

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**METODIKA PRO TESTOVÁNÍ PROSTŘEDÍ V KABINĚ
OSOBNÍHO VOZU S VYUŽITÍM TEPELNÉHO
MANEKÝNA A TESTOVACÍCH OSOB**

MEASUREMENT OF CABIN ENVIRONMENT BY MEANS OF THERMAL MANIKIN AND TEST
SUBJECTS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Róbert Toma

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Róbert Toma**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Technika prostředí
Vedoucí práce: **Bc.Ing. Jan Fišer, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Metodika pro testování prostředí v kabině osobního vozu s využitím tepelného manekýna a testovacích osob

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Metody predikce tepelného komfortu v podmínkách asymetrických a nestacionárních prostředí nejsou zatím uspokojivě vyřešeny. Stejně tak i energeticky efektivní tepelný management kabin vozidel je zásadním problémem především u vozidel s elektrickým či hybridním pohonem, kde spotřeba těchto systémů činí značnou část spotřeby vozu a snižuje tak dramaticky dojezd těchto vozidel. Je tedy nezbytné hledat cesty jak efektivně distribuovat teplo, chlad a větrací vzduch do kabiny, při co nejmenších energetických nárocích a také jak efektivně řídit tyto systémy. Jednou ze slibných cest je inovativní řídicí systém iHVAC, návrhem jehož testování a ověřování funkčnosti se zabývá tato práce.

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je vytvořit návrh testovací procedury pro testování inovativního HVAC systému pomocí tepelného manekýna a testovacích osob. Dále pak provést ověření metodiky za vybraných klimatických podmínek. Výsledkem práce by mělo být porovnání hodnocení tepelného stavu prostředí pomocí tepelného manekýna a hlasování od testovacích osob.

Seznam literatury:

Mathur,G. D. (2004): Vehicle Thermal Management: Heat Exchangers & Climate Control, SAE International, ISBN 0-7680-1445-X.

Nilsson, H.O. (2004): Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models, PhD thesis, University of Gävle.

ČSN EN ISO 14505-2 (2007): Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut, Praha.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

V tejto diplomovej práci je spracovaný návrh testovacej procedúry pre inovatívny systém HVAC. Návrh bol vytvorený testovaním vo viacerých fázach pomocou manekýna Newtona a respondentov v klimakomore na VUT v Brne. Postupným vyhodnotením týchto fáz bol zistený vzájomný vzťah a relevantnosť výsledkov od manekýna a testovacích osôb a po každej fáze boli navrhnuté úpravy procedúry. V práci sú tiež uvedené základy termoregulácie ľudského tela, faktory ovplyvňujúce tepelnú pohodu a rôzne spôsoby jej merania a vyhodnocovania pomocou viacerých stupníc a diagramu komfortných zón. Práca ďalej obsahuje dotazník pre testovanie tepelného komfortu a stupnice použité pri jeho vyplňovaní. Na záver je uvedený spôsob vyhodnotenia korelácie výsledkov z merania tepelného komfortu pomocou manekýna a testovacích osôb, ako aj finálny návrh testovacej procedúry, ktorá bude použitá pri kalibrácii a overovaní správneho fungovania iHVAC systému.

ABSTRACT

In this thesis, there is processed design of test procedure for innovative HVAC system. This design was created in consecutive phases with use of thermal manikin Newton and climate chamber. Correlation between data from thermal manikin and tests subjects and possible design changes were evaluated after each phase. There are mentioned basics of human thermoregulation, factors which affect thermal comfort and ways in which is possible to measure and rate it with use of thermal comfort scales and comfort zones diagram. The thesis includes survey for testing thermal comfort and scales which are used to complete it. In the end, we mentioned some results alongside with our approach in evaluation of correlation between thermal manikin and test. There is also final design of test procedure for innovative HVAC system which would be used for its calibration and final functionality testing.

KĹÚČOVÉ SLOVÁ

Tepelný komfort, tepelný pocit, stupnica MTV, diagram komfortných zón, tepelný manekýn, metodika testovania prostredia, testovacie osoby, klimakomora, iHVAC,

KEY WORDS

Thermal comfort, thermal sensation, MTV scale, comfort zone diagram, thermal manikin, measurement of cabin environment, test subjects, climate chamber, iHVAC,

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

TOMA, R. *Metodika pro testování prostředí v kabině osobního vozu s využitím tepelného manekýna a testovacích osob.* Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 74 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D..

ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že som diplomovú prácu s titulom *Metodika pro testování prostředí v kabině vozu s využitím tepelného manekýna a testovacích osob* vypracoval samostatne s použitím odbornej literatúry a prameňov uvedených na zozname, ktorý tvorí prílohu tejto práce.

27.5.2016

.....
Bc. Róbert Toma

POĎAKOVANIE

Týmto by som sa chcel poďakovať Ing. Bc. Janu Fišerovi, Ph.D. za vedenie tejto diplomovej práce, za cenné rady a strávený čas pri testovaní. Ďalej by som sa chcel poďakovať Ing. Milošovi Fojtlínovi za pomoc pri testoch v klimakomore a vyhodnocovaní výsledkov.

OBSAH

1	Úvod	13
2	Vymedzenie cieľov a limitov práce	14
3	Navrhnutý postup riešenia	15
4	Metabolizmus a tepelná regulácia človeka	16
4.1	Pasívny systém – tepelná výmena s okolím	17
4.2	Pasívny systém – prenos tepla vnútri človeka	22
4.3	Aktívny systém - termoregulácia	23
5	Tepelný komfort v kabínach vozidiel	24
5.1	Čo je to komfort prostredia ?.....	24
5.2	Modely tepelného komfortu	25
5.3	Nilssonov model tepelného komfortu	26
5.4	Vyhodnocovanie tepelného komfortu	28
5.5	Stupnice tepelného komfortu	31
6	Meranie tepelného komfortu	34
6.1	Samostatné senzory s integrovaným zahrievaním	34
6.2	Tepelný manekýn a jeho využitie pri meraní tepelného komfortu	35
6.2.1	<i>História tepelných manekýnov</i>	36
6.2.2	<i>Manekýn Newton</i>	38
6.2.3	<i>Klimakomora</i>	40
6.3	Inovatívny systém HVAC	41
7	Test Tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1	43
7.1	Podmienky a postup experimentu.....	43
7.2	Výsledky od manekýna Newtona a testovacích osôb.....	46
7.3	Záver a navrhnuté úpravy	48
7.4	Úprava dotazníka pre tepelný komfort.....	51
8	Test Tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 2	54
8.1	Použité vybavenie	54
8.2	Podmienky a postup experimentu.....	55
8.3	Vyhodnotenie biometrických dotazníkov	60
8.4	Vyhodnotenie a porovnanie výsledkov manekýna a testovacích osôb.....	62
9	Finálny návrh testovacej procedúry pre iHVAC	66
10	Záver	69
	Literatúra	71
	Zoznam použitých znakov a skratiek	73

1 ÚVOD

V dnešnej dobe zohráva priemysel neodmysliteľnú úlohu v ekonomike väčšiny štátov na svete a jedným z jeho najvýznamnejších odvetví je automobilový priemysel, ktorý sa stále dynamickým tempom vyvíja. Je to spôsobené dochádzajúcimi zásobami neobnoviteľných zdrojov energie, ale hlavne legislatívnymi požiadavkami (normy EURO 5 a 6) na obmedzenie znečisťovania vzduchu dopravnými prostriedkami. Tieto normy predpisujú maximálne množstvo emisií unikajúcich do ovzdušia, ktoré je však podľa zistení z roku 2015 často výrobcami prekračované (VOKÁČ, 2015). Výrobcovia sa teda sústreďujú na znižovanie hodnoty CO₂ a emisií celkovo, či už zmenou pohonných systémov, vývojom systémov využívajúcich obnoviteľné zdroje energie, ale aj vývojom sekundárnych systémov v interiéri. Konkrétne sa výrobcovia začínajú sústreďovať na vykurovacie a klimatizačné systémy, ktorých rozvoj, v porovnaní napríklad s pohonnými jednotkami, posledné roky stagnoval. Inovácia HVAC systémov je tiež možnosť odlíšiť sa od konkurencie, ktorá je hlavne na európskom trhu veľká a zaujať konečného spotrebiteľa novinkou alebo dobrými emisnými hodnotami automobilu.

Testovanie je neodlúčiteľnou súčasťou procesu vývoja a inovácie technických systémov a veľmi dôležitým nástrojom pre overovanie funkčnosti rôznych, už existujúcich prvkov. Pretože vnímanie tepelného komfortu v automobile je značne subjektívna záležitosť, je pre testovanie nových systémov potrebná dostatočne veľká a rozmanitá vzorka respondentov, čo býva časovo, organizačne aj finančne náročné. Pri testovaní sa preto využíva meracia technika, akou je napríklad tepelný manekýn, ktorá tieto testy zjednodušuje.

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť procedúru na testovanie inovatívneho systému pre riadenie HVAC, ktorý VUT v Brne vyvíja v spolupráci so ŠKODA AUTO a.s. Súčasťou bol návrh dotazníku tepelného komfortu, potrebného počtu respondentov, ich rozloženie a motivácia, potrebnej meracej techniky, časového harmonogramu a postupu merania a ďalších dôležitých informácií. Pretože sa vnútorné prostredie v automobile väčšinou veľmi dynamicky mení, bol návrh procedúry zameraný práve na testovanie takýchto prostredí a overovanie návrhu potom prebiehalo v niekoľkých fázach. Každá fáza bola vyhodnotená, boli navrhnuté potrebné úpravy experimentu a dotazníka, ktoré boli následne zapracované a otestované v ďalšej fáze. Cieľom bolo taktiež vyhodnotenie dát získaných z dotazníkov tepelného komfortu od respondentov a dát nameraných tepelným manekýnom Newtonom pri čiastkových meraniach a následné vyhodnotenie ich vzájomnej korelácie. Na záver boli zhodnotené zistené informácie a navrhnutý finálny návrh procedúry pre testovanie systému iHVAC.

2 VYMEDZENIE CIEĽOV A LIMITOV PRÁČE

Vymedzenie cieľov práce

- Návrh testovacej procedúry inovatívneho systému HVAC pomocou testovacích osôb a tepelného manekýna, ktorý bude slúžiť ako etalónové meradlo pre kalibráciu a testovanie nového systému
- Otestovanie korelácie medzi výsledkami od respondentov a z manekýna Newtona
- Overenie návrhu meraním vo vybraných klimatických podmienkach.
- Validácia výsledkov modelu MTV, ktorým vyhodnocujeme dáta namerané z manekýna pomocou testovacích osôb

Vymedzenie limitov práce

- Práca sa nezaobrá priamo testovaním systému iHVAC, ale iba testovaním a nastavením čiastkových subsystémov
- Pri práci bude použitý jeden druh odevu pre každú testovaciu fázu
- Experimentálna práca je limitovaná obmedzeným počtom opakovaní merania

3 NAVRHNUTÝ POSTUP RIEŠENIA

1) Rešerš a prípravné práce

- Získanie informácií o produkcii tepelnej energie v ľudskom tele, jeho prenose do okolia, ako aj o tepelnom komforte a jeho vyhodnocovaní
- Získanie informácií o tepelných manekýnoch a ich použití pri testovaní tepelného komfortu
- Zostavenie návrhu experimentu podľa technických možností OTTP FSI VUT Brno
- Zabezpečenie stanoveného odevu pre tepelného manekýna Newtona
- Skonštruovanie a pripojenie meracej techniky v klimakomore

2) Meranie tepelného komfortu

- Meranie tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a jej vyhodnotenie
- Vывodenie záverov z fáze 1 a návrh úprav procedúry a dotazníka tepelného komfortu
- Meranie tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 2
- Vyhodnotenie 2. fázy a návrh úprav pre finálny návrh

3) Zhrnutie výsledkov, definovanie záverov a vytvorenie finálneho návrhu procedúry pre iHVAC

4 METABOLIZMUS A TEPELNÁ REGULÁCIA ČLOVEKA

Zdravé ľudské telo sa snaží udržať vnútornú teplotu v blízkosti 36,5 °C, čo je nutná podmienka k bezproblémovému fungovaniu všetkých základných metabolických procesov v tele. Mierne kolísanie teploty spôsobujú chemické procesy v tele, ktoré uvoľňujú energiu v závislosti na zvýšenej fyzickej či mentálnej aktivite. Rozlišujeme bazálne teplo, ktoré generujú vnútorné orgány bez ohľadu na činnosť, a teplo vznikajúce činnosťou svalov alebo zvýšenou aktivitou vnútorných svalov. Väčšina energie (90 až 100 %) sa transformuje na vnútorné teplo (FOJTLÍN, 2014), (JANOTKOVÁ, 1991). Kvôli udržaniu teploty jadra na stanovenej hodnote je dôležité odvádzať teplo z tela. Ak sa toto množstvo tepla rovná teplu produkovanému, je dosiahnutá tepelná rovnováha. Tento stav charakterizuje rovnica tepelnej rovnováhy:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d [W] \quad (1)$$

Kde:

\dot{Q}	teplo vyprodukované človekom za jednotku času	[W]
\dot{Q}_{ved}	teplo odvedené do okolia vedením	[W]
\dot{Q}_k	teplo odvedené do okolia konvekciou	[W]
\dot{Q}_r	teplo odvedené radiáciou	[W]
\dot{Q}_v	teplo odvedené radiáciou vyparovaním	[W]
\dot{Q}_d	teplo odvedené radiáciou dýchaním	[W]

V praxi sa nepredpokladá kontakt s povrchmi s výrazne odlišnými teplotami, a tak sa člen prenosu tepla vedením často zanedbáva. Nemôžeme ho však zanedbať pri meraní tepelného komfortu v sede alebo ľahu, pretože plocha kontaktu tela s povrchom je dostatočne veľká, a preto nie je teplo odvedené vedením zanedbateľne malé.

Tepelná rovnováha predstavuje prvú podmienku pre dosiahnutie tepelného komfortu. Nemôže byť však dosiahnutá aktívnymi zásahmi termoregulačných mechanizmov v ľudskom tele. Rovnica tepelnej rovnováhy sa dá teda vyjadriť funkčnou závislosťou takto:

$$\dot{Q} = f(R_{cl}, f_{cl}, w, t_a, t_r, \varphi) \quad (2)$$

Kde:

\dot{Q}	tepelný tok vyprodukovaný človekom	[W]
R_{cl}	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
f_{cl}	stupeň pomerného zväčšenia povrchu tela odevom	[-]
w	rýchlosť prúdenia vzduchu	[m.s ⁻¹]
t_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
t_r	stredná radiačná teplota	[°C]
φ	relatívna vlhkosť	[-]

Funkčná závislosť je zároveň označovaná ako rovnica tepelnej pohody, v ktorej sú zahrnuté jednotlivé činitele charakterizujúce nasledovné veličiny:

- činnosť človeka – produkcia tepla človeka \dot{Q}
- vlastnosti odevu, definované tepelným odporom odevu R_{cl} a stupňom pomerného zväčšenia povrchu tela odevom f_{cl}
- tepelný stav mikroklimy - teplota vzduchu t_a , stredná radiačná teplota t_r , rýchlosť prúdenia vzduchu w a relatívna vlhkosť vzduchu φ (PAVELEK, 2003).

Ľudské telo nereaguje na okolie len pasívne, ale má mechanizmy, ktoré mu umožňujú prispôbiť sa okolitému prostrediu. Termomechanizmy fyziológie človeka je teda možné rozdeliť na aktívnu a pasívnu časť, ktoré spolu úzko súvisia. Pasívna zložka zahŕňa fyzikálne vlastnosti ľudského tela, tvorbu a prenos tepla v ľudskom tele a výmenu tepla s okolím. Aktívna zložka charakterizuje nervový systém človeka, ktorý na základe podnetov z termoreceptorov riadi odozvy a tým riadi termoregulačné mechanizmy v tele.

Napriek spomínanej snahe organizmu stabilizovať teplotu pomocou uvedených systémov na úrovni cca 36,5 °C, môžu nastať prípady, kedy telo nie je schopné teplotu úspešne regulovať.

- Prehriatie organizmu (hypertermia) – typicky nastáva pri vysokej fyzickej záťaži alebo pri veľmi vysokej teplote okolia
- Podchladenie organizmu (hypotermia) – pokles teploty jadra pod 35 °C (FOJTLÍN, 2014).

4.1 PASÍVNY SYSTÉM – TEPELNÁ VÝMENA S OKOLÍM

Prenos tepla kondukciou a tepelný odpor odevu

Kondukcia (vedenie) reprezentuje prenos tepla v prostredí, ktorého častice sa v smere tepelného toku nepohybujú. Popísané pravidlo najlepšie vystihujú látky tuhého skupenstva. Daný jav však nastáva aj pri laminárnom prúdení kvapalín, kde je vektor tepelného toku kolmý na vektor rýchlosti (PAVELEK, 2003).

Z pohľadu kinetickej teórie látok ide o pohyb a nárazy molekúl, pri ktorých sa energia odovzdáva z miesta vyššej hladiny energie (teploty) na miesto nižšej hladiny energie. V kovoch (vodiče elektrického prúdu) sa uplatňuje pohyb voľných elektrónov, teda principiálne mechanizmus vedenia elektrického prúdu. Prenos tepla vedením je podmienený existenciou materiálneho prostredia a prítomnosťou teplotného spádu. Jav vedenia tepla popisuje Fourierov zákon. Tento vzťah bol zistený empiricky, v jednorozmernom prípade je popísaný nasledovne

$$\dot{Q}_{ved} = -\lambda * S * \frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Kde:

λ	súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S	plocha prenosu tepla	[m ²]
$\frac{dT}{dx}$	teplotný gradient, os x značí smer šírenia tepla	[K.m ⁻¹]

Vedením tepla z ľudského tela je do okolia odovzdaného len minimum tepla. Tento prenos nastáva len pri kontakte pokožky alebo odevu s povrchom iného telesa. Vo väčšine prípadov je tento prenos tepla zanedbateľne malý. Výnimkou sú povrchy, ktoré majú veľmi vysokú alebo naopak veľmi nízku teplotu. V týchto prípadoch dokážeme znížiť tepelnú vodivosť (takže aj tepelný tok) vhodným odevom alebo poťahom. Tento stav môže ale byť aj žiaduci, napríklad pri použití vykurovaných alebo klimatizovaných sedačiek v automobiloch (POKORNÝ, 2012).

Pre odvod tepelného toku z povrchu tela musí tepelný tok prekonať tepelný odpor odevu a vrstiev vzduchu. Odpor je závislý na počte oblečených vrstiev a ich tepelnej vodivosti. Vzťah tepelného odporu je nasledovný:

$$R = \sum \left(\frac{d_{Tk}}{\lambda_{tk}} \right)_{tk} + \sum \left(\frac{d_{vzd}}{\lambda_{vzd}} \right)_{vzd} \quad (4)$$

Kde:

R	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
d_{Tk}	hrúbka vrstvy odevu	[m]
d_{vzd}	hrúbka vrstvy vzduchu	[m]
λ	tepelná vodivosť odevu – tk, vzduchu – vzd	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]

Rovnica počíta s predpokladom, že medzi pokožkou a jednotlivými vrstvami odevu sa nachádza vzduchová medzera.

V technike prostredia sa pre hodnotenie tepelného odporu odevu používa jednotka clo. 1 clo odpovedá izolačnej hmote s tepelným odporom $R = 0,155 \text{ m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$, čo je hodnota pre bežný pánsky oblek s bavlnenou spodnou bielizňou. Celková hodnota celého odevu je 0,82 násobok súčtu hodnôt jednotlivých častí oblečenia, ktoré bývajú uvedené v literatúre (pohybujú sa v intervale od 0 - nahý človek až 4 - polárny odev) (JANOTKOVÁ, 1991).

$$1 \text{ clo} = \frac{R}{0,155} \quad (5)$$

Kde:

R	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
---	---------------------	--------------------------------------

Prenos tepla konvekciou

Prenos tepla konvekciou je prenos tepla medzi povrchom tuhého skupenstva a okolitým médiom, ktoré obklopuje tento povrch. Prenos vzniká pomocou makroskopických

častic okolitého média, ktoré po styku s povrhom menia svoju teplotu a vytvárajú prúdenie. Týmto prúdením prenášajú teplo do ďalších vrstiev. Nutnou podmienkou je existencia tepelného spádu medzi povrhom a médiom. Konvekcia je popísaná Newtonovým ochladzovacím zákonom (PAVELEK, 2003):

$$\dot{Q}_k = \alpha * S * (t_{st} - t_t) \quad (6)$$

Kde:

\dot{Q}_k	tepelný tok konvekciou	[W]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S	plocha povrhu	[m ²]
t_{st}	teplota povrhu steny daného telesa	[K]
t_t	teplota okolitého média v dostatočnej vzdialenosti od povrhu	[K]

Súčiniteľ prenosu tepla α určíme výpočtom, meraním alebo odhadneme pomocou CFD simulácie. Tento súčiniteľ v sebe „schováva“ viaceré vlastnosti a atribúty prúdiaceho média. Je závislý na druhu prúdenia, viskozite a zmáčavosti média, tvare povrhu telesa atď. (POKORNÝ, 2012).

