

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

ZKRÁCENÁ VERZE DOKTORSKÉ PRÁCE
SUMMARY OF DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAN JANEČKA

VEDOUcí PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. FRANTIŠEK VDOLEČEK, CSc.

OPONENTI
OPPONENTS

Doc. Dr. Ing. PAVEL NĚMEČEK

Doc. Ing. ZDENĚK KRATOCHVÍL, CSc.

DATUM OBHAJOBY ŘÍJEN 2012

KLÍČOVÁ SLOVA

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

KEYWORDS

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

VUT v Brně – Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky

ISBN 80-214- doplní redakce

ISSN 1213-418X

OBSAH

OBSAH.....	3
1 ÚVOD.....	5
2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY	6
2.1 Faktory prostředí.....	6
2.1.1 Teplota vzduchu	6
2.1.2 Rychlost proudění vzduchu	6
2.1.3 Střední radiační teplota	7
2.1.4 Vlhkost vzduchu.....	8
2.2 Faktory osobní.....	8
2.2.1 Hodnota metabolismu	8
2.2.2 Tepelný odpor oděvu.....	9
2.3 Kritéria tepelné pohody.....	9
2.3.1 Operativní teplota	9
2.4 Současný stav dostupných systémů pro hodnocení vnitřního mikroklimatu.....	11
2.5 Současná legislativa pro hodnocení tepelného mikroklimatu.....	11
2.5.1 Nařízení vlády č. 361/2007 Sb.	11
2.5.2 Norma ČSN ISO 7730.....	11
2.5.3 Norma ČSN ISO 7726.....	12
3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE	13
4 ŘEŠENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty	14
4.1 Měření teploty	14
4.1.1 Senzor SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu.....	15
4.2 Měření střední radiační teploty	16
4.2.1 Infratermočlánek od firmy PerkinElmer	16
4.3 Měření rychlosti proudění vzduchu	18
4.3.1 Digitální tranzistorový termoanemometr.....	18
4.4 Konstrukce kompaktního snímače operativní teploty.....	19
4.5 Zhodnocení kompaktního snímače operativní teploty	20
5 ZÁVĚR.....	23
6 POUŽITÁ LITERATURA.....	26
7 VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	28
CURRICULUM VITAE.....	31
ABSTRAKT	32

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 těchto snah 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.

Teplo, 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.

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.

Hlavním cílem předložené dizertační práce je návrh vhodného snímače operativní teploty pro hodnocení tepelného stavu prostředí. Právě operativní teplota se jeví jako vhodný komplexní parametr, který se stanovuje přepočtem z několika přímo měřených veličin charakterizujících stav prostředí.

2 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY

Tepelná pohoda je pocit, který člověk vnímá při pobytu v prostředí. Jak již bylo řečeno, 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. [2], [8], [24], [29]

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, na faktory *prostředí* a faktory *osobní*.

2.1 FAKTORY PROSTŘEDÍ

Znalost faktorů prostředí, kterými jsou teplota vzduchu, střední radiační teplota, rychlost proudění vzduchu a vlhkost vzduchu, je důležité nejen pro jejich měření, ale také pro hodnocení tepelného stavu prostředí.

2.1.1 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 prostorech, 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.

2.1.2 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 misky 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: [4]

- 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.

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.

2.1.3 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 [19]. Pro tuto definici se účinky heterogenního i homogenního prostředí na člověka považují za stejné. Pro výpočet střední radiační teploty se používá následující rovnice (2.1) [4]

$$T_r^4 = T_1^4 \cdot F_{p-1} + T_2^4 \cdot F_{p-2} + \dots + T_N^4 \cdot F_{p-N}, \quad (2.1)$$

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 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. Pro výpočet střední radiační teploty měřené pomocí kulového teploměru platí vztah (2.2) [24]

$$T_r = \sqrt[4]{T_g^4 + \frac{\alpha_{kg}}{\varepsilon \cdot \sigma_0} \cdot (T_g - T_a)} . \quad (2.2)$$

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. [17]

2.1.4 Vlhkost vzduchu

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

2.2 FAKTORY OSOBNÍ

Pro dosažení tepelné pohody člověka v uzavřeném prostředí jsou důležité nejen faktory prostředí popsané výše, ale také faktory osobní, kterými jsou energetický výdej člověka a tepelný odpor oděvu.

2.2.1 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], která se u člověka blíží nule. Vnitřní produkce tepla je závislá na činnosti člověka. Člověk produkuje teplo i ve spánku a toto produkované teplo označujeme bazální metabolismus. Pro energetický výdej člověka platí vztah (2.3) [29]

$$\dot{Q}_m = \dot{Q} + W . \quad (2.3)$$

Vnější mechanickou účinnost člověka η [-] lze popsat vztahem (2.4) [57]

$$\eta = \frac{W}{\dot{Q}_m} . \quad (2.4)$$

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 m²), tedy 58,2 W.m⁻².

2.2.2 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 (2.5) [5], [12], [24]

$$\dot{Q}_k + \dot{Q}_r = \frac{S \cdot (t_k - t_p)}{R_{cl}}, \quad (2.5)$$

kde t_k je střední teplota povrchu pokožky [°C],
 t_p teplota vnějšího povrchu oděvu [°C],
 S povrch těla [m²],
 R_{cl} tepelný odpor oděvu [m².K.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 (2.6) [12]

$$I_{cl} = \frac{R_{cl}}{0,155}, \quad (2.6)$$

pro níž se zavedlo jednotkové označení clo. 1 clo odpovídá tepelnému odporu 0,155 m².K.W⁻¹.

