{M1}$ a $Pt_{V2} - Pt_{M2}$ (čidlo) a operační zesilovač OZ1 (L272). Platinové elementy jsou navrženy tak, aby platilo $Pt_{V1} = 2 \cdot Pt_{M1}$. Oběma děliči protéká proud z výstupu OZ1 a vytváří na nich úbytek napětí, který operační zesilovač dále porovnává. Protože proud tekoucí do vstupu OZ1 je zanedbatelný, teče stejný proud oběma elementy $Pt_{V1} - Pt_{M1}$. To stejné platí pro dělič $Pt_{V2} - Pt_{M2}$. Na základě tohoto a výše zmíněné podmínky je zřejmé, že na elementech Pt_V vznikne dvojnásobný úbytek napětí, resp. dvojnásobný ztrátový výkon, který se přemění na teplo, oproti Pt_M . Mezi prvky $Pt_V - Pt_M$ se tedy vytvoří teplotní gradient vedoucí k vytvoření tepelného toku. Protože je z výstupu OZ1 stále dodávána energie, nedochází k vyrovnání teplot obou elementů, ale k vytvoření ustáleného tepelného toku, který se šíří všemi třemi možnými způsoby přenosu tepla. V závislosti na geometrickém uspořádání platinových elementů lze pak některou ze složek tepelného toku narušovat, čímž dojde k narušení ustáleného stavu, což se projeví na výstupu OZ1 změnou napětí. Aby byl senzor schopný dostatečně rychle reagovat na změnu a pokrýt výkon potřebný k udržení konstantního tepelného toku, je třeba použít výkonový OZ.

Rezistory R1 a R2 spolu s diodou D1 slouží k přizpůsobení napětíových úrovní obou děličů. Dioda D1 zvyšuje napětí v uzlu pod děliči o 0,7 V kvůli zajištění minimálního vstupního napětí zesilovače. Rezistory R1 a R2 mají za úkol nastavit napětí v uzlu nad děliči, a tím de facto proud můstkem.

Část obvodu s OZ2 slouží k proudovému posílení děliče $Pt_{V2} - Pt_{M2}$, jímž lze nastavit úroveň výstupního napětí OZ1 v ustáleném stavu – nastavení pracovního bodu senzoru. Rezistory R3, $R_P(1)$ a $R_P(2)$, R4, R9 tvoří napětíový dělič pro nastavení vstupního napětí napětíového sledovače s OZ2, resp. k nastavení výstupního napětí OZ2. Rezistor R6 zde slouží jako zátěž, aby OZ2 nebyl nezatížen. Pomocí kombinace rezistorů R5 a R7 nastavují velikost proudového posílení.

4.2.1 Uspořádání můstku

Pro TDS tepelné radiace, na kterém proběhla měření, označují indexy u Pt_V a Pt_M , na které straně substrátu se daný element nachází. Ve schématu (4-5) je uvedeno jedno z možných propojení elementů. Dále lze např. vytvořit křížený dělič $Pt_{V1} - Pt_{M2}$ a $Pt_{V2} - Pt_{M1}$ a tím získat větší citlivost senzoru. Při osvětlení čidla z jedné strany se totiž snižuje dělicí poměr jednoho z děličů, zatímco u druhého se zvětšuje. Oba děliče tak působí proti sobě, čímž zvyšují změnu vstupního napětí OZ1. Bohužel, zároveň se sníží stabilita obvodu a je

obtížné jej nastavit tak, aby byl schopen dosáhnout ustáleného stavu. Z tohoto důvodu se mi nepodařilo najít vhodný ustálený stav u zapojení s kříženým děličem, především kvůli problémům s přehříváním jakožto důsledku požadavku dodání velkého výkonu.

4.2.2 Nastavení TDS tepelné radiace

U TDS tepelné radiace lze pomocí rezistorů R2, R7 a R9 dostavovat jeho vlastnosti. Rezistor R2 slouží k tzv. statickému nastavení, což je uzpůsobení vstupního napětí OZ1 a nastavení proudu obvodem. Čím je tento odpor větší, tím menší proud OZ1 dodává a zároveň tím nižší je napětí na jeho vstupech. Snižování odporu má za následek nárůst dodávaného proudu a zvýšení napětí na vstupech OZ1. Při jeho návrhu je třeba brát v úvahu minimální vstupní napětí OZ a proudovou zatížitelnost obvodu.

Pro optimální nastavení pracovního bodu senzoru je vhodné brát jako výchozí hodnotu polovinu napájecího napětí, v tomto případě 12 V. Je to z důvodu využití celého rozsahu pro oba typy změny vstupní veličiny – zvýšení/snížení přijaté energie.

Nastavení dynamického chování senzoru, tzn. zvýšení jeho rychlosti odezvy, lze provést volbou odporu rezistoru R7. Čím je tento rezistor menší, tím je rychlost odezvy senzoru vyšší. Nejvyšší rychlosti lze dosáhnout při nulových hodnotách R5 a R7. Při malých hodnotách těchto odporů nastává problém se stabilitou senzoru a nalezením ustáleného stavu.

Rezistor R9 v kombinaci s rezistorem R4 slouží ke zvýšení napětí v bodě pod potenciometrem, čímž nastavuje min. výstupní napětí sledovače OZ2 a tím rozsah regulace výstupního napětí OZ1.

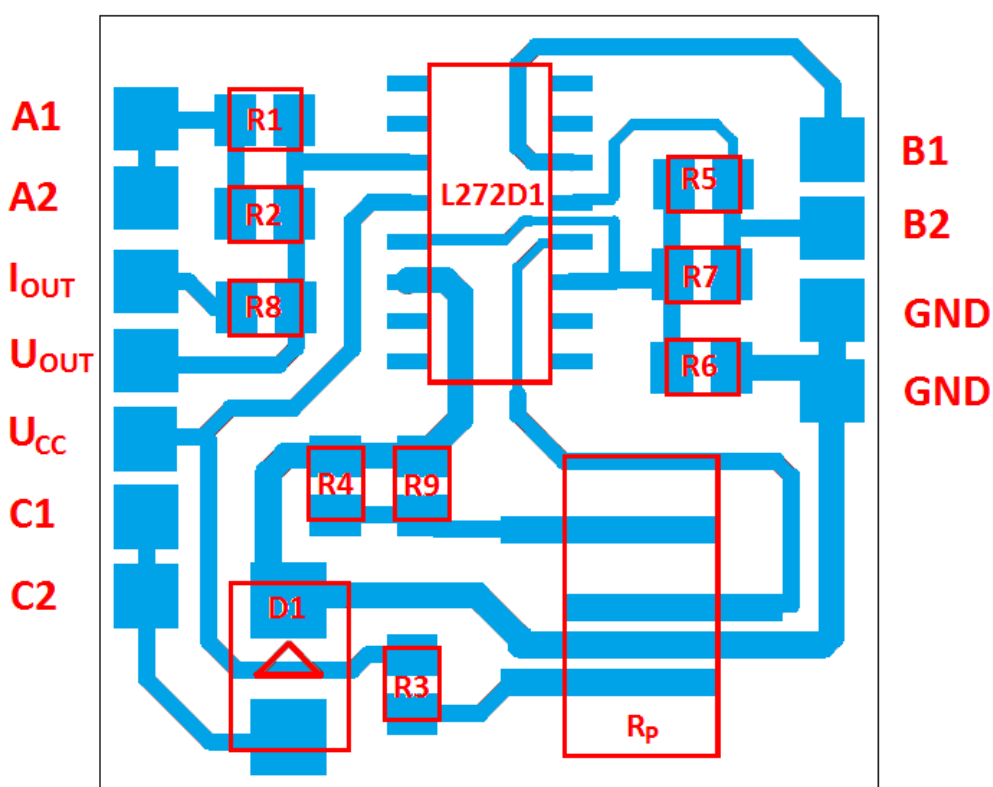
Protože nastavení TDS tepelné radiace ovlivňuje celá řada faktorů, včetně uspořádání měřící soustavy a parametrů čidla, nelze jednoznačně stanovit způsob nastavení pracovního bodu a parametry výše zmíněných součástek je třeba najít experimentálně.

4.2.3 Realizace senzoru

Volba technologie realizace TDS tepelné radiace vycházela především z požadavků na distribuci tepla. U čidla je to z důvodu snížení tepelné kapacity a tím zvýšení jeho rychlosti odezvy. U elektronického obvodu je pak kladen důraz na odvod tepla z operačního zesilovače, jelikož se jedná o aplikaci s relativně velkým požadovaným výkonem. Ten by bylo možné zajistit chladičem, avšak v SMD provedení dle zadání je možnost připojení chladiče velice omezená. Z tohoto důvodu jsem se rozhodl obvod realizovat tlustovrstvou technologií jako hybridní obvod na keramický substrát,

který má přibližně stokrát vyšší tepelnou vodivost než standardní substráty pro povrchovou montáž, např. FR4. Čidlo jsem rovněž realizoval tlustovrstvou technologií na keramický substrát, a to jednak z důvodu dobré tepelné vodivosti, ale také kvůli možnosti vytvoření platinového topného elementu.

Jako základní substrát pro výrobu el. obvodu jsem volil korundovou keramiku o rozměrech 50 x 50 mm. Navržená topologie obvodu je optimalizována pro rozměr 25 x 25 mm, na jeden substrát se tedy vejde čtyřikrát.



Obr. 4-6 Vodivý motiv TDS tepelné radiace s osazením součástkami

Soupis součástek

| | |
|----------------------|---------------------|
| R1, R5 | R0805 100K 1% |
| R2, R3, R6, R7 | R0805 20K 1% |
| R8 | R0805 1K 1% |
| R4, R9 | R0805 24R 1% |
| R _p | 64 Y 2K |
| D1 | 1N4007 SMA DO-214AC |
| OZ1, OZ2 | L272D SMD |

Rozmístění svorek na desce obvodu jsem volil tak, aby byl vodivý motiv co nejjednodušší kvůli minimalizaci zabrané plochy a množství použité vodivé pasty.

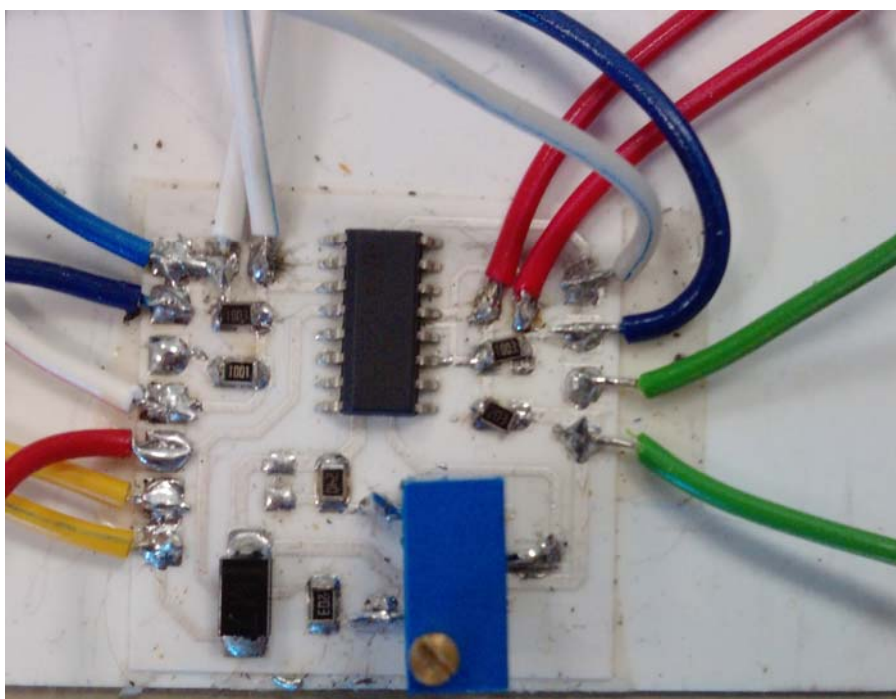
Popis svorek:

| | |
|------------------------|---|
| A1, A2 | vývody pro připojení čidla (viz uzel A, obr. 4-6) |
| I _{OUT} | proudový výstup TDS |
| U _{OUT} | napěťový výstup TDS |
| UCC | napájecí svorka (24 V) |
| C1, C2 | vývody pro připojení čidla (viz uzel C) |
| B1, B2 | vývody pro připojení čidla (viz uzly B1 a B2) |
| GND | napájecí svorka (0 V) |

4.2.4 Postup výroby desky TDS

1. tisk vodivého motivu na poloautomatickém sítotisku Aurel Mod. C880 – použita vodivá pasta CSP-1381,
2. leveling po dobu 10 min.,
3. zasušení ve vsázkové peci LAC LMH C7/12 při 150 °C/ 15 min.,
4. výpal v průtažné peci BTU BUCR-1 při teplotě 850 °C,
5. dělení substrátu – narýchování perem s diamantovým hrotem a následné rozlámání,
6. tisk pájecí pasty Cobar SAC-XF-3 šablonovým tiskem (ručně),
7. osazení součástkami na osazovacím zařízení SMT manipulátor M01,
8. pájení přetavením na HotPlate Ersa HP100 SMD Rating-Plate při 250 °C,
9. připojení kontaktů a THT součástek ručním pájením.

Pro tisk pájecí pasty mi byla zhotovena šablona na měděném plechu pomocí laseru panem Ing. Kosinou. Jako podklad pro její výrobu posloužil zhotovený vodivý motiv.

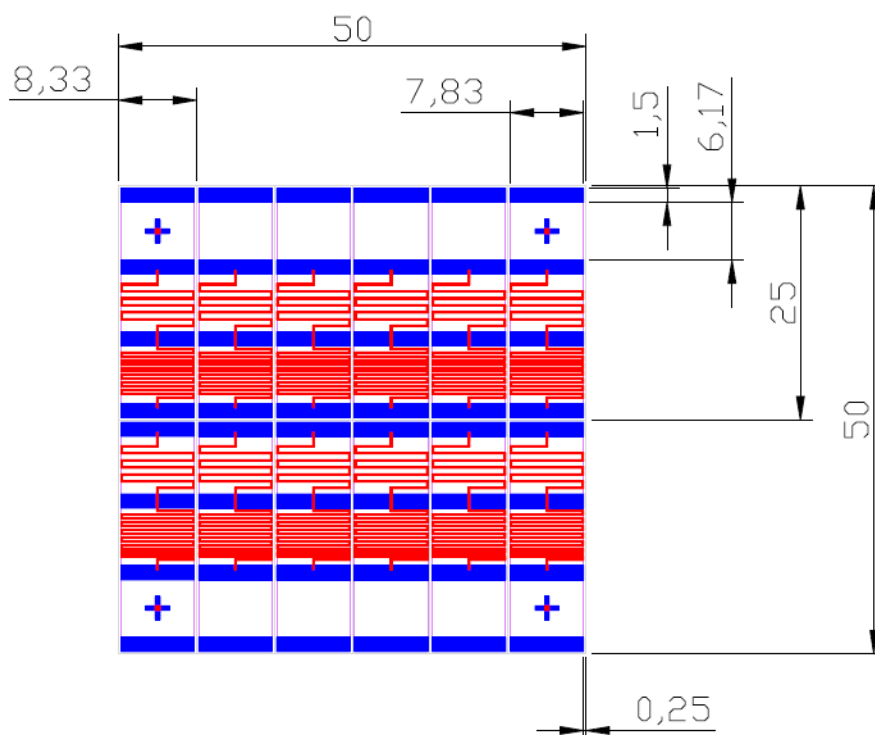


Obr. 4-7 Realizovaný TDS tepelné radiace

4.2.5 Návrh čidla

Čidlo se skládá ze dvou odporových děličů tvořených topnými elementy Pt_{V1} - Pt_{M1} a Pt_{V2} - Pt_{M2} , každý z nich na jedné straně substrátu, přičemž elementy na jedné straně jsou uspořádány v opačném pořadí než na straně druhé. Je realizované tlustovrstvou technologií na keramickém substrátu z důvodu možnosti zhotovení motivu platinou a kvůli dobré tepelné vodivosti keramiky, což snižuje tepelnou kapacitu čidla a tím zvyšuje jeho citlivost a rychlost odezvy.

