

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ
ÚSTAV TECHNIKY PROSTŘEDÍ

MĚŘENÍ PARAMETRŮ VNITŘNÍHO PROSTŘEDÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Příbyl** Jméno: **Jan** Osobní číslo: **380616**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav techniky prostředí**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Technika životního prostředí**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Měření parametrů vnitřního prostředí

Název diplomové práce anglicky:

Measurement of Thermal Environment Conditions

Pokyny pro vypracování:

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Vladimír Zmrhal Ph.D., ústav techniky prostředí FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **27.10.2016** Termín odevzdání diplomové práce: **13.01.2017**

Platnost zadání diplomové práce: _____

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

ANOTACE

Diplomová práce se zabývá tepelným komfortem člověka, faktory které tepelný komfort ovlivňují a popisuje ukazatele tepelného komfortu *PMV*, *PPD* a *DP* a operativní teplotu. V rámci praktické části byly pomocí vzduchové klimatizační jednotky Robatherm a vnitřních tepelných zisků v měřicí komoře vytvářeny různé tepelně vlhkostní podmínky, které byly monitorovány všesměrovou sondou rychlosti DANTEC 54T21 a měřicím přístrojem ALMEMO 2890-9 vybaveného sadou teplotních a vlhkostních čidel. Výsledkem práce je grafické a tabulkové vyhodnocení ukazatelů tepelného komfortu pro jednotlivé ustálené stavy vnitřního prostředí měřicí komory, doporučení tří vybraných stavů pro měření v rámci měřicí úlohy v předmětu experimentální metody a návrh na optimalizaci podmínek měření v měřicí komoře.

SUMMARY

The thesis deals with human's thermal comfort, factors that influence the thermal comfort and describes thermal comfort indicators PMV, PPD, PD and operative temperature. In the practical section various thermal and humidity conditions were created using air conditioning unit Robatherm and inner thermal gains of the measurement chamber, that were monitored by omnidirectional anemometer DANTEC 54T21 and measurement device ALMEMO 2890-9 equipped with range of thermal and humidity indicators. The outcome of the thesis is a graphical and tabular evaluation of thermal comfort indicators of particular steady conditions of interior environment of chamber, further recommendation of three selected conditions for measurement within the frame of experimental measurement exercise of course Experimental Methods and proposal for optimization of measurement condition in measurement chamber.

KLÍČOVÁ SLOVA

Vnitřní prostředí, operativní teplota, tepelná pohoda, tepelný komfort, PMV, PPD

KEY WORDS

Internal enviroment, operative temperature, thermal comfort, PMV, PPD

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem: „Měření parametrů vnitřního prostředí“ vypracoval samostatně pod vedením doc. Ing. Vladimíra Zmrhala, Ph.D., s použitím literatury, uvedené na konci mé diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze 13. 1. 2017

Jan Příbyl

Poděkování

Především děkuji doc. Ing. Vladimíru Zmrhalovi, Ph.D. za odborné vedení diplomové práce, cenné rady a trpělivost. Dále děkuji Ing. Lud'ku Marešovi za pomoc v laboratoři.

Děkuji rodině za podporu při studiu a v neposlední řadě také Martinu Tomkovi a panu Pochylovi za věcné připomínky.

Obsah

Soupis použitého značení	7
Úvod.....	10
Cíle.....	10
1 Tepelná rovnováha a tepelný komfort člověka	11
1.1 Faktory tepelného komfortu	11
1.1.1 Primární faktory.....	11
1.1.2 Sekundární faktory.....	14
2 Ukazatele tepelného komfortu	16
2.1 Předpověď středního tepelného pocitu (PMV).....	16
2.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených (PPD).....	18
2.3 Operativní teplota	18
2.4 Místní tepelný diskomfort	19
2.4.1 Průvan	20
2.4.2 Vertikální rozdíly teploty vzduchu	20
2.4.3 Teplé a chladné podlahy	21
2.4.4 Asymetrie radiační teploty	22
2.5 Kategorie tepelného prostředí.....	23
3 Experiment.....	24
3.1 Vzduchová klimatizační jednotka Robatherm.....	24
3.1.1 Chlazení	26
3.1.2 Ohřev.....	26
3.1.3 Řízení výkonu přívodního ventilátoru	28
3.1.4 Online řízení klimatizační jednotky.....	29
3.2 Vzduchotechnická trať	30
3.2.1 Měření barometrického tlaku	32
3.2.2 Měření parametrů přívodního vzduchu.....	33
3.2.3 Měření diferenčního tlaku U-trubicí a mikromanometrem.....	35
3.2.4 Měření průtoku clonou.....	36
3.2.5 Měření pomocí průtokoměru FMU 250/200	38
3.3 Úvodní měření průtoku, volba měřicí clony	39
3.3.1 Měření netěsnosti potrubí.....	40

3.3.2	Clona 250/140 mm	43
3.4	Měřicí komora	43
3.4.1	Tepelné zisky a tepelná zátěž měřicí komory	45
3.4.2	Všesměrová sonda Dantec 54T21	47
3.4.3	Měřicí přístroj Almemo 2890-9 a program Almemo 4.9.....	48
3.5	Postup měření	50
3.6	Zpracování dat	51
3.7	Výsledky měření.....	52
4	Diskuze	59
5	Závěr.....	60
6	Použitá literatura	62

Soupis použitého značení

c_a	měrná tepelná kapacita vzduchu	[J/kgK]
d	tloušťka vrstvy oděvu; vnitřní průměr	[mm], [m]
f_{cl}	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka	[-]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
h_b	výška sloupce rtuti staničního barometru	[mm]
h_{b1}	výška sloupce rtuti po korekci na výšku vrchlíku	[mm]
h_{b2}	výška sloupce rtuti po korekci na 0 °C	[mm]
l	čtení mikromanometru	[mm]
l_0	nulové čtení mikromanometru	[mm]
l_{cl}	tepelný odpor oděvu	[m ² K/W]
n	užitečný mechanický výkon	[W/m ²]
q	tepelný tok	[W/m ²]
q_d	tepelný tok dýcháním	[W/m ²]
q_k	tepelný tok konvekcí	[W/m ²]
q_m	metabolický tepelný tok	[W/m ²]
q_s	tepelný tok sáláním	[W/m ²]
q_v	tepelný tok vedením	[W/m ²]
q_w	tepelný tok vypařováním	[W/m ²]
p_b	barometrický tlak	[Pa]
p_v	parciální tlak vodní páry	[Pa]
$\overset{..}{p}_v$	parciální tlak sytých par při teplotě suchého teploměru t_a	[Pa]
$\overset{..}{p}_{v,m}$	parciální tlak sytých par při teplotě mokrého teploměru t_m	[Pa]
t_a	teplota vzduchu	[°C]
t_{cl}	teplota povrchu oděvu	[°C]
t_f	teplota podlahy	[°C]
t_k	výsledná teplota	[°C]
$t_{k,opt}$	optimální teplota pokožky	[°C]
t_m	teplota mokrého teploměru	[°C]
t_o	operativní teplota	[°C]
t_p	teplota přiváděného vzduchu	[°C]
t_r	střední radiační teplota	[°C]

v_a	rychlost proudění vzduchu	[m/s]
A	psychrometrický součinitel, plocha	[-], [m ²]
C	součinitel průtoku	[-]
D	vnější průměr	[m], [mm]
DR	stupeň obtěžování průvanem	[%]
K_m	konstanta mikromanometru	[-]
PD	procento nespokojených	[%]
PMV	předpověď středního tepelného pocitu	[-]
PPD	procentuální podíl nespokojených	[%]
Q_{vz}	tepelná zátěž od přivedeného vzduchu	[W]
Q_z	vnitřní tepelné zisky	[W]
Re_D	Reynoldsovo číslo vztažené k velkému průměru D clony	[-]
T_u	intenzita turbulence	[%]
U	součinitel prostupu tepla	[W/m ² K]
U_{pr}	průměrný součinitel prostupu tepla	[W/m ² K]
\dot{V}	průtok vzduchu	[m ³ /h]
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K]
α_{kg}	součinitel přestupu tepla na povrchu kulového teploměru	[W/m ² K]
β	poměr průměrů clony	[-]
Δh	rozdíl výšky, výška sloupce rtuti staničního barometru	[mm]
Δh_1	korekce na výšku vrchlíku staničního barometru	[mm]
Δh_2	korekce na teplotu 0 °C staničního barometru	[mm]
Δp	diferenční tlak	[Pa]
Δp_s	statický přetlak	[Pa]
$\Delta t_{a,v}$	vertikální rozdíl teplot	[°C]
Δt_{pr}	asimetrie radiační teploty	[°C]
ε	součinitel expanze	[-]
λ	součinitel prostupu tepla	[W/mK]
μ	dynamická viskozita tekutiny	[Pa×s]
ρ	hustota tekutiny	[kg/m ³]
ρ_a	hustota vzduchu	[kg/m ³]

ρ_{Hg}	hustota rtuti	[kg/m ³]
ρ_l	hustota lihu	[kg/m ³]
ρ_w	hustota vody	[kg/m ³]

ÚVOD

Lidé se již v dávné minulosti instinktivně snažili o dosažení tepelné pohody stavěním různých přístřešků a obydlí, aniž by cokoliv tušili o teorii tepelné pohody. Až do průmyslové revoluce byly jejich možnosti v tomto směru značně omezené. Ke zdokonalení vytápěcí techniky došlo koncem 18. století a začátkem 20. století bylo vynalezeno mechanické chlazení, to byl také podnět pro zahájení výzkumu tepelné pohody člověka. V 50. letech 20. století již bylo známo, že tepelnou pohodu ovlivňuje kromě teploty vzduchu i řada dalších faktorů a pro vyjádření míry tepelné pohody zavedl v roce 1970 profesor Povl Ole Fanger index *PMV* (*předpokládaný střední tepelný pocit*), který je dodnes používán při posuzování tepelného stavu vnitřního prostředí.

V dnešní době tráví člověk většinu života ve vnitřním prostředí, jehož kvalita je utvářena mnoha složkami. Z hlediska vlivu na zdraví a pracovní výkon mají největší podíl tepelně vlhkostní parametry a kvalita vzduchu, které spolu zejména v moderních výstavbách, díky nucenému způsobu větrání, často přímo souvisí. Na jejich návrh je proto kladen velký důraz a měření tepelně vlhkostních parametrů je běžnou praxí.

CÍLE

Cílem této práce je měření a vyhodnocování tepelně vlhkostních parametrů pro různé okrajové podmínky průtoku a teploty přiváděného vzduchu do experimentální komory napojené na vzduchový klimatizační systém. Naměřená data budou vyhodnocena pomocí ukazatelů *PMV*, *PPD*, *DR* a operativní teploty. Pro měřicí úlohu v rámci předmětu experimentální metody budou doporučeno několik měřicích stavů.

Střední radiační teplota t_r

Střední radiační teplota je myšlená rovnoměrná společná teplota všech ploch v prostoru, při níž by byl přenos tepla z těla sáláním stejný, jako ve skutečnosti. Stanoví se výpočtem dle vztahu [6]:

$$t_r = \sqrt[4]{(t_k + 273)^4 + 1,855 \times 10^7 \alpha_{kg} (t_k - t_a)} - 273 \quad (1.2)$$

t_k je výsledná teplota, měřená kulovým teploměrem o průměru $D=150\text{mm}$ a α_{kg} je součinitel přestupu tepla konvekcí na povrchu kulového teploměru, vypočtený dle vztahů [6]:

$$\alpha_{kg} = 1,4 \left(\frac{|t_a - t_k|}{D} \right)^{0,25} \quad \text{pro } v < 0,1 \text{ m}^2/\text{s} \quad (1.3)$$

$$\alpha_{kg} = 6,3 \frac{v^{0,6}}{D^{0,4}} \quad \text{pro } v > 0,1 \text{ m}^2/\text{s} \quad (1.4)$$

Rychlost proudění vzduchu

Při hodnocení vnitřního prostředí je nutno měřit nízké rychlosti proudění (od 0,05 m/s) s poměrně vysokou přesností a malým časovým zpožděním. Rychlostní čidlo musí být všesměrové – tj. musí reagovat na maximální rychlost z libovolného směru. Z měření rychlosti proudění vzduchu a teploty vzduchu je možno určit stupeň obtěžování průvanem [5].

Vlhkost vzduchu

Norma ČSN ISO 7730 uvádí, že v mírných podmínkách má relativní vlhkost vzduchu jen malý vliv na tepelnou pohodu. Zvýšení vlhkosti o 10% odpovídá zvýšení operativní teploty o hodnotu 0,3 °C. V praktické části diplomové práce bude měřena relativní vlhkost φ , vyjádřená v procentech [3].

Metabolismus člověka

V mírném tepelném prostředí se metabolismus přeměňuje téměř výhradně na teplo, které musí být průběžně odváděno, aby byla zachována tepelná rovnováha. Teplota pokožky se při mírné činnosti a komfortních podmínkách pohybuje v rozmezí od 33 °C do 34 °C, tato teplota roste se zvyšující se tělesnou aktivitou. Teplota těla je za normálních podmínek 36,8 °C a se zvyšující se tělesnou aktivitou roste. Bolestivě se projevuje teplota pokožky

nižší než 18 °C, nebo vyšší než 45 °C. Teplota těla nižší než 28 °C může způsobit srdeční arytmii a smrt, teplota vyšší než 46 °C může způsobit nevratné poškození mozku [1], [2].

Teplo produkované odpočívající dospělou osobou je přibližně 100 W a největší podíl na jeho odvodu má pokožka, z tohoto důvodu se pro vyjádření metabolického tepelného toku používají měrné jednotky. Odpočívající dospělá osoba produkuje 58 W/m² povrchu těla, to odpovídá hodnotě 1 met [2].

Následující tabulka uvádí další příklady hodnot metabolického tepelného toku v závislosti na vykonávané činnosti.

Tab. 1 – Hodnoty metabolismu dle ČSN ISO 7730 [3]

Činnost	Metabolický tepelný tok	
	[W/m ²]	[met]
Ležení	46	0,8
Sezení, uvolněné	58	1
Činnost v sedě	70	1,2
Lehká činnost vestoje	93	1,6
Chůze po rovině 3km/h	140	2,4

Oděv

Tepelný odpor oděvu l_{cl} hraje významnou roli při určování tepelné pohody. Při vystavení lidského těla chladným podmínkám, je oděv jedinou možností, jak docílit tepelného komfortu. Tepelný odpor oděvu se stanoví jako součet tepelných odporů jednotlivých vrstev tkanin o tloušťkách d a odporů vzduchových mezer λ dle následujícího vzorce [1]:

$$l_{cl} = \sum \left(\frac{d}{\lambda} \right)_{cl} + \sum \left(\frac{d}{\lambda} \right)_{vzd} \quad 1.5$$

Podobně jako je tomu u vyjádření produkce metabolického tepla, kde se zavádí jednotka met, se tepelný odpor dá vyjádřit jednotkou clo, která odpovídá tepelnému odporu 0,155 m²K/W. Tato hodnota odpovídá u běžného oděvu kombinaci spodního prádla, košile, kalhot, bundy, ponožek a bot. Norma ČSN ISO 7730:2005 [3] uvádí tabulku typických kombinací oděvu a hodnoty jejich tepelných odporů, viz Tab. 2.

Tab. 2– Hodnoty odporů při různých kombinacích oděvu [3]

Pracovní oděv	I_{cl}		Běžný oděv	I_{cl}	
	clo	$m^2 \cdot KW$		clo	$m^2 \cdot KW$
Spodky, kombinéza, ponožky, boty	0,70	0,110	Kalhotky, tričko, šortky, tenké ponožky, sandály	0,30	0,050
Spodky, košile, kombinéza, ponožky, boty	0,80	0,125	Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, tenké ponožky, boty	0,50	0,080
Spodky, košile, kalhoty, pracovní šaty, ponožky, boty	0,90	0,140	Kalhotky, spodnička, punčochy, šaty, střevíce	0,70	0,105
Spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, bunda, ponožky, boty	1,00	0,155	Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty	0,70	0,110
Spodní prádlo s dlouhými nohavicemi a rukávy, termobunda, ponožky, boty	1,20	0,185	Kalhotky, košile, kalhoty, bunda, ponožky, boty	1,00	0,155
Spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, bunda, silná prošívaná venkovní bunda a kombinéza, ponožky, boty, čepice, rukavice	1,40	0,220	Kalhotky, punčochy, halenka, dlouhá sukně, bunda, boty	1,10	0,170
Spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, bunda, silná prošívaná venkovní bunda a kombinéza, ponožky, boty	2,00	0,310	Spodní prádlo s dlouhými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, svetr V, bunda, ponožky, boty	1,30	0,200
Spodní prádlo s dlouhými rukávy a nohavicemi, termobunda a kalhoty, parka, silná kombinéza, ponožky, boty, čepice, rukavice	2,55	0,395	Spodní prádlo s krátkými rukávy a nohavicemi, košile, kalhoty, vesta, bunda, kabát, ponožky, boty	1,50	0,230

1.1.2 Sekundární faktory

Sekundární faktory neovlivňují přímo tepelné toky mezi člověkem a prostředím, přesto některé z nich mají významný vliv na tepelnou pohodu člověka [2].

Věk

S rostoucím věkem hodnota metabolismu klesá, daly by se tedy očekávat rozdíly v podmínkách tepelné pohody pro mladé a starší jedince. Výzkumy provedené v Dánsku a Spojených státech však dokázaly, že tepelné prostředí preferované staršími lidmi se od tepelného prostředí preferovaného mladými lidmi neliší. Nižší hodnota metabolismu starších lidí je kompenzována nižší tepelnou ztrátou vypařováním, starší lidé se méně potí [2], [6].

Pohlaví

Nebyly zjištěny významné rozdíly v tepelném prostředí preferovaném muži a ženami. Ženy mají nižší hodnotu metabolismu než muži, to je však kompenzováno nižší teplotou pokožky a menší tepelnou ztrátou vypařováním. Příčina toho že ženy v praxi často preferují vyšší teploty prostředí může být částečně vysvětlována lehčím oblečením, které ženy nosí v porovnání s muži [2], [6].

Adaptace

Bylo prokázáno, že lidé kteří žijí v teplých, či chladných klimatických podmínkách, jsou za podmínek na které jsou zvyklí schopni podávat vyšší pracovní výkony než lidé, kteří na tyto podmínky zvyklí nejsou. Prokázaly se mírné rozdíly v preferovaném tepelném prostředí z hlediska tepelné pohody mezi těmito skupinami [2], [6].

Sezónní a denní rytmy

Lidé se nemohou adaptovat tak, aby preferovali chladné, či teplé prostředí. Podmínky tepelného komfortu se v zimě a v létě neliší. Oproti tomu teplota lidského kolísá během dne, z čehož se dá usuzovat, že podmínky tepelného komfortu se během dne lišit mohou. Výzkumy však zjistily jen zanedbatelné rozdíly v preferovaném tepelném prostředí během dne [2], [6].

2 Ukazatele tepelného komfortu

Mezi nejčastěji používané ukazatele tepelného komfortu patří operativní teplota t_o , předpověď středního tepelného pocitu PMV a předpokládaný podíl nespokojených PPD . Tyto ukazatele vyjadřují tepelný komfort pro tělo jako celek, někdy je však možné pociťovat diskomfort i v případech, kdy je tělo v tepelné rovnováze a to například pokud dochází k místnímu ochlazování, či oteplováním jednotlivých částí těla. V takovém případě hovoříme o lokálním diskomfortu [3].