2.3 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.

2.3.1 Operativní teplota

Operativní teplota t_o [°C] je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekcí i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí. Pro operativní teplotu platí vztah (2.7) [7]

$$t_o = \frac{\alpha_k \cdot t_a + \alpha_r \cdot t_r}{\alpha_k + \alpha_r} = A \cdot t_a + (1 - A) \cdot t_r = t_r + A \cdot (t_a - t_r), \quad (2.7)$$

kde α_k je součinitel přestupu tepla konvekcí [W.m⁻².K⁻¹],
 α_r součinitel přestupu tepla radiací [W.m⁻².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

$$A = \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \alpha_r} = \frac{\alpha_k}{\alpha} \quad (2.8)$$

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 2.1.

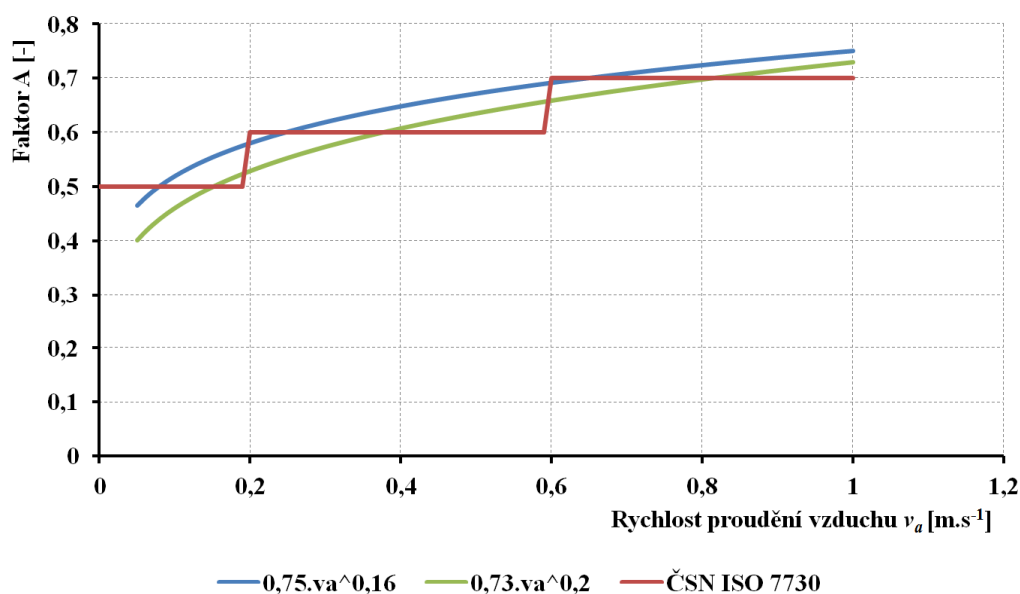
Tab.2.1 Hodnoty faktoru A dle normy ČSN ISO 7730

v_a (m.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 2.1 jsou znázorněny tři závislosti. Červeně je vyobrazen požadavek normy. Další dvě křivky (modrá a zelená) jsou možné aproximace tohoto faktoru, které lze vyjádřit vztahy (2.9) a (2.10) [7]

$$A = 0,75 \cdot v_a^{0,16}, \quad (2.9)$$

$$A = 0,73 \cdot v_a^{0,2}. \quad (2.10)$$



Obr.2.1 Faktor A ve vztahu pro operativní teplotu dle normy a možných aproximací [15]

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 $\alpha_k=3,6$ [7]. Problematikou operativní teploty se také zabývá např. literatura [14], [18], [32].

2.4 STÁVAJÍCÍ STAV DOSTUPNÝCH SYSTÉMŮ PRO HODNOCENÍ VNITŘNÍHO MIKROKLIMATU

Pro hodnocení tepelného mikroklimatu lze v současné době najít na trhu několik systémů. Jedná se např. o „datalogger“ od firmy LumaSense Technologies [16] zvaný Innova, datagogger od firmy DantecDynamics zvaný ComfortSense [5], ke kterým je možno připojit všechny potřebné snímače pro hodnocení tepelného komfortu. Tyto přístroje se připojují 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 prostorách.

Dále je možno zmínit soupravu od firmy Ahlborn s názvem ALMEMO [1] nebo soupravu od firmy Testo s názvem Testo 480 [30]. Hlavní vyhodnocovací zařízení je podobné digitálnímu multimetru, ke kterému se připojují jednotlivé sondy a naměřené hodnoty jsou zobrazovány přímo na displeji přístroje. Samozřejmostí je i možnost připojení k PC.

2.5 SOUČASNÁ LEGISLATIVA PRO HODNOCENÍ TEPELNÉHO MIKROKLIMATU

2.5.1 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. [20]

2.5.2 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 [4]:

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

Tab. 2.2 Příklad projektového kritéria pro prostory v různých typech budov [4]

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

Norma dále rozděluje prostory do třech kategorií A, B a C. Příklad budov a místností, které jsou rozděleny do jednotlivých kategorií ukazuje tabulka 2.2. 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.