Prenos tepla radiáciou

Radiácia (žiarenie) predstavuje prenos tepla medzi dvoma telesami prostredníctvom elektromagnetických vln. Každé teleso s teplotou vyššou ako 0 K vyžaruje časť svojej energie. Dopadom týchto vln sa časť energie pohltí a premení na vnútornú energiu – zvýši sa teplota telesa. Proces nie je závislý na prítomnosti teplotného spádu, takže prebieha neustále aj pri telesách s rovnakou teplotou. Vo vzduchu sa časť energie pohlcuje trojatómovými zložkami, ako je ozón, vodná para a iné. Dvoatómové zložky žiarenie nepohlcujú (FOJTLÍN, 2014).

Kirchhoffové zákony:

- Kirchhoffov zákon $a + r + \mu = 1$
- Kirchhoffov zákon pre dlhovlnné žiarenie a stav tepelnej rovnováhy platí $a = \varepsilon$

Množstvo celkového vyžiareného tepla radiáciou za jednotku času udáva Stefan – Bolzmanov zákon:

$$\dot{Q}_{1-2} = F_{1-2} * \varepsilon_1 * \sigma * (T_1 + 273,15)^4 * S_1 \quad (7)$$

Kde:

F_{1-2}	uhlový faktor medzi telesom (1) a (2)	[-]
ε_1	emisivita telesa (1)	[-]
σ	Stefan – Boltzmannova konštanta,	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
S_1	plocha telesa (1)	[m ²]
T_1	teplota povrhu telesa (1)	[K]

Ide o funkčnú závislosť množstva tepelného toku vyžiareného telesom (1) do okolia (2) na jeho povrchovej teplote T_1 , ploche S_1 a emisivite ε_1 , kde $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$. Z okolia (2) však prijme teleso (1) tepelný tok

$$\dot{Q}_{2-1} = F_{2-1} * \varepsilon_2 * \sigma * (T_2 + 273,15)^4 * S_2 \quad (8)$$

Kde:

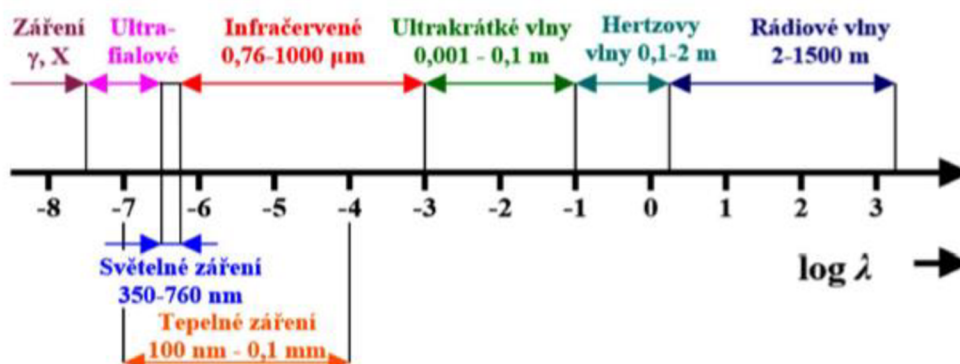
F_{2-1}	uhlový faktor medzi telesom (2) a (1)	[-]
ε_2	emisivita telesa (2)	[-]
σ	Stefan – Boltzmannova konštanta,	$[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$
S_2	plocha telesa (2)	$[\text{m}^2]$
T_2	teplota povrchu telesa (2)	[K]

Výsledné prenesené množstvo tepla za jednotku času sa rovná ich rozdielu. Vo vzorcoch môžeme vidieť vystupovať veličiny F_{1-2} , F_{2-1} ktoré sa nazývajú uhlové faktory. Vyjadrujú vzájomné usporiadanie telies v priestore a je nimi podmienená tepelná výmena žiarenia medzi dvoma povrchmi.

Zovšeobecnením Stefan – Boltzmanovoho zákona je Planckov zákon, ktorý našiel uplatnenie v kvantovej fyzike. Intenzita žiarenia závisí aj na frekvencii, respektíve na vlnovej dĺžke. Množstvo prenesenej energie sa potom vyjadruje po kvantách prislúchajúcich danej frekvencii a zavádzajú sa spektrálne veličiny: emisivita, transmisivita a absorptivita, ktoré popisujú chovanie materiálu voči rôznym spektrám žiarenia (PAVELEK, 2003).

Vlastnosti látok súvisiace s prenosom tepla radiáciou:

- Transmisivita t – schopnosť prepúšťať žiarenie
- Absorbtivita a – schopnosť absorbovať žiarenie
- Reflexivita r – schopnosť odrážať žiarenie
- Emisivita ε – schopnosť vyžarovať žiarenie



Obr. 4.1 Rozdelenie spektra podľa vlnových dĺžok (PAVELEK, 2003)

Ľudská pokožka má obzvlášť vysokú krátkovlnnú absorbtivitu a dlhovlnnú emisivitu, zhruba 0,97 až 1. Z hľadiska zdravia človeka všeobecne platí, že čím kratšia vlnová dĺžka, tým

má žiarenie väčšiu energetickú hodnotu a pri jeho absorpcii pokožkou dochádza k negatívnemu ovplyvneniu buniek a tkaniva. UV-A žiarenie je potrebné pre tvorbu vitamínu D v tele, ale nadmerné vystavovanie tela tomuto žiareniu spôsobuje napríklad starnutie kože. UV-B dlhodobu zhubnú – podporuje vznik rakoviny. UV-C preniká hlbšie do tela, gama žiarenie je smrteľné (napríklad výbuch atómovej bomby). Nebezpečné žiarenie UV-B a UV-C, ktoré prichádza od slnka, je z väčšej časti pohlcované ozónovou vrstvou (TOMA, 2014).

Prenos tepla vyparovaním (potením)

Vyparovanie (evaporácia) patrí medzi fázové premeny a teda ide o zvláštny prípad konvekcie. Pre uskutočnenie vyparovania je potrebné dodať latentné teplo výparné. Toto teplo je odoberané z vlhkého povrchu, čím sa tento povrch ochladzuje. Množstvo odparenej látky závisí na teplote okolitého vzduchu a jeho vlhkosti. Princíp vyparovania je možné definovať princípom difúzie podľa 1. Fickovho zákona takto:

$$\frac{dm}{dt} = - \frac{(p_a - p_a'')}{\lambda_{H_2O} * Re} * \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

Kde:

p_a	parciálny tlak vodných par vo vzduchu	[Pa]
p_a''	parciálny tlak nasýtených vodných par vo vzduchu	[Pa]
λ_{H_2O}	merné skupenské teplo výparné vody	[J.kg ⁻¹]
m	hmotnosť vody na povrchu telesa	[kg]
Re	súčiniteľ tepelného odporu vyparovaním	[m ² .Pa.W ⁻¹]
t	čas	[s]

Množstvo preneseného tepla vyparovaním na jednotku plochy a času je potom dané rovnicou:

$$\dot{q}_{w1} = 3,05 * 10^{-3} * (256 * \bar{t}_s - 3360 - p_a) \quad (10)$$

Kde:

\dot{q}_{w1}	merný tepelný tok suchým vyparovaním	[W.m ⁻²]
p_a	parciálny tlak vodných par v okolitom vzduchu	[Pa]
\bar{t}_s	stredná teplota pokožky	[°C]

V reálnych podmienkach nie je možné doceliť ustálenú hodnotu teploty pokožky, a preto pre výpočty používame hodnotu $\bar{t}_s = 34$ °C (FOJTLÍN, 2014).

Prenos tepla dýchaním

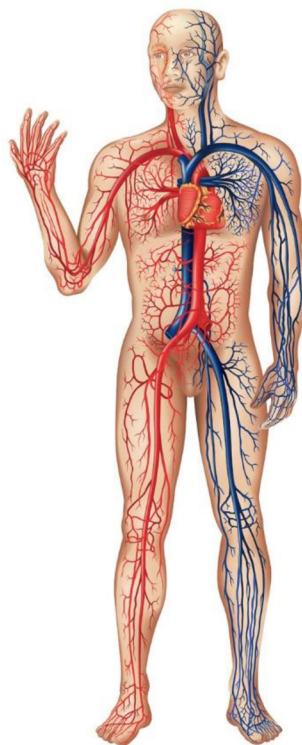
Dýchanie (respirácia) je kombináciou nútenej konvekcie a fázovej premeny vyparovania. Nútená konvekcia nastáva pri nádychu a výdychu vzduchu do a z dýchacieho traktu. Vyparovanie vzniká na slizniciach dýchacích ciest a v pľúcach. Pre určenie prenosu tepla dýchaním sú zatiaľ známe len empirické vzťahy. Veľký vplyv na túto hodnotu má však intenzita dýchania, ktorá je spájaná s vykonávanou aktivitou človeka (POKORNÝ, 2012).

4.2 PASÍVNY SYSTÉM – PRENOS TEPLA VNÚTRI ČLOVEKA

Ľudské telo produkuje metabolické teplo, ktoré vzniká svalovou činnosťou a ako vedľajší produkt pri metabolických premenách. Teplo sa tvorí hlavne v jadre tela – v srdci, pečeni a svaloch. V chladnom prostredí sa zväčšuje rýchlosť metabolických premen a je dopĺňovaná svalovým trasením. Ak je teplota okolia nižšia ako teplota tela, prestupuje teplota skrz tkanivo na povrch tela, kde odchádza do okolia. Tento prestup tkanivom výrazne obmedzujú tukové vrstvy, preto sú ľudia s väčším podielom tuku odolnejší voči chladu (TOMA, 2014), (VOMELA, 2014).

Okrem prestupu tepla vedením musíme brať do úvahy aj prestup tepla prúdením krvi vo veľkých cievach, ktoré sa ďalej rozvetvujú a umožňujú prekrvenie tkaniva aj v blízkosti povrchu. Za normálnych okolností sa krv z končatín vracia do srdca žilami. Žily tvoria v ľudskom tele dva systémy: jeden povrchový, ktorý môžeme vidieť na svojich končatinách a druhý hlboký, ktorý je tvorený väčšími žilami, ktoré vedú popri tepnách. Krv vnútri hlbokých žíl je chladnejšia, ohrieva sa však od teplejších tepien – dochádza k proti prúdovej tepelnej výmene krvi (VOMELA, 2014).

Pri fyzickej záťaži ľudské telo spaľuje energiu a vyrába mechanickú prácu. Ľudský organizmus ma malú mechanickú účinnosť, takže sa veľká časť energie premení na teplo produkované svalovou činnosťou. Pri tejto metabolickej premene je potrebné veľké množstvo kyslíka, ktorý je doručovaný pľúcami. Pri vysokej fyzickej záťaži je nutné zvýšiť dodávku kyslíka, ľudské telo to rieši intenzívnejším dýchaním – zväčšuje sa prenos tepla dýchaním vysvetlený v kapitole 4.1.5.



Obr. 4.2 Rozmiestnenie hlavných ciev v ľudskom tele

4.3 AKTÍVNY SYSTÉM - TERMOREGULÁCIA

Systém termoregulácie u človeka dovoľuje fyziologické prispôsobenie sa tepelnému zaťažovaniu tak, aby bol zaručený prijateľný rozsah teplôt pre správne fungovanie celého tela pri rôznych podmienkach. Teplo je primárne tvorené metabolizmom, ktorý vychádza z trávenia a fyzickej aktivity svalov. V normálnych podmienkach to má za následok priemernú teplotu tela okolo 37 °C. V určitom intervale sa telo snaží udržať na tejto teplote, aj keď vnútorné alebo vonkajšie teplotné zmeny rastú. Toto vyvoláva samovoľné reakcie ako aj zmenu správania. Autonómna regulácia je ovládaná časťou mozgu, ktorá sa nazýva hypotalamus, ktorý kontroluje rôzne možnosti straty tepla (kožou, cez krv, potením a dýchaním). Zmena správania môže vyvolať pohyb tela alebo mieru ošatenia osoby.

Centrum autonómnej časti termoregulácie je uložené v hypotalame. Pracuje podobne ako termostat na kúrení. Hodnota teploty, ktorú chce telo udržať, sa môže meniť v závislosti na rôznej fyziologickej kondícii. Tepelne citlivé receptory – nervové zakončenia, vysielajú signály do centra. V chladnom prostredí môžu receptory znížiť požadovanú teplotu a tepelné straty tela klesnú prostredníctvom zúženia ciev a triaškou. Naopak pri zvýšení požadovanej teploty, tepelné straty vzrastú vďaka rozšíreniu ciev a poteniu. Toto centrum regulácie je prepojené s receptormi v koži, ako aj vo vnútri tela a samotnom mozgu. Tieto receptory sú najviac citlivé na prudké zmeny (TOMA,2014).

5 TEPELNÝ KOMFORT V KABÍNACH VOZIDIEL

5.1 ČO JE TO KOMFORT PROSTREDIA ?

Pohoda prostredia je stav prostredia, ktorý vytvára človeku vhodné podmienky pre prácu a zdravý pobyt.

Čo ovplyvňuje komfort prostredia?

Pohoda vnútorného prostredia (mikroklima) sa hodnotí podľa stavu činiteľov prostredia:

- Čistota vzduchu
- Teplota vzduchu
- Teplota okolitých stien
- Rýchlosť prúdenia vzduchu
- Vlhkosť vzduchu
- Tepelno-izolačné vlastnosti odevu
- Činnosť človeka
- Osvetlenie
- Ionizujúce a neionizujúce elektromagnetické žiarenie
- Počet záporných častíc vo vzduchu
- Psychický stav človeka

Komfort prostredia rozdeľujeme na celkovú alebo čiastočnú – predmetom záujmu je iba niektorý z činiteľov prostredia (tepelná pohoda, toxická pohoda, aerosólová pohoda atď.)

Tepelný komfort (pohoda) prostredia

„Tepelný komfort je stavom mysli vyjadrujúcim spokojnosť s tepelným prostredím“ (ASHRAE 55, 1992). Problematika tepelného komfortu súvisí s tým, ako reaguje ľudské telo a ľudská psychika na zmeny okolitého prostredia. Hlavnou podmienkou tepelného komfortu je, aby energia produkovaná v tele zmenšená o energiu prenášanú formou mechanickej práce bola rovná energii odvedenej formou tepla do okolia vedením, konvekciou, radiáciou, vyparovaním a dýchaním. Tepelný komfort sa vzťahuje na tieto činitele (JANOTKOVÁ, 1991).

- Čistota vzduchu
- Teplota vzduchu
- Teplota okolitých stien
- Rýchlosť prúdenia vzduchu
- Vlhkosť vzduchu
- Tepelno-izolačné vlastnosti odevu
- Činnosť človeka

5.2 MODEL Y TEPELNÉHO KOMFORTU

Ako bolo spomenuté v kapitole 5.1.2, tepelný komfort súvisí s teplotou, ale tá nie je jediným dôležitým ukazovateľom. Už pred 2. svetovou vojnou sa touto problematikou zaoberal Yaglou a následne Bedford. Na začiatku 70. rokov špecifikoval Ole Fanger základné a doplnkové faktory ovplyvňujúce tepelnú pohodu vo vnútornom prostredí budov. Definoval index popisujúci predpokladaný stredný výsledok hodnotenia tepelného pocitu väčšej skupiny ľudí (index PMV) a index vyjadrujúci percentuálny podiel nespokojných (index PPD). V roku 1984 bola jeho metóda hodnotenia tepelného komfortu stanovená ako norma, ktorá bola neskôr prevzatá aj do českých noriem ako ČSN EN ISO 7730 – *Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Iný prístup zvolil Gagge, ktorý využil svoj fyziologický model pre predpovedanie strednej teploty pokožky a množstva vody na pokožke, na ktorých základe je vypočítaný index tepelného pocitu TSENS a index tepelného diskomfortu TDISC (POKORNÝ, 2012). V roku 2003 definoval Fiala index dynamického tepelného pocitu DTS ako ekvivalent k indexu PMV, ktorý je použiteľný aj pre časovo premenné podmienky. Index reprezentuje celkový tepelný pocit, ktorý závisí na strednej teplote pokožky, jej časovej zmene a teplote jadra ľudského tela. V tabuľke 5.1 je uvedený prehľad modelov tepelného komfortu (POKORNÝ, 2012).

Tab. 5.1 Prehľad modelov pre predpoklad tepelného komfortu (POKORNÝ, 2011)

Rok	Autor	Popis modelu
1936	Bedford	Merítka tepelného pocitu, empirický model
1970	Fanger	PMV-PPD model v ISO 7730 od roku 1984
1971	Givoni	Empirický model tepelnej pohody
1986	Gagge	Index tepelnej pohody TSENS, DISC
1989	Wyon	Model ekvivalentnej teploty
1992	Hagino	Empirický model tepelnej pohody v aute (pre Nissan)
1992	Taniguchi	Vplyv chladného vzduchu na pocit na tvári (pre Toyotu)
1992	Ingersoll	3-segmentový Gagge model, spojený s indexom PMV
1993	Gan	Stacionárny model PMV-PPD, využité CFD modelovanie
1994	Wang	Dynamický model tepelnej pohody
1997	Maue	8-segmentový model tepelnej pohody
1997	Brown	Empirický model tepelnej pohody v aute (pre Ford)
2003	Fiala	Index DTS – dynamický tepelný pocit
2003	Guan	Dynamický viac segmentový Gaggeov model
2003	Zhang	Berkeley model tepelnej pohody
2004	Nilsson	Model komfortných zón (v ISO 14505)
2008	Streblow	Prepojenie modelu Tanabe a Zhang (pre Airbus)
2010	Zhang	Nová verzia Berkeley modelu tepelnej pohody

Spoločným znakom je štatistické spracovanie dát z dotazníkov, kde testované osoby vyplňajú pocit, ako vnímajú tepelné prostredie. Modely sa líšia vyhodnocovaním – rôzny počet ľudí, rôzne indexy, inak položené otázky a pod. Z hľadiska mojej diplomovej práce je najdôležitejší Nilssonov model tepelného komfortu.

5.3 NILSSONOV MODEL TEPELNÉHO KOMFORTU

Tento model bol vypracovaný H.O. Nilssonom v roku 2004. Je založený na určení ekvivalentných teplôt jednotlivých častí tela a vyhodnotením tepelného komfortu a pocitu pomocou diagramu komfortných zón. Metóda bola priamo vyvinutá pre kabíny dopravných prostriedkov, a tým pádom zohľadňuje špecifické vlastnosti tohto prostredia (nehomogénnosť teplotných polí, vysoké rýchlosti prúdenia vzduchu, vplyv solárneho žiarenia a iné). V roku 2006 bol Nilssonov model štandardizovaný a na jeho základe vznikla norma ISO 14505, ktorá bola prebratá ako norma *ISO ČSN EN 14505 – Ergonomie tepelného pocitu – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech*.

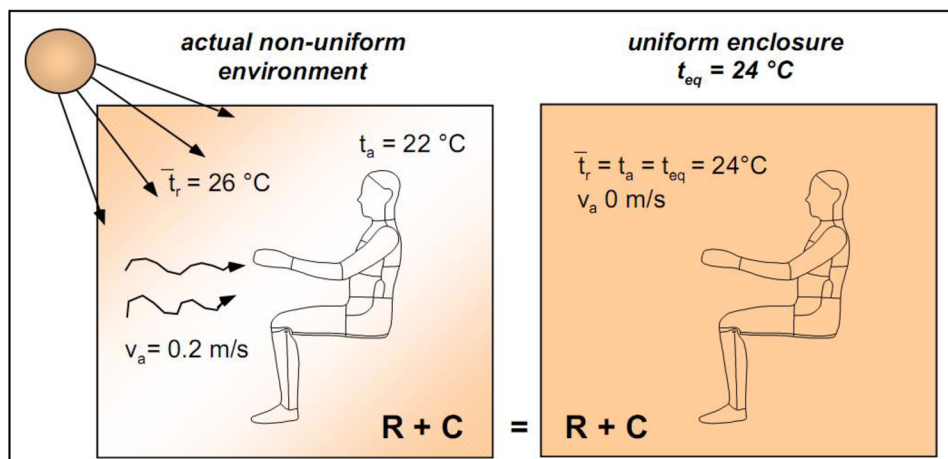
Princíp ekvivalentnej teploty umožňuje popísať asymetrické pôsobenie vplyvov okolia na človeka a zároveň vyhodnotiť jeho vnímanie a spokojnosť s prostredím. Spokojnosť s prostredím (tepelný komfort) je vyhodnotená pomocou ekvivalentných teplôt na 18 častiach tela a následne prepočítaná na celé telo váženým priemerom, kde váhami sú veľkosti plôch jednotlivých častí alebo iné (citlivosť časti na chlad). Vďaka ekvivalentnej teplote je možné porovnávať viaceré prostredia s nehomogénnymi podmienkami.

