

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

NÁVRH ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ A HODNOCENÍ TEPELNÉHO STAVU PROSTŘEDÍ

DEVICE PROPOSAL FOR MEASUREMENT AND EVALUATION OF ENVIRONMENTAL
THERMAL STATE

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. JAN JANEČKA

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Disertační práce se zabývá hodnocením tepelného stavu prostředí v uzavřených místnostech, ve kterých se nachází člověk. Docílení tepelné pohody souvisí s tepelnou bilancí lidského těla. Člověk při své práci produkuje teplo, které musí být odvedeno z jeho těla do okolí sáláním, prouděním, vedením, dýcháním a odpařováním. Intenzita odvádění tepla je ovlivněna parametry prostředí, kterými jsou zejména teplota vzduchu, střední radiační teplota, rychlost proudění vzduchu a vlhkost vzduchu. Dále jsou to faktory osobní, jako je energetický výdej lidského těla a hodnota odporu oblečení. Člověk má tedy možnost ovlivnit tepelnou pohodu svým chováním v daném prostředí, vhodným oblečením a regulací základních parametrů prostředí.

Norma ČSN ISO 7730 uvádí, že parametry prostředí by měly být odhadnuty nebo měřeny. Z těchto získaných údajů je následně vyhodnocena operativní teplota, která je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí.

V současné době na trhu nenajdeme levný snímač, který by operativní teplotu vyhodnocoval a umožňoval jeho nasazení v budovách. Existuje celá řada profesionálních zařízení, která mají velmi vysokou přesnost měření, ale zároveň jsou velice drahá. Jsou spíše využívána pro výzkum, popřípadě pro jednorázové a výjimečné měření tepelného stavu prostředí v místnostech.

Práce se proto zabývá návrhem vhodného (kompaktního) snímače operativní teploty, dle platných nařízení a norem. Důraz je kladen především na cenu zařízení spolu s garancí dostatečné přesnosti. Navrhovaný snímač je schopen poskytovat informace řídicímu systému, který následně bude moci upravit parametry prostředí vhodným způsobem na základě příslušných požadavků.

Právě zde se nachází prostor pro úsporu energie díky možnému kontinuálnímu měření a vyhodnocování tepelného stavu prostředí v místnostech. Při neustálém monitorování proto nebude docházet ke zbytečnému přetápění místností v zimních měsících a naopak v letních měsících k neúměrnému podchlazování. Tento výzkum a řešení se odrazí ve snížení spotřeby energie na provozování budov, a následně i produkci škodlivin. Tato problematika je sledována se vzrůstajícím zájmem. Celý systém je schopen pracovat autonomně bez zásahu člověka, což je další výhoda. Člověk již nebude muset neustále upravovat teplotu vzduchu, ale nadřazený řídicí systém sám vyhodnotí nejvhodnější nastavení na základě objektivně získaných údajů z tohoto snímače.

Součástí práce je i následné ověření navrženého snímače a definování jeho technických parametrů včetně základní analýzy jeho nejistot měření.

Klíčová slova

Měření, nejistota měření, operativní teplota, snímač operativní teploty, střední radiační teplota, rychlost proudění vzduchu, tepelný stav prostředí, tepelná pohoda, teplota vzduchu.

ABSTRACT

The thesis deals with evaluation of the environmental thermal state in closed rooms with people inside the room. The achievement of thermal comfort is related to thermal balance of human body. People are producing heat during their work, which has to be carried away from the body to surrounding area by radiation, convection, conduction, respiration and evaporation. The intensity of heat removal is influenced by environmental parameters, especially by air temperature, mean radiant temperature, air velocity and humidity. Personal factors as energy expenditure of human body and clothing resistance are influencing the intensity of heat removal as well. People are able to influence the thermal comfort by their behaviour in given environment, appropriate clothing and regulation of basic environmental parameters.

CSN ISO 7730 standard states that environmental parameters should be estimated or measured. The operative temperature is then evaluated from collected data. This operative temperature is defined as the temperature of black enclosed area where the human body will be by convection and radiation sharing the same amount of heat as in real inconsistent environment.

Nowadays on the market there is no cheap solution for sensor which is able to evaluate the operating temperature and could be used in buildings. There are a lot of professional sensors which have very high accuracy, but are very expensive. Therefore are mainly used only for research or for single and exceptional measurement of environmental thermal state in rooms.

The thesis is therefore focused on proposal of suitable (compact) operative temperature sensor assembled according to valid regulations and standards. Emphasis is placed mainly on the sensor price together with guarantee of sufficient accuracy. The proposed sensor is providing information to control system which is then able to adjust the parameters of environment using appropriate way based on relevant requirements.

Here is some space for energy savings due to possible continuous measurement and evaluation of environmental thermal state in different rooms. Therefore, during continuous measurement no unnecessary rooms overheating in winter as well as unreasonable cooling in summer should occur.

This research and solution is then reflected in reduction of energy consumption used for building operation and subsequently reduction of the pollutants production. This issue is being watched with increasing interest. Another advantage is that whole system is able to work autonomously without human intervention. People no longer have to continuously adjust air temperature because the control system is able to evaluate the most appropriate adjustments based on objective data obtained from the sensor.

The thesis includes subsequent verification of proposed sensor as well as the definition of sensor technical parameters including analysis of measurement uncertainties.

Keywords

Measurement, Uncertainty, Operative temperature, Sensor of operative temperature, Mean radiant temperature, Air velocity, Environmental thermal state, Thermal comfort, Air temperature.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

JANEČKA, J. *Návrh zařízení pro měření a hodnocení tepelného stavu prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 128 s. Vedoucí dizertační práce Ing. František Vdoleček, CSc.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem dizertační práci na téma „*Návrh zařízení pro měření a hodnocení tepelného stavu prostředí*“ vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pod odborným vedením mého školitele Ing. Františka Vdolečka, CSc.

V Brně dne 30. 8. 2012

.....

Ing. Jan Janečka

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval všem, kteří ovlivnili tvorbu mé dizertační práce. Zejména děkuji mému školiteli Ing. Františku Vdolečkovi, CSc. a garantovi výzkumných projektů GAČR prof. Ing. Milanu Pavelkovi, CSc. za společně strávený čas konzultacemi nad tématem této práce a za všechny velmi cenné připomínky a rady, které měly na vývoj mé práce a také pro můj přístup zásadní význam.

Práce vznikla při řešení výzkumného projektu GAČR 101/05/H018 – *Výzkum efektivních systémů pro zlepšení kvality životního prostředí* a výzkumného projektu GAČR 101/09/H050 – *Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení kvality vnitřního prostředí*.

Také bych rád poděkoval svým rodičům a přítelkyni Hance za jejich vytrvalou podporu v průběhu celého studia.

OBSAH

OBSAH	7
1. ÚVOD	9
2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE.....	10
3. TEPELNÁ POHODA	11
3.1 Termoregulační mechanismus člověka.....	11
3.1.1 Úloha kůže v termoregulaci	13
3.2 Produkce tepla v organismu a jeho výměna s prostředím.....	13
3.2.1 Teplo sdílené sáláním.....	15
3.2.2 Teplo sdílené konvekci	15
3.2.3 Teplo sdílené vypařováním	16
3.2.4 Teplo sdílené dýcháním.....	16
3.2.5 Rovnice tepelné pohody	17
4. FAKTORY TEPELNÉ POHODY	19
4.1 Charakteristika faktorů prostředí a metody jejich měření.....	19
4.1.1 Teplota vzduchu	19
4.1.2 Rychlost proudění vzduchu	19
4.1.3 Střední radiační teplota	21
4.1.4 Vlhkost vzduchu	24
4.2 Faktory osobní.....	25
4.2.1 Hodnota metabolismu.....	25
4.2.2 Tepelný odpor oděvu	27
5. KRITÉRIA TEPELNÉ POHODY	29
5.1 Operativní teplota	29
5.2 Index PMV.....	30
5.3 Index PPD	32
5.4 Index DR.....	32
5.5 Index PD.....	33
6. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU	34
6.1 Platná legislativa pro hodnocení tepelného mikroklimatu	34
6.1.1 Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.....	34
6.1.2 Norma ČSN ISO 7730.....	35
6.1.3 Norma ČSN ISO 7726.....	37
6.2 Zařízení pro hodnocení vnitřního mikroklimatu	37
7. VHODNÉ SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ	40
7.1 Měření teploty	40
7.1.1 Platinový snímač Pt 100	40
7.1.2 Teplotní senzor LM35CZ	41
7.1.3 Teplotní senzor DS18B20	42
7.1.4 Senzor SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu.....	43
7.2 Měření střední radiační teploty	46
7.2.1 Tepelné detektory infračerveného záření	47
7.2.1.1 Pyroelektrické senzory.....	47

7.2.1.2 Bolometry.....	48
7.2.1.3 Termoelektrické detektory.....	49
7.2.2 Kvantové detektory	54
7.2.3 Infratermočlánek od firmy PerkinElmer.....	54
7.2.4 Měření rychlosti proudění vzduchu	58
7.2.5 Digitální tranzistorový termoanemometr	59
8. KOMPAKTNÍ SNÍMAČ OPERATIVNÍ TEPLoty	63
8.1 Mikrokontrolér	63
8.2 A/D převodník Sigma-Delta	64
8.3 Dělič napětí pro A2TPMI334	67
8.4 D/A převodník MCP4725	68
8.5 Napěťová reference	69
8.6 Obvod FTDI FT232RL	71
8.7 Obvod reálného času DS1307.....	71
8.8 Obousměrný převodník napěťových úrovní pro sběrnici I ² C	72
8.9 Zobrazovací jenotka	73
8.10 Napájecí adaptér.....	74
8.11 Pouzdro kompaktního snímače operativní teploty	75
8.12 Návrh plošného spoje.....	77
9. OVĚŘENÍ PARAMETRŮ SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty	80
9.1 Ověřování rychlosti proudění vzduchu	80
9.2 Ověřování střední radiační teploty a teploty vzduchu v kalibrační komoře	84
9.2.1 Řešení kalibrační komory	84
9.2.2 Výsledky ověřování střední radiační teploty a teploty vzduchu v kalibrační komoře.....	85
9.3 Ověřování snímače teploty a relativní vlhkosti SHT25	90
9.4 Zhodnocení kompaktního snímače operativní teploty a návrh jeho možných úprav	91
10. NEJISTOTY MĚŘENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty	94
10.1 Teorie nejistot měření	94
10.1.1 Výpočet standardní nejistoty metodou typu A.....	95
10.1.2 Výpočet standardní nejistoty metodou typu B.....	96
10.1.3 Stanovení standardních nejistot nepřímých měření	97
10.2 Výpočet nejistoty nepřímého měření operativní teploty	98
11. ZÁVĚR.....	101
12. POUŽITÁ LITERATURA.....	104
13. VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	108
14. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	111
15. SEZNAM PŘÍLOH.....	115
16. PŘÍLOHY	116

1. ÚVOD

S rozvojem společnosti a jejího technického pokroku se stále zvyšují nároky na zlepšení prostředí v obytných a pracovních prostorách budov. Snahou je dosažení tepelné pohody (tepelného komfortu) člověka, která má zásadní vliv na jeho spokojenost, zdraví, pracovní výkon a bezpečnost práce. Dalším důvodem je, že člověk, při současném způsobu života, stráví až 90 % svého času ve vnitřním prostředí (budovy, dopravní prostředky). Zlepšení kvality prostředí je většinou závislé a limitované ekonomickým stavem společnosti. Vlastní realizace uvedených cílů vyžaduje znalost biologických procesů vedoucí k tepelné pohodě člověka, znalost procesů probíhajících ve sledovaném prostředí a znalost technologií a technických prostředků pro řešení problémů. Z důvodů potřebné znalosti biologických procesů se práce na svém počátku zabývá termoregulačními mechanismy lidského těla i výměnou tepla mezi lidským tělem a okolním prostředím.

Teplu, které člověk produkuje při různých činnostech, musí být odvedeno do prostoru tak, aby nedocházelo k výraznému zvýšení teploty těla. Na druhé straně odvod tepla nesmí být moc intenzivní, aby se to neprojevovalo výrazným snížením teploty těla. Člověk by tedy neměl cítit v daném prostředí pocit nepříjemného chladu a ani nepříjemného tepla. Tepelná pohoda je pocit, který člověk vnímá při pobytu v prostředí, kde je produkce tepla člověkem v rovnováze s teplem odvedeným do okolí, přičemž člověk prakticky neaktivuje vlastní termoregulační mechanismy jako je pocení, regulace krevního oběhu aj.

Vnitřní klima je zajišťováno stavebními konstrukcemi budov a jejich vytápěcími, větracími a klimatizačními systémy. Pro jejich návrh je nutné stanovit fyzikální parametry vnitřního prostředí, jako jsou teplota vzduchu, vlhkost vzduchu a rychlost proudění vzduchu a také teploty okolních objektů. Tyto faktory, ovlivňující intenzitu předávání tepla mezi tělem člověka a jeho okolím, mají vliv na stupeň dosažení tepelné pohody.

Náklady vynaložené na tepelný komfort člověka se s rostoucí ekonomikou a technickou vyspělostí stávají velkým zdrojem spotřeby energie, ať už v domácnostech, v zaměstnání či v dopravních prostředcích. Úspora energie je prvořadou záležitostí, a proto se hledají stále nová řešení, kde by se drahá energie mohla ušetřit. Účinnou regulací tepelného stavu prostředí lze docílit snížením spotřeby energie nebo navýšením komfortu pro člověka. K tomu je však zapotřebí především účinně monitorovat stav prostředí a v závislosti na jeho znalosti jej zpětně ovlivňovat vhodnými a úspornými zásahy.

Pro monitorování a hodnocení tepelného stavu prostředí existuje celá řada komerčních přístrojů, které toto umožňují. Tyto přístroje jsou však poměrně drahé, a právě cena neumožňuje jejich použití v každodenní praxi. Zde se otevírá prostor pro výzkum a vývoj nových zařízení, která by monitorování tepelného stavu prostředí umožňovala, a zároveň cena řešení by nebyla příliš vysoká. Pro návrh a realizaci je potřebná znalost platné legislativy a způsoby měření parametrů prostředí, což rovněž připomenou následující kapitoly práce.

Hlavním cílem předložené dizertační práce je návrh vhodného snímače operativní teploty pro hodnocení tepelného stavu prostředí. Operativní teplota se jeví jako vhodný komplexní parametr, který se stanovuje přepočtem z několika přímo měřených veličin charakterizujících stav prostředí. Technické vlastnosti navrženého zařízení budou patřičně ověřeny a následně budou stanoveny nejistoty měření tohoto zařízení. Veškeré tyto experimentální činnosti byly ověřovány na realizovaném a plně fungujícím funkčním vzorku snímače, který je součástí výsledků této práce.

2. CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

Jak již bylo řečeno v úvodu práce, v současné době neexistuje levné zařízení s patřičnou přesností, které by umožňovalo měření všech potřebných parametrů prostředí. Dostupnost takového zařízení nejen zpřístupní parametry komplexnějšího hodnocení prostředí a tepelné pohody podle příslušných norem a předpisů, ale současně umožní jejich využití v regulačních systémech. Dle základních norem ČSN ISO oboru je takovým výstižným komplexním parametrem operativní teplota. Konečným cílem práce je návrh a realizace takového dostupného snímače operativní teploty. Dílčí cíle práce je pak možno formulovat takto:

- Shrnutí současných teoretických poznatků vztahujících se k problematice tepelné pohody. Objasnění pojmů tepelné pohody a tepelného stavu prostředí.
- Analýza jednotlivých parametrů prostředí a způsob jejich měření s přihlédnutím k platné legislativě oboru.
- Průzkum nabídky drahých a vysoce specializovaných laboratorních systémů pro hodnocení stavu prostředí.
- Vytipování vhodných snímačů jednotlivých dílčích veličin, potřebných pro hodnocení tepelného stavu prostředí.
- Zvolení základní koncepce a způsobu řešení návrhu kompaktního snímače operativní teploty, upřesnění požadavků na snímač.
- Realizace kompaktního snímače operativní teploty formou funkčního vzorku. Samostatné ověření jednotlivých částí pro sledování dílčích veličin (teplota, proudění) a zpracování výsledné operativní teploty pomocí vhodného mikrokontroléru. Realizace koncepce do podoby (uceleného) kompaktního snímače s vhodnými výstupy signálu pro případný navazující řídicí systém.
- Ověření funkčnosti a základních parametrů snímače. Kalibrace snímače vztažená k dostatečně přesným profesionálním snímačům dílčích veličin, vyhodnocení přesnosti se základní analýzou nejistot měření. Stanovení nejistoty měření kompaktního snímače operativní teploty.
- Případné další návrhy na následné úpravy, zejména s ohledem na výhledovou sériovost výroby a nasazení snímače do praxe.

Je třeba připomenout, že práce se nezabývá návrhem následného řídicího systému pro regulaci parametrů prostředí, jelikož jsou tyto systémy dodávány spolu s technologií. Snímač bude navržen tak, aby byl schopen poskytovat data tomuto systému.

3. TEPELNÁ POHODA

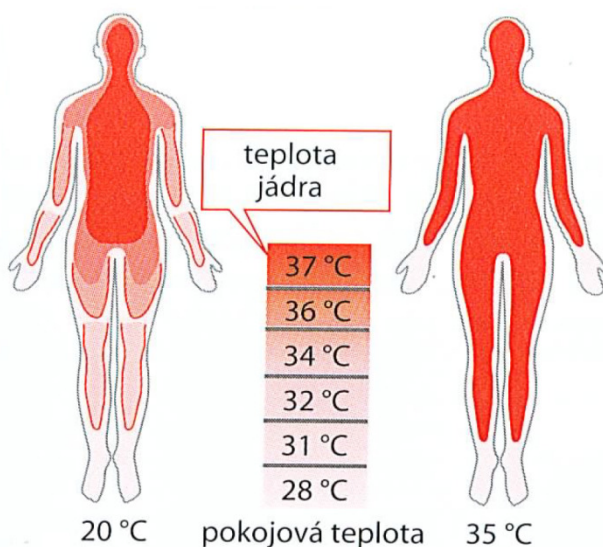
Tepelná pohoda je subjektivní pocit označující stav, při kterém je dosaženo tepelné rovnováhy člověka, kdy prostředí odebírá tělu tepelnou produkci bez nadměrného pocení (při suchém pocení). Nedosáhne-li se ani mokřým pocením tepelné rovnováhy, sníží chemická termoregulace těla intenzitu látkových přeměn a intenzita činnosti člověka nutně poklesne. Tepelný stav prostředí je velmi důležitým aspektem a zároveň limitujícím činitelem, který omezuje dosažitelný pracovní výkon a stává se faktorem ovlivňujícím produktivitu činnosti člověka. [4], [20]

K zajištění tepelné pohody pro zdravé jedince je potřeba znát souvislosti mezi tepelnou výměnou lidského těla s okolním prostředím, možnostech termoregulace lidského organismu a faktorech tepelné pohody, o kterých pojednává tato kapitola.

3.1 TERMOREGULAČNÍ MECHANIZMUS ČLOVĚKA

Termoregulačním mechanismem se rozumí schopnost organismu udržet si svou stálou tělesnou teplotu bez ohledu na to, že vlastní produkce tepla, jeho příjem a ztráty neustále kolísají. Čím jsou organismy složitější, tím užší je pro ně rozmezí optimální teploty, a proto se snaží udržet si teplotu svého vnitřního prostředí relativně stálou.

Člověk patří k teplokrevným (homoiotermním) živočichům. Jeho tělesná teplota je udržována na konstantní teplotě, i když se nachází v teplotně proměnlivém prostředí. Pouze však v samotném nitru těla je tato teplota konstantní a je rovna 37 °C. Teplota povrchu těla kolísá podle typu termoregulačních pochodů a je ovlivňována i teplotou okolí. Toto kolísání má vliv na končetiny a kůži, jak znázorňuje obrázek 3.1.



Obr. 3.1 Graf procentuálního podílu jednotlivých ztrát tepla nahého člověka [54]

Řídící centrum pro termoregulaci se nachází v zadní části hypotalamu. Tento termoregulační mechanismus by však nemohl fungovat bez tepelných senzorů, které zaznamenávají výkyvy tělesné teploty. V organismu proto najdeme periferní termoreceptory (chladové a tepelné receptory) v kůži a vnitřní termoreceptory, které se vyskytují v hlubokých tělních strukturách.

Termoreceptory chladové jsou nejvíce obsaženy v kůži. Jsou rozloženy rovnoměrně a zodpovídají za detekci chladu. Kožní termoreceptory spolu s vnitřními receptory zprostředkovávají termoregulačnímu centru naprosto přesný obraz o teplotní situaci tělesného jádra a povrchu těla. Pokud tedy řídící centrum v hypotalamu detekuje, že vnitřní teplota je vyšší nebo nižší než jmenovitá hodnota, dojde k aktivaci mechanismů, které

snižují nebo zvyšují produkci tepla, jak zobrazuje tabulka 3.1. Mezní hodnotou, kdy jsou tyto mechanismy uváděny v činnost, je teplota 37,1 °C. [61]

Tab. 3.1 *Termoregulační mechanismy člověka [61]*

<i>Mechanismus</i>	<i>Požadovaný efekt</i>	<i>Aktivace</i>
1. zvýšený svalový tonus 2. svalový třes 3. vědomé zvýšení svalové aktivity 4. chemická termogeneze (zvýšená sekrece hormonů štítné žlázy a adrenalinu) 5. zvýšená chuť k jídlu	zvýšená produkce tepla	chlad
1. vazokonstrikce 2. behaviorálně - redukce povrchu tepla - vhodný oděv	snížení tepelných ztrát	chlad
1. snížení svalového tonu 2. snížení tělesné aktivity 3. snížená chuť k jídlu 4. snížená sekrece hormonů štítné žlázy a adrenalinu	snížení produkce tepla	teplo
1. vazodilatace 2. pocení 3. intenzivní dýchání 4. termoregulační chování (lehký oděv)	zvýšení výdeje tepla	teplo

Člověk navíc svůj izolační systém těla posiluje behaviorálně, a to redukcí povrchu těla (schoulení), svalovou aktivitou (podupávání) a volbou vhodného oděvu vzhledem k teplotě prostředí. Takovou to cílenou činnost můžeme označit jako termoregulační chování.

Při reakci na chlad dochází v organismu k vazokonstrikci (zúžení) periferních arteriol a otevrou se arteriovenózní zkratky. Dojde tak ke snížení průtoku krve povrchovými vrstvami kůže.

V teplém prostředí se otevírají tepénky arteriovenózních zkratk a působením tepla i povrchové cévy. Vazodilatace (rozšíření cév) vede ke zvýšenému průtoku krve kůží a výsledkem je usnadnění výdeje tepla.

Kritickými stavy pro termoregulaci je hypertermie a hypotermie.

Hypertermie vzniká díky nerovnováhy mezi produkcí a ztrátami tepla, především při přetížení mechanismů předávajících teplo do svého okolí (např. při intenzivním cvičení). Pokud tento stav přetrvává, může dojít k úpalu. Úpal může způsobit těžké poškození mozku, které často vede ke smrti. V organismu nastává selhávání termoregulace.

Hypotermie je snížení tělesné teploty. Ztráty tepla nejsou vyrovnávány jeho tvorbou. Pokud tělesná teplota klesne na 28 – 30 °C dochází ke snížení enzymatických pochodů, zpomalení metabolismu a fyziologických funkcí. Organismus ztrácí schopnost nezávislého návratu k normě. Smrt může nastat, když teplota jádra klesne na 26 °C až 28 °C. [61]

3.1.1 Úloha kůže v termoregulaci

Kůže je hraniční vrstva pokrývající zevní povrch lidského těla a především představuje účinnou bariéru mezi tělem a vnějším prostředím. Zároveň tělo ochraňuje před nejrůznějšími vnějšími vlivy. U dospělého člověka měří povrch kůže $1,6 - 2 \text{ m}^2$, její tloušťka je $1,5 - 4 \text{ mm}$. Kůže, podkoží a podkožní tuk jsou tepelným izolátorem těla. Tuk je důležitým izolačním materiálem, který vede teplo oproti ostatním tkáním pouze z jedné třetiny. Každý milimetr podkožního tuku dovoluje člověku snášet chladnější atmosféru o 1 až $2 \text{ }^\circ\text{C}$.

Kůže se podílí na usměrňování a regulování výměny tepla mezi organismem a vnějším prostředím pomocí neurovaskulárních mechanismů. Důležitou roli v termoregulaci hraje i uspořádání cév. Samotné uspořádání cév v kůži má primárně termoregulační význam a umožňuje snížit výdej tepla do okolního prostředí při zachování průtoku. Průtok krve kůží se díky protiproudovému systému kolmo k povrchu paralelně běžících tepének, žilek a kapilárních smyček může pohybovat mezi hodnotami několika mililitrů v chladu až asi 7 litrů při potřebě zvýšeného výdeje tepla. Termoregulační funkci plní tři základní nastavení průtoku krve kůží.

V chladném prostředí a při malé produkci tepla je průtok krve kůží minimální. Na povrchu kůže je krev ve vrcholcích kapilárních kliček v teplotní rovnováze s prostředím. Ochlazená krev se v tenkých kožních žilkách ohřívá okolní tkání a tepennou krví z paralelně běžících tepének, kde se krev ochlazuje. Tímto dochází k zadržování tepla v těle.

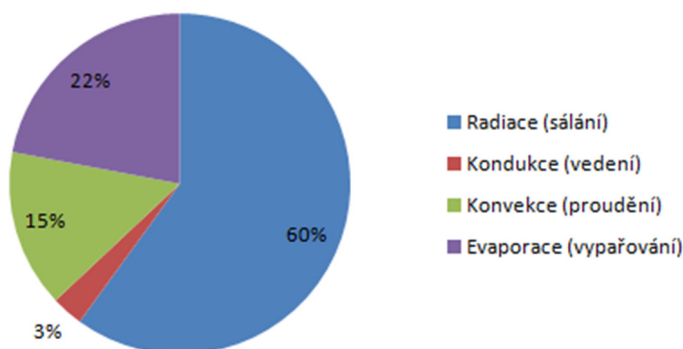
V apikálních oblastech těla jako jsou ušní boltce, nos, brada, rty, ruce se nacházejí arteriovenózní zkratky, které zkracují tok krve z tepének do žilek. Tím dochází k obcházení kapilárního řečiště a k rychlé změně prokrvení. Teplota povrchu těla se tak v chladném prostředí udrží dostatečně vysoká, aby se zabránilo poškození tkáně.

V horkém prostředí nebo při velké produkci tepla může samotné zúžení cév (vazokonstrikce) zvýšit průtok krve kůží několikanásobně. [28]

3.2 PRODUKCE TEPLA V ORGANIZMU A JEHO VÝMĚNA S PROSTŘEDÍM

Produkce tepla v organismu je kontinuální proces. Teplo vzniká jako nezbytný produkt metabolismu. Produkce tepla je dána úrovní metabolismu a faktory, které metabolismus ovlivňují. Nejvíce dochází ke zvyšování metabolismu při svalové aktivitě. První svalovou změnou reagující na chlad je postupné a obecné zvyšování svalového napětí. To má za následek třes svalů, což je charakteristická svalová odpověď na chlad. Kosterní svaly se stahují v malém rozsahu a ve velmi rychlém sledu. Člověk při tom nekoná žádnou práci a účinnost těchto svalových stahů se projeví zvýšením tělesné teploty za několik minut. Samotný začátek svalového třesu začíná nerytmicky, bez svalového chvění – postupně se zvyšuje tonus kosterních svalů a po dosažení kritické úrovně začíná svalový třes. Tento chladový třes u dospělých je nejdůležitějším mechanismem pro dodatečnou tvorbu tepla. [61]

Výdej tepla do prostředí je uskutečňován povrchem těla – radiací, kondukcí, konvekcí a evaporací vody z povrchu kůže a sliznic. Procentuální podíl jednotlivých ztrát je uveden v grafu na obrázku 3.2.



Obr. 3.2 Graf procentuálního podílu jednotlivých ztrát tepla nahého člověka [61]

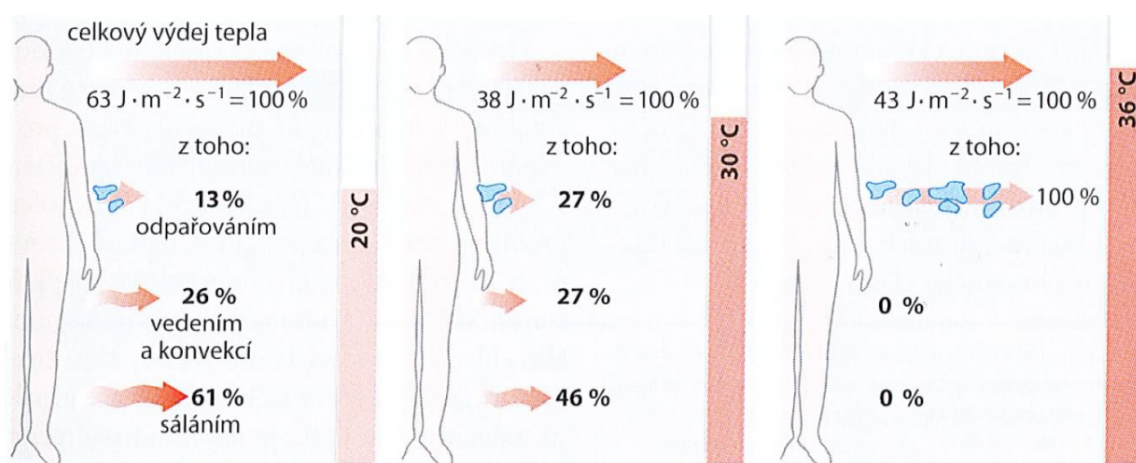
Radiace (záření) je proces, kdy povrch těla neustále vyzařuje teplo ve formě elektromagnetického vlnění. Tyto paprsky vyzařují simultánně i všechny okolní předměty. Úroveň emise je dána teplotním gradientem mezi tělem a prostředím.

Kondukce (vedení) je přenos tepelné energie, která se uskutečňuje přímým kontaktem s předměty majícími rozdílnou teplotu. Účinnost je malá, protože po ohřátí předmětu (vyrovnání teplot) se ztrácí gradient a další vedení neprobíhá.

Konvekce (proudění) je charakterizováno pohybem molekul plynů nebo kapaliny z místa s určitou teplotou do místa o jiné teplotě.

K odpařování vody dochází z povrchu těla, ze sliznic dutiny ústní a z dýchacích cest. Odpařením 1 g vody organismus ztratí 2,5 kJ. Když je teplota prostředí vyšší než teplota organismu, dochází ke ztrátě tepla odpařováním potu (evaporace). Pokud je organismu znemožněno toto odpařování dochází snadno k jeho přehřátí. [31]

Jen malá část tepelné produkce se může v těle akumulovat. Při trvalé akumulaci tepla by tělesná teplota vzrůstala. Extrémně nedostatečný odvod tepla, kdy by docházelo k přehřátí organismu, řeší tělo mdlobou. Za normální proto považujeme stav tepelné rovnováhy, kdy prostředí odebírá lidskému tělu tolik tepla, kolik se v lidském těle právě tvoří. Zapojení jednotlivých mechanismů výměny tepla s okolním prostředím při různých teplotách vzduchu znázorňuje obrázek 3.3. [61]



Obr. 3.3 Ztráty tepla lidského těla bez oděvu v klidu při různých teplotách prostředí [54]

3.2.1 Teplo sdílené sáláním

Tepelný tok sáláním vzniká mezi povrchem lidského těla (oblečení a pokožka) a povrchy okolních ploch v interiéru včetně zdrojů tepla. Ve většině případů je střední radiační teplota nižší než teplota oděvu člověka, proto se jedná o tepelnou ztrátu. Tepelný tok sdílený sáláním $\dot{Q}_r$ [W] lze stanovit ze Stefan - Boltzmannova zákona (3.1) [57]

$$\dot{Q}_r = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S_r \cdot (T_p^4 - T_r^4) = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S_r \cdot [(t_p + 273,15)^4 - (t_r + 273,15)^4] \quad (3.1)$$

kde ε je poměrná zářivost mezi povrchem těla a okolními plochami. Pro pokožku a většinu tkanin má hodnotu $\varepsilon = 0,95$ [-],
 σ_0 Stefanova-Boltzmannova konstanta $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$,
 S_r povrch lidského těla přenášející teplo radiací [m^2] - je menší než povrch oblečeného člověka (sálání se nezúčastní celý povrch oděvu, část je vzájemně zakryta). $S_r = 0,70 \cdot S_k$ - pro sedící osoby, $S_r = 0,73 \cdot S_k$ pro stojící osoby,
 S_k povrch oblečeného člověka [m^2],
 T_r střední radiační teplota [K],
 t_r střední radiační teplota [$^{\circ}\text{C}$],
 T_p střední teplota povrchu oděvu [K],
 t_p střední teplota povrchu oděvu [$^{\circ}\text{C}$].

3.2.2 Teplo sdílené konvekcí

Tepelný tok sdílený konvekcí $\dot{Q}_k$ [W] mezi tělem člověka a okolním vzduchem je způsobován prouděním vzduchu okolo lidského těla a platí pro něj vztah (3.2) [5]

$$\dot{Q}_k = \alpha_k \cdot S_k \cdot (t_p - t_a), \quad (3.2)$$

$$S_k = f_{cl} \cdot S, \quad (3.3)$$

$$S = 0,202 \cdot m^{0,425} \cdot h^{0,725}, \quad (3.4)$$

$$f_{cl} \begin{cases} 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1} \\ 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}, \end{cases} \quad (3.5)$$

kde f_{cl} je povrchový faktor oděvu [-],
 S_k povrch oblečeného člověka [m^2],
 S povrch lidského těla [m^2],
 α_k součinitel přestupu tepla konvekcí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 m hmotnost člověka [kg],
 h výška člověka [m].

K proudění vzduchu v_a kolem těla dochází dvěma způsoby:

- **volnou konvekcí**, vyvolanou rozdílem teplot stěn (povrchu oděvu) a vzduchu. Při rychlosti proudění vzduchu nepřesahující $0,15 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ platí [5]

$$\alpha_k = 2,38(t_p - t_a)^{0,25}, \quad (3.6)$$

- **nucenou konvekcí**, působením vnitřní cirkulace vzduchu v prostoru při rychlosti proudění vzduchu v rozmezí $v_a = 0,15 - 2,6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je [5]

$$\alpha_k = 12,1\sqrt{v_a}. \quad (3.7)$$

3.2.3 Teplo sdílené vypařováním

Tepelný tok $\dot{Q}_v$ [W] odváděný z povrchu těla vypařováním potu se skládá z tepelného toku odváděného suchým pocením $\dot{Q}_{vs}$ [W] a mokrým vypařováním $\dot{Q}_{vm}$ [W] a je dán vztahem (3.8) [57]

$$\dot{Q}_v = \dot{Q}_{vs} + \dot{Q}_{vm}. \quad (3.8)$$

Tepelný tok odváděný z lidského těla suchým vypařováním, nebo-li difúzí, nevnímá člověk jako pocení, a proto nepodléhá termoregulačním mechanismům. Velikost difúze z jednotkové plochy pokožky je proporcionálně úměrná rozdílu mezi tlakem nasycených vodních par $\check{p}_{pk}$ na povrchu pokožky a parciálním tlakem vodních par v okolním vzduchu p_{pv} a lze ji vyjádřit rovnicí (3.9) [57]

$$\dot{Q}_{vs} = \beta \cdot S \cdot l_0 \cdot (\check{p}_{pk} - p_{pv}), \quad (3.9)$$

kde β je součinitel difúzní propustnosti pokožky [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$],
 S plocha povrchu těla [m^2],
 l_0 výparné teplo vody [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$],
 $\check{p}_{pk}$ parciální tlak sytých vodních par při teplotě pokožky t_k [Pa],
 p_{pv} parciální tlak vodních par v okolním vzduchu závislý na teplotě t_a a relativní vlhkosti φ [Pa].

Součinitel difúzní propustnosti pokožky $\beta = 1,28 \cdot 10^{-9} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Pa}^{-1}$, výparné teplo vody při teplotě 35 °C je $l_0 = 2,4 \cdot 10^6 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1}$ a parciální tlak vodní páry nad povrchem pokožky v závislosti na její teplotě je $\check{p}_{pk} = (2,56 \cdot t_k - 3,38) \cdot 10^2 \text{ Pa}$. Po dosazení uvedených hodnot do rovnice (3.9) pro hustotu tepelného toku suchým (difúzním) vypařováním dostaneme vztah (3.10) [57]

$$\dot{Q}_{vs} = 3,07 \cdot S \cdot (0,256 \cdot t_k - 3,38 - p_{pv} \cdot 10^{-3}). \quad (3.10)$$

Tepelný tok odváděný z povrchu těla mokrým vypařováním (na povrchu kůže jsou zřetelné kapičky potu) řídí organismus pomocí termoregulace tak, aby udržoval stálou teplotu těla. Pro tepelný tok mokrým vypařováním platí rovnice (3.11) [57]

$$\dot{Q}_{vm} = 0,42 \cdot S_w \cdot (\dot{q}_m - 58,15) \cdot S, \quad (3.11)$$

kde S_w je plocha povrchu těla omáčená potem [m^2]
 $\dot{q}_m$ vnitřní produkce tepla (metabolismus) z jednotkové plochy na povrchu těla [$\text{W} \cdot \text{m}^2$].

3.2.4 Teplo sdílené dýcháním

Vdechovaný vzduch, jehož množství závisí na intenzitě fyzické činnosti, se v plicích zahřeje na teplotu 34 °C až 36 °C a současně se nasýtí vodní parou. Tepelný tok odváděný dýcháním $\dot{Q}_d$ [W] je roven součtu tepelného toku potřebného k ohřátí vzduchu a tepelného toku potřebného k odpaření vody v plicích jak ukazuje vztah (3.12) [57]

$$\dot{Q}_d = \dot{m}c_p(t_{vyd} - t_v) + \dot{m}l_0(\ddot{x}_{vyd} - x_v), \quad (3.12)$$

kde $\dot{m}$ je hmotnostní průtok suchého vdechovaného vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$],
 c_p měrná tepelná kapacita suchého vzduchu za konstantního tlaku [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$]
($c_p = 1010 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \text{K}^{-1}$),
 t_{vyd} teplota vydechovaného vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
($t_{vyd} = 34^{\circ}\text{C}$),
 t_v teplota vdechovaného vzduchu [$^{\circ}\text{C}$],
 l_0 měrné výparné teplo vody [$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$]
($l_0 = 2560 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$),
 $\ddot{x}_{vyd}$ měrná vlhkost vydechovaného nasyceného vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$],
 x_v měrná vlhkost vdechovaného vzduchu [$\text{kg} \cdot \text{kg}_{sv}^{-1}$].

Hmotnostní tok vzduchu vdechovaného do plic $\dot{m}$ závisí na potřebě kyslíku a je především funkcí metabolismu $\dot{Q}_m$, pro který platí (3.13) [57]

$$\dot{m} = 1,433 \cdot 10^{-6} \cdot \dot{Q}_m. \quad (3.13)$$

Měrná vlhkost vydechovaného vzduchu $\ddot{x}_{vyd}$ nasyceného vodní parou při teplotě 35°C bude (3.14) [57]

$$\ddot{x}_{vyd} = 37,85 \cdot 10^{-3} \quad (3.14)$$

a měrná vlhkost vdechovaného vzduchu x_v se dá vyjádřit přibližně vztahem (3.15) [57]

$$x_v = 6,3 \cdot 10^{-6} \cdot p_{pv}. \quad (3.15)$$

Po dosazení uvedených vztahů (3.13), (3.14), (3.15) do rovnice (3.12) a po jejich úpravě dostaneme vztah pro hustotu tepelného toku odváděného dýcháním (3.16) [57]

$$\dot{Q}_d = \dot{Q}_m \cdot [1,45 \cdot (35 - t_v) + 3,456 \cdot (37,85 - 6,3 \cdot 10^{-3} \cdot p_{pv})]^{10^{-3}}. \quad (3.16)$$

3.2.5 Rovnice tepelné pohody

V předchozích kapitolách byla popsána produkce tepla v organismu $\dot{Q}$ [W] a jeho výměna s prostředím. První podmínkou pro dosažení tepelné pohody je splnění rovnice tepelné rovnováhy (3.17) [21]

$$\dot{Q} = \pm \dot{Q}_{ved} \pm \dot{Q}_k \pm \dot{Q}_r + \dot{Q}_d + \dot{Q}_v \pm \dot{Q}_a, \quad (3.17)$$

kde $\dot{Q}_{ved}$ je tepelný tok vedením [W],
 $\dot{Q}_a$ tepelný tok akumulovaný v těle [W].

Akumulace tepla $\dot{Q}_a$ v těle a tepelný tok vedením $\dot{Q}_{ved}$ se neprojevuje významnější měrou a platí pro ně $\dot{Q}_a \doteq 0$, $\dot{Q}_{ved} \doteq 0$.

Pro pocit tepelné pohody je však důležité, jakým způsobem je tepelné rovnováhy dosaženo. Je-li např. tepelné pohody dosaženo vylučováním potu nebo snižováním cirkulace krve mezi vnitřními a periferními orgány z důvodů chladu, nelze o tepelné

pohodě hovořit. Lze tedy říci, že při stavu tepelné rovnováhy musí být tepelné rovnováhy dosaženo při minimálních zásazích tělesné regulace.

Při určité produkci tepla v těle jsou teplota pokožky a pocení jediné fyziologické veličiny, které ovlivňují tepelnou pohodu. Pro stav tepelné pohody je teplota pokožky t_k a tepelný tok mokřým pocením $\dot{Q}_{vm}$ vyjádřeny v závislosti na činnosti člověka $\dot{Q}_m$ vztahy (3.18) [21]

$$t_k = 35,7 - 0,0275 \cdot \frac{\dot{Q}_m}{S} \quad (3.18)$$

$$\dot{Q}_{vm} = 0,42 \cdot S_w \cdot \left(\frac{\dot{Q}_m}{S} - 58,15 \right). \quad (3.19)$$

Vztahy (3.18) a (3.19) se pokládají za druhou a třetí podmínku tepelné pohody. Rovnice tepelné pohody (3.17) vyjadřuje vzájemné vztahy mezi hlavními činiteli (faktory) tepelné pohody. Tyto činitele charakterizují

$\dot{Q}_m, Rcl, fcl$	činnost člověka, vlastnosti oděvu (faktory osobní),
T, w, tu, φ	tepelný stav prostředí (faktory prostředí).

4. FAKTORY TEPELNÉ POHODY

Tepelná pohoda je pocit, který člověk vnímá při pobytu v prostředí. Člověk při různých činnostech produkuje určité množství tepla. Aby se výrazně nezvýšila teplota těla, musí být zajištěn odvod tepla produkovaného člověkem do prostoru. Odvod tepla však nesmí být moc intenzivní, aby nezpůsobil výrazný pokles teploty těla. Člověk by neměl mít v daném prostředí pocit nepříjemného chladu a ani nepříjemného tepla. [5], [21], [45], [49], [51]

Faktory ovlivňující výměnu tepla mezi tělem člověka a jeho okolím mají zároveň vliv na stupeň dosažení tepelné pohody. Dají se rozdělit se do dvou základních kategorií, a to na faktory *prostředí* a faktory *osobní*.

4.1 CHARAKTERISTIKA FAKTORŮ PROSTŘEDÍ A METODY JEJICH MĚŘENÍ

Znalost faktorů prostředí a jejich měření je důležité pro hodnocení tepelného stavu prostředí. V následujícím textu budou jednotlivé faktory popsány.

4.1.1 Teplota vzduchu

Teplota vzduchu t_a [°C], je základní fyzikální veličinou a nelze ji určit pomocí jiných veličin. Je makroskopickým projevem tepelného pohybu molekul v látce, přičemž je přímou střední kinetické energii pohybu molekul. V důsledku změny teploty se mění různé fyzikální vlastnosti látek, které lze využít pro měření teploty. Jedná se o změny rozměrů látek, změny tlaku tekutin v uzavřených prostorách, změny elektrických odporů, změny termoelektrických napětí ve styku dvou látek, změny kmitočtu krystalových výbrusů, změny magnetických vlastností látek, změny skupenství látek, změny barvy látek apod.

Teploměry je nutné chránit před rušivými účinky prostředí. Jedná se především o ochranu proti mechanickým vlivům, proti tepelnému záření okolního prostředí a vůči elektrickým a magnetickým polím. Ochrana teploměru proti vlivu tepelného záření se provádí především tak, aby povrchy s extrémními teplotami byly co nejdále od samotného teploměru. Dále se teploměry proti vlivu tepelného záření chrání pomocí stínících ploch. Při volbě stínících ploch je potřeba dbát na to, aby teploměr byl odcloněn od vzdálených zářičů či studených ploch a aby bylo současně zabezpečeno dostatečné proudění kolem čidla. Také je třeba mít na paměti tepelnou setrvačnost čidla. Teploměr, který je umístěn v daném prostředí, neukazuje teplotu měřeného vzduchu okamžitě, ale pro dosažení tepelné rovnováhy je zapotřebí časová prodleva. Rychlost odezvy snímače je možné zkrátit jeho konstrukcí. Čím menší a lehčí je teplotní snímač, tím je rychlejší odezva. [51]

4.1.2 Rychlost proudění vzduchu

Rychlost proudění vzduchu v_a [m.s⁻¹] je veličina určená svojí velikostí a směrem. Nejčastěji se určuje ze silového působení proudící tekutiny na lopatky a mísky anemometrů nebo ze silového působení tekutiny na vhodně situované tlakové odběry. Velmi často se však rychlost proudění vzduchu stanovuje měřením intenzity ochlazováním různých obtékaných tělísek. Norma ČSN ISO 7726 stanovuje požadavky na snímače pro měření rychlosti proudění vzduchu a požaduje následující charakteristiky: [6]

- Citlivost snímače na směr proudění vzduchu (všesměrová citlivost).
- Citlivost na kolísání rychlosti proudění vzduchu.

- Možnost zjištění střední rychlosti za určitou dobu.

Při vyhodnocování tepelného stavu prostředí se lze setkat s dalším faktorem, kterým je intenzita turbulence Tu [%]. Stanovuje se při vyšších požadavcích na tepelný stav prostředí. Jedná se o podíl výběrové směrodatné odchylky rychlostí proudění vzduchu a střední rychlosti proudění vzduchu. Intenzitu turbulence lze určit ze vztahu (4.1) [51]

$$Tu = \frac{1}{\bar{v}_a} \cdot \sqrt{\frac{\sum_i (v_{ai} - \bar{v}_a)^2}{n-1}}, \quad (4.1)$$

kde v_{ai} jsou jednotlivé naměřené rychlosti proudění vzduchu [m.s^{-1}],
 $\bar{v}_a$ je střední rychlost z dlouhodobého měření [m.s^{-1}],
 n počet měření rychlostí [-].

Při měření v prostoru se střední hodnota rychlosti proudění vzduchu určuje z časového průběhu rychlosti za dobu minimálně 3 minut. Rychlostní čidla pro měření turbulence musí mít malé časové konstanty.

Ze známých principů měření rychlosti proudění vzduchu se jeví jako nejvhodnější použití termoanemometrů, protože jsou schopny měřit velmi malé hodnoty rychlosti proudění vzduchu, a zároveň splňují požadavky stanovené ve výše uvedené normě.

Aby snímač měřil rychlost proudění vzduchu ze všech směrů, je zapotřebí zvolit správný žhavený element. Často používaným elementem je žhavený drátek, který se vkládá kolmo na směr proudu vzduchu. Při odklonění o 10° naměříme rychlost proudění asi o 3 % nižší. Proto vhodnějším řešením je použití žhavené kuličky, která je prakticky směrově nezávislá. Proud vzduchu by však neměl přicházet ze strany držáku. Nevýhodou termoanemometrů je závislost na teplotě prostředí, proto veškeré termoanemometry mají mít dvě teplotní čidla. Jedno čidlo pro měření teploty horkého prvku a druhé pro měření teploty vzduchu. Určitá zjednodušená zařízení bez čidla teploty vzduchu jsou schopna fungovat pouze při teplotě t_a , pro kterou jsou kalibrována.