Samotné čidlo se stává ze dvou vrstev – vodivé (kontaktní plošky) a platinové (topné elementy), a je rozděleno do tří stejně velkých ploch vzájemně oddělených kontaktními ploškami. První z nich slouží pro připevnění, příp. připevnění k chladiči. Na zbylých dvou jsou vytvořeny meandry Pt_V a Pt_M , pro které platí $Pt_V = 2 \cdot Pt_M$. Pt_V má tedy dvojnásobný odpor, resp. počet čtverců, než Pt_M . Meandry jsou realizovány platinovou pastou o šířce cesty 0,15 mm. Pt_V má délku 105,897 mm, tj. 705,98 čtverců, a délka Pt_M je 51,739 mm, tedy 340,9 čtverců. Větší meandr není navržen přesně dvojnásobný z důvodu daných rozměrů plochy, na které má být realizován, také kvůli rovnoměrnému rozložení. Chyba 12 čtverců je však vzhledem k přesnosti TLV rezistorů zanedbatelná.



Obr. 4-8 Topologie multimotivu čidla TDS tepelné radiace

Rozměry čidel se odvíjí od rozměrů předřezaného keramického substrátu, který jsem měl k dispozici. Při samotné realizaci byl však použit nepředřezaný. Dělal jsem jej rýhováním perem s diamantovým hrotem a následným lámáním.

4.2.6 Postup výroby čidla

1. tisk platinové vrstvy - pasta ESL 5545, na substrát z korundové keramiky tloušťky 0,635 mm na sítotiskovém poloautomatu Aurel Mod. C880,
2. leveling – cca 10 min.,
3. zasušení ve vsázkové peci LAC LMH C7/12 při 125 °C/15 min.,
4. výpal v průtažné peci BTU BUCR-1 při teplotě 980 °C,
5. tisk vodivé vrstvy – pasta CSP-1381, na sítotiskovém poloautomatu Aurel Mod. C880,
6. leveling – cca 10 min.,
7. zasušení ve vsázkové peci LAC LMH C7/12 při 150 °C/15 min.,
8. výpal v průtažné peci BTU BUCR-1 při teplotě 850 °C,
9. dělení čidel narýhováním perem s diamantovým hrotem a následné rozlámání.

Výběr vhodných čidel pro měření proběhl na základě shody platinových elementů s nejbližšími poměry odporů v děliči $PtV1/PtM1 = PtV2/PtM2$. Čím blíže k sobě tyto odpory jsou, tím větší je citlivost čidla.

Kvůli zvýšení rychlosti odezvy na snížení působení tepla je čidlo připevněno na chladič (4-9), který snižuje jeho tepelnou kapacitu.



Obr. 4-9 Čidlo pro TDS tepelné radiace upevněné na chladiči

4.2.7 Výroba síť pro šablonový tisk

Pro realizaci TDS tlustovrstvou technologií jsem použil sadu přípravků od firmy Autotype a neovrstvené síto upnuté do rámu. Pro výrobu síta je zapotřebí pozitivní filmová předloha tištěná tak, aby ji bylo možné přiložit na síto potištěnou stranou. Je nutná vysoká kvalita tisku, aby natištěná vrstva nebyla prostupná pro světlo. Postup jsem optimalizoval experimentálně a několikrát ověřil. Nejmenší dosažené rozlišení je 150 μm .

Postup ovrstvení síta

Pozn. Kroky 3 – 6 probíhají v temné komoře.

- 1) Očištění a odmaštění desky
 - a. nanesení lihu (popř. xilenu),
 - b. působení 30 s,
 - c. oplach pod tekoucí vodou.

- 2) Nanesení přípravku pro zlepšení snášivosti povrchu Autotype Universal Mesh Prep
 - a. nanášení štětcem,
 - b. působení 1:30 min.,
 - c. oplach pod tekoucí vodou.
- 3) Navalování fotorezistu Autotype Capillex CP (negativní)
 - a. ponoření síta do vody a okapaní po 30 s,
 - b. ponoření připraveného fotorezistu (délka a šířka se odvíjí od parametru sítotisku – šířka těrky, délka pohybu těrky),
 - c. přiložení fotorezistu do středu síta,
 - d. navalování válečkem v různých směrech.
- 4) Sušení
 - a. suší se fénem studeným vzduchem (teplota vzduchu nesmí přesáhnout 35 °C),
 - b. sušení trvá cca 10 min. Rozhodující je optická kontrola (nevysušená místa jsou tmavá oproti suchým).
- 5) Osvit
 - a. sloupnutí fólie z fotorezistu,
 - b. přiložení předlohy potištěnou stranou na síto,
 - c. přiložení skla pro vyrovnání předlohy a jeho zatížení po stranách mimo motiv, kvůli správnému kontaktu se sítem,
 - d. síto se umístí na tmavou matnou podložku z důvodu eliminování podsvícení motivu odraženým světlem,
 - e. osvit UV lampou za vzdálenosti 10 cm po dobu 7:30 min.
- 6) Vyvolání
 - a. po osvitu se síto ponoří do kádinky s vodou,
 - b. nevyvolaný rezist lze odstranit buď proudem vody (v daných podmínkách hůře proveditelné), nebo rychlými krouživými pohyby měkkým štětcem,
 - c. doba vyvolávání se odvíjí od průběžné optické kontroly.

Odvrstvování síta

- 1) nanesení CPS Stencil Remover Conc. 1:25
 - a. přípravek se nanáší pomocí štětce,
 - b. doba působení 2 min.
- 2) Odvrstvení
 - a. odstranit fotorezist lze krouživými pohyby štětce, proudem vody nebo ultrazvukem ve vodní lázni,
 - b. doba odvrstvování se odvíjí od optické kontroly,
 - c. při nedostatečném odvrstvení se lze vrátit k bodu 1).
- 3) Odmaštění síta
 - a. aplikace lihu, příp. xylenu,
 - b. doba působení cca 30 s,
 - c. oplach tekoucí vodou.

Problémem u tohoto způsobu ovrstvení je vyšší hrubost vrstvy, což způsobuje zachytávání tlustovrstvých past při tisku a obtížené čištění síta před dalším tiskem. To může být problém v případě má-li být síto použito pro tisk jinou pastou, jež nesmí být kontaminována. Po hrubém očištění standardním způsobem, tzn. lihem či xylenem, může být síto očištěno ve vodní lázni ultrazvukem. Doba expozice musí být však velmi krátká (cca 5 s), problémem bude pravděpodobně i opakované mytí z důvodu narušení ovrstvení síta.

5 Měření vlastností TDS

5.1 Měření převodní charakteristiky univerzálního TDS

Cílem tohoto měření bylo získat převodní charakteristiku V/°C TDS použitého jako teploměr a ověřit její linearitu.

Použité přístroje

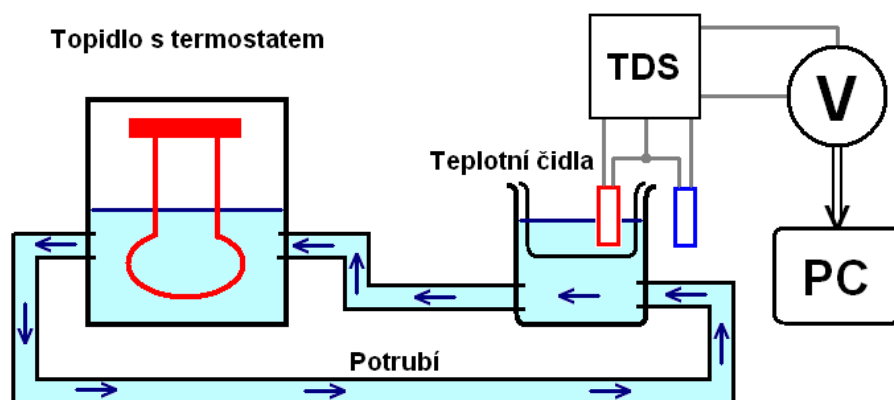
- topidlo s termostatem,
- rtuťový teploměr,
- multimetr UNI-T UT71D,
- počítačový program Interface Program 1.10 UT71C/D/E,
- TDS.

Postup měření

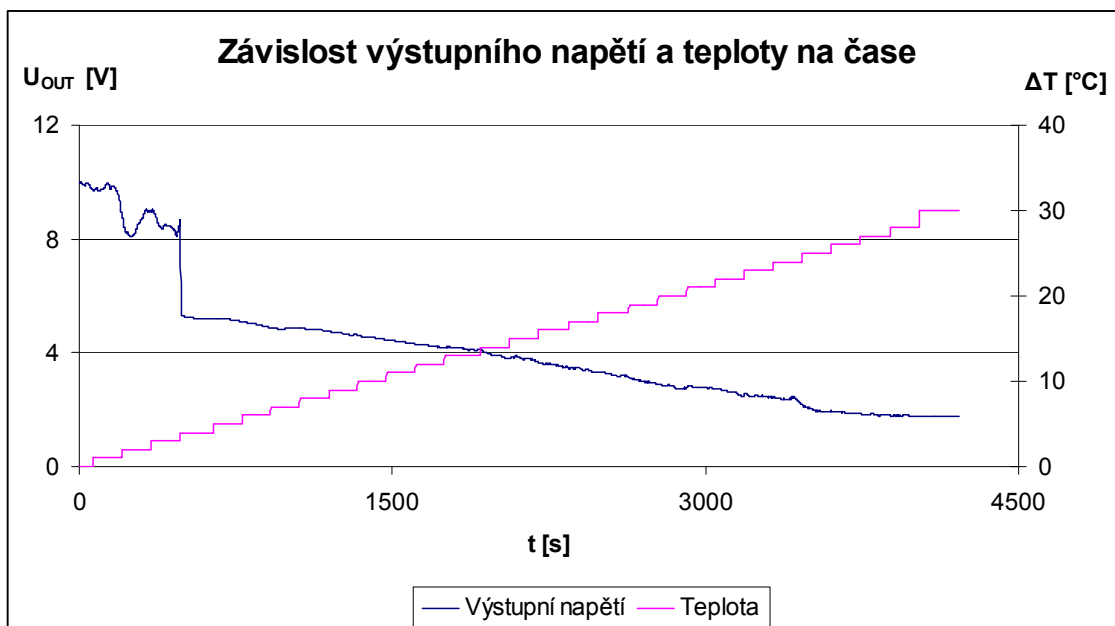
Teplotní čidla jsem umístil tak, že KTY-81 210 bylo ve vzduchu při pokojové teplotě a KTY-81 110 ponořeno ve dvojitě skleněné kádince s vodou, která zde sloužila jako nositel tepla. Situace je znázorněna na obrázku 4-6.

Měření začalo na pokojové teplotě $T = 25 \text{ }^\circ\text{C}$. Po ustálení soustavy na definované teplotě byla teplota zvyšována s krokem $1 \text{ }^\circ\text{C}$, ustálení TDS probíhalo po $3 \text{ min./ } 1 \text{ }^\circ\text{C}$. Referenční teplotu jsem měřil rtuťovým teploměrem umístěným ve skříně topidla. Výstupní napětí TDS bylo v čase zaznamenáváno pomocí multimetru ve spojení s programem Interface Program 1.10 UT71C/D/E. Měření proběhlo do teploty, při které výstupní napětí U_{OUT} odpovídalo saturačnímu napětí operačního zesilovače.

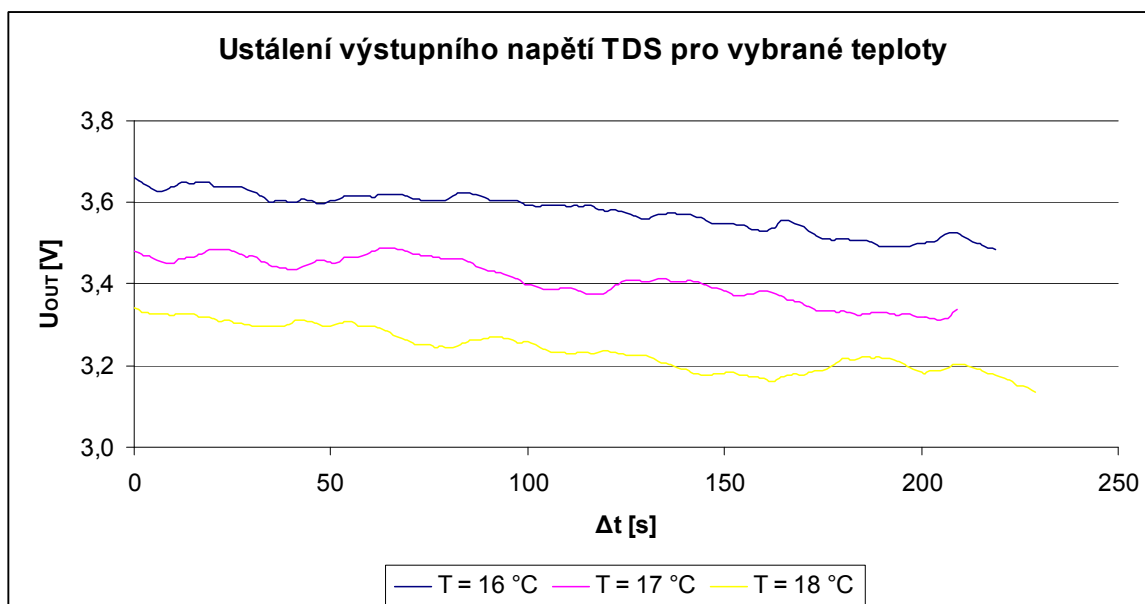
Z naměřených údajů jsem sestavil převodní charakteristiku V/°C vztaženou k počáteční teplotě měření $25 \text{ }^\circ\text{C}$.



Obr. 5-1 Uspořádání měření převodní charakteristiky TDS



Obr. 5-2 Závislost výstupního napětí TDS a teploty vody na čase



Obr. 5-3 Časový průběh ustálení výstupního napětí TDS pro vybrané teploty

Závěr měření

Z grafu závislosti výstupního napětí TDS na čase na obrázku 4-7 je patrné nedostatečné ustálení systému, především na začátku měření. Při bližším prozkoumání však k ustálení nedojde ani ve zdánlivě lineární oblasti, tak jak je ukázáno na obr. 4-8, kde je zobrazena závislost výstupního napětí po čas ΔT , tj. čas setrvání systému na vybraných teplotách $T = 16, 17$ a 18 °C.

To je s největší pravděpodobností způsobeno nedostatečným časem pro ustálení, a také cirkulací vody, která i přes použití dvojité skleněné kádinky působí změnu vlastností prostředí pro šíření tepelného toku mezi čidly senzoru. Proto nebylo dosaženo očekávaného výsledku, tedy naměření závislosti tvořené sérií jednotkových skoků tvarem podobných výsledku měření odezvy na jednotkový skok TDS.