2.5.3 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 [3]

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

3 CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE

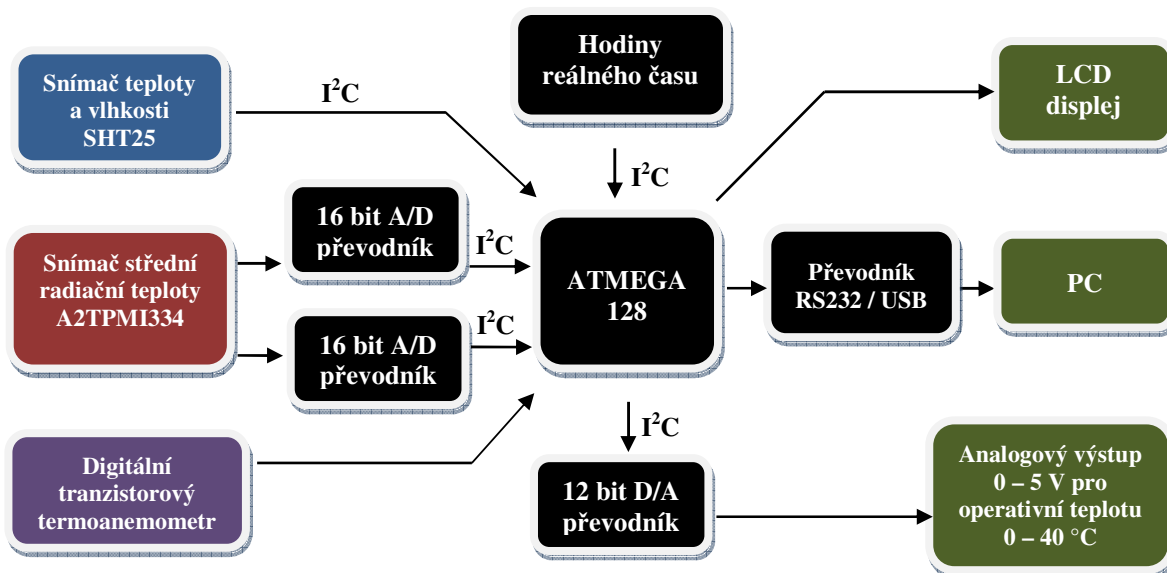
Jak již bylo řečeno, v současné době neexistuje levné zařízení s patřičnou přesností, které by umožňovalo měření všech potřebných parametrů prostředí. Dostupnost takového zařízení nejen zpřístupní parametry komplexnějšího hodnocení prostředí a tepelné pohody podle příslušných norem a předpisů, ale současně 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.

4 ŘEŠENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty

Kompaktní snímač operativní teploty je elektronické zařízení postaveno na mikrokontroléru Atmega128. K tomuto měřicímu, řídicímu a komunikačnímu zařízení jsou připojeny jednotlivé snímače pro měření parametrů prostředí. Z naměřených údajů je následně vypočtena operativní teplota dle vztahu 2.7 a pomocí D/A převodníku je hodnota operativní teploty převedena na analogové napětí, které je možné přivést do řídicího systému. Dále zařízení umožňuje komunikovat a počítačem pomocí USB portu, ve kterém je možno zobrazovat naměřené hodnoty a ukládat je do souboru. Pro okamžité zobrazení naměřených dat lze ke snímači připojit LCD displej. Na obrázku 4.1 je zjednodušené blokové schéma kompaktního snímače operativní teploty.



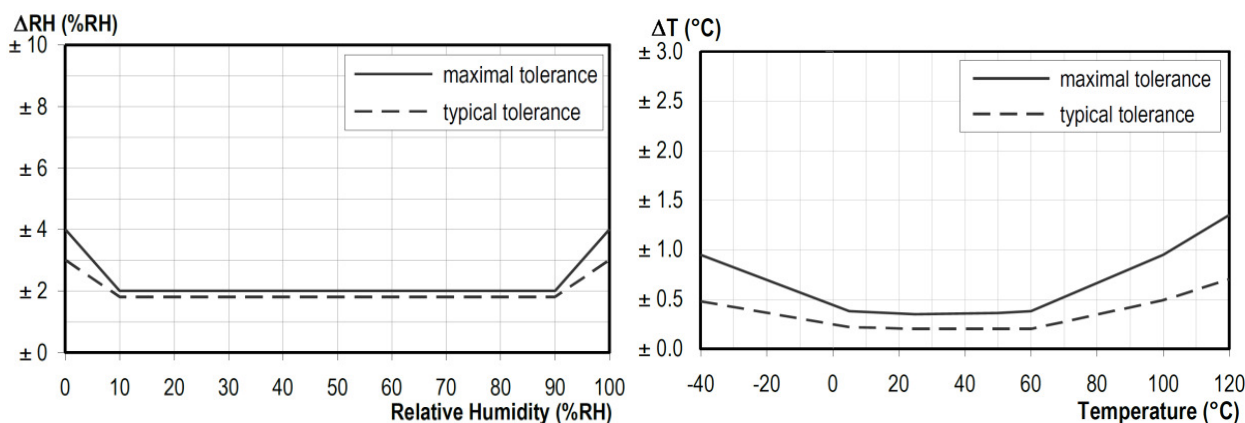
Obr. 4.1 Blokové schéma kompaktního senzoru operativní teploty

4.1 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), termočlávkové 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.