Pro objasnění principu práce termoelektrických anemometrů je potřeba vyjádřit tepelný tok předávaný konvekcí ze žhaveného tělíska do okolního prostředí, který by měl být v rovnováze s příkonem pro elektrický ohřev tělíska. Ochlazování žhaveného tělíska lze popsat kritériální rovnicí (4.2) [50], [51]

$$Nu = C_g \cdot Re^{m_g} \cdot Pr^{n_g}, \quad (4.2)$$

kde $Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda}$ je Nusseltovo číslo [-],
 α_{kt} součinitel přestupu tepla konvekcí obtékaného tělíska [$\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$],
 L charakteristický rozměr obtékaného tělíska [m],
 λ tepelná vodivost tekutiny ($\lambda = 2,65 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$ při určující teplotě $t_{ur} = 40^\circ \text{C}$) [$\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$],
 $Re = \frac{v_a \cdot L}{\nu}$ Reynoldsovo číslo [-],
 v_a rychlost proudění vzduchu [m.s^{-1}],
 ν kinematická viskozita tekutiny ($\nu = 17,27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2.\text{s}^{-1}$ při určující teplotě $t_{ur} = 40^\circ \text{C}$) [$\text{m}^2.\text{s}^{-1}$],
 Pr Prandtlovo číslo ($Pr = 0,727$ při určující teplotě vzduchu t_{ur} v rozmezí -50 až 500°C) [-],

C_g, m_g, n_g jsou koeficienty závislé na geometrii obtékaného tělíska a režimu proudění.

Fyzikální vlastnosti λ, ν , a Pr lze určit z tabulek pro určující teplotu t_{ur} , pro kterou platí vztah (4.3) [49]

$$t_{ur} = \frac{t_t + t_a}{2}, \quad (4.3)$$

kde t_t je teplota povrchu tělíska [$^{\circ}\text{C}$],
 t_a teplota okolního vzduchu [$^{\circ}\text{C}$].

Tepelný tok $\dot{Q}_{kt}$ [W] předávaný konvekcí ze žhaveného tělíska do okolního prostředí je dán vztahem (4.4) [49]

$$\dot{Q}_{kt} = S_t \cdot \alpha_{kt} \cdot (t_t - t_a), \quad (4.4)$$

kde S_t je plocha povrchu obtékaného tělíska [m^2].

Příkon pro elektrický ohřev tělíska P [W] je dán vztahem (4.5) [49]

$$P = R \cdot I^2, \quad (4.5)$$

kde R je elektrický odpor tělíska [Ω],
 I elektrický proud procházející tělískem [A].

Tepelný tok vyjádřený rovnicí (4.4) a elektrický příkon vyjádřený rovnicí (4.5) musí být v rovnováze. Z toho vyplývá, že se nabízejí dvě možnosti měření rychlosti proudění vzduchu:

- Přístroje s konstantní tepelnou energií P . Měření teploty žhaveného elementu t_t umožňuje určení rychlosti vzduchu v_a .
- Přístroje s konstantní teplotou žhaveného elementu t_t . Měření energie přiváděné k prvku pro udržení jeho teploty umožňuje stanovení rychlosti vzduchu v_a .

4.1.3 Střední radiační teplota

Střední radiační teplotu t_r [$^{\circ}\text{C}$] nebo T_r [K] lze definovat jako myšlenou rovnoměrnou společnou teplotu všech ploch ve vymezeném prostoru, při níž by byl přenos radiačního tepla z lidského těla roven přenosu radiačního tepla ve skutečném nerovnoměrném prostoru. Pro tuto definici se účinky heterogenního i homogenního prostředí na člověka považují za stejné. Pro výpočet střední radiační teploty se používá následující rovnice (4.6) [6]

$$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N}, \quad (4.6)$$

kde T_r je střední radiační teplota [K],
 T_N povrchová teplota plochy N [K],
 F_{p-N} úhlový poměr osálení mezi osobou a plochou N [-].

Výpočet střední radiační teploty je poměrně složitý a v praxi se téměř nepoužívá. Výhodnější je stanovit střední radiační teplotu měřením. K měření se nejčastěji používá černý kulový teploměr.

Černý kulový teploměr (Obr. 4.1) je tvořen černou koulí z měděného plechu, v jejímž středu se nachází čidlo teploty (termočlánek, odporová sonda atd.). Koule může mít teoreticky libovolný průměr, ale protože vzorec pro výpočet střední radiační teploty je závislý na průměru koule, je výhodnější používat standardizované průměry $d=100$ mm nebo 150 mm. Dále je zapotřebí poznamenat, že čím menší koule, tím větší vliv je teploty vzduchu a rychlosti proudění vzduchu, které způsobují sníženou přesnost měření. Koule má matný černý povrch vytvořený elektrochemicky nebo nátěrem a Vernonův – Joklův kulový teploměr má povrch potažený pěnovým polyuretanem.

Kulový teploměr se umístí do prostoru, kde se bude měřit střední radiační teplota. Koule se ustálí v tepelné rovnováze dané účinkem výměny tepla radiací s různými zdroji tepla a účinkem výměny tepla prouděním. Střední radiační teplota se určuje z teploty koule při tepelné rovnováze. Teplotní čidlo uvnitř koule umožňuje měření střední teploty koule, která je ve skutečnosti rovna teplotě vnitřního povrchu koule a teplotě vzduchu uvnitř koule a neliší se od teploty mezní vrstvy na vnějším povrchu koule. Rovnováha při výměně tepla mezi koulí a okolím je dána rovnicí (4.7) [51]

$$\dot{q}_r + \dot{q}_c = 0, \quad (4.7)$$

kde $\dot{q}_r$ je hustota tepelného toku radiací mezi plochami prostoru a koulí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$],
 $\dot{q}_c$ hustota tepelného toku prouděním mezi vzduchem a koulí [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$].

Přestup tepla radiací mezi plochami prostoru charakterizovaný střední radiační teplotou a koulí je vyjádřen vztahem (4.8) [51]

$$\dot{q}_r = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_r^4 - T_g^4), \quad (4.8)$$

kde ε je emisivita černé koule [-],
 σ_0 Stefan-Boltzmanova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 T_r střední radiační teplota [K],
 T_g teplota černé koule [K].

Přestup tepla prouděním je dán vztahem (4.9) [51]

$$\dot{q}_c = \alpha_{kg}(T_a - T_g), \quad (4.9)$$

kde α_{kg} je součinitel přestupu tepla konvekci v úrovni koule [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$].

V případě přirozeného proudění platí (4.10) [51]

$$\alpha_{kg} = 1,4 \cdot \left(\frac{\Delta T}{D}\right)^{\frac{1}{4}}, \quad (4.10)$$

a nucené proudění lze popsat vztahem (4.11) [51]

$$\alpha_{kg} = 6,3 \cdot \frac{v_a^{0,6}}{D^{0,4}}, \quad (4.11)$$

kde D je průměr koule [m],
 v_a rychlost proudění vzduchu v úrovni koule [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$].

Po dosazení rovnic (4.8), (4.9) do rovnice (4.7) dostaneme vztah pro teplotní rovnováhu ve tvaru (4.12) [51]

$$\dot{q}_r = \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot (T_r^4 - T_g^4) + \dot{q}_c = \alpha_{kg}(T_a - T_g) = 0, \quad (4.12)$$

ze kterého pro střední radiační teplotu platí (4.13) [51]

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{\alpha_{kg}}{\varepsilon \cdot \sigma_0} \cdot (T_g - T_a)}. \quad (4.13)$$

V případě přirozeného proudění lze po dosazení hodnot do rovnice (4.12) získat vztah (4.14) [51]

$$t_r = \left[(t_g + 273,15)^4 + \frac{0,25 \cdot 10^8}{\varepsilon} \cdot \left(\frac{t_g - t_a}{D} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot (t_g - t_a) \right]^{\frac{1}{4}} - 273,15. \quad (4.14)$$

Z výše uvedených vztahů vyplývá, že pro výpočet střední radiační teploty je zapotřebí znát nejen teplotu kulového teploměru t_g , ale i rychlost proudění vzduchu v_a a teplotu vzduchu t_a v blízkosti kulového teploměru. Při použití kulového teploměru je potřeba dbát na dobu ustálení, která se pohybuje okolo 20 až 40 minut. Pro velkou setrvačnost čidla proto nelze sledovat rychlé změny střední radiační teploty.



Obr.4.1 Vernonův kulový teploměr [32]

Použití kulového teploměru předpokládá aproximaci s tvarem lidského těla. Proto účinek ze stropu a z podlahy je v případě kulového teploměru nadhodnocen ve srovnání s účinkem na osobu.

Další možnou variantou je měření střední radiační teploty pomocí dvoukulového radiometru. Jedná se o dvě zahříváné koule s různými koeficienty vyzařování. Teplota koulí je udržována na stejné teplotě, a proto jsou vystavovány stejným ztrátám v důsledku proudění. Pro střední radiační teplotu dvoukulového radiometru platí vztah (4.15) [6]

$$T_r = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma_0 \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_p)}}, \quad (4.15)$$

kde	T_r	je střední radiační teplota [K],
	T_s	teplota snímače [K],
	P_p	výkon dodaný leštěnému snímači [W.m ²],
	P_b	výkon dodaný černému snímači [W.m ²],
	ε_p	koeficient vyzařování leštěného snímače [-],
	ε_b	koeficient vyzařování černého snímače [-].

Vhodnou metodou pro měření střední radiační teploty je také využití snímače s konstantní teplotou. Při použití této metody se předpokládá, že čidlo má stejnou teplotu jako je teplota okolního vzduchu. V takovém případě nedochází k žádným ztrátám tepla prouděním a tepelné změny čidla se rovnají změnám střední radiační teploty dané vztahem (4.16) [6]

$$T_r = \sqrt[4]{T_s^4 - \frac{P_s}{\sigma_0 \cdot \varepsilon_s}}, \quad (4.16)$$

kde	T_r	je střední radiační teplota [K],
	T_s	teplota snímače [K],
	P_s	výkon dodaný snímači [W.m ²],
	ε_s	koeficient vyzařování snímače [-].

V případě zvýšených požadavků na tepelný stav prostředí je možno vyhodnocovat asymetrii radiační teploty T_{pr} [K]. Tato veličina je definována rozdílem radiačních teplot dvou protilehlých ploch. Lze ji měřit pomocí kulového stereoteplooměru [24] nebo zahříváného snímače s reflexním a pohltivým kotoučem [6]. Ploška reflexního kotouče je pozlacená a ploška pohltivého kotouče je natřena černě. Pozlacený kotouč bude téměř zcela ztrácet teplo prouděním, zatímco černě natřený kotouč bude ztrácet teplo jak prouděním, tak i radiací. Jsou-li oba kotouče zahřívány na stejnou teplotu, rozdíl v dodané energii oběma kotoučům se rovná přenosu tepla radiací mezi natřeným kotoučem a okolím. Asymetrii radiační teploty lze vypočíst na základě vztahu (4.17) [6]

$$T_{pr} = \sqrt[4]{T_s^4 + \frac{P_p - P_b}{\sigma_0 \cdot (\varepsilon_b - \varepsilon_p)}}. \quad (4.17)$$

4.1.4 Vlhkost vzduchu

Množství vodní páry ve vzduchu, nebo-li vlhkost vzduchu, se dá vyjádřit několika způsoby. Rozlišujeme vlhkost (4.18), (4.19), (4.20) [5]

- Relativní $\varphi = \frac{p_p}{\check{p}_p}$ (4.18)

- Měrnou $x = \frac{m_p + m_k + m_t}{m_v}$ (4.19)

- Absolutní $\Phi = \frac{m_p + m_k + m_t}{V}$ (4.20)

kde	p_p	je parciální tlak par ve vzduchu [Pa],
	$\check{p}_p$	parciální tlak nasycených par při dané teplotě vzduchu [Pa],
	m_p	hmotnost par ve vzduchu [kg],
	m_k	hmotnost kapalně fáze vody ve vzduchu [kg],
	m_t	hmotnost tuhé fáze vody ve vzduchu [kg],

m_v hmotnost suchého vzduchu [kg],
 V celkový objem vlhkého vzduchu [m³].

Podle principu měření vlhkosti vzduchu rozlišujeme vlhkoměry dilatační, psychrometrické, elektrolytické a kondenzační.

Kondenzační vlhkoměr patří k poměrně přesným měřidlům. Sestává se z termoelektricky chlazeného kovového zrcátka, jehož odrazivost se snímá opticky. Orosení způsobuje výraznou změnu odrazivosti a zpětná vazba zmenšuje či zvětšuje intenzitu chlazení, aby se zrcátko udržovalo mírně orosené. Teplota zrcátka se pak měří platinovým odporovým teploměrem. Alternativou k optickému sledování zrcadla je použití krystalového rezonátoru, jehož rezonanční frekvence je ovlivněna kondenzací vodní páry na jeho povrchu. Kondenzační vlhkoměry mají dlouhodobou stabilitu, odolnost proti chemikáliím a velkou přesnost.

Dalším vhodným principem měření je kapacitní senzor vlhkosti využívající absorpci vody v polymerních materiálech. Sledovanou veličinou je u nich změna kapacity kondenzátoru, v němž je dielektrikem polymer. Jedna z elektrod je děrovaná a umožňuje okolnímu vzduchu kontakt s polymerním dielektrikem. Množství absorbované vody je poměrně malé, ale díky její velké dielektrické konstantě jsou změny kapacity měřitelné. Řádově činí 0,1 % z celkové kapacity na každé procento relativní vlhkosti. Tyto senzory se vyrábějí také s integrovaným zpracováním signálu, kdy výstupem je místo kapacity mnohem přijatelnější elektrické napětí, nebo digitální rozhraní. Kapacitní senzory se vyznačují malou závislostí údajů na teplotě, odolností vůči kondenzaci, dobrou odezvou v řádu desítek sekund, přesností v jednotkách procent relativní vlhkosti, poměrně dobrou odolností proti chemikáliím a vyšším teplotám, malými rozměry a v neposlední řadě nízkou cenou. [35]

Vliv relativní vlhkosti vzduchu je pro hodnocení tepelného stavu prostředí malý. Podmínkou je, aby se relativní vlhkost nacházela v rozmezí 30 až 70 %.

4.2 FAKTORY OSOBNÍ

4.2.1 Hodnota metabolismu

Energetický výdej člověka $\dot{Q}_m$ [W], nebo-li hodnota metabolismu $\dot{q}_m$ [W.m⁻²], se skládá z vnitřní produkce tepla $\dot{Q}$ [W] a mechanické práce W [W]. Vnitřní produkce tepla je závislá na činnosti člověka. Člověk produkuje teplo i ve spánku a toto produkované teplo označujeme bazální metabolismus. Jedná se o největší část celodenního energetického výdeje, asi 60 až 70 %. Je to energie, která je potřebná pro zachování základních životních funkcí v naprostém duševním i tělesném klidu za normální teploty a vlhkosti. Tato hodnota je závislá na pohlaví, hmotnosti, výšce a věku. Roste s hmotností a výškou, jak ukazují vztahy (4.21), (4.22) a s přibývajícím věkem se snižuje. Ženy mají při stejné hmotnosti nižší energetickou spotřebu než muži. Hmotnost a výška lidského těla souvisí s jeho složením, s větším zastoupením tuku a menší svalovou hmotou u žen. Kromě těchto vlivů, které je možné dobře určit, ovlivňuje klidový energetický výdej i řada situací, které jsou těžko postižitelné. Bazální metabolismus lze přibližně vypočítat dle Harrisovy-Benedictovy formule. [3], [5], [48]

Pro muže platí (4.21) [3]

$$\dot{Q}_b = 66,4730 + (13,7516 \cdot m_c) + (5,0033 \cdot v_c) - (6,7550 \cdot a_c). \quad (4.21)$$

Pro ženy platí (4.22) [3]

$$\dot{Q}_b = 655,0955 + (9,5634 \cdot m_c) + (1,8496 \cdot v_c) - (4,6756 \cdot a_c). \quad (4.22)$$

kde $\dot{Q}_b$ je celkový bazálně metabolický obrat během 24 hodin [kcal],
 m_c hmotnost člověka [kg],
 v_c výška postavy člověka [cm],
 a_c věk člověka [roky].

Pro energetický výdej člověka platí vztah (4.23) [57]

$$\dot{Q}_m = \dot{Q} + W. \quad (4.23)$$

Vnější mechanickou účinnost člověka η [-] lze popsat vztahem (4.24) [57]

$$\eta = \frac{W}{\dot{Q}_m}. \quad (4.24)$$

Následující tabulka 4.1 uvádí hodnoty energetického výdeje pro různé lidské činnosti.

Tab. 4.1 Hustota tepelného toku produkovaná člověkem při různých činnostech [5]

Činnost	Měrný energetický výdej $\dot{q}_m$		Mechanická účinnost η
	[W.m ⁻²]	[met]	[-]
Klidné ležení	46	0,8	0
Sezení	58	1	0
Práce v sedě	70	1,2	0
Stání, lehká práce	93	1,6	0 - 0,1
Stání, střední práce	116	2	0,1 - 0,2
Chůze po rovině: 2 km/h	110	1,9	
3 km/h	140	2,4	
4 km/h	165	2,8	
5 km/h	200	3,4	
Těžká fyzická práce	235	4	0,1 - 0,25

Hodnota metabolismu $\dot{q}_m$ produkovaná lidským tělem se zjišťuje pomocí měření spotřeby kyslíku a produkce oxidu uhličitého a platí pro něj vztah (4.25) [5], [61]

$$\dot{Q}_m = \frac{352 \cdot (0,23 \cdot RQ + 0,77) \cdot V_{O_2}}{S}, \quad (4.25)$$

kde RQ je respirační koeficient, molekulový poměr vydechovaného oxidu uhličitého (V_{CO_2}) a vdechovaného kyslíku (V_{O_2}) [-],
 V_{O_2} objemové množství spotřebovaného kyslíku při teplotě 0 °C a tlaku 101,3 kPa [l.min⁻¹],
 S plocha lidského těla [m²].

Pro vyjádření hodnoty hustoty tepelného toku $\dot{q}_m$ (metabolismu) byla zavedena jednotka met. 1 met představuje metabolické teplo produkované člověkem při lehké práci (v sedě) vztažené na plochu člověka ($1,9 \text{ m}^2$), tedy $58,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$.

Hodnota koeficientu RQ závisí na činnosti člověka, jeho stravě a fyzické kondici. Pro běžného člověka při konání lehké práce v sedě ($M < 1,5$ met) je $RQ = 0,83$. V extrémních případech může nabývat hodnoty $0,7 < RQ < 1,0$. Při určení respiračního koeficientu s chybou 10 % dostaneme hodnotu metabolismu s chybou menší než 3 %.

Zdravý muž (20 let) může dosáhnout maxima $M = 12$ met. Se stoupajícím věkem tato hodnota klesá. Ve věku 70 let je maximum $M = 7$ met. Pro ženy platí hodnoty o zhruba 30 % nižší. Činnost člověka se skládá ze směsice různých činností, proto je potřeba počítat s průměrnou aktivitou pro danou činnost a ne s maximálními hodnotami. [5]

4.2.2 Tepelný odpor oděvu

Lidské tělo není schopno vyrovnat tepelné ztráty vlivem okolí, proto je zapotřebí jej chránit oděvem. Tepelný tok přenášený konvekcí $\dot{Q}_k$ [W] a sáláním $\dot{Q}_r$ [W] z povrchu oblečeného člověka prostupuje oděvem, což lze vyjádřit rovnicí (4.26) [5], [21], [48]

$$\dot{Q}_k + \dot{Q}_r = \frac{S \cdot (t_k - t_p)}{R_{cl}}, \quad (4.26)$$

kde t_k je střední teplota povrchu pokožky [$^{\circ}\text{C}$],
 t_p teplota vnějšího povrchu oděvu [$^{\circ}\text{C}$],
 S povrch těla [m^2],
 R_{cl} tepelný odpor oděvu [$\text{m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$].

Tepelný odpor oděvu závisí na jeho členitosti a počtu vrstev, ze kterých se skládá. Pro tepelný odpor oděvu se používá také bezrozměrná veličina I_{cl} definována vztahem (4.27) [21]

$$I_{cl} = \frac{R_{cl}}{0,155}, \quad (4.27)$$

pro níž se zavedlo jednotkové označení clo. 1 clo odpovídá tepelnému odporu $0,155 \text{ m}^2\cdot\text{K}\cdot\text{W}^{-1}$. Hodnoty tepelných odporů pro některé druhy oděvů jsou uvedeny v tabulkách 4.2 a 4.3.

Tab. 4.2 Tepelný odpor jednotlivých částí oblečení [4]

Popis oblečení	Tepelný odpor [clo]
Slipy	0,03
Kalhotky a podprsenka	0,03
Tričko s krátkým rukávem	0,09
Tričko s dlouhým rukávem	0,12
Košile s krátkým rukávem	0,15
Košile s dlouhým rukávem	0,25
Kalhoty normální	0,25
Lehká letní sukně	0,15
Svetr	0,28
Sako	0,35
Ponožky	0,02

Tab. 4.3 *Tepelný odpor typických kombinací oblečení (výběr)[4]*

Běžné denní oblečení	I_{cl}	
	[clo]	[m ² .K.W ⁻¹]
Kalhotky, tričko, lehké ponožky, sandály	0,3	0,05
Kalhotky, spodnička, punčochy, lehké šaty s rukávy, sandály	0,45	0,07
Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, ponožky, Polobotky	0,5	0,08
Kalhotky, punčochy, košile s krátkými rukávy, sukně, sandály	0,55	0,085
Spodky, košile, lehčí kalhoty, boty	0,6	0,095
Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty	0,7	0,11
Spodky, nátělník, košile, kalhoty, svetr s věčkem, ponožky, boty	0,95	0,145

5. KRITÉRIA TEPELNÉ POHODY

Pro hodnocení tepelné pohody je nejčastějším kritériem operativní teplota t_o [°C], pak předpověď středního tepelného pocitu PMV (*Predicted Mean Vote*), předpověď procentuálního podílu nespokojených PPD, obtěžování průvanem DR, ale i ekvivalentní teplota, efektivní teplota aj.

5.1 OPERATIVNÍ TEPLOTA

Operativní teplota t_o [°C] je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekci i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí. Pro operativní teplotu platí vztah (5.1) [15], [17], [25], [33], [63]

$$t_o = \frac{\alpha_k \cdot t_a + \alpha_r \cdot t_r}{\alpha_k + \alpha_r} = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r = t_r + A \cdot (t_a - t_r), \quad (5.1)$$

kde α_k je součinitel přestupu tepla konvekci [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 α_r součinitel přestupu tepla radiací [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$],
 t_a teplota vzduchu [°C],
 t_r střední radiační teplota [°C],
 A faktor poměru součinitelů přestupu tepla na povrchu oděvu [-].

Faktor A lze vyjádřit vztahem

$$A = \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \alpha_r} = \frac{\alpha_k}{\alpha}. \quad (5.2)$$

Poměr součinitelů přestupu tepla na povrchu oděvu, vyjádřený faktorem A , závisí na rychlosti proudění vzduchu kolem oděvu, na teplotě oděvu, na střední radiační teplotě a v případě volné konvekce také na teplotě vzduchu. Při zanedbání vlivu teplot, tedy s konstantní hodnotou α_r se počítá jen se závislostí na rychlosti proudění vzduchu. Pro faktor A dle ČSN ISO 7730 platí hodnoty uvedené v tabulce (5.1).

Tab.5.1 Hodnoty faktoru A dle normy ČSN ISO 7730

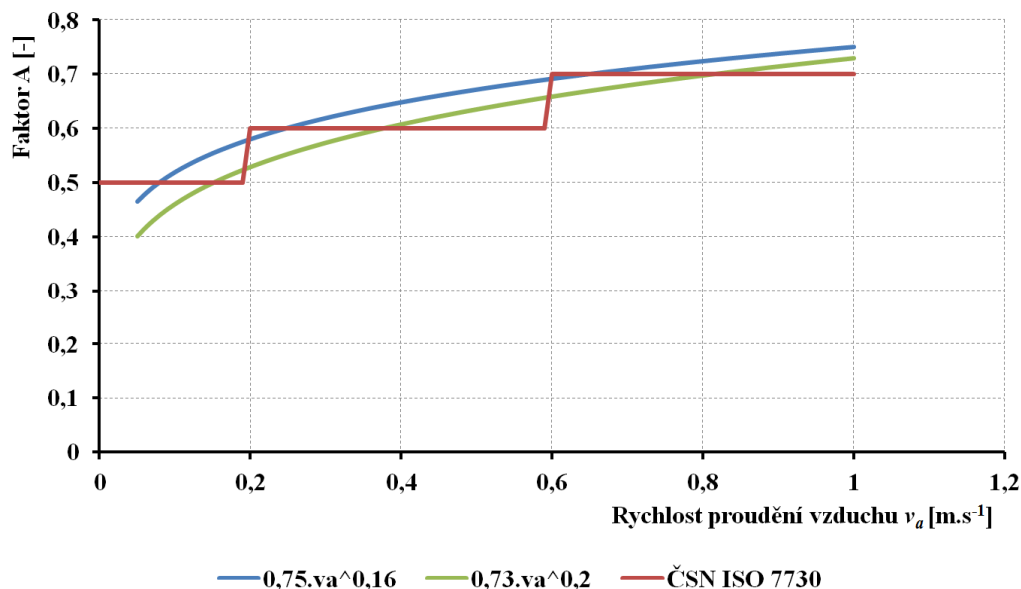
v_a ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	< 0,2	0,2 až 0,6	0,6 až 1
Faktor A	0,5	0,6	0,7

K výpočtům je vhodné závislost faktoru A vyjádřit analyticky. Na obrázku 5.1 jsou znázorněny tři závislosti. Červeně je vyobrazen požadavek normy. Další dvě křivky (modrá a zelená) jsou možné aproximace tohoto faktoru, které lze vyjádřit vztahy (5.3) a (5.4) [15]

$$A = 0,75 \cdot v_a^{0,16}, \quad (5.3)$$

$$A = 0,73 \cdot v_a^{0,2}. \quad (5.4)$$

Pro rychlosti proudění vzduchu do $0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ je vhodné počítat s konstantní hodnotou A , protože v této oblasti převažuje přirozená konvekce nad vynucenou a pro běžný rozsah teplot je $\alpha_k = 3,6$. [15]



Obr.5.1 Faktor A ve vztahu pro operativní teplotu dle normy a možných aproximací [15]

Norma ČSN ISO 7730 stanovuje, že operativní teplota má být vyhodnocena z měřených faktorů prostředí. Operativní teplota však přesto bývá měřena pomocí sond eliptického tvaru, jak je uvedeno na obrázku 5.2. V tomto případě se jedná o sondu od firmy Dantec Dynamics. Průměr senzoru je 56 mm a délka 160 mm. Snímacím elementem, který měří teplotu povrchu sondy, je niklový senzor. Velikost sondy je zvolena tak, aby byla poměrově shodná s lidským tělem a měla podobné ztráty jak zářením, tak i konvekcí.



Obr.5.2 Eliptická sonda operativní teploty od firmy Dantec Dynamics [9]

5.2 INDEX PMV

PMV je ukazatel, který předpovídá střední tepelný pocit velké skupiny osob. Lze ho stanovit, jestliže se odhadne hodnota metabolismu (energetický výdej), hodnota tepelného odporu oděvu a změří se již zmíněné faktory prostředí. Z řešení tepelné bilance je odvozena rovnice pro výpočet středního tepelného pocitu PMV (5.5) [7]

$$\begin{aligned}
PMV &= (0,303 \cdot e^{-0,036 M} + 0,028) \cdot \\
&\cdot [(M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot \\
&\cdot [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_a) - \\
&- 0,0014 \cdot M (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \\
&\cdot [(t_p + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \alpha_k (t_p - t_a)],
\end{aligned} \tag{5.5}$$

když platí

$$\begin{aligned}
t_p &= 35,7 - 0,028 (M - W) - R_{cl} \{ 3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} \cdot \\
&\cdot [(t_p + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \alpha_k (t_p - t_a) \},
\end{aligned} \tag{5.6}$$

$$\alpha_k = \begin{cases} 2,38 \cdot |t_p + t_a|^{0,25} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_p + t_a|^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_a} \\ 12,1 \sqrt{v_a} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_p + t_a|^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_a}, \end{cases} \tag{5.7}$$

$$f_{cl} = \begin{cases} 1,00 + 1,290 R_{cl} & \text{pro } R_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1} \\ 1,05 + 0,645 R_{cl} & \text{pro } R_{cl} > 0,078 \text{ m}^2 \cdot K \cdot W^{-1}, \end{cases} \tag{5.8}$$

kde

PMV	je předpověď středního tepelného pocitu [-],
M	energetický výdej povrchu lidského těla [$W \cdot m^{-2}$],
W	užitečný mechanický výkon, tj. vnější práce, (vztaženo k ploše povrchu lidského těla) [$W \cdot m^{-2}$],
R_{cl}	tepelný odpor oděvu [$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$],
f_{cl}	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka [-],
t_a	teplota vzduchu [$^{\circ}C$],
t_r	střední radiační teplota [$^{\circ}C$],
v_{ar}	relativní rychlost proudění vzduchu vůči lidskému tělu [$m \cdot s^{-1}$],
p_a	parciální tlak vodní páry [Pa],
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí [$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$],
t_p	teplota povrchu oděvu [$^{\circ}C$].

Výsledný střední tepelný pocit je hodnocen stupnicí PMV , kde +3 je horko, 0 neutrálně (tepelná pohoda) a -3 zima (Tab. 5.2).

Tab.5.2 Stupnice hodnocení středního tepelného pocitu PMV [7]

-3	-2	-1	0	1	2	3
zima	chladno	mírně chladno	neutrálně	mírně teplo	teplo	horko

PMV je počítáno z velkého množství parametrů, ale protože jde o částečně empirický vztah založený na odpovědích lidí, platí v omezeném rozsahu hodnot. Ukazatel dává relevantní výsledky, jen pokud se hodnoty PMV pohybují v rozmezí -2 až +2. Zadávané hodnoty jsou pak v následujícím rozmezí:

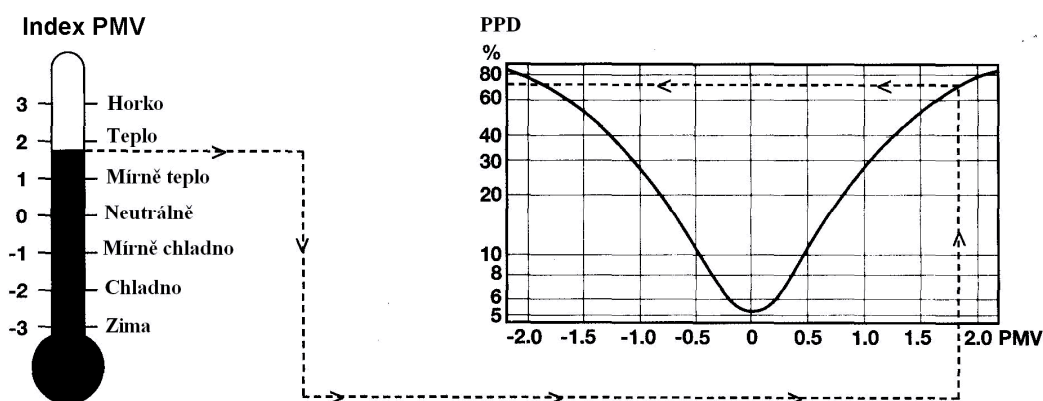
M	46 W·m ⁻² až 232 W·m ⁻² (0,8 met až 4 met)
I_{cl}	0 m ² ·K·W ⁻¹ až 0,310 m ² ·K·W ⁻¹ (0 clo až 2 clo)
t_a	10 °C až 30 °C
t_r	10 °C až 40 °C
pa	0 Pa až 2700 Pa
v_a	0 m·s ⁻¹ až 1 m·s ⁻¹

5.3 INDEX PPD

Vzhledem k individuálním odchylkám fyziologických funkcí jednotlivců nelze zajistit pocit pohody všem lidem v daném prostoru. Vždy bude asi 5 % nespokojených, kteří pociťují tepelnou nepohodu tzv. diskomfort. Procentuální podíl nespokojených PPD se vyhodnocuje na základě hodnoty středního tepelného pocitu PMV podle vztahu (5.9) [7]

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-(0,03353 \cdot PMV^4 + 0,2179 \cdot PMV^2)} \quad (5.9)$$

Graficky je způsob stanovení PPD znázorněn na obrázku 5.3.



Obr. 5.3 Předpověď procentuálního podílu nespokojených [7]

5.4 INDEX DR

Stupeň obtěžování průvanem DR je samostatný ukazatel pro posuzování parametrů prostředí podle normy [7] a vyjadřuje procentuální podíl osob, u kterých převládá pocit obtěžování průvanem. DR lze vypočítat podle vztahu (5.10) [7]

$$DR = (34 - t_a) \cdot (v_a - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot v_a \cdot Tu + 3,14), \quad (5.10)$$

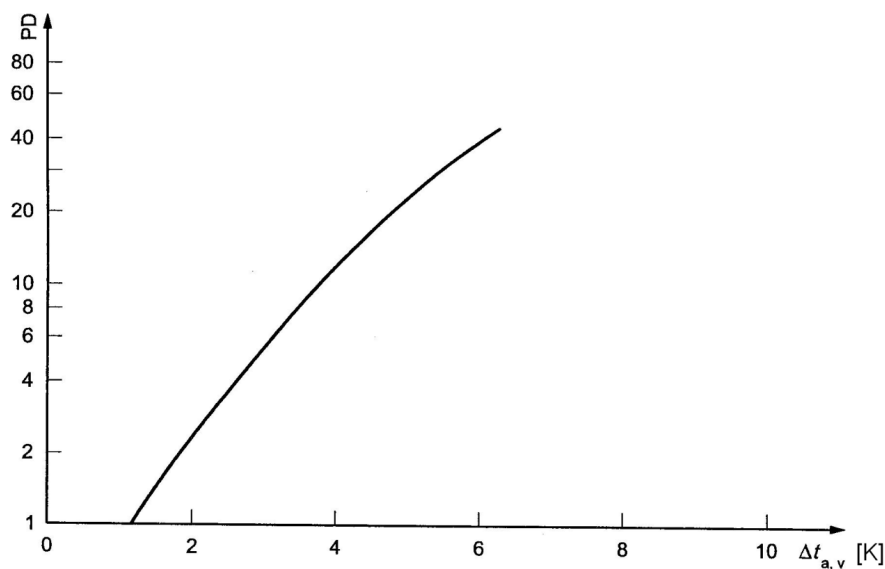
kde t_a je teplota vzduchu [°C],
 v_a rychlost proudění vzduchu [m·s⁻¹],
 Tu místní intenzita turbulence [%].

5.5 INDEX PD

Vysoký vertikální rozdíl teplot vzduchu mezi hlavou a kotníky může způsobit diskomfort. Obrázek 5.4 ukazuje procento nespokojených lidí PD s vertikálním rozložením teplot jako funkci vertikálního rozdílu teplot mezi hlavou a kotníky. Obrázek platí pro rostoucí teploty. Při klesajících teplotách jsou lidé méně citliví. PD se určí pomocí rovnice (5.11) [7]

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856 \cdot \Delta t_{a,v})} \quad \text{pro } \Delta t_{a,v} < 8 \text{ K}, \quad (5.11)$$

kde $\Delta t_{a,v}$ je vertikální rozdíl teploty vzduchu mezi hlavou a nohama (pod kotníky) [K].



Obr. 5.4 Místní diskomfort způsobený vertikálním rozdílem teploty vzduchu [7]

6. ZHODNOCENÍ SOUČASNÉHO STAVU

Člověk si v posledních letech zvykl na určitý standard tepelné pohody – tepelného komfortu. Z tohoto důvodu vzrostly náklady na energie a je nezbytně nutné začít se zabývat myšlenkou, jak by bylo možné zajistit člověku tepelnou pohodu v uzavřených prostorách a zároveň snížit náklady na spotřebu energií. Tyto požadavky jsou sice protichůdné, ale jsme schopni pomocí měření a dnešních nástrojů automatizace a regulace snížit náklady na spotřebu energií pomocí nových „objektivních“ snímačů, přístrojů, zařízení a postupů a zároveň zajistit tepelný komfort pro člověka. [10]

6.1 PLATNÁ LEGISLATIVA PRO HODNOCENÍ TEPELNÉHO MIKROKLIMATU

V této kapitole jsou uvedeny důležité základní dokumenty týkající se hodnocení tepelné pohody mírných tepelných prostředí. Dále se touto problematikou zabývá např. [22], [23].

6.1.1 Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.

Nařízením vlády České republiky ze dne 12. prosince 2007 byly stanoveny podmínky ochrany zdraví zaměstnanců při práci. Toto nařízení vlády publikované ve Sbírce zákonů č. 361/2007 kromě jiného stanovuje hygienické požadavky na pracovní prostředí a pracoviště. Příloha č.1 v tomto nařízení udává přípustné hodnoty mikroklimatických podmínek (Tab. 6.1). [34], [41]

Tab. 6.1 Přípustné hodnoty mikroklimatických podmínek [41]

Třída práce	M [W.m ⁻²]	Operativní teplota t _o [°C]						v _a [m.s ⁻¹]	φ [%]	SR t _o max ***	
		t _o min	t _o opt min		t _o opt	t _o opt max				t _o max	[g.h ⁻¹ .m ⁻²]
											[g.sm ⁻¹ .m ⁻²]
I	80	19,5	A	21,0	22,0	A	25,5	28,0	0,1-0,2	30-70	44
			B	20,5		B	26,5				354
			C	19,5		C	28,0				
IIa	81-105	15,5	A	17,5	20,0	A	23,5	27,0	0,1-0,2	30-70	83
			B	16,5		B	25,0				664
			C	15,5		C	26,0				
IIb	106-130	13,0	A	15,5	18,0	A	21,0	26,0	0,2-0,3	30-70	110
			B	14,5		B	22,5				880
			C	13,0		C	24,5				
IIIa	131-160*	10,0	A	12,0	15,0	A	18,5	26,0	0,2-0,3	30-70	158
			B	11,0		B	20,0				1274
			C	10,0		C	22,0				
IIIb	161-200**	10,0	A	10,0	12,5	A	16,0	26,0	0,2-0,3	30-70	240
			B	10,0		B	17,5				1614
			C	10,0		C	20,0				

Vysvětlivky k tabulce 6.1:

t_o	operativní teplota stanovená pro 60 % relativní vlhkost vzduchu
$t_{o \min}$	operativní teplota platná pro tepelný odpor oděvu 1 clo
$t_{o \text{ opt}}$	$t_{o \text{ opt min}}, t_{o \text{ opt max}}$ operativní teplota platná pro tepelný odpor oděvu 0,75 clo
$t_{o \max}$	operativní teplota platná pro tepelný odpor oděvu 0,5
v_a	rychlost proudění vzduchu
φ	relativní vlhkost vzduchu
*	z hlediska energetického výdeje práce není celosměnově únosná pro ženy
**	z hlediska energetického výdeje práce není celosměnově úměrná pro ženy i muže
***	$SR t_{o \max}$ ztráta vody potem a dýcháním při operativní teplotě $t_{o \max}$ se vypočítává jen pro kategorii C; ztráta uvedená pro danou třídu se násobí průměrným povrchem těla pro ženy 1,8 m ² , nebo průměrným povrchem těla pro muže 2,0 m ² (např. pro muže pracujícího ve třídě IIb 880 x 2,0=1760 ml/ 480 minut)
A	platí pro klimatizované prostory (odpovídá 15% nespokojených osob)
B	platí pro prostory s hybridním ventilačním systémem (odpovídá 20 % nespokojených osob)
C	platí pro přirozeně větrané prostory (odpovídá 30 % nespokojených osob)

Na pracovištích, kde jsou třídy práce I a IIa musí být ještě dodrženy tyto požadavky:

- Rozdíly teplot vzduchu mezi úrovní hlavy a kotníků nesmí být větší jak 3 °C.
- Asymetrie radiační teploty od oken nebo jiných chladných svislých povrchů nesmí být větší než 10 °C.
- Asymetrie radiační teploty od teplého stropu nebo jiných vodorovných povrchů nesmí být větší než 5 °C.
- Intenzita osálení hlav nesmí být větší než 200 W.m⁻².

Třídy práce jsou definovány v nařízení vlády. Uvedené přípustné hodnoty smí být překročeny za mimořádně teplých dnů, tj. když venkovní teplota dosáhne hodnoty vyšší než 30 °C. [41]

6.1.2 Norma ČSN ISO 7730

Norma ČSN ISO 7730 – Ergonomie tepelného prostředí – analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů *PMV* a *PPD* a kritéria místního tepelného komfortu má dva cíle:

- Stanovit metodu předpovědi tepelného pocitu a stupně nepohody (tepelné nespokojenosti) lidí vystavených mírnému tepelnému prostředí.
- Popsat podmínky tepelného mikroklimatu přijatelné pro pohodu.

Norma platí pro zdravé muže a ženy. U lidí nemocných nebo u lidí s tělesným postižením může docházet k odchylkám. Normu je možno použít pro novostavby, existující budovy, pro pracovní prostředí a pro jakýkoliv jiný druh mírného teplotního prostředí. Norma zavádí indexy *PMV* (předpověď středního tepelného pocitu) a *PPD* (předpokládané procento nespokojených) a *PD* (procento nespokojených s vertikálním rozdílem teplot vzduchu).

Tab. 6.2 Kategorie tepelného prostředí [7]

Kategorie	Tepelný stav těla jako celku		Místní diskomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD %		
				vertikálním rozdílem teploty vzduchu	Způsobený teplou nebo chladnou podlahou	asymetrií radiace
A	< 6	$-0,2 < PMV < 0,2$	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	$-0,5 < PMV < 0,5$	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	$-0,7 < PMV < 0,7$	< 30	< 10	< 15	< 10

Tab. 6.3 Příklad projektového kritéria pro prostory v různých typech budov [7]

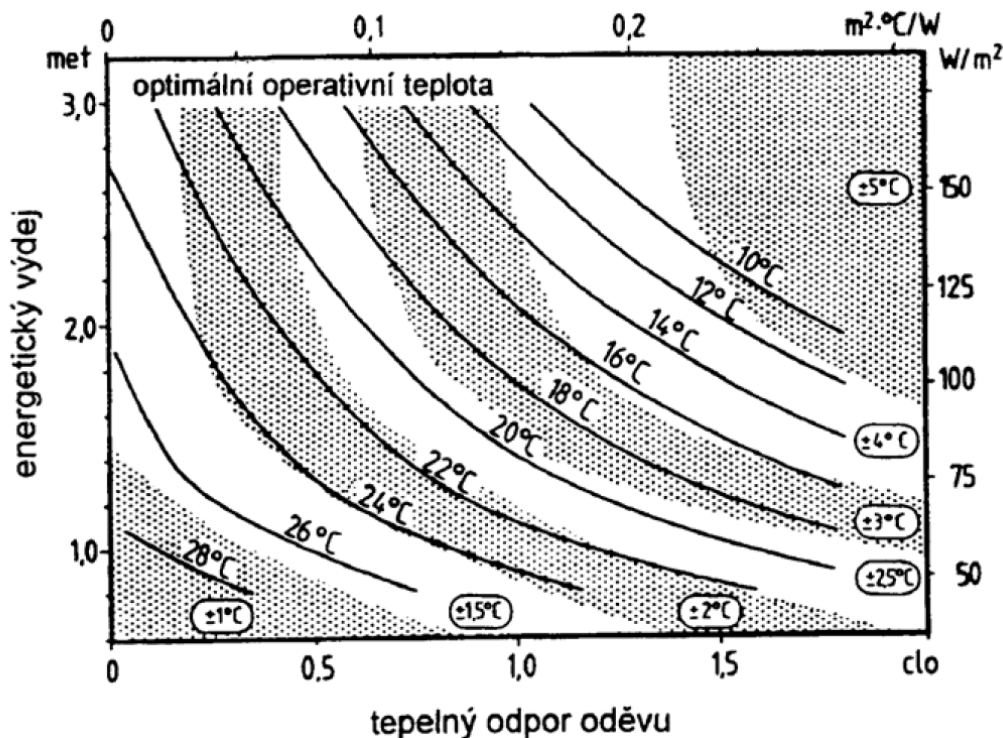
Typ budovy nebo prostoru	Čin- nost $W \cdot m^{-2}$	Katego- rie	Operativní teplota		Maximální střední rychlost proudění vzduchu	
			[°C]		[m.s ⁻¹]	
			Léto období pro ochlazování	Zima topná sezóna	Léto období pro ochlazování	Zima topná sezóna
Samostatná kancelář	70	A	$24,5 \pm 1,0$	$22,0 \pm 1,0$	0,12	0,1
Venkovní kancelář						
Zasedací místnost		B	$24,5 \pm 1,5$	$22,0 \pm 2,0$	0,19	0,16
Posluchárna						
Kavárna nebo restaurace		C	$24,5 \pm 2,5$	$22,0 \pm 3,0$	0,24	0,21
Učebna						
Mateřská školka	81	A	$23,5 \pm 1,0$	$20,0 \pm 1,0$	0,11	0,1
		B	$23,5 \pm 2,0$	$22,0 \pm 2,5$	0,18	0,15
		C	$23,5 \pm 2,5$	$22,0 \pm 3,5$	0,23	0,19
Obchodní středisko	93	A	$23,0 \pm 1,0$	$19,0 \pm 1,5$	0,16	0,13
		B	$23,0 \pm 2,0$	$19,0 \pm 3,0$	0,2	0,15
		C	$23,0 \pm 3,0$	$19,0 \pm 4,0$	0,23	0,18

Norma dále rozděluje prostory do třech kategorií A, B a C, kterým odpovídají následující kritéria (Tab. 6.2). Ověření, zda *PMV* spadá například do kategorie A může být vzhledem k určení vstupních parametrů komplikované, proto může být vhodné k tomuto účelu použít ekvivalentní rozsah operativní teploty. Jedná se o stanovení rozsahu operativní teploty pro dodržení rozsahu *PMV*. V mírných prostředích nemá relativní

vlhkost vzduchu výrazný vliv na tepelný pocit. Nárůstu relativní vlhkosti o 10 % odpovídá zvýšení operativní teploty o 0,3 °C.

Jak již bylo řečeno, norma zavádí tři kategorie tepelného prostředí. Tabulka 6.3 ukazuje příklady budov a místností, které jsou takto rozděleny. Je zde stanovena mez operativní teploty pro období léta a zimy. Pro každou místnost je také stanovena hodnota typické činnosti člověka M , vyjádřená hustotou uvolněného metabolického tepelného toku.

Optimální index PMV ($PMV = 0$), nebo-li optimální operativní teplotu, lze vyhledat také v grafu na obrázku 6.4, který ukazuje optimální operativní teplotu jako funkci činnosti člověka M a odporu oděvu. Rozsah parametrů místního tepelného diskomfortu platí pro kategorii B ($PPD < 10\%$). [7]



Obr. 6.4 Optimální operativní teploty (odpovídající $PMV = 0$) jako funkce tělesné aktivity a oděvu [7]

6.1.3 Norma ČSN ISO 7726

Norma ČSN ISO 7726 – *Tepelné prostředí: Přístroje a metody měření fyzikálních veličin* je určena k analýze tepelného působení prostředí. Tato norma obsahuje

- popis fyzikálních veličin ovlivňující tepelný stav prostředí,
- specifikaci měřicích přístrojů,
- způsoby měření jednotlivých fyzikálních veličin.

K měření je možno používat jakékoliv přístroje, které dosahují přesnosti uvedené v této normě.