Ekvivalentná teplota je definovaná ako teplota imaginárneho uzavretého priestoru, kde je stredná radiačná teplota rovná teplote vzduchu a vzduch je pokojný a v ktorom má ľudské telo rovnakú tepelnú výmenu radiáciou a konvekciou ako v reálnom prostredí (NILSSON, 2004). Ekvivalentná teplota je vypočítaná pomocou nasledujúceho vzťahu:

$$T_{eq} = T_{sk} - R_{ct} * \dot{q} = T_{eq} = T_{sk} - \frac{\dot{q}}{h_{ct}} \quad (11)$$

Kde:

T_{eq}	ekvivalentná teplota segmentu	[K]
T_{sk}	povrchová teplota segmentu	[K]
R_{ct}	tepelný odpor odevu a medznej vzduchovej vrstvy na segmente	[m ² .K.W ⁻¹]
h_{ct}	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
\dot{q}	tepelný tok zo segmentu	[W.m ⁻²]

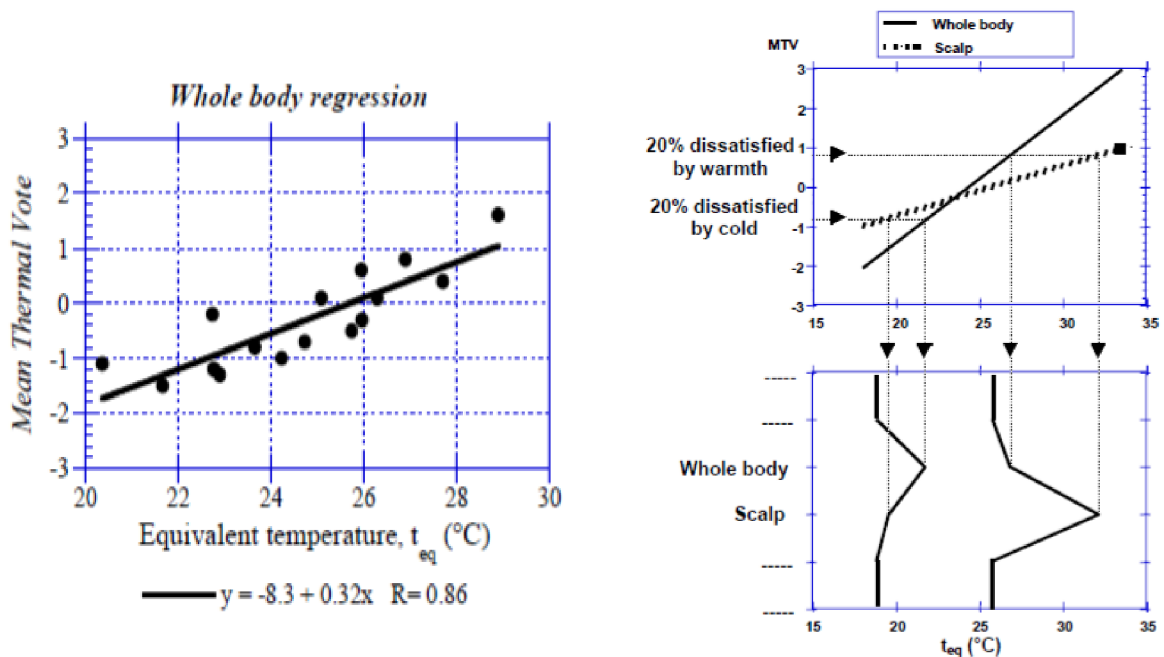


Obr. 5.1 Základný princíp ekvivalentnej teploty (NILSSON, 2004)

Na obrázku 5.1. môžeme vidieť podstatu princípu ekvivalentnej teploty. V ľavej časti je zobrazené nehomogénne prostredia so strednou radiálnou teplotou 26 °C, rýchlosťou prúdenia vzduchu 0,2 m.s⁻¹ a teplotou vzduchu 22 °C. V tomto prostredí sa nachádza tepelný manekýn so špecifickým odevom a metabolickou produkciou tepla. Manekýn s rovnakými parametrami sa nachádza aj na obrázku vpravo, kde je prostredie prevedené na homogénne pomocou ekvivalentnej teploty rovnej 24 °C. Táto teplota je určená na základe rovnosti tepelných tokov u manekýna v oboch prostrediach.

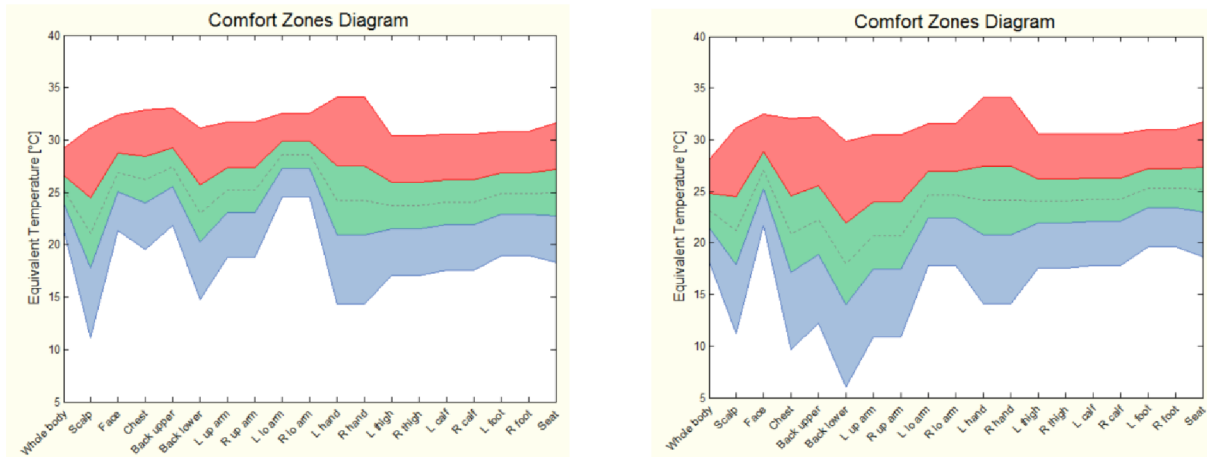
Diagram komfortných zón

Každý časti tela pripadá päť komfortných zón, ktoré sú definované diagramom komfortných zón (DKZ). DKZ sú definované na základe subjektívneho hodnotenia od testovacích osôb, a to pre jednu aktivitu a odev v ustálenom prostredí. Diagramy vznikli na základe prepojenia výsledkov od testovacích osôb (hodnotili prostredie pomocou indexu MTV, ktorý je vysvetlený v kapitole 5.5) a meraní z tepelného manekýna. Nilsson na základe analýzy meraní určil závislosť medzi MTV a T_{eq} (Obrázok 5.2).



Obr. 5.2 Tvorba diagramu komfortných zón podľa Nilssona– určenie širok jednotlivých pásiem diagramu

DKZ udáva doporučené hodnoty T_{eq} pre jednotlivé časti ľudského tela. Neutrálna zóna je stanovená v intervale MTV od -0,5 do +0,5, čo odpovedá spokojnosti 80 % respondentov. Hranica -1,5 bola stanovená pre zónu chladno ale príjemne a +1,5 pre zónu teplo ale príjemne. Ak je index MTV pri danej ekvivalentnej teplote vyšší ako 1,5 alebo menší ako -1,5, tak je prostredie moc teplé respektíve chladné (NILSSON,2004), (POKORNÝ, 2012).



Obr. 5.3 Porovnanie zmeny tvaru DKZ so zmenou odevu – letný odev (vľavo) a zimný odev (vpravo)

5.4 VYHODNOCOVANIE TEPELNÉHO KOMFORTU

Experimenty majú nezastupiteľnú úlohu pri tvorbe modelu tepelného komfortu. Z hľadiska zamerania môžeme vyhodnotenie tepelného komfortu v danom prostredí rozdeliť na merania:

- Parametrov okolitého prostredia
- Osobných činiteľov
- Fyziologického stavu človeka a jeho reakcie na prostredie
- Dotazovanie testovaných osôb

Meranie parametrov okolitého prostredia

O spôsoboch vyhodnocovania parametrov okolitého prostredia (teplota, vlhkosť, rýchlosť prúdenia a iné) pojednáva norma ČSN EN ISO 7726 *Ergonomie tepelného prostredia – Prístroje pro měření fyzikálních veličin*. Norma sa zaoberá metódami merania fyzikálnych veličín, ktoré charakterizujú pôsobenie okolia na človeka. Rôznymi meracími metódami a prístrojmi sa merajú veličiny uvedené v kapitole 5.1, s ktoré sa následne vyhodnocujú a usudzuje sa z nich charakter okolitého prostredia. Podrobnejšie informácie o jednotlivých meracích zariadeniach môžeme nájsť v skriptách (PAVELEK a ŠTETINA, 2007).

Meranie osobných činiteľov

Okrem vonkajších parametrov sú významné aj osobné činitele – intenzita vykonávanej činnosti (hodnota metabolizmu) a tepelný odpor oblečenia. Hodnota metabolizmu M [W/m^2] je definovaná normou ASHRAE na základe merania objemového množstva spotrebovaného O_2 a vzniknutého CO_2 . Hodnota je definovaná rovnicou

$$M = 352 \cdot \left(0,23 \cdot \frac{\dot{V}_{CO_2}}{\dot{V}_{O_2}} + 0,77 \right) \cdot \dot{V}_{O_2} / A_{Du} \quad (12)$$

Kde:

ADU	plocha ľudského tela podľa Duboisa	[m ²]
M	hodnota metabolizmu	[W.m ⁻²]
\dot{V}_{CO_2}	objemové množstvo vyprodukovaného CO ₂	[l.min ⁻¹]
\dot{V}_{O_2}	objemové množstvo spotrebovaného O ₂	[l.min ⁻¹]

Tepelný odpor odevov je podstatným faktorom ovplyvňujúci vnímanie okolitého prostredia. Spomínaný odpor odevov sa väčšinou meria pomocou tepelných dosiek (hot plates) alebo pomocou tepelných manekýnov. Tepelní manekýni sú vhodnejším meracím prístrojom, pretože zohľadňujú geometriu ľudského tela a lepšie dokážu zachytiť izolačné vlastnosti vzduchu medzi odevom a ľudskou pokožkou. Tepelní manekýni sú predovšetkým určení na meranie vlastností odevov, využívajú sa však aj pri meraní tepelného komfortu v nehomogénnych podmienkach, ako sú kabíny dopravných prostriedkov a iné.

Tepelný manekýn je vyhrievaná figurína, ktorá je schopná udržiavať konštantnú hodnotu povrchovej teploty a tým zistiť tepelné toky, alebo môžeme nastaviť konštantný tepelný tok a pozorovať zmenu teploty povrchu manekýna. Pri svojich meraniach budem používať manekýna Newton-a od firmy Measurement technology Northwest, o ktorom sa dozviete viac v kapitole 6.3 (TOMA, 2014).

Meranie fyziologického stavu človeka

Tepelný komfort súvisí s tepelným stavom človeka, ktorý je výsledkom tepelnej záťaže človeka. Základom pre popísanie tepelného stavu človeka je jeho povrchová teplota a s ňou súvisiaci tepelný tok do okolia. Povrchovú teplotu môžeme napríklad merať pomocou termočlánkov, ktoré priložíme na určité miesto na tele. Nevýhodou je, že pri určovaní celkového tepelného stavu človeka je nutné špecifikovať miesta merania. Druhý spôsob merania povrchovej teploty je pomocou termokamery. Tento spôsob je menej presný, ale poskytuje nám celkový pohľad na celú postavu človeka.

Vnútna teplota je dôležitá s ohľadom na životné funkcie ako aj funkciu hypotalamu, ktorý riadi termoregulačné mechanizmy. Podobne, ako pri meraní povrchovej teploty, závisí na mieste merania (teplota v ústach, v uchu, pod pazuchou či v tráviacom trakte).

Medzi ďalšie sledované parametre patrí krvný tlak, prietok cievami, hodnota metabolizmu a iné.

Dotazovanie sa testovaných osôb

Jedná sa o priamu metódu vyhodnotenia tepelného komfortu v danom prostredí. Aj keď matematické a fyzikálne modely a tepelné ukazovatele môžu poskytnúť opakovateľné aj spoľahlivé metódy posudzovania, prostredie v kabinách vozidiel sú často komplikované, dynamické a ovplyvnené mnohými faktormi. Pre vytvorenie priamych metód merania tepelného komfortu a k potvrdeniu ďalších spôsobov je potrebné subjektívne posudzovanie ľuďmi. Je dôležité vytvoriť testovacie postupy, ktoré zahŕňajú testovacie osoby, musia však

byť uplatnené etický kódex podľa ustanovenia ISO 12894. Sú používané zo štyroch hlavných dôvodov:

- Hodnotenie tepelného komfortu vo vozidlách
- Stanovenie alebo prevedenie štandardizovaných skúšobných metód tepelného komfortu vo vozidlách
- Porovnanie miery tepelného komfortu vo vozidlách s predpovedajúcimi metódami (modelmi) založenými na meraní prostredia vo vozidlách
- Určenie vzťahu medzi objektívnymi ukazovateľmi, ako napríklad teplota kože, so subjektívnymi hodnoteniami tepelného komfortu

Každý model tepelného komfortu je založený zo štatisticky spracovaných dotazníkov od určitej skupiny testovaných osôb. Je dôležité, aby bola testovaná skupina rovnomerne rozložená čo sa týka veku, pohlavia, výšky, váhy, zdravotného stavu a pod. Zásadné je formulovať otázky tak, aby boli jednoznačné a odpovede zodpovedali vyhodnocovaným veličinám a hodnotám príslušných subjektívnych stupníc (ČSN – EN 14505, 2007).

Objektívne metódy

Objektívne metódy určujú kvantitatívne fyzický alebo mentálny stav osoby pomocou nástrojov alebo hodnôt výstupu ukazovateľov výkonu. Princíp metódy spočíva v tom, že ukazovateľ môže byť interpretovaný v rámci podmienok, ktoré sú pre človeka predmetom záujmu (napríklad tepelný komfort). Príkladom môže byť meranie strednej teploty kože, ktorá kolíše ako termoregulačná odozva na horko a chlad. Ďalším príkladom môže byť vlhkosť kože. Nevýhodou objektívnych metód je to, že môžu zasahovať do toho, čo merajú – spojitost medzi nameranou hodnotou a tepelným komfortom nie je dokonalá. Výhoda týchto metód je, že sú často nezávislé a tým pádom ich môžeme použiť v spojení s ďalšími metódami (ČSN – EN 14505, 2007).

Behaviorálne metódy

Kvantitatívne určujú alebo popisujú jednanie človeka ako odozvu na prostredie. Pozorované jednanie človeka z určitého hľadiska súvisí s podmienkami, ktoré sú v jeho záujme (napríklad tepelný komfort vo vozidle) a vyžadujú odpovedajúci spôsob interpretácie. Príklady by zahrňovali zmenu polohy osoby, zmena chovania ale aj preferencie určitých miest na sedenie a pod. Výhody týchto metód sú v minimálnom zásahu do výsledkov merania a priamom „aktívnom“ posúdení diskomfortu. Nevýhody sú v stanovení validity a spoľahlivosti metódy a priamej interpretácie výsledkov v rámci určovania tepelného komfortu (ČSN – EN 14505, 2007).

Subjektívne metódy

Subjektívne metódy kvantifikujú odozvy ľudí na prostredie pomocou subjektívnych stupníc. Tieto stupnice sú založené na schopnosti pokračovať alebo tvoriť v sledovanom psychologickom jave. K posudzovaniu tepelného komfortu sa často používajú stupnice tepelného pocitu, preferencie, komfortu a pocitu vlhka. Výhody subjektívnych metód spočívajú v jednoduchosti a priamom súvisi so sledovaným javom. Nedostatky sú v tom, že môžu zasahovať do toho, čo sa pokúšajú zmerať – niektoré skupiny osôb nemusia byť schopné vykonať túto subjektívnu úlohu (napríklad deti) (ČSN – EN 14505, 2007).

5.5 STUPNICE TEPELNÉHO KOMFORTU

Stupnice tepelného komfortu sú veľmi subjektívne, čo má za následok ich relatívne ľahké použitie ako aj skutočnosť, že ich môžeme použiť, aj keď nie všetky faktory prispievajúce k odpovediam, sú známe. Tieto stupnice majú samozrejme aj svoje nevýhody. Presné formulácie týchto stupníc môžu byť ťažko simulovateľné. Rôzni ľudia majú rozdielne preferencie a to znamená, že takýto typ metód vyžaduje použitie reprezentatívnej skupiny v danom skúmanom prostredí, čo môže byť finančne a časovo náročné.

Poznáme päť typov stupníc, sú to:

- Stupnice zamerané na percepciu (Čo cítite práve teraz?)
- Stupnice zamerané na emócie (Ako sa cítite?)
- Stupnice zamerané na preferenciu (Akému prostrediu by ste dali prednosť?)
- Stupnice zamerané na prijateľnosť (Prijateľné/neprijateľné prostredie?)
- Stupnice zamerané na znášanlivosť (Je prostredie znesiteľné?)

Z týchto stupníc môžu byť vypracované dotazníky so subjektívnymi stupnicami. Pre tepelný komfort sa používajú prvé štyri z uvedených stupníc (ČSN – EN 14505, 2007).

Stupnice zamerané na percepciu (Čo cítite práve teraz?)

ASHRAE stupnica

V štúdiách, ktoré uskutočnil v roku 1971 Rohles na 1600 študentoch, sa skúmal vzťah medzi stupňom komfortu, teplotou, vlhkosťou, pohlavím a časom stráveným na danom mieste. Stupnica, ktorá vznikla z tohto výskumu, sa nazýva ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineers):

Hodnota	Anglický názov	Slovenský názov
+3	Hot	Horúco
+2	Warm	Teplo
+1	Slightly warm	Mierne teplo
0	Neutral	Neutrálne
-1	Slightly cool	Mierne chladno
-2	Cool	Chladno
-3	Cold	Zima

Na rozdiel od Bedforda sa stupnica pohybuje od +3 do -3 a nie od 1 do 7. Táto zmena bola uskutočnená preto, aby sa stupnica ľahšie pamätala, keďže je symetrická podľa nuly a kladné hodnoty sa viažu s teplou stranou, naopak záporné sa viažu k strane chladnej.

Stupnice zamerané na emócie (Ako sa cítite?)Bedfordova stupnica

Bedford v roku 1936 skúmal komfort pracovníkov ľahkého priemyslu. Veľký počet pracovníkov dostalo otázky ohľadom tepelného komfortu na pracovisku a zároveň boli prevedené samotné klimatické merania. Výskum bol vykonávaný na rôznych miestach behom zimy, keď bolo vykurovanie v prevádzke. Odpovede pracovníkov boli definované na sedem stupňovej stupnici:

Hodnota	Anglický názov	Slovenský názov
1	Much too warm	Príliš teplo
2	Too warm	Neprijemne teplo
3	Comfortably warm	Prijemne teplo
4	Comfortable	Prijemne
5	Comfortably cool	Prijemne chladno
6	Too cool	Neprijemne chladno
7	Much too cool	Príliš chladno

MTV stupnica

V sérii experimentov boli určené tepelné toky z tepelných manekýnov pre 30 rôznych klimatických podmienok a boli porovnané s odpoveďami dvadsiatich dobrovoľníkov vystavených rovnakým podmienkam. Hlasy jednotlivcov boli spriemerované pre každé podmienky a nazvali ich Mean Thermal Vote (stredný tepelný pocit MTV). MTV a Teq boli podrobené lineárnej analýze pre všetky podmienky. Bola zistená vysoká korelácia medzi segmentom tepelného toku a MTV pre rovnakú časť tela. Táto operácia bola prevedená pre všetkých 16 skúmaných častí (TOMA,2014):

Hodnota	Anglický názov	Slovenský názov
+3	Much too hot	Príliš horko
+2	Too hot	Neprijemne teplo
+1	Hot but comfortable	Teplo ale příjemne
0	Neutral	Neutrálne
-1	Cold but comfortable	Chladno ale příjemne
-2	Too cold	Neprijemne zima
-3	Much too cold	Príliš chladno

Tieto dve stupnice v sebe zahŕňajú vyjadrenie tepelného pocitu (stupnica zameraná na percepciu) – teplo, chladno, ako aj vyjadrenie tepelného komfortu (stupnica podľa emócie) – príjemne, neprijemne.