2.1 Předpověď středního tepelného pocitu (PMV)

Zkratka PMV pochází z anglického „*predicted mean vote*“, tento ukazatel předpovídá tepelný komfort na základě hlasování velké skupiny lidí, hodnotící svůj tepelný pocit pomocí sedmibodové stupnice, která výstižně popisuje tepelný stav prostředí, viz Tab. 3 [3]

Tab. 3 – Stupnice tepelných pocitů [3]

3	Horko
2	Teplo
1	Mírné teplo
0	Neutrální
-1	Mírné chladno
-2	Chladno
-3	Zima

Ukazatel PMV je funkcí rozdílu tepelného toku produkovaného organismem a aktuálního toku tepla, který tělu odebírá prostředí, tedy rozdílem pravé a levé strany rovnice (1.1.) Tento rozdíl se značí L a po dosažení optimálních fyziologických podmínek $t_{k,opt}$ a $q_{w,opt}$ pro PMV platí [1] [2]:

$$PMV = (0,303 \times \exp(-0,036q_m) + 0,028)L \quad (2.1)$$

kde je

$$L = (q_m - n) - 3,05 \times 10^{-3} [5733 - 6,99(q_m - n) - p_v] - 0,42 [(q_m - n) - 58,15] - 1,7 \times 10^{-5} q_m (5867 - p_v) - 0,0014 q_m (34 - t_a) - 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \alpha_k (t_{cl} - t_a) \quad (2.2)$$

t_{cl} se stanoví z rovnic:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028(q_m - n) - l_{cl} \left\{ 3,96 \times 10^{-8} f_{cl} \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4 \right] + f_{cl} \times \alpha_k (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (2.3)$$

$$\alpha_k = 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} \quad \text{pro } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \sqrt{v_a} \quad (2.4)$$

$$\alpha_k = 12,1 \sqrt{v_a} \quad \text{pro } 2,38 |t_{cl} - t_a|^{0,25} < 12,1 \sqrt{v_a}$$

$$f_{cl} = 1 + 1,290 \times l_{cl} \quad \text{pro } l_{cl} \leq 0,078 m^2 K / W \quad (2.5)$$

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 \times l_{cl} \quad \text{pro } l_{cl} \geq 0,078 m^2 K / W$$

kde je

q_m	energetický výdej lidského těla	[W/m ²]
n	užitečný mechanický výkon	[W/m ²]
l_{cl}	tepelný odpor oděvu	[m ² K/W]
f_{cl}	poměr povrchu oblečeného člověka k povrchu nahého člověka	[-]
t_a	teplota vzduchu	[°C]
t_r	střední radiační teplota	[°C]
v_a	relativní rychlost proudění vzduchu	[m/s]
p_v	parciální tlak vodní páry	[Pa]
α_k	součinitel přestupu tepla konvekcí	[W/m ² K]
t_{cl}	teplota povrchu oděvu	[°C]

Rovnice pro stanovení *PMV* jsou velice komplexní a vyžadují iterační metodu výpočtu, z tohoto důvodu bylo v rámci programu Excel v jazyce Visual Basic naprogramována funkce pro jejich řešení. Zdrojový kód této funkce je k nahlédnutí, viz Příloha 3.

Výhodou ukazatele *PMV* je možnost jeho stanovení pro nekonečné množství kombinací hodnot vstupních veličin, norma ČSN EN ISO 7730:2015 doporučuje použití tohoto ukazatele v rozmezí následujících hodnot hlavních parametrů výpočtu [3]:

q_m 46 až 232 W/m² (0,8 až 4 met)

l_{cl} 0 až 0,31 m² K/W (0 až 2 clo)

t_a 10 až 30 °C

t_r 10 až 40 °C

v_a 0 až 1 m/s

p_v 0 až 2700 Pa

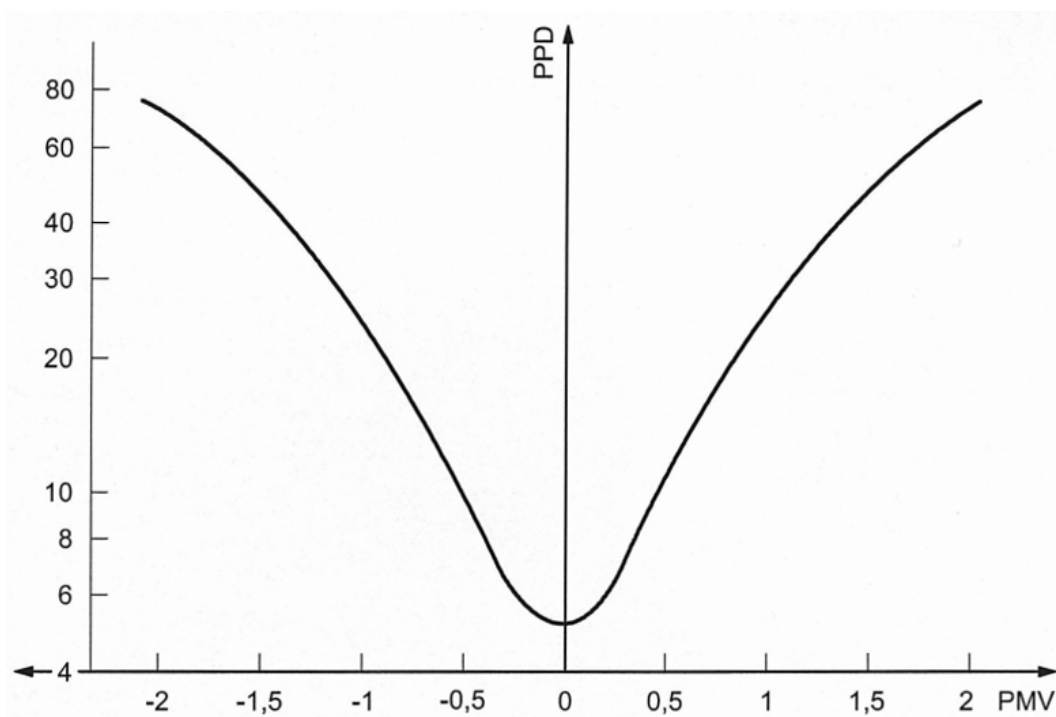
2.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených (PPD)

Zkratka *PPD* pochází z anglického „*Predicted Percentage of Dissatisfied*“, tento ukazatel stanoví procento lidí nespokojených s tepelným prostředím. Za nespokojenou se dle normy ČSN EN ISO 7730:2015 považuje osoba, která volí v Tab. 3 stavy *horko*, *teplo*, *chladno* nebo *zima* [3].

Ukazatel *PPD* je tedy přímo funkcí ukazatele *PMV* a stanoví se ze vzorce [10]:

$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353 PMV^4 - 0,2179 PMV^2) \quad (2.6)$$

Grafické znázornění uvedeného vztahu, viz Obr. 1, ze kterého lze vyčíst, že 5% lidí bude s tepelným stavem nespokojených i při dosažení optimálních parametrů tepelného stavu prostředí, kdy $PMV = 0$. V praxi se doporučuje, aby $PPD < 15 \%$, to odpovídá $PMV < |0,7|$ [2], [3].



Obr. 1 – *PPD* jako funkce *PMV* [3]

2.3 Operativní teplota

Operativní teplota t_o je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru (prostoru o stejné teplotě vzduchu a střední radiační teplotě), ve kterém by tělo sdílelo konvekcí i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném, teplotně nesourodém prostředí [5]. Stanoví se dle ČSN EN ISO 7726 [4] jako:

$$t_o = \frac{\alpha_k t_a + \alpha_s t_r}{\alpha_k + \alpha_s} \quad (2.7)$$

lze ji také zapsat jako:

$$t_o = A t_a + (1 - A) t_r \quad (2.8)$$

kde:

$$A = \frac{\alpha_k}{\alpha_k + \alpha_s} \quad (2.9)$$

Operativní teplota je tedy váženým průměrem teploty vzduchu a střední radiační teploty podle součinitelů přestupu tepla konvekcí a sáláním. Součinitel A se stanoví z rychlosti proudění vzduchu, za podmínky že $v_a > 0,2$ m/s, jako [5]:

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

pokud je rychlost proudění vzduchu $v < 0,2$ m/s, vypočítá se operativní teplota jako aritmetický průměr t_a a t_r [5]:

$$t_o = \frac{t_a + t_r}{2} \quad (2.11)$$

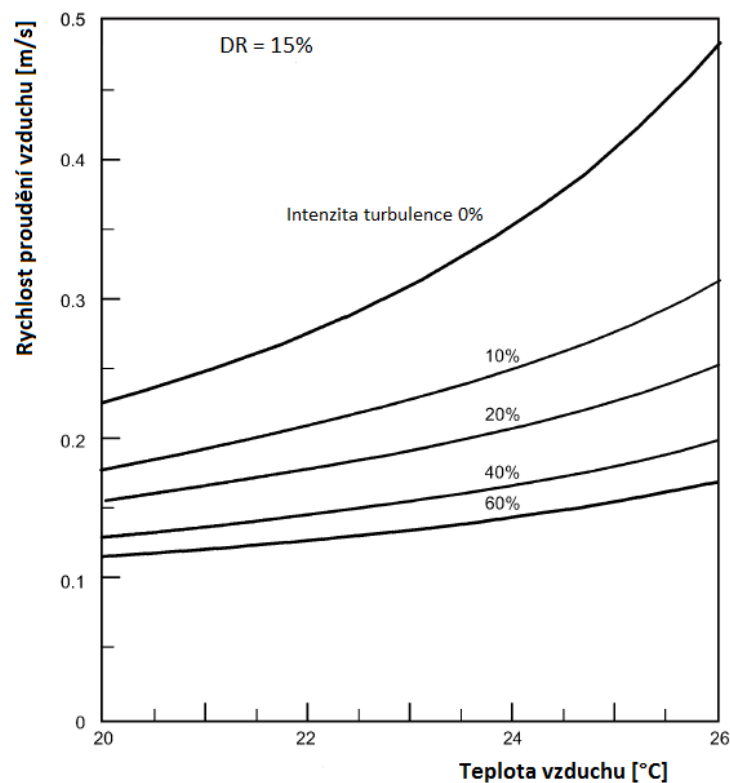
2.4 Místní tepelný diskomfort

Nespokojenost s tepelným prostředím může být způsobena vlivem nežádoucího ochlazování nebo oteplování jednotlivých částí těla, tento stav nazýváme místním diskomfortem. Příčinami místního diskomfortu nejčastěji jsou: průvan, vertikální rozdíl teploty mezi hlavou a kotníky, příliš vysoká, nebo nízká teplota podlahy, nebo vysoká asymetrie radiační teploty. Náchylnější k pociťování místního diskomfortu jsou lidé vykonávající lehkou práci v sedě, s rostoucí aktivitou riziko pociťování místního diskomfortu klesá [3], [8].

2.4.1 Průvan

Průvan je definován jako nechtěné lokální ochlazování těla, způsobené prouděním vzduchu. Jedná se o nejběžnější příčinu stížností na tepelný stav prostředí ve větraných prostorech. Nejcitlivější partie lidského těla z hlediska průvanu jsou krk a kolena [2].

Stupeň obtěžování průvanem DR určuje procento lidí u kterých se dá předpokládat pocit obtěžování průvanem. Stupeň obtěžování průvanem je funkcí teploty vzduchu t_a , rychlosti vzduchu v_a a intenzity turbulence T_u . Obr. 2 znázorňuje závislost teploty vzduchu, rychlosti vzduchu a intenzity turbulence při hodnotě $DR = 15\%$ a relativní vlhkosti vzduchu $\varphi = 0,5$ [2], [3].



Obr. 2 – Závislost t_a, v_a, T_u při stupni obtěžování průvanem 15 % [6]

Stupeň obtěžování průvanem lze vypočítat ze vztahu:

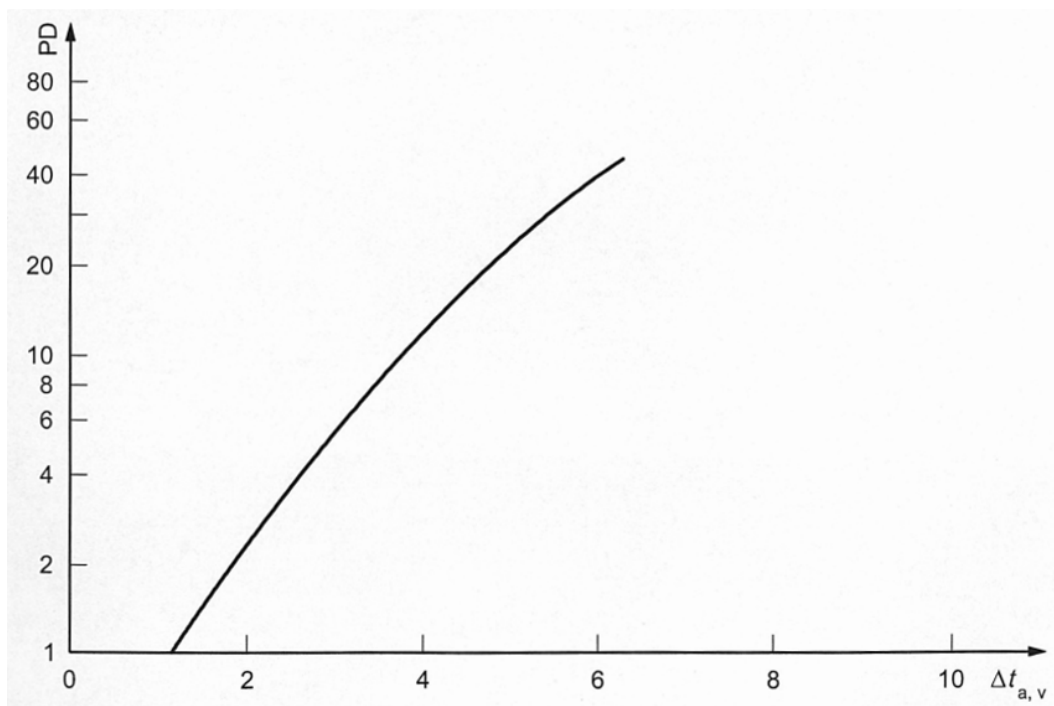
$$DR = (34 - t_a)(v_a - 0,05)^{0,62} (0,37 \times v_a \times T_u + 3,14) \quad (2.12)$$

2.4.2 Vertikální rozdíly teploty vzduchu

Ve většině místností teplota vzduchu roste s výškou nad podlahou, pokud je tento gradient příliš velký, může způsobit místní tepelný diskomfort. Obr. 3 zobrazuje procento

nespokojených PD jako funkci vertikálního rozdílu teplot vzduchu mezi hlavou a kotníky. Procento nespokojených PD se vypočte podle vztahu [3]:

$$PD = \frac{100}{1 + \exp(5,76 - 0,856\Delta t_{a,v})} \quad (2.13)$$

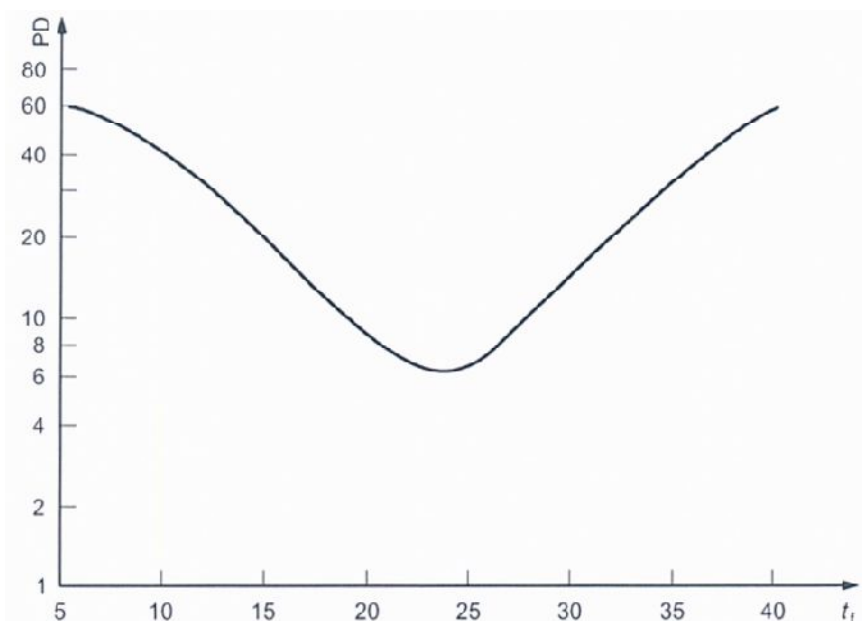


Obr. 3 – Závislost procenta nespokojených na teplotním rozdílu vzduchu mezi hlavou a kotníky [3]

2.4.3 Teplé a chladné podlahy

Ideální teplota podlahy pro sedící obuté osoby se pohybuje okolo 25 °C, pro osoby stojící je to 23 °C, avšak i při ideální teplotě podlahy bude ve velké skupině osob přibližně 8 % nespokojených, jak lze vidět v Obr. 4. Procento nespokojených se určí ze vztahu[6]:

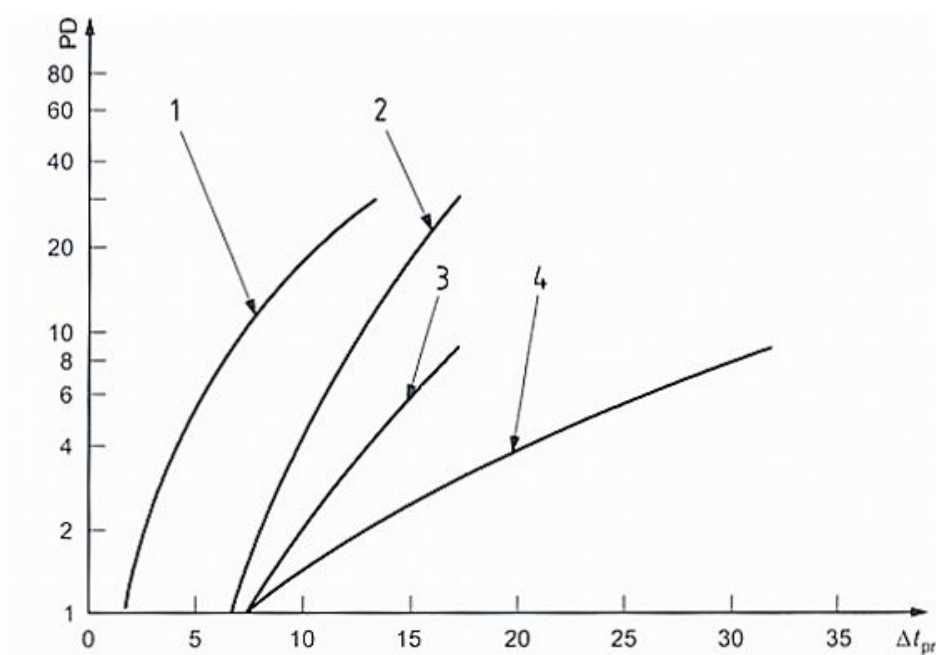
$$PD = 100 - 94 \times \exp(-1,387 + 0,118t_f - 0,0025t_f^2) \quad (2.14)$$



Obr. 4 – Závislost procenta nespokojených na teplotě podlahy [3]

2.4.4 Asymetrie radiační teploty

Asymetrická radiace je způsobena asymetrií radiační teploty Δt_{pr} povrchů v prostoru. Hodnota Δt_{pr} se stanoví výpočtem z měření hodnoty přímého sálání pomocí přímého radiometru. Nejcitlivěji lidé reagují na teplé stropy a chladné podlahy. Obr. 5 zobrazuje závislosti procenta nespokojených osob PD na hodnotě asymetrie radiační teploty Δt_{pr} [3].