6.2 ZAŘÍZENÍ PRO HODNOCENÍ VNITŘNÍHO MIKROKLIMATU

Pro hodnocení tepelného mikroklimatu lze v současné době najít na trhu několik systémů. Na obrázku 6.5 je zobrazen „datalogger“ firmy LumaSense Technologies, ke kterému je možno připojit všechny potřebné snímače pro hodnocení tepelného komfortu. Tento přístroj se připojuje k počítači a s dodávaným softwarem umožňuje zobrazovat průběhy naměřených veličin a vyhodnocený tepelný stav v měřeném prostředí. Nevýhodou

takových to zařízení je jejich cena. Samotný „datalogger“ spolu se snímači pro hodnocení tepelné pohody stojí okolo půl miliónu korun. Tyto přístroje se spíše používají pro výzkum a laboratorní měření, popřípadě pro jednorázová měření v ověřovaných prostorech.



Obr. 6.5 Souprava pro hodnocení vnitřního mikroklimatu od firmy LumaSense Technologies [29]

Dále je možno zmínit dánskou firmu DantecDynamics, která nabízí zařízení pro hodnocení tepelného stavu prostředí zvané ComfortSense. Jedná se o podobnou koncepci jako v případě zařízení od firmy LumaSense. Podoba zařízení je vyobrazena na obrázku 6.6.



Obr. 6.6 Systém pro hodnocení vnitřního klimatu od dánské firmy DantecDynamics (vlevo měřicí sondy, vpravo vyhodnocovací zařízení)[9]

Na obrázku 6.7 je vyobrazena souprava ALMEMO od firmy Ahlborn. Samotný přístroj je menší a umožňuje zobrazovat naměřené hodnoty přímo na displeji. Samozřejmostí je i možnost připojení k PC.



Obr. 6.7 Souprava pro hodnocení vnitřního klimatu ALMEMO od firmy AHLBORN měřicí a regulační technika spol. s r.o. [1]

Dalším přístrojem je Testo 480 (Obr. 6.8) od firmy TESTO s.r.o. Jedná se o nový měřicí přístroj pro efektivní analýzu klimatizačních zařízení a pohody prostředí. Jeho řešení je podobné přístroji od firmy Ahlborn. Měřicí přístroj má podobu digitálního multimetru se zobrazováním dat přímo na displeji. K přístroji je možno připojit veškeré potřebné sondy a samozřejmě je možnost připojení přístroje k počítači a pomocí softwaru EasyClimate vyhodnocovat naměřená data.



Obr. 6.8 Souprava pro hodnocení vnitřního klimatu od firmy Testo s.r.o. [58]

7. VHODNÉ SNÍMAČE PRO MĚŘENÍ PARAMETRŮ PROSTŘEDÍ

Tato kapitola je zaměřena na průzkum trhu, od něhož se odvíjí volba snímačů pro každou měřenou veličinu. Jednotlivá řešení budou následně popsána.

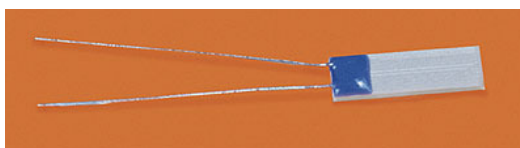
7.1 MĚŘENÍ TEPLOTY

Pro měření teploty vzduchu lze v dnešní době pořídit celou řadu snímačů pracujících na různých principech. Mohou to být snímače odporové (kovové, polovodičové), termočláňkové senzory nebo snímače teploty, které ve svém pouzdru mají zabudovány obvody pro zpracování signálů v případě teplotních snímačů s analogovým výstupem nebo dále pak v pouzdru obsahují i komunikační protokol, v případě teplotních senzorů s číslicovým výstupem. V této kapitole jsou popsány snímače vhodné pro měření teploty vzduchu pro hodnocení tepelného stavu prostředí.

7.1.1 Platinový snímač Pt 100

Platinové snímače Pt100 jsou nejrozšířenějšími odporovými snímači na trhu. Lze je pořídit v různých provedeních. Obrázek 7.1 ukazuje miniaturní senzor Pt100 od firmy Omegaeng. Jedná se o plochý senzor vyrobený tenkovrstvou technologií. Na vysoce tepelně vodivostní keramické podložce je nanášena tenká kovová vrstva platiny.

Při výběru vhodného měřicího elementu pro měření teploty vzduchu je potřeba dbát na rozměry snímače, které by měly být co nejmenší z důvodů jeho rychlé odezvy.

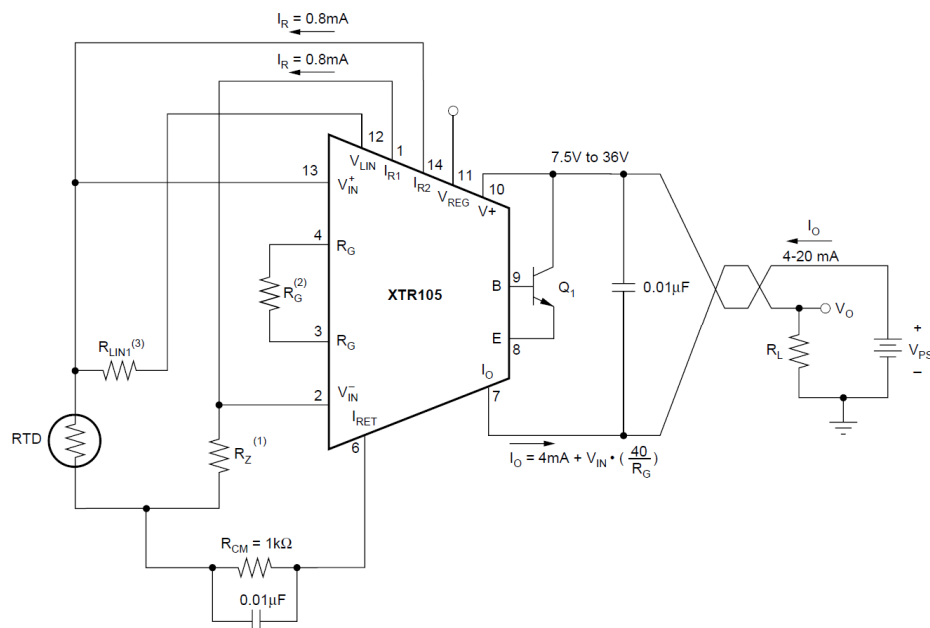


Obr. 7.1 Miniaturní snímač Pt100 od firmy Omegaeng [46]

Samotný element Pt100 není možné připojit k mikrokontroléru přímo, ale je nutno převést elektrický odpor na napětí nebo proud. Řešením může být řada integrovaných obvodů řady XTR od firmy Burr-Brown, konkrétně XTR105 pracující jako kompletní RTD proudový budič s linearizujícími vlastnostmi. Integrovaný obvod (dále IO) je zjednodušeně tvořen dvěma operačními zesilovači (dále OZ) se zpětnými vazbami a jedním proudovým zdrojem obsahujícím OZ. Pracuje na principu derivace vstupního napětí a doporučuje se pro linearizování velké škály senzorů, a to nejen teplotních, ale i tlakových, průtokových aj. Dle provozních podmínek se tento IO dodává v keramickém nebo plastovém pouzdře. [56]

Do obvodu se přivádí dva signály. Napětí, měnící se v čase, které odpovídá měřené teplotě a referenční napětí. IO pracuje jako rozdílový zesilovač, který tato dvě napětí nejprve vzájemně odečte a pak zderivuje. XTR 105 navíc funguje jako převodník U/I a na výstupu získáme proud závislý na teplotě. Schéma zapojení tohoto IO je na obrázku 7.2.

Integrované obvody řady XTR vynikají velmi malými rozměry, offsetem a driftem, excelentní linearitou, danou přesnými interními zdroji.



Obr. 7.2 Zapojení Pt100 k převodníku XTR105[60]

7.1.2 Teplotní senzor LM35CZ

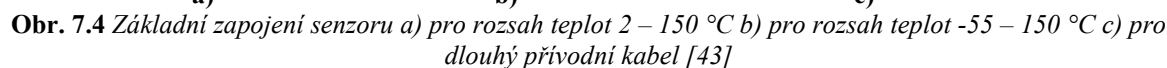
Teplotní senzor LM35 je velmi přesný integrovaný analogový senzor, jehož výstupní napětí je lineárně úměrné teplotě. Vyrábí se v pouzdrech TO-46, TO-92, TO220 a SO-8. Nejlepší vlastnosti má senzor v pouzdru TO-46. Jedná se o metalické pouzdro (Obr. 7.3) se třemi vývody.



Obr. 7.3 Teplotní senzor LM35 v pouzdru TO-46 s analogovým výstupem [43]

Teplotní závislost na výstupním napětí je $10 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, a proto senzor nepotřebuje externí kalibraci, což je jeho výhoda. Nelinearita je maximálně $0,25 \text{ }^\circ\text{C}$ a měřicí rozsah snímače je $-55 \text{ }^\circ\text{C}$ až $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Snímač je možno napájet napětím v rozsahu 4 V až 30 V . Proudový odběr senzoru je pouhých $60 \text{ }\mu\text{A}$, což způsobuje velmi malé zahřívání senzoru. Na obrázku 7.4 jsou tři způsoby zapojení senzoru. První zapojení umožňuje měřit teplotu vzduchu v rozsahu 0 až $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Tento rozsah měření teploty vzduchu je dostatečný pro hodnocení tepelného stavu prostředí v uzavřených místnostech. Druhá varianta umožňuje měřit v plném rozsahu senzoru od -55 do $150 \text{ }^\circ\text{C}$. Nevýhodou tohoto rozsahu je nutnost přivedení kladného i záporného napájecího napětí. Poslední varianta zapojení se využívá v případě, že senzor LM35 je propojen s vyhodnocovací jednotkou delším kabelem. Použitý kabel by v tomto případě měl být stíněný, přičemž stínění je potřeba připojit na nulový potenciál.

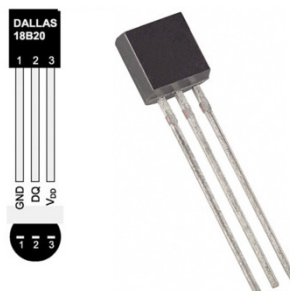
Požadavkům normy ČSN ISO 7726 na přesnost snímače vyhovuje typ LM35CAH. Tento senzor je v metalickém pouzdru TO-46 s dobrou časovou konstantou a přesnost měření je $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Pro připojení senzoru k mikropočesoru je nutné převést analogový signál na digitální pomocí A/D převodníku, který zvyšuje cenu tohoto řešení.



7.1.3 Teplotní senzor DS18B20

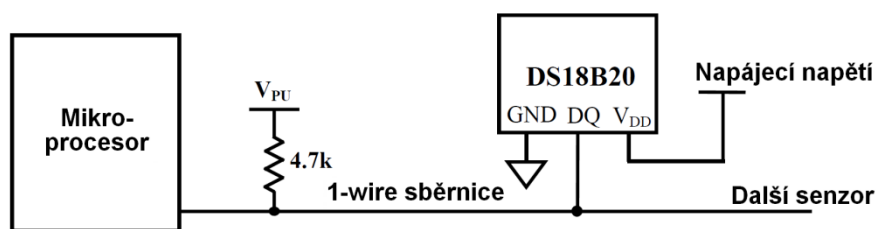
Teplotní senzory s digitálním výstupem jsou zařízení, která mají ve svém pouzdru implementovány kromě měřicího čidla, také obvody pro úpravu a zpracování signálu a dále disponují komunikací. Nejčastěji se využívá *1-wire*, *2-wire*, *I²C*, *SPI* apod.

Zástupcem z této kategorie snímačů je teplotní senzor DS18B20 (Obr. 7.5). Je to velmi snadno použitelný snímač a teplotu lze přečíst přímo ve stupních Celsia s přesností $\pm 0,5$ °C. Teplotní rozsah senzoru je od -40 °C až 125 °C. Senzor je vybaven až 12-ti bitovým A/D převodníkem, pro který je rozlišení senzoru 0,0625 °C. Dodává se v pouzdru TO-92, které se běžně používá například pro tranzistory.



Obr. 7.5 Digitální teplotní senzor DS18B20s digitálním výstupem [36]

DS18B20 komunikuje pomocí One-Wire sběrnice, která je mimořádně jednoduchá. Veškerá komunikace se odehrává po jediném vodiči a odesílání i příjem dat řídí mikrokontrolér. Navíc díky navrženému způsobu komunikace je odesílání i příjem asynchronní a mezi jednotlivými bity lze udělat libovolně dlouhou pauzu na další výpočty či zpracování přijatých dat. Protokol této sběrnice umožňuje připojit na jeden vstup mikrokontroléru více než jeden senzor, protože jednotlivé senzory se od sebe odlišují osmi bitovým ROM kódem vysílaným v úvodu komunikace. Způsob zapojení senzoru k mikrokontroléru je na obrázku 7.6.

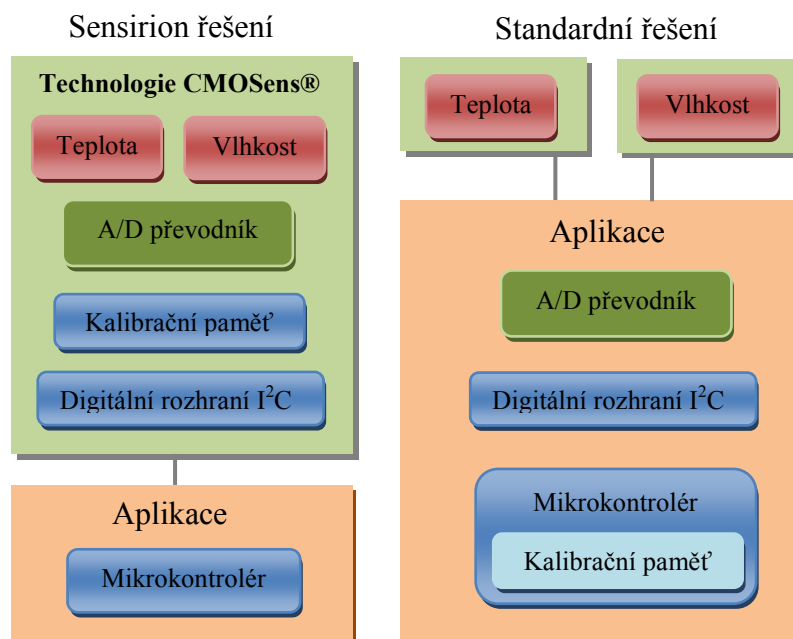


Obr. 7.6 Zapojení senzoru DS18B20 k mikrokontroléru [36]

7.1.4 Senzor SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu

Dalším teplotním senzorem s digitálním výstupem je senzor SHT25 od firmy Sensirion. Jedná se o duální senzor, který má ve svém pouzdru implementován nejen snímač teploty, ale i snímač vlhkosti. Výhodou tohoto řešení je měření potřebných veličin pomocí jedné součástky. Snímač je vyroben technologií CMOSens® (Obr. 7.7) a umožňuje na jednom čipu umístit samotný senzor v kombinaci s obvody pro analogové nebo digitální zpracování signálů. Technologie CMOSens® je zárukou vysoké přesnosti, spolehlivosti a funkčnosti vedle efektivnosti nákladů.

Měření vlhkosti je v tomto senzoru realizováno kapacitním čidlem. Snímání teploty je realizováno na band-gap PTAT principu, který zajišťuje velice lineární výstup měřené teploty a stabilitu údajů. Rozlišení tohoto senzoru je 12 bitů pro údaj o vlhkosti a 14 bitů pro údaj o teplotě. [53]



Obr. 7.7 Blokové schéma uspořádání senzoru SHT25a standardní řešení senzoru [55]

Výhody tohoto uspořádání jsou:

- Měření relativní vlhkosti a teploty v jednom komponentu.
- Individuální kalibrace v precizní vlhkostní komoře.
- Extrémně kompaktní rozměry 3 x 3 x 1,1 mm.
- Digitální výstup s I²C rozhraním (Hold/No Hold Master).
- Vynikající spolehlivost a dlouhodobá stabilita.
- Rozlišení 12 bitů pro relativní vlhkost a 14 bitů pro teplotu.
- Měřicí rozsah 0-100 % RV, -40 až +125 °C.
- Průměrný příkon je pouze 3,2 μ W při 1 měření za sekundu/ 8 bit.
- Velká odolnost vůči externímu rušení (EMC).
- SMT pouzdro DFN3-0, pájitelné reflow procesem.

Základní technické parametry senzoru:

Měření teploty vzduchu

Teplotní rozsah	-40 °C až 125 °C
Rozlišení	0,01 °C

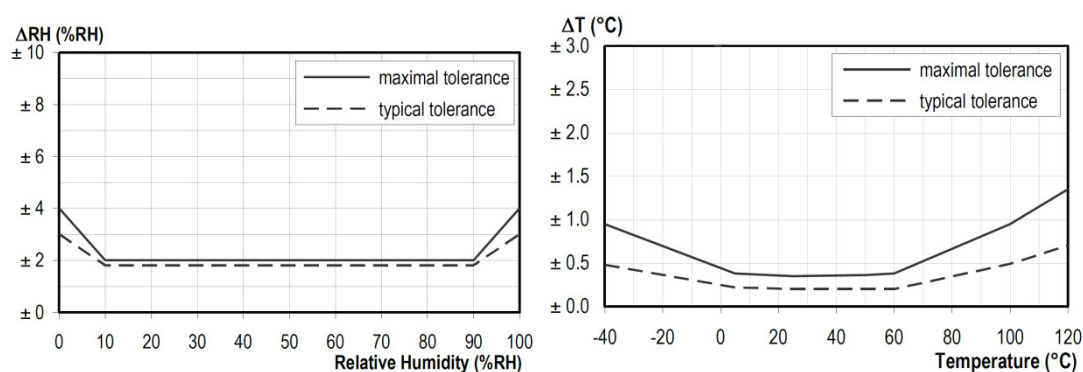
Přesnost	0,2 °C (více Obr. 7.8)
Opakovatelnost	0,1 °C
Časová konstanta	5 s

Měření relativní vlhkosti vzduchu

Rozsah měřené vlhkosti	0 % až 100 %
Rozlišení	0,04 %
Přesnost	1,8 % (více Obr. 7.8)
Opakovatelnost	0,1 %
Hystereze	1 %
Časová konstanta	8 s

Elektrické parametry senzoru

Napájecí napětí	2,1 V až 3,6 V
Spotřeba	300 μ A
Komunikace	I ² C



Obr. 7.8 Přesnost snímače SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu [53]

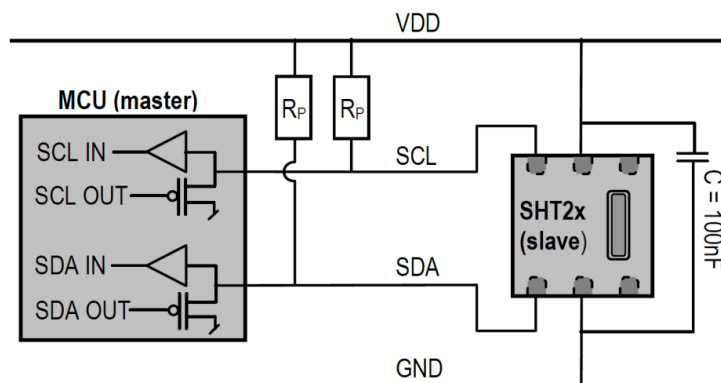
Způsob zapojení senzoru SHT25 k mikroprocesoru je zobrazen na obrázku 7.9. Zapojení je velice jednoduché a nejsou potřeba žádné podpůrné obvody. Pouze je nutné linky SDA a SCL připojit na napájecí napětí přes odpor o velikosti 10 k Ω a co nejbližší k senzoru připojit filtrační kondenzátor o velikosti 100 nF. Význam jednotlivých pinů uvádí tabulka 7.1

Tab. 7.1 Zapojení vývodů snímače SHT25 [53]

PIN	JMÉNO	KOMENTÁŘ	
1	SDA	Sériová data (obousměrně)	
2	GND	Zem	
3,4	NC	Není zapojeno	
5	VDD	Napájecí napětí	
6	SCL	Sériový hodinový signál (obousměrně)	

Komunikace se senzorem probíhá následujícím způsobem. Po odeslání start podmínky na sběrnici I²C zašle mikroprocesor adresu senzoru, která se skládá ze sedmi bitů a je dána výrobcem. Pro snímač SHT25 je adresa 1000000. Osmým bitem je směr komunikace. Pro zápis do registru snímače se jedná o log. 0 a pro čtení z registru snímače je to log. 1. Snímač odešle mikroprocesoru potvrzovací bit ACK o správném obdržení adresy. Dále mikroprocesor odešle senzoru příkaz dle tabulky 7.2. V případě, že příkazem

je měření dané veličiny, lze snímačem komunikovat ve dvou módech *hold master* nebo *no hold master* (Obr. 7.10). V režimu *hold master* je linka SCL blokována senzorem v průběhu procesu měření. Tímto snímač donutí mikroprocesor čekat na uvolnění této linky. Po dokončení měření senzor SHT25 linku uvolní a předá data mikroprocesoru. Ve druhém módu *no hold master* mikroprocesor zahájí komunikaci se senzorem a zadá mu příslušnou instrukci z tabulky 7.2. V průběhu procesu měření je možné, aby mikroprocesor komunikoval s dalšími zařízeními, protože linka SCL je senzorem SHT25 uvolněna.



Obr. 7.9 Zapojení snímače k mikroprocesoru [53]

Tab. 7.2 Příkazy pro snímač sht25 [53]

Příkaz	Komentář	Adresa
Měření teploty	hold master	11100011
Měření vlhkosti	hold master	11100101
Měření teploty	no hold master	11110011
Měření vlhkosti	no hold master	11110101
Zápis do registru		11100110
Čtení registru		11100111
Reset senzoru		11111110

Po ukončení komunikace se snímačem je nutné obdržená data přepočítat na měřenou fyzikální veličinu, podle následujících vztahů (7.1), (7.2). Pro teplotu vzduchu platí (7.1) [53]

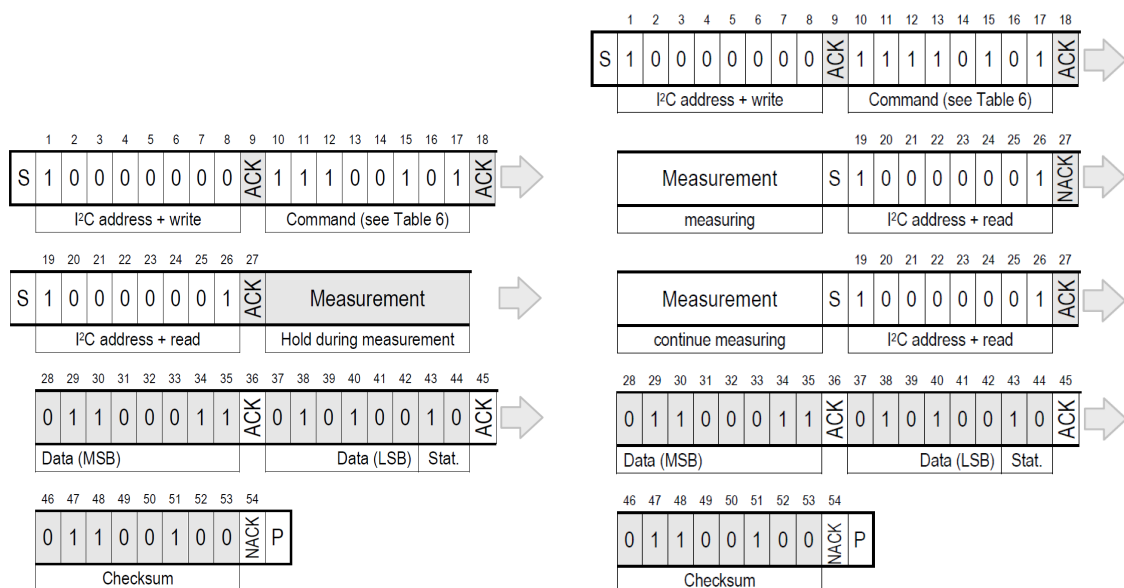
$$t_a = -46,85 + 175,72 \frac{D_t}{2^{16}}, \quad (7.1)$$

kde t_a je teplota vzduchu [°C],
 D_t digitální číslo ze senzoru SHT25 z měření teploty [-].

Pro výpočet relativní vlhkosti platí (7.2) [53]

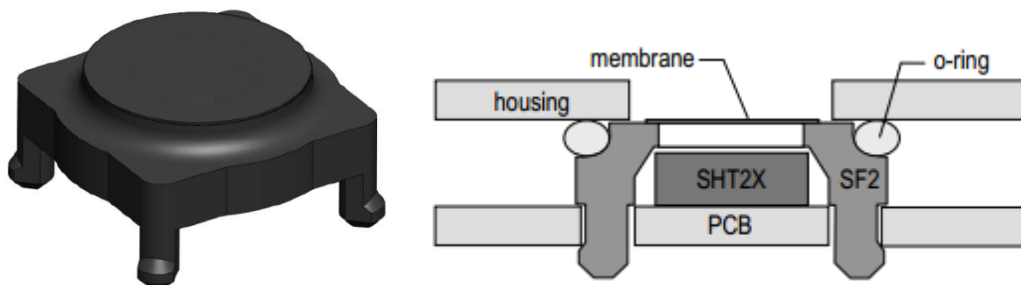
$$\varphi = -6 + 125 \frac{D_\varphi}{2^{16}}, \quad (7.2)$$

kde φ je relativní vlhkost vzduchu [%],
 D_φ digitální číslo ze senzoru SHT25 z měření vlhkosti [-].



Obr. 7.10 Hold master a No-Hold master komunikační sekvence [53]

Pro ochranu senzoru před vodou, prachem, sazemí a dalším znečištěním je možné senzor osadit filtrem SF2, který je zobrazen na obrázku 7.11. Jeho konstrukce je z teflonu s membránovým filtrem a upevňuje se přímo k desce plošného spoje. Filtr je navržen tak, aby co nejméně prodlužoval odezvu senzoru.



Obr. 7.11 Filtr SF2 pro snímač SHT25s ukázkou montáže do desky plošného spoje [53]

7.2 MĚŘENÍ STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLoty

Měření střední radiční teploty představuje specifický problém při měření teploty povrchu těles. Střední radiční teplota t_r je parametr, který charakterizuje střední teplotu povrchu ploch před referenčním místem. Pro měření je tedy zapotřebí vybrat vhodný snímač pro měření teploty ploch bezdotykově. Tento požadavek splňují snímače infračerveného (dále IR) záření, které se dělí do dvou skupin:

- tepelné detektory IR záření,
- kvantové detektory IR záření.

Tepelné detektory IR záření se dále dělí:

- pyroelektrické detektory,
- bolometrické detektory, mikrobolometry,

- termoelektrické detektory (Thermopile detektory, infratermočlánky, termoelektrické baterie).

Kvantové detektory IR záření se dále dělí:

- intrinsické kvantové detektory,
- extrinsické kvantové detektory,
- QWIP detektory.

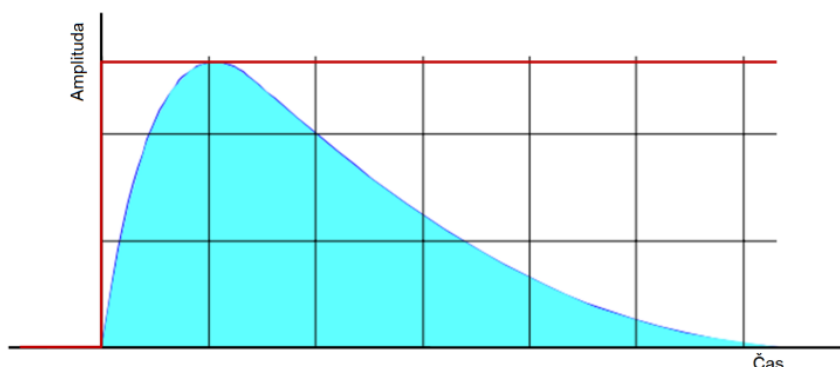
7.2.1 Tepelné detektory infračerveného záření

Jedná se o detektory, které jsou založeny na principu absorpce infračerveného záření a následného oteplení teplotního snímače. V praxi se to řeší například nanesením černé absorpční vrstvy na teplotní čidlo (např. termočlánek). Tato vrstva pohltí infračervené záření, které zahřeje čidlo.

Dále budou popsány jednotlivé tepelné detektory infračerveného záření.

7.2.1.1 Pyroelektrické senzory

Pyroelektrické materiály reagují na změnu teploty spontánní změnou polarizace, což je tzv. pyroelektrický jev. Změna polarizace způsobuje změnu náboje v materiálu a změna náboje může být převedena na elektrický signál. Odezva pyroelektrického detektoru na změnu teploty je zobrazena na obrázku 7.12. Změna teploty se provádí tak, že tepelné záření přerušujeme otáčením dírkovaného kotouče. Kotouč vytvoří z původního záření pulsy. Senzor pracuje tak, že výkyvy v ozáření senzoru odpovídají kolísání polarizace, tím vzniká střídavý proud, který může být monitorován zesilovačem.



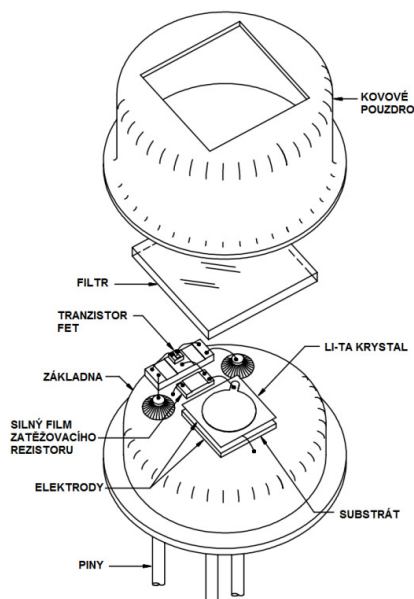
Obr. 7.12 Odezva pyroelektrického detektoru na změnu IR záření [56]

Pyroelektrické senzory se vyrábí z různých materiálů. Některé z jednoduchých krystalů (LiTaO_3 , NaNO_2 , triglycerinový sulfát TGS), jiné z keramických materiálů (titaničitan a zirkoničitan olovnatý).

Typický pyroelektrický snímač na keramické podložce je metodou nastřelování nanesen na čip, jenž má v sobě potřebné zesilovače a multiplexory. Tento způsob nanášení je však poměrně drahý. Jsou ale i další pyroelektrické materiály, které lze nanášet jiným postupem než nastřelováním. To se týká jak jednoduchých krystalů, tak pyroelektrických materiálů ve formě povlaku (filmu). Vytvoření povlaku je technicky jednoduše uskutečnitelné. Jednotlivé krystaly se nanášejí hůře na rozdíl od povlaků, ale jejich odezva na infračervené záření je značně lepší. [56]

Samotný pyroelektrický detektor je v podstatě kondenzátor vytvořený nanesením kovových elektrod na obě strany tenké vrstvy pyroelektrického materiálu. Absorpce infračerveného záření pyroelektrickým materiálem způsobí změnu jeho teploty. Změna

teploty zapříčiní změnu polarizace v pyroelektriku. Změna polarizace způsobí indukování elektrického náboje na elektrodách tohoto „kondenzátoru“ a ten způsobí tok střídavého proudu. Příklad řešení konstrukce pyroelektrického detektoru je zobrazen na obrázku 7.13.



Obr. 7.13 Příklad uspořádání jednotlivých komponent v pyroelektrickém detektoru [56]

Výhodou pyroelektrických senzorů je jejich vysoká citlivost na dopadající IR záření. Mezi nevýhody těchto snímačů patří zejména nutnost cyklicky přerušovat tepelné záření. Další nevýhodou může být velice slabý výstupní signál, který je nutné zesílit příslušným zesilovačem.

V této kapitole byl popsán základní princip pyroelektrických detektorů. Tento typ senzorů má oproti infračerveným termoelektrickým senzorům výhodu vyšší citlivosti na dopadající IR záření. Ovšem jejich velkou nevýhodou je nutnost cyklicky přerušovat IR záření. Způsob přerušování by bylo možné ve vyvíjeném snímači operativní teploty vyřešit, ale řešení by způsobilo zvětšení rozměrů snímače a také jeho cenu. Z uvedených důvodů tento snímač nebude v řešení uvažován.

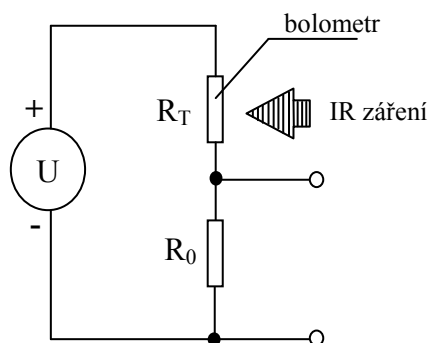
7.2.1.2 Bolometry

Elektrický odpor bolometru se mění v závislosti na jeho teplotě. Změna teploty je způsobena pohlcováním infračerveného záření. Množství dopadajícího záření je tedy možné určit ze změny odporu bolometru. Aby byly změny odporu závislé pouze na pohlcovaném infračerveném záření, musí být detektor tepelně izolován od okolí. Na obrázku 7.14 je bolometr ve funkci proměnného odporu odporového děliče.

Bolometr může být vyroben následujícím způsobem. Na hliníkový substrát (desku), který je odizolován vrstvičkou oxidu hlinitého (Al_2O_3), se na dobře tepelně vodivou desku z bismutu napaňují odporové dráhy z oxidů MnO , MgO , TiO , TiO_2 (tzv. termistorové bolometry) nebo chalkogenidové sklo (tzv. vrstevné bolometry). U jednoduchých bolometrů se zapojují čtyři dráhy (R_1 až R_4) do Wheatstonova můstku. Některé z nich se používají jako kompenzační nebo referenční. [27]

Bolometry a mikrobolometry jsou v praxi nejčastěji využívány pro termovizní měření. Jednotlivé bolometry se seskupují do matic, které vytvářejí jednotlivé obrazové pixely. Tyto snímače mají rychlou časovou odezvu a jsou velmi citlivé na IR záření. Jejich

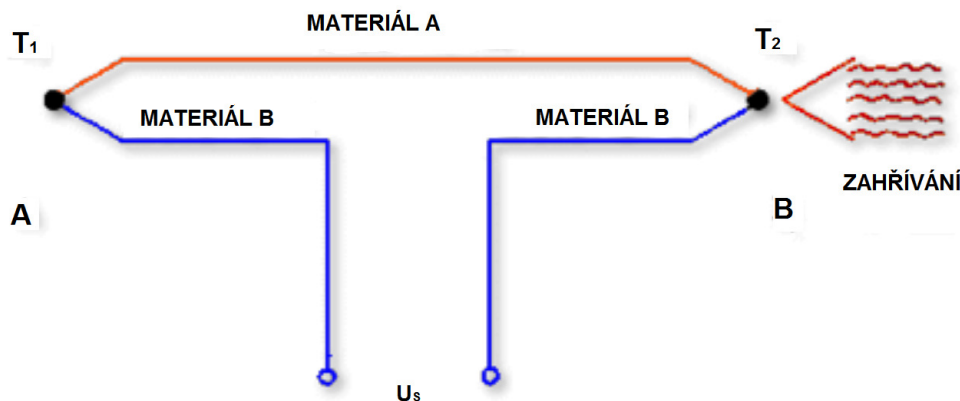
výborné parametry jsou však vykoupené poměrně vysokou cenou. Cena se stala důvodem, proč tento typ snímače nebude v kompaktním senzoru operativní teploty využit.



Obr.7.14 Bolometr ve funkci proměnného odporu odporového děliče[27]

7.2.1.3 Termoelektrické detektory

Někdy jsou termoelektrické detektory také nazývány jako "infratermočlánky, infračervené termočlánky" (angl. Thermopile sensor). Klasický termočlánek se skládá ze dvou tenkých pásků o velmi malé šířce (řádově desetiny mm) a různého materiálu, které jsou na konci svařeny a uloženy v keramickém pouzdře. Funkce termočlánku je založena na tzv. Seebeckově jevu. Ten se projevuje u dvou vodičů A a B z různých materiálů, u kterých je udržována teplota jejich spojů na rozdílných teplotách $T_1 < T_2$. V obvodu (Obr. 7.15) se objeví termoelektrické napětí a začne jím protékat proud.



Obr. 7.15 Seebeckův jev - termoelektrický článek (termočlánek) [27]

Výstupní Seebeckovo napětí je dáno vztahem (7.3) [27]

$$U_S = \int_{T_1}^{T_2} (\alpha_B(T) - \alpha_A(T)) dT, \quad (7.3)$$

kde U_S je výstupní napětí termočlánku [V],
 α_A, α_B jsou Seebeckovy konstanty kovů A a B [$V \cdot K^{-1}$],
 T_1, T_2 jsou teploty spojů [K].

Seebeckovy koeficienty jsou nelineární a závisejí na teplotě vodičů, použitém materiálu a jeho molekulární struktuře. Pokud jsou Seebeckovy koeficienty v daném rozsahu teplot přibližně lineární, může být uvedená rovnice (7.3) [27] linearizována na následující tvar

$$U_S = (\alpha_A - \alpha_B)(T_2 - T_1). \quad (7.4)$$

Z výše uvedených vztahů (7.3), (7.4) vyplývá, že pro velikost výstupního napětí je rozhodující teplotní gradient (rozdíl teplot) a velikost Seebeckových koeficientů jednotlivých kovů. Hodnoty pro některé kovy jsou uvedeny v následující tabulce 7.3.

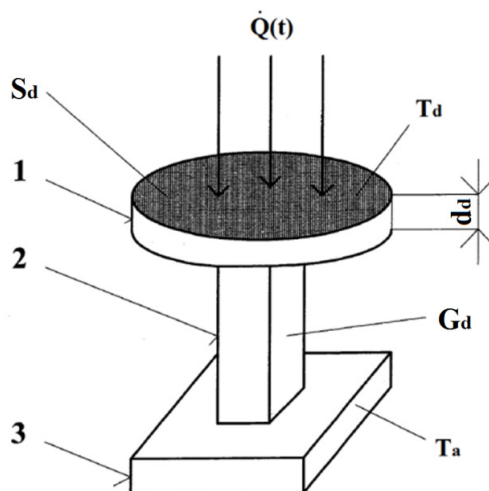
Tab. 7.3 Seebeckovy koeficienty některých materiálů vztahovaných k platině [27]

Materiál	Seebeckův koef. [$\mu\text{V.K}^{-1}$]	Materiál	Seebeckův koef. [$\mu\text{V.K}^{-1}$]	Materiál	Seebeckův koef. [$\mu\text{V.K}^{-1}$]
Selen	900	Wolfram	7,5	Uhlík	3
Tellur	500	Měď	6,5	Rtuť	0,6
Křemík	440	Zlato	6,5	Sodík	-2
Germanium	300	Stříbro	6,5	Draslík	-9
Antimon	47	Rhodium	6	Nikl	-15
Nichrom	25	tantal	4,5	Kobalt	-19
Železo	19	Olovo	4	Konstantan	-32
Kadminum	7,5	Hliník	3,5	Bismut	-72

Termoelektrické detektory reagují na tepelné infračervené záření objektů, na které jsou namířeny. Jsou tvořeny termočládky, jejichž konce jsou umístěny do jednoho bodu a jsou pokryty pro infračervené světlo pohlcujícím černě zbarveným materiálem.

Toto záření pohltí černá vrstva a zahřeje termočlánek. Pouzdro je navíc opatřeno okénkem s optickým filtrem, který upravuje infračervené záření do potřebné formy. V pouzdru je obsažen i termistor (typu NTC), který slouží jako referenční zdroj teploty a měří teplotu pouzdra detektoru. Naměřená teplota referenčního termočládku se používá při kompenzaci vlivu okolní teploty na teplotu měřenou. Nejčastěji je tato kompenzace umístěna na křemíkovém substrátu uvnitř pouzdra senzoru společně s termočládky.

Zjednodušený model termoelektrického detektoru si lze představit dle obrázku 7.16. Model se skládá ze tří částí. První část je označena 1 a jedná se o citlivý element o teplotě T_d , aktivní ploše S_d a tloušťce d_d . Druhou část označenou 2 tvoří tepelný most s okolím o tepelné vodivosti G_d . Třetí částí označenou 3 je podložka o teplotě okolí T_a .



Obr.7.16 Zjednodušená konstrukce termoelektrického tepelného detektoru [30]

Citlivý element lze charakterizovat tepelnou kapacitou C_d , pohltivostí ε a je propojen s teplotou okolí t_a tepelnou vodivostí G_d . Na aktivní plochu senzoru působí tepelný tok $\dot{Q}(t)$, který je časově proměnný. Pro tepelný tok $\dot{Q}(t)$ roven nule platí, že teplota citlivého elementu T_d a teplota vzduchu T_a budou sobě rovny. V případě, že tepelný tok $\dot{Q}(t)$ bude větší než nula, bude teplota citlivého elementu T_d vyšší než teplota vzduchu T_a . Ve stavu tepelné rovnováhy bude absorbovaná energie rovna energii odvedené tepelným mostem. Stav tepelné rovnováhy lze popsat diferenciální rovnicí ve tvaru (7.5) [30]

$$\varepsilon \cdot \dot{Q}(t) = C_d \cdot \frac{dT_d}{dt} + G_d \cdot \Delta T(t), \quad (7.5)$$

kde $\Delta T = T_d - T_a$ je oteplení citlivého elementu detektoru vlivem jeho ohřátí absorbovaným vstupním tepelným tokem $\varepsilon \cdot \dot{Q}(t)$.

V případě skokové změny vstupního tepelného záření rovno (7.6) [30]

$$\dot{Q}(t) = 1(t), \quad (7.6)$$

platí pro oteplení citlivého elementu po dosažení do rovnice (7.5) vztah (7.7) [30]

$$\Delta T(t) = \frac{\varepsilon \cdot \dot{Q}(t)}{G_d} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right), \quad (7.7)$$

kde $\tau = \frac{C_d}{G_d}$ je časová konstanta detektoru.

Pro maximální oteplení detektoru v ustáleném stavu platí vztah (7.8) [30]

$$\Delta T_{max} = \frac{\varepsilon \cdot \dot{Q}_{max}}{G_d}. \quad (7.8)$$

Jestliže vstupní tepelný tok $\dot{Q}(t)$ je časově proměnný a má tvar (7.9) [30]

$$\dot{Q}(t) = \dot{Q}_0 + \dot{Q}_{max} \cdot e^{j\omega t}, \quad (7.9)$$

pak oteplení vede na tvar (7.10) [30]

$$\Delta T(t) = T_0 + \Delta T_{max} \cdot e^{j(\omega t - \psi)}, \quad (7.10)$$

kde první člen představuje statickou složku teploty a druhý člen představuje harmonickou složku teploty. Pro harmonickou složku tepelného toku bude oteplení dáno vztahem (7.11) [30]

$$\Delta T(t) = \Delta T_{max} \cdot e^{j(\omega t - \psi)}, \quad (7.11)$$

kde znaménko mínus u fáze ψ značí, že oteplení ΔT se zpožďuje za vstupním tepelným tokem $\dot{Q}(t)$. Pro amplitudu oteplení ΔT_m a fázový úhel ψ dostaneme vztahy (7.12), (7.13) [30]

$$\Delta T_{max} = \frac{\varepsilon \cdot \dot{Q}_{max}}{\sqrt{G_d^2 + (\omega \cdot C_d)^2}}, \quad (7.12)$$

$$\psi = \arctg\left(\frac{\omega \cdot C_d}{G_d}\right). \quad (7.13)$$

Ze vztahu (7.12) je zřejmé, že pro zvětšení oteplení ΔT_m je potřeba zvětšit absorpci aktivní plochy ε a zmenšit hodnotu tepelné vodivosti G_d . Pro správnou činnost detektoru je proto zapotřebí volit vhodný materiál a vhodný povrch aktivní plochy. Pro tepelnou kapacitu senzoru C_d platí vztah (7.14) [30]

$$C_d = c_d \cdot m_d = c_d \cdot \rho_d \cdot V_d = c_d \cdot \rho_d \cdot S_d \cdot d_d, \quad (7.14)$$

kde c_d je měrná tepelná kapacita detektoru [$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$]
 m_d hmotnost citlivého senzoru [kg]
 ρ_d hustota materiálu detektoru [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$]
 V_d objem citlivého elementu [m^3]
 S_d velikost aktivní plochy [m^2]
 d_d tloušťka citlivého detektoru [m].

Z rovnice (7.12) je zřejmé, že tepelnou kapacitu C_d lze zajistit malými geometrickými rozměry citlivého elementu detektoru. Geometrické rozměry jsou v praxi zmenšovány až na minimum dané konstrukčně technologickým omezením.

Tepelná výměna mezi detektorem a jeho okolím je způsobena vedením, prouděním a zářením. Ztráty tepelnou vodivostí vedením G_v určují odvod tepla Q do okolí. Jsou úměrné teplotní diferencí ΔT a množství odvedeného tepla za jednotku času platí (7.15) [30]

$$\dot{Q}_d = \frac{dQ}{dt} = G_v \cdot \Delta T. \quad (7.15)$$

Jestliže je citlivý element detektoru o teplotě T_d a s okolím o teplotě T_a v tepelné rovnováze, což lze napsat ve tvaru (7.16) [30]

$$\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S_d \cdot T_d^4 = G_z \cdot (T_d - T_a) = G_z \cdot \Delta T, \quad (7.16)$$

pak pro velmi malé změny teploty $\Delta T = dT$ bude pro tepelnou vodivost způsobenou zářením G_z platit následující vztah (7.17) [30]

$$G_z = \frac{d}{dT} (\varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S_d \cdot T_d^4) = 4 \cdot \varepsilon \cdot \sigma_0 \cdot S_d \cdot T_d^3. \quad (7.17)$$

Zapouzdřením detektoru se složka proudění neuplatní. Také vakuováním pouzdra detektoru lze podstatně zmenšit vodivost prouděním G_p . Celkový odvod tepla z těla detektoru do okolí je dán výslednou tepelnou vodivostí G_d [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$], která je vypočtena z jednotlivých složek (7.18) [30]

$$G_d = G_v + G_z + G_p. \quad (7.18)$$

Záření okolí zpět na detektor lze zanedbat z důvodů velmi malé emisivity prostředí. Pro výslednou vodivost lze pak psát vztah (7.19) [30]

$$G_d = G_v. \quad (7.19)$$

Dalším důležitým parametrem je mezní kmitočet detektoru, který lze určit z časové konstanty τ a platí pro něj vztah (7.20) [30]

$$f_T = \frac{1}{2\pi \cdot \tau} = \frac{1}{2\pi \cdot C_d \cdot R_d}, \quad (7.20)$$

kde $R_d = \frac{1}{G_d}$ je celkový tepelný odpor detektoru [m.K.W⁻¹].

Je-li kmitočet střídavé složky detektoru vstupního tepelného záření mnohem menší než mezní kmitočet bude pro oteplení detektoru platit (7.21) [30]

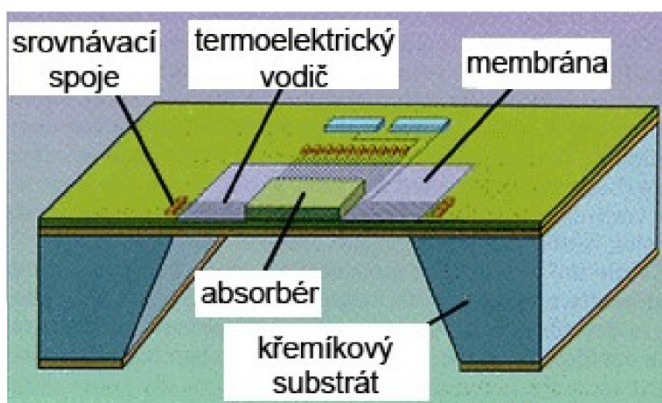
$$\Delta T = \frac{\varepsilon \cdot \dot{Q}_{max}}{G_d} = \Delta T_{max}, \quad (7.21)$$

a to znamená, že ΔT je nezávislé na frekvenci. Jestliže bude kmitočet střídavé složky mnohem vyšší než mezní kmitočet, bude pro oteplení detektoru platit vztah (7.22) [30]

$$\Delta T = \frac{\varepsilon \cdot \dot{Q}_{max}}{2\pi \cdot f \cdot C_d} \quad (7.22)$$

a je tedy závislé na frekvenci.