Ako výsledok ťažkostí s prekladom týchto stupníc bolo hlavným cieľom ukázať, že -1,0 a +1 sú akceptovateľné (príjemné) hodnotenia, zatiaľ čo -2 a +2 sú už neakceptovateľné (neprijemné) (TOMA,2014).

Stupnice zamerané na emócie (Ako sa cítite?)

<i>Hodnota</i>	<i>Anglický názov</i>	<i>Slovenský názov</i>
+3	Very discomfortable	Veľmi nekomfortne
+2	Discomfortable	Nekomfortne
+1	Little discomfortable	Mierne nekomfortne
0	No discomfort	Žiadny nekomfort

Stupnice zamerané na preferenciu (Akému prostrediu by ste dali prednosť?)

Stupnice preferencií sú pri posudzovaní k tomu, aby poskytli „hodnotu“ mienky testovanej osoby. Ak napríklad osoba zvolí pocit „mierne teplo“ neznamená to pranie „mierne ohrejte“. Preferenčné hodnotenie porovnáva čo osoba cíti, s tým, čo by chcela cítiť. (ČSN – EN 14505, 2007)

<i>Hodnota</i>	<i>Anglický názov</i>	<i>Slovenský názov</i>
+3	Very hot	Veľmi teplo
+2	Too hot	Teplo
+1	Little too hot	Mierne teplo
0	No change	Žiadna zmena
-1	Little too cold	Mierne chladno
-2	Too cold	Chladno
-3	Very cold	Veľmi chladno

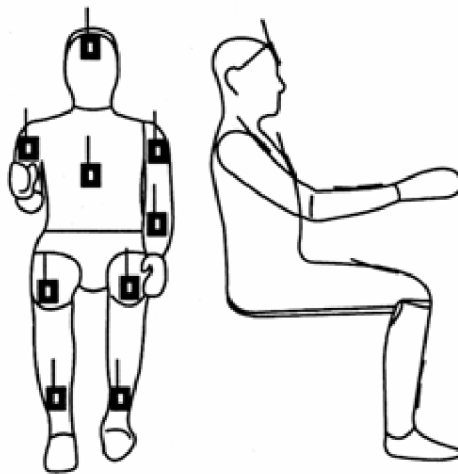
6 MERANIE TEPELNÉHO KOMFORTU

Meranie tepelného komfortu je možné uskutočniť viacerými metódami, avšak namerané hodnoty získané úplne odlišnými metódami nie sú medzi sebou porovnateľné. Najčastejšie používané metódy sú pomocou tepelného manekýna alebo pomocou samostatných plošných vyhrievaných senzorov.

6.1 SAMOSTATNÉ SENZORY S INTEGROVANÝM ZAHRIEVANÍM

Plošné zahrievané čidlá

Pre stanovenie smerovej T_{eq} sa môžu použiť ploché zahrievané sensorové prvky rôznych tvarov. Prvý typ senzoru je zhotovený zo samostatného zahriateho prvku. Skladá sa z malého plochého platinového povrchu, ktorý je elektricky vyhrievaný s rôzne nastaviteľnými hodnotami podľa úrovne činnosti osoby. Aby sa zabránilo neúmyselným prietokom tepla, je nainštalovaných osem odporových vyhrievačov a deväť spätných čítačiek hodnôt. Zmeraná hodnota je výsledná povrchová teplota, ktorá sa môže vypočítať zo zmeraného elektrického odporu a kalibračnej krivky. T_{eq} môžeme vypočítať z povrchovej teploty pomocou lineár a funkcií. Niekoľko senzorov môže byť spojených s povrchom figuríny, alebo môžu byť upevnené v oblečení na figuríne alebo reálnej osobe podľa obrázku.

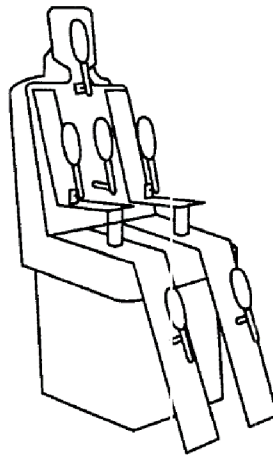


Obr. 6.1 Umiestnenie plošných senzorov na figuríne (ČSN EN 14505 – 2, 2007)

Druhý typ senzoru je založený na dvoch prvkoch s povlakom (filmom) zahrievaných pomocou Joulovho efektu v dvoch výkonových stupňoch. Sensory sú malé a majú plochý povrch, čo naznačuje že merajú smerovú T_{eq} . Tú vypočítame s použitím lineárneho modelu. Oboma týmito druhmi senzorov sa dá stanoviť celková ale aj miestna ekvivalentná teplota (ČSN EN 14505 – 2, 2007).

Samostatné zahrievané guľovité čidlá

Čidlo tvorí elipsoid veľkosti 200 mm x 50 mm. Čidlo sa zohrieva a teplota sa reguluje samostatným zariadením. Veľkosť a tvar snímača bol vybraný tak, aby percento tepelnej straty radiáciou a konvekciou odpovedalo ľudskému telu. Zmenu medzi zvislou a vodorovnou polohou môže čidlo simulovať rôzne polohy človeka v rôznych situáciách (napríklad pre sediaceho človeka sa nasmeruje 30° od vertikály). Čidlo sa skladá len z jednej zóny, takže nemôže rozlišovať rôzne podmienky v rôznych smeroch. Toto čidlo však nie je navrhnuté tak, aby meralo kontakt so sedadlom. Namerané hodnoty sa použijú na výpočet všesmerovej T_{eq} . Niekoľko takýchto senzorov sa môže nasadiť na konštrukciu v tvare sediacej mužskej postavy. Týmto spôsobom môžeme stanoviť T_{eq} miestnu aj celkovú (ČSN EN 14505 – 2, 2007).



Obr. 6.2 Umiestnenie elipsoidných senzorov na konštrukcií v tvare sediaceho ľudského tela (ČSN EN 14505 – 2, 2007)

6.2 TEPELNÝ MANEKÝN A JEHO VYUŽITIE PRI MERANÍ TEPELNÉHO KOMFORTU

Tepelný manekýn sa používa k hodnoteniu tepelného komfortu osôb vo vnútornom aj vonkajšom prostredí a hodnotenie tepelno-izolačných vlastností oblečenia a vybavenia pre športové a pracovné aktivity.

Meranie tepelného komfortu– v kabínach dopravných prostriedkov a vnútorných priestoroch budov je nutné precízne riadenie parametrov prostredia. Cieľom merania je odhaliť miesta, kde by mohlo dochádzať k obťažovaniu prievanom a k tepelnému diskomfortu.

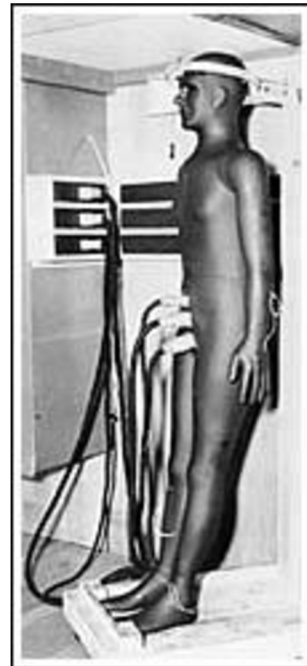
Hodnotenie tepelno-izolačných vlastností– je nutné pre overenie izolačných schopností odevov a vybavenia pre športové a pracovné aktivity. Hodnoty získané meraním môžeme použiť pri optimalizácii a CFD modelovaní vetracích a klimatizačných systémov v kabínach dopravných prostriedkov a vo vnútorných priestoroch budov.

6.2.1 HISTÓRIA TEPELNÝCH MANEKÝNOV

Začiatky vývoja tepelných manekýnov

Prvého tepelného manekýna skonštruoval v roku 1941 Dr. Harwood Belding, ktorý pracoval ako civilný pracovník pre americkú armádu na Harvarde. Pre armádu testoval ochranné odevy a testoval ich na pokusných osobách. Beldinga inšpirovali figuríny vo výkladoch obchodov s oblečením. Zostrojil manekýna bez hlavy a rúk z rôznych kovov, ktorý mal jednoduché vnútorné vyhrievanie a ventilátor na rozvod tepla po celom tele.

V roku 1942, Belding spolupracoval s inžiniermi z General Electric Co. na vývoji tepelného manekýna vyrobeného z medi o hrúbke 3 až 6 mm. Tento manekýn mal jednoduchý elektrický okruh, ktorý konštantne vyhrieval povrch tela manekýna s možnosťou nastavenia vyššej teploty na rukách a nohách. Tento typ manekýna kompletne prerobený v roku 1995 (lepšia regulácia teploty povrchu) je stále používaný na vývoj ochranných odevov americkou armádou (U.S. Army Research Institute).



Obr. 6.3 Manekýn vyrobený Dr. Beldigom

Tepelný manekýn počas 2. svetovej vojny

Tesne pred koncom 2. svetovou vojnou sa Dr. Belding a iní pracovníci z Harvardu presunuli a pracovali pre veliteľstvo americkej armády v Messachusetts, kde pracovali na zlepšovaní ochranných pomôcok pre vojenské zložky.

V septembri roku 1945 bol General Electric Co. požiadaný o skonštruovanie novej generácie tepelného manekýna pre Army Research Laboratory. Vychádzali z predchádzajúcej verzie a zo štúdie, ktorej sa zúčastnilo viac ako 3000 kadetov armády. Figurína obsahovala 6 nezávislých elektrických okruhov a bola vytvorená podľa tela mladého vojaka. Počas rokov 1940 – 1947 testovali oblečenie americkej armády a vďaka informáciám z bojísk dokázali navrhnúť viacero dobrých vylepšení.

Tepelný manekýn počas 50-tých rokov

Vedci sa začali zaoberať výskumom odevných látok, pri ktorom už bežne používali tepelných manekýnov na meranie odporu materiálov a prenosu tepla. Testovala sa široká škála vojenského oblečenia, spacie vaky, obuv a mnoho iného. Počas tohto obdobia bolo zistené, že zakrivenie ľudského tela tvorí komplexnú mikroklimu medzi odevom a povrchom kože osoby.

Tepelný manekýn počas 60-tých rokov

V roku 1961 sa väčšina práce s tepelnými manekýnmi sústreďuje do ústavu environmentálnej medicíny americkej armády – USARIEM. V roku 1962 bol zavedený index priepustnosti vlhkosti (im) ako výsledok testovania prenosu a odvodu vodnej pary a jej dopad na výkonnosť vojaka. Tento parameter charakterizuje priepustnosť materiálov s odvodom vodnej pary.

Woodcock používal vyhrievaný valec k vyhodnoteniu priepustnosti holého povrchu valca a rôznych ochranných odevov. Goldman a Breckenridge sa zaujímali o využitie tohto koeficientu v praxi. Pomocou priliehajúcej bavlnenej koži, ktorá bola nasiaknutá vodou, dokázali simulovať mokré potenie človeka. Mohlo sa začať merať maximálne dovolené odparovanie tepla daných ochranných kompletov, čo malo za následok značné zvýšenie priedušnosti chemických a biologických odevov.



Obr. 6.4 Vylepšená tepelná figurína zo 60-tých rokov

Tepelný manekýn v 70-tých rokoch

Porovnanie merania pomocou tepelných manekýnov a dobrovoľníkov ukázalo, že pohyb vzduchu u priliehavého viacvrstevného odevu môže mať značný účinok na odparovací a chladiaci potenciál ochranného kompletu. Givoni a Goldman zaviedli koeficient (ρ'), ktorý popisuje účinky prúdenia na vodeodolnosť a tepelnú odolnosť oblečenia. Givoni a Goldman použili poznatky k vývoju rovníc, ktoré predpovedali rektálnu teplotu počas používania vojenského odevu v rozsahu chladného až veľmi teplého prostredia. Tieto rovnice ďalej postupne modifikovali k predpovedi srdečnej frekvencie pri použití ochranného obleku a pri práci v stresujúcich podmienkach. V 70-tých rokoch slúžili tieto rovnice k vytvoreniu predpovedných modelov úrovne dehydratácie.

Tepelný manekýn od 80-tých rokov po súčasnosť

Začiatkom 80-tých rokov začala americká armáda kompletne meniť odev pre letectvo, vzdušné sily a vozidlá. Na základe rozširujúcej sa základni armáda prijala viacero komerčných materiálov (Gore-Tex, Thinsulate, Primaloft a iné), ktoré sa začali používať pre nové oblečenie, obuv, spacie vaky a rukavice.

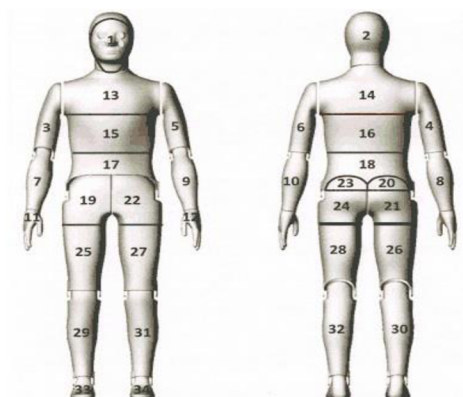
V roku 1984, USARIE vyvinula manekýna, ktorý mal 19 samostatných tepelných zón, ktorý bol schopný simulovať telesné pohyby ako beh alebo chôdzu. Tepelné figuríny sa v dnešnej dobe používajú prevažne v klimakomorách, kde môžeme presne nastaviť potrebné parametre okolitého prostredia (UNDRUSICK, 2012).



Obr. 6.5 Tepelný manekýn USARIE z roku 1984

6.2.2 MANEKÝN NEWTON

Pri meraní budeme používať manekýna Newton-a od americkej firmy Northwest, ktorý je k dispozícii na OTTP spolu so softwarom ThermDAC8 na vyhodnocovanie dát. Tepelný manekýn sa skladá z 34 častí (obrázok 6.6), ktoré sú nezávisle vyhrievané a reprezentujú jednotlivé časti ľudského tela. Telo manekýna je vybavené kĺbmi pre lepšiu manipuláciu a simuláciu rôznych polôh. Manekýn dokáže fungovať vo viacerých režimoch, ktoré môžeme vidieť nižšie v tabuľke. Telo manekýna je zhotovené z uhlíkového kompozitu, s medeným vnútrom. V každej časti je pod povrchom uložený systém vyhrievania na odporovom princípe, ktorý dokáže zároveň monitorovať teplotu (FIŠER,2013), (FOJTLÍN, 2014).



Obr. 6.6 Rozdelenie manekýna Newton-a do meracích zón

Technické parametre manekýna Newton-a

Pracovné rozsahy:	okolitá teplota -20 až +50 °C relatívna vlhkosť 0 až 100 % tepelný výkon až 700 W.m ⁻² frekvencia dychu 5 až 20 min ⁻¹
Veľkosť manekýn	konfekčná veľkosť M výška 178,5 cm
Presnosť merania	±0,1 °C pri nastavení povrchovej teploty a meraní teploty zóny
Režimy manekýna	konštantná povrchová teplota na každej zóne konštantný tepelný tok (strata manekýna) regulácia podľa rovnice tepelného komfortu
Príslušenstvo	Power Enclosure – zdroj a komunikácia s PC J-Box – rozhranie pre snímače kompletná kabeláž manekýna 2x odporové čidlo teploty vzduchu PT 100 1x čidlo relatívnej vlhkosti 1x anemometer (žhavená guľička) -Value Tester 8475 software ThermDAC8 respiračný systém
Nadstavbové systémy	systém umelého potenia – 0 – 1000 ml/h potu stand pre simuláciu chôdze (NORTHWEST, 2010)

Pri práci na tejto diplomovej práci sa nadstavbové systémy nebudú využívať. Pre potreby tejto diplomovej práce sme používali manekýna prevažne v sediacej polohe a zapnutého na režim vyhrievania jednotlivých častí na konštantnú povrchovú teplotu. V tomto režime sme sledovali povrchové teploty a tepelné toky potrebné na udržanie danej nastavenej teploty.



Obr. 6.7 Manekýn Newton s kompletným príslušenstvom

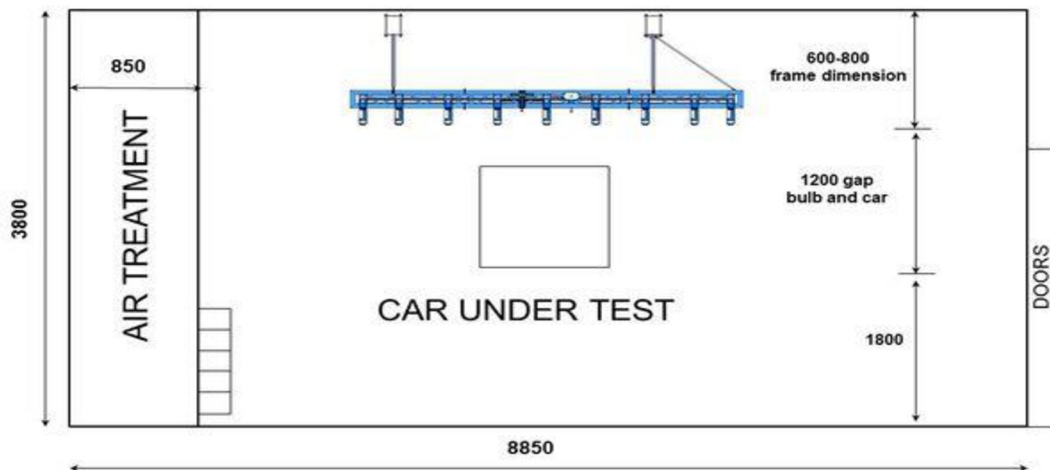
6.2.3 KLIMAKOMORA

V oblasti konštrukcie automobilov rastie nutnosť komplexnej simulácie okolitého prostredia s umelým globálnym žiarením a súčasným klimatickým zaťažením so striedavými cyklami, ktoré vzájomne kombinujú vlhký a suchý chlad podľa regionálnych klím a umožňujúce tak napodobnenie vonkajších atmosférických vplyvov s realistickým stupňom ostrosti odpovedajúcej praxi. Klimatická komora slúži ku skúšaniam kompletých vozov alebo iba kabín dopravných prostriedkov za uvedených klimatických podmienok.

Pri meraní budeme používať klimatickú komoru od firmy *ANGELANTONI INDUSTRIE S.P.A.* (www.angelantoni.it), ktorá od roku 2013 funguje na VUT v Brne (FIŠER, 2013).

Termodynamické parametre:

- Teplotný rozsah (so solárnou simuláciou) -10° do +50 °C
- Teplotný rozsah (bez solárnej simulácie) -40° do +85 °C
- Rýchlosť teplotnej zmeny (IEC 60068-35-5) +- 1 °C
- Vlhkostný rozsah (so solárnou simuláciou) 30 - 95 %RH
- Vlhkostní rozsah (bez solárnej simulácie) 30 - 60 %RH
- Stabilita udržiavania vlhkosti +- 5 RH
- Rosný bod 5° - 49 °C
- Solárna simulácia 10 kW /1000 W/m²



Obr. 6.8 Nákres klimakomory na VUT FSI v Brne

Rozmery komory

Vnútorňý objem 152m²

Rozmery:

- šírka 5 m
- dĺžka 8,85 m
- výška 3,8 m

Dvere pre vozidlo 2,4 x2,2 m

Výmena vzduchu

Vyvetranie	3000 m ³ /h
Prevádzka	300 m ³ /h



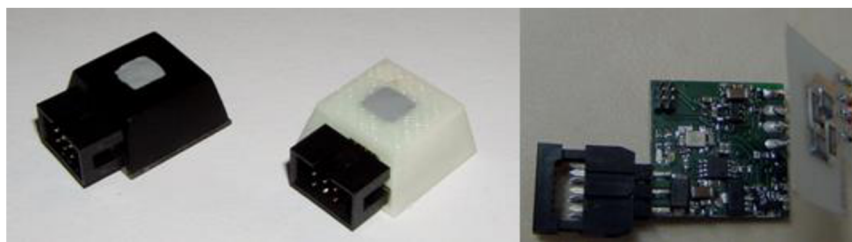
Obr. 6.9 Klimatická komora zvnútra s automobilom Škoda octavia combi

6.3 INOVATÍVNY SYSTÉM HVAC

Táto diplomová práca sa zaoberá návrhom testovacej procedúry pre projekt, ktorý beží v spolupráci VUT Brno a ŠKODA AUTO a.s. Projekt s názvom „*Inovativní řízení HVAC (heating, ventilation and air conditioning) systému kabiny automobilu jako součásti asistenčního systému řidiče*“ je riešený od 07/2014 a predpokladaný koniec je 06/2017.