U vyhodnocení je nutné zmínit, že změna teploty neprobíhala skokově, ale plynule s přibližně 40 s náběhem. [22]

5.2 Měření odezvy TDS na jednotkový skok

Cílem experimentu bylo zjištění odezvy výstupu TDS na jednotkový skok působený změnou tepelného toku.

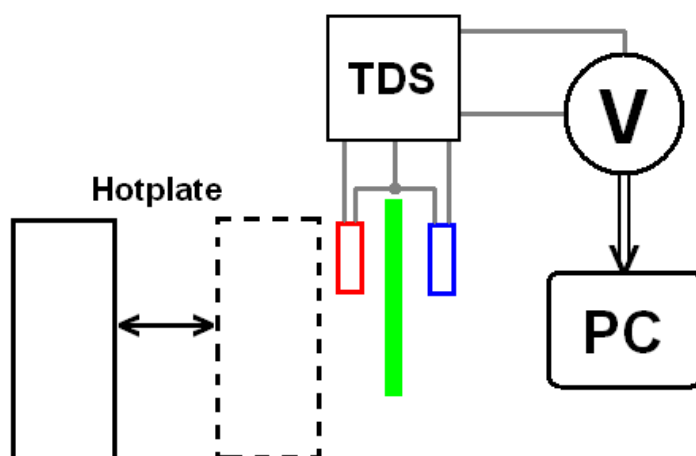
Použité přístroje

- hotplate s termostatem,
- multimetr UNI-T UT71B,
- multimetr UNI-T UT71D,
- počítačový program Interface Program 1.10 UT71C/D/E,
- TDS,
- deska FR4 0,6 mm.

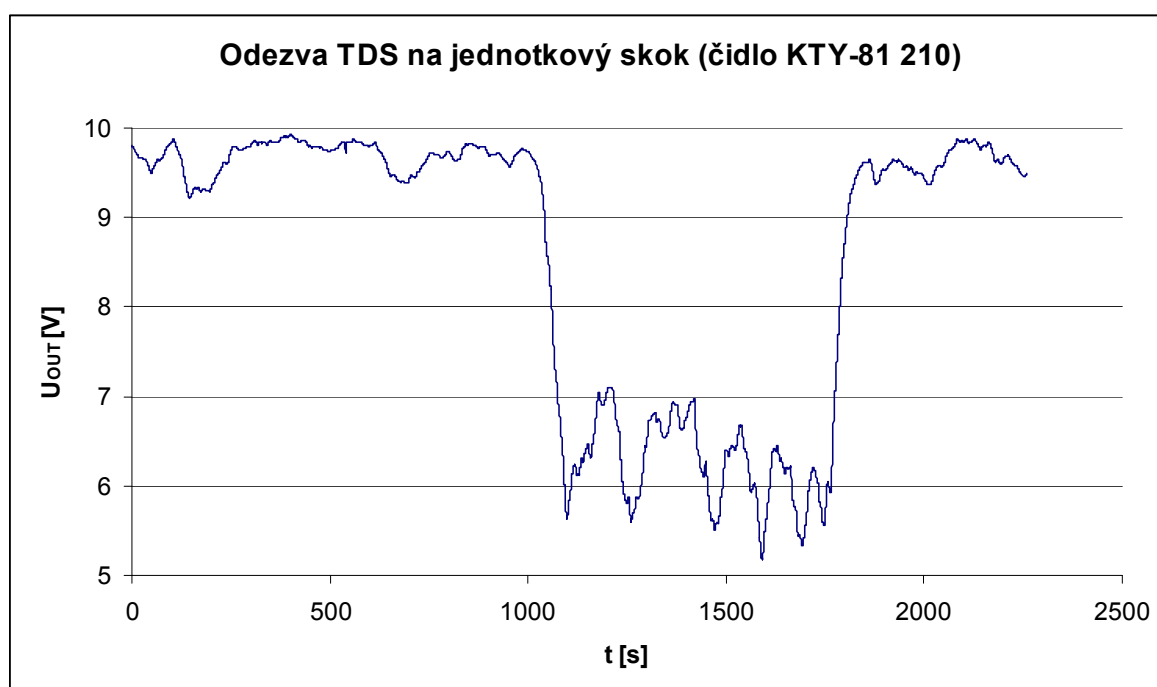
Postup měření

Čidla TDS byla upevněna do stojanu a byla mezi ně vložena deska z FR4 1,6 mm silná. V tomto uspořádání jsem TDS nechal ustálit za pokojové teploty 24,7 °C. Po ustálení jsem přiblížil hotplate rozehřátý na 65 °C do vzdálenosti 1 cm od čidla. Jako první byl hotplate přikládán k čidlu KTY-81 210. Celý postup se opakoval i pro čidlo KTY-81 110. Uspořádání soustavy je na obrázku 5-4.

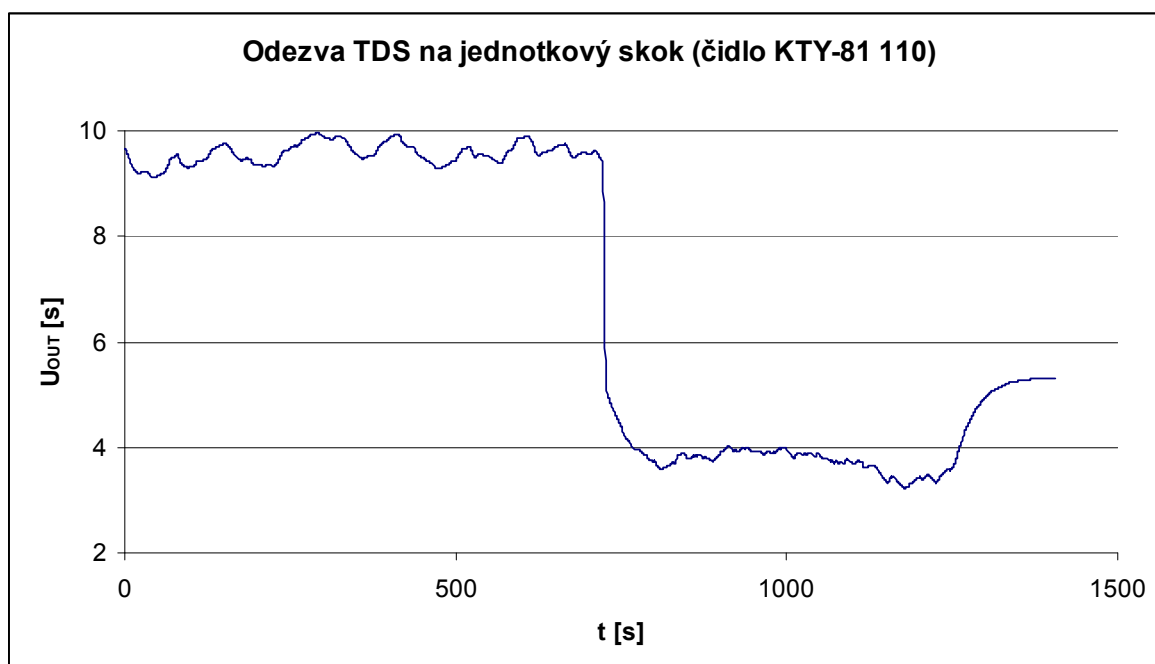
Protože při přiblížení hotplate nedojde ke změně prostředí mezi čidly, senzor se rozváží pouze vlivem tepelného toku.



Obr. 5-4 Uspořádání soustavy pro měření odezvy TDS na jednotkový skok



Obr. 5-5 Odezva na jednotkový skok - čidlo KTY-81 210



Obr. 5-6 Odezva na jednotkový skok - čidlo KTY-81 110

Výpočty

Rychlost přeběhu (SR) – je počítána jako podíl změny napětí ku změně času v lineární části překlopení výstupního napětí. SR_{FALL} a SR_{RISE} jsou rychlosti sestupné a náběžné hrany výstupního signálu.

$$SR = \frac{\Delta U}{\Delta t}, \quad (5-1)$$

Výpočet rychlosti přeběhu

kde SR je rychlost přeběhu (FALL – sestupná hrana, RISE – vzestupné hrana), ΔU změna napětí a Δt rozdíl časů

- KTY-81 210

$$SR_{FALL} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|8,414 - 7,388|}{|1053,98 - 1063,852|} = \frac{1,026}{9,872} = 0,1039 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$SR_{RISE} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|7,713 - 8,485|}{|1784,115 - 1793,349|} = \frac{0,772}{9,234} = 0,0836 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$$

- KTY-81 110

$$SR_{FALL} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|U_1 - U_2|}{|723,9389 - 726,5762|} = \frac{3,017}{2,6373} = 1,1440 \quad V \cdot s^{-1}$$

$$SR_{RISE} = \frac{\Delta U}{\Delta t} = \frac{|U_1 - U_2|}{|t_1 - t_2|} = \frac{|U_1 - U_2|}{|1273,157 - 1277,772|} = \frac{0,122}{4,61527} = 0,0264 \quad V \cdot s^{-1}$$

Velikost výchylky výstupního napětí – je počítána jako rozdíl průměrné hodnoty výstupního napětí v základním ustáleném stavu a v novém ustáleném stavu. Z ní je dále vypočtena citlivost TDS podle rozdílu pokojové teploty a teploty hotplately.

$$\Delta U_{OUT} = |U_{HI} - U_{LO}| \quad [V], \quad K = \frac{\Delta U_{OUT}}{|T_0 - T_{HP}|} \quad [V \cdot K^{-1}], \quad (5-2)$$

Výpočet velikosti výchylky výstupního napětí při jednotkovém skoku a citlivosti TDS

kde ΔU_{OUT} je změna výstupního napětí, U_{HI} průměrné výstupní napětí v základním ustáleném stavu, U_{LO} průměrné výstupní napětí v novém ustáleném stavu, T_0 teplota okolí, T_{HP} teplota hotplately a K je citlivost TDS

- KTY-81 210

$$\Delta U_{OUT} = |U_{HI} - U_{LO}| = |9,7099 - 6,4001| = 3,3098 \quad V$$

$$K = \frac{\Delta U_{OUT}}{|T_0 - T_{HP}|} = \frac{3,3098}{|24,7 - 65|} = 0,082 \quad V \cdot K^{-1}$$

- KTY-81 110

$$\Delta U_{OUT} = |U_{HI} - U_{LO}| = |9,5627 - 3,7420| = 5,820 \quad V$$

$$K = \frac{\Delta U_{OUT}}{|T_0 - T_{HP}|} = \frac{5,820}{|24,7 - 65|} = 0,144 \quad V \cdot K^{-1}$$

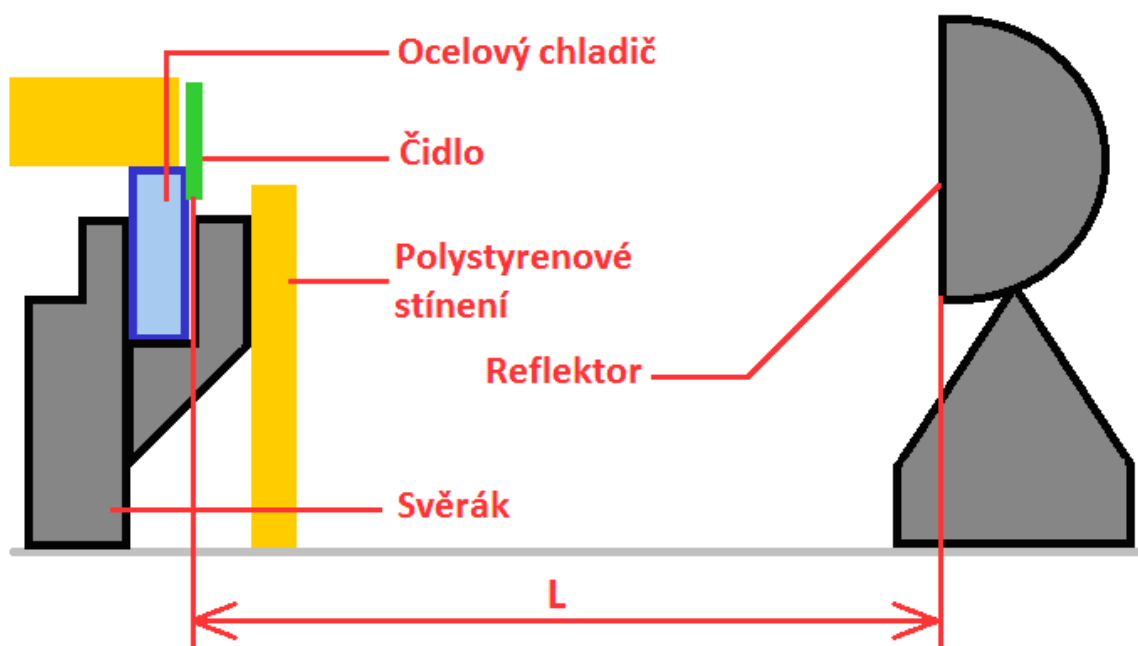
Závěr měření

Měřením jsem ověřil, že TDS je schopný zaznamenat změnu tepelného toku vnějším zdrojem, a zároveň jsem potvrdil, že jedno čidlo je citlivější na změnu než druhé. V mém případě je citlivější čidlo KTY-81 110, které vykazuje jak vyšší rychlost přeběhu SR_{FALL} , tak citlivost K .

U KTY-81 110 se mi nepodařilo naměřit průběh výstupního napětí při návratu do základního ustáleného stavu. SR_{RISE} je pro toto čidlo pouze informativní. Oproti očekávání se výstupní napětí TDS ustálilo na 5,3 V. Nejpravděpodobnější příčinou byla vazba v zemní smyčce elektrického rozvodu, nebo případné rušení. [22]

5.3 Měření odezvy na jednotkový skok TDS tepelné radiace

Účelem tohoto měření bylo zjištění citlivosti a rychlosti odezvy senzoru pro různé vzdálenosti umístění zdroje tepelného záření.



Obr. 5-7 Uspořádání měřicí soustavy pro měření odezvy na jednotkový skok

Popis měření

Měření proběhlo v laboratoři při standardním osvětlení pro vzdálenosti $l = 10, 40$ a 70 cm, na kterých jsem měřil odezvu senzoru na jednotkový skok. Změna vstupního signálu proběhla vždy po ustálení výstupního napětí senzoru. Jako zdroj tepelné radiace jsem použil žárovku opatřenou reflektorem. Aby nedocházelo k druhotnému ohřevu čidla jeho upevněním, opatřil jsem jej polystyrénovým stíněním. Čidlo je tak ohříváno pouze zářením reflektoru, které se skládá ze složky vyzářené žárovkou (lze nahradit bodovým zdrojem světla), složky odražené reflektorem (rovinné záření), jehož výkon při ideálním odrazu odpovídá 50% výkonu vyzářeného tepla žárovkou pro tuto konstrukci, a složky sekundární, na které se podílí veškeré části reflektoru, které jsou žárovkou zahřívány (nejen absorpcí tepelného záření, ale i kondukcí či konvekcí) a které jsou obtížně definovatelné. Patří mezi ně např. povrch žárovky, objímka, konstrukce reflektoru.

Pro zjednodušení výpočtu jsem sekundární zdroje záření zanedbal a uvažoval dále pouze složku přímou z bodového zdroje a složku reflektovanou. Při ideálním odrazu světla reflektorem odpovídá reflektovaný výkon 50 % tepelného výkonu žárovky, který je doplňkem k světelné účinnosti. Při použité žárovce s výkonem 100 W a účinnosti 10 % tvoří 90 % výkonu tepelná složka, tedy 90 W.