Obr. 5– 1) teplý strop 2) chladná stěna 3) chladný strop 4) teplá stěna [3]

2.5 Kategorie tepelného prostředí

Na základě znalosti ukazatelů tepelného komfortu, probraných v předchozích kapitolách, je možno stanovit, do jaké kategorie tepelného prostředí patří posuzovaný prostor. Dle normy ČSN EN ISO 7730 rozlišujeme tři kategorie tepelného prostředí, pro každou kategorii jsou uvedeny požadavky na *PMV*, *PPD*, a maximální procento lidí, pociťujících některý z druhů místního diskomfortu, viz Tab. 4. Aby prostor spadl do některé ze skupin, musí splňovat všechny požadavky současně [3].

Při návrhu vnitřního prostředí budov lze využít Tab. 5, která uvádí optimální operativní teploty a jejich přípustné odchylky pro jednotlivé kategorie tepelného prostředí při konkrétní úrovni činnosti a hodnotě odporu oděvu 0,5 clo v létě a 1 clo v zimě [3].

Tab. 4 – Kategorie tepelného prostředí [3]

Kategorie	Tepelný stav těla jako celku		Místní diskomfort			
	PPD %	PMV	DR %	PD % způsobený		
				vertikálním rozdílem teploty vzduchu	teplou nebo chladnou podlahou/floor	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. 5 – Kategorie tepelného prostředí dle operativní teploty [3]

Typ budovy nebo prostoru	Činnost W/m ²	Kategorie	Operativní teplota °C		Maximální střední rychlost proudění vzduchu ^a m/s	
			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	0,10
Venkovní kancelář		B	24,5 ± 1,5	22,0 ± 2,0	0,19	0,16
Zasedací místnost		C	24,5 ± 2,5	22,0 ± 3,0	0,24	0,21 ^b
Posluchárna						
Kavárna nebo restaurace						
Učebna						
Mateřská školka	81	A	23,5 ± 1,0	20,0 ± 1,0	0,11	0,10 ^b
		B	23,5 ± 2,0	22,0 ± 2,5	0,18	0,15 ^b
		C	23,5 ± 2,5	22,0 ± 3,5	0,23	0,19 ^b
Obchodní středisko	93	A	23,0 ± 1,0	19,0 ± 1,5	0,16	0,13 ^b
		B	23,0 ± 2,0	19,0 ± 3,0	0,20	0,15 ^b
		C	23,0 ± 3,0	19,0 ± 4,0	0,23	0,18 ^b

^a Maximální střední rychlost proudění vzduchu je založena na 40% intenzitě turbulence a teplotě vzduchu rovné operativní teplotě podle 6.2 a obrázku A.2. Pro léto je použita 60% a pro zimu 40% relativní vlhkost. K určení maximální střední rychlosti proudění vzduchu je v létě i zimě použit nižší teplotní rozsah.

^b Dolní limit 20 °C (viz obrázek A.2).

3 Experiment

Cílem tohoto experimentu bylo proměřit tepelně vlhkostní parametry vnitřního prostředí v experimentální komoře napojené na vzduchový klimatizační systém pro různé nastavení průtoku a teploty přiváděného vzduchu. Naměřená data měla být vyhodnocena pomocí ukazatelů *PMV*, *PPD*, *DR* a operativní teploty. Experiment si kladl za cíl simulovat podmínky letního i zimního provozu této komory.

Pro simulování letního provozu byla komoře instalována tepelná zátěž v podobě skříní se žárovkami různých výkonů a tato zátěž pak byla odváděna vzduchotechnickou klimatizační jednotkou. Simulování zimního provozu probíhalo opět za pomoci vnitřní tepelné zátěže, která měla za cíl pomoci teplotně vzdušnému vytápění dosáhnout komfortních teplotních podmínek v laboratoři. Veškeré teplotní změny v laboratoři byly průběžně monitorovány a data pro vyhodnocení stavu vnitřního prostředí byla sbírána za ustálených podmínek.

V následujících kapitolách budou popsány použité přístroje, metodika měření a vyhodnocování získaných dat.

3.1 Vzduchová klimatizační jednotka Robatherm

Klimatizační jednotka Robatherm, viz Obr. 6, se nachází v přízemí laboratoře Ústavu techniky prostředí. Jednotka je vybavena dvěma ventilátory, předehřevem, chlazením a dohřevem přívodního vzduchu, tkaninovými filtry a uzavíracími klapkami se servopohonem. Konkrétní parametry jednotky viz Tab. 6.

Přiváděný vzduch byl nasáván z přízemí laboratoře, nebo po částečném otevření přívodní klapky čerstvého vzduchu byl se vzduchem z laboratoře částečně nasáván i vzduch venkovní. Klapku se servopohonem je možno ovládat online po přihlášení do webového rozhraní, viz kapitola 3.1.4.

Tab. 6 – Specifikace klimatizační jednotky Robatherm

Klimatizační jednotka Robatherm				
Přívodní větev			Odvodní větev	
Jmenovitý průtok vzduchu	5000	m ³ /h	5000	m ³ /h
Výkon motoru ventilátoru	3	kW	3	kW
Jmenovité otáčky motoru	3637	1/min	3143	1/min
Tlak na výstupu z jednotky	750	Pa	750	Pa
Tlaková ztráta jednotky	627	Pa	627	Pa
Celková tlaková ztráta	1377	Pa	1377	Pa
Pracovní bod ventilátoru	2,73	kW	2,73	kW
Třída filtrace				
ČSN EN 779/1822	G3			
ČSN EN 779/1822	G7			
Chladič vzduchu – vodní				
Výkon	30,9	kW		
Průtok vzduchu	5000	m ³ /h		
Teplota vzduchu – vstup	32	°C		
Teplota vzduchu – výstup	16	°C		
Teploty vody	7/12	°C		
Průtok vody	5,3	m ³ /h		
Předehříváč vzduchu – vodní				
Výkon	90,7	kW		
Průtok vzduchu	5000	m ³ /h		
Teplota vzduchu – vstup	-15	°C		
Teplota vzduchu – výstup	37	°C		
Teploty vody	80/60	°C		
Průtok vody	3,9	m ³ /h		
Ohříváč vzduchu – vodní				
Výkon	20,9	kW		
Průtok vzduchu	5000	m ³ /h		
Teplota vzduchu – vstup	15	°C		
Teplota vzduchu – výstup	27	°C		
Teploty vody	80/60	°C		
Průtok vody	3,68	m ³ /h		



Obr. 6 – Klimatizační jednotka Robatherm [12]

3.1.1 Chlazení

Vodní chladič, který je součástí jednotky nebyl během měření využíván, neboť experiment probíhal v zimním období. Výkonové parametry vodního chladiče, viz Tab. 6. Za účelem chlazení byl do přívodního vzduchu nasávaného z prostředí laboratoře přimíchán vzduch venkovní. Toho bylo dosaženo částečným otevřením klapky přívodu venkovního vzduchu. Venkovní vzduch měl v době měření teploty od 8 °C do 14 °C.

3.1.2 Ohřev

Jednotka je vybavena vodním predehřivačem a ohřivačem o výkonech viz Tab. 6. Ohřivače zatím nejsou připojeny k zásobníku teplé vody a proto nebyly během měření využívány, v budoucnu však bude možné tyto ohřivače řídit pomocí webové aplikace, která je popsána v kapitole 3.1.4. K ohřevu vzduchu byl použit elektrický ohřivač EOKO se třemi topnými tělesy, s výkonem 3x1 kW a napájecím napětím 3x400 V, umístěných ve vzduchotechnickém potrubí. Jednotlivá tělesa byla řízena pomocí regulátorů. Ovládací skříňka viz Obr. 7.



Obr. 7 – Ovládací skříňka elektrického ohřivače

Světelná signalizace Ž1, Ž2, Ž3: Světlo signalizuje, že příslušné topné těleso je v daném okamžiku pod napětím a ohřívá vzduch.

Přepínače PŘ1, PŘ2, PŘ3:

Zapínají / vypínají jednotlivá topná tělesa zvlášť. Pro topná tělesa 2 a 3 umožňuje přepínač vřadit regulační obvod, kterým lze ručně nebo automaticky regulovat topný výkon těles.

Během měření tepelného stavu prostředí měřicí komory v zimním režimu, kdy bylo využíváno ohřivače vzduchu, bylo těleso 1 vždy zapnuto.

Centrální spínač V:

Spínač ovládá relé, které sepnutím jednotlivých kontaktů přivádí napětí k topným tělesům.

Regulační potenciometr P1: Otočným knoflíkem lze nastavit úroveň topného výkonu tělesa 2 v rozsahu 0 až 100 % z plného výkonu 1 kW. Regulátor 2 pracuje ve spínacím režimu zapnuto / vypnuto s krátkými časovými úseky sepnutí. Stupeň výkonu je dán poměrem doby sepnutí a vypnutí.

Regulace topného tělesa 2 byla využívána v měřeních číslo 18-26, pomocí této regulace a nastavováním stavů *zapnuto* / *vypnuto* na topných tělesech 1 a 2 je možné kontrolovat

topný výkon v rozsahu 0-3 kW, případně i udržovat konstantní teplotu přiváděného vzduchu při proměnlivém průtoku vzduchu.

Regulační potenciometr P2: Otočným knoflíkem lze nastavit žádanou teplotu ohřivaného vzduchu, kterou regulátor 3 s teplotním čidlem udržuje, v nastavitelném pásmu ΔT , konstantní. Teplotní čidlo je umístěno za ohřivačem vzduchu a je opatřeno stíněním proti sálání.

Tento regulátor se během měření tepelného stavu laboratoře příliš neosvědčil a proto nebyl při nastavování topného výkonu využíván. Požadovaný výkon ohřivače byl nastavován s pomocí regulace topného tělesa 2.

Digitální ukazatele teploty: Na displeji v horní části ovládací skříňky ohřivače jsou zobrazeny hodnoty teplot vzduchu z teplotních čidel která jsou ke skříňce připojena a mohou být umístěna dle potřeby. Čidla teploty byla v době měření ve špatném stavu a zobrazované hodnoty byly zavádějící, z tohoto důvodu nebyla čidla využívána.

3.1.3 Řízení výkonu přívodního ventilátoru

Řízení výkonu ventilátoru a tedy i množství přiváděného vzduchu probíhalo pomocí frekvenčního měniče Danfoss VLT 6000 HVAC, jehož ovládací panel je na Obr. 8.

Nastavení požadované frekvence, se po spuštění ventilátoru tlačítkem *Ruční start*, provede pomocí tlačítek +/- . Při vyhodnocování tepelného stavu prostředí v měřicí komoře byla frekvence nastavována v rozsahu 10-50 Hz a pro jednotlivé frekvence byl měřen průtok vzduchu pomocí clony s průměry 250/140 mm.



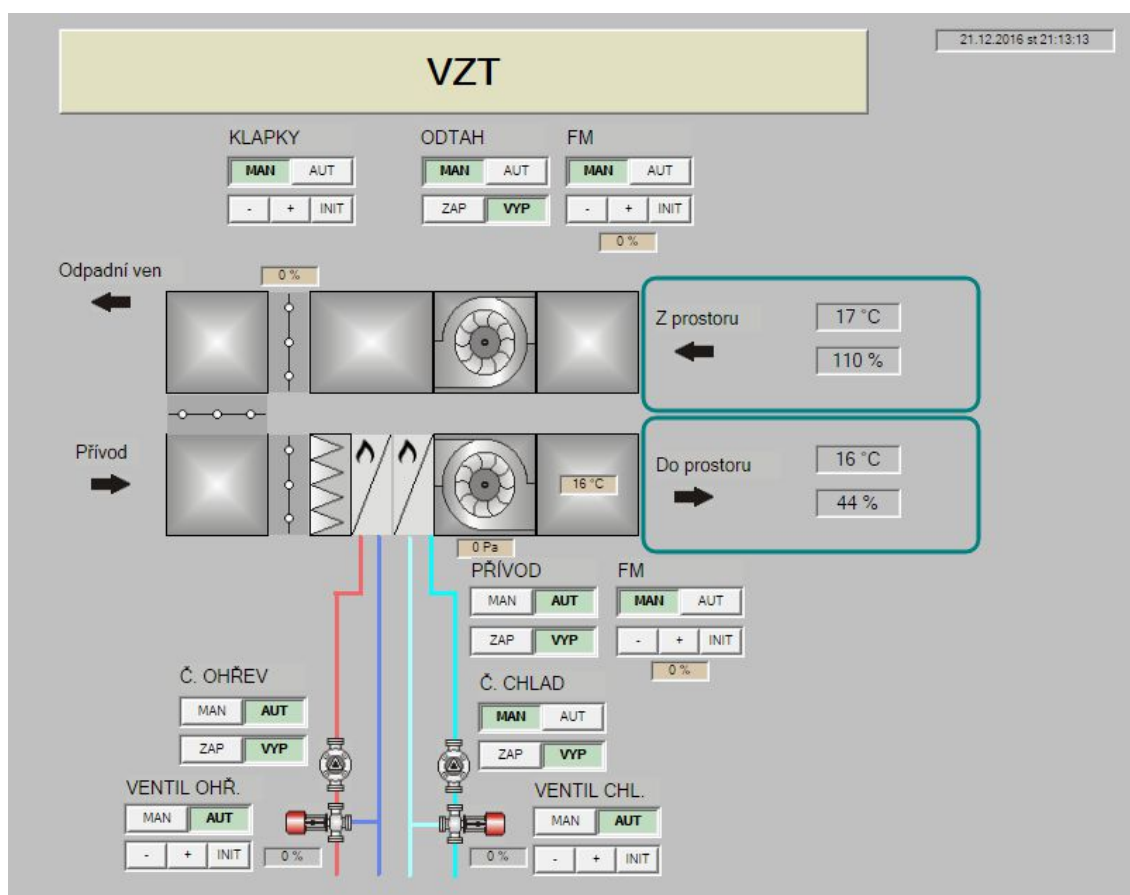
Obr. 8 – Ovládací panel frekvenčního měniče

- 1) **Ruční start** – zapne ventilátor přívodního vzduchu
- 2) **Stop** – vypne ventilátor přívodního vzduchu, frekvenční měnič zůstává v pohotovostním režimu.

Tlačítko + / - zvyšuje / snižuje nastavenou frekvenci

3.1.4 Online řízení klimatizační jednotky

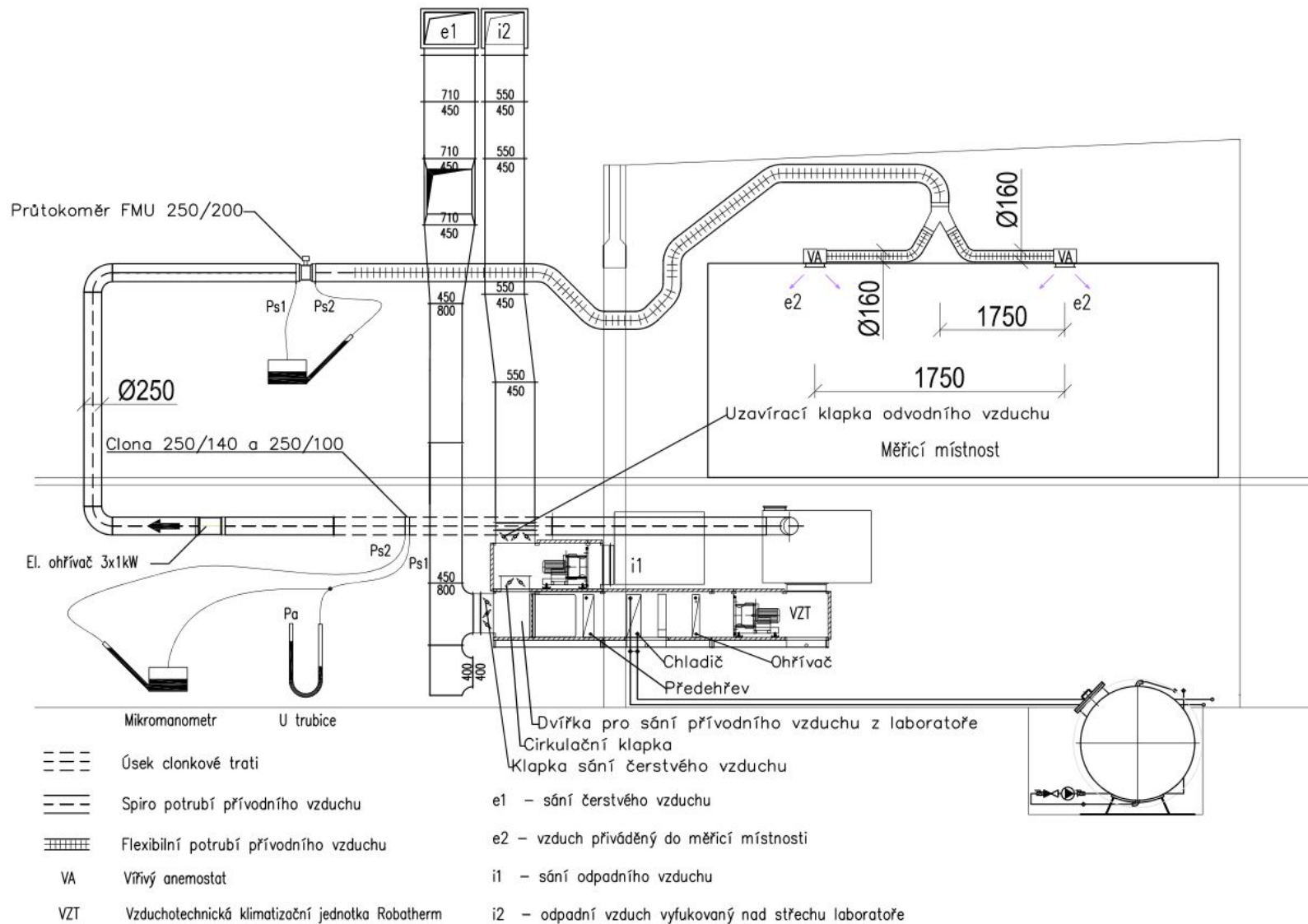
Ovládání klimatizační jednotky je možné pomocí webové aplikace. Po vyplnění přihlašovacích údajů se uživateli zobrazí ovládací panel, viz Obr. 9, který umožňuje sledování teplot přiváděného a odváděného vzduchu, nastavení směšovací klapky, nastavení uzavírací klapky přívodního vzduchu, řízení frekvencí obou ventilátorů (dálkové ovládání frekvenčního měniče Danfoss), zapínání a vypínání čerpadel okruhu vodního chladiče a ohřívače a nastavení trojcestných směšovacích ventilů.