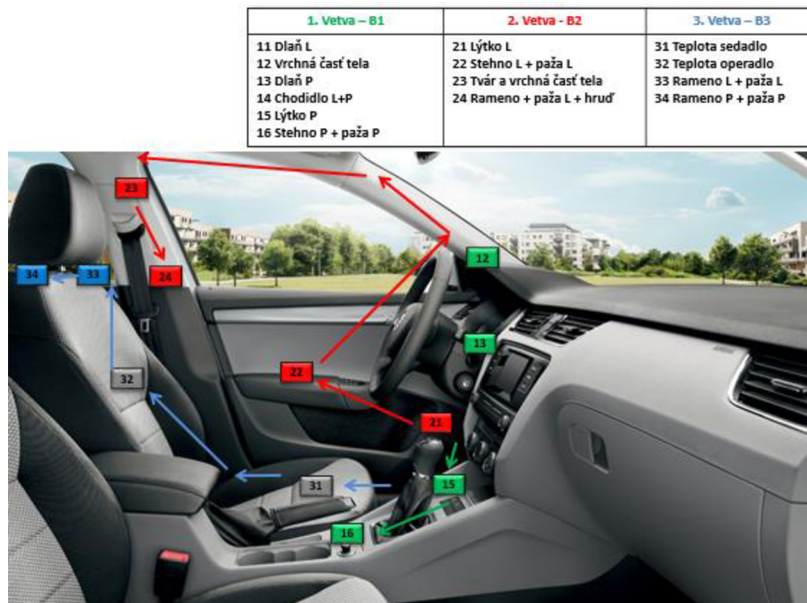
Cieľom projektu je vyvinúť hardware, software a algoritmy pre snímanie ekvivalentných teplôt kritických segmentov tela vodiča automobilu a vytvoriť graficky prehľadné a bezpečné riadenie systému vykurovania, vetrania a klimatizácie kabíny. Toto by malo spôsobiť zvýšenie bezpečnosti a optimalizáciu klimatizácie v priestore vozidla.

Snímanie ekvivalentnej teploty bude v projekte riešené plošnými senzormi (obrázok 6.10), ktorých princíp bol vysvetlený v kapitole 6.1.



Obr. 6.10 Sensory ekvivalentnej teploty pre projekt iHVAC

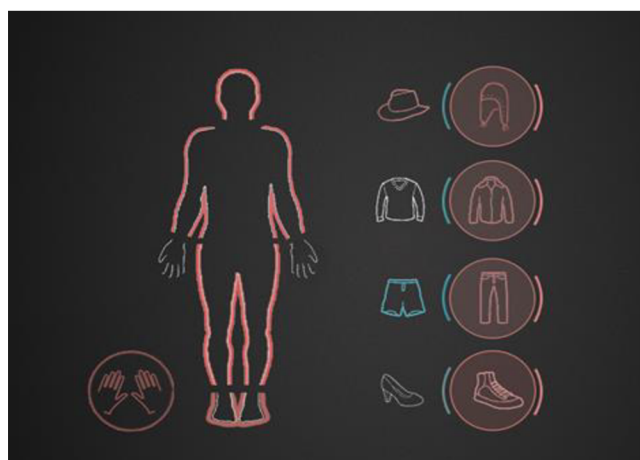
Tieto senzory rozmiestnené a zabudované do automobilu v okolí vodiča (obrázok 6.11) a budú napojené na aplikáciu v tablete, ktorý bude integrovaný do palubnej dosky. Aplikácia v tablete pomocou algoritmu prepočíta ekvivalentnú teplotu a vodičovi nezobrazí hodnoty teplôt, ale hodnotu aktuálneho globálneho tepelného pocitu v kabíne, ale aj hodnoty tepelného pocitu na jednotlivých častiach tela (Obrázok 6.12). Súčasťou tejto aplikácie bude aj virtuálny šatník (Obrázok 6.13), v ktorom si bude môcť užívateľ upraviť prednastavený odev (podľa vonkajšej teploty) podľa svojich preferencií.



Obr. 6.11 Návrh rozmiestnenia senzorov ekvivalentnej teploty v kabíne automobilu pre projekt iHVAC



Obr. 6.12 Ukážka grafického používateľského rozhrania (GUI) aplikácie pre systém iHVAC



Obr. 6.13 Ukážka virtuálneho šatníka v aplikácii pre systém iHVAC

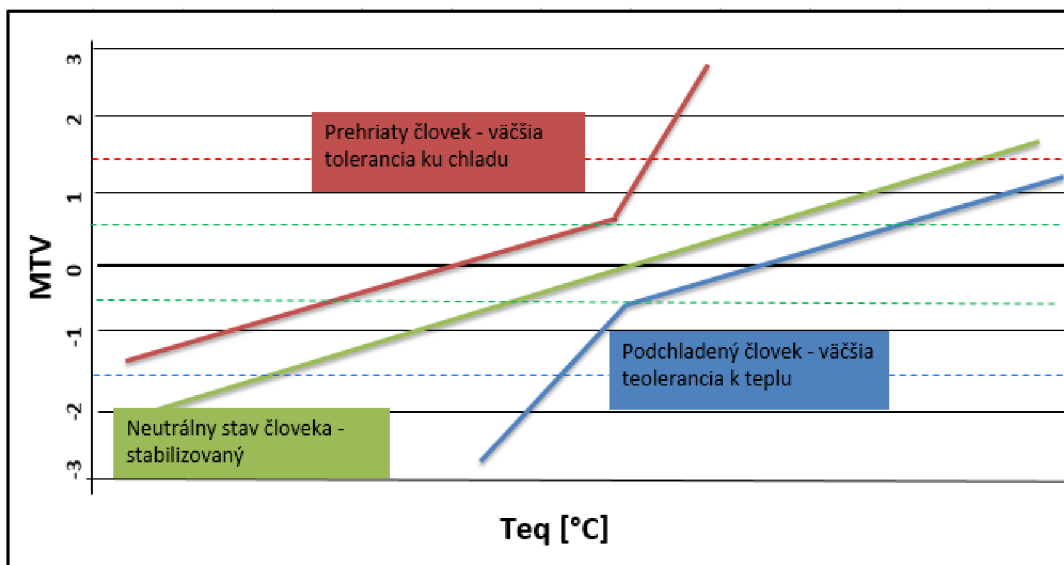
7 TEST TEPELNÉHO KOMFORTU V DYNAMICKÝCH PODMIENKACH – FÁZA 1

Tento test bol prevedený na jar 2015. Jeho cieľom bolo získať podrobnejšie informácie o použití diagramu komfortných zón (DKZ) a získať ďalšie skúsenosti pri testovaní tepelného komfortu pomocou tepelného manekýna Newtona a testovaných osôb. Cieľom bolo zachytiť vzťah medzi MTV (mean thermal vote) a T_{eq} (ekvivalentná teplota) pre „podchladeného“ alebo naopak „prehriateho človeka“, keďže používaný Nilssonov princíp s touto informáciou nepočíta.

Hlavná hypotéza pre overenie v teste bola nasledujúca:

Pokiaľ je ľudské telo podchladené, tak má väčšiu toleranciu k teplu a naopak ak je ľudské telo prehriate, tak má väčšiu toleranciu na chlad.

Prvotné zobrazenie tejto hypotézy je na obrázku 7.1, ktorý znázorňuje závislosť MTV na T_{eq} . Pri teste sme merali prípad "podchladeného človeka", v obrázku znázornený lomenou krivkou modrej farby. Klasický Nilssonov vzťah je vynesovaný priamkou zelenej farby. Predpokladali sme tiež tvar krivky, pretože sme predpokladali, že po skokovej zmene prostredia sa tolerancia mení s časom (výsledky sú vyhodnocované v 10. a 30. minúte testu).



Obr. 7.1 Hypotéza testu zachytená do grafu závislosti T_{eq} a MTV

7.1 PODMIENKY A POSTUP EXPERIMENTU

Podmienky merania

- Jednotný odev – tričko, spodná bielizeň, ponožky, nohavice a uzavreté topánky
- Podchladenie na úroveň cca MTV -2 vo vonkajšom prostredí
- Uvažuje sa sezónna aklimatizácia (zimný test sa robí v zime - prípad podchladeného človeka , letný v lete - prípad prehriateho človeka) – meral sa zimný test

- Vylúčenie vplyvu jedla, alkoholu, chorôb atď.
- Subjekty sedia do štvorca a manekýn je v strede medzi nimi (obrázok 7.3)
- Referenčné meranie pomocou manekýna Newtona
- Testovacie osoby nevedia teplotu prostredia, do ktorého vstupujú
- Poradie teplôt je náhodné (meranie $T_{eq} = 21,26$ a 30°C)
- Test v klimakomore ($T_{eq} = T_{vzduchu} = T_{stien}$)

Postup merania



Obr. 7.2 Testované subjekty pri stabilizácii vo velíne a následne ochladzovanie na MTV -2 až -3, ktoré prebiehalo vo vonkajšom prostredí

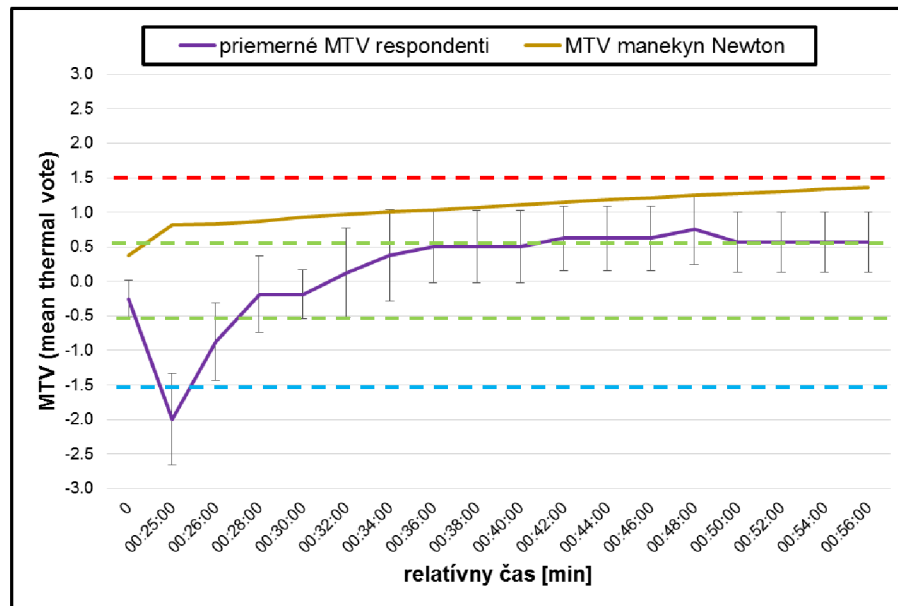
Dobrovoľníci sa dostavili do klimakomory, kde sa po dobu 1 hod stabilizovali vo velíne pri teplote cca 22°C . Následne sa presunuli do vonkajšieho prostredia, kde čakali až do doby, kým nedosiahli MTV -2 až -3 (Obrázok 7.2). Po dosiahnutí tejto hodnoty sa presunuli do klimakomory (Obrázok 7.3), kde počas 30 min vyplňali dotazník (Obrázok 7.4) a to každé 2 min. Test bol následne ukončený a pokračoval rovnakou procedúrou ďalší merací deň v iných podmienkach.

Tab. 7.1 Parametre prostredia v daných testovacích dňoch

	Teq komora nastavená [$^{\circ}\text{C}$]	Teq komora meraná [$^{\circ}\text{C}$]	Teplota vo velíne [$^{\circ}\text{C}$]	Vonkajšia teplota [$^{\circ}\text{C}$]
Deň 1	30	29,9	21,1	12,3
Deň 2	21	22,2	21,9	10,6
Deň 3	26	26,6	22,2	12,9

7.2 VÝSLEDKY OD MANEKÝNA NEWTONA A TESTOVACÍCH OSÔB

Deň 1 – 30 °C

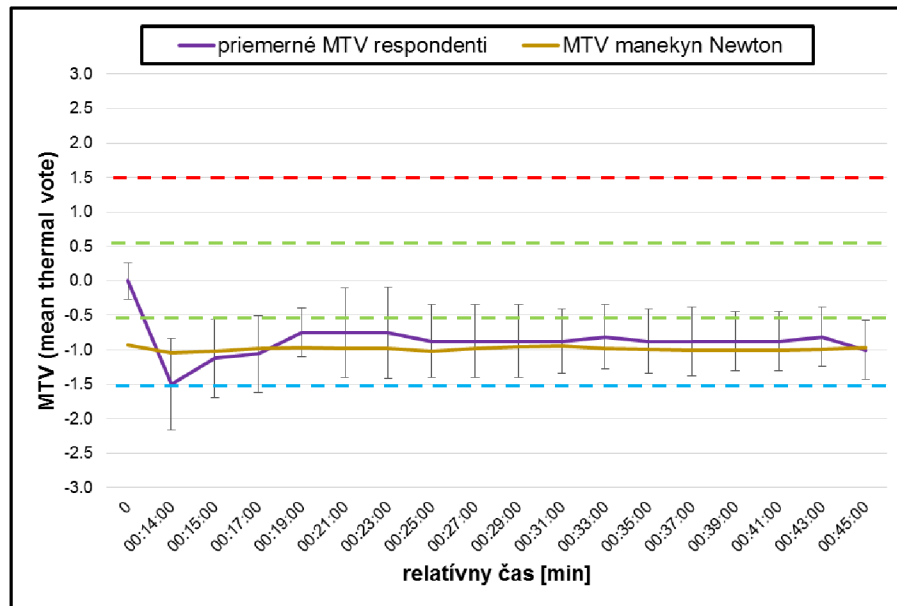


Obr. 7.5 Porovnanie výsledkov zistených MTV od manekýna Newtona a testovacích osôb 1. testovací deň

Prvý testovací deň bolo nastavená v komore $T_{eq} = 30\text{ °C}$ a vonkajšia teplota bola $12,3\text{ °C}$ pri ktorej sa respondenti „podchladzovali“ na hodnotu MTV rovnej aspoň -2 . Z obrázku 7.5 môžeme vidieť, že doba strávená vo vonkajšom prostredí bola 25 min. Manekýn bol usadený po celý čas v klimacomore, čo je vidieť aj na grafe. Vidíme, že naša pôvodná hypotéza sa potvrdila, pretože zo začiatku hodnotili respondenti prostredie v klimacomore ako mierne chladné, avšak manekýn ukazuje od začiatku MTV vyššie ako 0,5. S postupujúcim časom sa hodnoty od respondentov približujú ku krivke od manekýna. Z grafu na obrázku 7.5 môžeme vidieť, že MTV manekýna Newtona počas testu stúpa, čo bol následok rastúcej teploty v klimacomore, ktorá sa počas testu zmenila z $27,6\text{ °C}$ na začiatku, až na $31,2\text{ °C}$ na konci testu. Táto skutočnosť bola pravdepodobne spôsobená tým, že sme test začali v momente, keď nebola teplota v klimacomore ešte dostatočne vysoká a stabilizovaná.

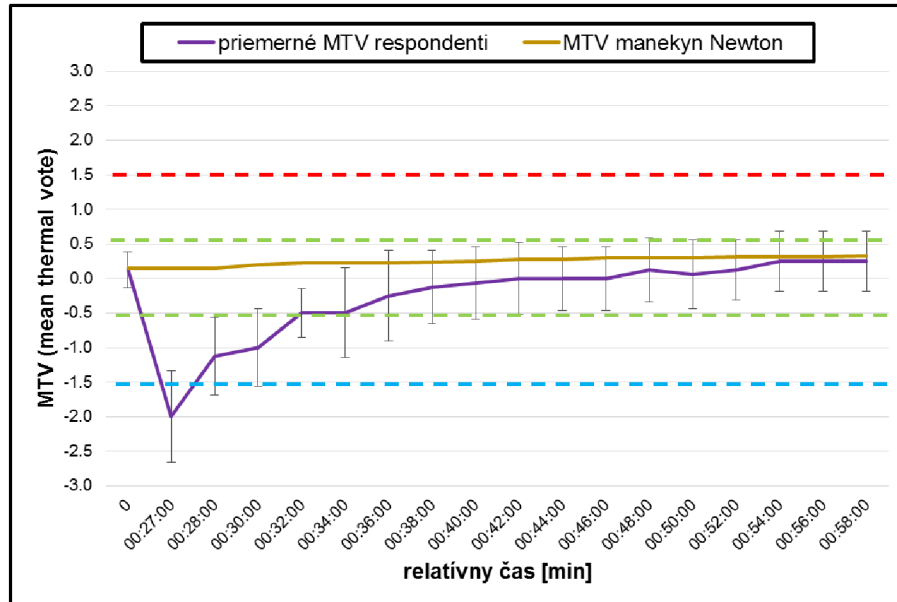
Deň 2 – 21 °C

Druhý testovací deň bola teplota T_{eq} v komore nastavená na 21 °C a vonkajšia teplota bola $10,6\text{ °C}$, čo sa odzrkadilo na kratšom čase potrebnom pre dosiahnutie MTV $-1,5$ a menšom. Na obrázku 7.6. môžeme vidieť, že testovacie osoby mali väčšiu toleranciu aj na záporné hodnoty MTV, s čím naša hypotéza nepočítala. Z grafu však vidíme, že krivka respondentov sa približuje ku krivke od manekýna Newtona výrazne rýchlejšie, ako tomu bolo na obrázku 7.5.



Obr. 7.6 Porovnanie výsledkov zistených MTV od manekýna Newtona a testovacích osôb 2. testovací deň

Deň 3 – 26 °C



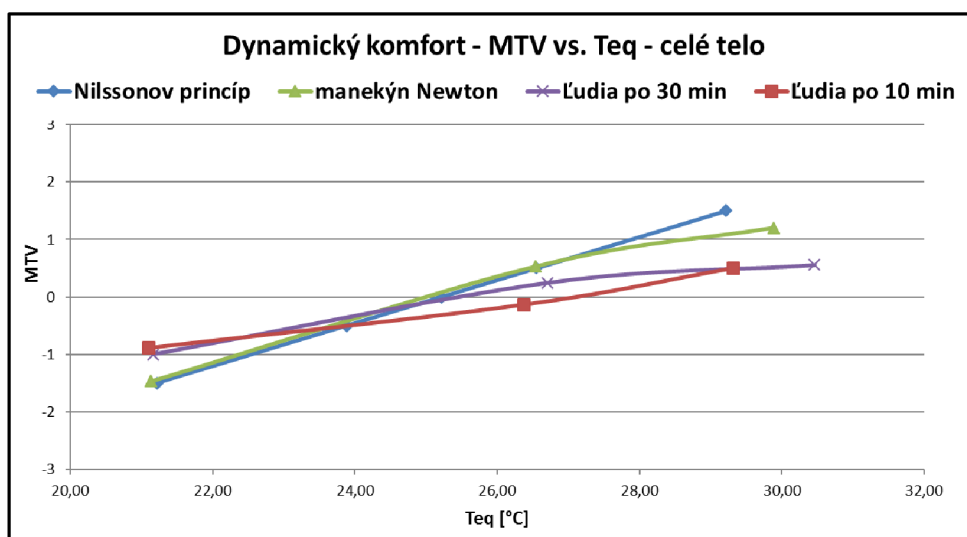
Obr. 7.7 Porovnanie výsledkov zistených MTV od manekýna Newtona a testovacích osôb 3. testovací deň

Posledný testovací deň bola $T_{eq} = 26\text{ °C}$ a vonkajšia teplota $12,9\text{ °C}$, z ktorej plynie najdlhší čas potrebný na dosiahnutie MTV aspoň -2, ktorá bola až 27 min. Graf na obrázku 7.7 má podobný priebeh ako graf z prvého dňa merania (Obrázok 7.5). Môžeme vidieť, že po

cca 25min v klimacomore sa krivky od respondentov a od manekyna Newtona dokonca stretli, čo by po dostatočne dlhom čase malo nastať vo všetkých prípadoch.

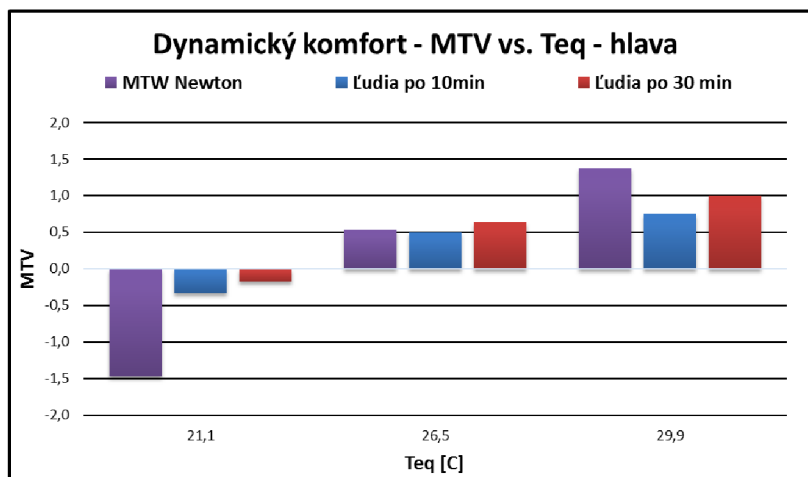
7.3 ZÁVER A NAVRHNUTÉ ÚPRAVY

Z výsledkov testu sme zistili, že naša hypotéza bola čiastočne potvrdená testom, avšak nepočítali sme s vyššou toleranciou aj pre mínusové hodnoty MTV (rozdiel medzi hypotézou 7.1 a výsledným grafom z testov 7.8). Toto lepšie hodnotenie však po cca 30 min začalo klesať a približovať sa krivke Nilssonovho princípu. Po dlhej aklimatizácii v danom prostredí sa krivka celá vyrovná a priblíži sa k Nilssonovej priamke, avšak pri mínusových hodnotách k tomu dôjde oveľa skôr (Obrázok 7.8). Odklonenie krivky manekyna Newtona a Nilssonovho princípu bolo spôsobené mierne rastúcou teplotou v klimacomore v 1. testovacom dni.