Dnešní infratermočlánky se vyrábějí integrované na bázi křemíku, poskytující dlouhou stabilitu, velmi nízký teplotní koeficient v citlivosti a opakovatelnosti měření. Monolitické senzory z důvodu dobré tepelné vodivosti křemíku, realizují na velmi tenké membráně 5 až 10 μm , aby se zabránilo tepelnému toku mezi měřicími a srovnávacími (studenými) spoji termočlánků. Měřicí spoje jsou tak umístěny ve středu membrány pod absorbujícím materiálem (absorbér) a srovnávací (studené) spoje pak na okraji na podložce. Termoelektrické senzory umožňují vzdálené měření teploty i v levných systémech, jelikož nepotřebují chlazení. Tyto senzory dosahují běžně rozlišení 1 °C v širokém měřicím rozsahu a až 0,1 °C v rozsahu úzkém. [62]



Obr. 7.17 Příklad struktury části čipu termoelektrického detektoru [62]

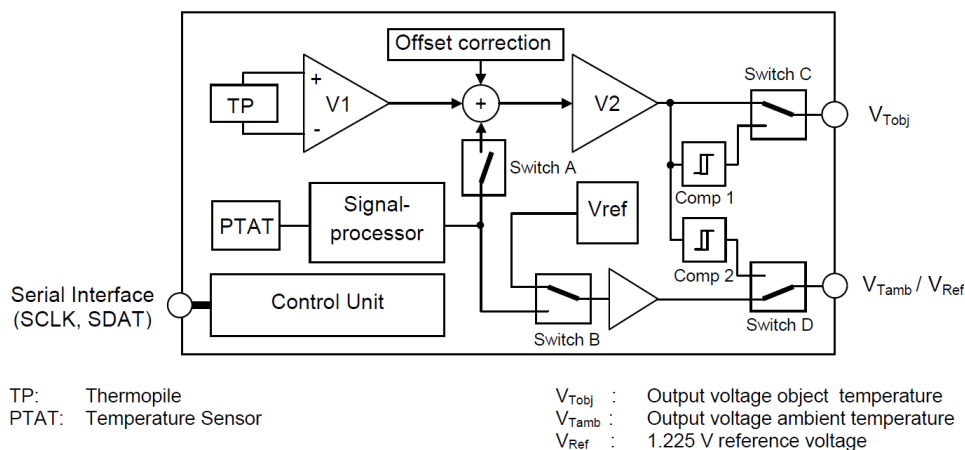
7.2.2 Kvantové detektory

Kvantové detektory využívají přímé přeměny dopadajícího záření na náboj, resp. elektrický proud. Více sofistikovaná teplotní zobrazovací zařízení pak využívají kvantové detektory, což jsou polovodičové systémy, ve kterých dopadající záření přímo excituje nosiče elektrického náboje (elektrony). Jejich počet a tedy i velikost výstupního elektrického signálu je úměrný intenzitě záření. Nejčastěji využívaný polovodičový materiál pro kvantové detektory je tellurid rtuťnokademnatý HgCdTe, často také označovaný jako CMT (Cadmium Mercury Telluride). Jeho výhodou je možnost nastavení maximální citlivosti v rozmezí 3 - 5 μm nebo 8 - 14 μm pouze složením sloučeniny. Nevýhodou je jeho "nekompatibilita" s křemíkem, a tedy složitější implementace na křemíkový chip. Signálový výstup kvantového detektoru je však malý a v normálním stavu při pokojové teplotě je znehodnocen šumem generovaným uvnitř součástky. Šum polovodiče je závislý na teplotě, proto je nutné jej eliminovat chlazením detektorů na velmi nízké teploty. Pro detekční pásmo 3 - 5 μm na -80 °C a na -193 °C pro pásmo 8 až 14 μm . Chlazení je tedy hlavní nevýhoda kvantových detektorů, ale protože jinak dosahují výborných elektrických vlastností, jsou voleny pro aplikace plošného termálního zobrazení, tedy pro účely termovize. [27]

Z důvodů nutného chlazení kvantových detektorů a příliš vysoké ceny není tento typ snímačů pro naši aplikaci vhodný. Závěrem lze konstatovat, že nejvhodnějším principem pro měření radiační teploty jsou tepelné detektory a z nich infratermočlánky.

7.2.3 Infratermočlánek od firmy PerkinElmer

Pro měření radiační teploty byl po průzkumu trhu vybrán senzor od firmy PerkinElmer s typovým označením A2TPMI334. Jedná se o univerzální infračervený senzor s integrovaným konfigurovatelným ASIC (Application – specific integrated circuit) pro zpracování signálu a korekci okolní teploty. Senzor je možné objednat již kalibrovaný přímo ze závodu a v tomto případě stačí pro jeho použití zapojit pouze tři piny. Jedná se o napájení 5 V, nulový potenciál a výstupní napětí odpovídající měřené teplotě objektu.



Obr. 7.18 Zjednodušené blokové schéma termočlánekové baterie A2TPMI [52]

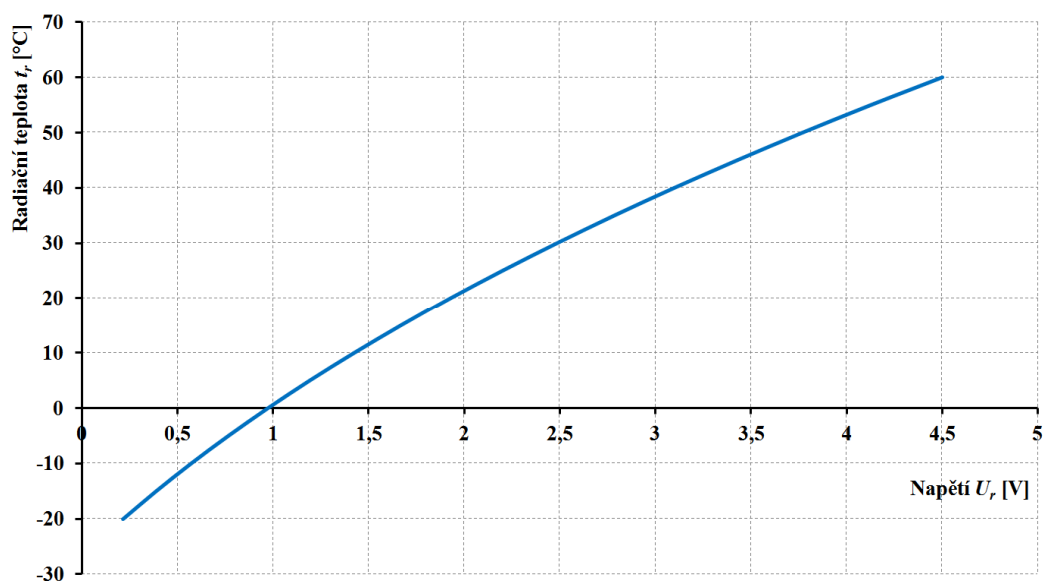
Napěťový signál, generovaný při dopadajícím IR záření na absorpční vrstvu, je zesílen pomocí předzesilovače s rozlišením 8 bitů. Vzhledem k principu měření teploty termočlánek může být výstupní napětí kladné nebo záporné podle toho, zda je teplota měřeného objektu vyšší nebo nižší než teplota okolí. Aby bylo možné zpracovávat napěťový signál se záporným napětím a přitom bylo napájení senzoru pouze z kladného napětí, jsou všechny vnitřní obvody vztaženy k referenčnímu napětí 1,225 V, které slouží

jako vnitřní virtuální zem. Výstupní napětí termočlánekové baterie je nelineární v závislosti na teplotě měřeného objektu. Zjednodušené blokové schéma tohoto snímače je znázorněno na obrázku 7.18.

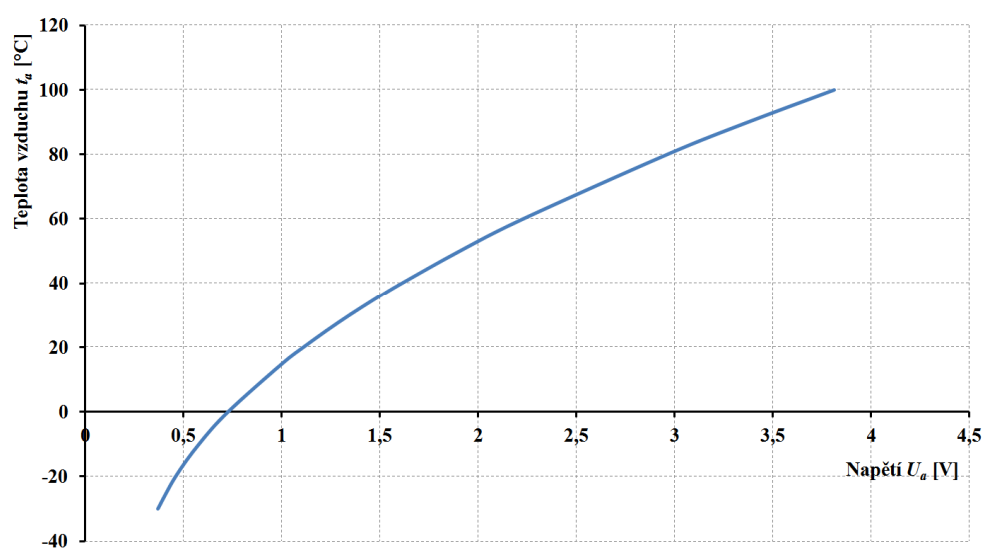
Závislost výstupního napětí na teplotě objektu je zobrazena na obrázku 7.19 a tuto charakteristiku lze popsat polynomem (7.23) [52]

$$t_r = -0,002603 \cdot U_r^6 + 0,04802 \cdot U_r^5 - 0,38431 \cdot U_r^4 + 1,8498 \cdot U_r^3 - 6,835 \cdot U_r^2 + 32,71 \cdot U_r - 26,75, \quad (7.23)$$

kde t_r je teplota měřeného objektu [°C],
 U_r výstupní napětí senzoru závislé na radiační teplotě [V].



Obr. 7.19 Závislost radiační teploty na výstupním napětí senzoru A2TPMI334[52]



Obr. 7.20 Závislost teploty vzduchu na výstupní napětí senzoru A2TPMI334[52]

Tento snímač disponuje také napěťovým výstupem z odporového snímače pro měření teploty srovnávacích spojů termočlánků, která odpovídá teplotě okolního vzduchu. Závislost výstupního napětí na teplotě vzduchu je nelineární a je zobrazena na obr. 7.20. Tuto závislost je možné vyjádřit následujícím polynomem (7.24) [52]

$$t_a = -0,5912 \cdot U_a^6 + 8,1616 \cdot U_a^5 - 45,303 \cdot U_a^4 + 130,15 \cdot U_a^3 - 210,22 \cdot U_a^2 + 221,49 \cdot U_a - 88,635, \quad (7.24)$$

kde t_a je teplota vzduchu [°C],
 U_a výstupní napětí senzoru závislé na teplotě vzduchu [V].

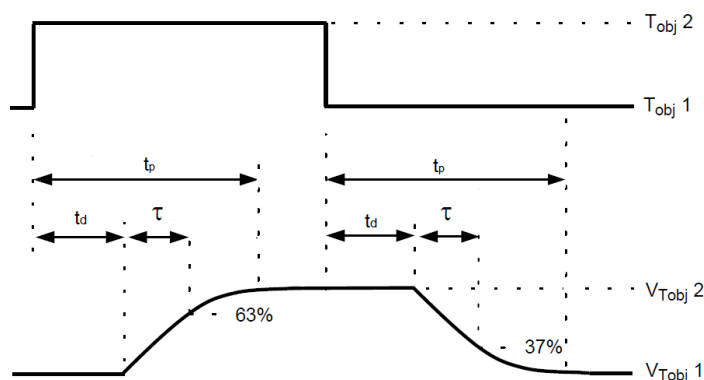
Tab. 7.4 Základní technické parametry senzoru A2TPMI334OAA060

Parametr	Hodnota
Napájecí napětí	5 V
Plocha obsorberu	0,7 x 0,7 mm
Zorné pole	60°
Doba odezvy	150 ms
Doba zpoždění	75 ms
Časová konstanta	25 ms
Spektrální citlivost	7,5-13,5 μm
Citlivost	55 V/W
NEP	0,64 nW/√Hz

K těmto snímačům se uvádějí v technických katalozích následující parametry:

- *Sensitivity* (Citlivost, Převodní konstanta) udává velikost výstupního napětí na intenzitě dopadajícího záření.
- *Noise equivalent power* (NEP) udává minimální intenzitu záření, kterou je schopen senzor detekovat.
- *Detectivity* (D) = NEP⁻¹.
- *Specific detectivity* (D*) = √ S_D / NEP je rozšířený parametr *detektivity* D o vliv plochy detektoru S_D.
- *Response time* (Časová konstanta, Rychlost odezvy, Frekvenční odezva) je minimální doba, kterou potřebuje senzor na změření změny teploty (maximální frekvence, se kterou se může měnit teplota měřeného objektu, aby ještě byly všechny změny senzorem zaznamenány).

Na následujícím obrázku 7.21 jsou vyobrazeny časové průběhy, které znázorňují odezvu snímače na skokovou změnu radiační teploty. Doba t_d je čas potřebný pro AD/DA převod a způsobuje zpoždění. Dále je zobrazena časová konstanta snímače a doba odezvy. Doba odezvy je maximální potřebný čas pro docílení 95 % hodnoty měřené veličiny. Jednotlivé technické parametry senzoru jsou uvedeny v tabulce 7.4.

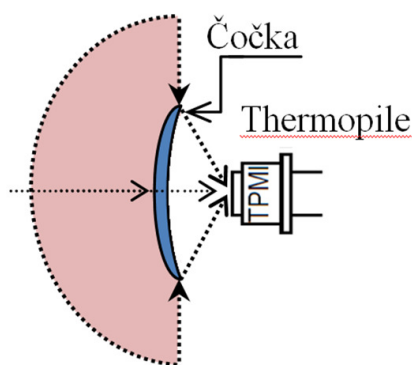


Obr. 7.21 Znáznornění časového průběhu výstupního napětí na skokovou změnu radiační teploty [52]

V této kapitole byl popsán vybraný senzor pro měření radiační teploty. Snímač svými parametry odpovídá požadavkům pro měření radiační teploty v uzavřených prostorech, kde se může nacházet člověk.

Zorný úhel snímače je 60° , což je nedostatečné pro pokrytí celého poloprostoru. Aby bylo možné měřit radiační teplotu z celého poloprostoru je zapotřebí, aby měl snímač zorný úhel 180° . Na trhu se však takový senzor nenachází, protože výrobci se snaží osazovat senzory s optikou, která má zorný úhel co nejmenší. Je to z důvodů, aby bylo možné měřit teplotu objektu z co největší vzdálenosti.

Existují dvě možnosti jak zorný úhel snímače rozšířit. Prvním z nich je osadit výsledný kompaktní snímač operativní teploty celkem šesti takovými snímači, aby zorný úhel pokryl celý poloprostor. Výhodou tohoto řešení by byla možnost měření asymetrie střední radiační teploty v jednotlivých zónách snímače. Nevýhodou by byla vysoká cena tohoto řešení a dále zvětšení rozměrů výsledného snímače.



Obr. 7.22 Znáznornění řešení s optickou čočkou propouštějící IR záření se zorným úhlem 180°

Druhým řešením je osazení snímače optikou, která by úhel 60° rozšířila na celý poloprostor, tedy 180° , jak je zobrazeno na obrázku 7.22. S požadavkem na výrobu optiky byla nejprve oslovena firma PerkinElmer, která však kusovou výrobu odmítla. Pokud by se však jednalo o odběr senzorů v řádech tisíců, bylo by možné tyto čočky u této firmy nechat vyrobit. Potřebnou čočku s definovanými parametry vyrobila Vývojová optická dílna AV ČR v Turnově, která v rámci organizační struktury Akademie věd České republiky pracoviště Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i., plní od svého založení v roce 1965 poslání být dodavatelem nejvyšší kvality optiky pro Akademii věd, výzkumná pracoviště na vysokých školách a v průmyslových podnicích v tuzemsku i v zahraničí, rovněž pro širokou obec výzkumníků amatérů. Vyvíjí, vyrábí a provádí servis pro téměř

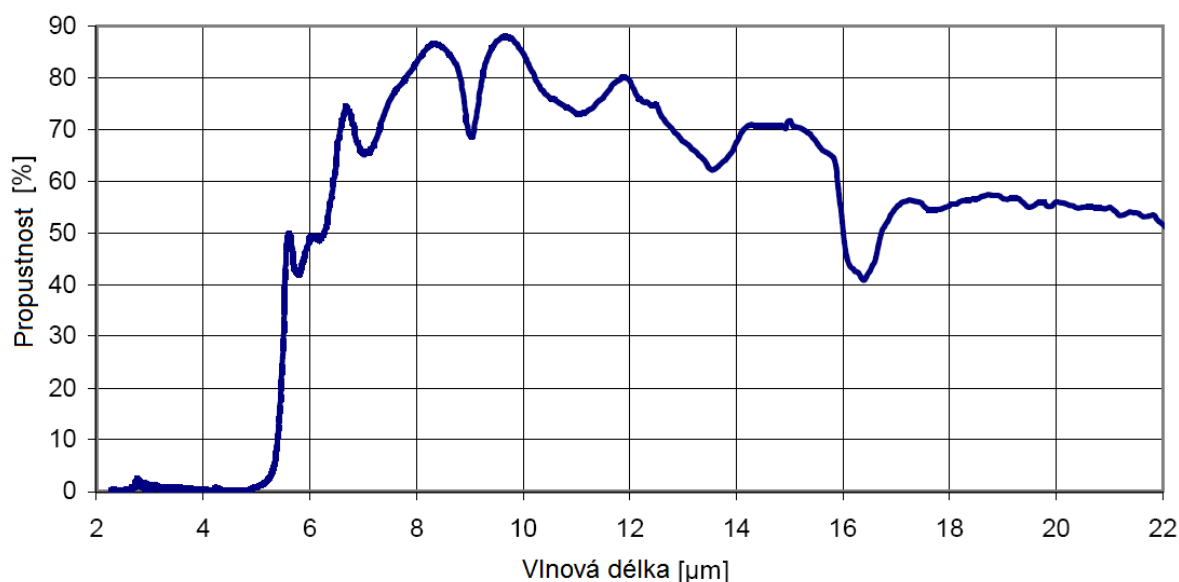
všechny typy optických prvků. Rozsahem výroby je schopna pokrýt kusovou a malosériovou výrobu.

Dle předaných parametrů byla navržena a poté vyrobena optická čočka, která se nasazuje přímo na pouzdro senzoru. Čočka je zobrazena na obrázku 7.23.



Obr. 7.23 Optická čočka propouštějící IR záření se zorným úhlem 180°

Materiál čočky je z křemíku, který má propustnost v rozsahu vlnových délek 5,5 až 22 μm průměrně 70 % jak je zobrazuje obrázek 7.24.



Obr. 7.24 Závislost propustnosti materiálu čočky na vlnové délce [52]

7.2.4 Měření rychlosti proudění vzduchu

Při výběru vhodného principu měření rychlosti proudění vzduchu je zapotřebí vzít v úvahu parametry popsané v kap. 4.1.2. Z průzkumu trhu vyplynulo, že neexistuje řešení, které by se dalo zabudovat do návrhu kompaktního snímače operativní teploty, a proto bude anemometr navržen. Samotným návrhem se bude zabývat následující kapitola. Pro ověřování navrženého snímače bude zapotřebí přesný anemometr. Byl pořízen termoanemometr od firmy TESTO s typovým označením TESTO 445 s termickou kuličkovou sondou (Obr. 7.25). Průměr kuličky je 3 mm. Velkou nevýhodou těchto komerčních zařízení je však jejich cena, která se pohybuje v řádech desítek tisíc korun. Výhodou tohoto zařízení je ale přesnost měření, proto je tento přístroj vhodný pro srovnávací měření rychlosti proudění vzduchu.



Obr. 7.25 Termoanemometr TESTO 445 s termickou kuličkovou sondou [58]

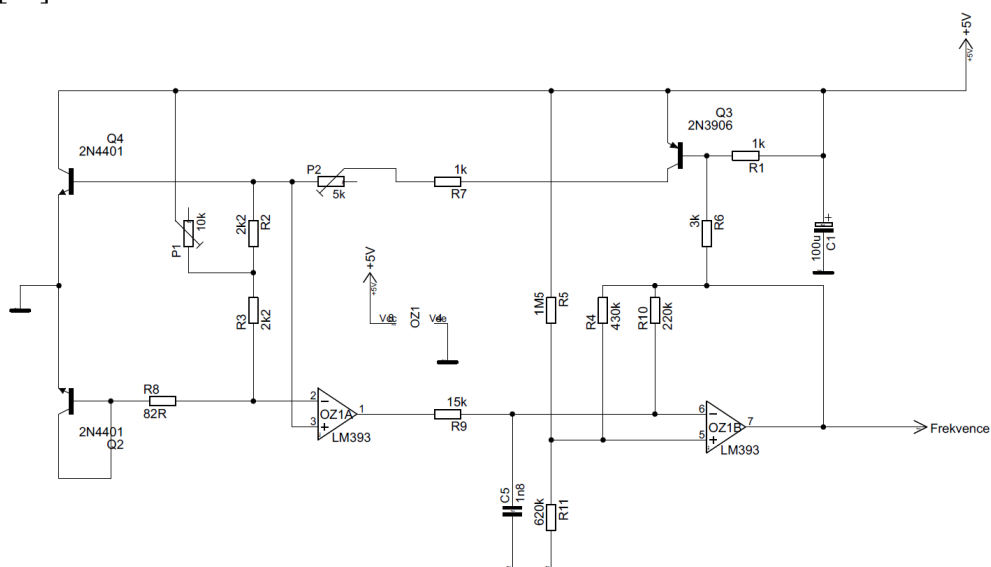
Základní technické parametry přístroje TESTO 445:

Měřicí rozsah: 0 m.s^{-1} až 10 m.s^{-1}

Přesnost měření: $\pm (0,03 \text{ m.s}^{-1} \pm 5 \% \text{ z naměřené hodnoty})$

7.2.5 Digitální tranzistorový termoanemometr

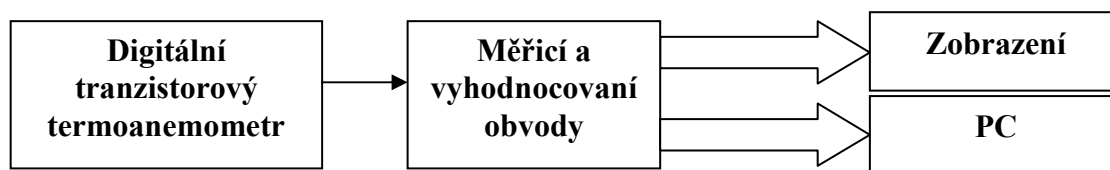
V dnešní době je možné koupit celou řadu velmi přesných a pro naše požadavky dostačujících přístrojů. Základním problémem je vysoká cena těchto zařízení a velké rozměry, proto bylo přistoupeno k návrhu senzoru, který by měl podstatně nižší cenu. Na základě průzkumu trhu z hlediska metodiky měření byl navržen termoanemometr, ve kterém je žhaveným tělískem tranzistor podle [18]. Obvod na obrázku 7.26 využívá vztahu mezi rychlostí proudění vzduchu a teplem, které je potřeba dodávat do senzoru, který je vystaven proudění, aby byla zachována teplotní difference mezi ním a okolím. Výkon potřebný pro splnění této podmínky je roven druhé mocnině rychlosti proudění vzduchu. [14], [18]



Obr. 7.26: Zapojení digitálního tranzistorového termoanemometru [18]

Není-li senzor vystaven proudění, nastaví se trimrem P_1 klidový proud bází tranzistorů Q_2 a Q_4 , přičemž tranzistor Q_2 je zapojen jako dioda a slouží pro kompenzaci okolní teploty. Při správném nastavení se kolektorovou ztrátou zvýší teplota tranzistoru Q_4 asi na $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, což má za následek pokles jeho napětí U_{BE} , které je menší než napětí U_{BE} na tranzistoru Q_2 spolu s úbytkem napětí na rezistoru R_8 . Následkem toho je neinvertujícím vstupu komparátoru nižší napětí než na invertujícím a výstup je potenciálu blízkém zemi. Kondenzátor C_5 multivibrátoru s OZ1B je přemostěn rezistorem R_9 . Multivibrátor nekmitá a výstup komparátoru OZ1B je na napětí blízkému napájecímu. Tím je tranzistor Q_3 udržován v uzavřeném stavu a výstupní frekvence je nulová. Je-li Q_4 vystaven proudění vzduchu, a tedy ochlazován, úbytek napětí U_{BE} tranzistoru Q_4 se vůči napětí U_{BE} Q_2 zvyšuje až se komparátor OZ1A překlápí a uvolní funkci multivibrátoru. Kondenzátor C_5 se nabíjí přes odpor R_4 , což má za následek asi $700\text{ }\mu\text{s}$ dlouhý impuls do báze tranzistoru Q_4 přes trimr P_2 a způsobuje jeho ohřev. Těmito krátkými impulsy se obvod snaží udržet stálý teplotní rozdíl tranzistoru Q_4 vzhledem k tranzistoru Q_2 . Frekvence na výstupu OZ1B je úměrná teplu nutnému k ohřevu tranzistoru Q_4 . [18]

Pro ověření, zda je tento anemometr dostačující pro měření rychlosti proudění vzduchu, bylo přistoupeno k jeho konstrukci. Tento obvod uveden na obrázku 7.26 byl doplněn o mikroprocesor ATMEGA 32 a displejem pro zobrazení naměřené hodnoty. Aby nemusely být měřené hodnoty odečítány ručně, bylo v návrhu počítáno i s komunikací s počítačem. Zjednodušené blokové schéma navrženého zařízení popisuje obrázek 7.27.



Obr. 7.27 Měřicí zobrazovací a komunikační obvod pro digitální tranzistorový termoanemometr

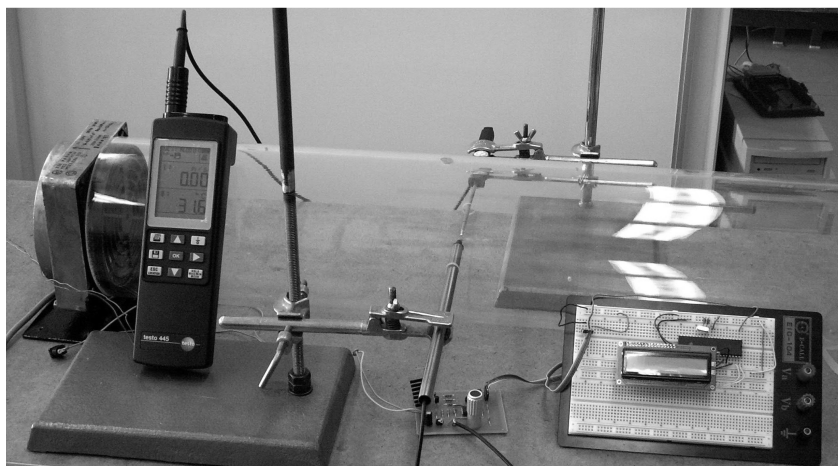
Finální řešení celého termoanemometru zobrazuje následující obrázek 7.28. Je složen z vyhodnocovací jednotky a odnímatelné sondy se žhaveným tranzistorem.



Obr. 7.28 Digitální tranzistorový termoanemometr

Tranzistorový termoanemometr bylo zapotřebí ověřit. Nejrychlejším a nejjednodušším řešením bylo postavení měřicí tratě, ve které lze oceňovat výstupní frekvenci z tranzistorového termoanemometru na rychlost proudění vzduchu. Cejchování bylo provedeno pomocí přístroje TESTO 445 s termickou kuličkovou sondou.

Měřicí trať, která je vyobrazena na následujícím obrázku 7.29, je složena z plexisklového válce o průměru 140 mm, do kterého je vložen ventilátor s možností regulace rychlosti otáčení triakovým regulátorem. Pro vytvoření laminárního proudění jsou do ústí trubice vloženy trubičky o průměru 5 mm.

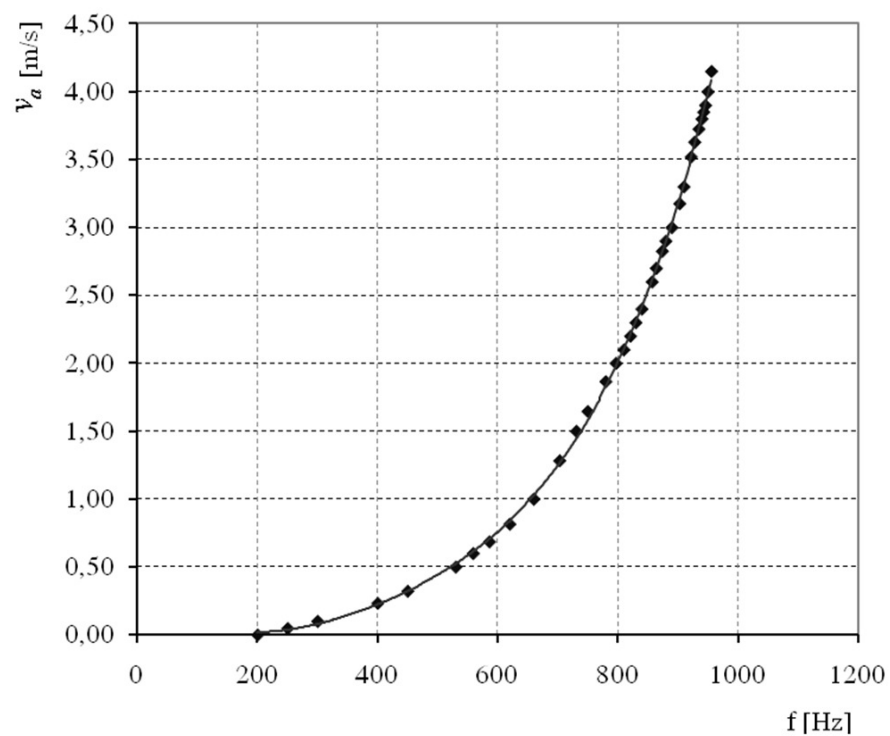


Obr. 7.29 Měřicí pracoviště pro ověřování snímačů rychlosti proudění vzduchu

Vyhřívaný tranzistor byl vložen spolu s kuličkovou sondou TESTO do středu plexisklového válce. Měření probíhalo sestupně, tzn. snižováním výkonu ventilátoru od maxima do minima. Rozsah měření byl přibližně od 4 do 0 m.s⁻¹. Výsledná charakteristika snímače má exponenciální průběh a je zobrazena na obrázku 7.30. Na základě této závislosti lze konstatovat, že navržený snímač rychlosti proudění vzduchu je možné použít pro kompaktní senzor operativní teploty, protože ji lze popsat následujícím polynomem (7.25)

$$v_a = -1,65668 + 0,0183325 \cdot f - 0,0000757002 \cdot f^2 + 1,51482 \cdot 10^{-7} \cdot f^3 - 1,40018 \cdot 10^{-10} \cdot f^4 + 5,263 \cdot 10^{-14} \cdot f^5, \quad (7.25)$$

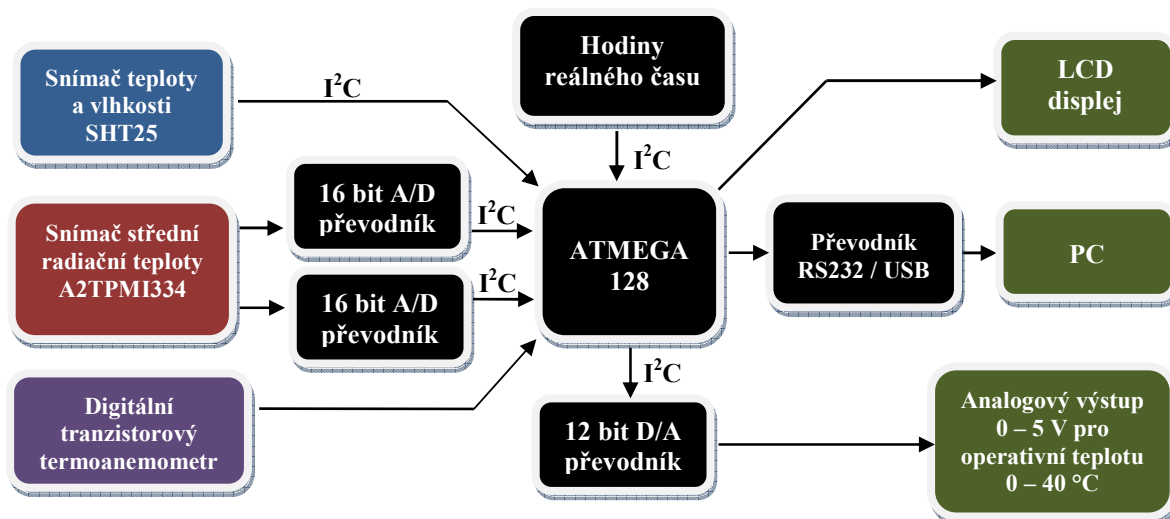
kde v_a je rychlost proudění vzduchu [m.s⁻¹],
 f výstupní frekvence senzoru závislá na rychlosti proudění vzduchu [Hz].



Obr. 7.30 Závislost rychlosti proudění v_a na frekvenci f digitálního tranzistorového termoanemometru

8. KOMPAKTNÍ SNÍMAČ OPERATIVNÍ TEPLOTY

V předchozích kapitolách byly popsány principy měření jednotlivých veličin, byly vybrány vhodné senzory a popsány jejich základní vlastnosti. V této kapitole se budeme zabývat samotnou konstrukcí senzoru a jeho kompletací. Na obrázku 8.1 je zjednodušené blokové schéma kompaktního snímače.



Obr. 8.1 Blokové schéma kompaktního senzoru operativní teploty

V následující části textu budou vybrány a popsány vhodné komponenty pro úpravu a zpracování naměřených dat. Jedná se zejména o vyhodnocovací a řídicí jednotku, A/D a D/A převodníky, komunikaci s počítačem, zobrazování dat na displeji a hodiny reálného času, které slouží pro přiřazení časové značky k naměřeným parametrům prostředí.

V dalších kapitolách budou popsány jednotlivé části kompaktního snímače operativní teploty.

8.1 MIKROKONTROLÉR

Mikrokontrolér (angl. microcontroller, používané zkratky: μC nebo MCU) je programovatelná elektronická součástka, která má nejčastěji podobu integrovaného obvodu. Jedná se o miniaturní počítač, který je integrován na jediném čipu. Typicky obsahuje procesor (rovněž označovaný jako CPU), paměť, programovatelné vstupně/výstupní rozhraní a další periferní obvody. Je vhodný pro použití v řízení a je navržen a určen pro tzv. vestavné (angl. embedded) aplikace. Mikrokontrolér je buď řídicí jednotkou („mozkem“) nějakého přístroje nebo je součástí zařízení, kde plní určitou specifickou funkci (na rozdíl od běžných počítačů, které jsou určeny k univerzálnímu použití). Proto je navržen jako samostatná jednotka schopná komunikace a interakce s okolím. V mikrokontroléru jsou obvykle kromě vstupních a výstupních obvodů integrovány periferní obvody, např. čítač, časovač, komparátor, sériové porty, analogově-digitální, příp. digitálně-analogový převodník, USB, PWM (pulzně-šířkový modulátor), paměť EEPROM a další. Mikrokontroléry se často používají v přístrojích napájených z baterií, proto je u nich rovněž kladen velký důraz na malou spotřebu. Obvykle disponují různými úspornými režimy, umožňují řídit kmitočet oscilátoru nebo vypínat jednotlivé moduly. Některé typy mohou být dále speciálně navrženy, aby splňovaly určité specifické požadavky. Příkladem může být zvětšený rozsah pracovních teplot (např. -40 až 150 °C) u mikrokontrolérů určených k řízení motorů automobilů apod. [37]

Mikrokontroléry lze dnes nalézt téměř v každém moderním elektronickém přístroji. Své místo mají nejen v systémech, kde je potřeba složité řízení nebo ovládání, ale používají se rovněž v přenosných lékařských přístrojích nebo implantátech, dálkových ovládacích, kancelářských přístrojích, měřicích přístrojích, hračkách, mp3 přehrávačích, mobilních telefonech a v celé řadě dalších přístrojů a zařízení. Výhodou jejich použití je, že umožňují nahradit velké množství logických obvodů a diskrétních součástek, které byly dříve k realizaci podobných zapojení potřeba. Různé periférie, které jsou již v mikrokontroléru integrovány, dokáží nahradit i další integrované obvody. Tím je možné nejen snížit náklady, ale rovněž díky jeho použití navrhnout např. uživatelsky přívětivější rozhraní nebo implementovat funkce, které zvyšují komfort celého zařízení. Při použití mikrokontroléru lze rovněž celé zařízení zdokonalovat nebo přidávat další funkce pouhou změnou programu bez nutnosti zásahu do jeho konstrukce. [37]

Z důvodů výše uvedených výhod je kompaktní snímač operativní teploty postaven na mikrokontroléru AVR řady ATMegal28. Jedná se o velmi zdařilý a oblíbený mikrokontrolér přizpůsobený jazyku C, který využívá výhod architektury RISC svou výkonností a rozsahem instrukční sady se blíží architektuře CISC. Architektura toho mikrokontroléru je harwardská tzn., že má oddělené sběrnice pro paměť programu a dat.

Z periferních obvodů je využit sériový komunikační port UART, sériová komunikační sběrnice I²C a sériová komunikační sběrnice SPI pro programování. Dále je využit čítač a časovač pro měření frekvence z digitálního tranzistorového termoanemometru. Dále jsou použity vstupní a výstupní porty pro možnost zobrazení naměřených dat na displeji. [2]

8.2 A/D PŘEVODNÍK SIGMA-DELTA

Pro převod výstupního termoelektrického napětí z infračerveného termoelektrického senzoru od firmy PerkinElmer na digitální číslo je zapotřebí použít A/D převodník. Výstupní napětí se pohybuje v rozsahu 0,000 V až 5,000 V. Pro výběr vhodného typu A/D převodníku je nutné vzít v úvahu rozlišitelnost senzoru, která by měla být 0,0005 V. A/D převodník by tedy měl být minimálně 14-ti bitový.

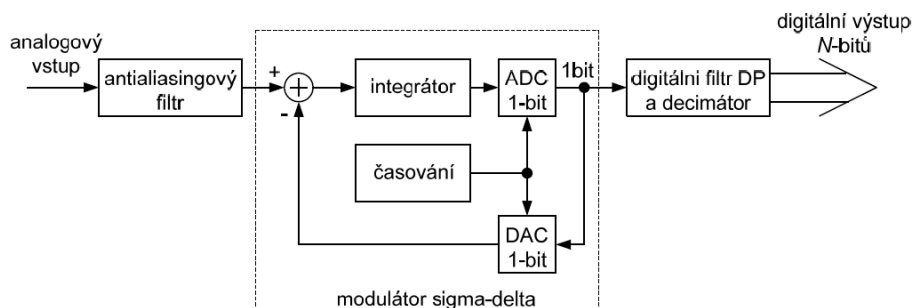
Převodník bude použit pro měření teploty, a proto není zapotřebí, aby byl převodník velmi rychlý. Dalším požadavkem je, aby integrovaný obvod s A/D převodníkem měl zabudovaný komunikační protokol.

Všechny tyto požadavky splňuje A/D převodník se sigma-delta modulací. Výhodou tohoto převodníku je odolnost proti rušivým signálům a vysoký počet bitů, kterých bývá až 24. Další výhodou je vzorkovací frekvence (v řádech jednotek až desítek kHz) a poměrně příznivá cena.

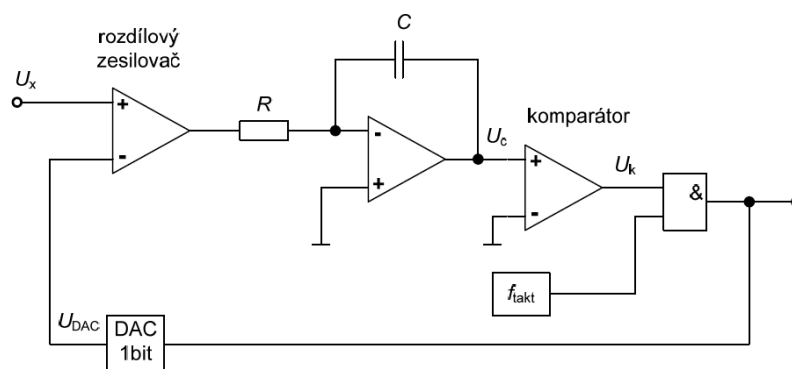
Základ A/D převodníku sigma-delta tvoří modulátor sigma-delta skládající se ze součtového členu, integrátoru a jednobitového převodníku A/D a D/A (Obr. 8.2), které pracují synchronně a jsou řízeny blokem časování. Na vstupu modulátoru je připojen antialiasingový filtr. Výstupní jednobitová posloupnost modulátoru sigma-delta je pomocí digitálního filtru typu dolní propust (DP) a decimátoru převáděna na N-bitovou digitální informaci.

Zjednodušené schéma modulátoru sigma-delta znázorňuje obrázek 8.3. Rozdílový zesilovač odečítá od vstupního napětí U_x napětí na výstupu jednobitového převodníku D/A U_{DAC} , které nabývá kladného nebo záporného referenčního napětí $+U_{ref}$ a $-U_{ref}$. Výstupní napětí rozdílového zesilovače je integrováno. Strmost integrace závisí na rozdílu vstupního napětí U_x a výstupního napětí převodníku D/A. Je-li vstupní napětí $U_x > 0$ a výstupní napětí integrátoru je záporné, pak napětí na výstupu jednobitového převodníku D/A bude $+U_{ref}$. Na výstupu rozdílového zesilovače bude napětí $K(U_x - U_{ref})$. Toto napětí bude malé a kladná směrnice nárůstu napětí U_c na výstupu integrátoru bude mít také malou strmost.

Poté, co výstupní napětí integrátoru překročí nulovou hodnotu, překlápí komparátor na opačnou úroveň napětí. V důsledku toho se na výstupu jednobitového převodníku D/A objeví napětí $-U_{\text{ref}}$. Nyní bude rozdíl napětí na výstupu rozdílového zesilovače větší a záporná směřnice ve srovnání s kladnou směřnicí v absolutní hodnotě bude větší. [11]

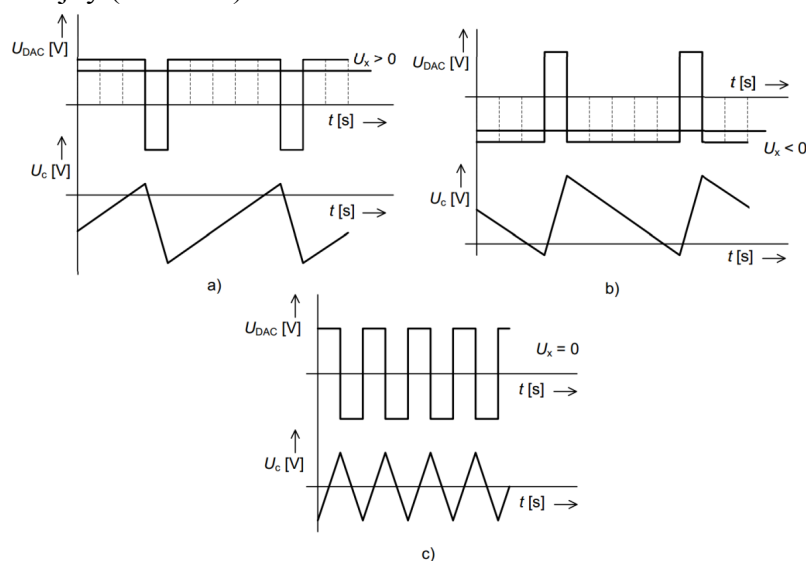


Obr. 8.2 Blokové schéma A/D převodníku Sigma-Delta [11]



Obr. 8.3 Blokové schéma modulátoru Sigma-Delta [11]

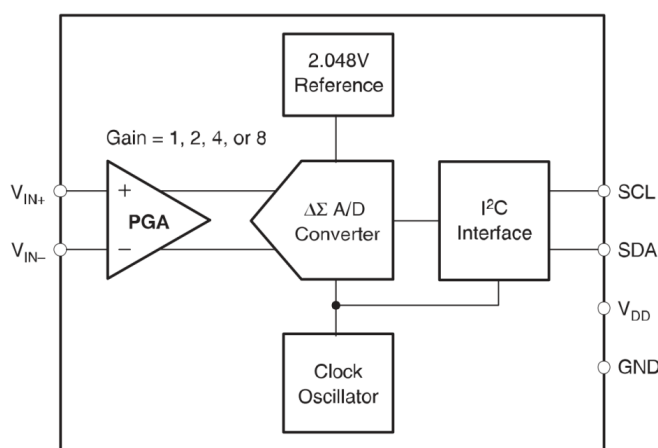
Počet logických jedniček na výstupu komparátoru je úměrný vstupnímu napětí U_x . Průběhy napětí na integrátoru a výstupu jednobitového převodníku D/A jsou zobrazeny na obrázku 8.4. Obrázek 8.4 a) znázorňuje průběhy napětí pro vstupní napětí modulátoru sigma delta větší než nula. Jestliže je vstupní napětí $U_x = 0$, pak počet logických 1 a 0 na výstupu komparátoru je stejný (obr. 8.4c).



Obr. 8.4 Průběhy napětí na integrátoru a DA převodníku [11]

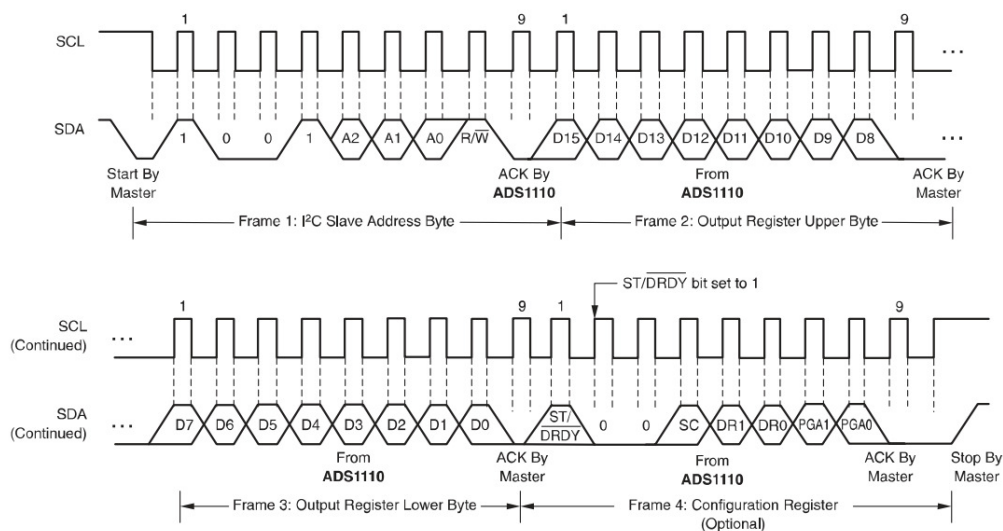
Jestliže je přivedeno na vstup modulátoru sigma-delta záporné napětí, je funkce obvodu obdobná jako při kladném vstupním napětí s tím rozdílem, že nárůst výstupního napětí je strmý a vybíjení je pozvolné (obr. 8.4b). Pokud je vstupní napětí záporné, je poměr počtu logických jedniček na výstupu komparátoru k celkovému počtu taktů malý. Výstupním signálem modulátoru sigma-delta je tedy sled logických jedniček a nul s různou četností. N-bitové výstupní slovo je získáno zpracováním vzorků v digitálním filtru, které představuje zvýšení přesnosti A/D převodu. [11]

Z velkého počtu dostupných A/D převodníků na trhu byl vybrán integrovaný obvod od firmy Texas Instruments s označením ADS1110. Jedná se o 16-ti bitový A/D převodník sigma-delta se vstupním zesilovačem, který má možnost programového nastavení zesílení 1, 2, 4 nebo 8. Dále tento obvod obsahuje komunikaci I²C, interní precizní napěťovou referenci 2,048 V a interní oscilátor. Blokové schéma tohoto integrovaného obvodu je na následujícím obrázku 8.5. Velkou výhodou je, že tento obvod již nepotřebuje pro svou činnost žádné externí součástky.