Obr. 9 – Webový ovládací panel klimatizační jednotky [13]

3.2 Vzduchotechnická trať

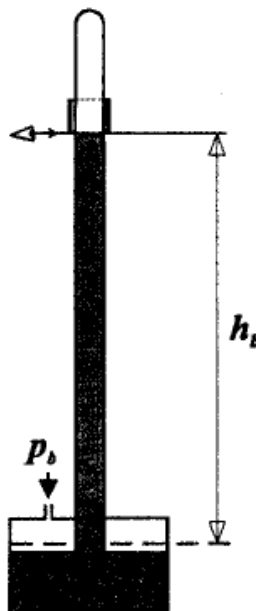
Vzduchotechnická trať která přivádí vzduch do měřicí komory je na Obr. 10. Přívodní potrubí je ke vzduchotechnické jednotce připojeno přes dřevěnou komoru, která vyříznutím otvoru umožňuje napojení více potrubí současně. Přívodní potrubí je provedeno dle potřeby z potrubí Spiro, a z ocelového potrubí s přírubami o průměru 250 mm. V 1.NP laboratoře se na rovném úseku pod stropem nachází clonková trať a za clonkovou trať elektrický ohříváč vzduchu o výkonu 3x1 kW. Ve 2.NP je na přívodní potrubí instalován průtokoměr FMU 250/200. V poslední části vede trať realizovaná z ohebného potrubí nad strop měřicí komory, kde se rozděljuje na dva úseky se stejnou tlakovou ztrátou, které se připojují k vířivým anemostatům TDF-Silent AIR-R-300-H výrobce TROX Austria GmbH.



Obr. 10 – Schéma vzduchotechnické trati

3.2.1 Měření barometrického tlaku

Barometrický tlak p_b , se kterým je dále počítáno při výpočtu průtoku vzduchu clonou, se určí pomocí rtuťového staničního barometru, jehož schematické zobrazení je možno vidět na Obr. 11. Rtuť v nádobce je vystavena tlaku okolí, jenž způsobí vytlačení sloupce rtuti do skleněného válce ve kterém je vakuum. Nejprve se změří výška sloupce rtuti h_b , včetně vrchlíku, který vzniká důsledkem tečného napětí mezi povrchem skleněné nádoby a rtutí. Dále se změří výška sloupce rtuti bez vrchlíku a z rozdílu výšek se určí výška vrchlíku Δh . Tab. 7 zobrazuje hodnoty korekcí na výšku vrchlíku Δh_1 . Pro urychlení a zpřesnění měření barometrického tlaku byly hodnoty korekce na výšku vrchlíku vyneseny do grafu a jednotlivé body byly proloženy regresní křivkou reprezentovanou rovnicí (3.2) [9].



Obr. 11 – Princip funkce staničního barometru [9]

Tab. 7 – Hodnoty korekce na výšku vrchlíku

Vnitřní průměr trubice (mm)	Výška vrchlíku Δh (mm)								
	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8
7	0,17	0,34	0,49	0,62	0,74	0,85	0,95	1,04	1,12

$$\Delta h_1 = -0,149\Delta h^2 + 0,886\Delta h + 0,005 \quad (3.2)$$

Uvedená rovnice byla používána při výpočtech barometrického tlaku v programu Excel.

Při výpočtu naměřeného tlaku se nejprve započítá korekce na výšku vrchlíku:

$$h_{b1} = h_b + \Delta h_1 \quad (3.3)$$

Poté se provede korekce na 0 °C

$$\Delta h_2 = -1,63 \times 10^{-4} h_{b1} t_a \quad (3.4)$$

$$h_{b2} = h_{b1} + \Delta h_2 \quad (3.5)$$

Z výšky sloupce rtuti po korekci na výšku vrchlíku a korekci na 0°C lze určit barometrický tlak dle vztahu:

$$p_b = \frac{\rho_{Hg} \times h_{b2} \times g}{1000} \quad (3.6)$$

kde je

$$\rho_{Hg} \quad \text{hustota rtuti} = 13595,1 \text{ při teplotě } 0 \text{ °C} \quad [\text{kg/m}^3]$$

$$h_{b2} \quad \text{výška sloupce rtuti po korekci na } 0 \text{ °C} \quad [\text{mm}]$$

3.2.2 Měření parametrů přírodního vzduchu

Pomocí Assmanova aspiračního psychrometru, jehož schéma je na Obr. 13, se změří teplota suchého teploměru t_a a teplota mokrého teploměru t_m . Ze znalosti zmíněných teplot a barometrického tlaku lze pomocí h-x diagramu určit zbylé parametry vzduchu graficky, nebo výpočtem. Vzhledem k vyššímu počtu měření, které bylo v laboratoři prováděno, byly parametry vzduchu počítány v programu Excel z následujících rovnic:

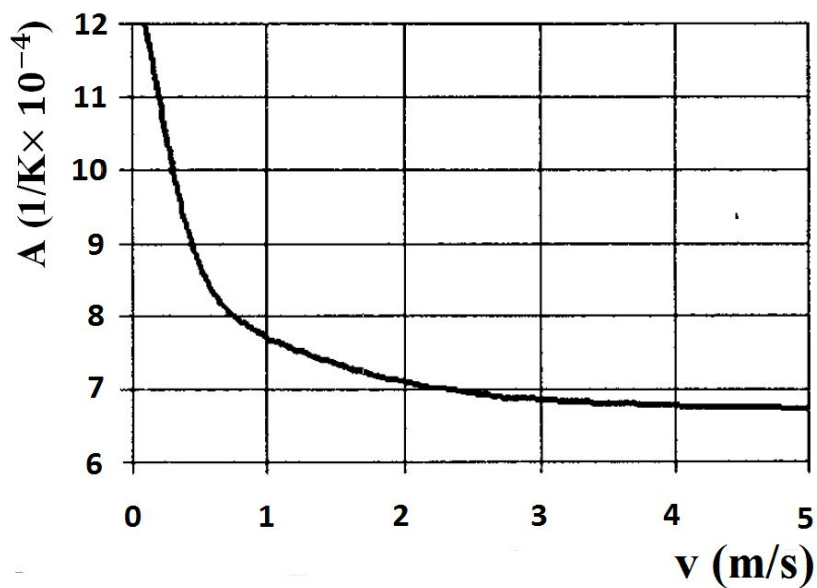
$$p_v = p_{v,m}'' - A \times p_b (t_a - t_m) \quad (3.7)$$

kde:

A je psychrometrický součinitel, který zahrnuje odchylky skutečného sušení mokrého teploměru od adiabatického. Jeho hodnota závisí na rychlosti proudění vzduchu kolem mokrého teploměru, viz Obr. 12, ze kterého je patrné, že při rychlostech proudění vzduchu do 2,5 m/s hodnota psychrometrického součinitele prudce klesá, při vyšších rychlostech proudění je dále téměř konstantní. Z tohoto důvodu se při určování parametrů vzduchu používá Assmanův aspirační psychrometr, který je vybaven systémem nuceného větrání mokrého teploměru [9].

$$p_v \quad \text{parciální tlak vodních par ve vzduchu} \quad [\text{Pa}]$$

$$p_{v,m}'' \quad \text{parciální tlak sytých par při teplotě mokrého teploměru } t_m \quad [\text{Pa}]$$

Obr. 12 – Závislost $A = f(v)$ [9]

$$\log(\ddot{p}_{v,m}) = \frac{658 + 10,24t_a}{236 + t_a} \quad (3.8)$$

$$\ln(\ddot{p}_v) = 23,58 - \frac{4044,2}{235,6 + t_a} \quad (3.10)$$

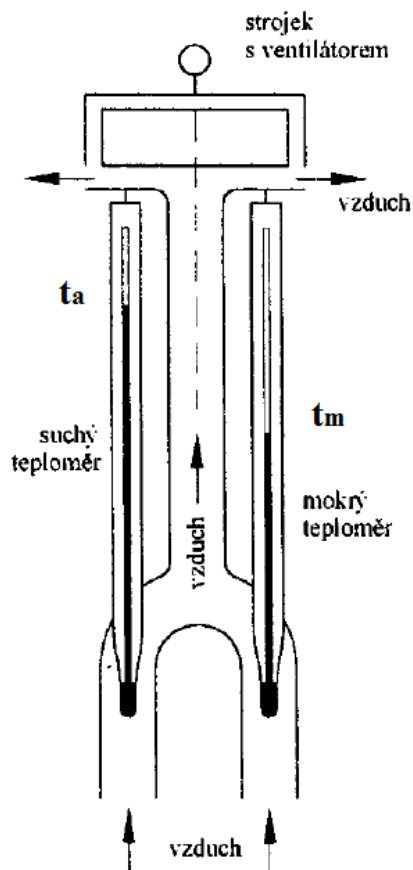
$$\varphi = \frac{p_v}{\ddot{p}_v} \quad (3.11)$$

kde je

φ relativní vlhkost vzduchu [-]

\ddot{p}_v parciální tlak sytých par při teplotě suchého teploměru t_a [Pa]

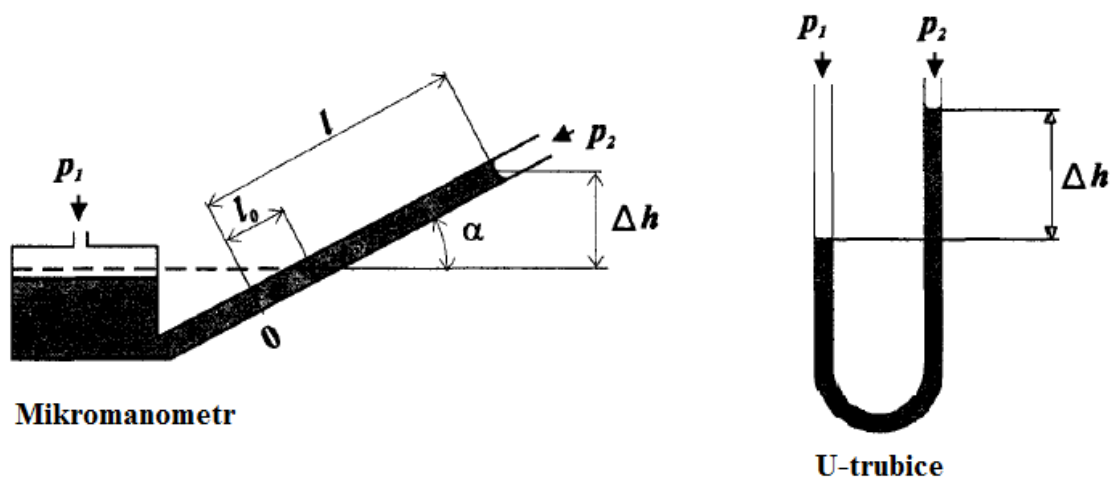
$$\rho_a = \frac{(p_b - 0,378p_v)}{287(t_a + 273,15)} \quad (3.12)$$



Obr. 13 – Assmanův aspirační psychrometr [9]

3.2.3 Měření diferenčního tlaku U-trubicí a mikromanometrem

Schéma mikromanometru a U-trubice je viz Obr. 14.



Obr. 14 – Schéma mikromanometru a U-trubice [9]

Diferenční tlak měřený U-trubicí se stanoví z rozdílu výšek hladin náplně dle vztahu [9]:

$$\Delta p = g \rho \frac{\Delta h}{1000} \quad (3.13)$$

kde je

ρ hustota náplně [kg/m³]

Δh rozdíl výšek hladin náplně [mm]

U-trubice byla použita při měření průtoku clonou pro stanovení hodnoty statického přetlaku v potrubí, viz Obr. 10, její náplní byla destilovaná voda, jejíž hustota se určí ze vztahu [9]:

$$\rho_w = 1000 - (t_a - 4) [0,097 + 0,0036(t_a - 4)] \quad (3.14)$$

Mikromanometr pracuje na stejném principu jako U-trubice, díky sklonnému ramenu však umožňuje měření menších tlakových rozdílů, skloněním trubice se zvyšuje citlivost přístroje. Před začátkem měření je nutné ustavit mikromanometr do vodorovné polohy. Diferenční tlak měřený mikromanometrem se stanoví dle vztahu (3.13). Rozdíl výšek hladin Δh se stanoví ze vztahu [9]:

$$\Delta h = K_m (l - l_0) \quad (3.15)$$

kde je

K_m konstanta mikromanometru (určená sklonem) [-]

l čtení mikromanometru [mm]

l_0 nulové čtení mikromanometru (pro nulový tlakový rozdíl) [mm]

Náplní mikromanometru je líh, jehož hustota se určí ze vztahu:

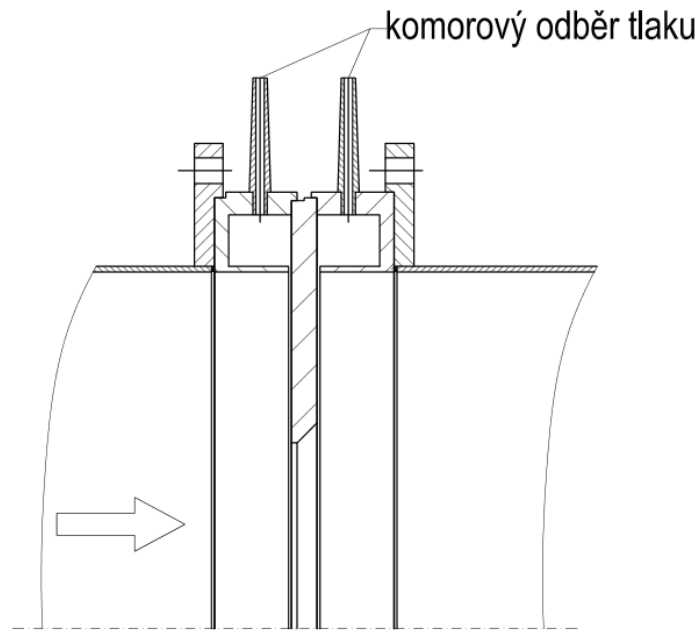
$$\rho_l = 806,2 - 0,85t_a \quad (3.16)$$

Mikromanometr byl použit pro měření rozdílu statického tlaku před clonou a za clonou a k měření rozdílu statického tlaku před a za průtokoměrem FMU 250/200, dle Obr. 10.

3.2.4 Měření průtoku clonou

Pro měření průtoku vzduchu je na přívodním potrubí instalována clonková trať a k dispozici jsou dvě clony s komorovým odběrem diferenčního tlaku Δp . První o průměrech 250/100 mm, druhá o průměrech 250/140 mm. Po úvodním měření bude vybrána clona, která lépe odpovídá požadavkům experimentu.

Clona, jejíž schéma lze vidět na Obr. 15 je tenká deska s ostrohranným kruhovým otvorem na straně ze které je přiváděn vzduch a kuželovým rozšířením na opačné straně.



Obr. 15 – Schéma clony s komorovým odběrem diferenčního tlaku

Množství protékajícího vzduchu se stanoví dle následujících rovnic [7]:

$$\dot{V} = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \varepsilon_1 \frac{\pi}{4} d^2 \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho_a}} 3600 \quad (3.17)$$

kde je

C součinitel průtoku [-]

β poměr průměrů clony $\frac{d}{D}$ [-]

ε_1 součinitel expanze [-]

d vnitřní průměr clony [-]

Součinitel průtoku C se vypočte z rovnice:

$$C = 0,5959 + 0,0312\beta^{2,1} - 0,184\beta^8 + 0,0029\beta^{2,5} \left(\frac{10^6}{\text{Re}_D} \right)^{0,75} \quad (3.18)$$

kde je

Re_D Reynoldsovo číslo vztahované k velkému průměru D clony [-]

Reynoldsovo číslo se vypočte z rovnice:

$$\text{Re}_D = 4 \frac{q_m}{\pi D \mu} \quad (3.19)$$

kde je

μ dynamická viskozita tekutiny [Pa×s]

Dynamická viskozita tekutiny se vypočte z rovnice:

$$\mu = \frac{1,49(273+t_a)^{1,5}}{(390+t_a)10^6} \quad (3.20)$$

součinitel expanze ε_1 se vypočte z rovnice:

$$\varepsilon_1 = (0,41+0,35\beta^4) \frac{\Delta p}{0,41(p_b + \Delta p_s)} \quad (3.21)$$

kde je

Δp_s statický přetlak [Pa]

3.2.5 Měření pomocí průtokoměru FMU 250/200

Průtokoměr FMU 250/200, který lze vidět na Obr. 16, se skládá ze dvou spojených přechodek s měřicími dýzami. Každá dýza má odstranitelnou plastovou zátku, která zabraňuje vstupu nečistot [11].



Obr. 16 – Průtokoměr FMU 250/200 [11]

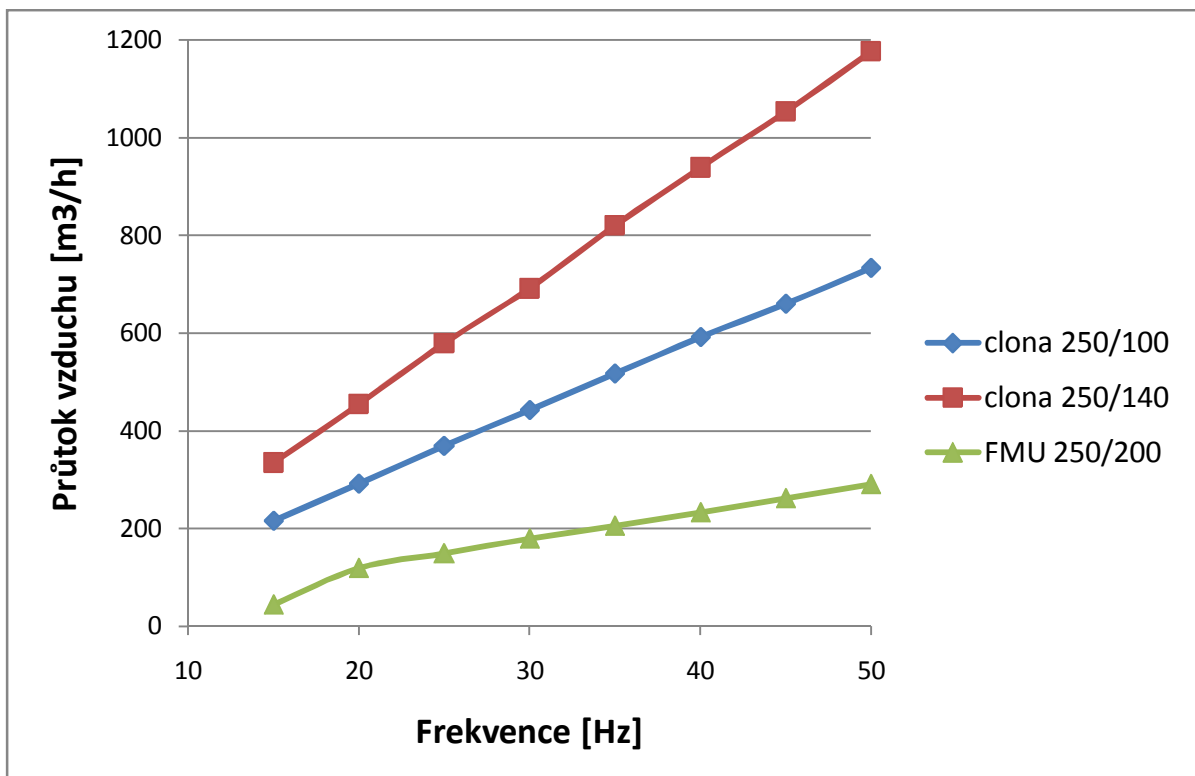
Průtokoměr se zapojí k mikromanometru dle Obr. 10 a stanoví se diferenční tlak. Výrobce na štítku průtokoměru uvádí vztah pro přepočet diferenčního tlaku na průtok vzduchu \dot{V} :

$$\dot{V} = 45,7\sqrt{\Delta p} \quad (3.22)$$

3.3 Úvodní měření průtoku, volba měřicí clony

Ještě než bylo započato samotné měření a vyhodnocování stavu tepelného prostředí v měřicí komoře, proběhlo měření množství přiváděného vzduchu s použitím dvou různých clon, aby se rozhodlo, která ze clon lépe vyhovuje účelům měření a bude dále používána. Množství přiváděného vzduchu bylo také měřeno pomocí průtokoměru FMU 250/200 výrobce Lindab. Na potrubí přivodního vzduchu je instalována clonková trať a k dispozici byly clony o průměrech 250/100 mm a 250/140 mm, průtokoměr FMU 250/200 byl instalován mimo clonkovou trať, dle Obr. 10.