Výkon P_B z bodového zdroje ve vzdálenosti l vztažený na plochu lze pak vypočítat jako:

$$P_B = \frac{P}{4\pi \cdot l^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (5-3)$$

kde P je výkon zdroje záření a l vzdálenost od zdroje záření, resp. poloměr kulové plochy.

Reflektovaná složka P_{Ref} záření je potom :

$$P_{Ref} = \frac{0,5P}{\pi \cdot r^2} \left[\frac{W}{m^2} \right], \quad (5-4)$$

kde r je poloměr reflektoru.

Pro výpočet výkonu, jež dopadá na čidlo je možné využít vztah:

$$P_C = S_C (P_B + P_{Ref}) \quad [W], \quad (5-5)$$

kde P_C je výkon dopadající na čidlo a S_C plocha čidla.

Z odezvy výstupního napětí senzoru při osvětlení čidla daným výkonem se dále vypočítá citlivost senzoru jako změna výstupního napětí ku změně vstupního výkonu (viz rov. 5-6).

$$K = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_C} \left[\frac{V}{W} \right], \quad (5-6)$$

kde ΔU_{OUT} je změna výstupního napětí a ΔP_C změna dopadajícího výkonu na čidlo.

Takto vypočítaná citlivost je pouze orientační pro zjištění jejího trendu. Zanedbal jsem totiž mnoho faktorů, které na čidlo během měření působí včetně vyzáření veškerého ztrátového výkonu žárovkou a stoprocentního odrazu reflektoru.

Podmínky měření:

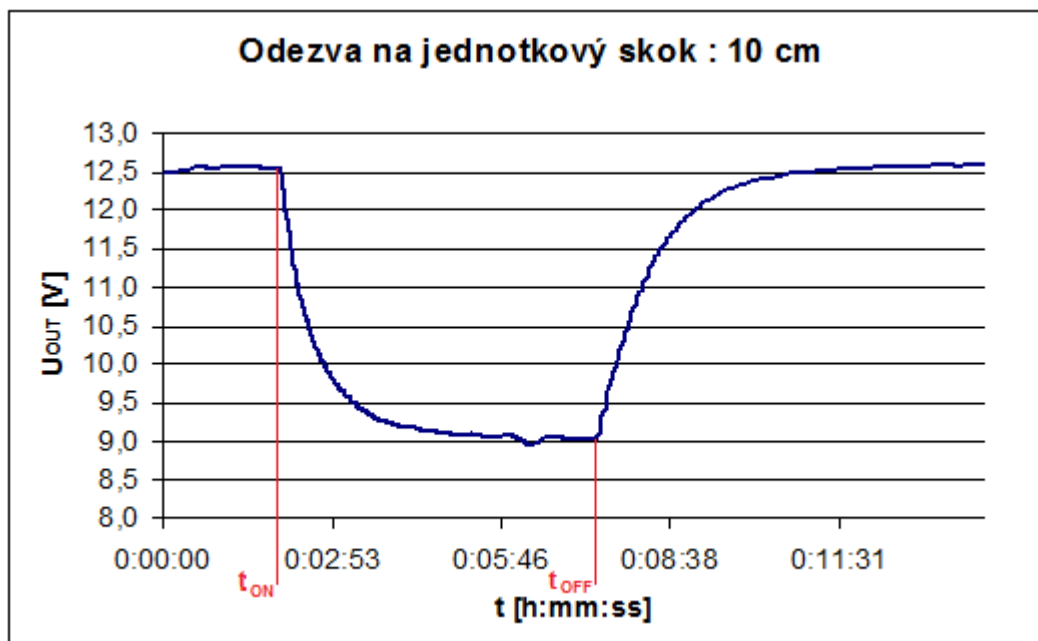
Teplota: 25,4 °C

Vlhkost: 42 %

Použité přístroje:

- svinovací metr,
- reflektor 100 W,
- zdroj napětí PSM3/3A,
- multimetr UNI-T UT71D,
- počítačový program Interface Program 1.10 UT71C/D/E.

Odezva TDS na jednotkový skok – reflektor ve vzdálenosti 10 cm



Obr. 5-8 Průběh výstupního napětí TDS při měření odezvy na jednotkový skok (reflektor 10 cm vzdálený)

Průběh měření:

$t = 0:00$ Ustálení

$t = 2:00$ Rozsvícení reflektoru (t_{ON})

$t = 7:25$ Zhasnutí reflektoru (t_{OFF})

$U_0 = 12,54 \text{ V}$ (výstupní napětí TDS ve výchozím ustáleném stavu)

$U_{ON} = 9,01 \text{ V}$ (výstupní napětí TDS po ustálení při rozsvíceném reflektoru)

$U_{OFF} = 12,59 \text{ V}$ (výstupní napětí TDS po ustálení po zhasnutí reflektoru)

$\Delta U_{ON} = |U_0 - U_{ON}| = |12,54 - 9,01| = 3,53 \text{ V}$ (změna U_{OUT} po rozsvícení)

$\Delta U_{OFF} = |U_{ON} - U_{OFF}| = |12,54 - 9,01| = 3,58 \text{ V}$ (změna U_{OUT} po rozsvícení)

Výpočet rychlosti odezvy:

Rychlost odezvy je čas do dosažení 70,7 % hodnoty nového ustáleného stavu. Pro tato měření je to konkrétně τ_{ON} – čas dosažení dané hodnoty při přechodu U_0 a U_{ON} , a τ_{OFF} – čas dosažení dané hodnoty při přechodu U_{ON} a U_{OFF} .

$$\tau_{ON} = t(U_0 - 0,707 \cdot \Delta U_{ON}) - t_{ON} = t(12,54 - 2,5 \text{ V}) - 2:00 = t(10,04 \text{ V}) - 2:00 = 2:43 - 2:00 = 43 \text{ s}$$

$$\tau_{OFF} = t(U_{ON} + 0,707 \cdot \Delta U_{OFF}) - t_{OFF} = t(9,01 + 2,53 \text{ V}) - 7:25 = t(11,54 \text{ V}) - 7:25 = 8:35 - 7:25 = 70 \text{ s}$$

Výpočet citlivosti

$$P_B = \frac{P}{4\pi \cdot l^2} = \frac{90}{4\pi \cdot 0,1^2} = 716,20 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{Ref} = \frac{0,5P}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,5 \cdot 90}{\pi \cdot 0,2^2} = 358,10 \frac{W}{m^2}$$

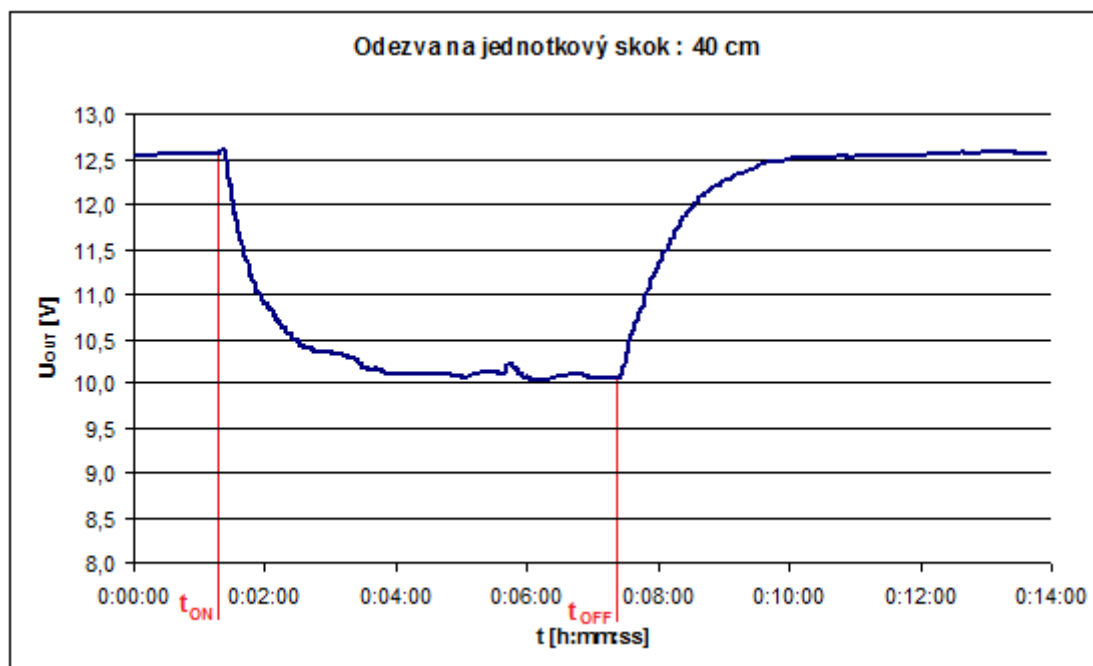
$$P_{\check{c}} = S_{\check{c}}(P_B + P_{Ref}) = 1,39 \cdot 10^{-4} \cdot (716,20 + 358,10) = 0,15 \text{ W}$$

$$K_{ON} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\check{c}}} = \frac{3,53}{0,15} = 23,53 \frac{V}{W}$$

$$K_{OFF} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\check{c}}} = \frac{3,58}{0,15} = 23,87 \frac{V}{W}$$

$$K_{10cm} = \frac{K_{ON} + K_{OFF}}{2} = \frac{23,53 + 23,87}{2} = 23,70 \frac{V}{W}$$

Jednotkový skok – reflektor ve vzdálenosti 40 cm



Obr. 5-9 Průběh výstupního napětí TDS při měření odezvy na jednotkový skok (reflektor 40 cm vzdálený)

Průběh měření:

- $t = 0:00$ Ustálení
- $t = 1:23$ Rozsvícení reflektoru (t_{ON})
- $t = 7:27$ Zhasnutí reflektoru (t_{OFF})

$$U_0 = 12,56 \text{ V}$$

$$U_{ON} = 10,06 \text{ V}$$

$$U_{OFF} = 12,57 \text{ V}$$

$$\Delta U_{ON} = |U_0 - U_{ON}| = |12,54 - 10,06| = 2,48 \text{ V}$$

$$\Delta U_{OFF} = |U_{ON} - U_{OFF}| = |12,57 - 10,06| = 2,51 \text{ V}$$

Výpočet rychlosti odezvy:

$$\begin{aligned} \tau_{ON} &= t(U_0 - 0,707 \cdot \Delta U_{ON}) - t_{ON} = t(12,56 - 1,75 \text{ V}) - 1:23 = t(10,81 \text{ V}) - 1:23 = \\ &= 2:02 - 1,23 = 43 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{OFF} &= t(U_{ON} + 0,707 \cdot \Delta U_{OFF}) - t_{OFF} = t(10,06 + 1,77 \text{ V}) - 7:27 = t(11,83 \text{ V}) - 7:27 = \\ &= 8:22 - 7:27 = 55 \text{ s} \end{aligned}$$

Výpočet citlivosti

$$P_B = \frac{P}{4\pi \cdot l^2} = \frac{90}{4\pi \cdot 0,4^2} = 44,76 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{Ref} = \frac{0,5P}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,5 \cdot 90}{\pi \cdot 0,2^2} = 358,10 \frac{W}{m^2}$$

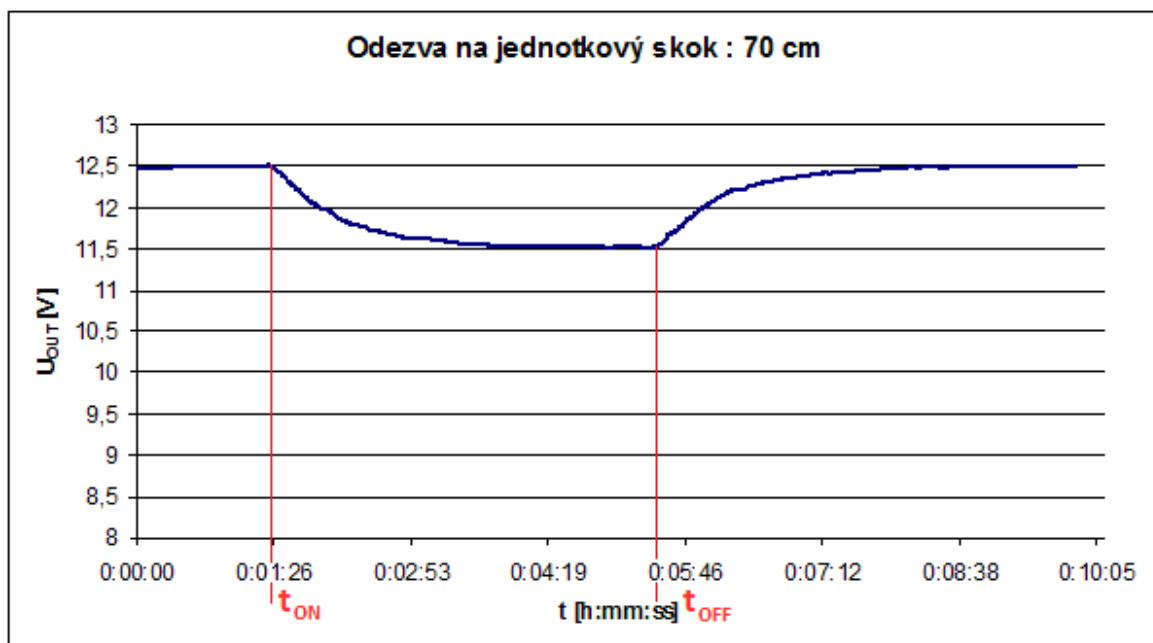
$$P_{\dot{c}} = S_{\dot{c}}(P_B + P_{Ref}) = 1,39 \cdot 10^{-4} \cdot (44,76 + 358,10) = 0,06 \text{ W}$$

$$K_{ON} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\dot{c}}} = \frac{2,48}{0,06} = 41,33 \frac{V}{W}$$

$$K_{OFF} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\dot{c}}} = \frac{2,51}{0,06} = 41,83 \frac{V}{W}$$

$$K_{40cm} = \frac{K_{ON} + K_{OFF}}{2} = \frac{41,33 + 41,83}{2} = 41,58 \frac{V}{W}$$

Jednotkový skok – reflektor ve vzdálenosti 70 cm



Obr. 5-10 Průběh výstupního napětí TDS při měření odezvy na jednotkový skok (reflektor 70 cm vzdálený)

Průběh měření:

- $t = 0:00$ Ustálení
 $t = 1:29$ Rozsvícení reflektoru (t_{ON})
 $t = 5:28$ Zhasnutí reflektoru (t_{OFF})

$$U_0 = 12,50 \text{ V}$$

$$U_{ON} = 11,51 \text{ V}$$

$$U_{OFF} = 12,50 \text{ V}$$

$$\Delta U_{ON} = |U_0 - U_{ON}| = |12,50 - 11,51| = 0,99 \text{ V}$$

$$\Delta U_{OFF} = |U_{ON} - U_{OFF}| = |12,50 - 11,51| = 0,99 \text{ V}$$

Výpočet rychlosti odezvy:

$$\begin{aligned} \tau_{ON} &= t(U_0 - 0,707 \cdot \Delta U_{ON}) - t_{ON} = t(12,50 - 0,70 \text{ V}) - 1:29 = t(11,80 \text{ V}) - 1:29 = \\ &= 2:18 - 1:29 = 49 \text{ s} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \tau_{OFF} &= t(U_{ON} + 0,707 \cdot \Delta U_{OFF}) - t_{OFF} = t(11,51 + 0,70 \text{ V}) - 5:18 = t(12,21 \text{ V}) - 5:18 = \\ &= 6:18 - 5:18 = 60 \text{ s} \end{aligned}$$