Obr. 8.5 Blokové schéma AD převodníku ADS1110 [59]

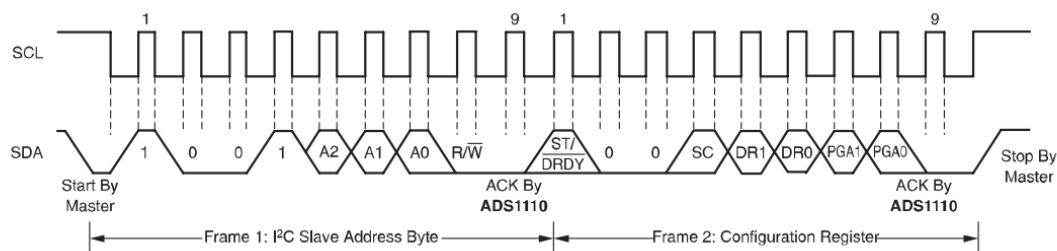
Napájecí napětí ADS1110 je v rozsahu 2,7 V až 5,5 V a jeho proudová spotřeba je pouhých 240 μ A. Chyba převodu je maximálně 0,01 % z plného rozsahu. S A/D převodníkem komunikuje mikrokontrolér pomocí protokolu I²C. Časový diagram pro čtení z AD převodníku je zobrazen na obrázku 8.6.



Obr. 8.6 Časový diagram pro čtení z AD převodníku [59]

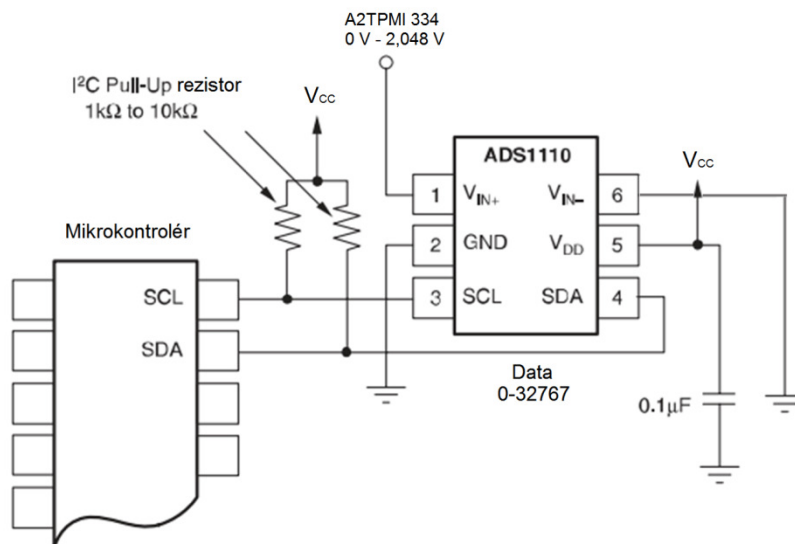
Po odeslání startovací podmínky následuje jedinečná adresa A/D převodníku, která je sedmibitová. Adresu definuje výrobce a tato adresa je pevná. V případě potřeby je možné si vybrat z osmi adres, které jsou definovány v objednacím čísle. K sedmibitové adrese se připojuje osmý bit, který rozhoduje, zda se jedná o čtení nebo zápis. V případě čtení je tento bit v logické jedničce. Poté zašle A/D převodník dva bajty dat. V případě potřeby je možné si vyžádat i konfigurační registr a pro ukončení čtení následuje stop podmínka. [59]

Časový diagram zápisu do A/D převodníku zobrazuje obrázek 8.7. Po startovací podmínce následuje sedmibitová adresa A/D převodníku a osmý bit je v případě zápisu v logické nule. Poté následuje zaslání bajtu s konfigurací registru A/D převodníku a ukončení komunikace.



Obr. 8.7 Časový diagram pro zápis do AD převodníku [59]

Připojení A/D převodníku k mikrokontroléru přibližuje obrázek 8.8. Zapojení využívá pouze kladný vstup A/D převodníku a pracuje tedy v tzv. single-ended módu. V tomto případě se zmenšuje počet bitů převodníku na patnáct. Na vstup $+V_{IN}$ je připojen napěťový výstup z infračerveného termočlánekového senzoru A2TPMI334 prezentující radiační teplotu. Napětí z tohoto senzoru je v rozsahu 0 – 5 V. Napětí je nutné zeslabit pomocí napěťového děliče, aby napětí na vstupu $+V_{IN}$ bylo v rozsahu 0 – 2,048 V. Napěťový dělič bude popsán v následující kapitole. Hodnota teploty okolního vzduchu, která je vyvedena ze snímače A2TPMI se zapojuje stejným způsobem jako v případě radiační teploty.

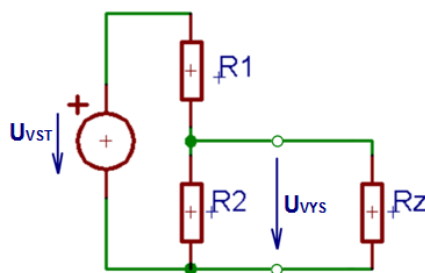


Obr. 8.8 Zapojení AD převodníku ADS1110 k mikrokontroléru [59]

8.3 DĚLIČ NAPĚTÍ PRO A2TPMI334

Pro snížení vstupního napěťového signálu z infračervené termočlánekové baterie je použit odporový dělič napětí (Obr. 8.9). Jedná se o velmi levnou a jednoduchou konstrukci. Odporový dělič je zobrazen na následujícím obrázku 8.9. Vstupní odpor A/D

převodníku R_z je při použití zesilovače se zesílením jedna rovno $3,5 \text{ M}\Omega$. Tento odpor způsobuje zátěž pro odporový dělič napětí, který je do výpočtu dělicího poměru započítán.



Obr. 8.9 Zatížený odporový dělič

Pro výpočet dělicího poměru platí vztah (8.1)

$$U_{VYS} = U_{VST} \frac{R_z \cdot R_2}{(R_2 + R_z) \cdot \left(R_1 + \frac{R_z \cdot R_2}{R_z + R_2}\right)}, \quad (8.1)$$

kde U_{VYS} je napětí na vstupu A/D převodníku ADS1110 [V],
 U_{VST} napětí z infračervené termočlávkové baterie A2TPMI334 [V],
 R_z vstupní odpor A/D převodníku [Ω],
 R_1, R_2 jsou volené hodnoty odporů děliče napětí [Ω].

Maximální hodnota U_{VST} je 5 V a při tomto napětí bude U_{VYS} z odporového děliče maximálně 2 V. Při volbě hodnoty odporu R_1 rovno $20 \text{ k}\Omega$ a R_2 rovno $30 \text{ k}\Omega$ je U_{VYS} po dosazení do rovnice (8.1) rovno

$$U_{VYS} = 5 \frac{3500000 \cdot 20000}{(20000 + 3500000) \cdot \left(30000 + \frac{3500000 \cdot 20000}{3500000 + 20000}\right)} = 1,993 \text{ V}. \quad (8.2)$$

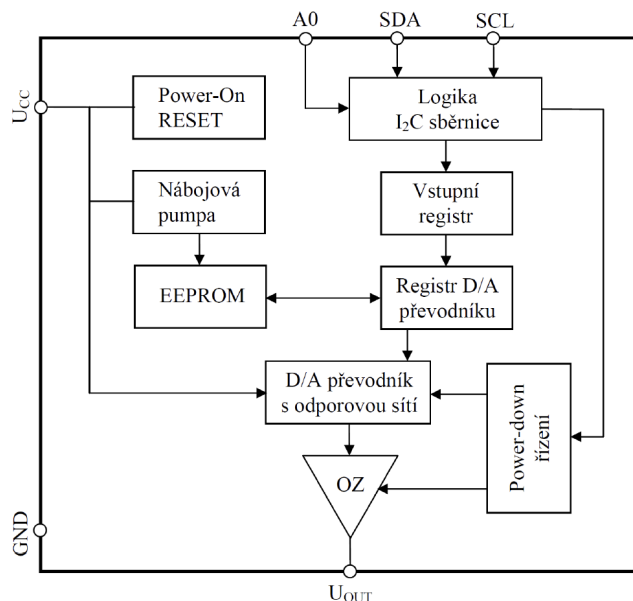
Pro dělicí poměr K , který je použit pro výpočet radiační teploty platí vztah (8.3)

$$K = \frac{U_{VST}}{U_{VYS}} = \frac{5}{1,993} = 2,509. \quad (8.3)$$

8.4 D/A PŘEVODNÍK MCP4725

D/A převodník převádí vstupní číslicový signál na analogové napětí. Digitální signál ovládá elektronické přepínače, které přepínají rezistory o takových hodnotách, že každá další hodnota je dvojnásobkem předcházející a vytváří výstupní signál.

Pro aplikaci byl vybrán 12-ti bitový D/A převodník MCP4725. Pracuje v rozsahu napájecího napětí 2,7 – 5 V, které je zároveň referenčním napětím. Jeho výstup je udržován na stálé hodnotě, i když mikrokontrolér nekomunikuje s tímto zařízením. Tuto funkci zajišťuje paměť EEPROM, která uchovává poslední hodnotu.



Obr. 8.10 Blokové schéma D/A převodníku MCP4725 [38]

Se zařízením lze komunikovat pomocí sběrnice I²C. Data jsou uchovávána v paměti i při vypnutém zařízení a po opětovném zapnutí je výstup aktivován s příslušnou hodnotou výstupního napětí. Obvod obsahuje jeden adresovací vstup A0, který se připojuje na napájecí napětí nebo na nulový potenciál.

Pro výstupní napětí D/A převodníku závislé na operativní teplotě platí vztah (8.4)

$$U_o = \frac{U_{ref} \cdot D_o}{4096}, \quad (8.4)$$

kde U_{ref} je referenční napětí ($U_{ref} = 5V$) [V],
 D_o digitální hodnota operativní teploty [-].

8.5 NAPĚŤOVÁ REFERENCE

Pro napájení D/A převodníku je zapotřebí velmi přesná a neměnná hodnota napětí. Je to z důvodu, že napájecí napětí je zároveň použito jako referenční napětí pro samotný D/A převodník. Další reference je použita pro napájení snímače SHT25, který pro svou činnost potřebuje napájecí napětí 3 V.

Reference se vyrábí různými způsoby, ale nejdůležitějšími vlastnostmi při dosahování známého výstupního napětí stále zůstávají přesnost a stabilita. Odchylku od takto vymezené úrovně pak nazýváme chybou. Specifikace napěťové reference k vyčíslení povolených tolerancí při známých okolních podmínkách obvykle vyžívají následujících parametrů:

- počáteční přesnost,
- teplotní drift,
- dlouhodobá stabilita,
- teplotní hystereze.

Chyba způsobená počáteční přesností (angl. Initial Accuracy) způsobuje rozdíly ve výstupním napětí měřené na dané teplotě, obvykle při + 25 °C. Výstupní napětí se s každým kusem stejného typu mění, ale pro daný kus bude konstantní. S tím lze jednoduše počítat a případný posun vyrovnat kalibrací.

Teplotní drift, někdy také teplotní koeficient TC [ppm/°C], (angl. Temperature drift) vyjadřuje, jakým způsobem se bude výstupní napětí měnit s teplotou.

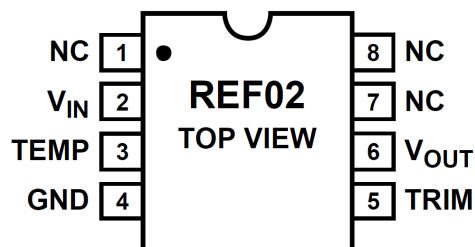
Dlouhodobá stabilita (angl. Long Term Stability) je parametr definující způsob „stárnutí“ daného čipu a jeho sklon ke změnám referenčního napětí v čase, nezávisle na dalších proměnných.

Teplotní hystereze (angl. Thermal Hysteresis) je mnohdy přehlížena a může v celé řadě případů vytvářet dominantní zdroj celkové chyby napěťové reference. Opět se jedná o zcela přirozenou vlastnost, která pouze odráží různé teplotní namáhání čipu v důsledku jednotlivých cyklů. Vůči svému okolí se hystereze projevuje změnou výstupního napětí při dané teplotě, následující po cyklu s větší tepelnou náročností. Parametr sice nevykazuje závislost na teplotním koeficientu či časovém driftu, přesto ale dokáže snížit účinnost výchozí napěťové kalibrace.

V závislosti na požadavcích konkrétního zapojení nás mohou v souvislosti s napěťovou referencí zajímat i další parametry:

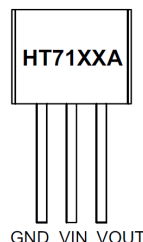
- kolísání výstupního napětí v závislosti na velikosti napájecího napětí (angl. Line Regulation / PSRR),
- kolísání výstupního napětí v závislosti na proudovém odběru zátěže (angl. Load Regulation). [60]

Pro napájení D/A převodníku byla zvolena napěťová reference od firmy Texas Instruments REF02AU. Jedná se o napěťovou referenci s výstupním napětím 5 V a počáteční přesností 0,3 %. Vyniká také výborným teplotním driftem 8,5 ppm/°C. Pro zapojení tohoto IO postačuje zapojit pouze tři piny V_{IN} , V_{OUT} a GND. Význam jednotlivých vysvětluje obrázek 8.11.



Obr. 8.11 Význam jednotlivých pinů napěťové reference REF02AU [60]

Druhou referencí je HT7130A pro napájení snímače SHT25 od firmy Holtek v pouzdru TO-92. Reference má na výstupu napětí 3 V s počáteční přesností 5 %. Výhodou této reference je, že pro napájení ji postačuje 5 V. Výstup lze zatížit proudem až 30 mA.

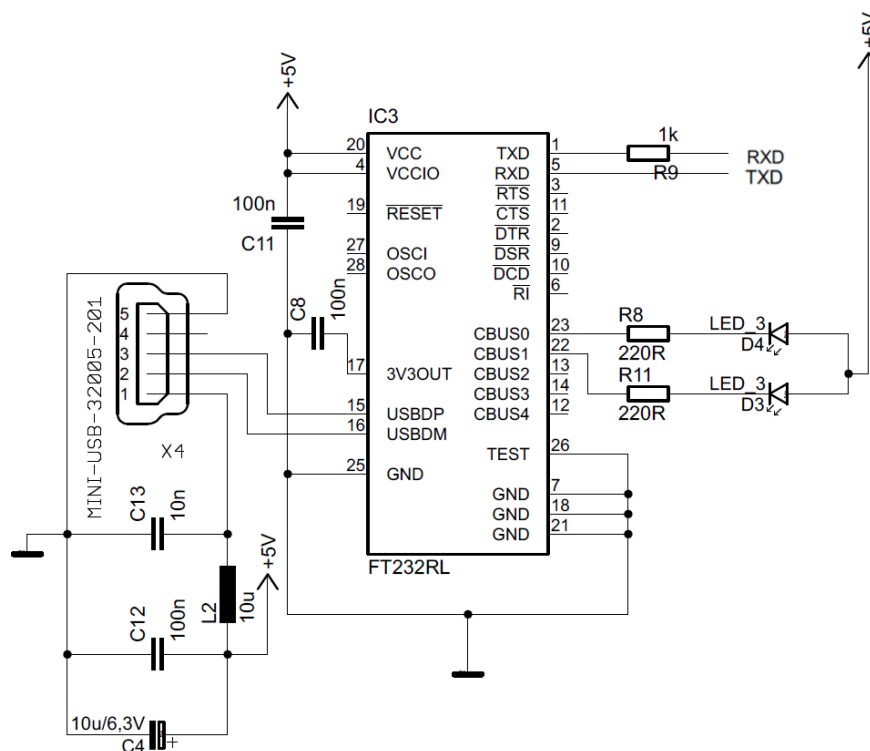


Obr. 8.12 Význam jednotlivých pinů napěťové reference HT7130A [16]

8.6 OBVOD FTDI FT232RL

Obvod FT232RL umožňuje převod komunikační linky USB na rozhraní RS232, kterým disponuje mikrokontrolér. Komunikační linku USB obsahují všechny počítače, proto bylo použito tohoto převodníku komunikačních protokolů. Velkou výhodou je, že uživatel nepotřebuje znát detailní způsob komunikace přes USB a programovat pro ni obslužné algoritmy. Zapojení převodníku FT232RL k mikrokontroléru ukazuje obrázek 8.13. Samotný obvod je napájen ze sběrnice USB.

Pro minimalizaci rozměrů byl vybrán konektor mini USB. Příjem a vysílání dat je indikováno pomocí led diod připojených na piny CBUS0 a CBUS1. [12]



Obr. 8.13 Zapojení převodníku FT232RL

Pro komunikaci pomocí USB je zapotřebí do počítače nainstalovat ovladače VCP, které vytvoří virtuální sériový port a D2XX rozhraní, které umožňuje aplikačnímu programu komunikovat s FT232RL pomocí kódu uloženého v dynamické knihovně. Veškeré ovladače a postup instalace jsou k dispozici na stránkách výrobce. [12]

8.7 OBVOD REÁLNÉHO ČASU DS1307

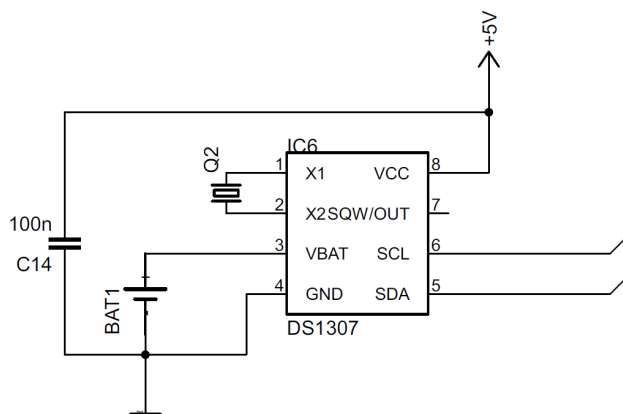
Pro zjišťování reálného času lze použít čítač/časovač mikrokontroléru. Nevýhodou ovšem toho řešení je zajištění trvalého napájení mikrokontroléru. Díky tomuto řešení by docházelo k zatěžování mikrokontroléru výpočty. Z těchto důvodů je použito řešení s obvodem reálného času DS1307 od firmy Dallas Semiconductors. Tento obvod poskytuje informaci o sekundách, minutách, hodinách, dnech, měsících a rocích. Může pracovat jak v 12-ti hodinovém tak 24-ti čtyř hodinovém cyklu. Má ošetřeny počty dnů v měsíci až do roku 2100 i s přestupnými roky. Pro komunikaci je použita sběrnice I²C. [8]

Údaje o času a datu jsou uloženy v osmi registrech, ze kterých je možno tyto údaje vyčíst. Organizace samotného registru ukazuje tabulka 8.1. Při nastavování data a času se do registru zapíše aktuální hodnoty, od kterých se následně začne čítat.

Tab. 8.1 Organizace vnitřní paměti DS1307 [8]

	Bit7	Bit6	Bit5	Bit4	Bit3	Bit2	Bit1	Bit0
00h	CH	10 SECONDS			SECONDS			
01h	X	10 MINUTES			MINUTES			
02h	X	12/24	^{10 HR} A/P	10HR	HOURS			
03h	X	X	X	X	X	DAY		
04h	X	X	10 DATE		DATE			
05h	X	X	X	¹⁰ MONTH	MONTH			
06h	10 YEAR				YEAR			
07h	OUT	X	X	SO	X	X	RS1	RS0

Obrázek 8.14 znázorňuje zapojení obvodu reálného času DS1307. K obvodu se zapojuje záložní baterie pro uchování informace času i po ztrátě napájení.

**Obr. 8.14** Zapojení obvodu reálného času DS1307

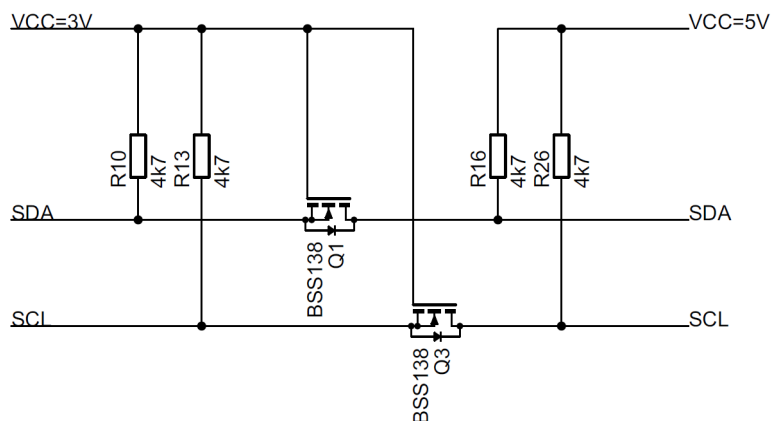
8.8 OBOUSMĚRNÝ PŘEVODNÍK NAPĚŤOVÝCH ÚROVNÍ PRO SBĚRNICI I²C

Pro komunikaci mikrokontroléru se snímačem teploty a vlhkosti SHT25 je zapotřebí upravit napěťové úrovně, a to z důvodů rozdílného napájecího napětí obou obvodů. Z toho vyplývá i odlišná logická úroveň pro komunikaci na sběrnici I²C. Mikrokontrolér je napájen 5 V a senzor SHT25 je napájen 3 V. Komunikace probíhá oběma směry a proto je nutné použít obousměrný převodník napětí. K tomuto účelu lze využít například zapojení, které znázorňuje obrázek 8.15 s jediným MOS-FET tranzistorem v každé komunikační lince.

Tento převodník úrovně umožňuje izolovat část sběrnice, ve které jsou připojena zařízení vypnutá, a tím umožňuje normální práci zařízením, která jsou stále napájena. Další důležitou vlastností tohoto obvodu je ochrana části s nižším napájecím napětím proti napěťovým špičkám z druhé části až do velikosti, kdy dojde k průrazu tranzistoru. Při správné funkci jsou předpokládány tři stavy, ve kterých sběrnice pracuje.

V prvním stavu žádné zařízení nepřistupuje na sběrnici, a proto úroveň signálů SDA a SCL jsou v logické nule. Část sběrnice s nižším napětím je připojena na napájení 3 V přes zvedací rezistory. Vstupy NMOS tranzistoru *gate* a *source* jsou připojeny na napájecí napětí 3 V. Potom je napětí U_{gs} nižší než napětí prahové U_{th} a tranzistor je uzavřen, což umožňuje druhé části sběrnice připojení přes zvedací rezistory na vyšší

napájecí napětí 5 V. Tím je na obou částech logická jednička i při rozdílných napětíových úrovních.



Obr. 8.15 Obousměrný převodník napětíových úrovní pro I^2C sběrnici [37]

Ve druhém stavu, kdy je zařízení napájené z 3 V, se připojí vodič sběrnice na úroveň logické nuly. Vstup *source* tranzistoru bude také v úrovni logické nuly, ale napětí na hradle tranzistoru zůstává na 3 V. Napětí U_{gs} je potom větší jak prahové napětí U_{th} a tranzistor je ve vodivém stavu. Nyní je i část 5 V systému připojena na úroveň logické nuly z 3 V systému přes otevřený tranzistor NMOS. Obě části systému se tedy nacházejí na úrovni logické nuly.

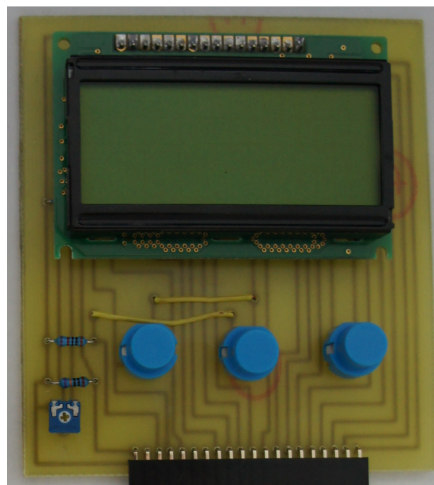
Ve třetím stavu je zařízení k pěti voltové části systému připojeno vodičem sběrnice na logickou nulu přes vstup *drain* – substrát NMOS tranzistoru, a tím je tři voltová část systému připojena k úrovni logické nuly z pěti voltové části systému. Poté i napětí U_{gs} bude větší jak prahové napětí U_{th} , tranzistor NMOS začne být vodivý a obě části systému budou na úrovni logické nuly. [37]

Hodnoty zvedacích odporů nejsou jednoznačně stanoveny a závisí na hodnotách napájecího napětí, délce a kapacitní zátěži datových vodičů sběrnice a požadavku náběžné a sestupné hrany.

8.9 ZOBRAZOVACÍ JENOTKA

Kompaktní snímač operativní teploty byl od samého počátku navrhován s možností zobrazování naměřených údajů na LCD displeji. Při návrhu ovšem nastal problém s velikostí displejů. Výsledné řešení bylo s displejem poměrně velké. Z tohoto důvodu byla zvolena vhodnější varianta oddělení displeje od snímače. Toto řešení se nakonec ukázalo jako výhodnější, a to z důvodů možnosti umístění snímače kdekoli v místnosti a displej je pak možné zabudovat v dosahu obsluhy.

Na trhu je k dispozici celá řada displejů od monochromatických přes barevné, grafické až po dotykové, které jsou trendem dnešní doby. Samozřejmě se jednotlivé varianty liší cenou. Bylo vybráno nejvhodnější řešení s poměrem cena/výkon, kterým je monochromatický LCD displej (Obr. 8.16), který disponuje celkem 16-ti znaky na řádek a obsahuje celkem čtyři řádky. To je zcela dostatečné pro zobrazování potřebných údajů. Schéma zapojení a návrh konstrukce jsou uvedeny v příloze 16.2.



Obr. 8.16 Monochromatický podsvětlený displej 16x4

8.10 NAPÁJECÍ ADAPTÉR

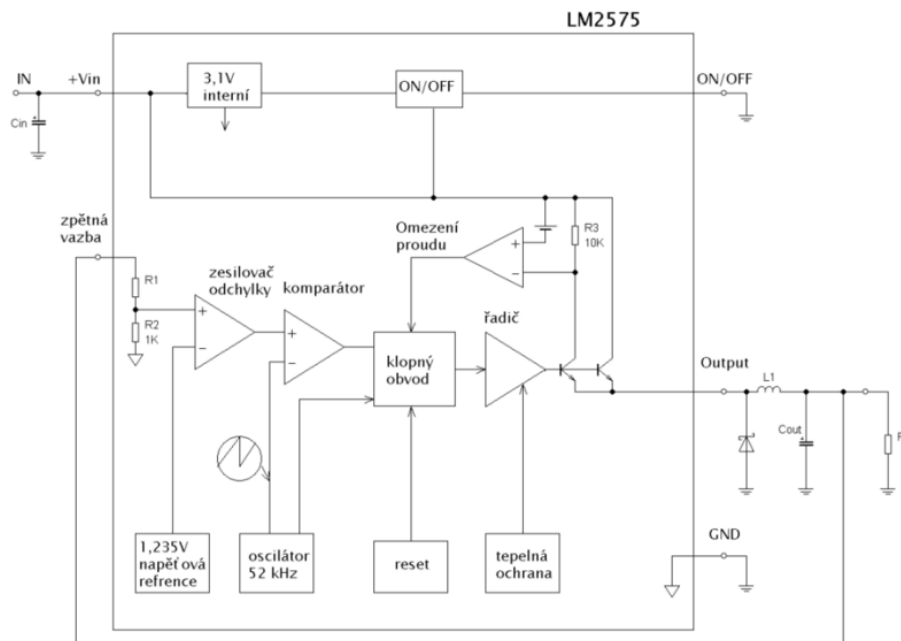
Kompaktní snímač operativní teploty potřebuje ke své činnosti dvě úrovně napájecího napětí 5 V a 15 V. Z důvodu dostupnosti síťového napětí 230 V ve všech budovách je vhodné použít síťový adaptér na 230 V, který by měl na svém výstupu potřebné obě napěťové úrovně. Na trhu ovšem není dostupný vhodný adaptér, který by se dal jednoduše použít. Z toho důvodu je proveden návrh stabilizovaného spínaného napájecího adaptéru, který je zobrazen v příloze 16.3. Obě napájecí větve by měly disponovat výkonem 1,5 W. Při návrhu adaptéru bude počítáno s patřičnou rezervou a výkon transformátoru bude dvojnásobně vyšší.

Pro stabilizaci napětí je použit IO od firmy National Semiconductor LM2575. Skutečnost proč nebyl vybrán klasický sériový stabilizátor napětí je taková, že na sériovém regulačním prvku (tranzistoru) se ztrácí výkon rovný součinu výstupního proudu a rozdílu vstupního a výstupního napětí. Tento výkon se přeměňuje na nežádoucí teplo, které je nutné odvést ze zařízení.

Ve spínaném stabilizátoru sériový regulační prvek pracuje ve spínacím režimu, kdy proud prochází při minimálním napětí (stav saturace) a napětí je na regulačním prvku při minimálním proudu (rozeprnutý stav). Rozptýlovaný tepelný výkon má minimální hodnotu. Nevýhodou spínaného stabilizátoru je vznik zvlnění výstupního napětí způsobeného principem činnosti. Uvedenou nevýhodu je nutné účinně potlačit výstupním LC filtrem.

Blokové schéma na obrázku 8.17 vysvětluje funkci spínaného stabilizátoru LM2575 s nejjednoduššími základními periferními prvky. Napětí na výstupu stabilizátoru je děleno děličem napětí tvořeným rezistory R1 a R2. Struktura umožňuje nastavení hodnoty R2 a tím určení výstupního napětí.

Výstupní napětí děliče je porovnáváno s napětím vnitřního referenčního zdroje a odchylka je zesilována zesilovačem. Výstup zesilovače je veden na vstup komparátoru, na jehož druhý vstup je přiveden signál oscilátoru o pilovém časovém průběhu. Na výstupu komparátoru se tak získává napětí obdélníkového průběhu se střídou modulovanou vstupním napětím. Tímto signálem je ovládán klopný obvod, který řídí řadič spínacích tranzistorů. Na konci periody je klopný obvod uváděn do klidového stavu pomocným signálem oscilátoru. [42]



Obr. 8.17 Blokové schéma spínaného stabilizátoru LM2575[42]

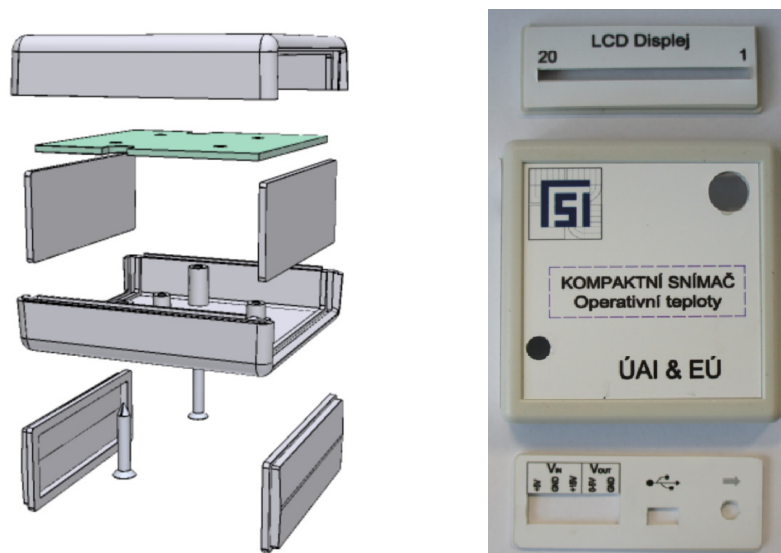
Tepelná ochrana je založena na nárůstu klidového proudu v bipolárním tranzistoru. Při překročení prahové hodnoty blokuje činnost řadiče spínacích tranzistorů. Proudová ochrana srovnává úbytek napětí na odporu v kolektoru spínacího tranzistoru s vnitřní referencí. Po překročení prahové hodnoty nedovolí překlopení klopného obvodu.

Vlastní spínací tranzistor je tvořen paralelní strukturou dvou tranzistorů. Pro správnou funkci je nutná dokonalá shoda parametrů obou tranzistorů. Toho lze dosáhnout souběžnou výrobou obou tranzistorů na společném čipu technologiemi výroby monolitických obvodů.

8.11 POUZDRO KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty

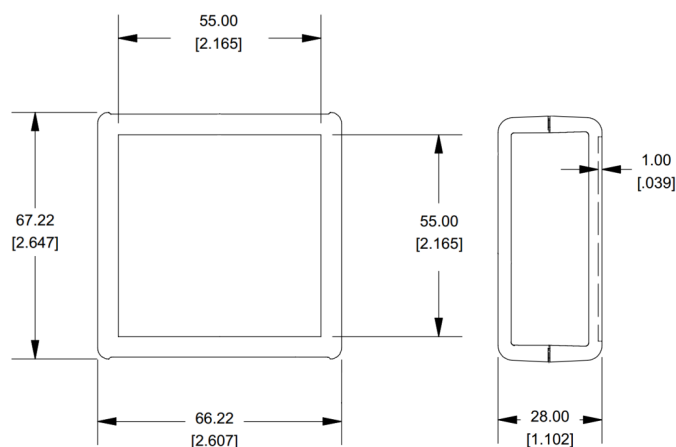
Jednotlivé elektronické části vyvíjeného snímače již byly popsány a před samotným návrhem desky plošného spoje je zapotřebí navrhnout pouzdro, do kterého se snímač vloží. Kompaktní snímač by měl být umístěn v místnosti na zdi popřípadě zapuštěn do stěny. Snímač by neměl být příliš rozměrný, aby v místnosti nevzbuzoval pozornost.

Nejprve bylo uvažováno vyrobení pouzdra na míru, ale toto řešení bylo brzy zamítnuto z důvodu vysoké ceny výroby při malém odběru. Navíc není zcela jisté, zda by se podařilo navrhnout konstrukci pouzdra napoprvé. Z tohoto důvodu byl zvolen výběr pouzdra z dostupných typových vzorů. Přijatelným řešením je pouzdro od firmy Hammond Manufacturing 1593K, které zobrazují obrázky 8.18 a 8.19.



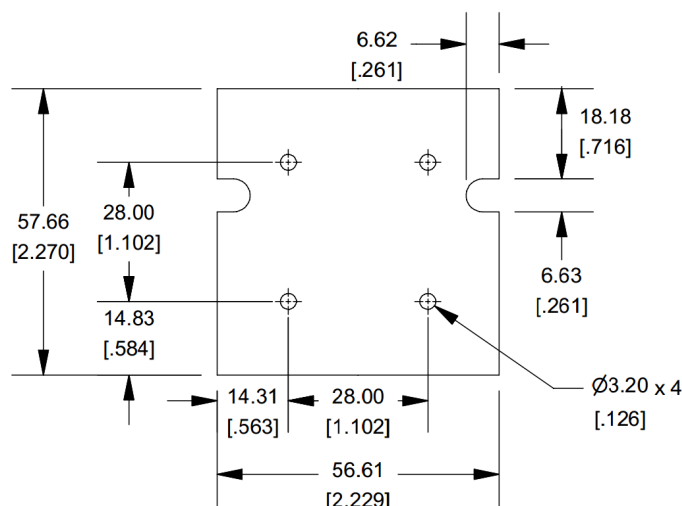
Obr. 8.18 Krabička Hammond 1593K [13]

Jedná se o krabičku z plastu složenou ze čtyř dílů, přičemž existuje možnost si zvolit ze dvou druhů čelních dílů. Může se jednat o hladkou destičku, která je vnořena do krabičky nebo profilovanou a lícující se zbytkem krabičky. Šířka krabičky je 55 mm, výška 67 mm a hloubka 28 mm. Krabička se skládá dohromady pomocí dvou šroubů.



Obr. 8.19 Rozměry krabičky Hammond 1593K [13]

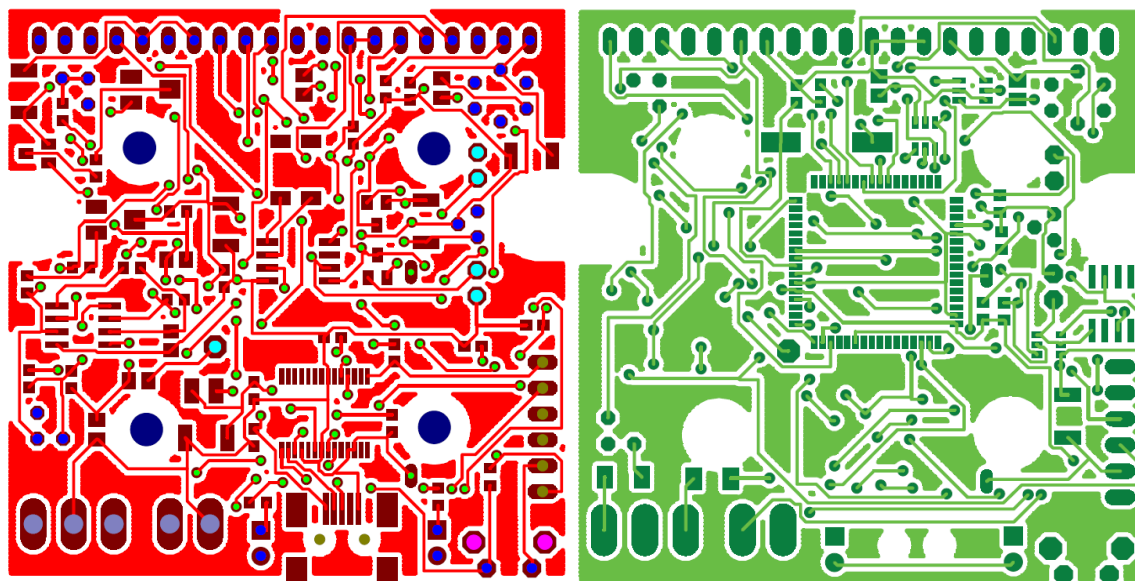
Do krabičky je možné umístit desku plošného spoje s rozměry 57 mm x 56 mm. Další rozměry a vzhled desky plošného spoje ukazují obrázek 8.20. Desku je možné ke krabičce připevnit pomocí čtyř šroubů.



Obr. 8.20 Rozměry desky plošného spoje [13]

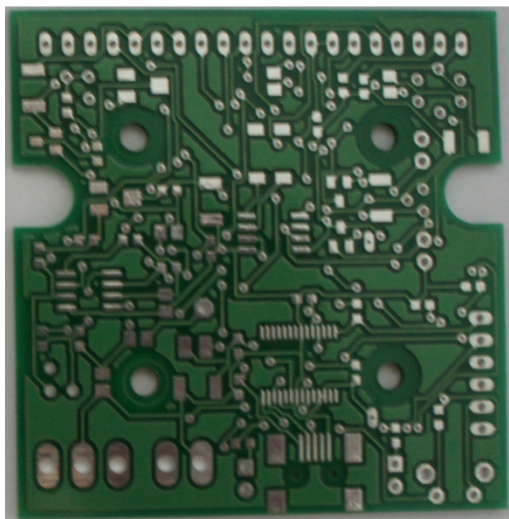
8.12 NÁVRH PLOŠNÉHO SPOJE

Návrh plošného spoje byl vytvořen v programu EAGLE. Finální podobu návrhu znázorňuje obrázek 8.21. Jedná se o oboustrannou desku plošného spoje. Návrh zapojení se podařilo umístit na poměrně malou plochu zvolené desky. Samotná náročnost desky z hlediska výroby byla určující pro zvolení výroby firmou APAMA sídlící v Brně.



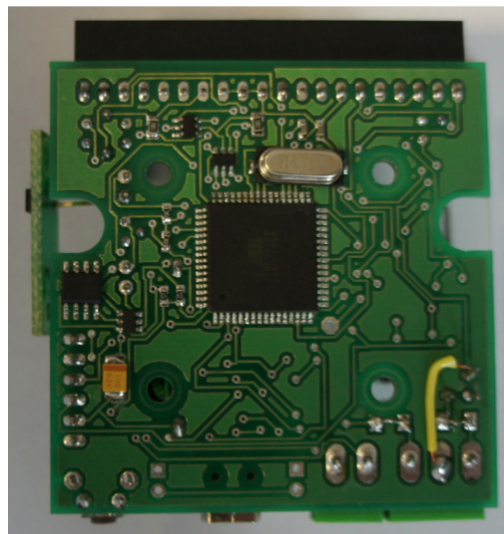
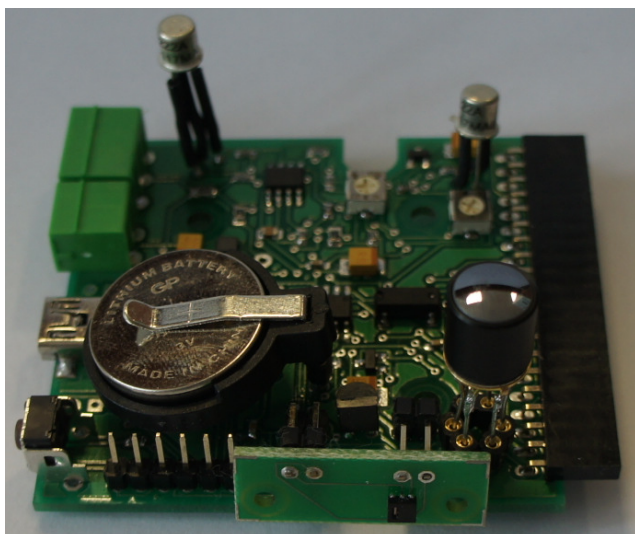
Obr. 8.21 Návrh oboustranného plošného spoje

Výslednou podobu desky plošného spoje ukazuje obrázek 8.22. Cena osazení desky součástkami je pro kusovou výrobu vysoká. Z tohoto důvodu bylo provedeno osazení ručně, v podmínkách laboratoře. Výslednou desku plošného spoje osázenou součástkami popsanými v textu výše znázorňuje obrázek 8.23.



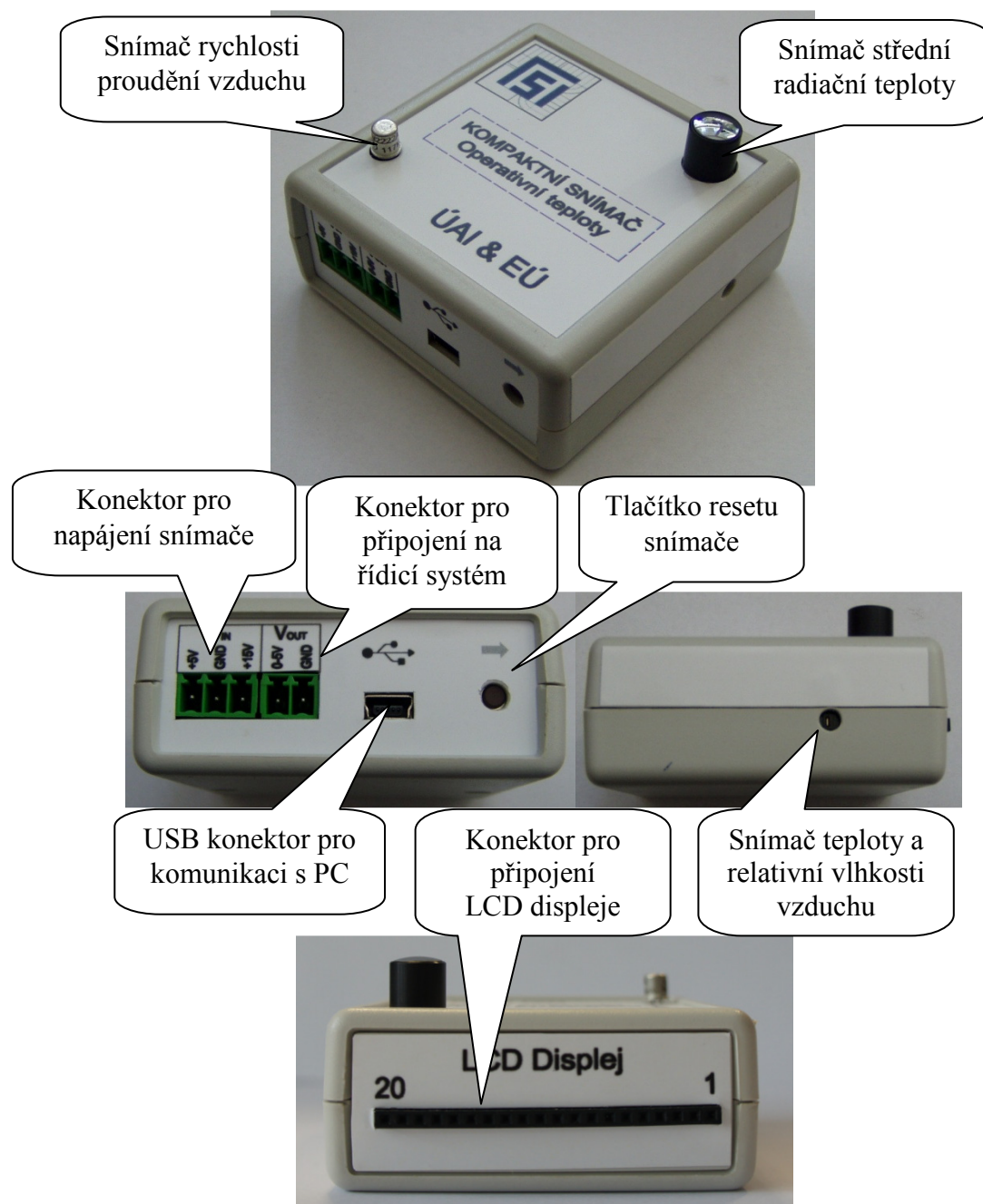
Obr. 8.22 *Finální podoba desky plošného spoje*

Při umísťování jednotlivých senzorů na desce plošného spoje bylo dbáno, aby se jednotlivé měřené veličiny navzájem neovlivňovaly. Jedná se zejména o vhodné umístění vyhřívaného tranzistorového anemometru, který nesmí ovlivňovat měření teploty a měření střední radiační teploty.



Obr. 8.23 *Osazená deska plošného spoje kompaktního snímače operativní teploty*

Na obrázku 8.24 je konečná podoba snímače. V horní části kompaktního snímače je umístěn snímač střední radiační teploty a vyhřívaný tranzistorový termoanemometr. Čočka snímače je umístěna tak, aby periferně nezabírala teplotu žhaveného elementu. Z boku krabičky je umístěn snímač teploty vzduchu a relativní vlhkosti SHT25. Tímto je zamezeno, aby byla měřená teplota vzduchu ovlivňována vyhřívaným elementem. V čelech krabičky jsou umístěny konektory pro napájení snímače, komunikaci s počítačem, pro zasílání operativní teploty nadřazenému řídicímu systému v podobě unifikovaného napětíového signálu a pro zobrazování naměřených dat na displeji.