Nejprve byla na potrubí instalována clona 250/100 mm a průtokoměr FMU 250/200. První měření průtoku proběhlo 1.10.2016 clonou 250/100, přivodní ventilátor klimatizační jednotky byl ovládán frekvenčním měničem popsáním v kapitole 3.1.3. Měřilo se v rozsahu 15-50 Hz. Při druhém měření, které proběhlo 21.10.2016 byla na clonkovou trať instalována clona 250/140 a průtok vzduchu byl současně měřen i průtokoměrem FMU 250/200. Následující graf zobrazuje naměřené průtoky vzduchu jednotlivými měřicími zařízeními v závislosti na nastavené frekvenci.



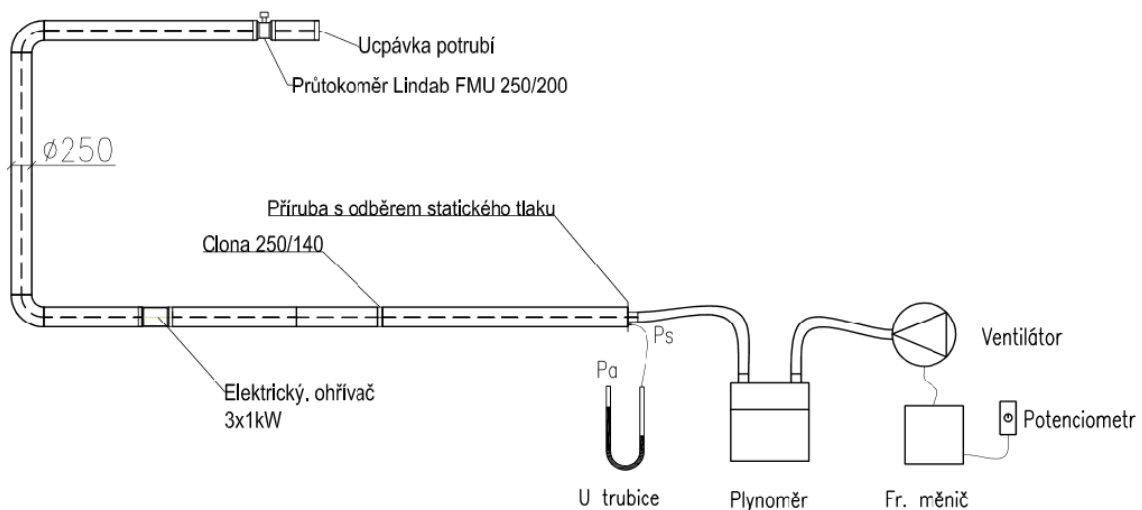
Graf 1 – Průtok vzduchu v závislosti na nastavené frekvenci

Z Graf 1 lze vyčíst, že se naměřené průtoky při jednotlivých frekvencích značně liší. V případě clon se tato skutečnost předpokládá vzhledem k odlišným vnitřním průměrům

a tedy rozdílné tlakové ztrátě clon. Průtok vzduchu naměřený clonou 250/140 a průtokoměrem FMU 250/200 by se však měl alespoň přibližně shodovat, protože měření probíhalo na obou zařízeních současně. Vzdálenost místa instalace clony a průtokoměru FMU je přibližně 12 m, netěsnost potrubí mezi měřicími zařízeními tedy mohla být jedna z příčin stanovení rozdílných průtoků přiváděného vzduchu. Pro potvrzení, či vyvrácení této domněnky byla provedena jednoduchá zkouška netěsnosti potrubí.

3.3.1 Měření netěsnosti potrubí

Na začátek vzduchotechnického potrubí byla instalována příruha s redukcí a odběrem statického tlaku. Statický tlak byl připojen na U-trubicu proti tlaku atmosférickému, aby se určil přetlak v potrubí. Na druhý konec vzduchotechnického potrubí se instalovala ucpávka. Nakonec se na přírubu připojil přenosný ventilátor s průtokoměrem řízený frekvenčním měničem FRECON FIA-L s potenciometrem, viz Obr. 17. a Obr. 18.



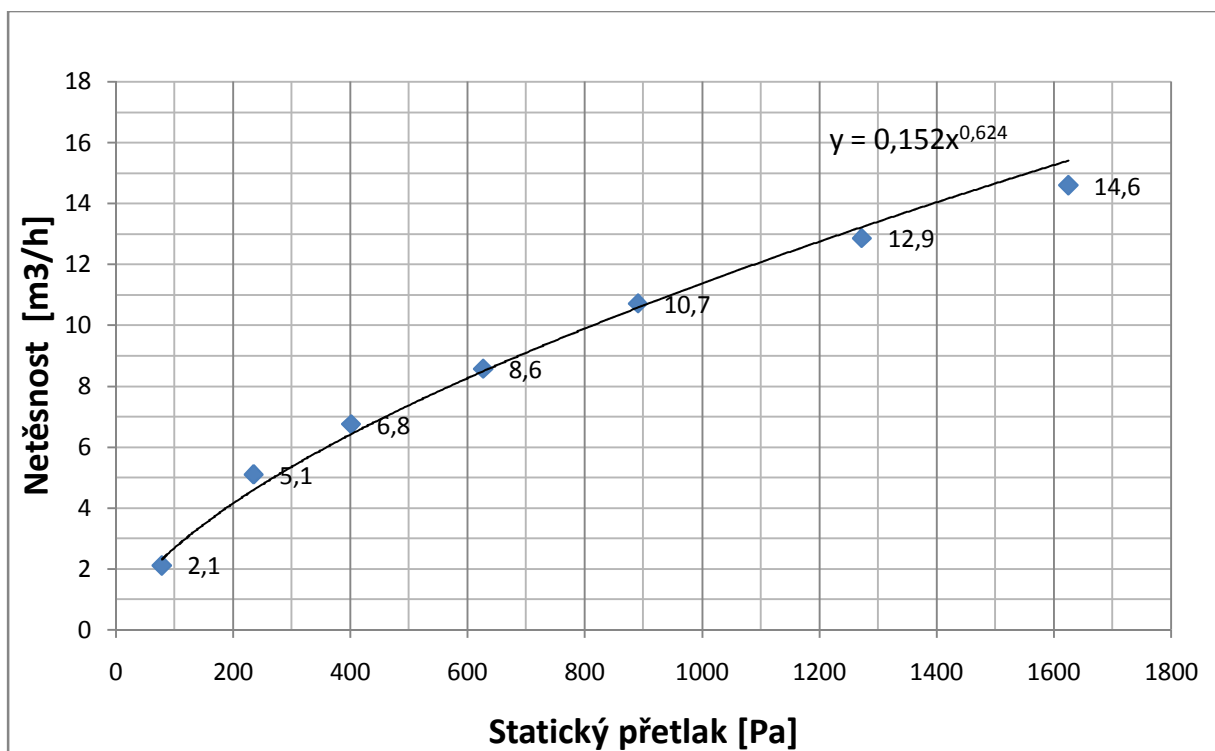
Obr. 17 – Schéma měření netěsnosti potrubí



Obr. 18 – Napojení ventilátoru přes plynoměr do vzduchotechnického potrubí

Pomocí frekvenčního měniče se nastavovala úroveň výkonu ventilátoru. Před každým měřením se stanovil objem vzduchu, který má protéci plynoměrem a měřena byla doba, za kterou tento objem plynoměrem protekl. Pro každou úroveň výkonu ventilátoru byl U-trubicí měřen přetlak v potrubí. Naměřené hodnoty netěsnosti v závislosti na přetlaku byly vyneseny do Graf 2 a byla stanovena regresní křivka, pro niž platí rovnice:

$$y = 0,152x^{0,624} \quad (3.23)$$



Graf 2 – Závislost netěsnosti na statickém přetlaku v potrubí

Porovnáním několika vybraných hodnot průtoků během zkoušky netěsnosti s průtoky naměřenými při dopravování vzduchu do měřicí komory za stejných hodnot přetlaku v potrubí se zjistilo, že v důsledku netěsnosti potrubí uniká méně než jedno procento objemu dopravovaného vzduchu, viz Tab. 8.

Tab. 8 – Měření netěsnosti

Přetlak v potrubí	Průtok vzduchu		Podíl vzduchu, který uniká netěsnostmi
	Měření netěsnosti	Přívod vzduchu do měřicí komory	
Pa	m3/h	m3/h	%
969	11	1176	0.94
783	10	1054	0.92
588	8	939	0.87
450	7	820	0.84
333	6	691	0.82
225	4	579	0.77

Z tohoto měření byl učiněn závěr, že potrubí je dostatečně těsné a rozdílné výsledky při měření průtoků clonou s průměry 250/140 mm a měřicím zařízením FMU 250/200 jsou zapříčiněny chybou v kalibraci měřicího zařízení FMU 250/200. Jelikož má použitá clona normalizované rozměry a průtok byl počítán dle příslušné normy, chyba na straně clony

se nepředpokládá. Při vyhodnocování průtoků v dalších měřeních nebylo měřicí zařízení FMU 250/200 využíváno.

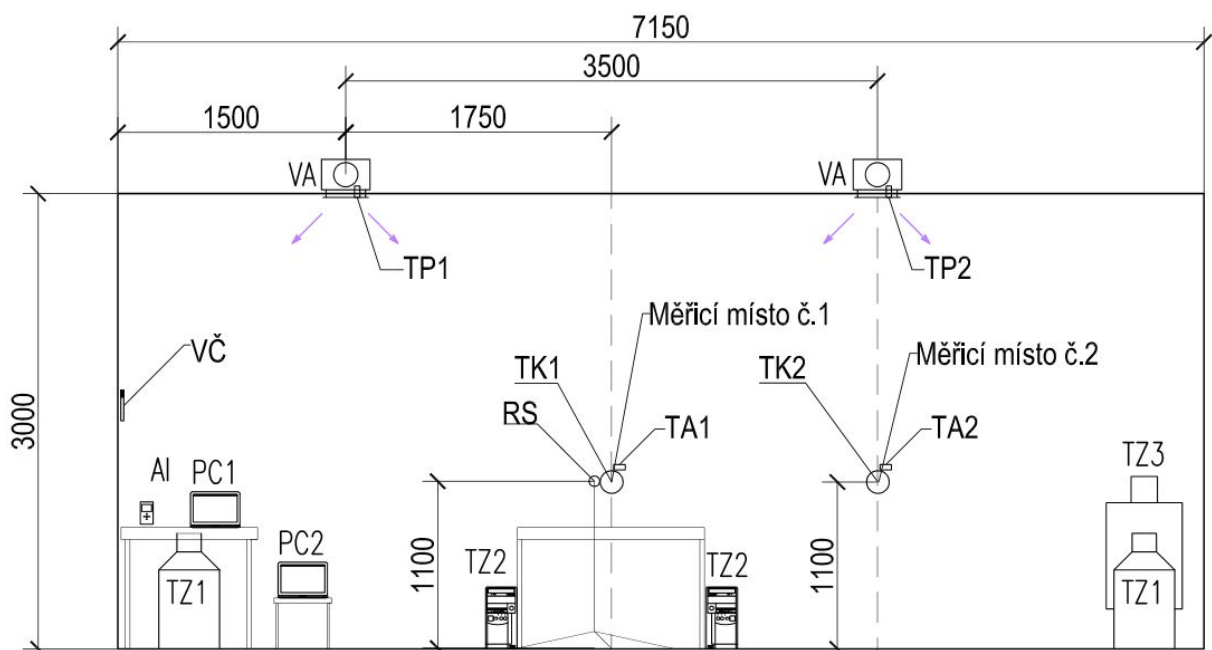
3.3.2 Clona 250/140 mm

Vzhledem k většímu maximálnímu množství přiváděného vzduchu naměřeného v závislosti na nastavené frekvenci ventilátoru se jako vhodnější měřicí zařízení jevila clona 250/140. Toho bylo využito zejména v měřeních, kdy byl do měřicí komory přiváděn chladný vzduch, který způsobuje vysoký stupeň obtěžování průvanem.

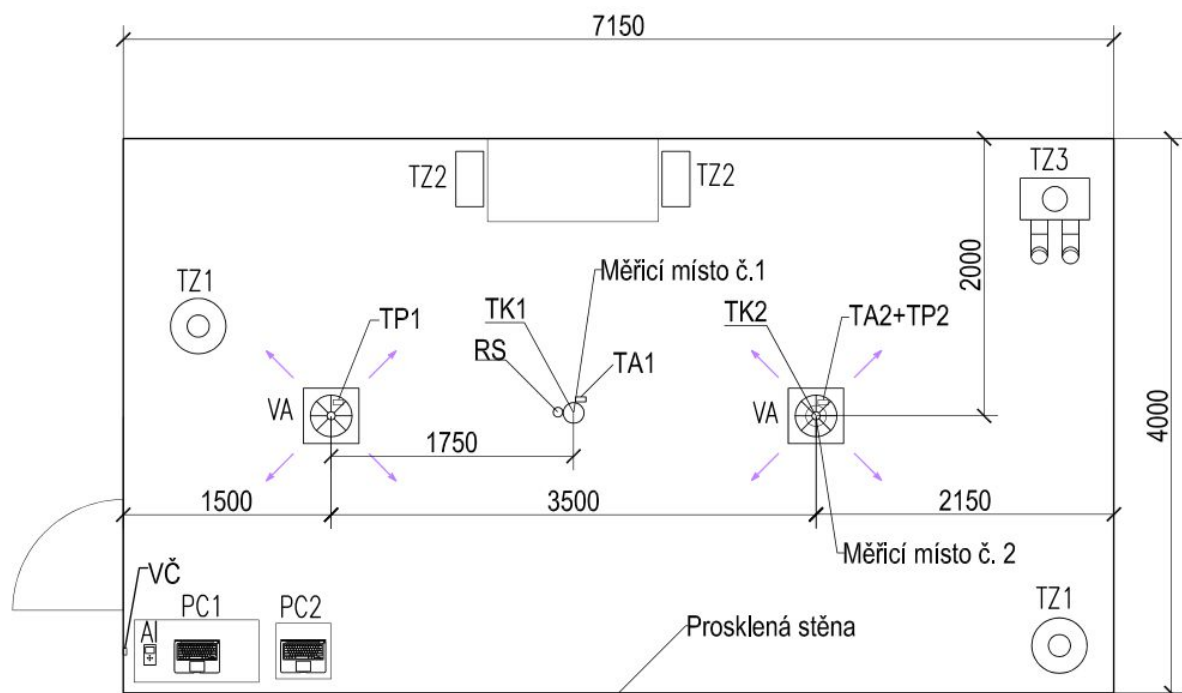
3.4 Měřicí komora

Měření vnitřního tepelného prostředí bylo prováděno v měřicí komoře, která se nachází v laboratoři Ústavu techniky prostředí. Její schéma a rozmístění jednotlivých zařízení lze vidět na Obr. 19 a Obr. 20. Označení jednotlivých zařízení je shrnuto v Tab. 9. Měřicí komora má rozměry $7,15 \times 4 \times 3$ m a objem $85,8 \text{ m}^3$. Stěna o rozměrech $7,15 \times 3$ m, viz Obr. 20, je prosklená, ostatní stěny jsou dřevěné o tloušťce 20 mm, strop je dřevěný o tloušťce 20 mm a podlaha je dřevěná o tloušťce 25 mm.

Bylo rozhodnuto, že vyhodnocení tepelně vlhkostního stavu v měřicí komoře se provede pro měřicí místo 1, mezi anemostaty ve výšce 1,1 m, což odpovídá úrovni hlavy sedící osoby.



Obr. 19 – Pohled přes prosklenou stěnu do měřicí komory



Obr. 20 – Půdorys měřicí komory

Tab. 9 – Vybavení měřicí komory

Označení	Typ zařízení	Měřená veličina
AI	Almemo 2890-9	-
TK	Kulový teploměr	t_{k1}, t_{k2}
PC	Přenosný počítač	-
RS	Rychlostní sonda Dantec	t_a, t_w, t_a
TA	Čidlo teploty vzduchu v místnosti	t_a
TP	Čidlo teploty přiváděného vzduchu	t_p
TZ	Tepelný zisk	-
VA	Vířivý anemostat	-
VČ	Čidlo vlhkosti	φ

3.4.1 Tepelné zisky a tepelná zátěž měřicí komory

Do měřicí komory byly instalovány spotřebiče (žárovky v plechových skříních) za účelem simulování vnitřních tepelných zisků od osob a přístrojů, přehled instalovaných spotřebičů viz Tab. 10. Vzhledem k nízkým venkovním teplotám, které do značné míry ovlivňují i teploty v měřicí komoře se instalace tepelných zisků projevila jako účelná jak pro režim vytápění, tak i pro režim chlazení a proto byly všechny spotřebiče zapnuty ve všech vyhodnocovaných stavech.

Tab. 10 – Přehled tepelných zisků

Označení	Typ spotřebiče	Výkon [W]	Počet spotřebičů	Celkový výkon [W]
PC1	Přenosný počítač	40	1	40
PC2	Přenosný počítač	40	1	40
TZ1	Barel	100	2	200
TZ2	Počítačová skříň	120	2	240
TZ3	Figurína	70	1	70
Celkové tepelné zisky Q_z				590

Tepelná zátěž přiváděného vzduchu Q_{vz} byla pro jednotlivé měřené stavy vypočítána ze vztahu:

$$Q_{vz} = \dot{V} \rho_a c_a (t_p - t_a) \quad (3.24)$$

kde hustota vzduchu $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$ a hodnota měrné tepelné kapacity $c_a = 1010 \text{ J/kgK}$.