Výpočet citlivosti

$$P_B = \frac{P}{4\pi \cdot l^2} = \frac{90}{4\pi \cdot 0,7^2} = 14,62 \frac{W}{m^2}$$

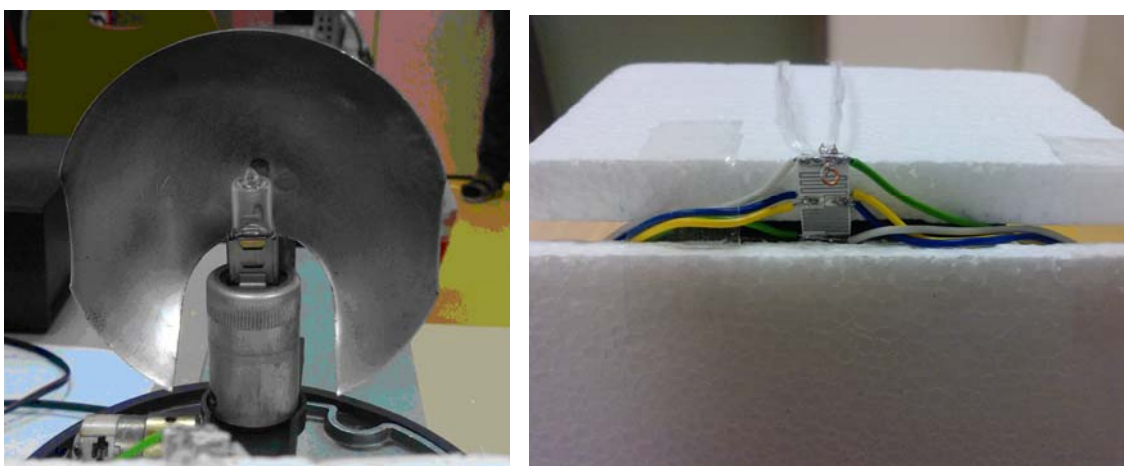
$$P_{Ref} = \frac{0,5P}{\pi \cdot r^2} = \frac{0,5 \cdot 90}{\pi \cdot 0,2^2} = 358,10 \frac{W}{m^2}$$

$$P_{\check{c}} = S_{\check{c}}(P_B + P_{Ref}) = 1,39 \cdot 10^{-4} \cdot (14,62 + 358,10) = 0,052 \text{ W}$$

$$K_{ON} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\check{c}}} = \frac{0,99}{0,052} = 19,38 \frac{V}{W}$$

$$K_{OFF} = \frac{\Delta U_{OUT}}{\Delta P_{\check{c}}} = \frac{0,99}{0,052} = 19,38 \frac{V}{W}$$

$$K_{70cm} = \frac{K_{ON} + K_{OFF}}{2} = \frac{19,38 + 19,38}{2} = 19,38 \frac{V}{W}$$



Obr. 5-11 Reflektor použitý pro měření (vlevo) a upevnění čidla (vpravo)

Závěr

Úkolem tohoto měření bylo zjistit rychlost odezvy a citlivost TDS tepelné radiace. To jsem určoval na základě odezvy TDS na jednotkový skok – rozsvícení a zhasnutí reflektoru v různých vzdálenostech. Ze získaných průběhů jsem odečetl rychlosti odezvy:

$$l = 10 \text{ cm: } \tau_{ON} = 43 \text{ s; } \tau_{OFF} = 70 \text{ s}$$

$$l = 40 \text{ cm: } \tau_{ON} = 43 \text{ s; } \tau_{OFF} = 55 \text{ s}$$

$$l = 50 \text{ cm: } \tau_{ON} = 49 \text{ s; } \tau_{OFF} = 60 \text{ s}$$

Z toho, že je τ_{ON} vždy kratší oproti τ_{OFF} , lze dedukovat, že se čidlo snáze ohřívá než chladne. To by bylo možné snížit připevněním čidla na větší chladič a lépe jej s ním propojit. Pro celkové zkrácení doby odezvy by bylo třeba najít čidlo s totožnými odpory meandrů a snížení hodnoty odporu R7.

Citlivost TDS jsem určil jako poměr změny výstupního napětí a tepelného výkonu dopadajícího na funkční plochu čidla. Výpočet do dopadajícího výkonu je složitý, zejména z důvodu velkého množství faktorů, které jej ovlivňují. Proto jsem jeho výpočet značně zjednodušil a získané citlivosti mají pouze orientační charakter. Zanedbal jsem totiž veškeré ztráty přenosu energie od reflektoru k čidlu a reflektor jsem uvažoval jako dokonale odrazivý. Vypočtené citlivosti na různých vzdálenostech pak budou ve skutečnosti vyšší. Odchylka citlivosti pro $l = 40 \text{ cm}$ je pravděpodobně způsobena špatným natočením reflektoru.

$$l = 10 \text{ cm: } k = 23,7 \frac{V}{W}; l = 40 \text{ cm: } k = 41,58 \frac{V}{W}; l = 70 \text{ cm: } k = 19,38 \frac{V}{W}.$$

5.4 Měření převodní charakteristiky TDS tepelné radiace

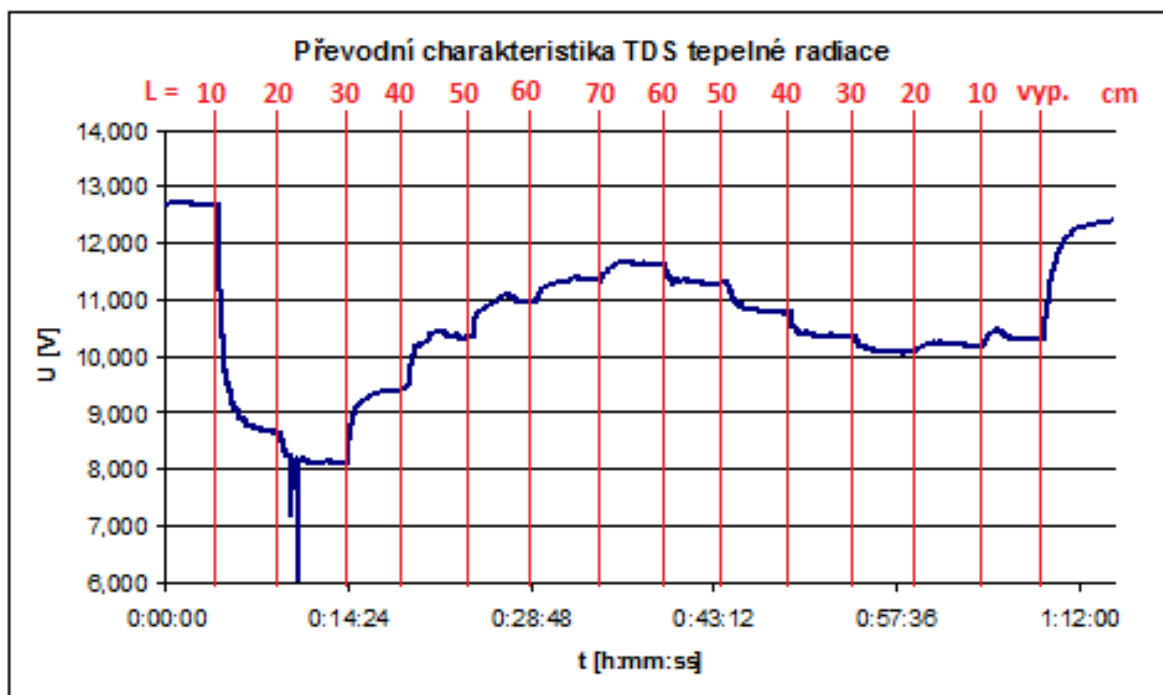
V rámci měření odezvy na jednotkový skok jsem provedl měření převodní charakteristiky senzoru, a to při stejném uspořádání experimentu. Měřil jsem pro tyto vzdálenosti reflektoru od čidla $l = 10, 20, 30, 40, 50, 60$ a 70 cm, s tím rozdílem, že mezi posunem reflektoru jsem senzor nenechal přejít do výchozího stavu, ale vždy do nového ustáleného stavu.

Použité přístroje:

- svinovací metr,
- reflektor 100 W,
- zdroj napětí PSM3/3A,
- multimetr UNI-T UT71D,
- počítačový program Interface Program 1.10 UT71C/D/E.

Popis měření:

Měření jsem zahájil rozsvícením reflektoru po ustálení senzoru ve vzdálenosti 10 cm od čidla, po té jsem vždy po přechodu do nového ustáleného stavu reflektor vzdaloval s krokem 10 cm až po 70 cm, kde jsem po ustálení začal reflektor opět přibližovat. Výstupní napětí TDS jsem průběžně zaznamenával do počítače.



Obr. 5-12 Převodní charakteristika TDS tepelné radiace

Závěr:

Z průběhu výstupního napětí senzoru v čase je patrná hystereze při návratu zpět k čidlu, jejíž příčinou je s největší pravděpodobností akumulace tepla uchycením senzoru, jež zároveň vede k menší odezvě výstupu na změnu vstupu ve fázi přibližování reflektoru. Zajímavé je, že u malých vzdáleností reflektoru od čidla je výstupní napětí vyšší, než u vzdáleností 20 – 30 cm. Možným vysvětlením je ohřev uchycení za čidlem, které dále ohřívá stranu čidla odvrácenou od reflektoru. Tím dochází k potlačení rozdílů napětí na obou děličích, tedy k menšímu vychýlení senzoru z rovnovážného stavu.

Při posunu mezi vzdálenostmi 10 a 20 cm při vzdalování reflektoru došlo nejspíše k výpadku napájení, což vysvětluje velmi rychlý pokles napájecího napětí. Rovněž je možné, že TDS mohl indukovat napěťovou špičku způsobenou činností.

Z převodní charakteristiky je dále patrná exponenciální závislost velikosti odezvy senzoru na vzdálenosti, což odpovídá tomu, že přenesený výkon klesá s kvadrátem vzdálenosti.

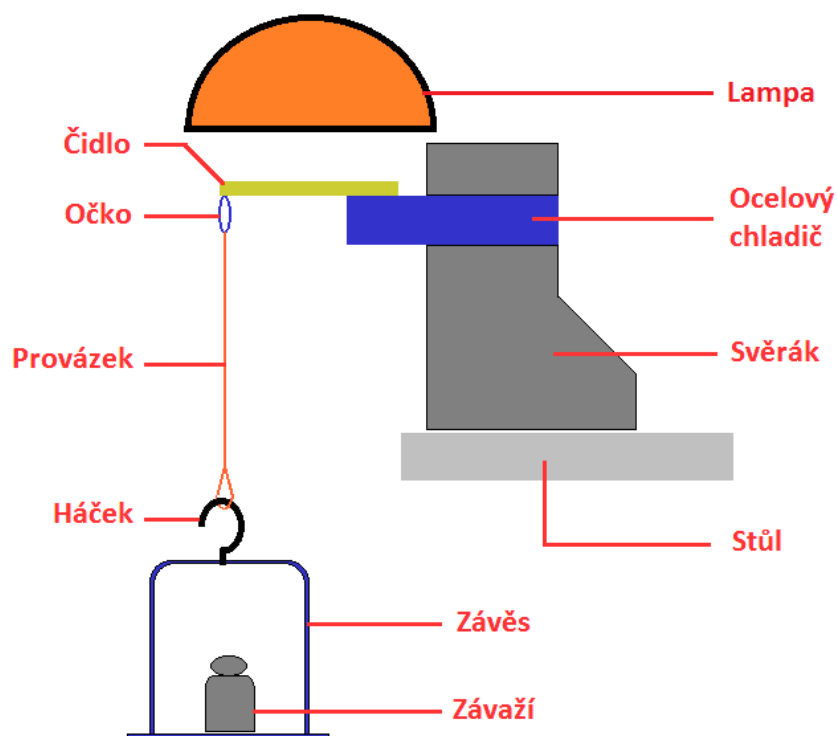
Chyby tohoto měření mohly být způsobeny pohybem vzduchu v místnosti, změnou teploty v místnosti, nedokonalým zaměřením reflektoru, příp. elektromagnetickým rušením.

5.5 Měření vlivu tenze na TDS tepelné radiace

Účelem měření bylo ověřit, zda nedochází k ovlivňování výstupního signálu senzoru mechanickou cestou, tzn. deformací čidla. Jako možný způsob deformování jsem zvolil ohyb čidla, resp. zatížení čidla závažím a tím jeho ohnutí.

Použité přístroje:

- lampa 20 W,
- zdroj napětí Agilit E3631A,
- multimetr UNI-T UT71D,
- počítačový program Interface Program 1.10 UT71C/D/E,
- závaží 90 g (317 g celkem vč. závěsu a háčku).



Obrázek 5-1 Uspořádání měřící soustavy pro měření vlivu tenze na TDS

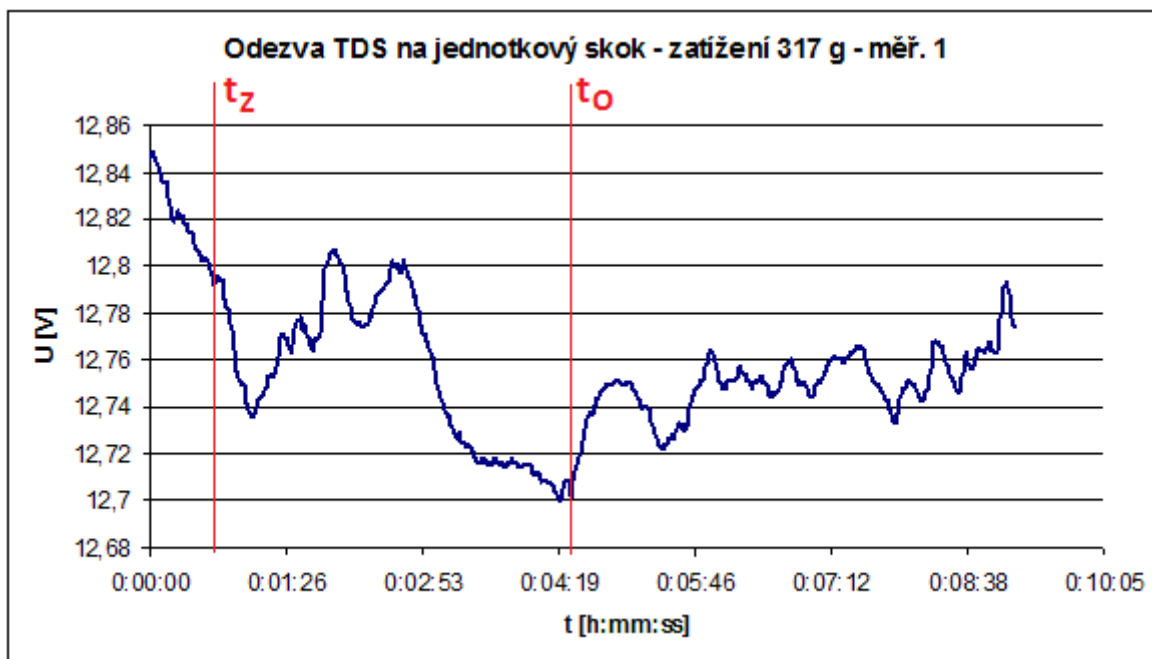
Měření odezvy TDS na skokovou změnu zatížení čidla bez osvětlení

Čidlo připevněné k ocelovému chladiči jsem upevnil do polohovatelného svěřáku tak, aby jej bylo možné zatěžovat. Opatřil jsem jej očkem z měděného drátu připájením k vodivé plošce na jeho konci. Zatěžování jsem prováděl tak, že na provázek protažený připraveným očkem jsem zavěsil pomocí háčku závěs se závažím. Odlehčení čidla pak proběhlo odepnutím celého závěsu. Jelikož se senzor ustaluje včetně zavěšeného provázku o délce 30 cm, neuvažuji možné ovlivnění čidla přiblížením ruky ani změnu jeho nejbližšího okolí. Jeho váha 0,25 g je pro měření zanedbatelná.