Obr. 8.24 Finální podoba kompaktního snímače operativní teploty

9. OVĚŘENÍ PARAMETRŮ SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLOTY

Kalibrace akreditovanými pracovišti jsou poměrně nákladné, proto bylo ověřování snímače prováděno v laboratorních podmínkách, na základě kterého byly zjištěny technické parametry vyvinutého snímače. Uvedený způsob ověřování snímače byl také zvolen z důvodů možného postupného „odladování“ vyvinutého kódu, na jehož základě mikrokontrolér pracuje. Další nevýhodou je, že kalibrace všech měřených veličin není možná na jednom akreditovaném pracovišti a samotnou operativní teplotu zatím kalibrovat nelze, neboť tato pracoviště nedisponují potřebným technickým vybavením.

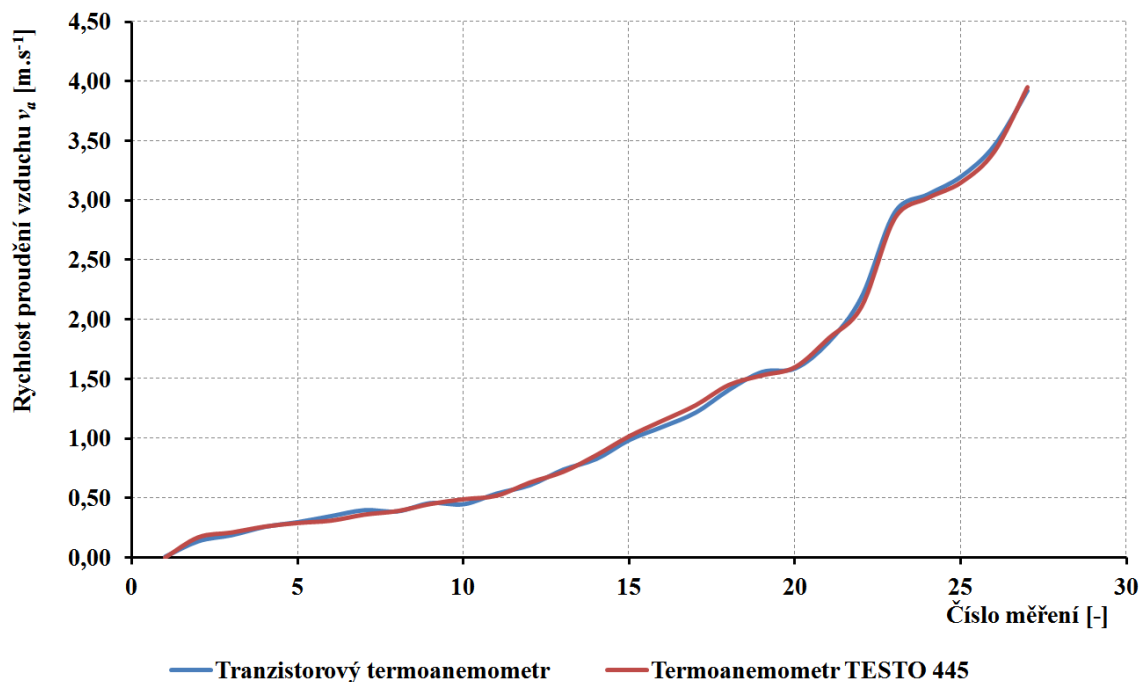
9.1 OVĚŘOVÁNÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU

Ověření přesnosti měření rychlosti proudění vzduchu spočívalo v porovnávání vyvinutého tranzistorového termoanemometru s etalonem, kterým byl termoanemometr TESTO 445 s kuličkovou sondou. Měření bylo uskutečněno v ověřovacím tunelu (Obr. 9.1), který byl popsán v kapitole 7.2.5 a probíhalo pro rostoucí i pro klesající proudění vzduchu v rozmezí 0 m.s^{-1} až 4 m.s^{-1} . Z naměřených hodnot v uvedeném rozsahu s náhodným krokem byl sestaven graf pro rostoucí rychlost proudění vzduchu zobrazený na obrázku 9.2.

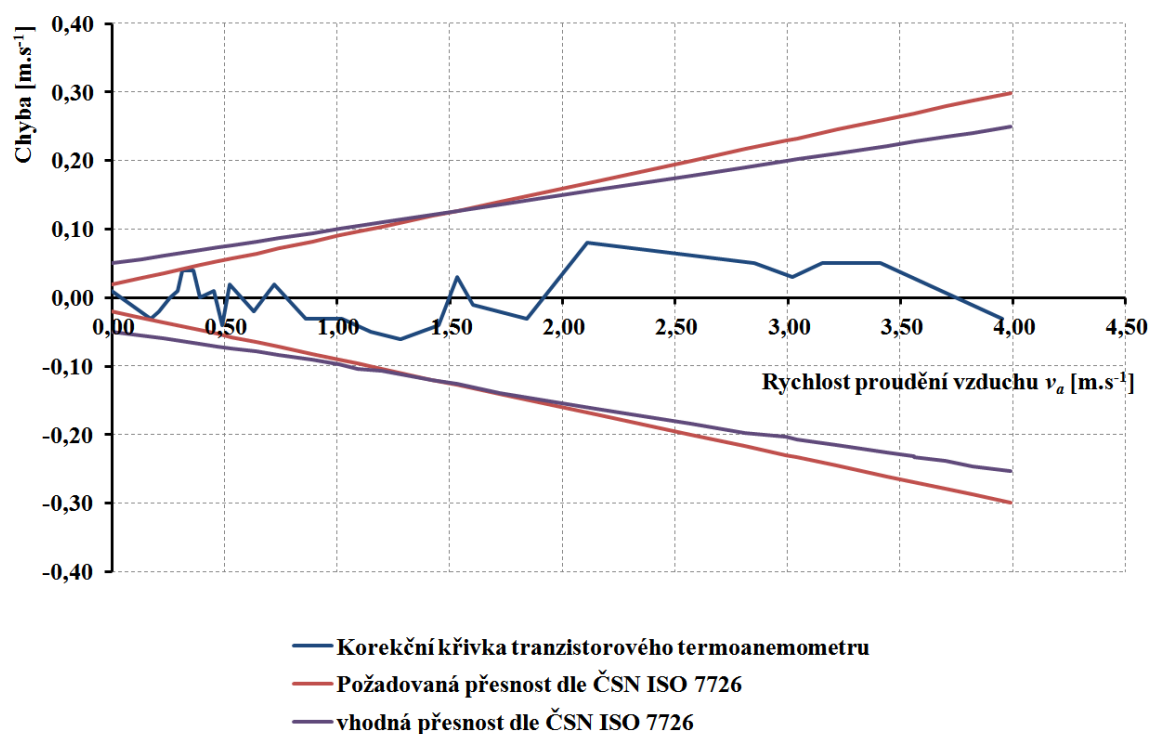


Obr. 9.1 Měřicí pracoviště pro ověření rychlosti proudění vzduchu kompaktního snímače operativní teploty

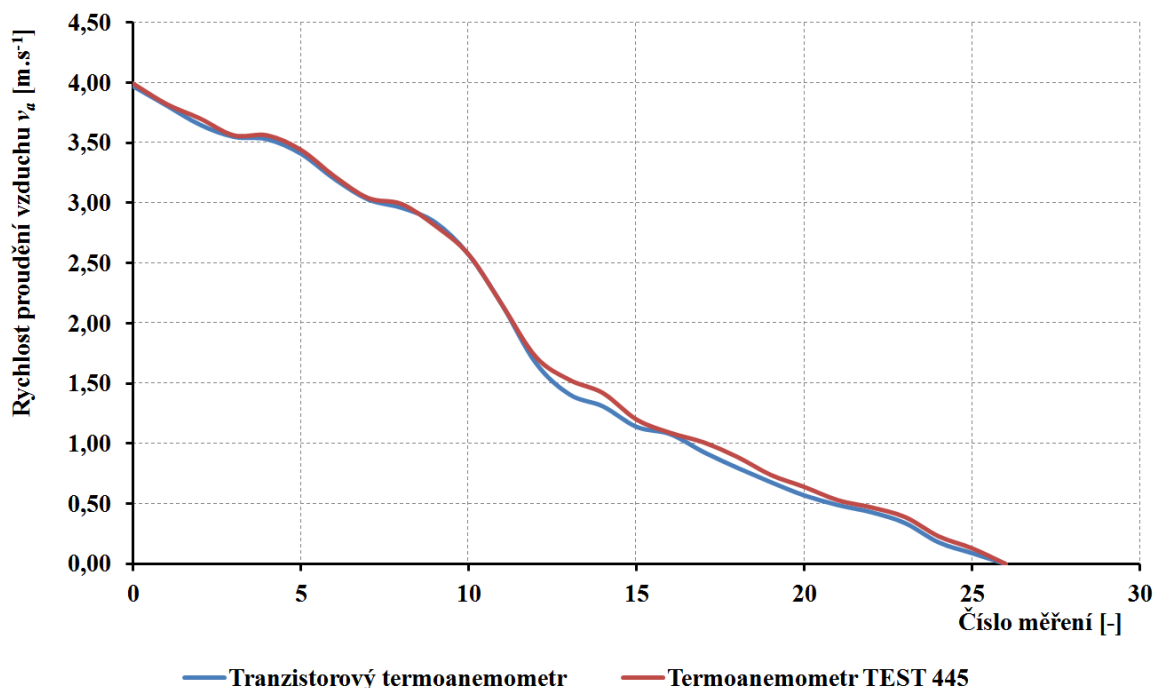
Z naměřených dat byla následně vypočítána chyba měření, která byla následně vynesena do grafu (Obr. 9.3). V grafu lze vidět i požadovanou přesnost dle normy ČSN EN 7726. Norma uvádí přesnost požadovanou, která je vynesena v grafu fialovou barvou a přesnost vhodnou, vynesenu v grafu barvou červenou. Přesnost vyvinutého tranzistorového anemometru se po porovnání naměřených a požadovaných hodnot dle normy do této tolerance nevešla. Norma ČSN EN 7726 požaduje rozsah měření od 0 m.s^{-1} do 1 m.s^{-1} . Rozsah tranzistorového termoanemometru je od 0 m.s^{-1} do 4 m.s^{-1} , což odpovídá normě.



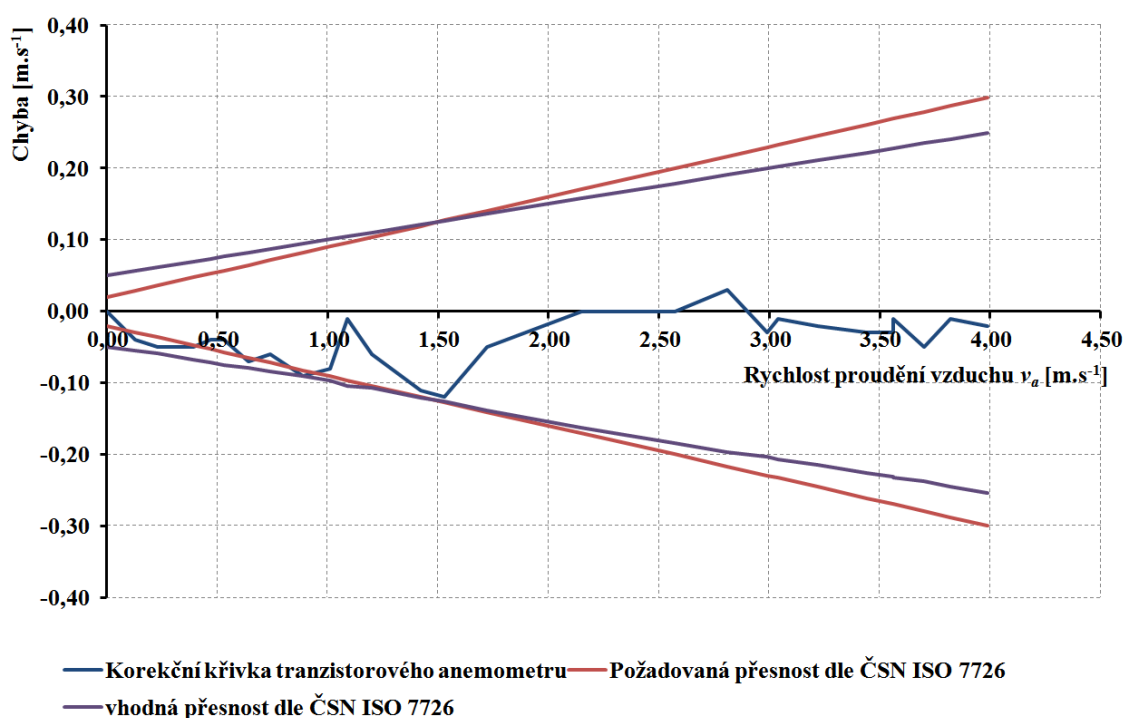
Obr. 9.2 Rychlost proudění vzduchu termoanemometru TESTO a tranzistorového termoanemometru pro zvyšující se rychlost proudění vzduchu



Obr. 9.3 Korekční křivka tranzistorového termoanemometru pro zvyšující se proudění

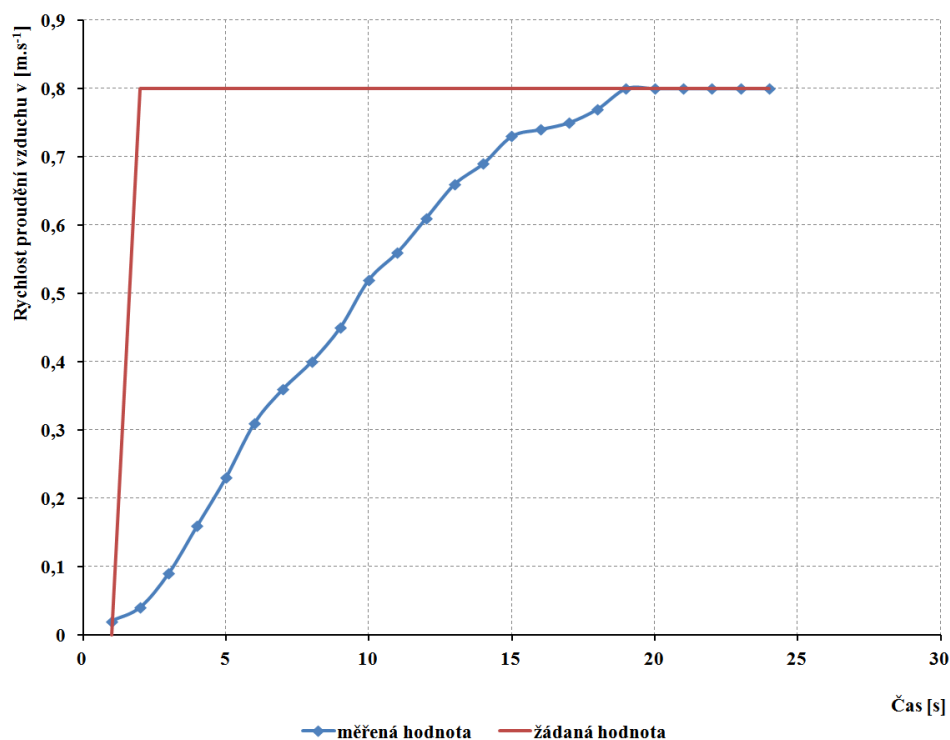


Obr. 9.4 Rychlost proudění vzduchu termoanemometru TESTO a tranzistorového termoanemometru pro klesající rychlost proudění vzduchu



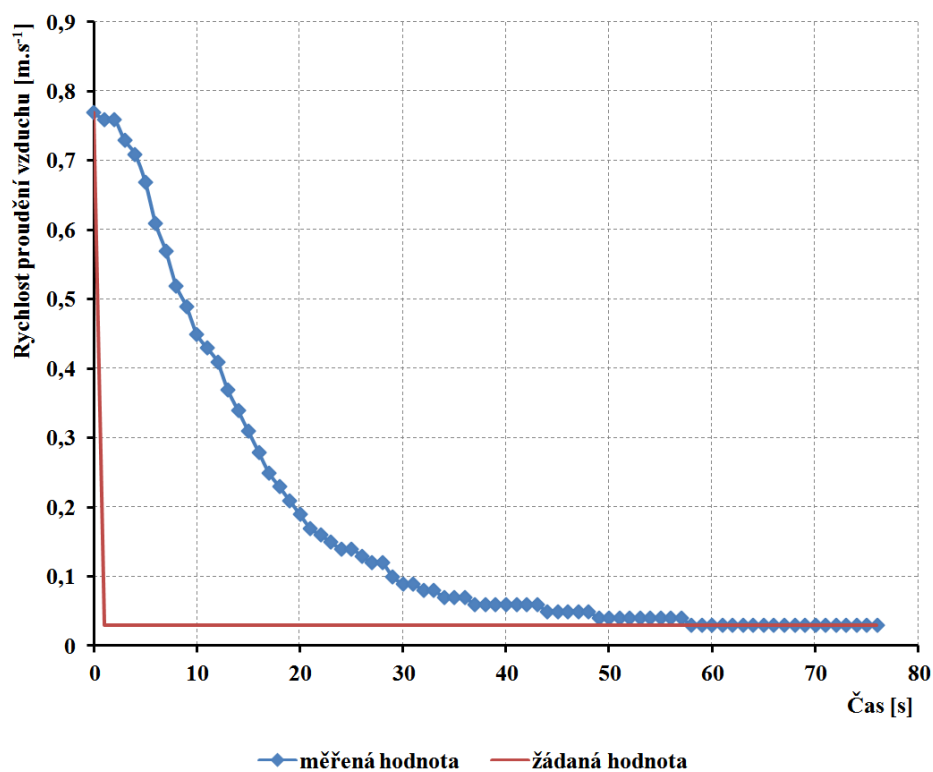
Obr. 9.5 Rychlost proudění vzduchu termoanemometru TESTO a tranzistorového termoanemometru pro klesající rychlost proudění vzduchu

Poslední ověřovanou vlastností snímače je časová konstanta. Měření probíhalo opět pro rostoucí a klesající rychlost proudění vzduchu. Pro rostoucí rychlost proudění byl proveden jednotkový skok z 0 na $0,8 \text{ m.s}^{-1}$. Což je 80 % z požadovaného rozsahu, který má být dle normy 0 až 1 m.s^{-1} . Průběh časové odezvy lze vidět na obrázku 9.6. Z grafu lze odhadnout, že časová konstanta činí pro rostoucí rychlost proudění vzduchu 10 s.



Obr. 9.6 Závislost rychlosti proudění vzduchu v čase pro tranzistorový termoanemometr (rostoucí hodnota proudění)

Pro klesající rychlost proudění vzduchu byl proveden jednotkový skok z $0,77 \text{ m.s}^{-1}$ na 0 m.s^{-1} . Jedná se o 77% zásah z požadovaného rozsahu. Časová odezva byla pomalejší oproti rostoucí rychlosti proudění a z grafu (obr. 9.7) lze odhadnout hodnotu časové konstanty 16 s.



Obr. 9.7 Závislost rychlosti proudění vzduchu v čase pro tranzistorový termoanemometr (klesající hodnota proudění)

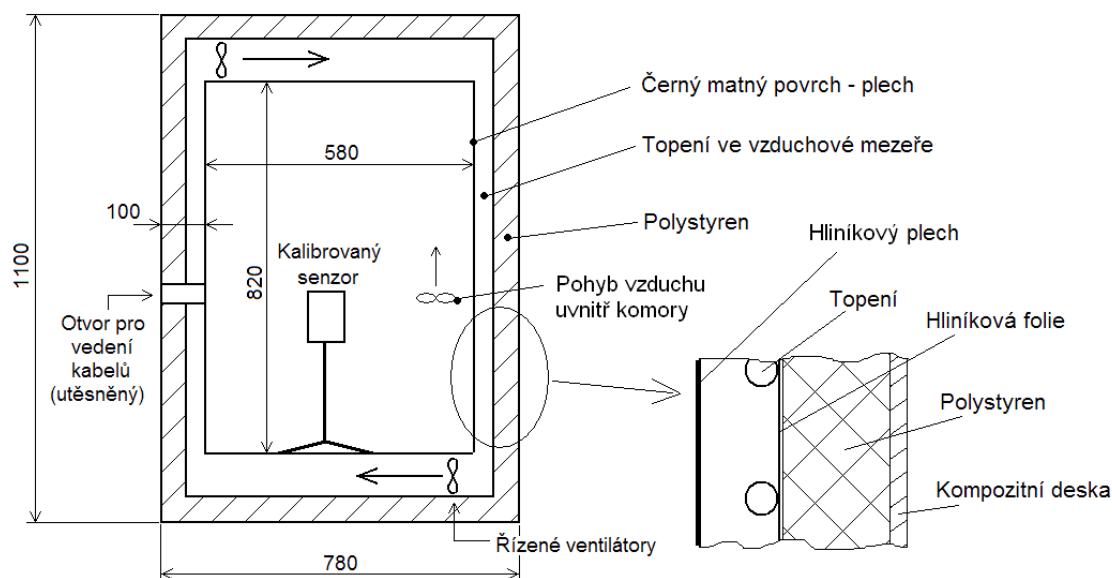
9.2 OVĚŘOVÁNÍ STŘEDNÍ RADIČNÍ TEPLOTY A TEPLoty VZDUCHU V KALIBRAČNÍ KOMOŘE

Ověření střední radiční teploty a teploty vzduchu nebylo možno v prostředí laboratoře provést z důvodů celé řady rušivých vlivů. Jedná se zejména o průvan, mění se teplotu povrchů vlivem slunečního záření apod. Pro ověření přesnosti měření střední radiční teploty je zapotřebí vytvořit homogenní podmínky, což v laboratoři není možné. Z těchto důvodů byla v rámci projektu GAČR vyvinuta kalibrační komora ve spolupráci s Energetickým ústavem a Ústavem automatizace a informatiky, na které se autor práce podílel návrhem regulačního systému. Stručným popisem kalibrační komory se zabývá následující kapitola.

9.2.1 Řešení kalibrační komory

Pro kalibrační komoru je požadováno, aby povrch vnitřních stěn byl minimálně padesátkrát větší, než povrch čidel ve vnitřním prostoru, a to jak senzorů testovaných, tak senzorů k monitorování aktuálního tepelného stavu uvnitř komory. Při takovém uspořádání je možno uvažovat o radičních podmínkách na povrchu senzoru jako u malého tělesa ve velkém prostoru. Komora byla vytvořena tak, aby bylo bezproblémové použití sady relativně rozměrných senzorů pro měření tepelného stavu prostředí dle ČSN EN ISO 7726, jejíž součástí je také kulový teploměr o průměru 100 mm nebo 150 mm. Kalibrace vyhřívaných senzorů pro měření ekvivalentní teploty se provádí dle normy ČSN EN ISO 14505-2.

Zjednodušený náčrtek kalibrační komory ukazuje obrázek 9.8. Stěna komory má tři základní vrstvy. Nejsvrchnější vrstva má zejména funkci ochrannou, pevnostní, neboť tvoří „kostru“ celého zařízení. Druhá vrstva má izolační funkci a slouží také jako nosný prvek topných elementů. Třetí vrstvu tvoří vnitřní vestavba, uvnitř které je již samotný kalibrační prostor.



Obr. 9.8 Zjednodušený náčrtek kalibrační komory [40]

Tepelné podmínky je možno řídit regulátorem (Obr. 9.9) vyvinutým, na míru pro kalibrační komoru, manuálně nebo automaticky, na základě údajů ze snímačů teploty DALLAS 18B20 zabudovaných v každé stěně kalibrační komory. Ty jsou odolné vůči elektromagnetickému rušení a jsou odstíněny od radičního záření z topných kabelů.

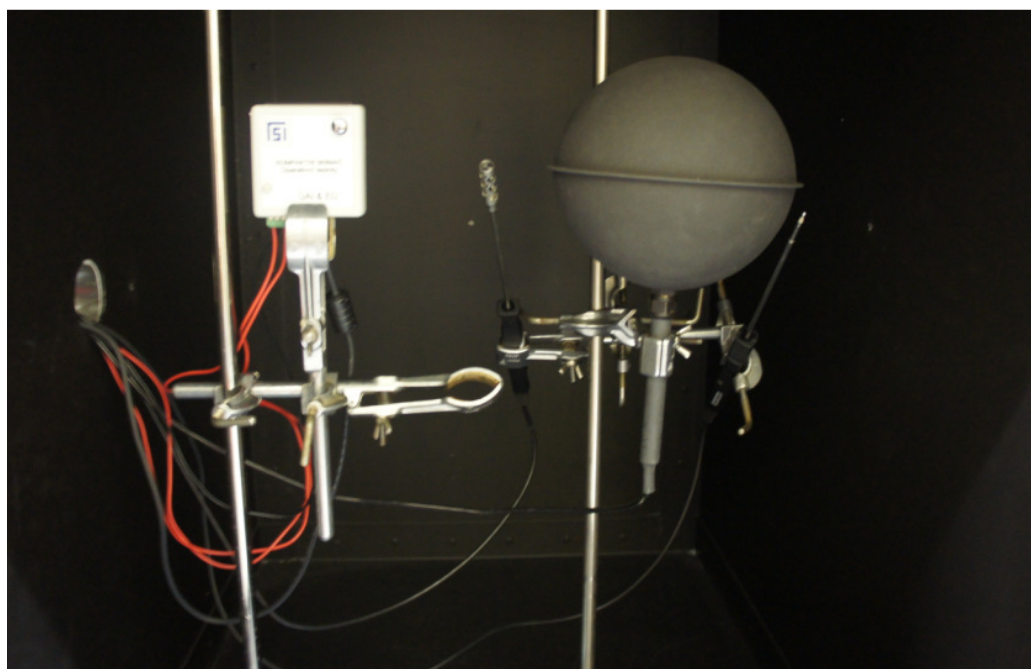
V případě automatického provozu celý systém řídí Mikrokontrolér ATMEL řady ATMeaga 32. V komoře je možno nastavit různé režimy provozu podle požadavků na kalibraci určitých senzorů. Lze měnit teplotu vzduchu, rychlost proudění vzduchu i zajistit homogenitu či nehomogenitu radiačních podmínek.



Obr. 9.9 Regulátor teplot stěn kalibrační komory

9.2.2 Výsledky ověřování střední radiační teploty a teploty vzduchu v kalibrační komoře

Ověření snímačů střední radiační teploty A2TPMI334 a teploty vzduchu SHT25 bylo uskutečněno v kalibrační komoře popsané v předchozí kapitole. Dolní rozsah měření je závislý na okolní teplotě vzduchu, protože kalibrační komora neobsahuje chlazení. Ověření probíhalo v rozsahu teplot 21 °C až 33 °C.



Obr. 9.10 Snímače umístěné v kalibrační komoře

Pro měření byla připravena sada pro měření tepelného stavu prostředí od firmy TESTO, která obsahovala kulový teploměr pro měření střední radiační teploty o průměru 150 mm. Kulový teploměr měří s přesností $\pm 0,5$ °C v rozsahu 0 °C až 50 °C. Pro měření

teploty vzduchu byla použita velmi přesná NTC sonda s rozsahem měření $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ s přesností garantovanou výrobcem $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ a rozlišením $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$. Poslední použitou sondou byla žhavená kuličková sonda pro měření rychlosti proudění vzduchu, která byla popisována v předchozích kapitolách. Do kalibrační komory byla umístěna tato sada spolu s ověřovaným kompaktním snímačem operativní teploty. Pohled dovnitř komory spolu s ověřovanými snímači ukazuje obrázek 9.10.

Samotné měření probíhalo postupným zvyšováním teploty v uvedeném rozsahu vždy o $2\text{ }^{\circ}\text{C}$. K ustálení teplot v komoře došlo přibližně po hodině měření a poté byly odečteny jednotlivé hodnoty teplot a rychlosti proudění vzduchu. Celé měřicí pracoviště zobrazuje obrázek 9.11.

V následujících tabulkách 9.1, 9.2, 9.3 jsou zaznamenány naměřené a vypočtené hodnoty jednotlivých teplot.

Z hodnoty teploty kulového teploměru, teploty vzduchu v komoře a změřené rychlosti proudění vzduchu, byla vypočtena střední radiační teplota pomocí vztahu (4.14). Vypočtené hodnoty střední radiační teploty pro jednotlivě nastavené teploty stěn uvádí tabulka 9.2. Tato vypočtená střední radiační teplota byla porovnána s hodnotou naměřenou pomocí snímače A2TPMI334 a byla vypočtena absolutní chyba, která činila $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Všechny hodnoty absolutní chyby při ověřování střední radiační teploty jsou zaznamenány v tabulce 9.3.



Obr. 9.11 Měřicí pracoviště pro ověřování střední radiační teploty a teploty vzduchu

Teplota vzduchu byla porovnáována s velmi přesnou NTC sondou. Absolutní chyba teploty vzduchu snímače SHT25 v měřeném rozsahu činila $\pm 0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Všechny naměřené a

vypočtené hodnoty teploty vzduchu jsou zaznamenány v tabulce 9.3. Tímto se potvrdila hodnota uvedená v katalogu výrobce, který zaručuje maximální chybu 0,2 °C.

Tab. 9.1 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot stěn kalibrační komory

Žádaná teplota	Teplota stěn kalibrační komory						Průměrná teplota stěn
	čelo	levý bok	pravý bok	strop	dno	zadní čelo	
[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
21,0	21,1	20,9	21,1	21,0	21,1	21,0	21,0
23,0	23,1	22,9	23,1	23,1	23,0	22,9	23,0
25,0	25,2	25,3	25,3	25,2	25,4	25,1	25,3
27,0	27,0	27,2	27,1	27,3	26,9	27,0	27,1
29,0	29,1	28,9	28,9	29,0	28,8	29,0	29,0
31,0	30,1	30,9	30,9	31,3	31,1	31,2	30,9
33,0	33,2	32,9	33,1	33,4	32,9	33,0	33,1

Tab. 9.2 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot stěn kalibrační komory

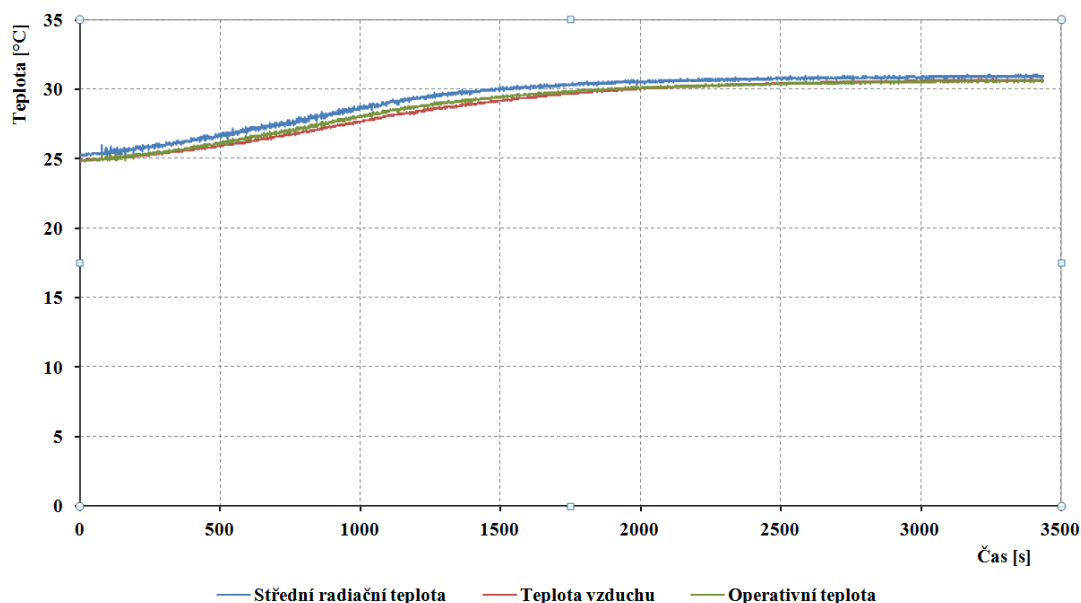
Sada TESTO			Střední radiační teplota
kulový teploměr	teplota vzduchu	rychlost proudění	
[°C]	[°C]	[m.s ⁻¹]	[°C]
20,9	20,7	0,00	20,9
22,9	22,9	0,02	22,9
25,0	24,8	0,01	25,0
26,8	26,7	0,01	26,8
28,8	28,9	0,01	28,8
30,7	30,5	0,01	30,7
32,9	32,8	0,03	32,9

Tab. 9.3 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot stěn kalibrační komory

Kompaktní snímač operativní teploty			Absolutní chyba	
teplota vzduchu	střední radiační teplota	rychlost proudění vzduchu	teplota vzduchu	střední radiační teplota
[°C]	[°C]	[m.s ⁻¹]	[°C]	[°C]
20,7	20,9	0,00	0,0	0,0
22,8	22,9	0,01	-0,1	0,0
24,6	25,1	0,02	-1,2	0,1
26,6	27,0	0,00	-0,2	0,2
28,7	28,7	0,03	-0,2	-0,1
30,5	30,6	0,02	0,0	-0,1
32,6	32,6	0,03	-0,2	-0,3

Z uskutečněných měření byla vynesena závislost střední radiační teploty, teploty vzduchu a operativní teploty na čase pro změnu teploty stěn z 25 °C na 31 °C (Obr. 9.12).

Časová konstanta činí přibližně 23 minut a je způsobena pomalým vytápěním jednotlivých stěn.

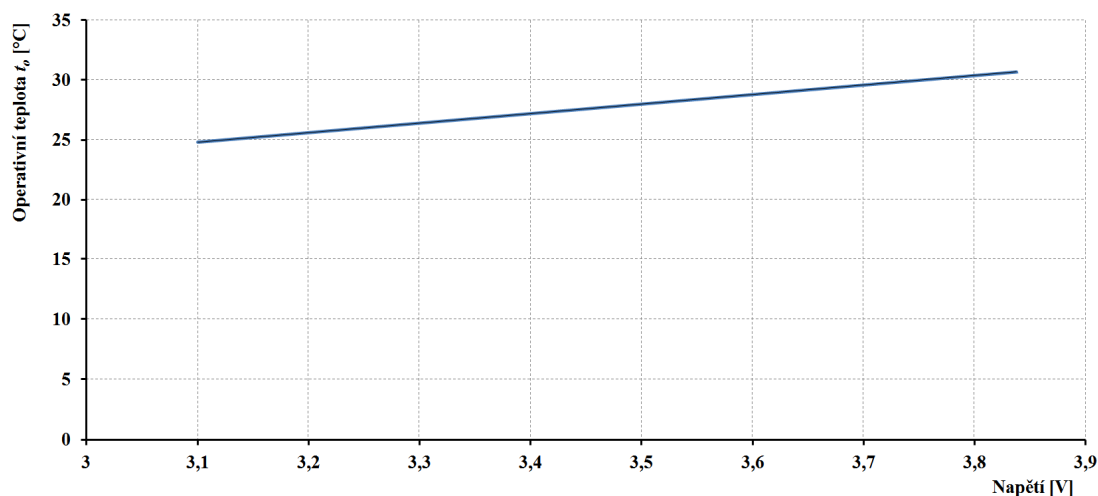


Obr. 9.12 Závislost jednotlivých teplot kompaktního snímače střední radiační teploty na čase v kalibrační komoře.

Při návrhu snímače, jak již bylo popsáno v kapitole 8, bylo uvažováno zasilání operativní teploty nadřazenému systému. Zasilání této informace je pomocí unifikovaného napěťového signálu v rozmezí 0 až 5 V, kterému odpovídá rozsah operativní teploty v rozmezí 0 °C až 40 °C. Výstupní závislost je lineární, jak ukazuje obrázek 9.13 a pro zpětný přepočítání výstupního napětí U_o na hodnotu operativní teploty platí (9.1)

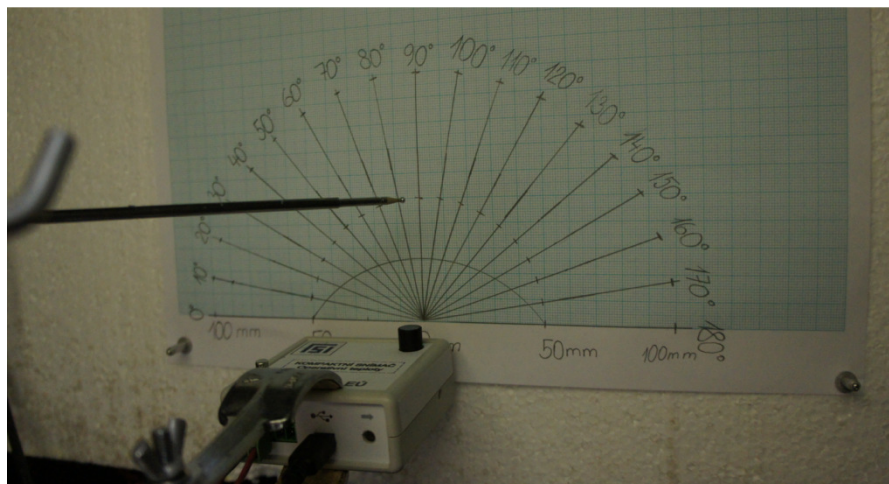
$$t_o = 8 \cdot U_o, \quad (9.1)$$

kde t_o je hodnota operativní teploty [°C],
 U_o hodnota výstupního napětí [V].



Obr. 9.13 Závislost operativní teploty na výstupním napětí kompaktního snímače operativní teploty

V kalibrační komoře byla také zjišťována citlivost snímače v celém poloprostoru, aby nedocházelo k ovlivňování měření vlivem parazitního infračerveného záření z okolí. Poloprostor byl rozčleněn po 10° a ve vzdálenosti 50 mm od čočky snímače byla postupně přemísťována žhavená kulička sondy TESTO pro měření rychlosti proudění vzduchu. Realizace experimentu je na následujícím obrázku 9.14.



Obr. 9.14 Závislost jednotlivých teplot kompaktního snímače střední radiační teploty na čase v kalibrační komoře.

Z naměřených výsledků (Tab. 9.3) lze vyhodnotit, že snímač je mírně závislý na úhlu dopadajícího záření. V poloprostoru teplota kolísala o $0,3^\circ\text{C}$.

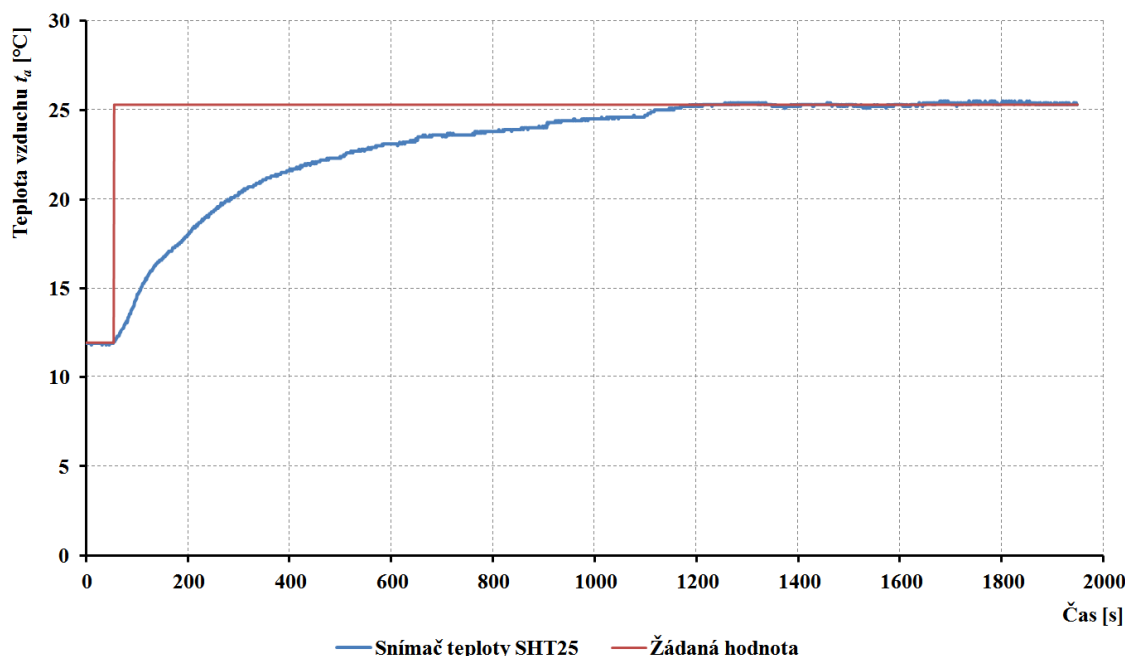
Tab. 9.3 Naměřené a vypočtené hodnoty teplot stěn kalibrační komory

Úhel	Radiační teplota
[$^\circ$]	[m.s^{-1}]
0	23,1
10	23,2
20	23,2
30	23,3
40	23,3
50	23,3
60	23,2
70	23,3
80	23,3
90	23,3
100	23,3
110	23,3
120	23,2
130	23,3
140	23,3
150	23,2
160	23,3
170	23,2
180	23,0

9.3 OVĚŘOVÁNÍ SNÍMAČE TEPLoty A RELATIVNÍ VLHKOSTI SHT25

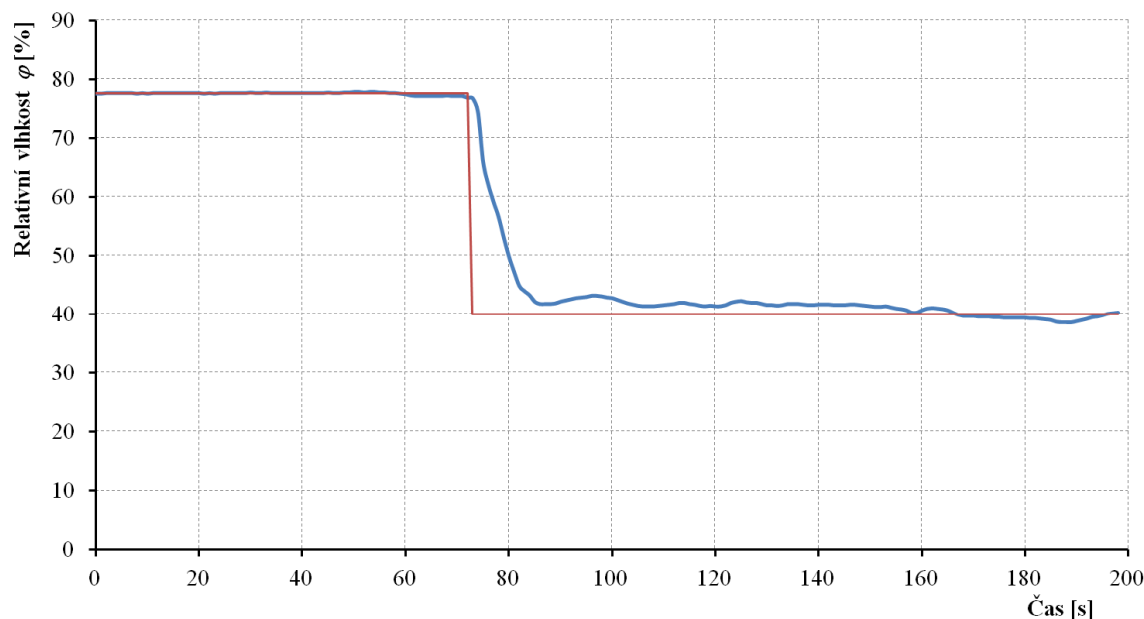
U snímače teploty a vlhkosti vzduchu byla ověřována odezva snímače na skokový vstupní signál. V tomto případě se jednalo o skokovou změnu teploty a relativní vlhkosti vzduchu.

Časová odezva na změnu teploty byla ověřována v chladicím boxu, do kterého byl snímač umístěn asi na půl hodiny. Poté byl z chladicího boxu umístěn do teploty okolního vzduchu. Miniaturní snímač vlhkosti a teploty vzduchu. Změna teploty byla z 12 °C na 25,3 °C. Časová odezva je zobrazena na obrázku 9.15. Časová konstanta τ činila 4,5 minuty. Hodnota je značně rozdílná oproti údajům výrobce, který zaručuje časovou konstantu snímače maximálně 30 s a typickou časovou konstantu výrobce uvádí 5 s. Pro uvedené hodnoty není výrobcem specifikován teplotní rozdíl jednotkového skoku. Na snížení rychlosti odezvy snímače má také vliv teplota pouzdra, ve které je snímač umístěn. Pro rychlejší odezvu snímače by bylo vhodné provést jeho lepší izolaci od pouzdra.



Obr. 9.15 Časová odezva snímače teploty SHT25 pro skokovou změnu teploty vzduchu

Také byla ověřována časová odezva kapacitního snímače vlhkosti SHT25. Byla měřena odezva na skokovou změnu z relativní vlhkosti 77,6 % na 40 %. Snímač byl umístěn do uzavřeného prostředí s vodou na přibližně 5 hodin a poté byl umístěn do okolního prostředí. Časovou odezvu snímače zobrazuje obrázek 9.16. Z naměřených hodnot byla zjištěna časová konstanta τ 7s. Stejnou hodnotu uvádí výrobce v technické specifikaci a měřením byla potvrzena.



Obr. 9.16 Časová odezva snímače vlhkosti SHT25 pro skokovou změnu relativní vlhkosti

9.4 ZHODNOCENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLOTY A NÁVRH JEHO MOŽNÝCH ÚPRAV

Výsledky ověřování tranzistorového snímače proudění ukazují poměrně dobrou přesnost. Měřená rychlost proudění byla porovnávána pomocí komerčního termoanemometru TESTO 445, který disponuje také jistou chybou měření, kterou je nutné zahrnout do celkové nejistoty měření pomocí tranzistorového termoanemometru. Z tohoto důvodu by bylo vhodné tranzistorový termoanemometr nechat zkalibrovat akreditovaným pracovištěm a na základě této kalibrace stanovit přesnost snímače. Při ověřování časové konstanty bylo zjištěno, že časová odezva na přibližně 80% změnu rychlosti proudění je poměrně dlouhá a činí 16 s. Norma požaduje časovou konstantu 1 s. Při menších změnách rychlosti proudění je časová konstanta podstatně rychlejší. Tímto senzorem není možno měřit intenzitu turbulence, pro kterou je potřeba mnohem rychlejší odezvu. Ovšem pro výpočet operativní teploty je vhodnější použít střední hodnotu rychlosti proudění vzduchu, kterou díky své setrvačnosti snímač poskytuje.

Teplota vzduchu byla měřena pomocí snímače SHT25, který má velmi malé rozměry a tudíž by měl mít velmi malou časovou konstantu. Výrobce uvádí hodnotu časové konstanty 5 s. Při ověřování však tato hodnota nebyla docílena. Důvodem je zřejmě poměrně velká plocha desky plošného spoje, která se ustálí na teplotě okolního vzduchu a při velkých změnách teploty způsobuje velkou setrvačnost pro docílení tepelné rovnováhy. Tento jev lze odstranit úpravou stávajícího řešení, které spočívá v minimalizaci desky plošného spoje. Přesnost měření teploty vzduchu odpovídá hodnotě uvedené v katalogu výrobce a činí $\pm 0,2$ °C.

Snímač dále umožňuje také měření relativní vlhkosti vzduchu, u kterého byla zjišťována časová konstanta, která činí 7 s. Zjištěná hodnota odpovídá specifikaci výrobce.