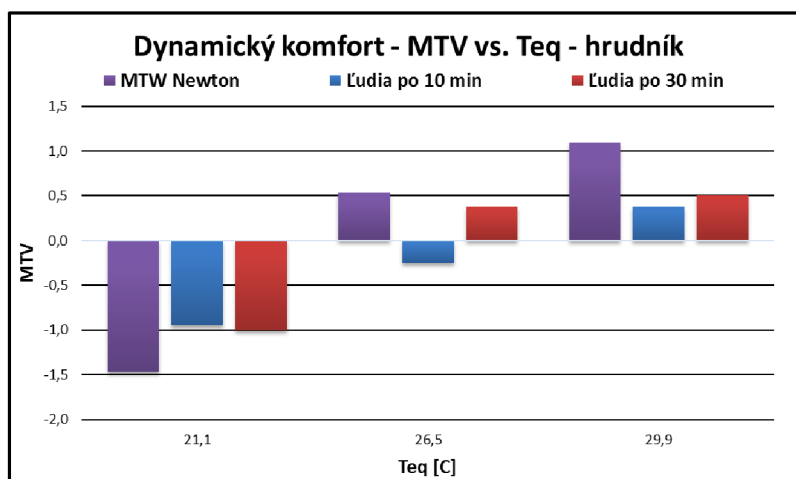


Obr. 7.8 Porovnanie výsledkov testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a dát z manekyna Newtona (Nilssonov princíp)

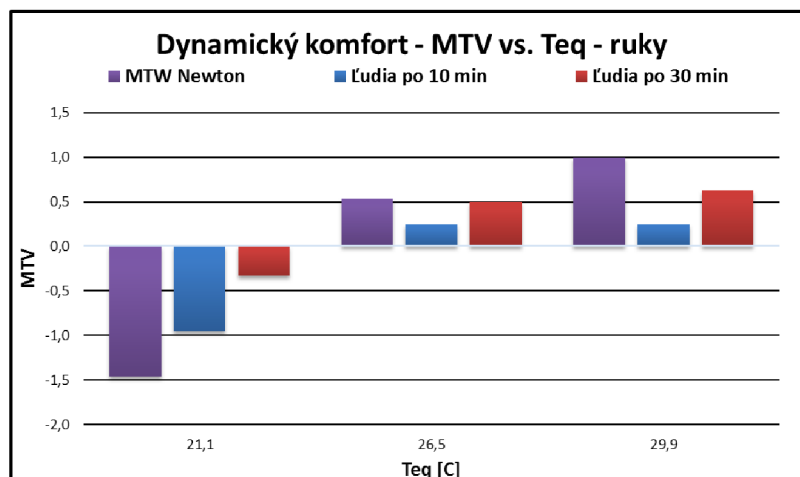
Na obrázkoch 7.9 až 7.12 sú uvedené príklady vyhodnotenia na jednotlivých častiach ľudského tela. Môžeme si všimnúť, že na hlave (Obr. 7.9) a hrudníku (Obr. 7.10) je dodržaný trend približovania sa k hodnotám z tepelného manekyna. Na grafe zobrazujúcom výsledky na rukách (Obr. 7.11) však môžeme vidieť, že pri $T_{eq} = 21,1$ °C sa MTV časom zväčšuje, čo mohlo byť spôsobené faktom, že respondenti často vyplňali dotazník a preto museli s rukami často manipulovať, a tým ich prekrvovali. Na obrázku 7.12 pre výsledky chodidiel zase vidíme, že pri najnižšej meranej teplote ich dobrovoľníci hodnotili moc nízkymi hodnotami MTV. Toto mohlo byť spôsobené horším prekrvením končatín pri pocite zimy (vazokonstrikcia ciev).



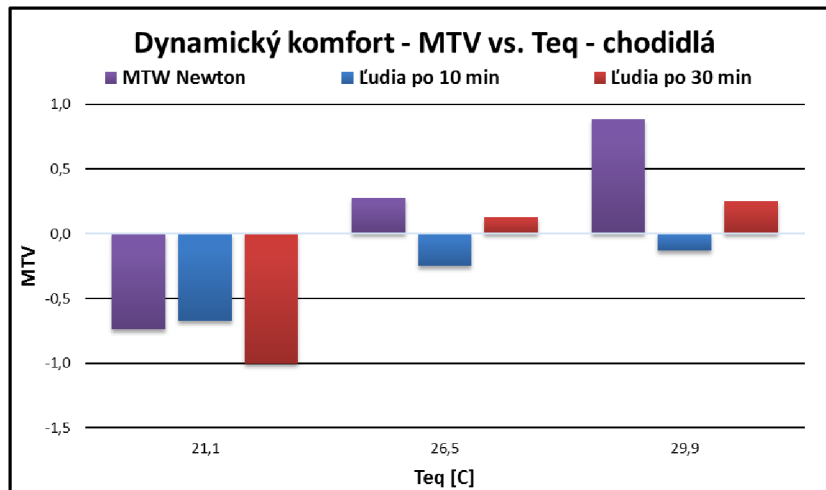
Obr. 7.9 Porovnanie výsledkov testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a dát z manekýna Newtona na hlave



Obr. 7.10 Porovnanie výsledkov testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a dát z manekýna Newtona na hrudníku



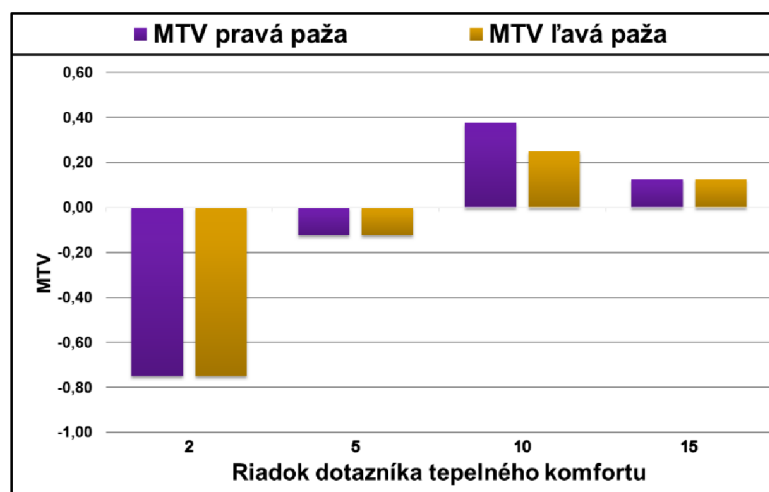
Obr. 7.11 Porovnanie výsledkov testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a dát z manekýna Newtona na rukách



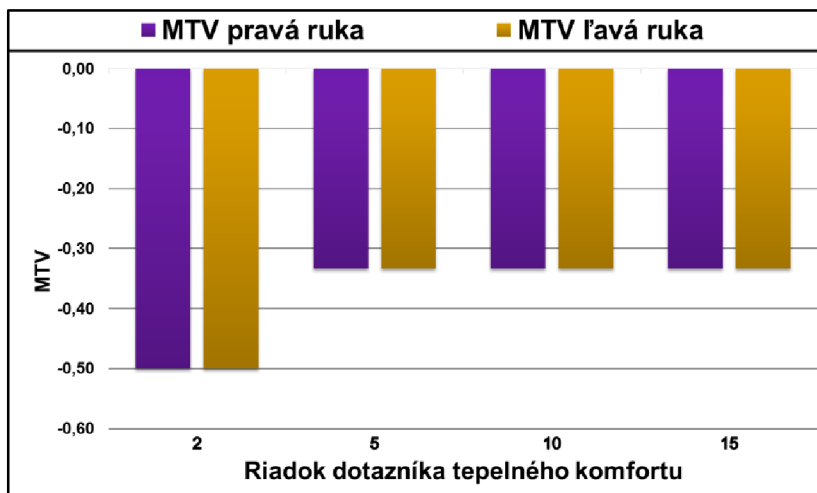
Obr. 7.12 Porovnanie výsledkov testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1 a dát z manekýna Newtona na chodidlách

Navrhnuté úpravy dotazníka

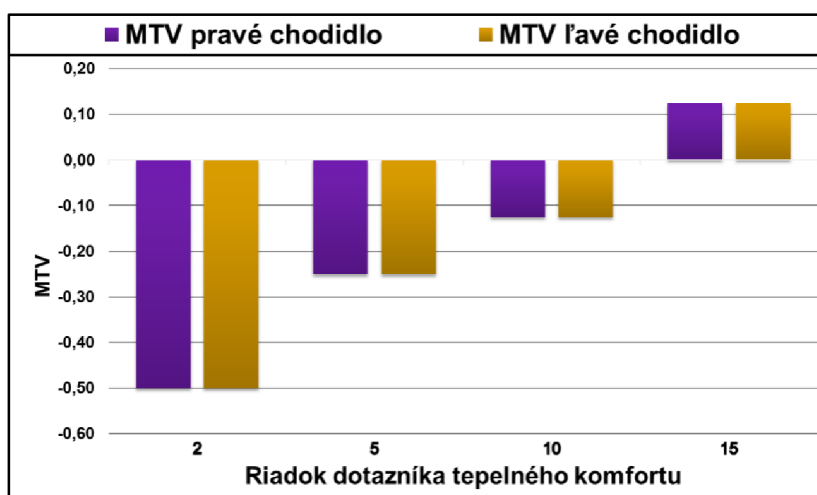
V dotazníku bolo treba rozdeliť každú časť tela zvlášť na tepelný pocit a tepelný komfort. Pri vyhodnocovaní sme zistili, že párové časti tela nie je nutné vyplňovať zvlášť, pretože ich respondenti aj tak hodnotia takmer rovnakými hodnotami, čo môžeme vidieť na obrázkoch 7.13 až 7.15. Taktiež bolo nutné pridať nový parameter do dotazníka a to „Žiadaná zmena“, ktorá bude zachycovať, ako by sa respondent zachoval v automobile (pridal alebo zoslabil klimatizáciu a pod.). Poslednou veľkou zmenou bolo vytvorenie stupníc pre tepelný pocit, komfort a žiadanú zmenu, ktoré budú mať respondenti po ruke počas celého testu, čím sa zrýchli ich vyplňovanie a zamedzí sa vzniku prípadných chýb spôsobených zlým pochopením týchto stupníc alebo ich zámenou.



Obr. 7.13 Príklad zhody MTV od respondentov na párových častiach – pravá a ľavá paža z prvého testovacieho dňa



Obr. 7.14 Príklad zhody MTV od respondentov na párových častiach – pravá a ľavá ruka z druhého testovacieho dňa



Obr. 7.15 Príklad zhody MTV od respondentov na párových častiach – pravé a ľavé chodidlo z tretieho testovacieho dňa

Navrhnuté úpravy postupu

Z daných meraní sme zistili, že by bolo vhodné predĺžiť dobu merania v klimakomore na minimálne 1 hod, aby sme dokázali presnejšie zachytiť „vyrovnávanie“ krivky späť k Nilssonovmu princípu. Taktiež by bolo vhodné použiť väčšiu vzorku respondentov, ktorý by boli rovnomerne rozložené, či už podľa pohlavia, ale aj veku. Rozhodli sme sa tiež upraviť dotazník.

7.4 ÚPRAVA DOTAZNÍKA PRE TEPELNÝ KOMFORT

K úprave dotazníkov sme sa rozhodli po prvej fáze testov dynamického MTV, pretože bol zbytočne zložitý a niekedy nebolo respondentom úplne jasné, čo sa po nich žiada. Snažili sme sa ho teda sprehľadniť, ale zachovať všetky nutné a potrebné informácie.

Na základe zistených nedostatkov z prvej fázy testovania sme urobili nasledujúce úpravy a zmeny

- Rozdelili sme pojem tepelný pocit a tepelný komfort pre každú časť tela (napr.: subjektu môže byť zima, ale je mu to príjemné)
- Pridali sme pole „Žiadaná zmena“ – vyjadruje žiadosť testovaného subjektu na zmenu okolitého stavu prostredia (chce ohriať alebo naopak ochladiť)
- Oddelili sme časti tela, ktoré sú v kontakte so sedačkou v automobile od ostatných častí, aby bol dotazník použiteľný aj pri detailnom výskume kontaktného komfortu
- Pre nový dotazník sme použili tri nezávislé stupnice namiesto jednej stupnice MTV. Dôvodom bol predovšetkým fakt, že stupnica MTV nie je vhodná pre popis "žadanej zmeny" pocitu testovanej osoby a v niektorých prípadoch veľké dynamické zmeny komfortu a tepelného pocitu neumožňujú správne zachytenie týchto zmien.
- Vytvorili sme pomocnú tabuľku so slovným a grafickým popisom všetkých použitých stupníc a grafickou reprezentáciou častí manekýna, aby táto tabuľka bola testovacím osobám v priebehu testu vždy k dispozícii.
- Pridali sme piktogramy pre lepšie pochopenie vyplňaných veličín

Výslednú podobu finálnej verzie dotazníka a doplnkových tabuliek môžeme vidieť na obrázkoch 7.16 a 7.17.

	Tepelný pocit	Tepelný komfort	Žiadaná zmena	
+3	Horko	Velmi komfortní	Velmi ohřát	+3
+2	Teplo	Komfortní	Ohřát	+2
+1	Mírné teplo	Právě komfortní	Mírně ohřát	+1
0	Neutrální pocit	-	Žádná změna	0
-1	Mírně chladno	Právě nekomfortní	Mírně ochladit	-1
-2	Chladno	Nekomfortní	Ochladit	-2
-3	Zima	Velmi nekomfortní	Velmi ochladit	-3

PŘEDNÍ STRANA		ZADNÍ STRANA	
Tvář		Hlava temeno	
Hruď		Záda lopatky	
Paže		Záda bedra	
Dlaně		Hýždě	
Stehna přední		Stehna spodní	
	Lýtka a holeně		
	Chodidla		

Obr. 7.16 Stupnice pre nový dotazník a názorná grafika s popisom a lokalizáciou jednotlivých častí tela

Kód osoba:		Datum a čas testu:		Project: Contact comfort - autumn 2015															
Číslo měření	ČÁSTI V KONTAKTU SE SEDAČKOU				Žádaná změna	OSTATNÍ ČÁSTI										GLOBÁLNÍ			
	Záda lopatky	Záda bedra	Hýždě	Stehna spodní		Tvář	Hlava a temeno	Hrud'	Paže	Dlaně	Stehna přední	Lýtka + Holeně	Chodidla	Celkový tepelný komfort	Žádaná změna				
	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	pocit 	komfort 	
-1.																			
0.																			
1.																			
2.																			
3.																			
4.																			
5.																			
6.																			
7.																			
8.																			
9.																			
10.																			

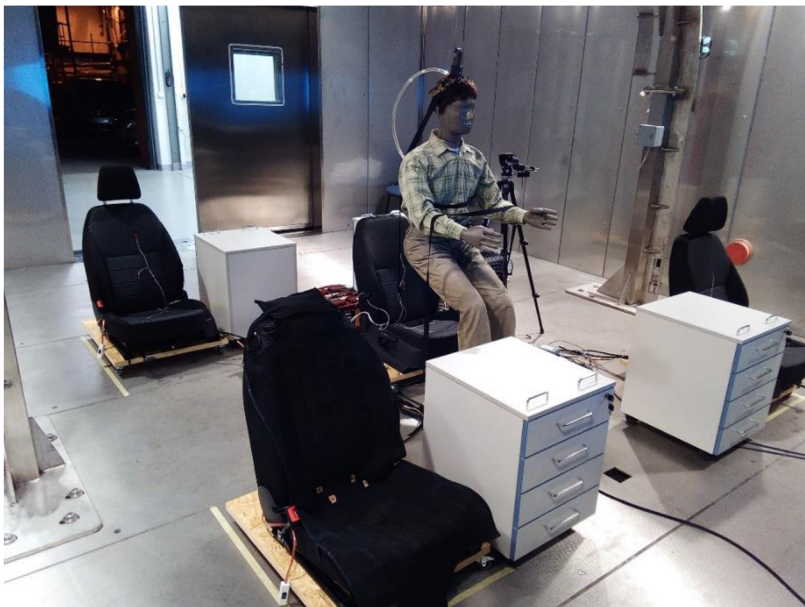
Obr. 7.17 Upravený dotazník tepelného komfortu použitý při meraní tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 1

8 TEST TEPELNÉHO KOMFORTU V DYNAMICKÝCH PODMIENKACH – FÁZA 2

Hlavným cieľom bolo merať tepelný komfort pri kontakte so sedačkou pri rôznych podmienkach pri použití vyhrievaných sedačiek a klimatizácie, ako aj vyskúšať upravený dotazník a jeho implementáciu a následne získané dáta porovnať s dátami z manekýna. Ďalej bolo cieľom nábrať skúsenosti s prácou s väčšou skupinou dobrovoľníkov, spôsob ich zaškolenia a práce s nimi pri samotnom teste, spôsob motivácie a iné.

8.1 POUŽITÉ VYBAVENIE

- Klimakomora VUT v Brne
- Manekýn Newton od firmy Northwest
- Textilná zábrana pre obmedzenie vplyvu prúdenia vzduchu
- 5 vyhrievaných sedačiek od ŠKODA a.s. – vybavené senzormi teploty a vlhkosti (2 sedačky vybavené dečkou na sledovanie tepelného toku)
- Kamera FLIR i7 na monitorovanie teploty tváre počas testu
- Napájanie a regulácia sedačiek
- Popruhy na pripevnenie manekýna ku sedačke – kompenzácia rozdielu hmotnosti manekýna a človeka
- Upravený dotazník
- Rozmerná TV – časovaná prezentácia pre pripomenutie vyplňania dotazníkov
- Teplomery TESTO na kontrolu teploty okolia
- Sonda na meranie rýchlosti prúdenia vzduchu



Obr. 8.1 Vybavenie pripravené na test tepelného komfortu pri dynamických podmienkach – fáza 2

8.2 PODMIENKY A POSTUP EXPERIMENTU

Podmienky merania

- 24 testovaných subjektov rovnomerne rozložených podľa veku a pohlavia
- Jednotný odev – košeľa / sveter, tričko, spodná bielizeň, ponožky, nohavice a uzavreté topánky
- Sezónna aklimatizácia na zimné podmienky (možné merať cca od 10. do 4. mesiaca v roku)
- Vylúčenie vplyvu jedla, alkoholu, chorôb atď.
- Referenčné meranie pomocou manekýna Newtona
- Subjekty sedia do štvorca a manekýn je v strede medzi nimi
- Testovacie osoby nevedia teplotu prostredia, do ktorého vstupujú
- Poradie teplôt je náhodné (meranie $T_{eq} = 16, 18, 20$ a 24°C), ako aj rotácia subjektov na jednotlivých miestach
- Konštantná teplota sedačky je 40°C

Plán experimentu

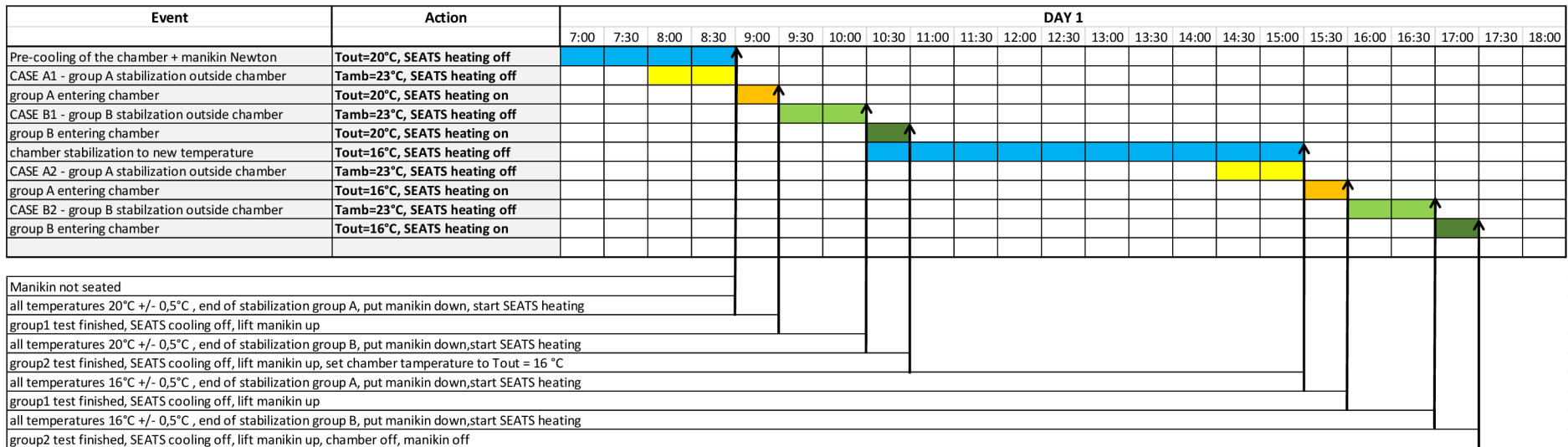
Test bol naplánovaný na 3 týždne. Subjekty sme rozdelili do šiestich skupín, kde v každej skupine sú 2 ženy a 2 muži. Každý týždeň prebehne test dvoch skupín súčasne.