Prostor kolem zavěšeného závěsu jsem vymezil kovovým stojanem, abych zabránil jeho kývání a otáčení, které by vedlo nerovnoměrnému zatěžování čidla. Měření proběhlo se zhasnutou lampou.

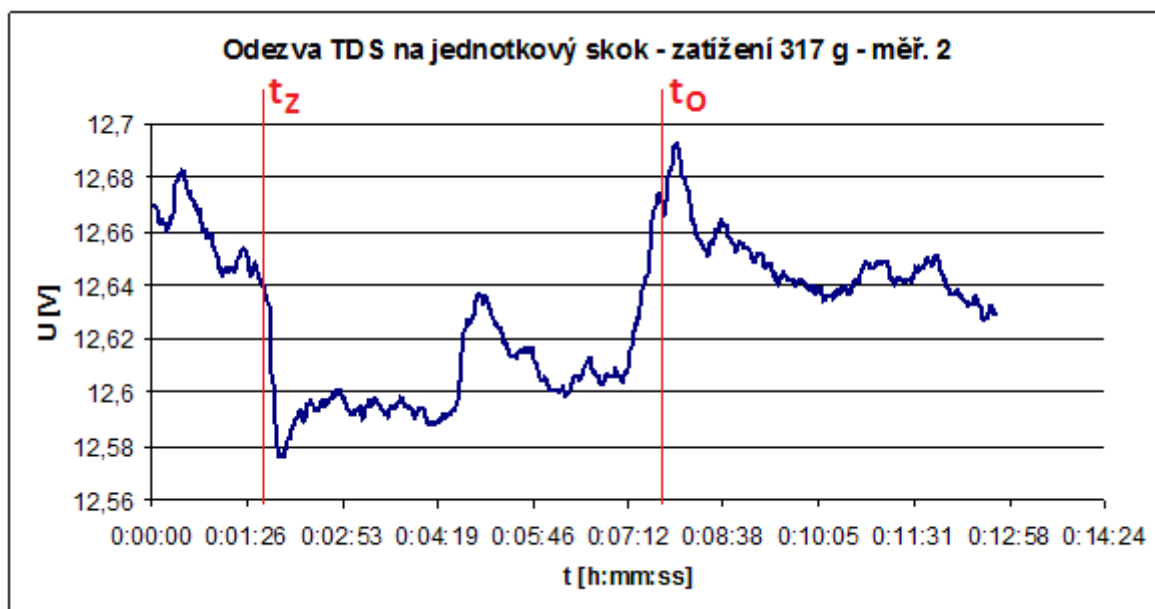
Po ustálení výstupního napětí jsem čidlo zatížil zátěží o hmotnosti 317 g. Po náhodné době, avšak delší než 4 min., jsem čidlo opět odlehčil a senzor nechal 5 min. ustálit. Toto měření jsem opakoval čtyřikrát. Hmotnost zátěže jsem volil na základě předchozích experimentů – lehčí zátěže se na výstupním napětí TDS neprojeví, u těžších je problém s nosností substrátu, který po delší době namáhání praská. Na vině mohou být i mikropraskliny vzniklé při dělení substrátu lámáním.

Měření 1: $t_z = 0:39$ (čas zatížení čidla), $t_o = 4:24$ (čas odlehčení čidla)



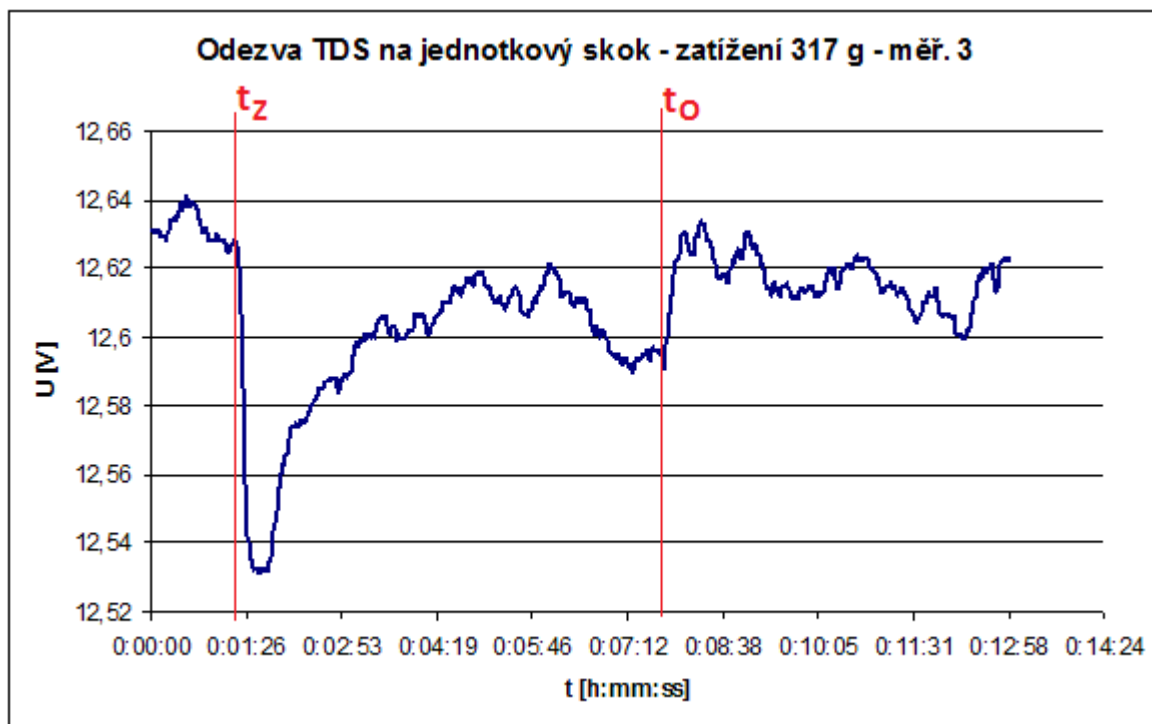
Obr. 5-13 Odezva TDS na skokové zatížení a odlehčení (1. měření)

Měření 2: $t_z = 1:48$, $t_o = 7:42$



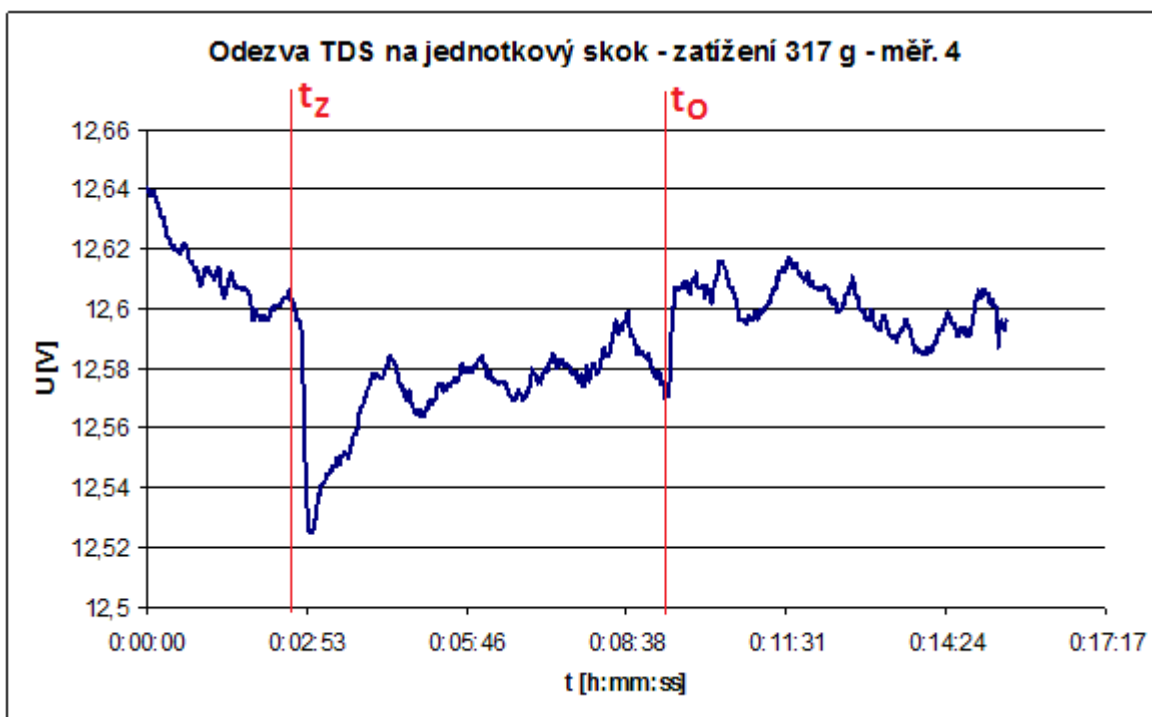
Obr. 5-2 Odezva TDS na skokové zatížení a odlehčení (2. měření)

Měření 3: $t_z = 1:19, t_o = 7:42$



Obr. 5-15 Odezva TDS na skokové zatížení a odlehčení (3. měření)

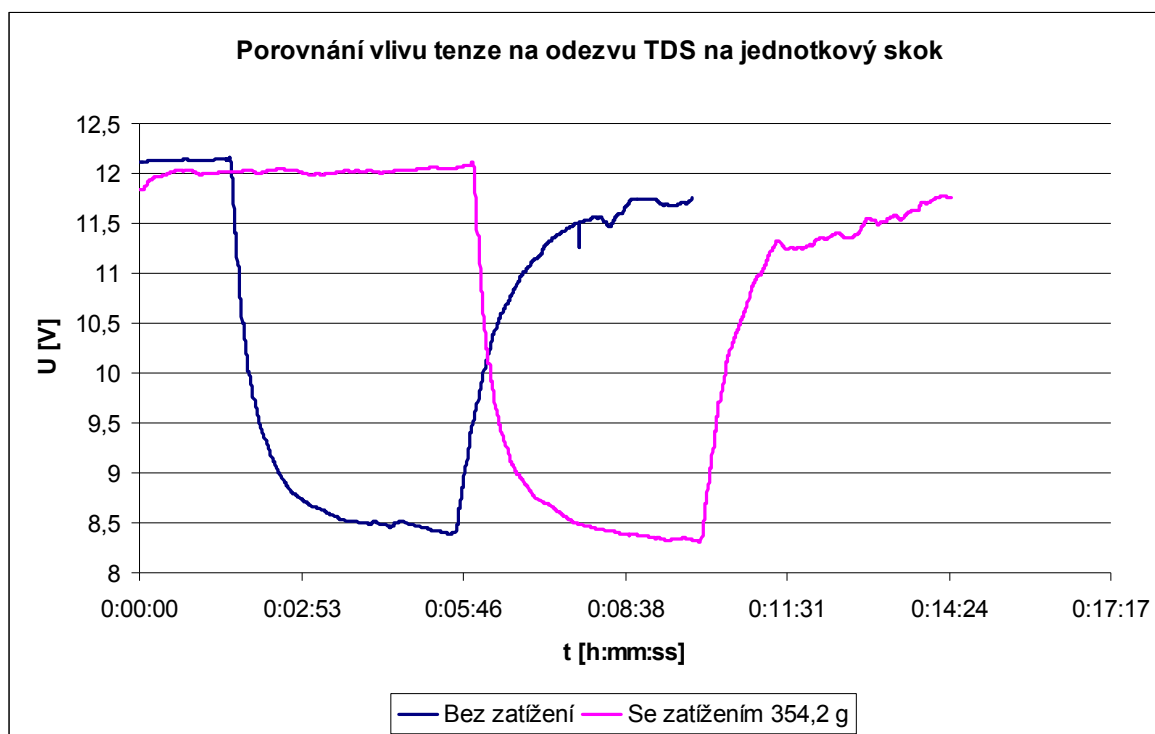
Měření 4: $t_z = 2:51, t_o = 9:20$



Obr. 5-163 Odezva TDS na skokové zatížení a odlehčení (4. měření)

Měření odezvy TDS na jednotkový skok s konstantním zatížením

Účelem experimentu bylo srovnání vlivu zatížení čidla na odezvu senzoru na jednotkový skok – rozsvícení a zhasnutí lampy s výkonem 20 W umístěné ve vzdálenosti 2 cm od čidla. V první části jsem změřil odezvu TDS bez zatížení, ve druhé části jsem provedl stejné měření při stálém zatížení závažím o hmotnosti 317 g, které jsem na čidlo zavěsil v čase $t = 0$ s. Rozsvícení/zhasnutí proběhlo vždy po ustálení výstupního napětí TDS.



Obr. 5-174 Odezva TDS na jednotkový skok při/bez zatížení

5.5.1 Závěr

Měřením zatěžování čidla bez osvětlení jsem zjistil reakci TDS na zatížení i odlehčení v řádu desetin voltu, přičemž odezva na zatížení je rychlejší a větší než na odlehčení. Po zatížení se však výstup neustálí na nové hodnotě, ale dále se mění. To je způsobeno buď úrovní odezvy blízké úrovni šumu výstupního napětí, nerovnoměrným zatížením v důsledku kývání zátěže či působením jiného rušivého vlivu. Aby byla odezva TDS větší, bylo by nutné senzor více zatížit, což není možné z důvodu malé zatížitelnosti – čidlo unese dlouhodobě zátěž do 400 g, krátkodobě i 500 g. Pro využití TDS jako tenzometru

by bylo nutné použít pružnější materiál substrátu s citlivějším čidlem a nalézt nastavení senzoru s větší dynamikou.

Dalším faktorem, který může mít za následek malou odezvu, především při odlehčení, je rozdílné chování keramiky a platinového meandru při ohýbání. Odlehčením se keramika pružně vrací do původní polohy, kdežto platinový meandr, který je kujný, může ohnutím změnit strukturu a navracet se hůře. Tím by nebylo měření na stejném čidle reprodukovatelné.

Měření jednotkového skoku při/bez zatížení ukázalo u výstupního signálu TDS posun směrem dolů v řádu desetin voltu podle očekávání. Na základě předchozího měření však nelze říci, zda je tento posun způsoben vlivem zátěže, nebo má jinou příčinu.

Na měření mohl mít parazitní vliv průvan v místnosti, kývání závaží, elektromagnetické rušení nebo pružné uchycení čidla k chladiči.