Poslední měřenou veličinou je střední radiační teplota, která byla ověřována v kalibrační komoře vyvinuté pro tyto účely v rámci projektu GAČR. Časová odezva navrženého snímače je podstatně lepší než v případě použití kulového teploměru. Komořka má poměrně velkou setrvačnost, proto nebylo možné hodnotu časové konstanty změřit. Ale ze zkušeností v průběhu vývoje způsobu měření střední radiační teploty je časová konstanta maximálně v řádech sekund. Nevýhodou zvoleného řešení při použití čočky pro

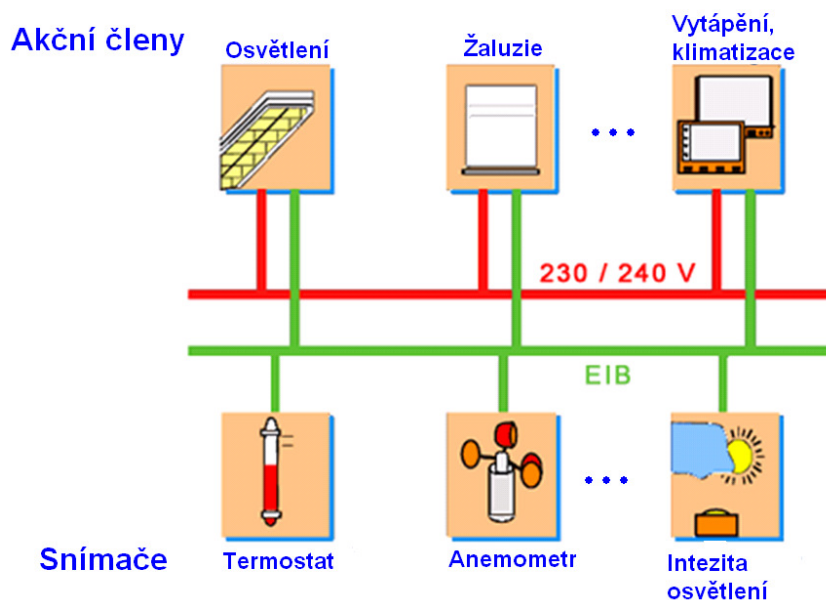
dosažení zorného úhlu 180° je snížení propustnosti IR záření k vlastnímu detektoru senzoru a tím nesprávně změřená střední radiální teplota. Díky kalibraci v komoře bylo možné určit konstantu, která vyrovnává hodnotu propustnosti. Dále byla ověřována citlivost snímače na IR záření dopadající pod různým úhlem a bylo zjištěno, že v celém rozsahu zorného úhlu není hodnota výsledné teploty stejná. Je to dáno částečným odrazem IR záření od povrchu čočky. Tuto chybu metody však nelze odstranit a je nutné ji započíst do výsledné nejistoty měření. Samotná přesnost snímače je definována výrobcem na 1°C , která se také z prováděných měření potvrdila.

V práci byly popsány a prezentovány výsledky poslední funkční verze snímače. Z důvodu přehlednosti práce nebyly popisovány neúspěchy v průběhu vývoje snímače. Z posledních uskutečněných měření vyplynuly následné úpravy, kterými jsou

- zmenšení rozměrů desky plošného spoje pro snímač SHT25,
- zabudování napájecího adaptéru do krabičky,
- změna propojení kompaktního snímače operativní teploty s displejem,
- začlenění komunikace KNX do snímače.

Snímač bude dále využíván pro řešení následujících diplomových a dizertačních prací, ze kterých určitě vyplynou další požadavky, které nebylo možné vystihnout v průběhu samotného návrhu, ale budou dále zapracovány v dalších verzích snímače. Zcela jistě se bude jednat pouze o změnu elektrického zapojení a úpravu samotného kódu mikrokontroléru.

Podstatnou změnou by mohlo být začlenění komunikačního protokolu sběrnice KNX do tohoto snímače. Jedná se o jednotný komplexní systém pro řízení inteligentních budov a domácností, jenž je v souladu s Evropskou normou EN50090 a s normou ISO/IEC 14543. V principu jde o decentralizovaný sběrniceový systém, který se skládá z různých KNX prvků připojených do této sběrnice. Každý z nich pak disponuje jedinečnou adresou pro jeho identifikaci.



Obr. 9.17 Způsob zapojení snímačů a akčních členů na sběrnici KNX [26]

Výhodou této topologie (Obr. 9.17) je podstatné zjednodušení elektroinstalace v budovách. Všechny prvky této sběrnice jsou propojeny pouze pomocí jednoho páru vodičů, které slouží jak pro komunikaci, tak i pro napájení těchto zařízení. Silová část elektroinstalace se

přivádí pouze ke světlům, vytápění, klimatizaci, motorům apod. Samotné spínání těchto zařízení provádí spínací člen na základě programu.

V tabulce 9.4 je uvedena cenová rozvaha použitého materiálu vyvinutého snímače operativní teploty. Zásadní položkou v celkové ceně činí samotná čočka. Výroba byla provedená na zakázku dle požadovaných parametrů v omezeném počtu kusů. V případě sériové výroby navrženého snímače operativní teploty by byla možná domluva s výrobcem snímače A2TPMI pro zabudování čočky přímo do pouzdra. Tato úprava by cenu výsledného snímače A2TPMI s osazenou čočkou razantně snížila.

Tab. 9.4 *Cenová rozvaha vyvinutého snímače operativní teploty*

Položka	Cena [CZK]
SHT25	510,-
A2TPMIOAA180	730,-
Tranzistorový termoanemometr	120,-
Obslužné obvody	1 500,-
Čočka se zorným úhlem 180°	6 400,-
Výroba DPS	600,-
Cena celkem	9 860,-

Vyvinutý snímač operativní teploty je však i přes svou cenu stále mnohanásobně levnější než dostupné systémy pro hodnocení tepelného stavu prostředí popsané v kapitole 6.

10. NEJISTOTY MĚŘENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty

10.1 TEORIE NEJISTOT MĚŘENÍ

Nejistota měření je přidružený parametr k výsledku měření charakterizující rozptýlení hodnot, které lze odůvodněně pokládat za hodnotu veličiny. Uvedená definice obsahuje tři klíčová slova [44]

- **přidružený k výsledku měření**, což znamená, že nejistota je parametr, který nemá sám o sobě velký význam a je intervalem okolo výsledku měření,
- **rozptýl hodnot**, čímž se nejistotě dává statistická podoba,
- **důvodné přisouzení**, které dává povinnost určit a zdůvodnit zdroje nejistot a jejich příspěvky k výsledné hodnotě.

Přidruženým parametrem může být směrodatná odchylka nebo její násobek. Součástí nejistoty může být obecně celá řada složek. Některé mohou být vyhodnoceny ze statistického rozložení výsledků měření, jiné se vyhodnocují z předpokládaného pravděpodobnostního rozložení. [47]

Základní kvantitativní charakteristikou nejistoty měření je standardní nejistota a označuje se symbolem u z anglického výrazu „uncertainty“. Standardní nejistota se podle způsobu svého vyhodnocení dělí na dvě složky:

- **zdroje určené metodou typu A** – se stanovují z výsledků opakovaných měření statistickou analýzou série naměřených hodnot a označuje se u_A . Produktem výpočtu je standardní nejistota typu A.
- **zdroje určené metodou typu B** – jsou založeny na jiném principu než na statistickém zpracování série pozorování. Tyto nejistoty jsou získané z různých zdrojů a slučují se do výsledné standardní nejistoty typu B, kterou značíme u_B .

V praxi si jen těžko vystačíme s jedním nebo druhým typem standardní nejistoty. Proto je zapotřebí stanovit výsledný efekt kombinace obou typů vyjádřený kombinovanou nejistotou, kterou značíme $u_C(y)$ a její hodnota se určí podle následujícího vztahu (10.1) [47]

$$u_C(x) = \sqrt{u_A^2(y) + u_B^2(y)}. \quad (10.1)$$

Původně stanovená směrodatná odchylka představuje u nejčastěji používaného normálního rozdělení interval určený s pravděpodobností 68 %. Podobně je tomu i u jiných zákonů rozdělení. Pro dosažení lepšího intervalu pokrytí blížíícího se ke 100 %, je třeba rozšířit standardní nejistotu činitelem rozšíření k_r . Pro normální rozdělení $k_r = 2$ odpovídá pokrytí 95 %, $k_r = 3$ odpovídá pokrytí 99,7 %. Rozšířenou nejistotu lze vyjádřit vztahem (10.2) [47]

$$U(y) = k_r \cdot u_C(y), \quad (10.2)$$

kde U je rozšířená nejistota,
 k_r koeficient rozšíření,

u_C standardní kombinovaná nejistota,
 y měřená veličina.

10.1.1 Výpočet standardní nejistoty metodou typu A

Výpočet standardní nejistoty je založen na statistickém zpracování naměřených údajů. U opakovaných přímých měření jde o běžné statistické zpracování hodnot měřené veličiny získané opakovaným přímým měřením. Měření by mělo být uskutečněno alespoň desetkrát. Předpokládá se, že měření jsou navzájem nezávislá a uskutečněná za stejných podmínek [19], [47].

Nejprve provedeme odhad měřené veličiny y , který je dán aritmetickým průměrem $\bar{y}$ z n naměřených hodnot y_i podle vztahu (10.3) [47]

$$\bar{y} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n y_i \quad (10.3)$$

Následuje odhad rozptylu naměřených hodnot označovaný jako výběrový rozptyl $\sigma^2(y_i)$, který se určí ze vztahu (10.4) [47]

$$\sigma^2(y_i) = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (10.4)$$

Odmocněním výběrového rozptylu σ^2 získáme výběrovou směrodatnou odchylku $\sigma(y_i)$, která charakterizuje rozptyl naměřených hodnot kolem aritmetického průměru $\bar{y}$. Rozptyl výběrových průměrů $\sigma^2(\bar{y})$ se určí ze vztahu (10.5) [47]

$$\sigma^2(\bar{y}) = \frac{\sigma^2(y_i)}{n} \quad (10.5)$$

Směrodatná odchylka výběrových průměrů $\sigma(\bar{y})$ je zvolena za standardní nejistotu typu A a je dána vztahem (10.6) [47]

$$u_A = \sigma(\bar{y}) = \sqrt{\frac{1}{n \cdot (n-1)} \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (10.6)$$

Pokud je počet opakovaných měření menších než deset a není možné učinit kvalifikovaný odhad na základě zkušenosti, určí se korigovaná nejistota u_{Ak} ze vztahu (10.7) [47]

$$u_{Ak} = k \cdot \sigma(\bar{y}), \quad (10.7)$$

kde k je koeficient závislý na počtu opakovaných měření, jak je uvedeno v tabulce 10.1.

Tab. 10.1: Hodnoty korekčních koeficientů pro různý počet opakovaných měření[47]

n	9	8	7	6	5	4	3	2
k	1,2	1,2	1,3	1,3	1,4	1,7	2,3	7,0

10.1.2 Výpočet standardní nejistoty metodou typu B

Nejistoty zjišťované metodou typu B jsou vázány na známé, identifikovatelné a kvantifikovatelné zdroje. Výpočet nejistot typu B je spojený s odhadem y_i vstupní veličiny Y_i pomocí jiné metody jako je např. statistické zpracování série měření. Standardní nejistota $u(y_i)$ se odhadne pomocí úsudku na základě všech dostupných informací o možné variabilitě Y_i . Jako zdroje informací k určení nejistoty typu B mohou posloužit

- předcházející měření a jejich výsledky,
- zkušenosti a všeobecné znalosti o chování měřeného objektu, měřicích metodách, měřicích prostředcích a podmínkách měření,
- informace o měřicích prostředcích a podmínkách jejich použití získané od výrobců,
- údaje z certifikátů, kalibračních listů, ověřovacích listů apod.,
- nejistoty referenčních údajů převzatých z různých zdrojů.

Obecný postup při určování nejistoty typu B:

1. najdeme všechny možné zdroje $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ dílčích nejistot
2. určíme standardní nejistotu vlivem každého zdroje z certifikátů, technické dokumentace, tabulek, technických norem, kalibračních listů apod.
3. určíme vztah mezi veličinou Y a jednotlivými zdroji $Z_1, Z_2, \dots, Z_p$ [47]

$$Y = f(Z_1, Z_2, \dots, Z_p) \quad (10.7)$$

4. s použitím zákona o šíření nejistot se vypočítá nejistota $u_B(y)$.

Není-li známa přímo standardní nejistota u_B vlivem příslušného zdroje, mohou nastat situace popsané dále

- z certifikátu, dokumentace výrobců apod. zjistíme rozšířenou nejistotu U a koeficient rozšíření k_r , stanoví se standardní nejistota $u_B(z_j)$ vlivem daného zdroje podle vztahu (10.8) [47]

$$u_B(z_j) = \frac{U}{k_r}, \quad (10.8)$$

- jestliže známe rozpětí, ve kterém se může nacházet většina naměřených hodnot a při určování tohoto intervalu bylo uvažováno normální rozdělení, lze standardní nejistotu $u_B(z_j)$ vlivem zdroje Z_j určit ze vztahu (10.9) [47]

$$u_B(z_j) = \frac{U}{m}, \quad (10.9)$$

kde m je koeficient rozšíření rovný kvantilu normovaného normálního rozdělení (pro $m=1,96$ je pravděpodobnost 95 %, pro $m=2,58$ je pravděpodobnost 99 %, atd.)

- není-li možné odhadnout hranice, ve které se měřená hodnota nachází, odhadnou se hodnoty změn $\pm z_{j\max}$ od jmenovité hodnoty měřené veličiny příslušející ke zdroji Z_j , jejichž překročení je jen málo pravděpodobné. Dále se pak posoudí rozdělení pravděpodobnosti odchylek v tomto intervalu a určí se jeho aproximace. Standardní nejistota $u_B(z_i)$ se vypočte podle vztahu (10.10) [47]

$$u_B(z_j) = \frac{z_{j\max}}{k}, \quad (10.10)$$

kde k je hodnota příslušná ke zvolené aproximaci rozdělení pravděpodobnosti (např. normální $k = 2;3$, rovnoměrné $k = \sqrt{3}$, trojúhelníkové $k = \sqrt{6}$, atd. z [47]).

10.1.3 Stanovení standardních nejistot nepřímých měření

Často nelze hledanou fyzikální veličinu Z měřit přímo a musíme ji získat z více přímo měřených veličin $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$ na základě odpovídajících závislostí (10.11) [19], [47]

$$Z = f(Y_1, Y_2, \dots, Y_m). \quad (10.11)$$

Odhad výstupní veličiny se určí ze vztahu (10.12) [47]

$$z = f(y_1, y_2, \dots, y_m), \quad (10.12)$$

kde $y_1, y_2, \dots, y_m$ jsou odhady vstupních veličin $Y_1, Y_2, \dots, Y_m$

Nejistota odhadu y veličiny Y pro případ, že odhady $y_1, y_2, \dots, y_m$ jsou nekorelované, se určí ze vztahu (10.13) [47]

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(y_i), \quad (10.13)$$

přičemž pro koeficienty citlivosti A_i platí vztah (10.14) [47]

$$A_i = \frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)}{\partial Y_i}. \quad (10.14)$$

V případě, že koeficienty jsou $y_1, y_2, \dots, y_m$ korelované, je nutné uvažovat také kovariance mezi jednotlivými odhady, které tvoří další složky výsledné nejistoty. Potom se nejistoty výstupní veličiny určí ze vztahu (10.15) [47]

$$u^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u^2(y_i) + 2 \sum_{i=2}^m \sum_{j<i}^{m-1} A_i A_j u(y_i, y_j), \quad (10.15)$$

kde $u(y_i, y_j)$ je kovariance mezi navzájem korelovanými odhady y_i, y_j , což můžou být navzájem různé veličiny, tak i dvě hodnoty téže veličiny.

Kovariance mezi odhady vlivů jednotlivých zdrojů určují, jak jsou tyto odhady vzájemně ovlivněny společnými zdroji nejistot. Navzájem závislé zdroje nejistot přispívají

k výsledné nejistotě více či méně a to podle toho, jak se navzájem slučují. Kovariance mohou i celkovou nejistotu snížit.

Kovarianci mezi odhady y_i a y_j dvou vstupních veličin stanovujeme metodou typu A tehdy, je-li k dispozici n naměřených hodnot obou veličin. Jsou-li odhady představovány aritmetickými průměry (10.16) [47]

$$\bar{y}_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{ik}, \quad \bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n y_{jk}, \quad (10.16)$$

vypočítá se kovariance určená metodou typu A ze vztahu (10.17) [47]

$$u_A(y_i, y_j) = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{k=1}^n (y_{ik} - \bar{y}_i)(y_{jk} - \bar{y}_j). \quad (10.17)$$

Kovarianci $u_B(y_i, y_j)$ můžeme zjistit z technické dokumentace nebo výpočtem. Nyní uvedu jeden případ, a to pokud nelze určit korelační koeficient ani se vyhnout korelacím sestavením vhodného modelu. V tomto případě se určuje vliv korelace na výslednou nejistotu pomocí horní hranice odhadu standardní nejistoty měřené veličiny pomocí vztahu (10.18) [47]

$$u_B^2(y) = \sum_{i=1}^m A_i^2 u_B^2(y_i) + 2A_1 A_2 u_B(y_1) u_B(y_2). \quad (10.18)$$

Problematika určování kovariancí je velmi složitá. Často se však lze setkat s korelacemi a kovariancemi i tam, kde bychom to při běžném pohledu vůbec nečekali. Jedná se například o případ opakovaného měření jedním měřidlem, opakovaného měření různými měřidly. Další příklady pro stanovení korelací jsou uvedeny například v [8].

10.2 VÝPOČET NEJISTOTY NEPŘÍMÉHO MĚŘENÍ OPERATIVNÍ TEPLoty

Operativní teplota není měřená přímo, ale je počítána dle vztahu (10.13) z měřených faktorů prostředí. Z hlediska výpočtu nejistot měření se jedná o nepřímé měření a výsledná nejistota měření se vypočítá dle vztahu (10.19). Nejistota měření operativní teploty je vypočtena pro označený řádek v tabulkách 9.2 a 9.3. Z uskutečněných opakovaných měření vyplynulo, že vliv standardní nejistoty typu A je zanedbatelný. Z tohoto důvodu je počítána nejistota pouze ze složek nejistoty typu B dle vztahu (10.19)

$$u_c(t_o) = \sqrt{A_{t_r}^2 u_B^2(t_r) + A_{t_a}^2 u_B^2(t_a) + A_{v_a}^2 u_B^2(v_a)}. \quad (10.19)$$

Ze vztahu (10.19) vyplývá, že je zapotřebí určit nejistotu jednotlivých parametrů prostředí a dále citlivostní koeficienty dle (10.14).

Hodnota intervalu, ve kterém se bude měřená teplota vzduchu nacházet, byla zjištěna z řady uskutečněných měření a činí

$$\pm \Delta t_a = 0,2 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.20)$$

Hodnota intervalu, ve kterém se bude měřená střední radiační teplota nacházet, byla zjištěna z uskutečněných měření a činí

$$\pm \Delta t_r = 1 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.21)$$

Hodnota intervalu, ve kterém se bude měřená rychlost proudění vzduchu nacházet, byla určena z mnoha uskutečněných měření a činí

$$\pm \Delta v_{at} = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (10.22)$$

Hodnota intervalu, ve kterém se bude nacházet měřená rychlost proudění vzduchu, pomocí přístroje TESTO 445, byla určena z přesnosti měření uvedené v katalogu výrobce

$$\pm \Delta v_{ae} = 0,08 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

Pro nejistotu měření střední radiační teploty $u_B(t_r)$ platí (10.23)

$$u_B(t_r) = \frac{\Delta t_r}{m} = \frac{1}{\sqrt{3}} = 0,58 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.23)$$

Pro nejistotu měření teploty vzduchu $u_B(t_a)$ platí (10.24)

$$u_B(t_a) = \frac{\Delta t_a}{m} = \frac{0,2}{\sqrt{3}} = 0,12 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.24)$$

Pro nejistotu měření rychlosti proudění vzduchu $u_B(v_{at})$ tranzistorovým termoanemometrem platí (10.25)

$$u_B(v_{at}) = \frac{\Delta v_{at}}{m} = \frac{0,05}{\sqrt{3}} = 0,03 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (10.25)$$

Pro nejistotu měření rychlosti proudění vzduchu $u_B(v_{ae})$ použitého etalonu TESTO 445 platí (10.26)

$$u_B(v_{ae}) = \frac{\Delta v_{ae}}{m} = \frac{0,08}{\sqrt{3}} = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}. \quad (10.26)$$

Derivací funkce operativní teploty (5.1) podle jednotlivých proměnných získáme jednotlivé koeficienty citlivosti (10.27), (10.28), (10.29)

$$A_{t_r} = \frac{\partial t_o}{\partial t_r} = 1 - 0,75 v_a^{0,16} = 1 - 0,75 \cdot 0,03^{0,16} = 0,57, \quad (10.27)$$

$$A_{t_a} = \frac{\partial t_o}{\partial t_a} = 0,75 v_a^{0,16} = 0,75 \cdot 0,03^{0,16} = 0,43, \quad (10.28)$$

$$\begin{aligned} A_{v_a} &= \frac{\partial t_o}{\partial v_a} = 0,12 v_a^{-0,84} t_a - 0,12 v_a^{-0,84} t_r = \\ &= 0,12 \cdot 0,03^{-0,84} \cdot 32,6 - 0,12 \cdot 0,03^{-0,84} \cdot 32,6 = 0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m} \cdot \text{s}^{-1}}. \end{aligned} \quad (10.29)$$

Pro kombinovanou nejistotu operativní teploty, na základě vztahu (10.13), platí (10.30)

$$u_c(t_o) = \sqrt{A_{t_r}^2 u_B^2(t_r) + A_{t_a}^2 u_B^2(t_a) + A_{v_a}^2 u_B^2(v_{at}) + A_{v_a}^2 u_B^2(v_{ae})} =$$

$$\begin{aligned} &= \sqrt{0,57^2 \cdot 0,58^2 + 0,43^2 \cdot 0,12^2 + (0)^2 \cdot 0,03^2 + (0)^2 \cdot 0,05^2} = \\ &= 0,12 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} . \end{aligned} \quad (10.30)$$

Kombinovanou nejistotu $u_c(t_o)$ vynásobíme koeficientem rozšíření $k_r = 2$ a dostaneme rozšířenou nejistotu měření operativní teploty (10.30) s intervalem pokrytí 95 %

$$U(\Delta t_o) = u_c(t_o) \cdot k_r = 0,12 \cdot 2 = 0,24 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.31)$$

Výsledek měření operativní teploty můžeme zapsat ve tvaru (10.32)

$$t_o = 32,6 \pm 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (10.32)$$

11. ZÁVĚR

Dizertační práce vychází ze skutečnosti, že nejen teplota vzduchu ovlivňuje tepelný stav prostředí, ale i teplota povrchů v místnosti, rychlost proudění vzduchu a vlhkost vzduchu. Stále častěji se stává standardem nejen vytápění budov, ale také jejich chlazení a případně i úprava vnitřního vzduchu, což umožňuje řízení všech těchto parametrů prostředí, a to přispívá k lepší regulaci z hlediska tepelné pohody. Výzkumy prováděné v poslední době definují nejrůznější modely a indexy tepelné pohody, kterými se práce zabývá v kapitole 5.

Současná legislativa se zaměřuje na operativní teplotu jako na komplexní parametr, který vystihuje všechny tyto parametry prostředí a jeví se jako vhodnější pro hodnocení tepelného stavu prostředí. Dále legislativa definuje optimální hodnoty operativní teploty v jednotlivých prostředích. Na základě provedeného průzkumu trhu z hlediska dostupných měřicích systémů, které vyhodnocují operativní teplotu, bylo zjištěno, že taková zařízení sice existují a zabývá se jimi kapitola 6, ale cena těchto zařízení je poměrně vysoká a jejich konstrukce není vhodná pro nasazení do regulačních systémů upravujících tepelné klima v uzavřeném prostředí. Jejich využití je spíše pro výzkumné účely. Z tohoto důvodu bylo přistoupeno k myšlence navrhnout kompaktní snímač operativní teploty s respektováním požadavků norem, který by bylo možné připojit k regulačnímu systému. Již při samotném návrhu byl kladen důraz na výslednou cenu kompaktního snímače, neboť je předpoklad jeho použití pro monitorování tepelného stavu prostředí v uzavřených prostorách.

Člověk by již požadovanou teplotu vzduchu nenastavoval, ale celý systém by pracoval autonomně a řídil by tepelný stav prostředí na základě operativní teploty v jednotlivých místnostech. Kontinuálním měřením a vyhodnocováním tepelné pohody by bylo možno ušetřit náklady na energie, a tím přispět ke snížení vypouštění skleníkových plynů. Jedná se o neustálý koloběh, který ve své podstatě naráží na finanční nákladnost celého řešení a následně jeho návratnost.

Vývoj samotného snímače spočíval na myšlence, aby byl snímač kompaktní, bylo jej možné umístit na stěnu nebo pod omítku a snímač dovedl zasílat operativní teplotu nadřazenému regulačnímu systému. V průběhu řešení práce byly testovány nejrůznější snímače, z nichž nejvhodnější jsou popsány v této práci. Při výběru snímačů bylo přihlíženo k normě ČSN ISO 7726, která stanovuje způsob měření a technické požadavky na jednotlivé měřené veličiny. Přesnost měření vždy závisí na samotných snímačích, a proto byly voleny snímače, u kterých výrobce definuje přesnost měření stejnou nebo lepší na základě uvedené normy. Pro měření teploty vzduchu bylo možné vybírat z celé řady snímačů a na základě technických parametrů a konstrukčního řešení byl zvolen kombinovaný snímač pro měření teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu od firmy Sensirion. Pro měření střední radiační teploty je doporučen kulový teploměr, který je ovšem poměrně rozměrný a také má dlouhou časovou odezvu. Z těchto důvodů bylo přistoupeno k řešení měření střední radiační teploty pomocí infračerveného termočláňkového snímače, který měří teplotu povrchů v prostoru na základě dopadajícího IR záření. Jejich nevýhodou je malý zorný úhel, který bývá maximálně 120°. Výrobci se snaží totiž dosáhnout co nejmenší zorný úhel, a to z důvodů měření co nejmenší plochy z co největší vzdálenosti. Jedná se o snímače, které jsou zapouzdřeny ve vakuu, aby nedocházelo k ovlivňování měřené radiační teploty parazitními vlivy, není možno optiku u tohoto snímače jednoduše vyměnit. Vhodná optika byla proto osazena na samotné pouzdro infračerveného snímače. Rozměrný kulový teploměr byl tímto nahrazen relativně malým snímačem s velmi rychlou odezvou v řádech sekund. Poslední měřenou veličinou je rychlost proudění vzduchu. Jedná se o poměrně komplikovanou veličinu, pro kterou neexistuje žádný rozměrově malý snímač, který by se dal zabudovat do navrhovaného

celku. Vždy se jedná o sondy, které jsou použitelné jen s vyhodnocovacím přístrojem. V práci je popsán návrh digitálního tranzistorového termoanemometru, který byl následně ověřen s komerčně dostupným a relativně přesným přístrojem TESTO 445. Výsledky popsané v práci ukazují na použitelnost této metody měření.

V další části práce je samotný návrh celého zařízení, které je postaveno na mikrokontroléru ATMEGA128. Jedná se o měřicí, vyhodnocovací a komunikační jednotku, která propojuje všechny systémy. Výhodou tohoto řešení je možnost velmi rychle reagovat na potřebné změny pouhou úpravou kódu, na jehož základě celý mikrokontrolér pracuje.

Práce byla velmi úzce navázána také na projekty GAČR 101/05/H018 – *Výzkum efektivních systémů pro zlepšení kvality životního prostředí* a GAČR 101/09/H050 – *Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení kvality vnitřního prostředí*. V rámci těchto projektů byly ve spolupráci s dalšími studenty navrženy ověřovací a kalibrační komory, které byly při testování a ověřování tohoto snímače využity. Dále byl navržen a realizován jednoduchý tunel pro ověřování rychlosti proudění vzduchu. Na těchto dílčích projektech se autor podílel a výsledky jsou publikovány jako funkční vzorky. Postup a výsledky jednotlivých měření jsou popsány v práci. Navržený a otestovaný snímač operativní teploty byl ověřován v laboratořích FSI na pracovištích EU OteP a UAI a zde byly také provedeny jednoduché kalibrace porovnáním se srovnatelně přesnou či přesnější měřicí technikou. Bylo-li zmíněno sériové nasazování snímače do praxe, pak by mu musela předcházet důsledná kalibrace v laboratořích metrologického národního systému, což je ale samo o sobě opět velmi nákladnou záležitostí a v rámci této disertační práce řešeno nebylo.

V posledním kroku byla stanovena nejistota vyvinutého kompaktního snímače operativní teploty, jejíž výpočet je popsán v kapitole 10.2. Stanovená nejistota s koeficientem rozšíření $k_r = 2$ činí $U_r = \pm 0,4$ °C. Uvedená nejistota měření stanovuje, že měřená veličina se bude v daném intervalu nacházet s 95 % pravděpodobností. I touto analýzou nejistot se potvrdila použitelnost snímače pro praxi podle požadavků ČSN ISO 7726.

Dizertační práce se tedy pokusila, v souladu s dnešními trendy prosazovanými v komplexní automatizaci budov a koncepci inteligentních budov, posunout hodnocení tepelné pohody a celkového stavu prostředí v místnostech k objektivnějším a komplexním metodám hodnocení. Zavádění těchto nových trendů s sebou nese také potřebu vývoje nových snímačů a jedním z nich je vyvinutý kompaktní snímač operativní teploty, který plně prokázal svou funkčnost i schopnost poskytovat objektivní informace nadřazenému řídicímu systému. Dnes je rovněž zřejmé, že v průběhu testů několika variant snímače se prokázaly možnosti jeho dalších zlepšení a úprav, jak to naznačila i kapitola 9.4.

Nezanedbatelným výsledkem je i stránka ekonomická, kdy snímač s náklady přibližně desetitisíc korun je schopen zvládnout vyhodnocení tepelné pohody jako dnes dostupná složitá laboratorní technika s pořizovací cenou mnohonásobně vyšší. Přitom je předpoklad, že v případě sériové výroby by se cena ještě snížila. Snímač pro sériové nasazení může být jednodušší o řadu pomocných komunikačních kanálů, které byly nepostradatelné pro ověřování. Konstrukce může být kompaktní včetně napájecího zdroje a zobrazovací jednotky, čímž by bylo možno docílit snížení ceny. Snímač operativní teploty by se tak mohl stát běžnou součástí modulů elektroniky komplexní automatizace budov, který je například znám pod označením KNX/EIBA.

Lze předpokládat, že právě díky technice, podobné tomuto snímači operativní teploty, která již v kompaktním provedení přímo prezentuje souhrnné parametry prostředí a tepelné pohody dojde k výraznějšímu využití těchto komplexních parametrů v praxi. I když současné možnosti regulace vedou ve většině případů zpětně zase k regulaci teploty při

vytápění nebo chlazení (klimatizaci), lze předpokládat, že uplatnění tohoto komplexního pohledu může přinést výrazné úspory do oblastí nákladů na energie, které jsou v dnešní době velmi zajímavou komoditou. V kombinaci s dalším rozvojem řídicí techniky pro systémy budov lze předpokládat uplatnění těchto komplexních přístupů v blízké budoucnosti. I zde je také potřeba respektovat dávné pravidlo, že než je možné něco regulovat je třeba umět přesně měřit.

12. POUŽITÁ LITERATURA

- [1] AHLBORN. *Souprava pro měření tepelného komfortu ALMEMO* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.ahlborm.cz/cs/produkt/souprava-pro-mereni-tepelneho-komfortu-almemo/>>.
- [2] ATMEL. *8-bit Atmel Microcontroller with 128 KBytes In-System Programmable Flash 6-Bit ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER with Onboard Reference and Temperature Sensor* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.atmel.com/Images/doc2467.pdf>>.
- [3] BRUCHANOV M. *Výpočet bazálního metabolismu* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://bruxy.regnet.cz/web/fitness/CZ/vypocet-bazalniho-metabolismu>>.
- [4] CENTNEROVÁ, L. *Tepelná pohoda a nepohoda. Vytápění, větrání, instalace*, 2000, roč. 9, č. 5, s. 213-216. ISSN: 1210-1389.
- [5] CENTNEROVÁ, L. *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2001. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Karel Papež, CSc.
- [6] ČSN ISO 7726, 1993. *Tepelné prostředí. Přístroje a metody měření fyzikálních veličin*. Federální úřad pro normalizaci a měření.
- [7] ČSN ISO 7730, 2006. *Ergonomie tepelného prostředí - Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. Federální úřad pro normalizaci a měření.
- [8] DALLAS SEMICONDUCTOR. *DS1307 64 x 8 Serial Real-Time Clock* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.sparkfun.com/datasheets/Components/DS1307.pdf>>.
- [9] DANTEC DYNAMICS. *ComfortSense* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=20093>>.
- [10] DLESEK, V. *Úspory energie při vytápění budov. Vytápění, větrání, instalace*, 1994, roč. 3, č. 4, s. 8-12. ISSN: 1210-1389.
- [11] FOREJTEK, J. *Návrh a realizace sigma-delta převodníku AD v technice SC*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 75 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Háze, Ph.D.
- [12] FTDI CHIP. *Future Technology Devices International Ltd. FT232R USB UART IC* [online]. [cit. 2012-8-30] <http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf>.
- [13] HAMMOND. *Hand Held Instruments* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.hammondmfg.com/pdf/1593K.pdf>>.
- [14] HEMZAL, K. *Využití některých poznatků o proudění v klimatizovaném prostoru. Vytápění, větrání, instalace*, 2002, roč. 11, č. 1, s. 14-16. ISSN: 1210-1389.
- [15] HEMZAL, K. *Operativní teplota v hodnocení tepelné rovnováhy člověka. Vytápění, větrání, instalace*, 2008, roč. 17, č. 1, s. 16-23. ISSN: 1210-1389.
- [16] HOLTEK. *High Voltage Regulator HT71XX* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.gme.cz/dokumentace/330/330-144/dsh.330-144.1.pdf>>.
- [17] HRUŠKA, F. *Regulace parametrů prostředí podle indexů tepelné pohody člověka. Vytápění, větrání, instalace*, 2003, roč. 12, č. 1, s. 46-49. ISSN: 1210-1389.
- [18] HUMLHANS, J. *Zajímavá zapojení - 3. díl*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 175 s. ISBN: 80-7300-152-7.

- [19] CHUDÝ, V.; PALENČÁR, R.; KUREKOVÁ, E.; HALAJ, M. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava, 1999, 688s. ISBN: 80-227-1275-2.
- [20] CHYSKÝ, J.; HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace*. 3. vyd. Praha, 1993. 490 s. ISBN: 80-901574-0-8.
- [21] JANOTKOVÁ, E. *Technika prostředí*. Skripta VUT, Brno, 1991. ISBN: 80-214-0258-X.
- [22] JOKL, M. *Optimální mikroklimatické podmínky pracovišť*. Vytápění, větrání, instalace, 1997, roč. 6, č. 2, s. 69-72. ISSN: 1210-1389.
- [23] JOKL, M. *Optimální a přípustné mikroklimatické podmínky pro obytné prostředí*. Vytápění, větrání, instalace, 2005, roč. 14, č. 5, s. 1-4. ISSN: 1210-1389.
- [24] JOKL, M.; MALÝ, S.; JIRÁK, Z.; TOMÁŠKOVÁ, H. *Kulový stereoteploř - nový přístroj pro stanovení operativní teploty a radiační teplotní asymetrie*. Vytápění, větrání, instalace, 2009, roč. 18, č. 1, s. 36-38. ISSN: 1210-1389.
- [25] KABELE, K. *Modelování operativní teploty*. Vytápění, větrání, instalace, 2003, roč. 12, č. 1, s. 33-37. ISSN: 1210-1389.
- [26] KNX. *Was ist KNX?* [online]. [cit. 2012-8-30] <http://www.knx.ch/wDeutsch/seiten/was_ist_konnex.php?navid=10>.
- [27] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha, 2005. 239 s. ISBN: 80-7300-145-4.
- [28] LANGMEIER, M. *Základy Lékařské fyziologie*. 1. vyd. Praha, 2009. 320 s. ISBN: 978-247-2526-0.
- [29] LUMASENSE TECHNOLOGIES. *Thermal Comfort Datalogger INNOVA 1221* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://lumasenseinc.com/EN/products/gas-monitoring/thermal-comfort/>>.
- [30] LYSENKO, V. *Detektory pro bezdotykové měření teplot*. 1. vyd. Praha, 2005. 153 s. ISBN: 80-7300-180-2.
- [31] MATHAUSEROVÁ, Z. *Působení tepelně vlhkostních podmínek na člověka*. Vytápění, větrání, instalace, 1997, roč. 6, č. 4, s. 203-205. ISSN: 1210-1389.
- [32] MATHAUSEROVÁ, Z. *Kulový teploměr a jeho použití*. Vytápění, větrání, instalace, 2003, roč. 12, č. 2. ISSN: 1210-1389.
- [33] MATHAUSEROVÁ, Z. *Operativní teplota*. Vytápění, větrání, instalace, 2006, roč. 15, č. 3, s. 131-132. ISSN: 1210-1389.
- [34] MATHAUSEROVÁ, Z. *Novelizace hygienické legislativy - nařízení vlády č. 361/2007 Sb.* Vytápění, větrání, instalace, 2008, roč. 17, č. 2, s. 87-89. ISSN: 1210-1389.
- [35] MATUŠKA, T. *Experimentální metody v technice prostředí*. Skripta ČVUT, Praha, 2005. ISBN 80-01-03291-4.
- [36] MAXIM. *DS18B20 Programmable Resolution 1-Wire Digital Thermometer* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://datasheets.maxim-ic.com/en/ds/DS18B20.pdf>>.
- [37] MCU.CZ. *Převodník úrovní I2C* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://mcu.cz/news.php?extend.2212>>.
- [38] MICROCHIP. *12-Bit Digital-to-Analog Converter with EEPROM Memory in SOT-23-6* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22039c.pdf>>.
- [39] MIKROKONTROLÉRY PIC. *Co je mikrokontrolér?* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://mikrokontrolery-pic.cz/zaciname/co-je-to-mikrokontroler/>>.

- [40] MLČÁK, R.; PAVELEK, M. Návrh komory pro kalibraci čidel tepelného stavu prostředí. In Sborní z konference Mezinárodní setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky. Plzeň: 2008. s. 239-242. ISBN: 978-80-7043-666- 0.
- [41] Nařízení vlády č.361/2007 Sb. ze dne 12. Prosince 2007, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.
- [42] NATIONAL SEMICONDUCTOR. *Simple Switcher 1A Step-Down Voltage Regulator* humidity and Temperature Sensor [online]. [cit. 2012-8-30] < <https://www.national.com/ds/LM/LM1575.pdf>>.
- [43] NATIONAL SEMICONDUCTOR. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors* [online]. [cit. 2012-8-30] < <https://www.national.com/ds/LM/LM35.pdf>>.
- [44] NĚMEČEK, P. *Nejistoty měření*. Česká společnost pro jakost, o. s. Praha, 2008. ISBN: 978-80-02-02089-9.
- [45] NOVÝ, R. *Technika prostředí*. Skripta ČVUT, Praha, 2000. ISBN: 80-01-03492-5.
- [46] OMEGAENG. *TFD Thin Film Detector* [online]. [cit. 2012-8-30] < http://www.omegaeng.cz/ppt/pptsc.asp?ref=TFD_RTD>.
- [47] PALENČÁK, R. VDOLEČEK, F. HALAJ, M.: *Nejistoty v měření I-V. Cyklus článků*. Automa, 2001 – 2002, roč. 7-8, ISSN 1210-09592.
- [48] PARSONS, K. *Human thermal environments*. 2. vyd. London, 2003. 527 s. ISBN: 0-415-23792-0.
- [49] PAVELEK, M.; ŠTĚTINA, J. *Experimentální metody v technice prostředí*. Skripta VUT, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, Brno 2007. ISBN: 978-80-214-3426-4.
- [50] PAVELEK, M. *Termomechanika*. Skripta VUT, Akademické nakladatelství CERM, s. r. o. Brno, Brno 2003. ISBN: 80-214-2409-5.
- [51] PAVELEK, M.; ŠTĚTINA, J. *Experimentální metody v technice prostředí*. Skripta VUT, Nakladatelství VUTIUM, Brno 1997. ISBN: 80-214-0970-3.
- [52] PERKINELMER. *Thermopile with integrated signal processing circuit* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.hofoo.com.cn/uploadfiles/a2tpmi.pdf>>.
- [53] SENSIRION. *Humidity and Temperature Sensor* [online]. [cit. 2012-8-30] < http://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/SHT25.pdf>.
- [54] SILBERNAGL, S.; DESPOPOULOS, A. *Atlas fyziologie člověka*. 3. vyd. Praha, 2004. 448 s. ISBN 978-80-247-0630-6.
- [55] SOS ELECTRONICS. *Profesionální řešení pro nejpřesnější měření vlhkosti a teploty* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.soselectronic.cz/?str=862>>.
- [56] STRNAD, K. *Využití termovizních systémů v silnoproudé elektrotechnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 73 s. Vedoucí diplomové práce doc. Dr. Ing. Hana Kuchyňková.
- [57] SZÉKYOVÁ, M.; FERSTL, K.; NOVÝ, R. *Větrání a klimatizace*. 1. vyd. Bratislava, 1993. 359 s. ISBN: 80-8076-037-3.
- [58] TESTO. *Testo 480 - nový měřicí přístroj pro efektivní analýzu klimatizačních zařízení a pohody prostředí* [online]. [cit. 2012-8-30] < [http://www.testo.cz/online/abaxx-?%\\$part=PORTAL.CZE.HomeDesk&%\\$event=show-from-content&externalid=opencms%3A%2FSites%2FCZE%2FSharedDocuments%2FNews%2Ftesto480_cz.news](http://www.testo.cz/online/abaxx-?%$part=PORTAL.CZE.HomeDesk&%$event=show-from-content&externalid=opencms%3A%2FSites%2FCZE%2FSharedDocuments%2FNews%2Ftesto480_cz.news)>.

- [59] TEXAS INSTRUMENTS. *16-Bit ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER with Onboard Referenceumidity and Temperature Sensor* [online]. [cit. 2012-8-30] <
<http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/ads1110.pdf>>.
- [60] TEXAS INSTRUMENTS. *4-20mA CURRENT TRANSMITTER with Sensor Excitation and Linearization* [online]. [cit. 2012-8-30] <
<http://www.ti.com/lit/ds/symmlink/xtr105.pdf>>.
- [61] TROJAN, S. *Lékařská fyziologie*. 4. vyd. Praha, 2003. 772 s. ISBN: 80-247-0512-5.
- [62] VOJÁČEK, A. *Thermopile sensors=radiační pyrometry* [online]. [cit. 2012-8-30] <
<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005101401>>.
- [63] ZMRHAL, V.; DRKAL, F.; MATHAUSEROVÁ, Z. *Směrnice STP - OS 01/č.3/2010: Operativní teplota v praxi*. Vytápění, větrání, instalace, 2010, roč. 19, č. 5, s. 1-8. ISSN: 1210-1389.

13. VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

2012

VDOLEČEK, F.; JANEČKA, J.; KOŠÍKOVÁ, J. Modely pro výuku termodiagnostiky. *Technická diagnostika*, 2012, roč. 21, č. Z1, s. 347-352. ISSN: 1210- 311X.

JANEČKA, J.; KOŠÍKOVÁ, J.; MLČÁK, R.; VDOLEČEK, F.; PAVELEK, M. Ověřování a kalibrace snímačů tepelné pohody. *Automa*, 2012, roč. 18, č. 4, s. 10-12. ISSN: 1210-9592.

KOŠÍKOVÁ, J.; JANEČKA, J.; VDOLEČEK, F. Problémy s přesností parametrů tepelné pohody. In *XXXVI. Seminar ASR 2012 - "Instruments and Control"*. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2012. s. 41-49. ISBN: 978-80-248-2626- 4.

2011

KOŠÍKOVÁ, J.; VDOLEČEK, F.; JANEČKA, J. Thermo diagnostics use for monitoring of the working environment parameters. In *Zborník XIV. medzinárodnej vedeckej konferencie DIS 2011*. DIS. Košice: Asociácia technických diagnostikov SR, 2011. s. P9_1 (P9_9 s.) ISBN: 978-80-553-0732- 9.

KOŠÍKOVÁ, J.; VDOLEČEK, F.; JANEČKA, J. Thermo diagnostics use for monitoring of the working environment parameters. *Spravodaj ATD SR*, 2011, roč. 2011, č. 1,2. 2011, s. 29-31. ISSN: 1337- 8252.

JANEČKA, J.; VDOLEČEK, F.; KOŠÍKOVÁ, J. Měření a analýza teplotních polí ve výuce termodiagnostiky. In *Zborník XIV. medzinárodnej vedeckej konferencie DIS 2011*. DIS. Košice: Asociácia technických diagnostikov SR, 2011. s. P7_1 (P7_8 s.) ISBN: 978-80-553-0732- 9.

VDOLEČEK, F.; KOŠÍKOVÁ, J.; JANEČKA, J. Tepelná pohoda v širších souvislostech. *Automa*, 2011, roč. 17, č. 12, s. 22-23. ISSN: 1210- 9592.

2010

JANEČKA, J.; VDOLEČEK, F.; KOŠÍKOVÁ, J.; ZUTH, D. Smart Sensor of Airflow Velocity. In *ME 2010 - Mechanical Engineering 2010*. Bratislava: STU Bratislava - FME, 2010. s. S2- 43 (S2-48 s.) ISBN: 978-80-227-3304- 5.

KOŠÍKOVÁ, J.; JANEČKA, J.; VDOLEČEK, F.; ZUTH, D. Accuracy and Uncertainties in Airflow Measurement. In *ME 2010 - Mechanical Engineering 2010*. Bratislava: STU Bratislava - FME, 2010. s. S2- 49 (S2-54 s.) ISBN: 978-80-227-3304- 5.

JANEČKA, J. Měření rychlosti proudění vzduchu v technice prostředí. In *Sborník přednášek 33. mezinárodní konference TD 2010 - DIAGON 2010*. 1. Academia centrum UTB ve Zlíně, 2010. s. 7-10. ISBN: 978-80-7318-940- 2.

2009

JANEČKA, J.; ZUTH, D. The possibilities of thermal comfort measurement. In *Proceedings of XXXIVth Seminary ASR'09 Proceedings of XXXIVth Seminary ASR'09 - Instruments and Control*. Ostrava: VŠB - TU Ostrava, 2009. s. 18-18. ISBN: 978-80-248-1953- 2.

JANEČKA, J. THERMAL COMFORT - Measurement of the Mean Radiant Temperature. In *TD 2009 - DIAGON 2009 Sborník přednášek 32. mezinárodní konference*. Zlín: UTB Zlín, 2009. s. 61-66. ISBN: 978-80-7318-840- 5.

JANEČKA, J.; ZUTH, D.; VDOLEČEK, F. Měření střední radiační teploty. In *Měření a regulace teplot v teorii a praxi*. Ostrava: VŠB- TU Ostrava, 2009. s. 91-96. ISBN: 978-80-87294-02- 4.

JANEČKA, J.; ZUTH, D. Usage of Modern Sensors for Thermal Comfort Determination. *Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*, 2009, roč. LV, č. 2, s. 43-48. ISSN: 1210- 0471.

VDOLEČEK, F.; ZUTH, D.; JANEČKA, J. Kybernetika a snímače tepelné pohody. In *Šedesát let kybernetiky*. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. s. 30-36. ISBN: 978-80-7204-662- 1.

2008

JANEČKA, J.; ZUTH, D. Evaluation of Thermal Comfort with Type of Synthetic Skin Sensors. In *Mechanical Engineering 2008 - Proceedings of the Abstracts*. Bratislava: SjF STU v Bratislave, 2008. s. II- 16 (II-18 s.)ISBN: 978-80-227-2987- 1.

JANEČKA, J. Diagnostika tepelného stavu prostředí. In *TD 2008-DIAGON 2008 Sborník 31. mezinárodní konference*. Zlín: Academia centrum UTB ve Zlíně, 2008. s. 11-16. ISBN: 978-80-7318-707- 1.

JANEČKA, J. Hodnocení tepelného stavu prostředí. *Automa*, 2008, roč. 14, č. 11, s. 20-22. ISSN: 1210- 9592.

Práce vznikla za finanční podpory projektů GAČR 101/05/H018 – *Výzkum efektivních systémů pro zlepšení kvality životního prostředí* a GAČR 101/09/H050 – *Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení kvality vnitřního prostředí*.

14. SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A	klimatizované prostory
A	faktor poměru součinitelů přestupu tepla na povrchu oděvu
A_i	koeficient citlivosti
α_A, α_B	Seebeckovy konstanty kovů
a_c	věk člověka
α_{kg}	součinitel přestupu tepla konvekcí v úrovni koule
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí
α_{kt}	součinitel přestupu tepla konvekcí obtékaného tělíska
B	prostory s hybridním ventilačním systémem
β	součinitel difúzní propustnosti pokožky
C	přírozně větrané prostory
c_d	měrná tepelná kapacita citlivého elementu
C_d	tepelná kapacita citlivého elementu
C_g, m_g, n_g	koeficienty závislé na geometrii obtékaného tělíska a režimu proudění
c_p	měrná tepelná kapacita suchého vzduchu
D	průměr koule
d	tloušťka citlivého elementu
δ	přesnost údaje měřicího přístroje
D_t	digitální číslo ze senzoru SHT25 z měření teploty
D_φ	digitální číslo ze senzoru SHT25 z měření vlhkosti
DR	stupeň obtěžování průvanem
D_o	digitální číslo závislé na operativní teplotě
ε	poměrná zářivost povrchů (emisivita)
ε_p	koeficient vyzařování leštěného snímače
ε_b	koeficient vyzařování černého snímače
f	frekvence
F_{p-N}	úhlový poměr osálení mezi osobou a plochou
f_{cl}	povrchový faktor oděvu
φ	relativní vlhkost vzduchu
Φ	absolutní vlhkost vzduchu
G_d	tepelná vodivost citlivého elementu
h	výška člověka
I	elektrický proud
I_{cl}	tepelný odpor oděvu
k_r	koeficient rozšíření
l_0	měrné výparné teplo vody
L	charakteristický rozměr obtékaného tělíska
λ	tepelná vodivost tekutiny
M	energetický výdej povrchu lidského těla
m	koeficient příslušný zvolenému rozdělení
m	hmotnost člověka
$\dot{m}$	hmotnostní průtok suchého vdechovaného vzduchu
m_d	hmotnost citlivého senzoru
m_p	hmotnost par ve vzduchu
m_k	hmotnost kapalné fáze vody ve vzduchu
m_t	hmotnost tuhé fáze vody ve vzduchu
m_v	hmotnost suchého vzduchu

m_c	hmotnost člověka
n	počet měření rychlostí proudění vzduchu
η	mechanická účinnost
Nu	Nusseltovo číslo
p_a	parciální tlak vodní páry
$\check{p}_{pk}$	parciální tlak sytých vodních par při teplotě pokožky t_k
p_{pv}	parciální tlak vodních par v okolním vzduchu
Pr	Prandtlovo číslo
PMV	předpověď středního tepelného pocitu
PPD	procentuální podíl nespokojených
PD	procento nespokojených lidí s vertikálním rozložením teplot
P_p	dodávka tepla leštěnému snímači
P_b	dodávka tepla černému snímači
P_s	dodávka tepla nebo chladu snímači
p_p	parciální tlak par ve vzduchu
$\check{p}_p$	parciální tlak nasycených par při dané teplotě vzduchu
π	Ludolfovo číslo
ψ	fázový úhel
$\dot{Q}_b$	bazální metabolismus
$\dot{Q}_r$	tepelný tok sdílený sáláním
$\dot{Q}_k$	tepelný tok sdílený konvekcí
$\dot{Q}_{vs}$	tepelný tok suchým pocením
$\dot{Q}_{vm}$	tepelný tok mokřým vypařováním
$\dot{q}_m$	měrná vnitřní produkce tepla v lidském těle (metabolismus)
$\dot{Q}_m$	vnitřní proudce tepla v lidském těle
$\dot{Q}_a$	tepelný tok akumulovaný v těle
$\dot{Q}_{ved}$	tepelný tok vedením
$\dot{q}_r$	hustota tepelného toku radiací mezi plochami prostoru a koulí
$\dot{q}_c$	hustota tepelného toku prouděním mezi vzduchem a koulí
S	plocha povrchu těla
S_k	povrch oblečeného člověka
S_r	povrch lidského těla přenášející teplo radiací
S_w	plocha povrchu těla omáčená potem
S_t	povrch obtékaného tělíska
σ_0	Stefanova-Boltzmannova konstanta
σ	směrodatná odchylka
R	elektrický odpor
r	rozlišení měřicího přístroje
R_{cl}	tepelný odpor oděvu
Re	Reynoldsovo číslo
ρ_d	hustota materiálu detektoru
S_d	aktivní plocha elementu
T_1, T_2	teploty spojů termočládku
t_o	operativní teplota
T_r	střední radiační teplota
t_r	střední radiační teplota
T_p	střední teplota povrchu oděvu
t_p	střední teplota povrchu oděvu

t_{vyd}	teplota vydechovaného vzduchu
t_v	teplota vdechovaného vzduchu
t_k	teplota pokožky
Tu	intenzita turbulence
t_{ur}	určující teplota
t_t	teplota povrchu tělíska
T_N	povrchová teplota plochy
T_g	teplota černé koule
T_s	teplota snímače
T_{pr}	asymetrie radiační teploty
t_{po}	teplota vnějšího povrchu oděvu
t_a	teplota vzduchu
t_r	střední radiační teplota
$\Delta t_{a,v}$	vertikální rozdíl teploty vzduchu mezi hlavou a nohama člověka
ΔT_{max}	maximální oteplení detektoru v ustáleném stavu
v_{ar}	relativní rychlost proudění vzduchu, vůči lidskému tělu
t_{cl}	teplota povrchu oděvu
T_d	teplota citlivého elementu
T_p	třída přesnosti
U	rozšířená nejistota
U_{ref}	referenční napětí
U_o	výstupní napětí D/A převodníku závislé na operativní teplotě
U_{gs}	napětí mezi piny gate a source NMOS tranzistoru
U_{th}	prahové napětí NMOS tranzistoru
u_C	kombinovaná standardní nejistota
u_B	standardní nejistota typu B
u_A	standardní nejistota typu A
U_S	výstupní napětí termočlánku
v_a	rychlosti proudění vzduchu v rozmezí
v_{ai}	jednotlivé rychlosti proudění vzduchu
$\bar{v}_a$	střední rychlost z dlouhodobého měření
ν	kinematická viskozita tekutiny
V	celkový objem vlhkého vzduchu
v_c	výška postavy člověka
V_{O_2}	objem spotřebovaného kyslíku
V_{CO_2}	objem spotřebovaného oxidu uhličitého
V_d	objem citlivého elementu
W	užitečný mechanický výkon
x	měrná vlhkost vzduchu
y	hodnota měřené veličiny
$\bar{y}$	aritmetický průměr
$\ddot{x}_{vyd}$	měrná vlhkost vydechovaného nasyceného vzduchu
x_v	měrná vlhkost vdechovaného vzduchu
A/D	analogově číslicový převodník
EMC	elektromagnetická kompatibilita
IR	infračervené záření
NEP	minimální detekovatelná intenzita IR záření

NC	nezapojený pin
NMOS	označení pro tranzistor s indukovaným kanálem
OZ	operační zesilovač
PTAT	označení napěťové reference s kladným teplotním koeficientem
SMT	technologie výroby elektronických součástek
SMD	označení součástky pro povrchovou montáž
RV	relativní vlhkost

15. SEZNAM PŘÍLOH

16.1 Kompaktní snímač operativní teploty

- 16.1.1 *Zapojení Mikrokontroléru ATMEGA128*
- 16.1.2 *Zapojení tranzistorového termoanemometru*
- 16.1.3 *Zapojení snímače střední radiační teploty*
- 16.1.4 *Zapojení snímače teploty a relativní vlhkosti SHT25*
- 16.1.5 *Zapojení DA převodníku*
- 16.1.6 *Zapojení hodin reálného času DS1307*
- 16.1.7 *Zapojení převodníku FT232RL pro komunikaci s PC*
- 16.1.8 *Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje kompaktního snímače operativní teploty*
- 16.1.9 *Zapojení snímače SHT25 na samostatné desce plošného spoje*
- 16.1.10 *Předloha pro výrobu a osazení samostatné desky plošného spoje pro snímač SHT25*
- 16.1.11 *Soupis použitých součástek pro kompaktní snímač operativní teploty*

16.2 Zobrazovací jednotka

- 16.2.1 *Schéma zapojení zobrazovací jednotky*
- 16.2.2 *Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje zobrazovací jednotky*
- 16.2.3 *Soupis použitých součástek pro zobrazovací jednotku*

16.3 Napájecí adaptér

- 16.3.1 *Schéma zapojení napájecího adaptéru*
- 16.3.2 *Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje napájecího adaptéru*
- 16.3.3 *Soupis použitých součástek pro napájecí adaptér*

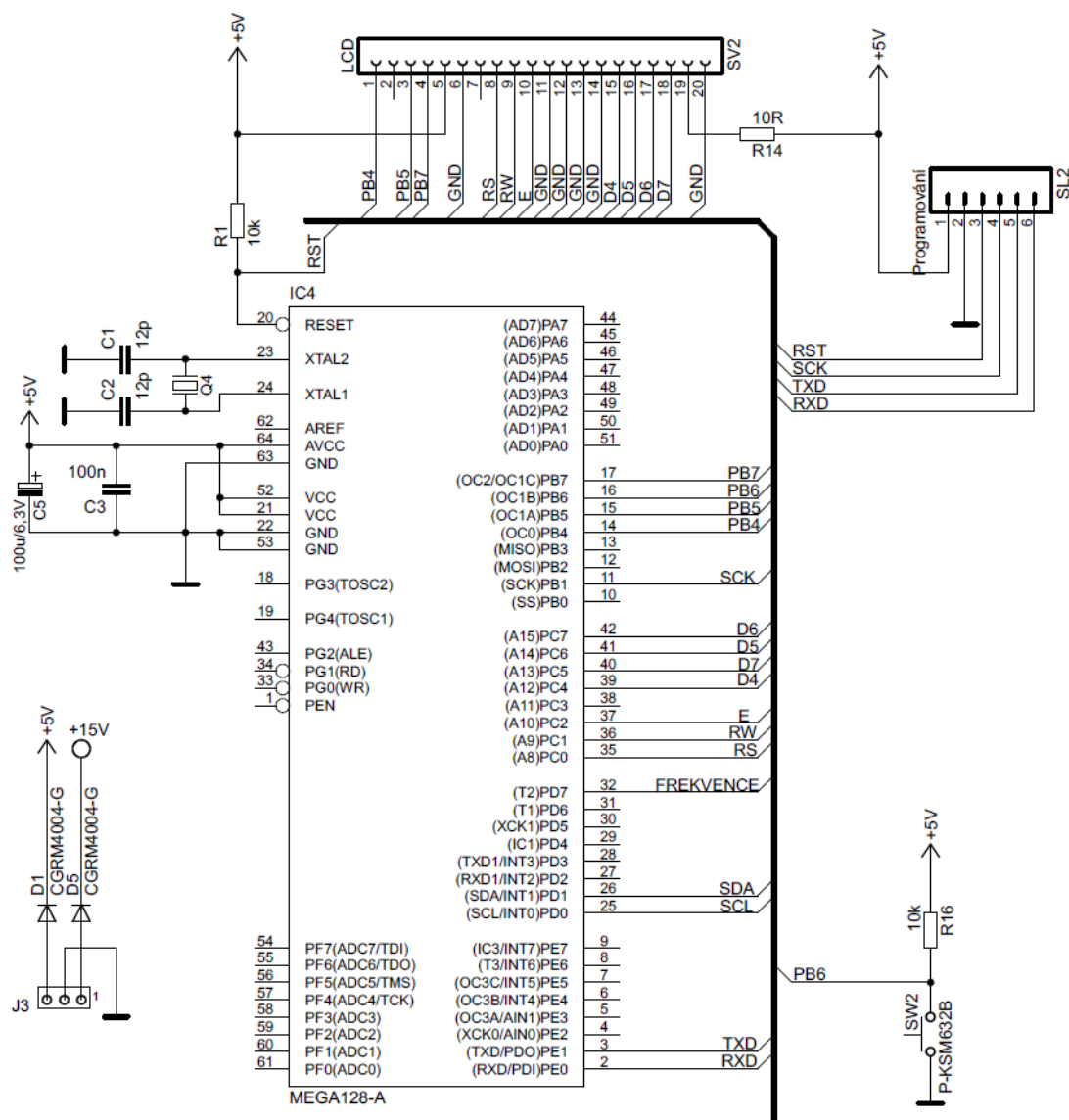
16.4 Přílohy na CD

- 16.4.1 *Text práce*
- 16.4.2 *Kód v jazyce pro mikrokontrolér*
- 16.4.3 *Firemní literatura*

16. PŘÍLOHY

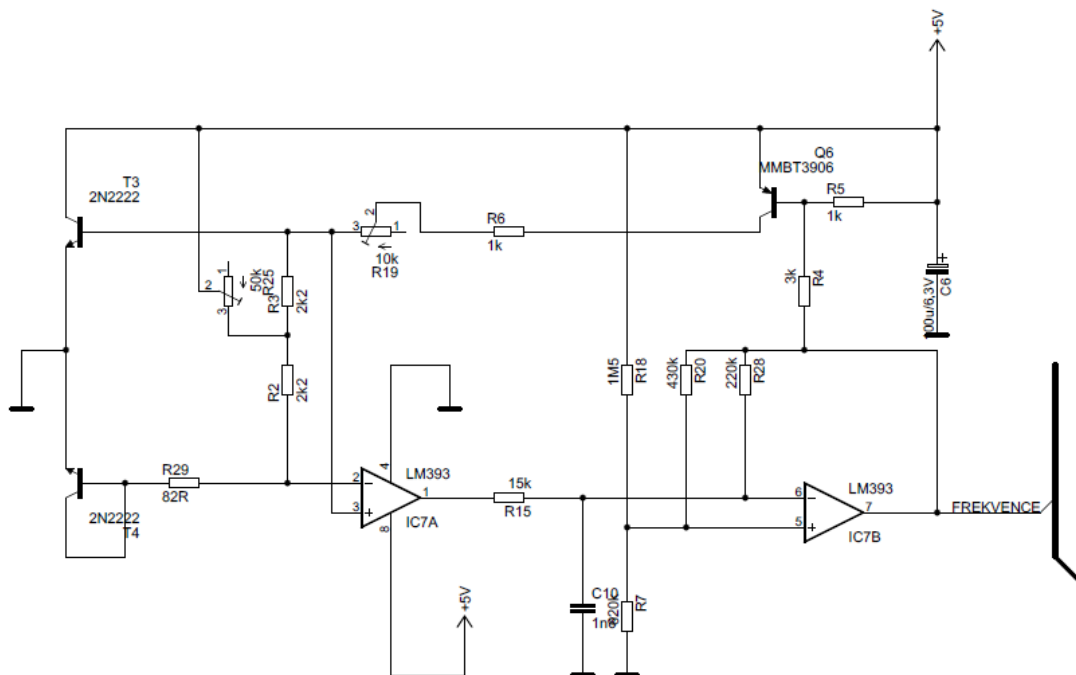
16.1 KOMPAKTNÍ SNÍMAČ OPERATIVNÍ TEPLoty

16.1.1 Zapojení Mikrokontroléru ATMEGA128



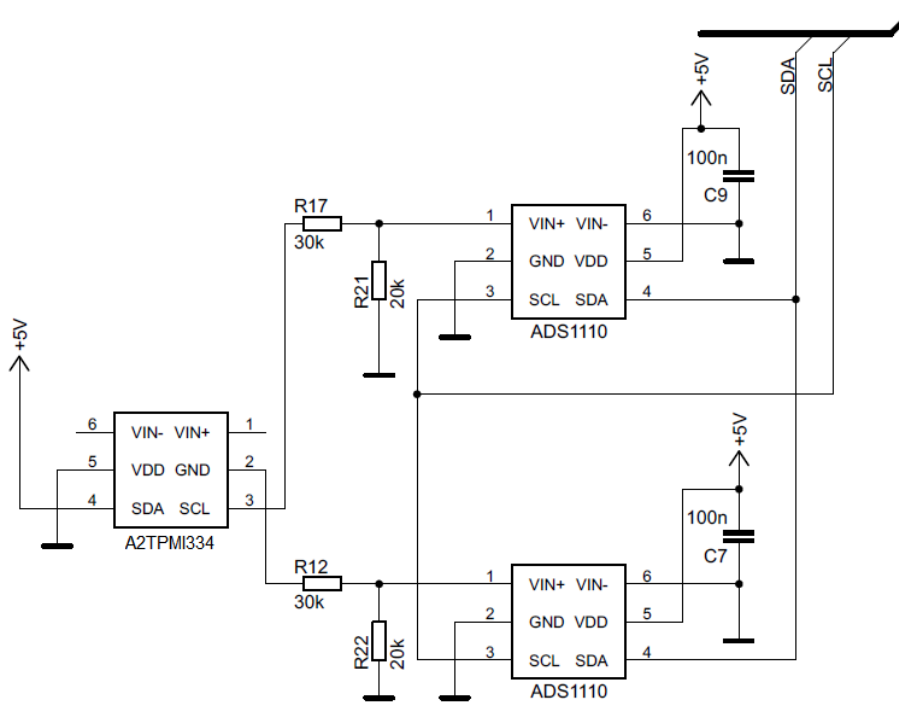
Obr. 16.1 Schéma zapojení mikroprocesorové jednotky ATMEGA128 k perifériím

16.1.2 Zapojení tranzistorového termoanemometru



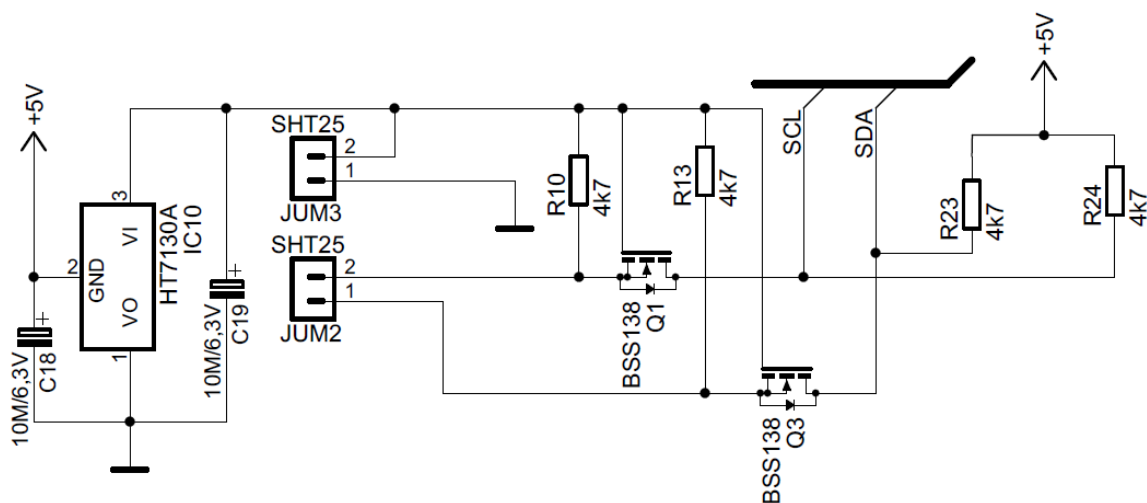
Obr. 16.2 Zapojení tranzistorového termoanemometru

16.1.3 Zapojení snímače střední radiační teploty



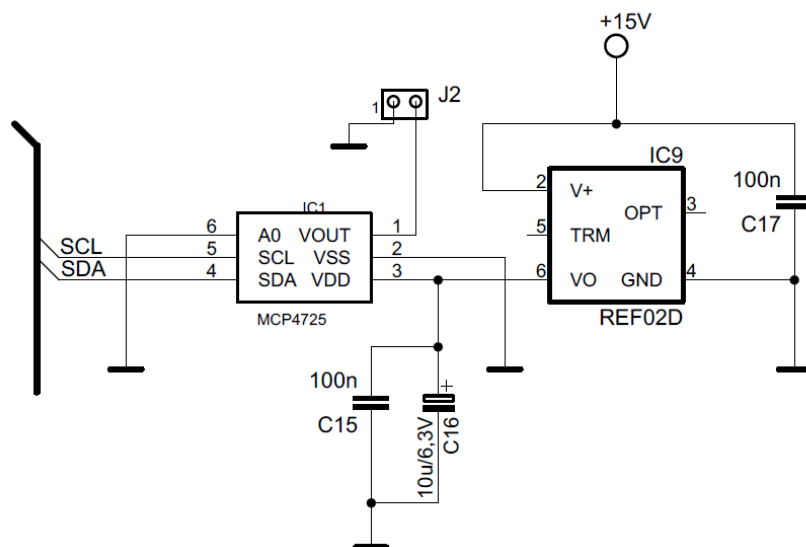
Obr. 16.3 Zapojení snímače střední radiační teploty A2TPMI334 s A/D převodníky ADS1110

16.1.4 Zapojení snímače teploty a relativní vlhkosti SHT25



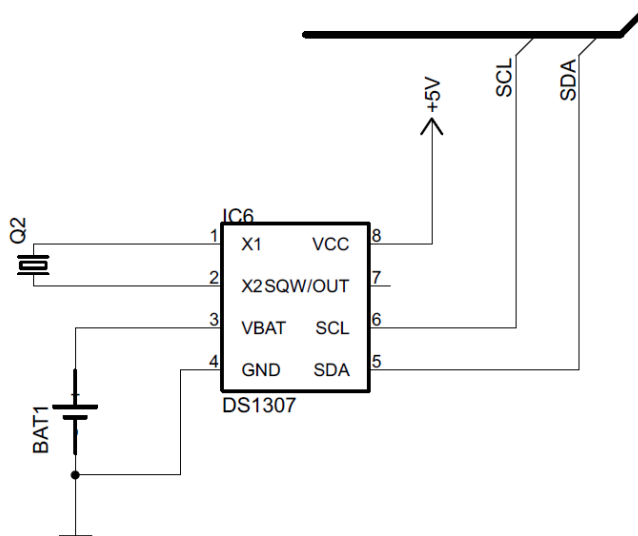
Obr. 16.4 Zapojení snímače teploty a relativní vlhkosti SHT25 s oboustranným převodníkem napětových úrovní

16.1.5 Zapojení DA převodníku



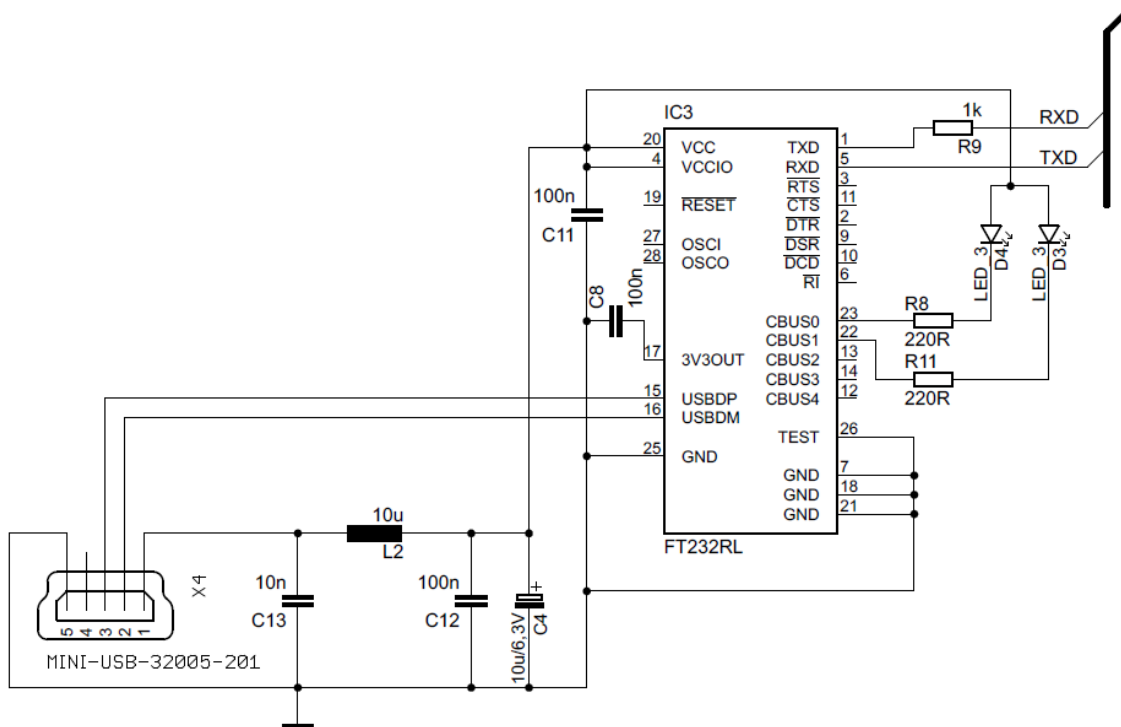
Obr. 16.5 Zapojení D/A převodníku MCP4725 s přesnou napětovou referencí REF02

16.1.6 Zapojení hodin reálného času DS1307



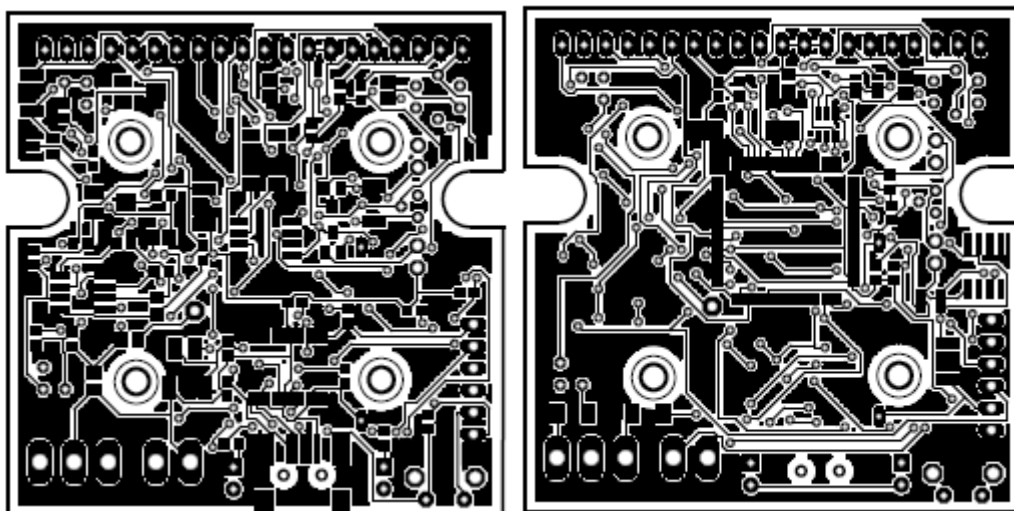
Obr. 16.6 Zapojení hodin reálného času DS1307

16.1.7 Zapojení převodníku FT232RL pro komunikaci s PC

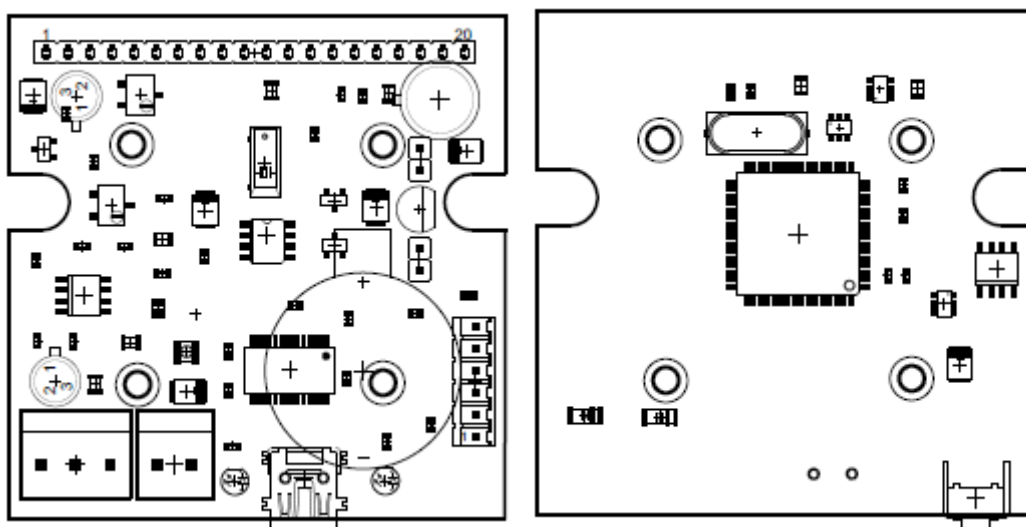


Obr. 16.7 Zapojení převodníku FT232RL (RS232 -> USB)

16.1.8 Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje kompaktního snímače operativní teploty

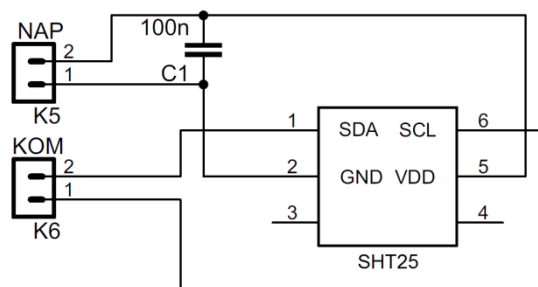


Obr. 16.8 Předloha pro výrobu oboustranné desky plošného spoje (vlevo horní vrstva, vpravo dolní vrstva)



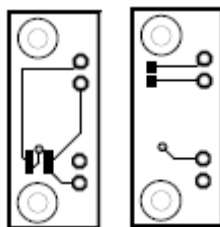
Obr. 16.9 Předloha pro osazení oboustranné desky plošného spoje součástkami (vlevo horní vrstva, vpravo dolní vrstva)

16.1.9 Zapojení snímače SHT25 na samostatné desce plošného spoje

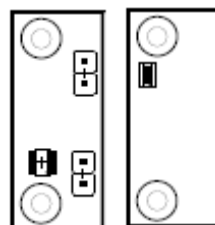


Obr. 16.10 Schéma zapojení snímače SHT25 na samostatné desce plošného spoje

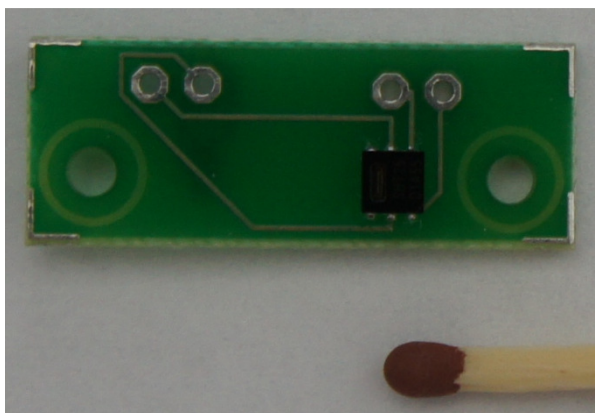
16.1.10 Předloha pro výrobu a osazení samostatné desky plošného spoje pro snímač SHT25



Obr. 16.11 Předloha pro výrobu oboustranné desky plošného spoje (vlevo horní vrstva, vpravo dolní vrstva)



Obr. 16.12 Předloha pro osazení oboustranné desky plošného spoje (vlevo horní vrstva, vpravo dolní vrstva)



Obr. 16.13 Finální podoba osazené desky plošného spoje

16.1.1 Soupis použitých součástek pro kompaktní snímač operativní teploty**Tab. 16.1** *Soupis součástek kompaktního snímače operativní teploty-část 1*

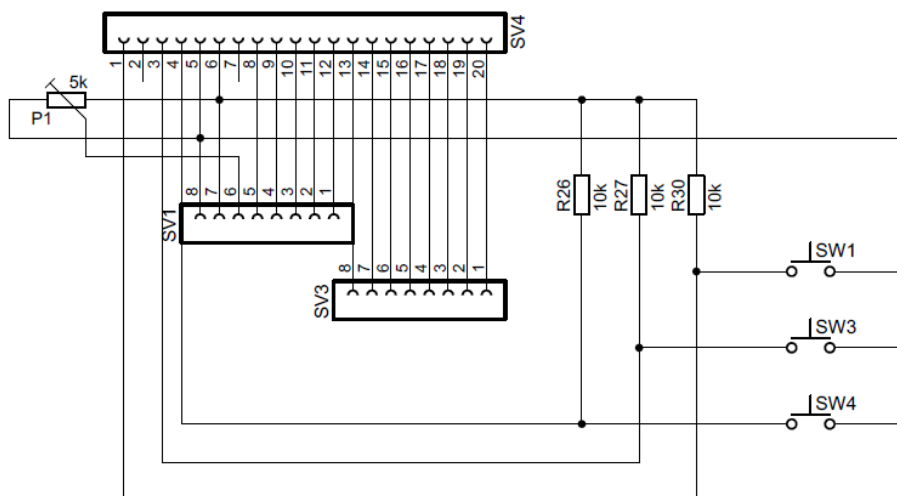
Počet kusů	Položka	Popis	Prodejce
1	Rezistor 10R	R0603 10R 1%	GME
1	Rezistor 82R	R0603 82R 1%	GME
2	Rezistor 220R	R0603 220R 1%	GME
3	Rezistor 1k	R0603 1k 1%	GME
2	Rezistor 2k2	R0603 2k2 1%	GME
1	Rezistor 3k	R0603 3k 1%	GME
4	Rezistor 4k7	R0603 4k7 1%	GME
2	Rezistor 10k	R0603 10k 1%	GME
1	Rezistor 15k	R0603 15k 1%	GME
2	Rezistor 20k	R0603 20k 1%	GME
2	Rezistor 30k	R0603 30k 1%	GME
1	Rezistor 430k	R0603 430k 1%	GME
1	Rezistor 620k	R0603 620k 1%	GME
1	Rezistor 1M5	R0603 1M5 1%	GME
2	Kondenzátor keramický 15p	CK0603 15P/50V NP0	GME
1	Kondenzátor keramický 1n8	CK0603 1N8/50V X7R	GME
1	Kondenzátor keramický 10n	CK0603 10N/50V X7R	GME
10	Kondenzátor keramický 100n	CK0603 100N/50V Y5V	GME
4	Kondenzátor tantalový 10μF/6V	CTS 10M/25V B 20%	GME
1	Kondenzátor tantalový 100μF/6V	CTS 100M/6,3V B 10%	GME
2	Tranzistor 2N2222A	2N2222A	GME
2	Tranzistor BSS138	BSS138 SMD	GME
1	Trimr 20k	TS53YJ-20k	GME
1	Trimr 50k	TS53YJ-50k	GME
1	Krystal 14,7456 MHz	Q14,7456MHz SMD	GME
1	Krystal 32,768 kHz	Q32,768kHz MP03	GME
1	IO HT7130A-1	HT7130A-1	GME
1	AD převodník	ADS1110A0IDBVT	TME
1	AD převodník	ADS1110A1IDBVT	TME
1	Hodiny reálného času	DS13077Z	TME
1	DA převodník	MCP4725A0T-E/CH	TME
1	Napěťová reference	REF02AU	TME
1	IO ATMEGA128A-AU	ATmega128A-AU	GME
1	IO LM393D	LM393 SMD	GME

Tab. 16.1 *Soupis součástek kompaktního snímače operativní teploty-část 2*

Počet kusů	Položka	Popis	Prodejce
1	Dutinková lišta 20 PIN	BLW20G V5,7mm	GME
1	Oboustranný kolík	S1G20	GME
1	USB konektor	USB-MINI B F SMD	GME
1	Knoflíková baterie	CR2032	GME
1	Držák baterie	BH2032	GME
1	Krabička	HM-1593KGY	TME
1	Čočka	180°	Optická dílna Trutnov
1	Snímač teploty a vlhkosti	SHT25	SOS El.
1	Snímač radiační teploty	A2TPMIOAA180	SOS El.
1	Led dioda zelená	L-934GT	GME
1	Led dioda oranžová	L-934SEC	GME
1	Mikrospínač	P-KSM632B	GME

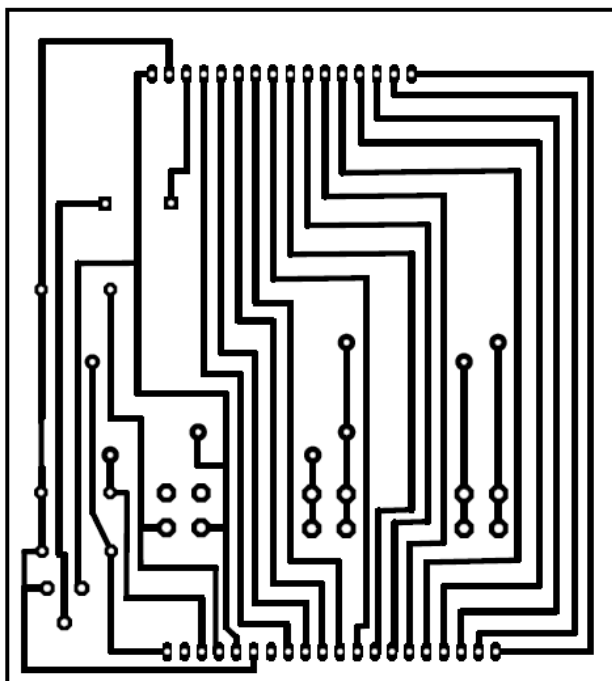
16.2 ZOBRAZOVACÍ JEDNOTKA

16.2.1 Schéma zapojení zobrazovací jednotky

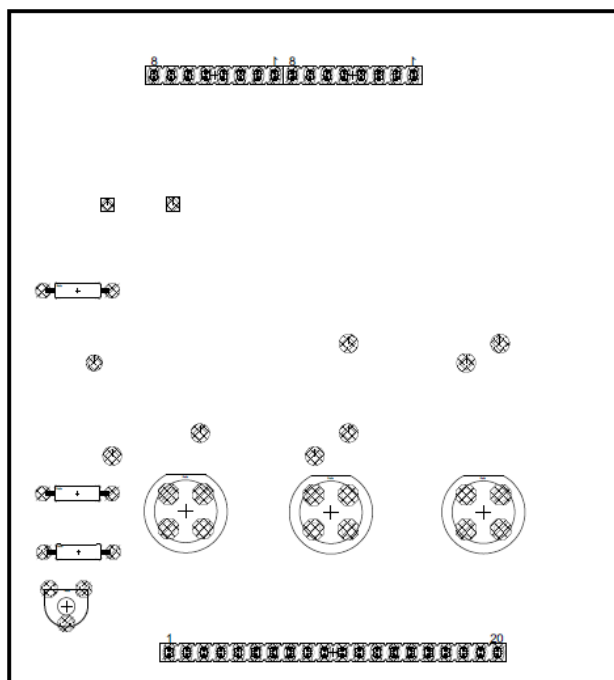


Obr. 16.14 *Schéma zapojení zobrazovací jednotky MC1604C*

16.2.2 Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje zobrazovací jednotky



Obr. 16.15 Předloha pro výrobu jednostranné desky plošného spoje zobrazovací jednotky



Obr. 16.16 Předloha pro osazení jednostranné desky plošného zobrazovací jednotky

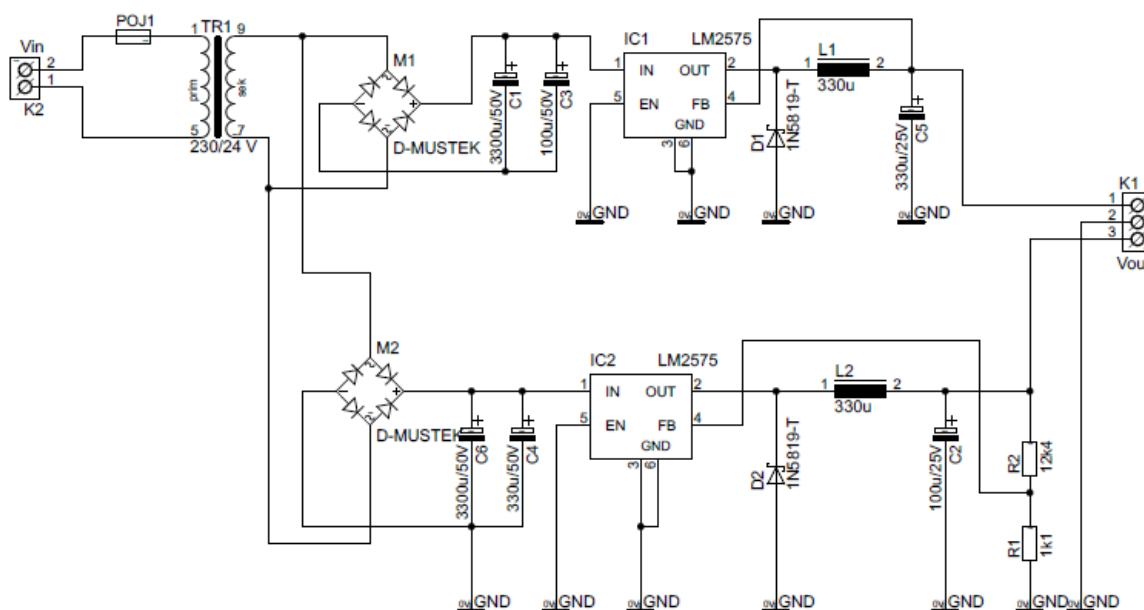
16.2.3 Soupis použitých součástek pro zobrazovací jednotku

Tab.16.2 *Soupis součástí zobrazovací jednotky*

Počet kusů	Položka	Popis	Prodejce
3	Rezistor 10k	MRR 10k	GME
1	LCD MC1604CH-SYL	MC1604C-SYL	GME
1	Dutinková lišta 20 PIN	BLW20G V5,7mm	GME
1	Oboustranný kolík	S1G20	GME
3	Tlačítkový spínač	P-DT6BL	GME
1	Trimr	PK50HK010	GME
1	Fotosenzitivní jednostranný PS	CU-TA056-P	GME
1	Krabička	U-KM78	GME

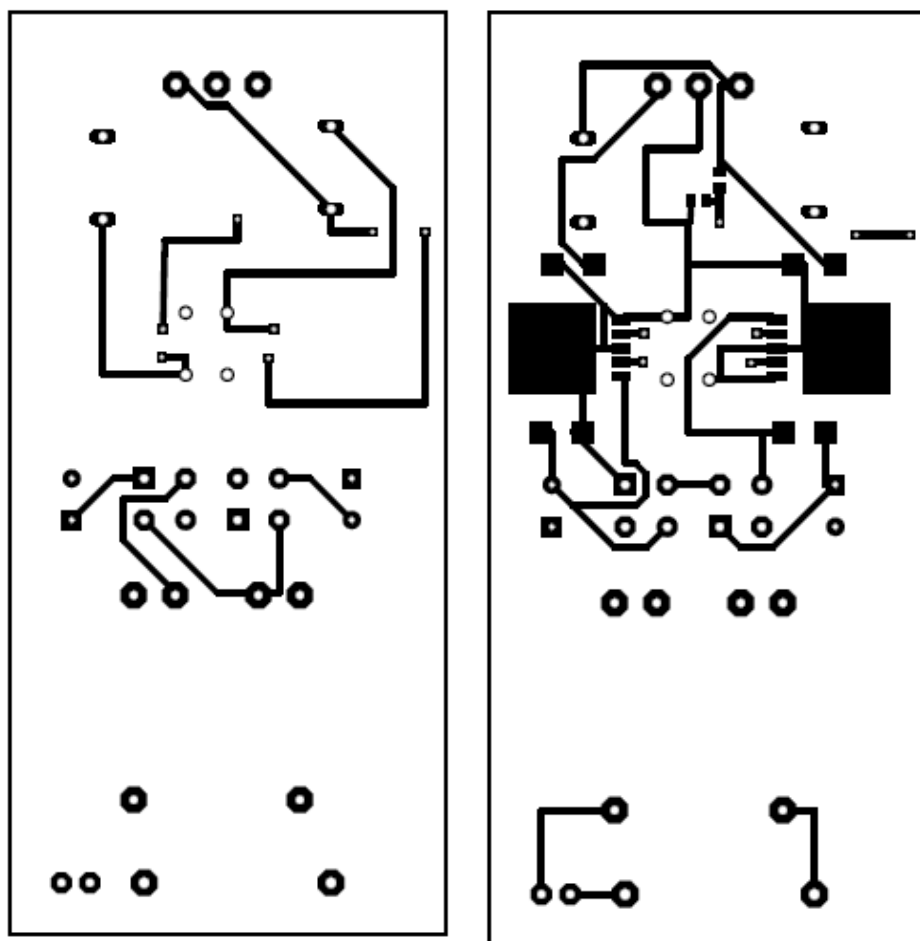
16.3 NAPAJECÍ ADAPTÉR

16.3.1 Schéma zapojení napájecího adaptéru

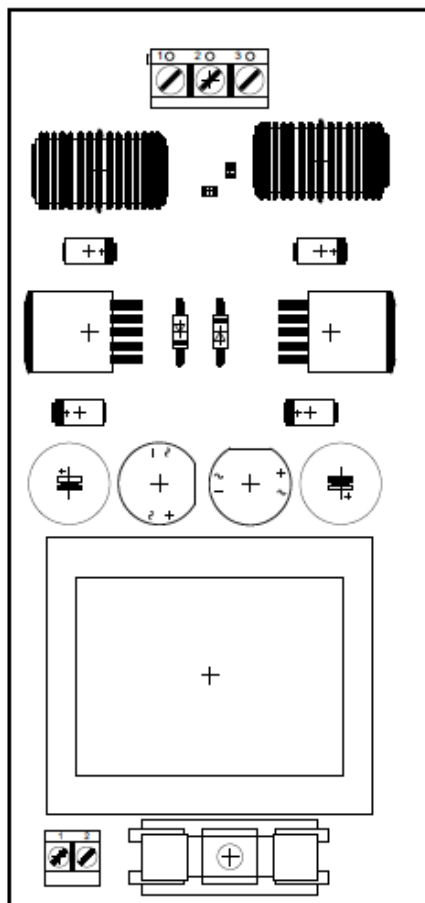


Obr. 16.17 Schéma zapojení napájecího adaptéru

16.3.2 Předloha pro výrobu a osazení desky plošného spoje napájecího adaptéru



Obr. 16.18 Předloha pro výrobu oboustranné desky plošného napájecího adaptéru



Obr. 16.19 *Předloha pro osazení desky plošného spoje (horní vrstva)*

16.3.3 Soupis použitých součástek pro napájecí adaptér

Tab. 16.3 Soupis použitých součástek pro napájecí adaptér

Počet kusů	Položka	Popis	Prodejce
1	Rezistor 12k4	R0805 12k4 1%	GME
1	Rezistor 1k1	R0805 1K1 1%	GME
2	Stabilizátor napětí	LM2575S-5.0 TO-263	GME
1	Transformátor EI	EI Transformátor do DPS HAHN BV EI 382 1196 (2x18)	GME
2	Usměrňovací můstek	B250C1500	GME
2	Kondenzátor elektrolytický	CE 3300u/50V JAM-SK 18x42 RM7,5 BULK	GME
2	Kondenzátor elektrolytický	CE 100u/25VIT CAP-GL 8x12 RM3,5	GME
2	Kondenzátor elektrolytický	CE 300u/25VT JAM-TK 8x11,5 RM3,5	GME
2	Schottkyho dioda	1N5819 MELF (SMD)	GME
2	Tlumivka 330uH	TL.SMT75 330uH (SMD)	GME
2	Tlumivka 330uH	09P-331K MAT	GME
1	Superrychlá pojistka	PTF15B	GME
1	Pojistkové pouzdro do DPS	PTF15B	GME
1	Pojistka 100mA	FSF00.1	GME
1	Svorkovnice 2 PINY	ARK300R-A-2P	GME
1	Svorkovnice 3 PINY	ARK300R-A-3P	GME
2	Kabelová příchytka	F0510HC-1	GME
1	Šňůra síťová 2x0,75mm ²	NKE 150/0 H03VVH2 bez koncovky	GES
4	Kabel třížilový	LIYY 314	GES
1	Krabička plastová na zdroj KPZ5	114x70x63	GES
2	Kabelová průchodka	AG-12SRBL	GES
1	Deska plošného spoje	CU-TA054-1/2P	GME