4.1.1 Senzor SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu

Pro měření teploty vzduchu a relativní vlhkosti vzduchu byl vybrán duální senzor SHT25 od firmy Sensirion s digitálním výstupem, 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® a umožňuje na jednom čipu umístit samotný senzor v kombinaci s obvodem pro analogové nebo digitální zpracování signálů. Technologie CMOSens® zaručuje vysokou přesnost, spolehlivost a funkčnost vedle efektivnosti nákladů. [27]



Obr. 4.2 Přesnost snímače SHT25 pro měření teploty a relativní vlhkosti vzduchu [26]

Výhodou je také poměrně dobrá přesnost snímače, kterou ukazuje obrázek 4.2. Snímač lze připojit přímo k mikrokontroléru bez jakýchkoliv dalších podpůrných obvodů, což nezvyšuje cenu řešení. Komunikace probíhá pomocí sběrnice I²C a obdržená data lze přepočítat na měřenou fyzikální veličinu, podle následujících vztahů (4.1), (4.2). Pro teplotu vzduchu platí (4.1) [26]

$$t_a = -46,85 + 175,72 \frac{D_t}{2^{16}}, \quad (4.1)$$

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

Pro výpočet relativní vlhkosti platí (7.2) [26]

$$\varphi = -6 + 125 \frac{D_\varphi}{2^{16}}, \quad (4.2)$$

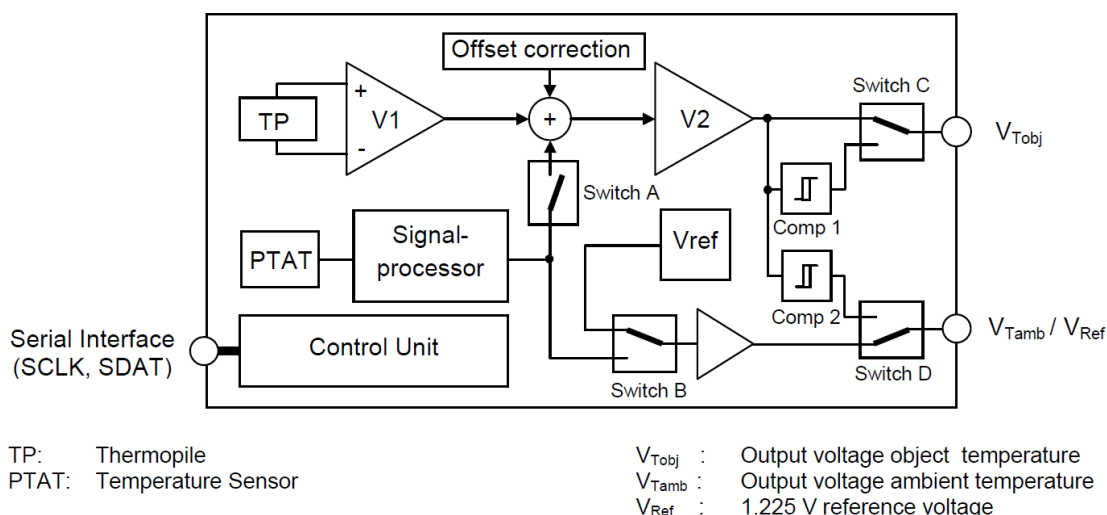
kde φ je relativní vlhkost vzduchu [%],
 D_φ digitální číslo ze senzoru SHT25 z měření vlhkosti [-].

4.2 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.

4.2.1 Infratermočlánek od firmy PerkinElmer

Pro měření radiční 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 kalibrováný 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.



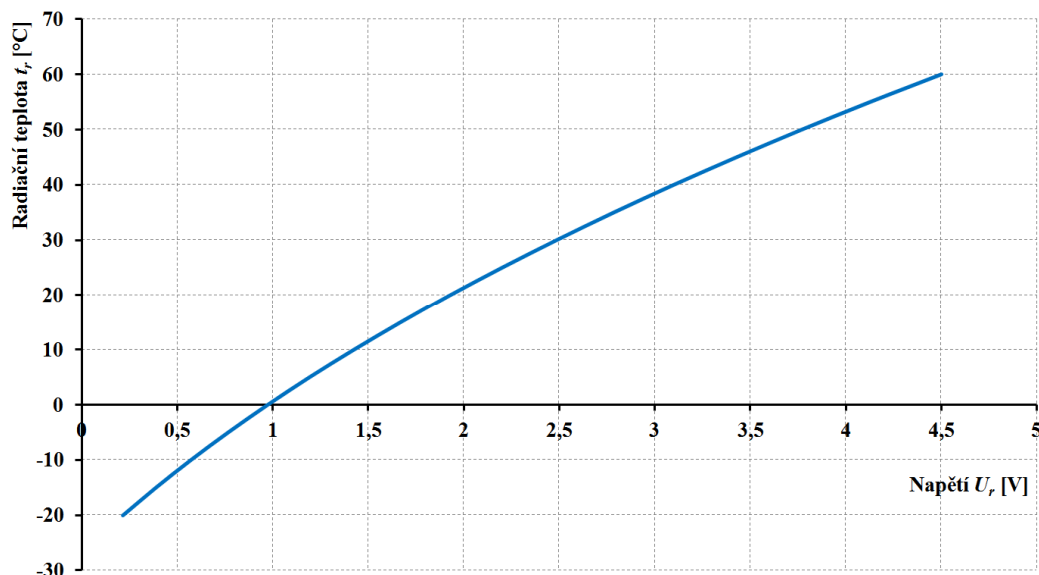
Obr. 4.3 Zjednodušené blokové schéma termočlánekové baterie A2TPMI [52]

Napěťový signál, generovaný při dopadajícím IR záření na absorpční vrstvu, je zesílen pomocí předzesilovače s rozlišením 8 bitů. Vzhledem k principu měření teploty termočláneků 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 4.3.