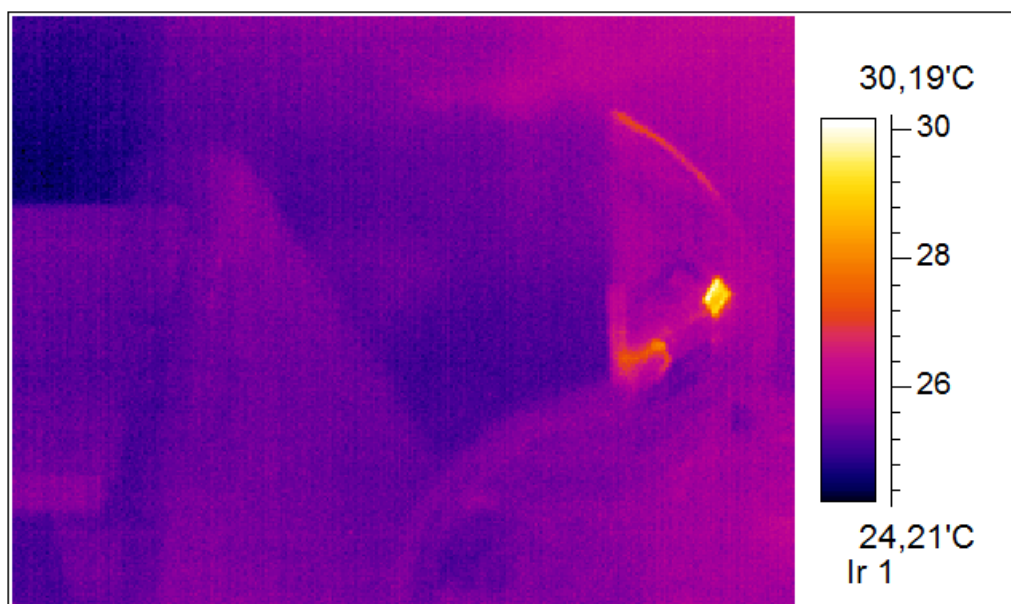
5.6 Měření rozložení teploty termokamerou

Původním záměrem tohoto měření bylo prokázat tepelnou výměnu mezi čidly TDS. Vzhledem k tomu, že senzor pracuje s malými výkony na nízkých teplotách a citlivost termokamery je pro toto měření nedostačující, nepodařilo se mi tuto výměnu zobrazit. Měření má tedy ilustrativní charakter a chci jím ukázat rozložení teploty měřících soustav, ve kterých probíhaly předchozí experimenty.

Pro měření jsem použil zapůjčenou termokameru SAT-HY 6800.

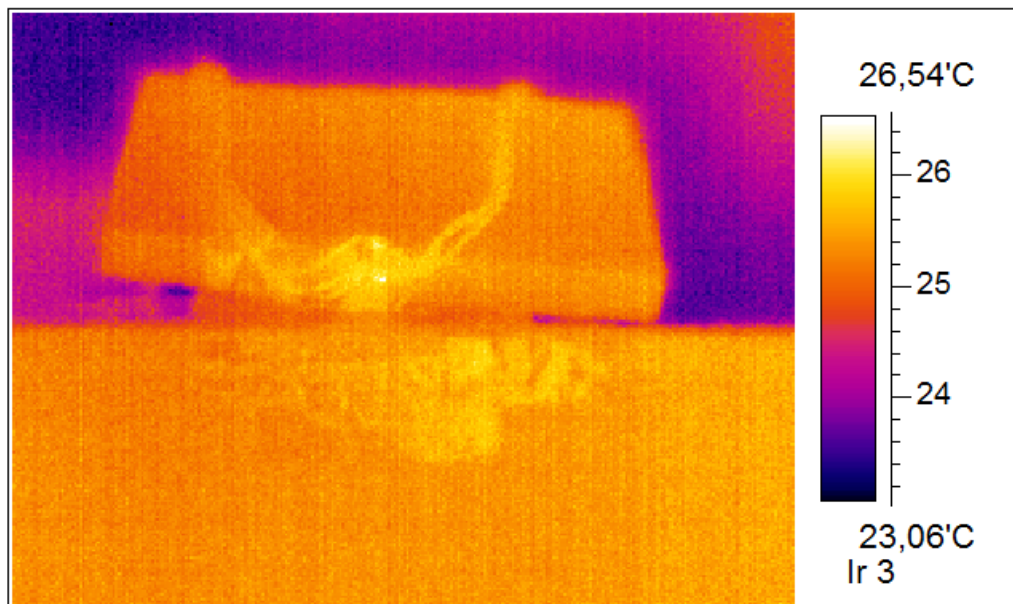
Měření odezvy na jednotkový skok

Následující snímek ukazuje rozložení teploty v neaktivní měř. soustavě, tzn. zhaslý reflektor a vypnutý TDS. Místo na reflektoru, které se jeví teplejší oproti svému okolí je pouhý odraz okna, což jsem experimentálně ověřil prostým otáčením reflektoru, přičemž zdánlivě teplejší místo zůstávalo stále v místě odlesku. Všechny lesklé předměty soustavy vykazovaly podobné chování.



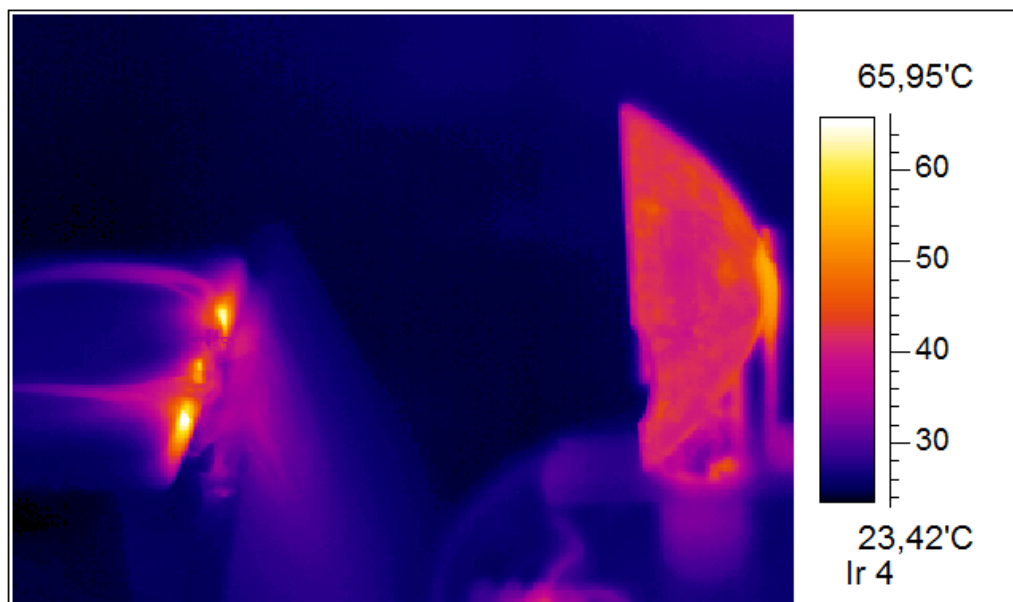
Obr. 5-18 Vypnutá měřící soustava

Teplota čidla i stínění kolem něj odpovídá pokojové teplotě 25,4 °C. Chladná místa v pozadí jsou podlaha a stěna.



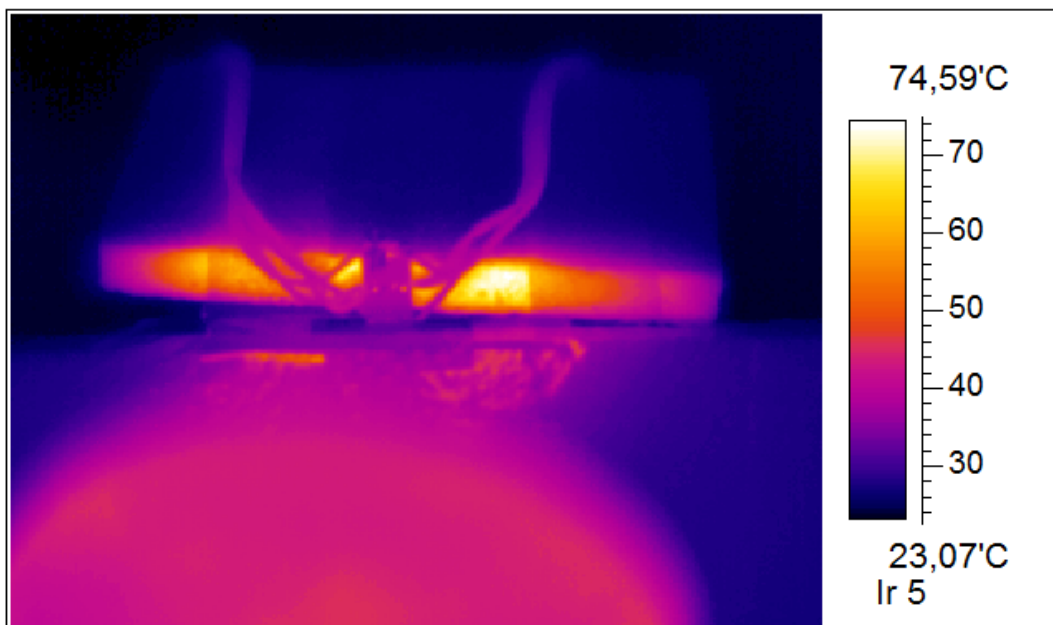
Obr. 5-19 Pohled na čidlo - bez světlení

Po rozsvícení reflektoru je dobře patrné rozložení teploty v okolí čidla. Bohužel, nelze říct, zda teplota nad 60 °C odpovídá vyzářené energii povrchem, nebo pouze energii odražené.



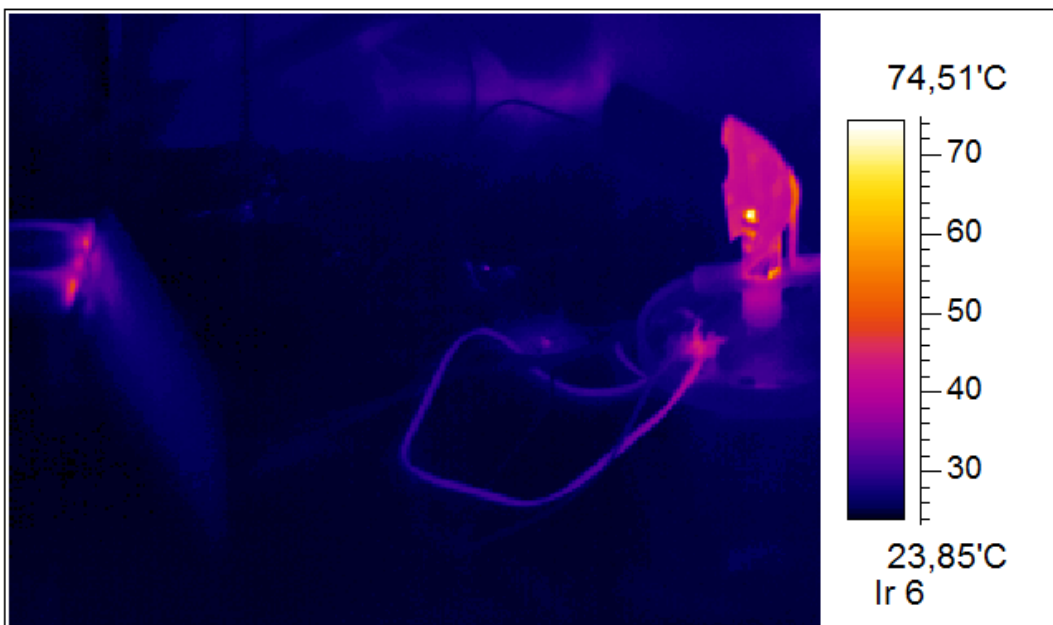
Obr. 5-20 Celá soustava v provozu - 10 cm

Čidlo má oproti svému okolí teplotu nižší asi o 30 °C v porovnání s nejteplejšími místy, což by znamenalo, že teplo buď lépe odvádí (lépe se chladí), nebo je oproti okolí daleko méně odráží.

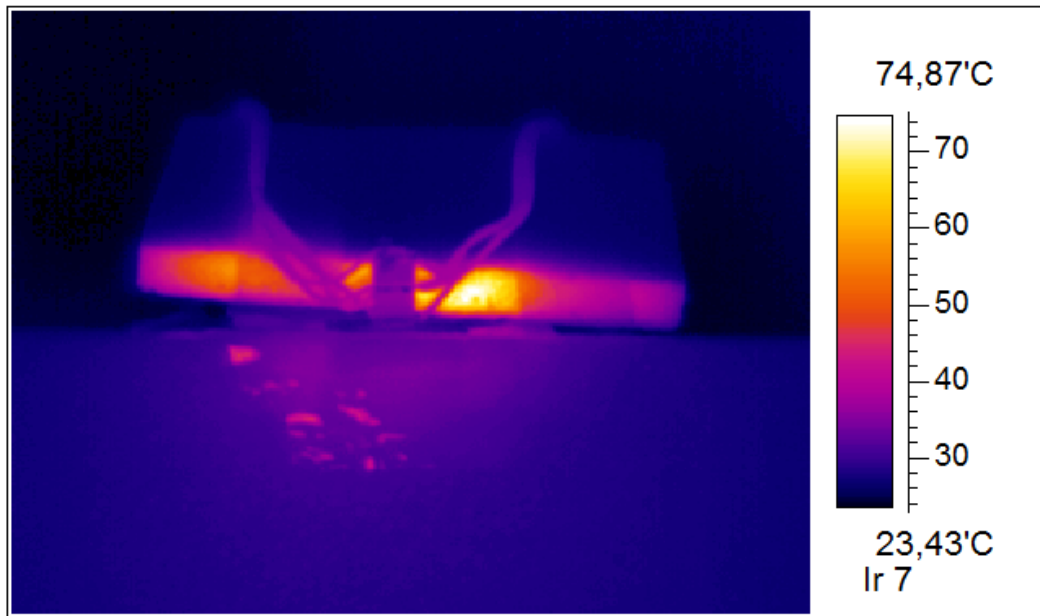


Obr. 5-21 Pohled na čidlo - 10 cm

Kromě reflektoru a čidla je možné si na tomto obrázku všimnout přívodního kabelu reflektoru, především pak svorky, do které je připojen.