V pondelok prebehla kontrola vybavenia a príprava na test. V utorok sa uskutočnilo krátke zaškolenie subjektov, vyskúšali si prácu s dotazníkom, aby sme eliminovali ich zlé vyplňovanie. V stredu a štvrtok prebehol samotný test, a to každý deň dve rôzne teploty pre obidve skupiny. Postup experimentu v deň testu môžeme vidieť na obrázku 8.2.

Postup experimentu

V deň experimentu sa obsluha dostavila o 7:00 do klimakomory a zapla jej temperovanie na merané podmienky. Taktiež zapla vyhrievanie manekýna Newtona, ktorý potrebujem cca 2 hod na stabilizáciu. Prvá skupina respondentov sa dostavila o 8:00 a bola usadená do stabilizačného „kútiku“ (Obrázok 8.3), kde prebehla stabilizácia po dobu 1 hod. Počas stabilizácie vyplnili dobrovoľníci fyziologický a osobný dotazník, kde uvádzali vek, pohlavie, zdravotný stav a iné, ako aj dotaz na ich oprávnenie riadiť motorové vozidlo a vzťah k starším aj novým technológiám v automobiloch.

- STABILISATION - chamber
- STABILIZATION - group1
- SEATS heating on - test group1
- STABILIZATION - group2
- SEATS heating on - test group2



Obr. 8.2 Časový priebeh jedného dňa testu tepelného komfortu v dynamických podmienkach – fáza 2



Obr. 8.3 Stabilizačný kútik vo veľine klimakomory

Potom obsluha respondentom rozdala dotazníky tepelného komfortu. Na konci stabilizácie, tesne pred presunom do komory, vyplnili dobrovoľníci riadok s označením -1. Táto informácia je nutná pre zistenie úspešnosti stabilizácie pred testom. Dobrovoľníci sa presunuli do klimakomory, kde sa usadili na svoje miesto podľa návodu na nástenke (Obrázok 8.4).



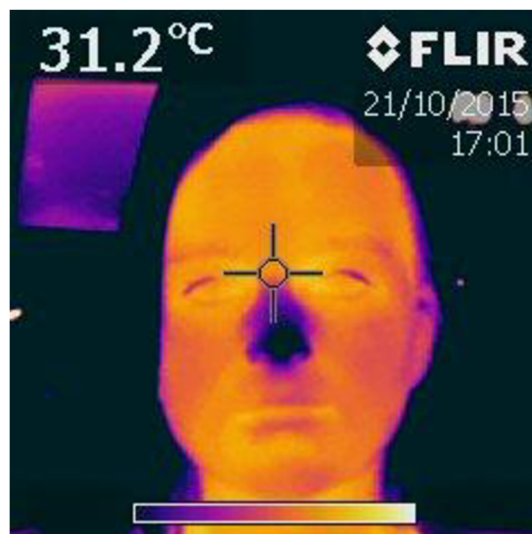
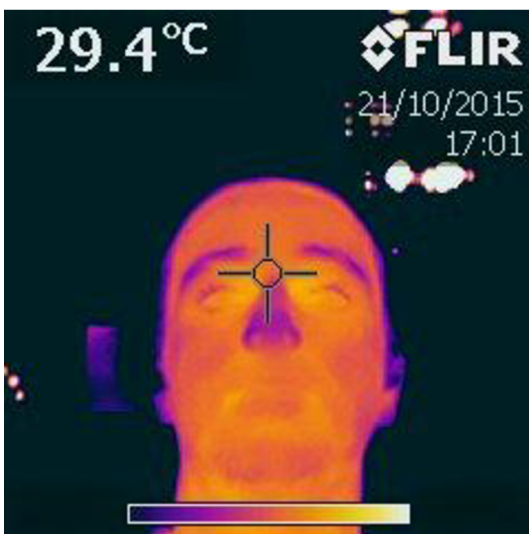
Obr. 8.4 Zasadací poriadok pre jednu zo skupín a obidva testovacie dni. Už použité schéma rozsadenia bolo vždy po skončení časti testu označená preškrtnutím.

Po usadení na svoje miesto začali vyplňovať riadok s číslom 0, zatiaľ čo obsluha usadila manekýna a pripevnila ho popruhmi ku sedačke. Na pokyn obsluhy sa zaplo vyhrievanie sedačiek a respondenti vyplňovali nový riadok každé 3 min (Obrázok 8.5) – pokyn k vyplňovaniu bol zadávaný pomocou projekcie fotiek bežiacich na televízore

v prednej časti klimakomori. Popri vyplňovaní im jeden z členov obsluhy každé 3 min snímá fotky tváre termokamerou (príklad viď obrázky 8.6).



Obr. 8.5 Jedna zo skupín zachytená pri vyplňovaní dotazníka počas testu



Obr. 8.6 Snímka z termokamery muža a ženy pri teste

Po 30 min sa test skončil, vyplo sa vyhrievanie sedačiek, dobrovoľníci odovzdali vyplnené dotazníky a dostali malú motivačnú odmenu (Obrázok 8.7).



Obr. 8.7 Motivačné občerstvenie pre dobrovoľníkov

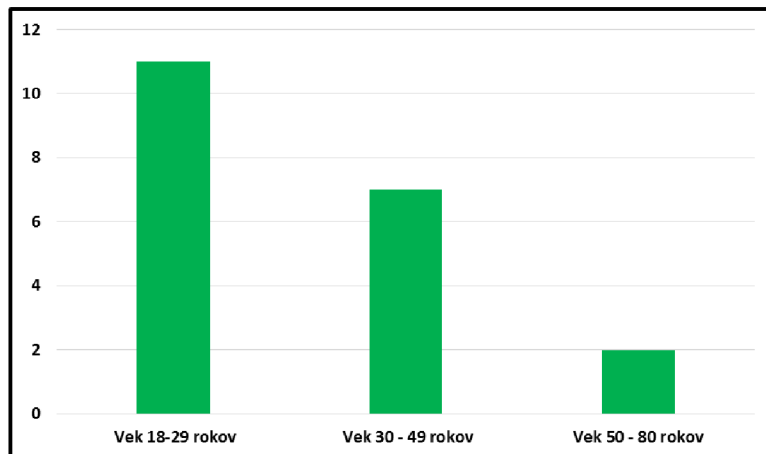
Následne sa skupiny vymenili a nasledoval rovnaký postup s druhou skupinou. Po ukončení testu druhej skupiny sa zmenilo nastavenie podmienok v klimacomore a od 14:30 hod sa opäť začal rovnaký postup so skupinou jedna, avšak už pri iných testovacích podmienkach v klimacomore.

8.3 VYHODNOTENIE BIOMETRICKÝCH DOTAZNÍKOV

Personal number	Sex		Age [years]	Height [cm]	Weight [kg]	BMI	physical condition			Health condition		active drive					Vehicle HVAC equipment					
	Male	Female					active sportsman	weekend sportsman	do not do sports	no major issues	health issues (+ type of issue)	Yes				No		no AC	manual AC	automatic AC	heated seats	ventilated seats
												daily	less than once a week	less than once a month	occasionally	passenger	do no use cars					
A_F1	0	1	51	172	75	25,4	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0
A_F2	0	1	23	163	64	24,1	0	0	1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0
B_F1	0	1	22	165	52	19,1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
C_F1	0	1	34	175	78	25,5	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
C_F2	0	1	48	162	58	22,1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
D_F1	0	1	22	163	57	21,5	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Average			33	167	64	23	1	3	2	6	0	1	3	0	1	1	0	1	4	1	3	0
Median			29	164	61	23																
SD			12	5	10	2																
A_M1	1	0	23	175	75	24,5	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0
A_M2	1	0	41	179	81	25,3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
B_M1	1	0	24	178	82	25,9	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
B_M2	1	0	23	188	80	22,6	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
B-M3(F2)	1	0	24	183	88	26,3	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
C_M1	1	0	50	191	78	21,4	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0
C_M2	1	0	26	192	97	26,3	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0
D_M1	1	0	30	180	82	25,3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0
D_M2	1	0	23	185	78	22,8	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
D_M3(F2)	1	0	23	191	83	22,8	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	0
E_M1	1	0	32	180	94	29,0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
E_M2	1	0	26	180	82	25,3	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
E_M3	1	0	30	180	81	25,0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0
E_M4	1	0	31	181	87	26,6	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Number of	14	6					2	10	2	14	0	2	10	1	1	0	0	2	5	7	5	0
Average			29	183	83	24,9																
Median			26	181	82	25,3	3	13	4	20	0	3	13	1	2	1	0	3	9	8	8	0
SD			8	5	6	1,9																

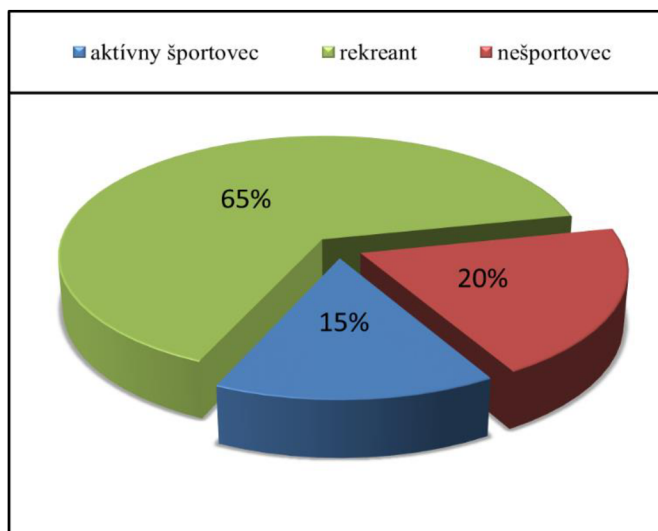
Obr. 8.8 Kompletné vyhodnotenie biometrických dotazníkov podľa respondentov

Na obrázku 8.8. môžeme vidieť, že testu sa celkovo zúčastnilo 20 respondentov, z čoho bolo 14 mužov a 6 žien. Toto rozdelenie nie je rovnomerné, takže sa odlišuje od ideálneho stavu, ale v našich podmienkach nebolo možné zohnať vhodnejších dobrovoľníkov. Tento fakt ovplyvnil aj rovnomerné rozloženie respondentov podľa veku, čo môžeme vidieť na obrázku 8.9.

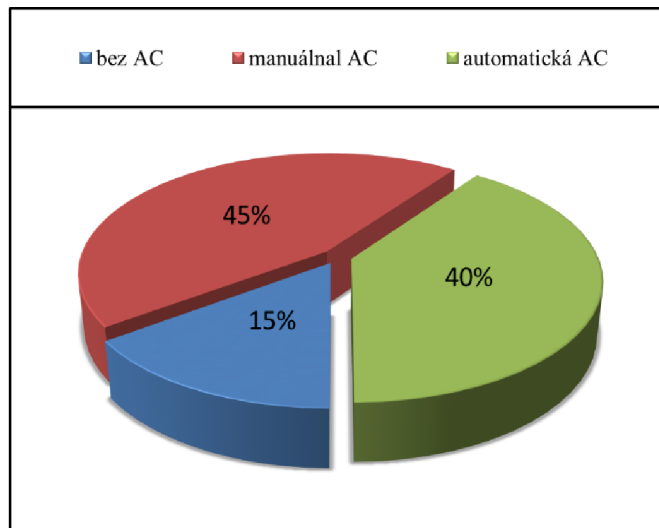


Obr. 8.9 Rozdelenie respondentov do troch skupín podľa veku

Z tabuľky (obrázok 8.8.) môžeme ďalej vidieť, že až 19 respondentov malo vodičské oprávnenie, z ktorých 16 používa vozidlo častejšie ako raz za týždeň. Tento fakt je však priaznivý, pretože automobilky sa zameriavajú hlavne na vodičov, pretože ich komfort môže ovplyvniť bezpečnosť posádky.



Obr. 8.10 Rozdelenie respondentov podľa fyzickej kondície uvedenej v biometrickom dotazníku

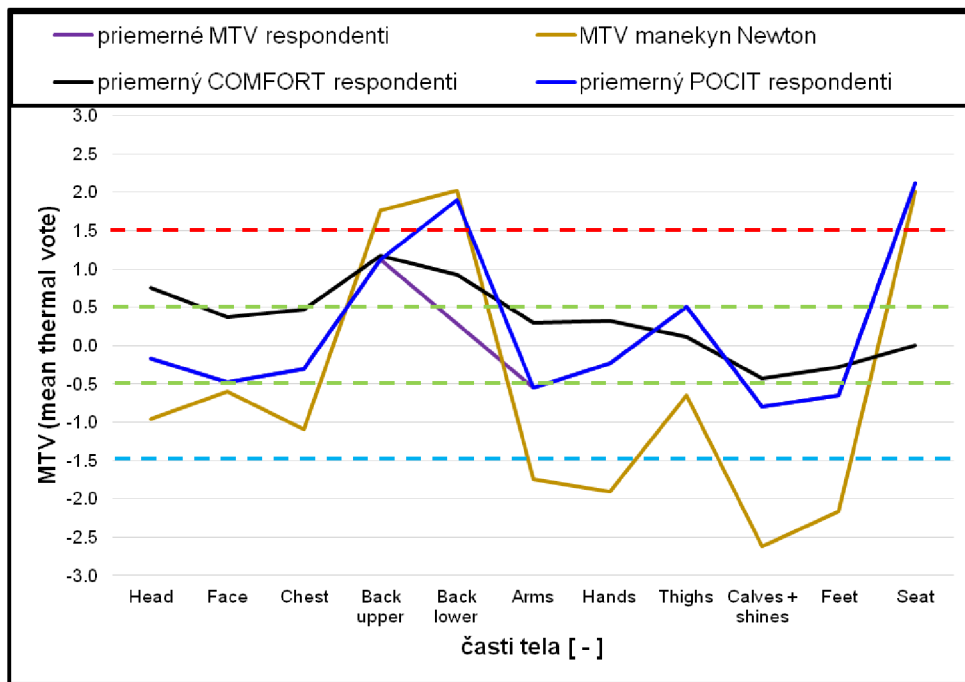


Obr. 8.11 Rozdelenie typov HVAC vybavenia v automobiloch používaných respondentmi

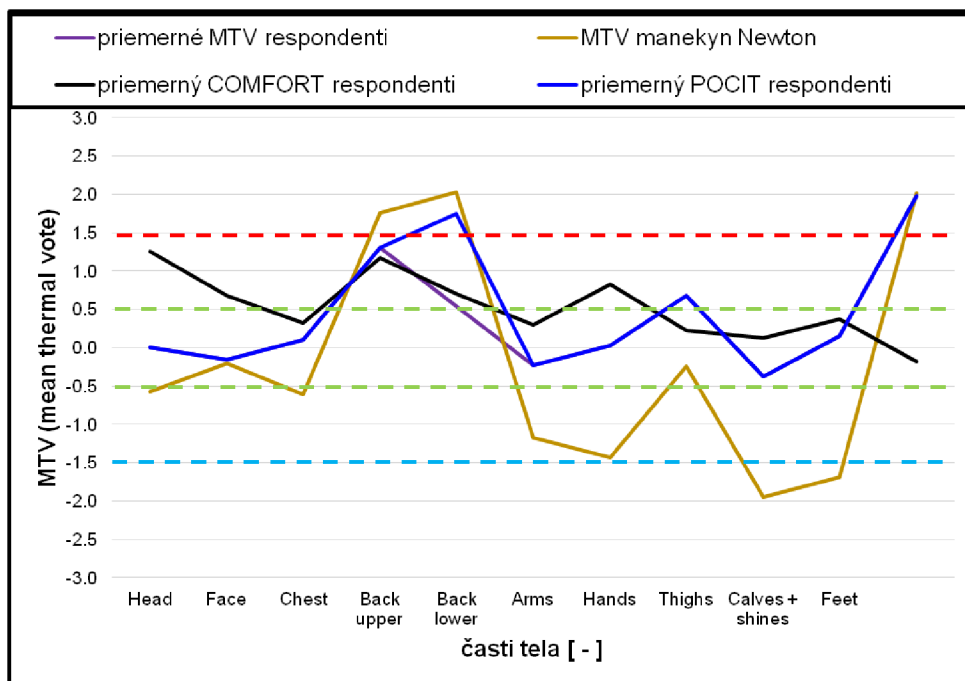
Na obrázku 8.10 môžeme vidieť rozdelenie dobrovoľníkov podľa ich fyzickej kondície, ktorá má vplyv na termoreguláciu človeka a môže teda ovplyvniť meranie komfortu. Tieto dáta sú potrebné pre prípadné vylúčenie respondenta z testu, kvôli vonkajším vplyvom (alkohol, fyzická námaha pred testom a pod.). Na obrázku 8.11 vidíme percentuálne zastúpenie HVAC výbavy áut respondentov.

8.4 VYHODNOTENIE A POROVNANIE VÝSLEDKOV MANEKÝNA A TESTOVACÍCH OSÔB

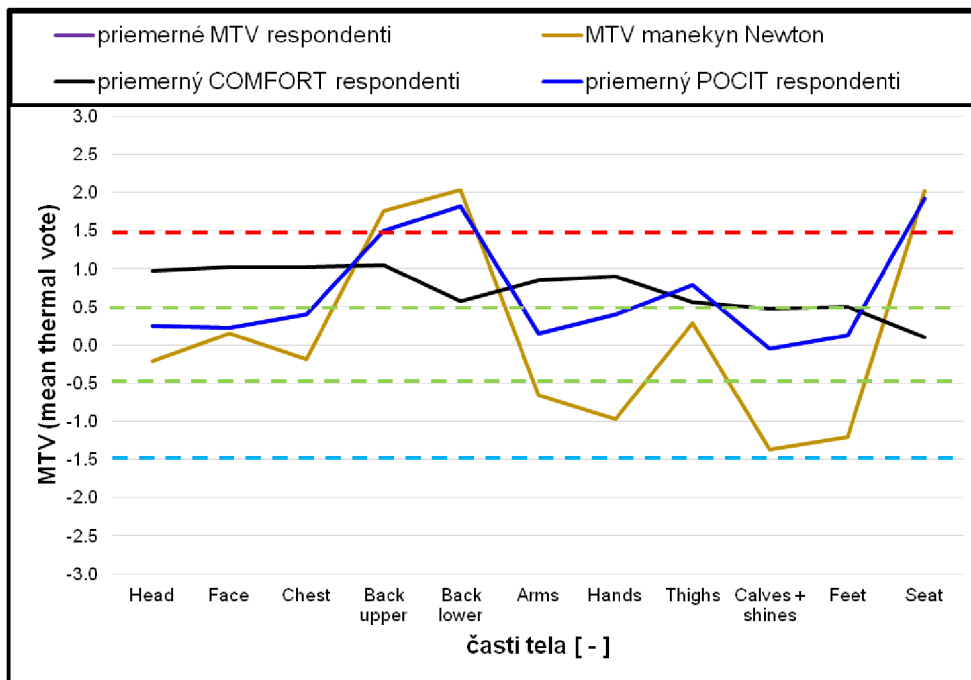
Testovanie v druhej fáze prebehlo, ako bolo spomenuté v kapitole 8.2, pri štyroch rôznych ekvivalentných teplotách pri použití vyhrievaných sedačiek. Z posledných riadkov (10. riadok – po 30 minútach testu) dotazníkov tepelného komfortu sme vyhodnotili pre každú teplotu hodnoty „priemerného“ respondenta a to zvlášť pre tepelný pocit a tepelný komfort. Priemerná hodnota bola najskôr spočítaná pre každú testovaciu skupinu zvlášť a následne sme spriemerovali aj týchto päť skupín. Priemernú hodnotu MTV podľa manekýna Newtona sme zistili meraniami zvlášť na každej sedačke pre dobrovoľníkov a sedačke uprostred a ich následným spriemerovaním.