Závislost výstupního napětí na teplotě objektu je zobrazena na obrázku 4.4 a tuto charakteristiku lze popsat polynomem (4.3) [25]

$$t_r = -0,002603 \cdot U_r^6 + 0,04802 \cdot U_r^5 - 0,38431 \cdot U_r^4 + 1,8498 \cdot U_r^3 - 6,835 \cdot U_r^2 + 32,71 \cdot U_r - 26,75, \quad (4.3)$$

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



Obr. 4.4 Závislost radiační teploty na výstupním napětí senzoru A2TPMI334[52]

Tento snímač disponuje také napěťovým výstupem z odporového snímače pro měření teploty srovnávacích spojů termočlánků, která odpovídá teplotě okolního vzduchu. Tuto závislost je možné vyjádřit následujícím polynomem (4.4) [25]

$$t_a = -0,5912 \cdot U_a^6 + 8,1616 \cdot U_a^5 - 45,303 \cdot U_a^4 + 130,15 \cdot U_a^3 - 210,22 \cdot U_a^2 + 221,49 \cdot U_a - 88,635, \quad (4.4)$$

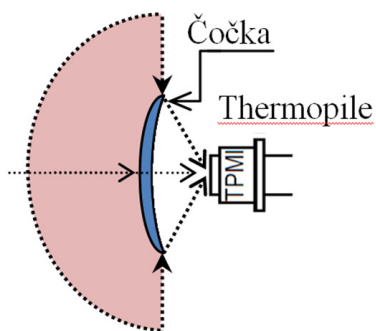
kde t_a je teplota vzduchu [°C],
 U_a výstupní napětí senzoru závislé na teplotě vzduchu [V].

Snímač svými parametry odpovídá požadavkům pro měření radiační teploty v uzavřených prostorách, 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 radiální teploty v jednotlivých zónách snímače. Nevýhodou by byla vysoká cena tohoto řešení a dále zvětšení rozměrů výsledného snímače.



Obr. 4.5 Znárodnění 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 4.5. Podoba čočky a senzor osazený touto čočkou je na obrázku 4.6. Materiál čočky je z křemíku, který má propustnost, v rozsahu vlnových délek 5,5 až 22 μm , průměrně 70 %.



Obr. 4.6 Optická čočka propouštějící IR záření se zorným úhlem 180°

4.3 MĚŘENÍ RYCHLOSTI PROUDĚNÍ VZDUCHU

Z průzkumu trhu vyplynulo, že neexistuje řešení, které by se dalo zabudovat do návrhu kompaktního snímače operativní teploty, a proto bude anemometr navržen.

4.3.1 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 [9]. Schéma bylo upraveno pro dosažení lepších výsledků měření. Byl zvolen tranzistor 2N2222A

v kovovém pouzdru, který je mnohem citlivější a nezávislý na směr přicházejícího proudu vzduchu. Výstupní hodnotou je frekvence, která je závislá na intenzitě ochlazování žhaveného tranzistoru vlivem proudícího vzduchu. Tato frekvence je vyhodnocována mikrokontrolérem a přepočítána na rychlost proudícího vzduchu dle vztahu (4.5)

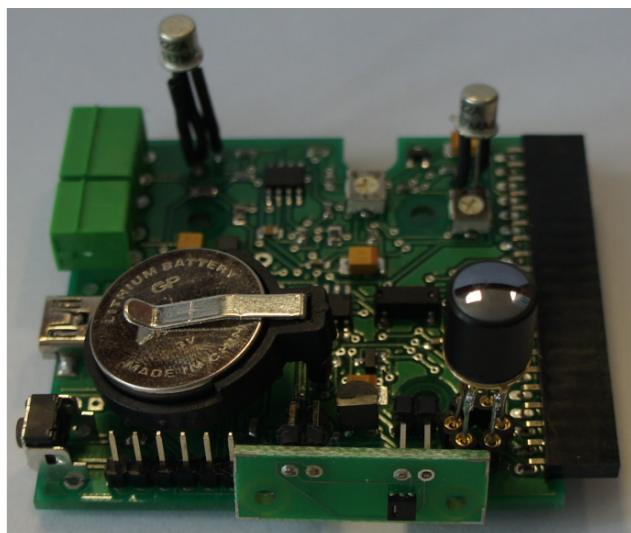
$$v_a = -1,65668 + 0,0183325 \cdot f - 0,0000757002 \cdot f^2 + 1,51482 \cdot 10^{-7} \cdot f^3 - 1,40018 \cdot 10^{-10} \cdot f^4 + 5,263 \cdot 10^{-14} \cdot f^5, \quad (4.5)$$

kde v_a je rychlost proudění vzduchu [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$],
 f výstupní frekvence senzoru závislá na rychlosti proudění vzduchu [Hz].

Tento polynom byl získán na základě porovnávání naměřených hodnot s přeným přístrojem TESTO 445 s termickou kuličkovou sondou.