Teploty v laboratoři, která obklopuje měřicí komoru, jsou během dne proměnlivé a v různých částech laboratoře se liší. Například prostor mezi stropem měřicí komory a stropem laboratoře, který je vybaven světlíkem bude mít pravděpodobně výrazně odlišnou teplotu od zbytku laboratoře a měřicí komory. Měřicí komora má velmi lehké stěny a v důsledku toho sdílí s okolím značné množství tepla prostupem. Závislost tepla sdíleného prostupem při středním rozdílu teplot mezi okolím a měřicí komorou zobrazuje Graf 3. Tento graf také ukazuje, jak by se snížilo teplo sdílené prostupem, kdyby byly dřevěné konstrukce izolovány polystyrenem o různých tloušťkách. Tab. 11 uvádí hodnoty průměrného součinitele prostupu tepla měřicí komory U_{pr} pro různé hodnoty tepelné izolace dřevěných konstrukcí. Průměrný součinitel prostupu tepla byl stanoven dle vztahu:

$$U_{pr} = \frac{\sum U_j A_j}{\sum A_j} \quad (3.25)$$

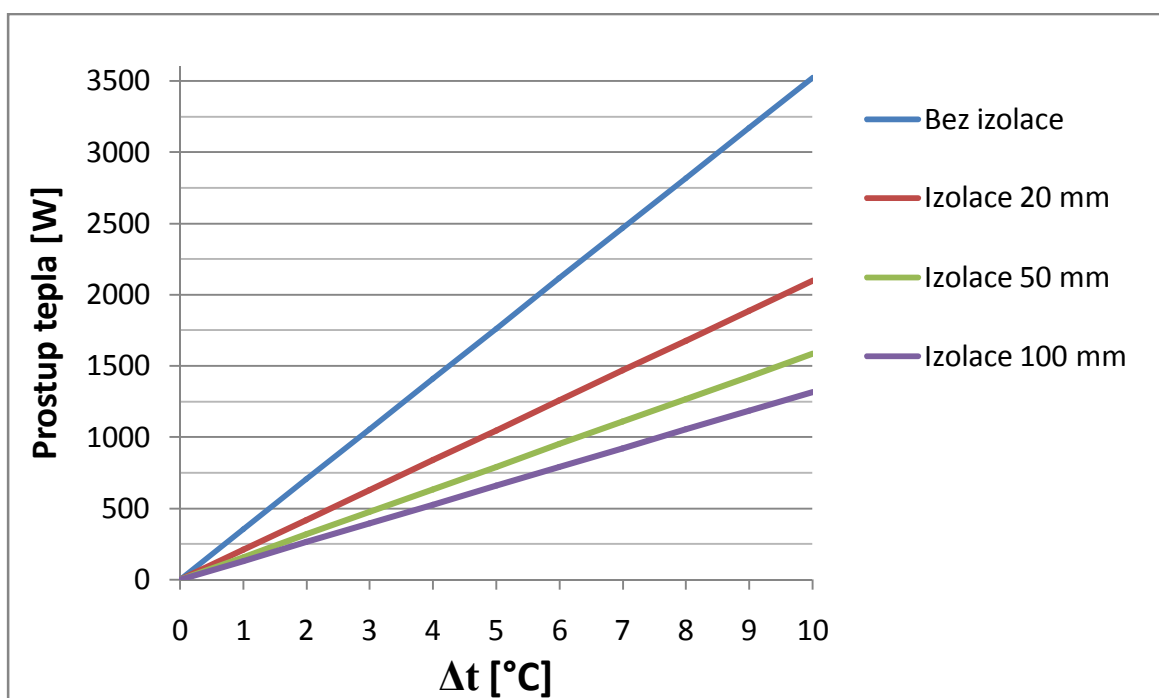
kde je:

A_j plocha jednotlivých stěn [m²]

U_j součinitel prostupu tepla jednotlivých stěn [W/m²K]

Tab. 11 – Průměrný součinitel prostupu tepla v závislosti na tloušťce izolace

Tloušťka izolace	Průměrný součinitel prostupu tepla
[m]	[w/m2K]
0	2,84
20	1,69
50	1,28
100	1,06



Graf 3 – Prostup tepla mezi měřicí komorou a laboratoří v závislosti na středním rozdílu teplot a tloušťce tepelné izolace dřevěných konstrukcí

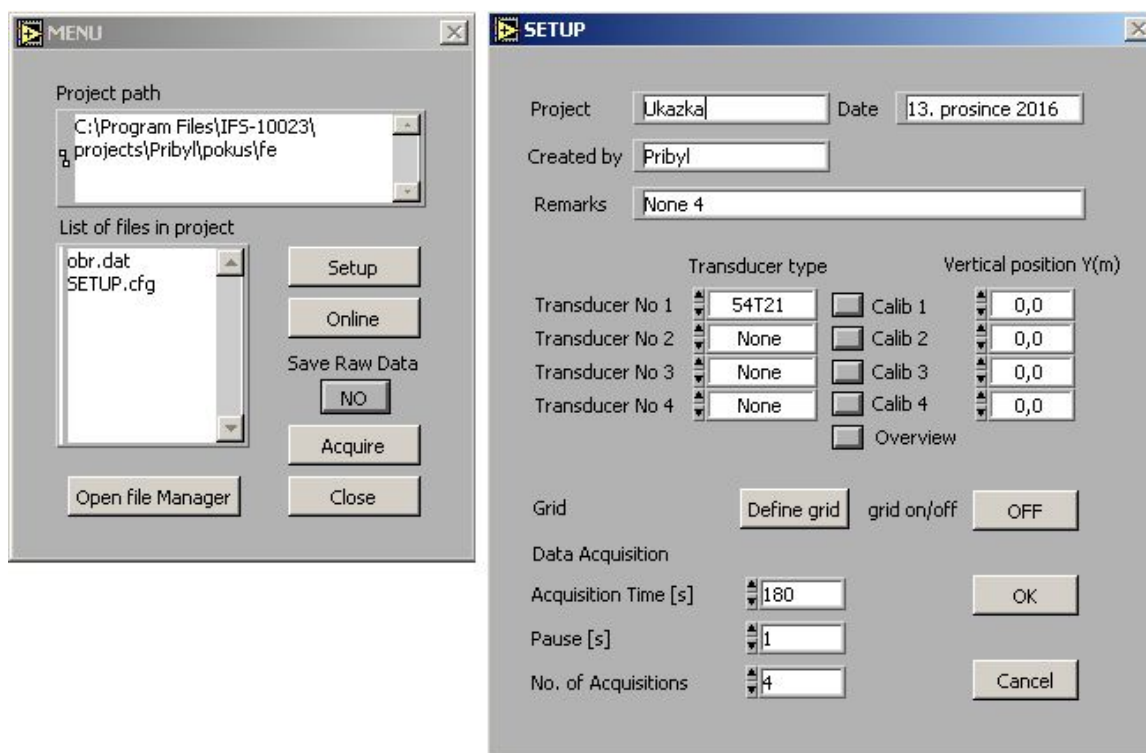
3.4.2 Všesměrová sonda Dantec 54T21

Všesměrová sonda Dantec 54T21 Indoor Flow System měří okamžitou teplotu, rychlost proudění vzduchu a intenzitu turbulence v bodě pomocí převodníku napěťových signálů. Sonda rychlosti pracuje na principu měření přestupu tepla mezi kulovou plochou o průměru 3 mm, ohřivanou na konstantní teplotu t_c , která je vyšší než teplota okolního vzduchu. Z rovnice tepelné rovnováhy kulové plochy, jejíž teplo je odebíráno převážně konvekcí, lze při znalosti součinitele přestupu tepla α_k stanovit rychlost proudění vzduchu:

$$q_k = \alpha_k (t_c - t_a) \quad (3.26)$$

Sonda je napojena na měřicí počítač vybavený kartou s D/C převodníkem a softwarem, který vyhodnocuje výsledky, tento software byl instalován na PC2.

Nastavení nástroje pro vyhodnocení výsledku lze vidět na Obr. 21.

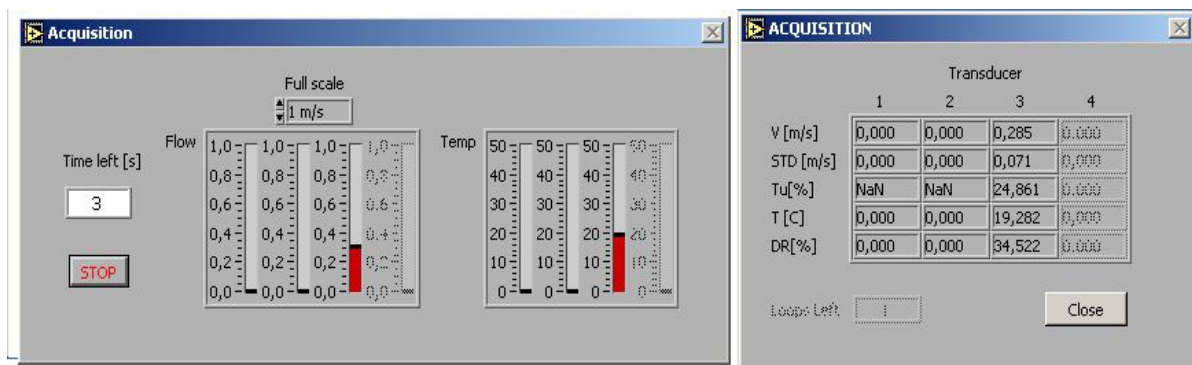


Obr. 21 – Nastavení měřicího softwaru Dantec

Vlevo na Obr. 21 je úvodní menu programu, které po kliknutí na tlačítko *Setup* otevře tabulku s nastavením měření, viz Obr. 21 vpravo. Zde se vyplní název série měření a zvolí se typ použitých měřicích zařízení. V kolonce *Acquisition Time* se nastaví doba, po kterou bude čidlo měřit. V případě vyhodnocování stupně obtěžování průvanem se dle

normy ČSN ISO 7730 měří 180 vteřin. V kolonce *No. of Acquisitions* se nastaví počet opakování měření. V případě této diplomové práce bylo každé měření opakováno minimálně dvakrát a získaná data byla exportována do souboru Excel a zprůměrována. Stupeň obtěžování průvanem *DR* byl vypočítán z průměrných hodnot více měření. Aby bylo možné data naměřená sondou rychlosti přiřadit ke změřenému tepelnému stavu pomocí měřicího zařízení Almemo 2890-9, obsahuje každé měření informaci o čase, ve kterém bylo uskutečněno [3].

Na Obr. 22 vlevo je zobrazena hodnota teploty a rychlosti proudění ve sloupcových grafech. Vpravo na Obr. 22 je tabulka výsledků měření, kde je kromě průměrné teploty a rychlosti proudění za 180 vteřin vyhodnocen i stupeň obtěžování průvanem *DR* a velikost turbulence *Tu*.



Obr. 22 – Vlevo: průběh měření, vpravo: tabulka s výsledky

Sonda Dantec 54T21 byla připevněna na podstavci ve stejné vzdálenosti od obou anemostatů ve výšce 1,1 m nad zemí, což odpovídá úrovni hlavy sedící osoby, viz Obr. 19 a Obr. 20.

3.4.3 Měřicí přístroj Almemo 2890-9 a program Almemo 4.9

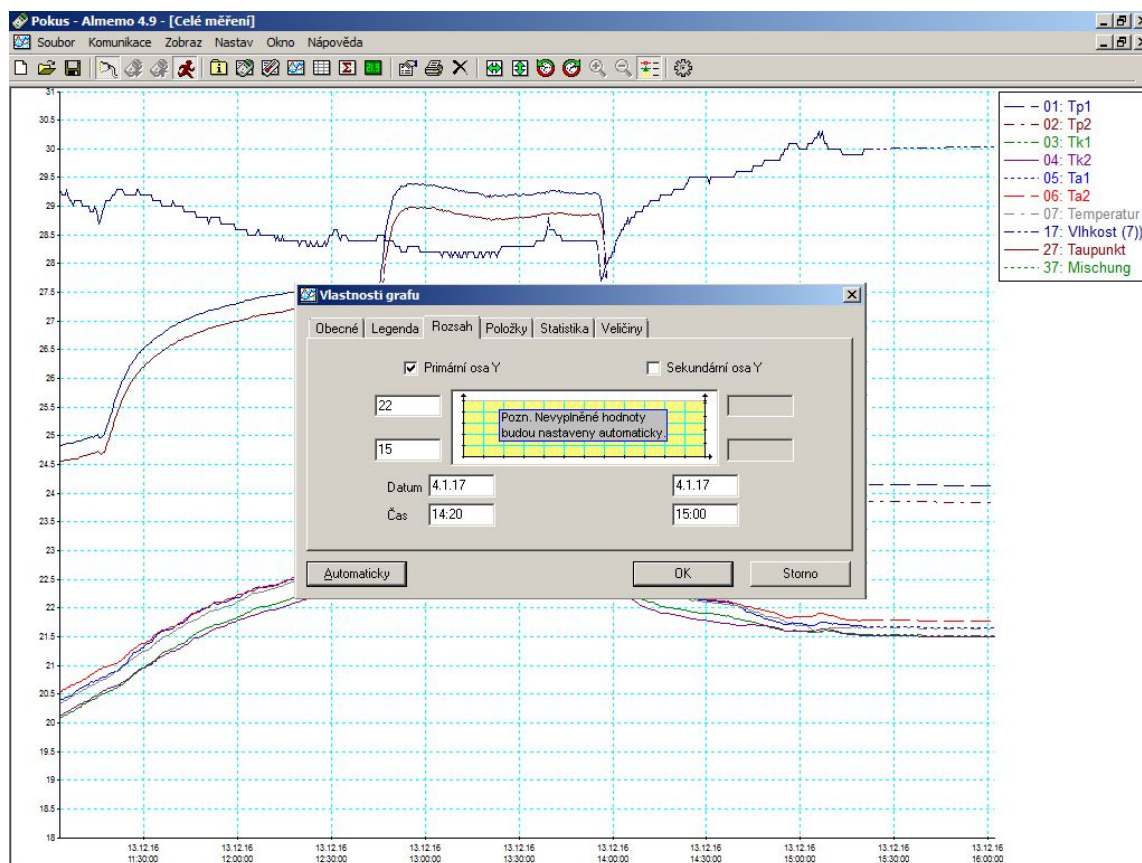
Kulové teploměry, sondy teploty vzduchu a vlhkostní čidlo umístěné v měřicí komoře byly připojeny k měřicímu přístroji Almemo 2890-9, který je vybaven devíti univerzálními vstupy, dvěma výstupy, grafickým displejem a paměťovou kartou. Přístroj byl připojen k PC1, na kterém byl instalován software Almemo 4.9, který mimo jiné umožňuje zobrazení měřených veličin v grafu v reálném čase. Při prvním spuštění programu Almemo 4.9 bylo nastaveno zaznamenávání měřených veličin každých 30 vteřin a byl vytvořen seznam měřicích míst tak, aby číselná označení vstupů jednotlivých čidel odpovídala měřeným veličinám, viz Obr. 23. Toto nastavení bylo uloženo a při každém dalším měření

načteno pomocí volby SOUBOR→OTEVŘÍT. Zaznamenávání dat se provede kliknutím na červeného panáčka na horní liště programu.

Měřicí místa					
	Jméno	Jedn.	Rozsah	Horní mez	Dolní mez
01	Tp1	°C	P204		
02	Tp2	°C	P204		
03	Tk1	°C	P204		
04	Tk2	°C	P204		
05	Ta1	°C	P204		
06	Ta2	°C	P204		
07	Temperatur	°C	Ntc		
17	Vlhkost (7))	%rH	HcrH		
27	Taupunkt	°C	H DT		
37	Mischung	gk	H AH		
+M	[PŘIDEJ NOVÉ M. MÍSTO]				
+V	[PŘIDEJ NOVÝ VZOREC]				

Obr. 23 – Nastavení názvů měřicích míst

Pomocí volby ZOBRAZ→GRAF→VYTVOŘ NOVÝ byl nastaven graf, který v reálném čase zobrazoval naměřená data. Skrze prosklenou stěnu měřicí komory byla měřená data pozorována a čekalo se na ustálení tepelných podmínek v měřicí komoře. Obr. 24 zobrazuje nastavení rozsahu grafu.



Obr. 24 – Monitorování měřených veličin v reálném čase, nastavení rozsahu grafu

3.5 Postup měření

Po příchodu do laboratoře byl nejdříve změřen barometrický tlak staničním barometrem a teplota v laboratoři pomocí přenosného přístroje ALMEMO 2290-4 vybaveného teplotním čidlem. Na PC1 byl v programu Almemo 4.9 načten projekt s již přednastavenými názvy jednotlivých čidel a bylo spuštěno průběžné zaznamenávání hodnot. Tyto hodnoty byly každých 30 vteřin vykreslovány do grafu a PC1 byl otočen směrem k prosklené výloze měřicí komory, aby bylo možné zvenčí sledovat tepelně vlhkostní stav prostředí měřicí komory a jeho ustálení při změně parametrů přívodního vzduchu. Na PC2 byla při každé sérii měření pomocí sondy Dantec vytvořena složka s aktuálním datem. Dále byly spuštěny spotřebiče simulující vnitřní tepelné zisky, které činí 590 W a laboratoř byla uzavřena.

K měřicí cloně byla dle Obr. 10 připojena U-trubice a mikromanometr, aby bylo možno měřit průtok vzduchu dopravovaný klimatizační jednotkou Robatherm do měřicí komory. Jednotka byla spuštěna pomocí tlačítka *Hand Start* na frekvenčním měniči Danfoss, viz Obr. 8 a nastavena požadovaná frekvence. Pro každou nastavenou hodnotu frekvence

na frekvenčním měniči byl měřen průtok vzduchu. Pro určení hustoty nasávaného vzduchu se změřila teplota suchého a mokrého teploměru a v programu Excel byl proveden výpočet množství přiváděného vzduchu dle kapitol č. 0 až 3.2.4.

Při měření bez vytápění a chlazení (měření č. 1-7), byla klapka přívodu venkovního vzduchu zcela uzavřena a přiváděný vzduch byl jednotkou nasáván z prostředí laboratoře.

Při simulaci chlazení klimatizační jednotkou, měření č. 8-17, bylo použito online ovládání uzavírací klapky venkovního vzduchu, viz kapitola č. 3.1.4, kterou bylo nastavováno množství přísávaného venkovního vzduchu.

Při simulaci vytápění klimatizační jednotkou, měření č. 18-30, byl dle návodu z kapitoly č. 3.1.2 ohřívač nastaven na požadovanou úroveň výkonu, tu je možno měnit plynule od 1 do 3 kW a uzavírací klapka venkovního vzduchu byla zcela uzavřena.

Po nastavení požadovaných hodnot průtoku a teploty přiváděného vzduchu bylo vyčkáno, než se v měřicí komoře ustálí tepelně vlhkostní podmínky. Doba ustálení podmínek mezi jednotlivými měřeními byla i s ohledem na dobu ustálení teploty kulového teploměru vyšší než 30 minut.

Po ustálení tepelně vlhkostních podmínek bylo spuštěno měření pomocí sondy Dantec 54T21 dle návodu uvedeného v kapitole č. 3.4.2. Poté byla laboratoř po dobu měření opět uzavřena. Po uplynutí doby měření bylo zkontrolováno, že měření proběhlo správně, naměřená data byla exportována do souboru Excel a byly nastaveny nové parametry přívodního vzduchu.

3.6 Zpracování dat

Pro každý měřicí den byl v příloženém programu Excel vytvořen samostatný list, do kterého byla exportována data naměřená v příslušný den měřicím přístrojem Almemo 2890-9 a sondou Dantec 54T21. Data byla ponechána v původní formě. Dále byl vytvořen pro každý měřicí den nový list, ve kterém byla naměřená data vyhodnocena následujícím způsobem:

- Teploty přiváděného vzduchu t_{p1} a t_{p2} byly zprůměrovány, průměrná teplota byla označena t_p .
- Byla smazána data naměřená v měřicím místě 2, vyhodnocováno bylo pouze měřicí místo 1.