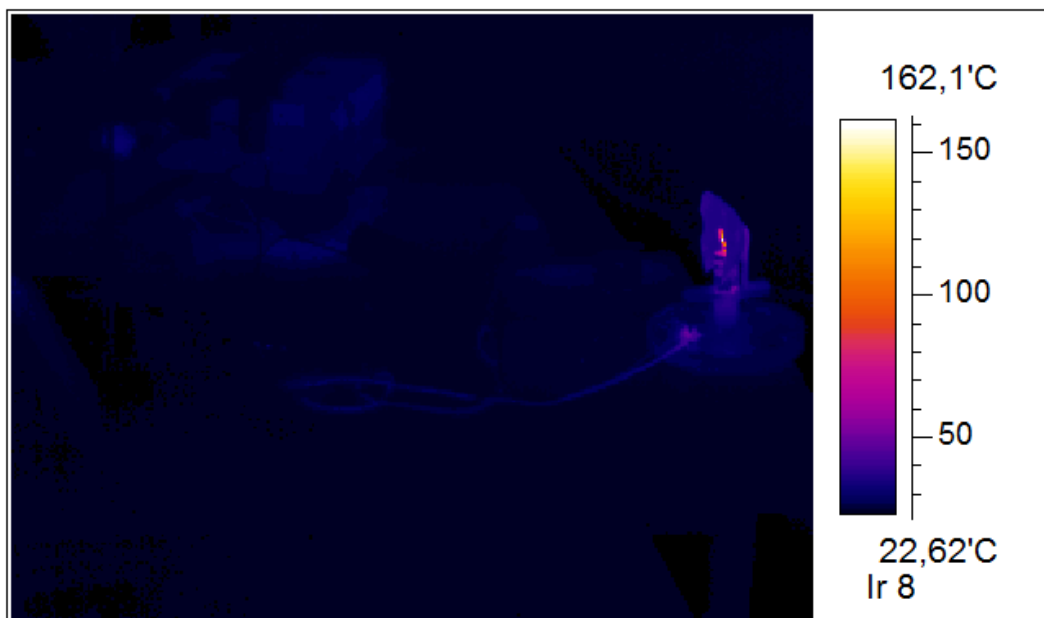


Obr. 5-22 Pohled na soustavu - 40 cm

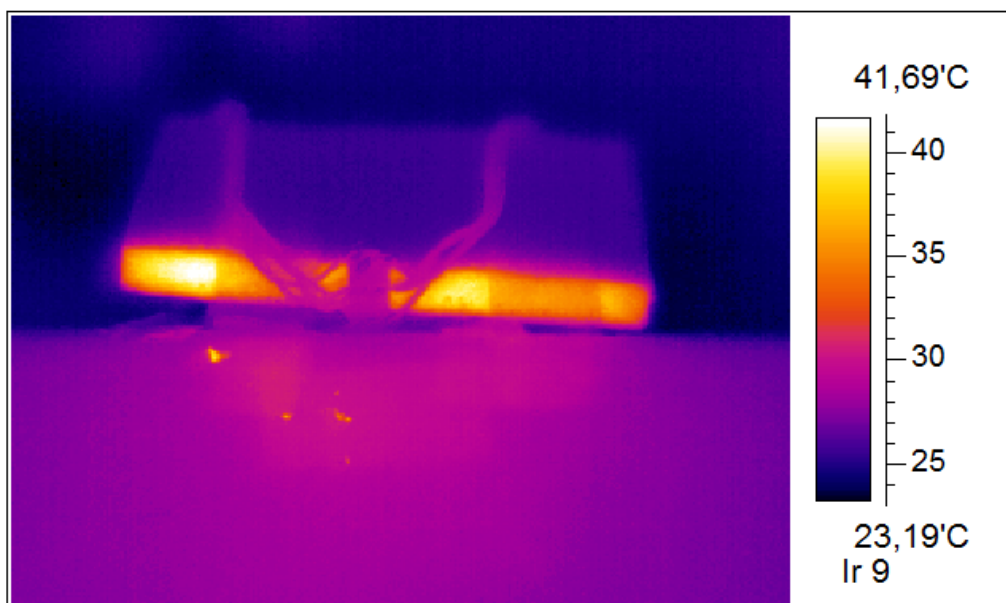


Obr. 5-23 Pohled na čidlo - 40 cm

Bohužel se mi nepodařilo vhodně nastavit rozsah termokamery, aby bylo zřetelné i čidlo. Nejzřetelnější je proto na snímku žárovka. Při jejím detailním měření jsem zjistil teplotu povrchu 175 °C.



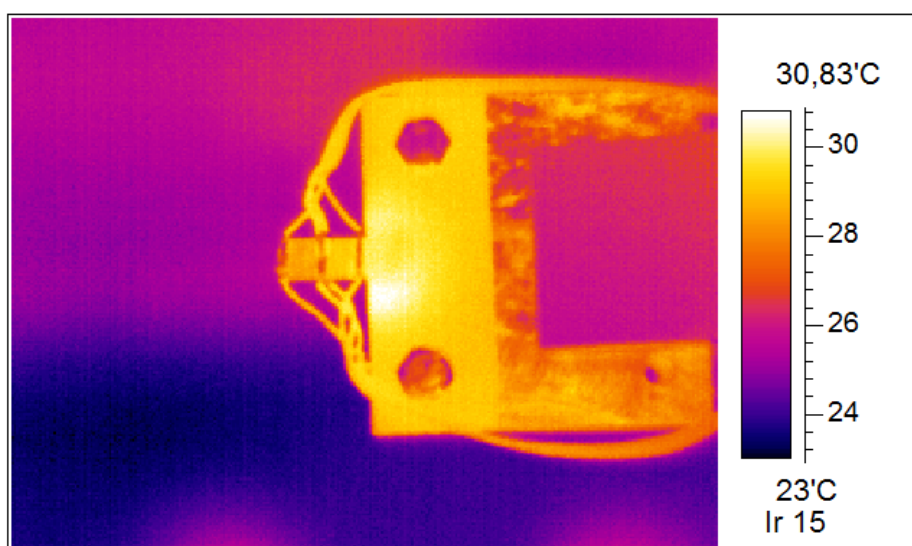
Obr. 5-24 Pohled na soustavu - 70 cm



Obr. 5-25 Pohled na čidlo - 70 cm

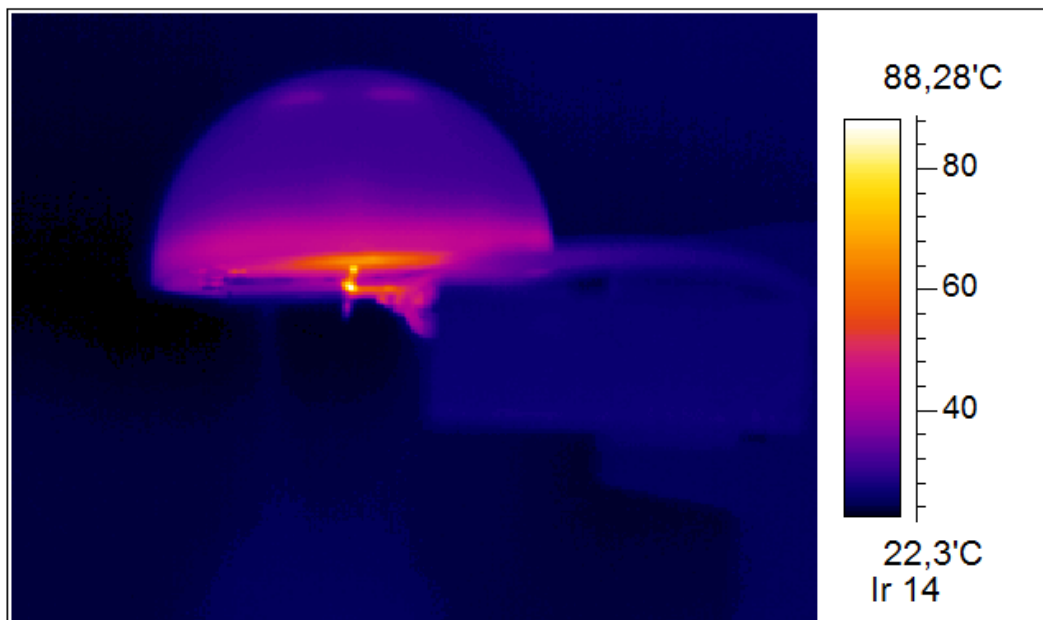
Měření vlivu tenze na TDS tepelné radiace

Mohlo by se zdát, že teplota chladiče není pravdivá z důvodu lesklého povrchu. Protože ale tato fotografie byla pořízena po experimentu s lampou, je možné, že chladič nestačil zchladnout na pokojovou teplotu, na což ukazuje i čidlo, které má stejnou teplotu, i přes matný povrch.



Obr. 5-26 Rozložení teploty při měření tenze - bez osvětlení

Nejteplejším místem na tomto snímku je připevněné měděné očko pro provlečení provázku. Je pravděpodobné, že se jako horké jeví z důvodu lesklého povrchu.



Obr. 5-27 Měření tenze – s osvětlením

6 Závěr

V této diplomové práci bylo úkolem navrhnout termodynamickou sondu v bilančním zapojení realizovanou tlustovrstvou technologií na keramickém substrátu. Tato sonda je určena pro monitorování tepelné radiace a využívá originálního principu založeného na bilanční rovnováze, v níž se sonda udržuje. Po krátkém teoretickém rozboru byla sonda navržena, realizována a byly proměřeny její vlastnosti, měření citlivosti a rychlosti odezvy. Byl rovněž prozkoumán vliv parazitní tenze na užitečný signál senzoru.

V průběhu řešení bylo nutné navrhnout topologii jak pro termodynamickou sondu, tak pro vlastní bilanční zapojení. K tomu byl stanoven technologický postup výroby. Čidlo i TDS jsou realizovány tlustovrstvou technologií na anorganickém substrátu především z důvodu dobré tepelné vodivosti a možnosti vytváření motivu pomocí speciálních past.

Z důvodu nutnosti vytvoření sít pro sítotisk motivů jsem optimalizoval proces ovrstvení sít s pomocí přípravků firmy Autotype. Postup ovrstvení sít jsem ověřil a nejmenší rozlišení, které bylo touto cestou dosaženo je 150 μm .

Měřením byla zjištěna rychlost odezvy senzoru při konstantním budícím tepelném výkonu pro různé vzdálenosti – $l = 10 \text{ cm}$: $\tau_{ON} = 43 \text{ s}$, $\tau_{OFF} = 70 \text{ s}$; $l = 40 \text{ cm}$: $\tau_{ON} = 43 \text{ s}$, $\tau_{OFF} = 55 \text{ s}$; $l = 70 \text{ cm}$: $\tau_{ON} = 49 \text{ s}$, $\tau_{OFF} = 60 \text{ s}$.

Měření citlivosti senzoru je z důvodu komplikovaného výpočtu značně zaokrouhlené, a proto ho je nutné chápat jako orientační. Zjištěné citlivosti senzoru pro různé vzdálenosti jsou $l = 10 \text{ cm}$: $k = 23,7 \frac{V}{W}$; $l = 40 \text{ cm}$: $k = 41,58 \frac{V}{W}$; $l = 70 \text{ cm}$: $k = 19,38 \frac{V}{W}$. Jelikož jsem zanedbal ztráty přenosu tepla od reflektoru na povrchu čidla, skutečné citlivosti budou větší než vypočtené.

Při ověřování vlivu tenze na užitečný signál senzoru se prokázal její slabý vliv. Tento vliv je nejpatrnější v okamžik skokového zatížení čidla. Zatížení se projeví změnou výstupního napětí v řádu desetin voltu, tj. přibližně stejně, jako se pohybuje výstupní napětí okolo hodnoty napětí výchozího ustáleného stavu. Jeho další působení proto není patrné. Pro zvětšení odezvy na zatížení by bylo nutné použít zátěž s vyšší hmotností. To je však limitováno nosností substrátu čidla. Možným řešením je např. zvýšení citlivosti čidla, pevnější materiál substrátu nebo vhodnější kombinace součástek pro nastavení senzoru.

Pro ilustraci provedených měření jsem pořídil snímky rozložení teploty v příslušných měřicích soustavách termokamerou SAT-HY 6800.

7 Použitá literatura

- [1] ŘEZNÍČEK, Michal. *Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu*. [s.l.], 2007. 21 s. Semestrální práce.
- [2] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických struktur*. [s.l.] : [s.n.], 2006. 337 s.
- [3] SKOPEC, Petr. *Měření stratifikace teploty ve výškových halách*. [s.l.], 2006. 78 s. Diplomová práce.
- [4] *Základy mikroelektronických technologií* [online]. 2007 [cit. 2009-12-16]. Dostupný z WWW: <<http://web.umel.feec.vutbr.cz/BMMS/prednasky/BMMS-02.pdf>>.
- [5] *Teplotní senzory realizovaná tlustovrstvou technologií* [online]. 2003 [cit. 2009-12-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au010311.pdf>>.
- [6] *Tlusté vrstvy* [online]. 2007 [cit. 2009-12-16]. Dostupný z WWW: <<http://www.umel.feec.vutbr.cz/~szend/vyuka/bmts/2009-BMMS-4-tluste-vrstvy.pdf>>.
- [7] ŘEZNÍČEK, Michal. *Hlavní principy a metody vytváření vrstevných mikrotopných článků pro biosenzoriku, Technologie měření povrchových teplot mikrosubstrátů pro biosenzoriku*. [s.l.], 2004. 20 s. Semestrální práce.
- [8] *Google Images* [online]. 2009 [cit. 2009-12-16]. Dostupný z WWW: <<http://images.google.cz/images?hl=cs&lr=&client=firefox-a&rls=org.mozilla:cs:official&um=1&q=hybridn%C3%AD+integrovan%C3%BD+obvod&sa=N&start=18&ndsp=18>>.
- [9] ŘEZNÍČEK, Michal. *Optimalizovaný termodynamický senzor na bilančním principu*. [s.l.], 2007. 21 s. Semestrální práce.
- [10] *GM Electronics* [online]. 2009 [cit. 2009-12-17]. Dostupný z WWW: <<http://www.gme.cz/cz/index.php?product=832-029>>.
- [11] SZENDIUCH, Ivan. *Technologie elektronických obvodů a systémů*. Brno : Vutium, 2002. 200 s. ISBN 80-214-2072-3.

- [12] SZENDIUCH, Ivan. *Základy technologie mikroelektronických obvodů a systémů*. Brno : Vutium, 2006. 379 s. ISBN 80-214-3292-6.
- [13] HALLIDAY, David; RESNICK, Robert; WALKER, Jearl. *Fyzika : Vysokoškolská učebnice obecné fyziky*. 1. vydání. Brno : Vutium, 2001. 1174 s. ISBN 80-214-1869-9.
- [14] *Hw.cz* [online]. 2010-03-29 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/teorie-a-praxe/art3412-senzory-snimace-a-cidla-v-praxi-5-dil.html>>.
- [15] *Snímače teploty* [online]. 2004 [cit. 2010-04-21]. JSP.cz. Dostupné z WWW: <http://www.jsp.cz/files/uvod_C.pdf>.
- [16] BALOS, Michal. Senzory teploty realizované technologií tlustých vrstev. *Měření teploty* [online]. 2003, 1, [cit. 2010-04-29]. Dostupný z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/au010311.pdf>>.
- [17] *GES Electronics* [online]. 1998 [cit. 2010-04-29]. Datasheet KTY-81 210. Dostupné z WWW: <http://www.ges.cz/sheets/k/kty81_2.pdf>.
- [18] SMUTNÝ, Lubomír; KUREKOVÁ, Eva. *Řídicí systémy letadel* [online]. 2002 [cit. 2010-04-29]. Snímače a měření . Dostupné z WWW: <http://fs1.vsb.cz/3_SMUTNY/Predmety/06_Ridici_systemy_letadel/Prezentace/04_RSL_Snimace-Mereni.ppt>.
- [19] ŘEZNÍČEK, Zdeněk, et al. *Termodynamická sensorika : Výzkum technologie monitorování termodynamické rovnováhy bilančními senzory a její průmyslové aplikace*. První část. Brno : VUT Brno, 2007. 22 s.
- [20] ŘEZNÍČEK, Zdeněk, et al. *Termodynamická sensorika : Výzkum technologie monitorování termodynamické rovnováhy bilančními senzory a její průmyslové aplikace*. Druhá část. Brno : VUT Brno, 2008. 17 s.
- [21] KLÍMA, M. *Nekonvenční aplikace hybridních integrovaných obvodů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 19 s. Vedoucí semestrální práce doc. Ing. Ivan Szendiuch, CSc.

- [22] KLÍMA, Martin. *Termodynamický senzor realizovaný tlustovrstvou technologií*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 33 s. Semestrální práce. VUT Brno.

8 Seznam zkratk

| | | |
|-------|---|--|
| HIO | - | hybridní integrovaný obvod |
| OZ | - | operační zesilovač |
| P | - | příkon |
| SMD | - | součástky pro povrchovou montáž |
| TDS | - | termodynamický senzor |
| THT | - | through hole technology |
| TVL | - | technologie tlustých vrstev, tlusté vrstvy |
| t_v | - | teplota vlastní |
| UV | - | ultrafialový |