4.4 KONSTRUKCE KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty

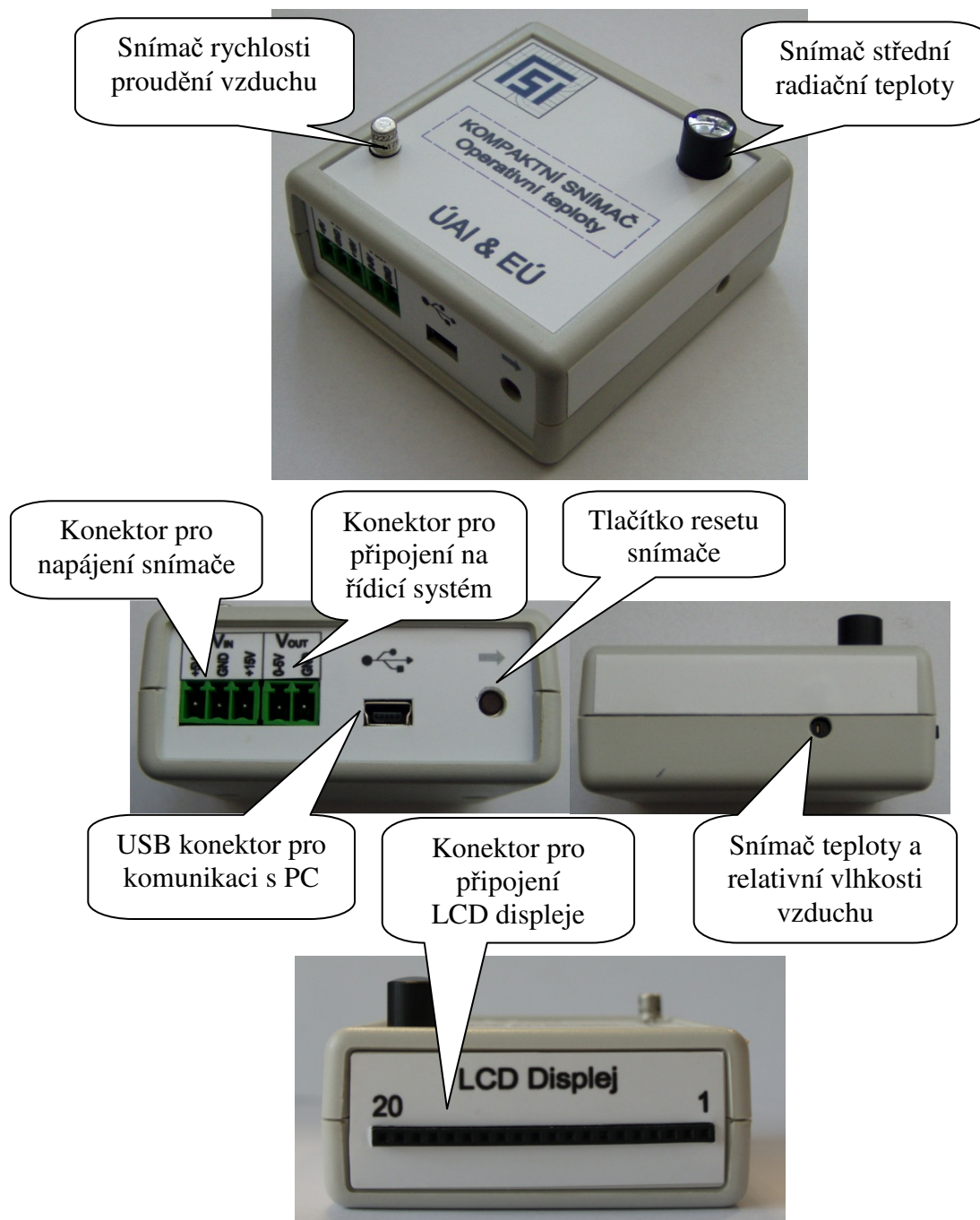
Po ověření jednotlivých snímačů bylo přistoupeno k návrhu zapojení a k vývoji desky plošného spoje. Výsledné řešení tohoto snímače je zobrazeno na obrázku 4.7.



Obr. 4.7 Osazená deska plošného spoje kompaktního snímače operativní teploty

Konečná podoba vyvinutého snímače je na obrázku 4.8. V horní části je umístěn snímač střední radiální teploty a vyhřívaný tranzistor pro měření rychlosti proudění vzduchu. V boční stěně je zabudován snímač pro měření teploty a relativní

vlhkosti vzduchu. Tímto řešením je docíleno, aby se jednotlivé měřené veličiny neovlivňovaly. V čelech pouzdra jsou zabudovány konektory pro napájení snímače, komunikaci s počítačem a konektor pro připojení LCD displeje.



Obr. 4.8 *Finální podoba kompaktního snímače operativní teploty*

4.5 ZHODNOCENÍ KOMPAKTNÍHO SNÍMAČE OPERATIVNÍ TEPLoty

Kalibrace akreditovanými pracovišti jsou poměrně nákladné, proto bylo ověřování vyvinutého snímače prováděno v laboratorních podmínkách.

Výsledky ověřování tranzistorového snímače proudění ukazují poměrně dobrou přesnost. Byla zjištěna jeho nejistota měření, která činí $0,03 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Měřená rychlost proudění vzduchu byla porovnávána pomocí komerčního termoanemometru TESTO 445, který disponuje nejistotou $0,05 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, kterou je nutné zahrnout do celkové nejistoty měření pomocí tranzistorového termoanemometru. Z tohoto důvodu by bylo vhodné tranzistorový termoanemometr nechat zkaližovat 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 nižší. Tímto senzorem není možno měřit intenzitu turbulence, pro kterou je potřeba mnohem rychlejší odezvy. 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 $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$.