- Data získaná opakovaným měřením téhož tepelného stavu pomocí sond rychlosti byla zprůměrována, stupeň obtěžování průvanem DR byl vypočten z průměrných hodnot.
- Data naměřená měřicím přístrojem Almemo 2890-9 v době měření sondou rychlosti byla zprůměrována a přiřazena k odpovídajícímu měření sondou rychlosti.
- Jednotlivé měřené stavy měřicí komory byly očíslovány chronologicky čísly 1-30.
- Z hodnot naměřených v jednotlivých stavech měřicí komory byla vypočtena střední radiační teplota t_r a ukazatele PMV , PPD , DR a t_o .
- V listu *Souhrn* byly všechny měřicí stavy vyneseny do jedné tabulky, ve které bylo doplněno vyhodnocení tepelných kategorií prostředí a sečteny vnitřní tepelné zisky s tepelnou zátěží přiváděnou v daný moment klimatizačním zařízením.

Tab. 12 – Seznam naprogramovaných funkcí v programu Excel

Požadovaný výpočet	zadání funkce	poznámka
PMV	= PMVx (clo ; met ; n ; t_a ; φ ; v_a ; t_r ; p_v)	zadává se jen φ , nebo p_v
PPD	= PPD (PMV)	
T_o	= TOPERA (t_a ; t_r ; v_a)	
DR	= DR (v_a ; T_u ; t_a)	T_u – intenzita turbulence

3.7 Výsledky měření

V měřicí komoře bylo změřeno celkem třicet různých ustálených tepelně vlhkostních stavů, jejichž veškeré měřené a vypočtené parametry jsou přehledně shrnuty v tabulce, viz příloha P1. Modře jsou vyznačeny stavy, při nichž přívodní vzduch odváděl vnitřní tepelné zisky. Červeně jsou zvýrazněny stavy, které představovali zimní provoz a přiváděným vzduchem byla měřicí komora vytápěna.

Výsledky měření při režimu chlazení

Měření číslo 1 až 17 simulovala režim chlazení pomocí vzduchové klimatizační jednotky. Jednotka z měřicí komory odváděla uměle vytvořené vnitřní tepelné zisky, které činily 590 W. Během těchto měření se, díky lehkým stěnám měřicí komory, výrazně projevil vliv okolních teplot, které jsou v prostoru laboratoře v zimě nízké. Porovnáme-li návrhové hodnoty operativní teploty pro letní provoz například kanceláře, viz Tab. 5 se stanovenými hodnotami operativní teploty pro jednotlivé stavy měřicí komory, viz Tab. 15, zjistíme, že v měřicí komoře nebylo dosaženo teplotních podmínek, které by letnímu provozu

odpovídaly. Z důvodu nízkých teplot v měřicí komoře bylo při výpočtu ukazatele PMV za hodnotu odporu oděvu dosazováno 1 clo, viz také Tab. 13. Tato hodnota odporu oděvu odpovídá spíše kancelářskému oblečení nošenému v zimě. Bez tohoto opatření by však většina hodnot PMV v této sérii měření byla mimo rozsah platnosti normy ČSN EN ISO 7730.

Tab. 13 – Hodnoty pro výpočet PMV, měření 1-17

Oděv	Metabolizmus	Fyzická činnost
[clo]	[met]	[met]
1	1,2	0

Tab. 14 zobrazuje hodnoty naměřené v měřicí komoře pro jednotlivé ustálené stavy tepelně vlhkostního prostředí. Kromě toho také uvádí frekvenci nastavenou na frekvenčním měniči, který ovládá ventilátor přívodního vzduchu a tomu odpovídající hodnotu množství přiváděného vzduchu. Tab. 15 zobrazuje hodnoty ukazatelů tepelného komfortu stanovených na základě naměřených hodnot, operativní teplotu, střední radiační teplotu a tepelnou zátěž odváděnou vzduchem.

Stavů č. 1-7 měřicí komory bylo dosaženo přiváděním vzduchu pouze z prostředí laboratoře, bez přísávání vzduchu venkovního. Tomu odpovídaly teploty přiváděného vzduchu vyšší než 19 °C, jednalo se tedy o téměř izotermní přívod vzduchu. Stupeň obtěžování průvanem *DR* rostl s množstvím přiváděného vzduchu z hodnoty 0 % až na 17 % při hodnotách průtoku v rozmezí 206 až 776 m³/h. Během těchto měření bylo dosaženo poměrně dobrých hodnot ukazatelů tepelné pohody a kategorie tepelného prostředí B. Měřeno 24.11.2016.

Stavů č. 8 a 9 bylo dosaženo poměrně velkým otevřením klapky sání venkovního vzduchu (30% dle online ovládacího programu). Teploty přiváděného vzduchu 15-16 °C byly nejnižší ze všech měřených stavů. Za povšimnutí stojí vysoký stupeň obtěžování průvanem v porovnání s kterýmkoliv jiným měřením s obdobným objemem přiváděného vzduchu, který pro stav č. 9 činil 457 m³/h, hodnota *DR* byla 17,4 %. Díky vyšším teplotám okolí měřicí komory v porovnání s ostatními měřicími dny a tudíž i vyšším ziskům tepla z okolí bylo i přes nízké teploty přiváděného vzduchu dosaženo dobrých ukazatelů tepelné pohody, hodnota *PPD* pro stav č. 9 byla 10,7 %, tomu odpovídá kategorie tepelného prostředí B. Měřeno 24.11.2016.

Stavy č. 10-13 byly naměřeny při částečném otevření klapky sání venkovního vzduchu (15% dle online ovládacího programu), množství přiváděného vzduchu bylo

v rozmezí 293 až 866 m³/h. Teploty přívodního vzduchu se pohybovaly v rozmezí 17,5-18,5 °C. Při frekvenci 38 Hz, čemuž odpovídal průtok vzduchu 866 m³/h byl stupeň obtěžování průvanem 22,6 % a ukazatel *PPD* 11,2 % nespokojených, tomu už odpovídá kategorie tepelného prostředí C. Měřeno 25.11.2016.

Stavy č. 14-17 navazovaly na předchozí měření, klapka sání venkovního vzduchu byla opět nastavena na 15 % otevření, průtok přiváděného vzduchu byl dále zvyšován z hodnoty 871 až na 1128 m³/h. Oproti předchozím měřicím dnům byly teploty v okolí měřicí komory nižší. Tomu odpovídají i výsledky ukazatelů tepelné pohody, *PPD* vyšší než 20% znamená, že tento stav nevyhověl požadavkům tepelného prostředí kategorie C. Vysoký průtok přiváděného vzduchu způsobil, že hodnota *DR* byla vyšší než 30 %. Měřeno 29.11.2016.

Tab. 14 – Naměřené hodnoty tepelného prostředí, chlazení

č. měření	f	\dot{V}	t_p	t_{kl}	t_{al}	φ	v_a
	[Hz]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[m/s]
1	10	206	19,0	20,7	20,7	43,1	0,04
2	14	300	19,0	20,7	20,7	43,3	0,08
3	18	398	19,0	20,6	20,6	43,3	0,08
4	22	495	19,1	20,6	20,6	43,4	0,10
5	26	589	19,3	20,6	20,6	43,5	0,12
6	30	682	19,4	20,6	20,5	43,5	0,13
7	34	776	19,7	20,6	20,6	43,3	0,13
8	18	380	15,8	20,0	19,9	43,0	0,12
9	22	457	15,3	19,7	19,5	43,0	0,13
10	14	293	17,5	20,3	20,3	39,8	0,08
11	22	475	17,7	20,2	20,1	40,1	0,09
12	30	644	18,0	20,0	19,9	40,1	0,13
13	38	866	18,4	19,9	19,8	40,2	0,16
14	38	871	17,6	19,0	18,9	28,8	0,22
15	42	964	18,3	19,3	19,3	27,8	0,22
16	46	1041	17,5	19,1	19,0	27,5	0,23
17	50	1128	18,1	19,1	19,1	26,9	0,20

Tab. 15 – Stanovené hodnoty ukazatelů tepelného komfortu, chlazení

č. měření	t_r	t_o	PMV	PPD	DR	Q_{vz}	Kategorie tepelného prostředí
	[°C]	[°C]	[-]	[%]	[%]	W	
1	20,7	20,7	-0,20	5,8	0,0	-118	B
2	20,7	20,7	-0,20	5,8	6,5	-176	B
3	20,6	20,6	-0,22	6,0	7,3	-216	B
4	20,6	20,6	-0,25	6,3	11,2	-243	B
5	20,6	20,6	-0,28	6,7	13,8	-261	B
6	20,6	20,6	-0,31	7,0	15,3	-260	B
7	20,6	20,6	-0,32	7,1	17,0	-236	B
8	20,1	20,0	-0,42	8,7	14,6	-519	B
9	19,8	19,7	-0,52	10,6	17,4	-653	B
10	20,3	20,3	-0,31	7,0	7,5	-271	B
11	20,2	20,1	-0,34	7,4	10,2	-383	B
12	20,1	20,0	-0,46	9,4	15,9	-423	B
13	20,0	19,9	-0,55	11,2	22,6	-410	C
14	19,1	19,0	-0,90	22,2	30,5	-375	Mimo rozsah
15	19,4	19,3	-0,84	19,8	30,4	-321	Mimo rozsah
16	19,2	19,1	-0,92	22,7	35,9	-515	Mimo rozsah
17	19,2	19,1	-0,86	20,5	31,4	-363	Mimo rozsah

Výsledky měření při zimním provozu

Měření číslo 18 až 30 simulovala zimní provoz vzduchové klimatizační jednotky, která vytápěla měřicí komoru. Vnitřní tepelné zisky činily opět 590 W. I v této sérii měření se nepříznivě projevovaly lehké obvodové stěny, kterými prostupem unikalo velké množství tepla. Při výpočtu ukazatele *PMV* byly použity hodnoty z Tab. 16.

Tab. 16 – Hodnoty pro výpočet *PMV*, zimní režim

Oděv	Metabolizmus	Fyzická činnost
[clo]	[met]	[met]
1	1,2	0

Tab. 17 zobrazuje hodnoty naměřené v měřicí komoře pro jednotlivé ustálené stavy tepelně vlhkostního prostředí. Kromě toho také uvádí frekvenci nastavenou na frekvenčním měniči, který ovládá ventilátor přívodního vzduchu a tomu odpovídající hodnotu množství přiváděného vzduchu. Tab. 18 zobrazuje hodnoty ukazatelů tepelného komfortu stanovených na základě naměřených hodnot, operativní teplotu, střední radiační teplotu a teplo přivedené vytápěcím vzduchem.

Stavy č. 18-22 byly naměřeny se zapnutým elektrickým ohřevem, kterým byla udržována teplota přívodního vzduchu okolo 22 °C, průtok přiváděného vzduchu byl postupně snižován z 1112 na 680 m³/h. Vlivem vysokých ztrát prostupem tepla do okolí a vysokému průtoku vzduchu, který způsobuje obtěžování průvanem bylo při této sérii měření dosahováno srovnatelných, nebo i horších tepelných ukazatelů než například v sérii měření č.10-13, kde bylo vzduchem chlazeno. To lze vidět, viz Graf 4, který zobrazuje některá vybraná měření. Měřeno 29.11.2016.

Stavy č. 23-26 byly naměřeny při průtocích vzduchu od 557 do 215 m³/h s vyššími teplotami přívodního vzduchu, než tomu bylo v předchozí sérii. Topný výkon vzduchu zůstal přibližně stejný. Nižší rychlosti proudění vzduchu při jinak téměř totožných teplotách vnitřního prostředí znamenaly vyšší hodnotu *PMV* než v předchozí sérii, což lze spatřit, viz Graf 4, porovnáním stavu č. 18 a č. 25. V této sérii měření byl stupeň obtěžování průvanem 0 %. Měřeno 1.12.2016.

Stavy č. 27-28 byly naměřeny při plném výkonu 3 kW elektrického ohřivače, při objemu přívodního vzduchu 897 a 667 m³/h. Byl naměřen značný rozdíl ve stupni obtěžování průvanem, který byl 15,6 % při vyšším objemu přiváděného vzduchu, oproti 0 %

při nižším průtoku. Při těchto měřeních bylo dosaženo téměř neutrálního tepelného prostředí a *PPD* lehce nad 5 %. Měřeno 4.12.2016.

Stavy č. 29-30 byly naměřeny při výkonu elektrického ohříváče 2 kW, při objemu přívodního vzduchu 893 a 672 m³/h. Stejně jako v předchozím měření bylo dosaženo téměř neutrálního tepelného prostředí a *PPD* lehce nad 6 %. Měřeno 4.12.2016.

Vzduch nasávaný z prostředí laboratoře měl obvykle relativní vlhkost v rozmezí 40-50 %, ohřevem se jeho relativní vlhkost ještě snížila, což se projevilo na naměřených hodnotách vlhkosti v měřicí komoře, které v zimním provozu nepřekročily 30 %.

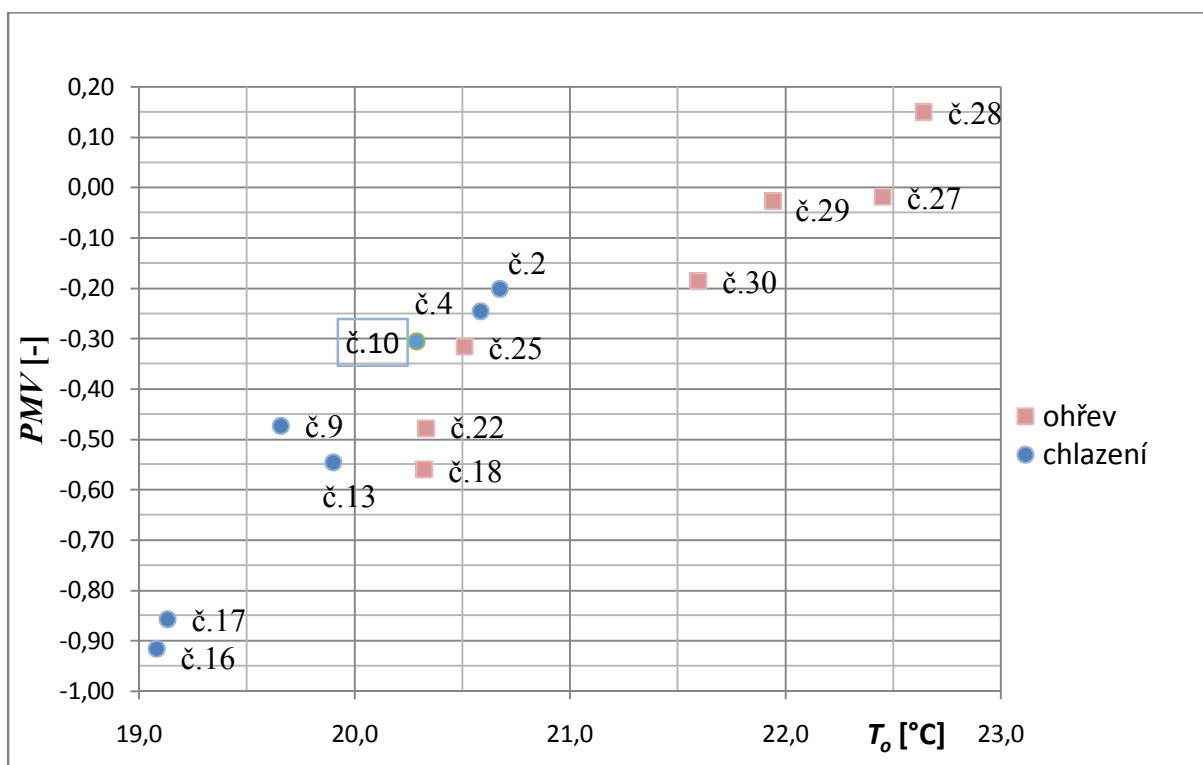
Tab. 17 – Naměřené hodnoty tepelného prostředí, zimní provoz

č. měření	f	\dot{V}	t_p	t_{kl}	t_{al}	φ	v_a
	[Hz]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[m/s]
18	50	1112	22,0	20,3	20,4	25,2	0,18
19	45	1004	21,8	20,4	20,5	25,3	0,15
20	40	907	21,7	20,3	20,4	25,4	0,16
21	35	796	21,9	20,3	20,4	25,6	0,14
22	30	680	22,5	20,3	20,5	25,7	0,14
23	25	557	22,9	20,5	20,3	28,6	0,05
24	20	438	23,9	20,6	20,7	28,5	0,03
25	15	323	25,4	20,5	20,5	28,8	0,03
26	10	215	23,9	20,1	20,0	29,6	0,03
27	40	897	27,3	22,4	22,7	28,4	0,15
28	30	667	29,0	22,5	23,0	28,3	0,04
29	30	672	25,3	21,9	22,1	29,4	0,10
30	40	893	24,0	21,6	21,7	30,0	0,14

Tab. 18 – Stanovené hodnoty ukazatelů tepelného komfortu, zimní provoz

č. měření	t_r	t_o	PMV	PPD	DR	Q_{vz}	Kategorie tepelného prostředí
	[°C]	[°C]	[-]	[%]	[%]	W	
18	20,2	20,3	-0,6	11,6	22,9	593	C
19	20,3	20,4	-0,5	10,2	18,7	446	C
20	20,3	20,3	-0,5	10,8	19,8	391	C
21	20,2	20,3	-0,5	10,0	15,9	418	B
22	20,2	20,3	-0,5	9,8	15,9	471	B
23	20,6	20,4	-0,3	7,4	0,0	497	B
24	20,6	20,6	-0,3	6,8	0,0	484	B
25	20,5	20,5	-0,3	7,1	0,0	526	B
26	20,1	20,0	-0,4	8,7	0,0	285	B
27	22,2	22,5	0,0	5,0	15,6	1392	A
28	22,3	22,6	0,1	5,5	0,0	1350	A
29	21,8	21,9	0,0	5,0	8,2	727	A
30	21,5	21,6	-0,2	5,7	15,0	686	A

V příloze P2 lze vidět všechny naměřené stavy vynesené do grafu s hodnotami t_o na vodorovné ose a PMV na svislé ose. Následující Graf 4 zobrazuje vybrané tepelné stavy v měřící komoře. Nutno podotknout, že ukazatel PMV není funkcí operativní teploty.



Graf 4 – Vybrané měřicí stavy

4 Diskuze

Měření odhalilo nedostatky týkající se zejména měřicí komory, jejíž lehké stěny s průměrným součinitelem prostupu tepla $U_{pr} = 2,84 \text{ W/ m}^2\text{K}$ a celkovou plochou $124,1 \text{ m}^2$ sdílí s okolím 352 W při rozdílu $1 \text{ }^\circ\text{C}$. Takto vysoká hodnota U_{pr} znemožňuje výraznější vychýlení tepelného stavu laboratoře od tepelného stavu okolí. Aby bylo možno simulovat letní provoz klimatizační jednotky i v zimním semestru, musela by se měřicí komora náležitě zateplit. Hodnoty U_{pr} v závislosti na tloušťce zateplení dřevěných konstrukcí laboratoře, jsou uvedeny v kapitole 3.4.1. Řešením by také bylo přesunutí měření této úlohy do letního semestru, kdy teploty v laboratoři dosahují až $30 \text{ }^\circ\text{C}$. Toto opatření by na druhou stranu vyžadovalo zprovoznění chladiče, který je součástí klimatizační jednotky.

V rámci předmětu experimentální metody se k měření doporučují stavy podobné těm, které uvádí následující tabulka:

Tab. 19 – Doporučené měřicí stavy

č. měření	f	\dot{V}	t_p	v_a	t_o	PMV	PPD	DR
	[Hz]	[m ³ /h]	[°C]	[m/s]	[°C]	[-]	[%]	[%]
17	50	1128	18,1	0,2	19,1	-0,86	20,5	31,4
22	30	680	22,5	0,14	20,3	-0,48	9,8	15,9
28	30	667	29	0,04	22,6	0,15	5,5	0,0

Stav. č. 17 představuje maximální množství přiváděného vzduchu o nízké teplotě, což má za následek vysoký stupeň obtěžování průvanem a vysoký ukazatel PPD .

Stav č. 22 při kterém je přiváděno $680 \text{ m}^3/\text{h}$ vzduchu ohřátého na teplotu $22,5 \text{ }^\circ\text{C}$, stupeň obtěžování průvanem je oproti předchozímu poloviční, stejně jako ukazatel PPD

Stav č. 28 při kterém je přiváděno $667 \text{ m}^3/\text{h}$ vzduchu ohřátého na teplotu $29 \text{ }^\circ\text{C}$. Objem je stejný jako v předchozím případě, vyšší teplota přiváděného vzduchu se výrazně projeví nižší rychlostí proudění vzduchu a nulovým stupněm obtěžování průvanem. Ukazatel PPD nabývá téměř ideální hodnoty $5,5 \text{ } \%$.

5 Závěr

Cílem diplomové práce bylo proměření tepelně vlhkostních parametrů vnitřního prostředí experimentální klimatizované komory pro různé okrajové podmínky průtoku a teploty přiváděného vzduchu. Na základě naměřených hodnot vyhodnotit dosažení tepelného komfortu pomocí ukazatelů *PMV*, *PPD* a *DR* a operativní teploty. Pro měřicí úlohu v rámci předmětu experimentální metody měli být vybrány měřicí stavy, které by umožnily studentům získat povědomí o možných příčinách vzniku tepelného diskomfortu.

V teoretickém úvodu se diplomová práce věnuje problematice tepelné rovnováhy lidského těla a rozebírá postup výpočtu jednotlivých ukazatelů tepelné pohody a představuje kategorie tepelného prostředí. Pro výpočet ukazatelů tepelné pohody a operativní teploty bylo vytvořeno makro v programu Excel, zdrojový kód tohoto programu je k nahlédnutí, viz Příloha 3.

V praktické části byly specifikovány měřicí přístroje a ostatní zařízení a byla popsána metodika měření. Vzduchová klimatizační jednotka byla připojena k měřicí komoře, do které je vzduch přiváděn dvěma anemostaty. Byla provedena a vyhodnocena zkouška těsnosti potrubí, která ukázala, že potrubní trati uniká méně než jedno procento přiváděného vzduchu. V průběhu samotného měření tepelně vlhkostních stavů v měřicí komoře byl pomocí clony s průměry 250/140 mm napojené na odběry diferenčního tlaku stanovován objem přiváděného vzduchu. Podmínky v měřicí komoře byly průběžně měřeny a zaznamenávány pomocí měřicí techniky Almemo 2890-9, ke které byla připojena sada čidel teploty vzduchu, kulový teploměr a čidlo vlhkosti. Všesměrovou sondou Dantec 54T21 byla monitorována rychlost proudění vzduchu a intenzita turbulence. Změřeno a vyhodnoceno bylo celkem 30 ustálených stavů vnitřního prostředí měřicí komory, ve které byl simulován letní i zimní provoz klimatizační jednotky.

V rámci experimentu se v měřicí komoře nepodařilo dosáhnout tepelného stavu, který by odpovídal letním podmínkám. Příčinou jsou nízké teploty v zimních měsících v laboratoři a lehké stěny obklopující měřicí komoru, která tak má značné tepelné ztráty. Jako řešení bylo navrženo zateplení dřevěných stěn měřicí komory, nebo přesunutí měřicí úlohy v rámci předmětu experimentální metody do letního semestru, kdy jsou teploty v laboratoři vyšší. Měření zimního provozu klimatizační jednotky proběhlo úspěšně. Studentům byly doporučeny tři měřicí stavy, kterých bylo dosaženo a na kterých je možno demonstrovat příčiny vzniku tepelného diskomfortu, konkrétně stav č. 17, stav č. 22 a stav

č. 28. Kompletní informace o naměřených hodnotách a vyhodnocení měřicích stavů je k nahlédnutí, viz Příloha 1.

6 Použitá literatura

- [1] NOVÝ, J. *Technika prostředí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2006. ISBN 80-01-03492-5.
- [2] ASHRAE *Handbook 2005 Fundamentals*. 2005, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers. ISBN 1-931862-71-04
- [3] ČSN EN ISO 7730: 2005 *Ergonomie tepelného prostředí - Analitické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního tepelného komfortu*. ČNI, Praha 2005.
- [4] ČSN EN ISO 7736: 2001 *Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin*. ČNI, Praha 2001.
- [5] ZMRHAL, V., DRKAL, F. *Operativní teplota v praxi*. Směrnice STP-OS01/č.3/2010. Příloha časopisu VVI č.5/2010.
- [6] MANGUM, B., HILL, J. *Thermal analysis, human comfort, indoor environments*. Washington: U.S. Government Printing Office, 1977. NBS Special Publication
- [7] ČSN EN ISO 5167-1: 1991 *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku*. ČNI, Praha 1993.
- [8] NICOL, F., HUMPHREYS, M., ROAF, S. *Adaptive thermal comfort: principles and practice*. Abingdon: Routledge, 2012. ISBN 978-0-415-6959-8.
- [9] MATUŠKA, T. *Experimentální metody v technice prostředí*. Praha: Nakladatelství ČVUT, 2005. ISBN 80-01-03291-4
- [10] LAIN, M., BARTÁK, M. *Posouzení parametrů prostředí v místnosti klimatizované jednotkou SPLIT* [Online]. 2006. Topinfo s.r.o. [12.1.2017]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/2700-posouzeni-parametru-prostredi-v-mistnosti-klimatizovane-jednotkou-split>
- [11] Specifikace produktů Lindab [Online]. Lindab. [12.1.2017]. Dostupné z: <http://www.lindab.com/cz/pro/products/pages/fmu.aspx>

[12] Fotogalerie Ústavu techniky prostředí [Online]. České vysoké učení technické v Praze. [12.1.2017]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-techniky-a-prostredi/ustav-techniky-a-prostredi-12116/odborna-cinnost-12116/vybaveni-12116/fotogalerie-12116/>

[13] Online ovládání klimatizační jednotky Robatherm [Online]. ENERGOCENTRUM PLUS, s.r.o. [12.1.2017]. Dostupné z: <https://www.fs.cvut.cz/ustavy/sekce-ustav-techniky-a-prostredi/ustav-techniky-a-prostredi-12116/odborna-cinnost-12116/vybaveni-12116/fotogalerie-12116/>

[14] CENTNEROVÁ, L.: *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody*: disertační práce. Praha: ČVUT, Fakulta stavební, 2001.

Seznam příloh

- Příloha 1:** Tabulky naměřených hodnot
- Příloha 2:** Zobrazení naměřených stavů v grafu
- Příloha 3:** Zdrojový kód makra pro výpočet PMV , PPD , t_o a DR

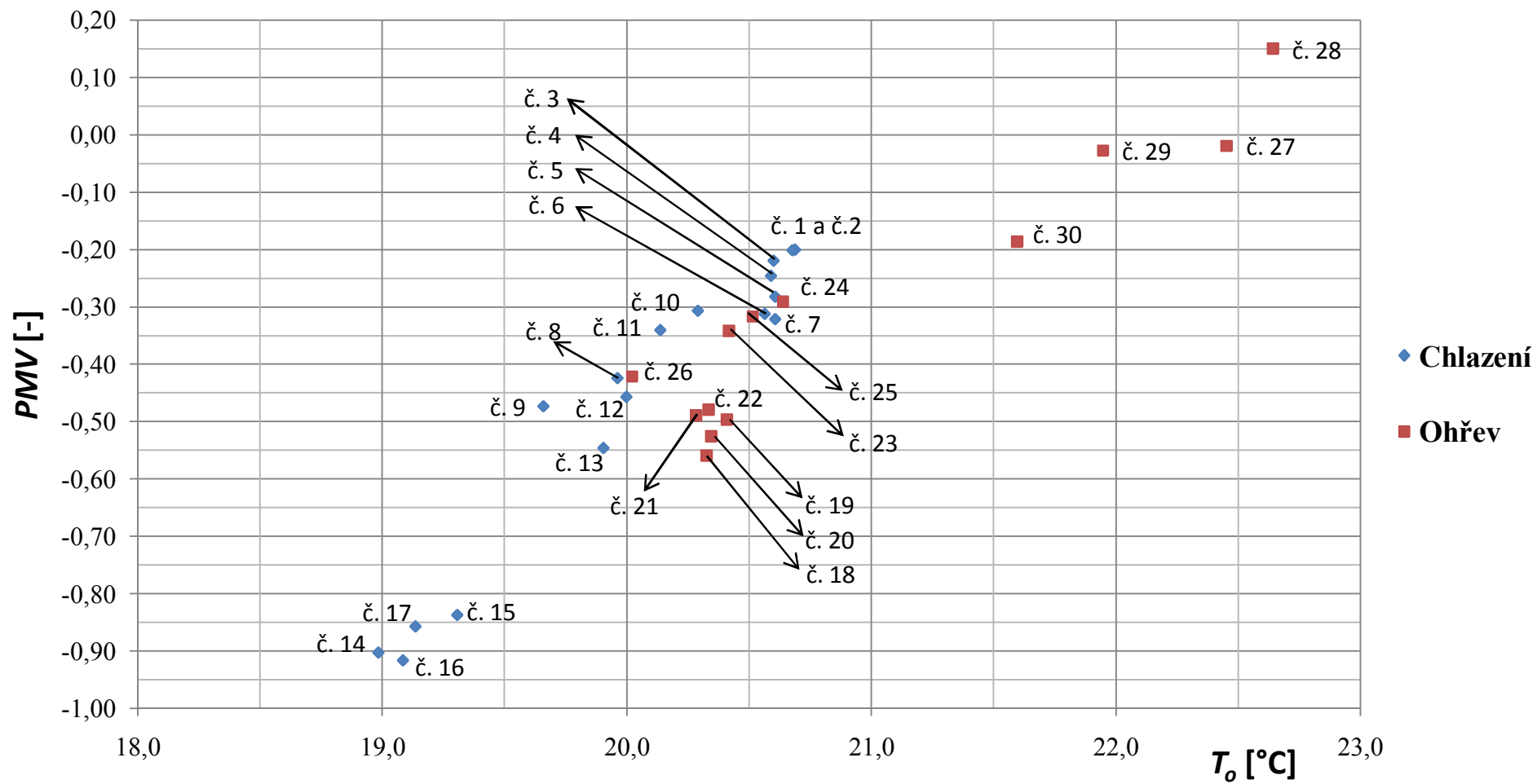
Příloha 1 – Tabulka naměřených hodnot

č. měření	Datum	f	V	t_p	t_{kl}	t_{al}	RH	v	t_r	t_o	PMV	PPD	DR	Q_{vz}	Q_z	Kategorie tepelného prostředí
		[Hz]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[m/s]	[°C]	[°C]	[-]	[%]	[%]	W	W	
1	24.11.16	10	206	19,0	20,7	20,7	43,1	0,04	20,7	20,7	-0,20	5,8	0,0	-118	590	B
2	24.11.16	14	300	19,0	20,7	20,7	43,3	0,08	20,7	20,7	-0,20	5,8	6,5	-176	590	B
3	24.11.16	18	398	19,0	20,6	20,6	43,3	0,08	20,6	20,6	-0,22	6,0	7,3	-216	590	B
4	24.11.16	22	495	19,1	20,6	20,6	43,4	0,10	20,6	20,6	-0,25	6,3	11,2	-243	590	B
5	24.11.16	26	589	19,3	20,6	20,6	43,5	0,12	20,6	20,6	-0,28	6,7	13,8	-261	590	B
6	24.11.16	30	682	19,4	20,6	20,5	43,5	0,13	20,6	20,6	-0,31	7,0	15,3	-260	590	B
7	24.11.16	34	776	19,7	20,6	20,6	43,3	0,13	20,6	20,6	-0,32	7,1	17,0	-236	590	B
8	24.11.16	18	380	15,8	20,0	19,9	43,0	0,12	20,1	20,0	-0,42	8,7	14,6	-519	590	B
9	24.11.16	22	457	15,3	19,7	19,5	43,0	0,13	19,8	19,7	-0,52	10,6	17,4	-653	590	B
10	25.11.16	14	293	17,5	20,3	20,3	39,8	0,08	20,3	20,3	-0,31	7,0	7,5	-271	590	B
11	25.11.16	22	475	17,7	20,2	20,1	40,1	0,09	20,2	20,1	-0,34	7,4	10,2	-383	590	B
12	25.11.16	30	644	18,0	20,0	19,9	40,1	0,13	20,1	20,0	-0,46	9,4	15,9	-423	590	B
13	25.11.16	38	866	18,4	19,9	19,8	40,2	0,16	20,0	19,9	-0,55	11,2	22,6	-410	590	C
14	29.11.16	38	871	17,6	19,0	18,9	28,8	0,22	19,1	19,0	-0,90	22,2	30,5	-375	590	Mimo rozsah
15	29.11.16	42	964	18,3	19,3	19,3	27,8	0,22	19,4	19,3	-0,84	19,8	30,4	-321	590	Mimo rozsah
16	29.11.16	46	1041	17,5	19,1	19,0	27,5	0,23	19,2	19,1	-0,92	22,7	35,9	-515	590	Mimo rozsah
17	29.11.16	50	1128	18,1	19,1	19,1	26,9	0,20	19,2	19,1	-0,86	20,5	31,4	-363	590	Mimo rozsah

Příloha 1 – Tabulka naměřených hodnot – pokračování

č. měření	Datum	f	V	t_p	t_{kl}	t_{a1}	RH	v	t_r	t_o	PMV	PPD	DR	Q_{vz}	Q_z	Kategorie tepelného prostředí
		[Hz]	[m ³ /h]	[°C]	[°C]	[°C]	[%]	[m/s]	[°C]	[°C]	[-]	[%]	[%]	W	W	
18	29.11.16	50	1112	22,0	20,3	20,4	25,2	0,18	20,2	20,3	-0,56	11,6	22,9	593	590	C
19	29.11.16	45	1004	21,8	20,4	20,5	25,3	0,15	20,3	20,4	-0,50	10,2	18,7	446	590	C
20	29.11.16	40	907	21,7	20,3	20,4	25,4	0,16	20,3	20,3	-0,53	10,8	19,8	391	590	C
21	29.11.16	35	796	21,9	20,3	20,4	25,6	0,14	20,2	20,3	-0,49	10,0	15,9	418	590	B
22	29.11.16	30	680	22,5	20,3	20,5	25,7	0,14	20,2	20,3	-0,48	9,8	15,9	471	590	B
23	01.12.16	25	557	22,9	20,5	20,3	28,6	0,05	20,6	20,4	-0,34	7,4	0,0	497	590	B
24	01.12.16	20	438	23,9	20,6	20,7	28,5	0,03	20,6	20,6	-0,29	6,8	0,0	484	590	B
25	01.12.16	15	323	25,4	20,5	20,5	28,8	0,03	20,5	20,5	-0,32	7,1	0,0	526	590	B
26	01.12.16	10	215	23,9	20,1	20,0	29,6	0,03	20,1	20,0	-0,42	8,7	0,0	285	590	B
27	13.12.16	40	897	27,3	22,4	22,7	28,4	0,15	22,2	22,5	-0,02	5,0	15,6	1392	590	B
28	13.12.16	30	667	29,0	22,5	23,0	28,3	0,04	22,3	22,6	0,15	5,5	0,0	1350	590	A
29	13.12.16	30	672	25,3	21,9	22,1	29,4	0,10	21,8	21,9	-0,03	5,0	8,2	727	590	A
30	13.12.16	40	893	24,0	21,6	21,7	30,0	0,14	21,5	21,6	-0,19	5,7	15,0	686	590	B

Příloha 2 – Zobrazení naměřených stavů



Příloha 3 – Zdrojový kód makra pro výpočet *PMV*, *PPD*, *t_o* a *DR*

```
Function PMVx(CLO, MET, WME, Ta, RH, VEL, Tr, PA)
If PA = "0" Then
    PA = RH * 10 * Exp(16.6536 - (4030.183 / (Ta + 235)))
End If
ICL = 0.155 * CLO
M = MET * 58.15
W = WME * 58.15
MW = M - W
If ICL <= 0.078 Then
    FCL = 1 + 1.29 * ICL
Else
    FCL = 1.05 + 0.645 * ICL
End If
HCF = 12.1 * Sqr(VEL)
TAA = Ta + 273
TRA = Tr + 273
'TCLA = TAA + (35.5 - TA) / (3.5 * ICL + 1) 'odhad povrchove teploty odevu
TCLA = TAA + (35.5 - Ta) / (3.5 * (6.45 * ICL + 0.1)) 'odhad povrchove teploty odevu
P1 = ICL * FCL
P2 = P1 * 3.96
P3 = P1 * 100
P4 = P1 * TAA
P5 = 308.7 - 0.028 * MW + P2 * (TRA / 100) ^ 4
XN = TLCA / 100
XF = XN
MAXITER = 1500
EPS = 0.000015
For N = 1 To MAXITER
    XF = (XF + XN) / 2
    HCN = 2.38 * Abs(100 * XF - TAA) ^ 0.25
    If HCF > HCN Then
        HC = HCF
```

```

Else
  HC = HCN
End If
XN = (P5 + P4 * HC - P2 * XF ^ 4) / (100 + P3 * HC)
If Abs(XN - XF) < EPS Then
  Exit For
End If
If N = MAXITER Then
  MsgBox "NEDOSTATEK ITERACII!"
End If
Next N
TCL = 100 * XN - 273
HL1 = 3.05 * 0.001 * (5733 - 6.99 * MW - PA)
If MW > 58.15 Then
  HL2 = 0.42 * (MW - 58.15)
Else
  HL2 = 0
End If
HL3 = 1.7 * 0.00001 * M * (5867 - PA)
HL4 = 0.0014 * M * (34 - Ta)
HL5 = 3.96 * FCL * (XN ^ 4 - (TRA / 100) ^ 4)
HL6 = FCL * HC * (TCL - Ta)
TS = 0.303 * Exp(-0.036 * M) + 0.028
PMVx = TS * (MW - HL1 - HL2 - HL3 - HL4 - HL5 - HL6)
End Function

```

```

Function PPD(PMVx)
PPD = 100 - 95 * Exp(-0.03353 * PMVx ^ 4 - 0.2179 * PMVx ^ 2)
End Function

```

```

Function TOPERA(Ta, Tr, v)
A = 0.73 * v ^ 0.2
If v < 0.2 Then TOPERA = (Ta + Tr) / 2 Else TOPERA = A * Ta + (1 - A) * Tr
End Function

```

```

Function DR(v, Tu, Ta)
DR = (34 - Ta) * (v - 0.05) ^ 0.62 * (0.37 * v * Tu + 3.14)
End Function

```