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 radiační teplota. Ovšem 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 $1 \text{ }^\circ\text{C}$, která se také z prováděných měření potvrdila. Vypočtená nejistota typu B tohoto snímače činí $0,58 \text{ }^\circ\text{C}$.

Z hlediska výpočtu nejistot měření se pro operativní teplotu jedná o nepřímé měření a výsledná kombinovaná nejistota se vypočítá dle vztahu (4.6).

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.

$$u_c(t_o) = \sqrt{A_{t_r}^2 \cdot u_B^2(t_r) + A_{t_a}^2 \cdot u_B^2(t_a) + A_{v_a}^2 \cdot u_B^2(v_a)} \quad (4.6)$$

Ze vztahu (4.6) vyplývá, že je zapotřebí určit nejistotu jednotlivých parametrů prostředí a dále citlivostní koeficienty dle vztahu (4.7) [22]

$$A_i = \frac{\partial f(Y_1, Y_2, \dots, Y_m)}{\partial Y_i} \quad (4.7)$$

Derivací funkce operativní teploty (2.7) podle jednotlivých proměnných získáme jednotlivé koeficienty citlivosti (4.8), (4.9), (4.10). Výpočet je proveden pro tyto naměřené hodnoty parametrů prostředí:

- rychlost proudění vzduchu $v_a=0,03 \text{ m.s}^{-1}$
- teplota vzduchu $t_a=32,6 \text{ }^\circ\text{C}$
- střední radiační teplota $t_r=32,6 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$A_{t_r} = \frac{\partial t_o}{\partial t_r} = 1 - 0,75v_a^{0,16} = 1 - 0,75 \cdot 0,03^{0,16} = 0,57, \quad (4.8)$$

$$A_{t_a} = \frac{\partial t_o}{\partial t_a} = 0,75v_a^{0,16} = 0,75 \cdot 0,03^{0,16} = 0,43, \quad (4.9)$$

$$\begin{aligned} A_{v_a} &= \frac{\partial t_o}{\partial v_a} = 0,12v_a^{-0,84}t_a - 0,12v_a^{-0,84}t_r = \\ &= 0,12 \cdot 0,03^{-0,84} \cdot 32,6 - 0,12 \cdot 0,03^{-0,84} \cdot 32,6 = 0 \frac{^\circ\text{C}}{\text{m.s}^{-1}}. \end{aligned} \quad (4.10)$$

Pro kombinovanou nejistotu operativní teploty, na základě vztahu (4.6), byla vypočtena hodnota $0,12 \text{ m.s}^{-1}$.

Kombinovanou nejistotu $u_c(t_o)$ vynásobíme koeficientem rozšíření $k_r = 2$ a dostaneme rozšířenou nejistotu měření operativní teploty (4.11) s intervalem pokrytí 95 %

$$U(\Delta t_o) = u_c(t_o) \cdot k_r = 0,12 \cdot 2 = 0,24 \text{ }^\circ\text{C} . \quad (4.11)$$

Výsledek měření operativní teploty lze zapsat ve tvaru (4.12)

$$t_o = 32,6 \pm 0,3 \text{ }^\circ\text{C}. \quad (4.12)$$

5 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.

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. Legislativa také 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, 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.

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 termočlánkového 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. DDP. Stanovená nejistota s koeficientem rozšíření $k_r = 2$ činí $U_r = \pm 0,3$ °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. 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 to přesně měřit.

6 LITERATURA

- [1] AHLBORN. *Souprava pro měření tepelného komfortu ALMEMO* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.ahlborn.cz/cs/produkt/souprava-pro-mereni-tepelneho-komfortu-almemo/>>.
- [2] CENTNEROVÁ, L. *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2001. Vedoucí dizertační práce Doc. Ing. Karel Papež, CSc.
- [3] ČSN ISO 7726, 1993. *Tepelné prostředí. Přístroje a metody měření fyzikálních veličin*. Federální úřad pro normalizaci a měření.
- [4] 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.
- [5] DANTEC DYNAMICS. *ComfortSense* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.dantecdynamics.com/Default.aspx?ID=20093>>.
- [6] DLESEK, V. *Úspory energie při vytápění budov*. Vytápění, větrání, instalace, 1994, roč. 3, č. 4, s. 8-12. ISSN: 1210-1389.
- [7] HEMZAL, K. *Operativní teplota v hodnocení tepelné rovnováhy člověka*. Vytápění, větrání, instalace, 2008, roč. 17, č. 1, s. 16-23. ISSN: 1210-1389.
- [8] HRUŠKA, F. *Regulace parametrů prostředí podle indexů tepelné pohody člověka*. Vytápění, větrání, instalace, 2003, roč. 12, č. 1, s. 46-49. ISSN: 1210-1389.
- [9] HUMLHANS, J. *Zajímavá zapojení - 3. díl*. 1. vyd. Praha: BEN, 2005. 175 s. ISBN: 80-7300-152-7.
- [10] CHUDÝ, V.; PALENČÁR, R.; KUREKOVÁ, E.; HALAJ, M. *Meranie technických veličín*. 1. vyd. Bratislava, 1999, 688s. ISBN: 80-227-1275-2.
- [11] CHYSKÝ, J.; HEMZAL, K. *Větrání a klimatizace*. 3. vyd. Praha, 1993. 490 s. ISBN: 80-901574-0-8.
- [12] JANOTKOVÁ, E. *Technika prostředí*. Skripta VUT, Brno, 1991. ISBN: 80-214-0258-X.
- [13] JOKL, M.; MALÝ, S.; JIRÁK, Z.; TOMÁŠKOVÁ, H. *Kulový stereoteploměr - nový přístroj pro stanovení operativní teploty a radiační teplotní asymetrie*. Vytápění, větrání, instalace, 2009, roč. 18, č. 1, s. 36-38. ISSN: 1210-1389.
- [14] KABELE, K. *Modelování operativní teploty*. Vytápění, větrání, instalace, 2003, roč. 12, č. 1, s. 33-37. ISSN: 1210-1389.
- [15] KREIDL, M. *Měření teploty – senzory a měřící obvody*. 1. vyd. Praha, 2005. 239 s. ISBN: 80-7300-145-4.
- [16] LUMASENSE TECHNOLOGIES. *Thermal Comfort Datalogger INNOVA 1221* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://lumasenseinc.com/EN/products/gas-monitoring/thermal-comfort/>>.
- [17] MATHAUSEROVÁ, Z. *Kulový teploměr a jeho použití*. Vytápění, větrání, instalace, 2003, roč. 12, č. 2. ISSN: 1210-1389.

- [18] MATHAUSEROVÁ, Z. *Operativní teplota*. Vytápění, větrání, instalace, 2006, roč. 15, č. 3, s. 131-132. ISSN: 1210-1389.
- [19] MATUŠKA, T. *Experimentální metody v technice prostředí*. Skripta ČVUT, Praha, 2005. ISBN 80-01-03291-4.
<<http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/22039c.pdf>>.
- [20] Nařízení vlády č.361/2007 Sb. ze dne 12. Prosince 2007, kterým se stanoví podmínky ochrany zdraví při práci.
- [21] NĚMEČEK, P. *Nejistoty měření*. Česká společnost pro jakost, o. s. Praha, 2008. ISBN: 978-80-02-02089-9.
- [22] PALEŇČÁK, R. VDOLEČEK, F. HALAJ, M.: *Nejistoty v měření I-V. Cyklus článků*. Automa, 2001 – 2002, roč. 7-8, ISSN 1210-09592.
- [23] PARSONS, K. *Human thermal environments*. 2. vyd. London, 2003. 527 s. ISBN: 0-415-23792-0.
- [24] 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.
- [25] PERKINELMER. *Thermopile with integrated signal processing circuit* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.hofoo.com.cn/uploadfiles/a2tpmi.pdf>>.
- [26] SENSIRION. *Humidity and Temperature Sensor* [online]. [cit. 2012-8-30] <http://www.soselectronic.com/a_info/resource/c/SHT25.pdf>.
- [27] SOS ELECTRONICS. *Profesionální řešení pro nejpřesnější měření vlhkosti a teploty* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://www.soselectronic.cz/?str=862>>.
- [28] 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.
- [29] SZÉKYOVÁ, M.; FERSTL, K.; NOVÝ, R. *Větrání a klimatizace*. 1. vyd. Bratislava, 1993. 359 s. ISBN: 80-8076-037-3.
- [30] 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)>.
- [31] VOJÁČEK, A. *Thermopile sensors=radiační pyrometry* [online]. [cit. 2012-8-30] <<http://automatizace.hw.cz/clanek/2005101401>>.
- [32] 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.

7 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.; MLCÁK, 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 radiální 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*.

CURRICULUM VITAE

Osobní údaje:

Jméno a příjmení : Ing. Jan Janečka
Datum narození : 26.4.1983
Národnost : česká
Email: y47509@stud.fme.vutbr.cz

Vzdělání:

- 2005-2007: Ing., VUT Brno - Fakulta elektrotechniky komunikačních technologií, obor Kybernetika, automatizační a měřicí technika
- 2002-2005: Bc., VUT Brno - Fakulta elektrotechniky komunikačních technologií, obor Automatizace a měřicí technika
- Střední průmyslová škola elektrotechnická ve Frenštátě pod Radhoštěm, obor Automatizační technika

Kariéra:

- 2011–dosud: ABB s.r.o., divize silnoprůdové elektrotechniky
- 2009–2011: Práce na projektu: Výzkum energeticky úsporných zařízení pro dosažení pohody vnitřního prostředí GAČR 101/09/H050
- 2007–2008: Práce na projektu: Výzkum efektivních systémů pro zlepšení kvality vnitřního prostředí GAČR 101/05/H018
- 2006-2008: Technická laboratoř ABB s.r.o. PPMV Brno

Ostatní aktivity

- 2007 – dosud: Člen ASI (Asociace Strojních Inženýrů) - Klub Brno

Ostatní dovednosti

- Vyhláška č.50 § 7
- Práce s programy Labview, ControlWeb, MS Office a další
- Znalost jazyka ANSI-C, programování mikrokontrolerů ATmega
- Mírně pokročilá znalost AJ
- Mírně pokročilá znalost NJ
- Řidičský průkaz skupiny A, B, C, T

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 radiální 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 konvekcí 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.

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 than 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 than able to adjust the parameters of environment using appropriate way based on relevant requirements.