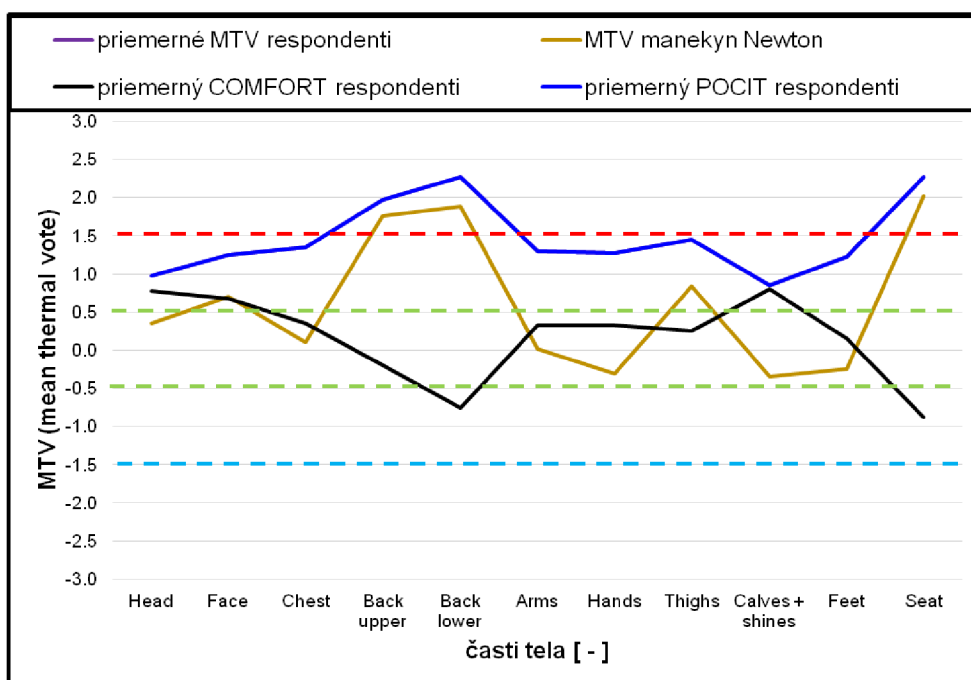
Obr. 8.12 Porovnanie výsledkov od tepelného manekýna a respondentov z druhej fázy testovania pri ekvivalentnej teplote $T_{eq} = 16 \text{ °C}$



Obr. 8.13 Porovnanie výsledkov od tepelného manekýna a respondentov z druhej fázy testovania pri ekvivalentnej teplote $T_{eq} = 18 \text{ °C}$



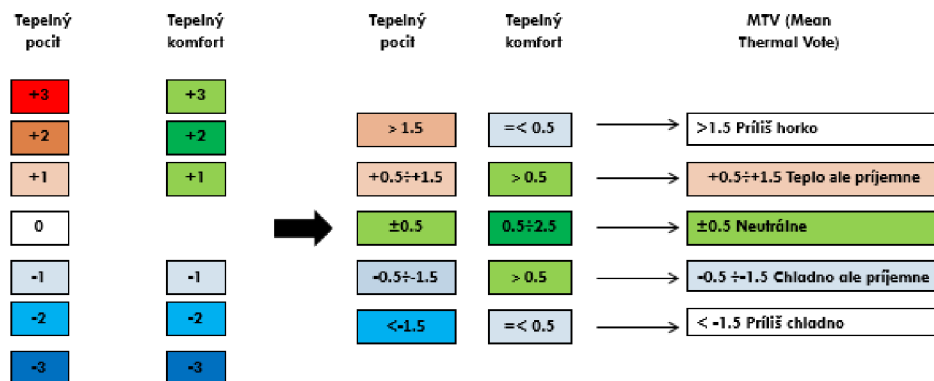
Obr. 8.14 Porovnanie výsledkov od tepelného manekýna a respondentov z druhej fázy testovania pri ekvivalentnej teplote $T_{eq} = 20 \text{ °C}$



Obr. 8.15 Porovnanie výsledkov od tepelného manekýna a respondentov z druhej fázy testovania pri ekvivalentnej teplote $T_{eq} = 24 \text{ °C}$

Na obrázkoch 8.12 až 8.15 sú uvedené aj výsledky pre priemerný MTV respondenta, ktorý bol prepočítaný z tepelného pocitu a komfortu podľa tabuľky na obrázku 8.16. Tento prepočet je prevažne experimentom a jeho doladenie je možnou témou pre budúce práce. V prepočte sa totiž pri použití vyhrievaných sedačiek a rôznych ekvivalentných teplôt vyskytuje zopár kombinácií tepelného pocitu a komfortu, ktoré tento algoritmus zatiaľ nevie

vyhodnotiť, ide však o veľmi malé množstvo hodnôt. Z obrázkov 8.12 až 8.15 taktiež vidíme, že prepočítané hodnoty MTV sa skoro presne zhodujú s hodnotami priemerného tepelného pocitu.



Obr. 8.16 Tabuľka prepočtu tepelného pocitu a tepelného komfortu od respondentov na hodnoty MTV

Z vyhodnotenia môžeme vidieť že tvar krivky priemerného pocitu od respondentov (takmer zhodná s krivkou prepočítaného MTV) je takmer totožná s tvarom krivky MTV manekýna Newtona, je však posunutá o určitú hodnotu MTV dohora. Tento posun môžeme podľa obrázkov pozorovať prevažne na hrudníku, pažiach, rukách a predkolení a je pravdepodobne spôsobený efektom vyhrievaných sedačiek, čím sa vlastne potvrdzuje zmysel ich používania. Ľudia vďaka vyhrievaným sedačkám uvádzali vyššie hodnoty tepelného pocitu aj na nekontaktných častiach tela. Tento efekt bol pri teplotách 16 °C, 18 °C a 20 °C vítaný a odzrkadľuje sa na krivke pre priemerný tepelný komfort. Pri teplote 24 °C už bolo vyhrievanie príliš silné a respondenti ho hodnotili ako nekomfortné - krivka tepelného komfortu sa pohybuje na nižších hodnotách oproti ostatným teplotám.

9 FINÁLNY NÁVRH TESTOVACEJ PROCEDÚRY PRE IHVAC

Tento návrh bude použitý pre testovanie a kalibráciu inovatívneho systému iHVAC, ktorého princíp bol naznačený v kapitole 6.3. Koncept tohto návrhu je postavený na poznatkoch a skúsenostiach zistených počas fázy jedna a dva a bude teda vychádzať z testovania v druhej fáze, ktoré bolo komplexnejšie zamerané. Kalibrácia senzorov bude prebiehať v klimacomore pri minimálne troch rôznych T_{eq} okolia, pričom senzory budú uchytené „na voľno“ na rovinnej podložke. Následne sa senzory zabudujú do interiéru vozidla Škoda Octavia III, ktoré bude umiestnené do vnútra klimacomory a pomocou manekýna a respondentov sa bude overovať správnosť funkcie senzorov a systému ako celku.



Obr. 9.1 Oficiálne logo inovatívneho HVAC systému vyvíjaného na VUT v Brne v spolupráci so ŠKODA AUTO a.s.

Toto testovanie bude prebiehať minimálne pri už použitých štyroch rôznych ekvivalentných teplotách. Taktiež bude nutné použiť minimálne dva druhy testovacieho odevu pre manekýna a respondentov – napríklad letný a zimný odev (TOMA, 2014). Dôležité bude tiež zistiť, ako senzory ekvivalentnej teploty reagujú napríklad na zvýšenú rýchlosť prúdenia vzduchu (z otvorov vzduchotechniky v automobile) a ich správanie pri spustení iných, už nainštalovaných systémov (Climatronic) v automobile. Preto budú testy prebiehať aj pri zvýšenej práci ventilácie, klimatizácie, vykurovania alebo vyhrievaných sedačiek. Príklad predbežných testovacích kombinácií je na obrázku 9.2.

Statické podmienky				Dynamické podmienky				
Typ odevu	T_{eq} okolia	simulácia slniečného žiarenia	T_{eq} v aute	T_{eq} okolia = T_{eq} v aute	simulácia slniečného žiarenia	Zapnuté systémy po štarte testu	T_{eq} v aute po skončení testu	
letný	30	ANO	18	30	ANO	klimatizácia + ventilácia	24	
			24					NIE
			30					
		18						
		NIE	24					
			30					
prechodný	15	ANO	15	15	ANO	vykurovanie + ventilácia vzduchu	20	
			20					NIE
			25					
		15						
		NIE	20					
			25					
zimný	-5	ANO	8	-5	ANO	vykurovanie + vyhrievané sedačky + ventilácia	16	
			16					NIE
			24					
		8						
		NIE	16					
			24					

Obr. 9.2 Možné testovacie prípady a ich kombinácie pri teste systému iHVAC

Z tabuľky (Obrázok 9.2) je zrejme, že testy budú prebiehať v statických aj dynamických podmienkach. Testy v statických podmienkach budú prebiehať tak, že respondenti budú usadení do automobilu, pričom budú dopredu zvolené (no dobrovoľníkom neznáme) ekvivalentné teploty okolia aj vnútra kabíny a respondenti budú po dobu 30 min hodnotiť ich pocity. Naopak pri dynamických podmienkach bude kabína automobilu stabilizovaná na ekvivalentnú teplotu okolia (T_{eq} okolia = T_{eq} v aute). Po usadení dobrovoľníkov do kabíny bude auto naštartované, budú spustené funkcie systému Climatronic a testovacie osoby budú teda hodnotiť meniace sa prostredie v kabíne po dobu minimálne 30 min. Hodnoty ekvivalentnej teploty v aute na konci sa líšia s ohľadom na testovací odev. Pre zimný odev napríklad stačí $T_{eq} = 16$ °C pre dosiahnutie tepelného komfortu, avšak pri letnom odeve je dosiahnutý komfort až niekde na hranici $T_{eq} = 24$ °C. Hodnoty zistené od tepelného manekýna, testovacích osôb a senzorov ekvivalentnej teploty iHVAC systému by sa mali ideálne zhodovať.

Z výsledkov uvedených vo vyhodnotení jednotlivých fáz je zrejme, že etalónovým meradlom pre kalibráciu senzorov ekvivalentnej teploty pre systém iHVAC bude tepelný manekýn, pretože pracuje s dostatočnou presnosťou a dokáže zastúpiť väčšiu vzorku respondentov. Meraniu s testovacími osobami však nikdy nie je možné úplne vynechať, ale naopak ma nezastupiteľnú úlohu pri overovaní predchádzajúcich testov. Množstvo týchto testovacích osôb však nemusí byť také veľké, aké by bolo treba pri práci bez tepelného manekýna. Na testovanie bude použitý dotazník pre vyhodnocovanie tepelného komfortu z testovacej fázy 2 (Obr. 7.9 a Obr. 7.10), ktorý sa pri testovaní dobre osvedčil.

Súhrn hlavných poznatkov pre prípravu testu

- *Jednotný odev testovacích osôb* – je dôležité dodržať jednotný odev, ako respondentov tak aj manekýna Newtona, aby sme mohli vyhodnotiť tepelný komfort na každej časti tela relevantne. Pri tvorbe diagramu komfortných zón je totiž v rovnici (11) zahrnutý aj tepelný odpor odevu, ktorý zásadne ovplyvňuje tvar diagramu, výpočet ekvivalentnej teploty a vnímanie tepelného stavu prostredia.
- *Vylúčenie vplyvu jedla, alkoholu, chorôb, zvýšenej aktivity*– je nutné z pohľadu fungovania metabolizmu tela. Po jedle ľudské telo trávi potravu, a tým tvorí viac tepla ako zvyčajne. Po športovom výkone vykazujú ľudia vyššie hodnoty MTV ešte 2 až 3 hodiny po skončení činnosti.
 - *Testovacie subjekty rovnomerne rozložené podľa pohlavia a veku* – toto rozloženie je dôležité z pohľadu rôznorodého vnímania tepelného komfortu ľuďmi. Z výsledkov bakalárskej práce (TOMA, 2014) sme zistili, že napríklad ženy sú všeobecnejšie viac zimomravé než muži a seniori sú zimomravejší než mladší ľudia, čo je výsledkom rôznych „výkonov“ metabolizmu pohlaví a ľudí rozdielneho veku.
- *Zabezpečiť motiváciu respondentov*– pri testovaní sme narazili na problém s množstvom respondentov. Keďže testy druhej fázy trvali tri pracovné dni, množstvo dobrovoľníkov odmietlo účasť kvôli pracovnej vyťažnosti. Do budúca je potrebné uvažovať s finančnou odmenou pre testovacie osoby, ktorá by pokryla aspoň časť

ušlej mzdy počas doby trvania testov, alebo by motivovala väčšiu skupinu študentov možnosťou privyrobiť si.

- *Zabezpečiť zaškolenie pre respondentov pred „ostrým“ testom* – toto zaškolenie sa osvedčilo pri druhej fáze testovania, kde zaškolený respondenti vyplňovali dotazníky oveľa rýchlejšie a bez väčších chýb, ako zamernenie stupníc pre tepelný pocit a tepelný komfort a podobne. Taktiež je potrebné vysvetliť testovacím osobám význam týchto stupníc, aby ich vedeli pri teste správne používať.
- *Neznáme klimatické podmienky testu* – sú dôležité aby respondenti dopredu nepoznali teplotu v testovacom priestore, pretože by to spôsobilo určité podvedomé očakávanie a tým ovplyvnenie testu.
- *Usadenie testovacích osôb do štvorca* – toto rozmiestnenie je vhodné preto, že simuluje usadenie ľudí v automobile. Druhou výhodou je fakt, že ľudia si navzájom do dotazníkov nevidia a ani nemôžu medzi sebou komunikovať, čo zabraňuje vzájomnému ovplyvňovaniu.
- *Potrebný čas na samotný test je minimálne 30 min* – tento čas je minimum pre ustálenie testovacej osoby v klimatických podmienkach testu, čím zabezpečíme vyhodnocovanie daných klimatických podmienok a nie dynamickej zmeny (pokiaľ ju teda nechceme priamo merať).

10 ZÁVER

Cieľom tejto diplomovej práce bolo navrhnúť metodiku testovania pre inovatívny systém HVAC (heating, ventilation and air-conditioning), ktorý vyvíja VUT v spolupráci so Škoda Auto a.s. Ďalej sme mali za úlohu zistiť vzájomný vzťah výsledkov pri meraní tepelného komfortu pomocou tepelného manekýna a testovacích osôb.

V teoretickej časti práce som uviedol základnú definíciu tepelného komfortu a vplyvov, ktoré na neho vplyvajú, napríklad princíp prenosu tepla do okolia, základy termoregulácie ľudského tela a iné. Ďalej som uviedol spôsoby merania tepelného komfortu a stupnice, ktoré slúžia na jeho vyhodnotenie. Na záver rešeršnej časti som zhrnul informácie o tepelnom manekýnovi Newtonovi, o histórii tepelných manekýnov celkovo a uviedol som aj princíp, na ktorom by mal fungovať nový systém iHVAC.

V praktickej časti sme pristúpili k samotnému meraniu, ktoré bolo rozdelené do dvoch fáz. V prvej fáze sme sa snažili zachytiť a vyhodnotiť priebeh MTV pri dynamickej zmene prostredia. Tohto testu sa zúčastnili len štyria dobrovoľníci a prebiehal pre tri rôzne ekvivalentné teploty. Po vyhodnotení tejto časti sme pristúpili k viacerým zmenám v metodike merania tepelného komfortu, ako aj k úprave dotazníka pre tepelný komfort. V tomto upravenom dotazníku bol zavedený tepelný pocit a tepelný komfort pre každú časť tela zvlášť, pretože sa ukázalo, že MTV stupnica nie je vhodná pre hodnotenie tepelného komfortu, ak dochádza k dynamickým zmenám vo vnútri ľudského tela – napríklad prechod z podchladenia do tepla.

V druhej fáze sme testovali kontaktný komfort na vyhrievaných sedačkách od firmy ŠKODA AUTO a.s. Tohto testu sa zúčastnilo 20 respondentov a bol použitý aj manekýn Newton. Meranie prebiehalo v skupinách štyroch dobrovoľníkov + Newton a to pri štyroch rôznych ekvivalentných teplotách vždy 30 min počas troch týždňov. V tejto fáze sme okrem odborných poznatkov získali aj znalosti a skúsenosti s prácou a organizáciou väčšej skupiny ľudí.

V závere práce som sa venoval vyhodnocovaniu druhej fázy testovania, vyvodením záverov z meraní a návrhom finálneho návrhu pre testovanie tepelného komfortu a kalibrácie iHVAC systému. Z výsledkov sme zistili, že tepelný manekýn Newton je vhodným etalónovým meradlom pre kalibráciu senzorov ekvivalentnej teploty nového systému a spolu s testovacími osobami bude slúžiť aj na overenie správnej funkčnosti systému po jeho integrácii do automobilu Škoda Octavia III. Toto zistenie vychádza z výsledkov vzájomnej korelácie výsledkov od manekýna a respondentov v prvej fáze ale aj fáze druhej, v ktorej bol tvar kriviek takmer rovnaký, iba posunutý pôsobením vyhrievaných sedačiek.

Do budúcnosti by sa mohla práca rozšíriť o porovnanie výsledkov podľa manekýna Newtona, testovacích osôb a samostatných plošných senzorov ekvivalentnej teploty. Toto testovanie je vlastne ďalším krokom v riešení projektu iHVAC, pri ktorom budú použité nami zistené poznatky.

LITERATÚRA

- [1] AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATION AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS (2001) *ASHRAE Handbook Fundamentals*. Atlanta, USA.
- [2] BEDFORD, T. (1936) *The Warmth Factor in Comfort at Work. A Physiological Study of Heating and Ventilation* (76).
- [3] ČSN ISO 14505. (2007) *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech.*, Český normalizační institut.
- [4] ČSN EN ISO 14505-2 *Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech - Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty*. Český normalizační institut, srpen 2007.
- [5] ČSN ISO 7726. (2002) *Ergonomie tepelného prostředí - Přístroje pro měření fyzikálních veličin.*, Český normalizační institut.
- [6] ČSN EN ISO 7730 *Mírné tepelné prostředí - Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody*. Český normalizační institut, 1997.
- [7] ENDRUSICK L.T., STROSCHEIN A.L. a GONZALEZ R.R. *Manikin history*. Dostupné z <http://www.thermetrics.com/solutions/manikin-history>
- [8] FANGER, P. O. (1970) *Thermal comfort : analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [9] FIALA, D. *Dynamic simulation of human heat transfer and thermal comfort*. Ph.D. Thesis, Institute of Energy and Sustainable Development. Leicester, De Montfort University, 1998.
- [10] FIŠER, J. (2013) *Tepelný manekýn Newton*. Dostupné z <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelnymankyn-newton>
- [11] FIŠER, J. (2013) *Klimatická komora*. Dostupné z www.energetickeforum.cz/modules/marwel/index.php?rewrite=fsi-vut-v-brne%2Flaboratore%2Fklimaticka-komora&page=2
- [12] FOJTLÍN, M. *Stanovení součinitelů přenosu tepla radiací a konvekcí z povrchu tepelného manekýna*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 63s. Vedoucí diplomové práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D.

- [13] JANOTKOVÁ E. *Technika prostředí*. Brno: Skripta VUT Brno, 1991.
- [14] LINHART, Jiří. *Termomechanika – Stručné učební texty*, Plzeň: ZČU, 2012. 103s
- [15] Manuál tepelný manekýn Newton, *Measurements Technology Northwest*, 2010
- [16] NILSSON, H. O. (2004) *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Ph.D. Thesis, University of Gävle.
- [17] PAVELEK, M. a ŠTĚTINA, J. (2007) *Experimentální metody v technice prostředí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství, CERM.
- [18] PAVELEK, M. a kol. (2003) *Termomechanika*. Skripta, FSI, VUT Brno.
- [19] POKORNÝ, Jan. *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2012. Disertační práce 164 s., 3 přílohy. Vedoucí práce prof. Ing. Miroslav JÍCHA, CSc.
- [20] TOMA, R. *Vytvoření databáze typických skladeb oblečení pro kabiny automobilů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 53 s. Vedoucí bakalářské práce Bc. Ing. Jan Fišer, Ph.D..
- [21] VOKÁČ, L. (2015) *KDieselgate po dvou týdnech. O co v aféře jde?*. Dostupné z http://ceskapozice.lidovky.cz/dieselgate-po-dvou-tydnech-o-co-v-afere-jde-fgs-/tema.aspx?c=A151006_120814_pozice-tema_houd
- [22] VOMELA, J. a kol. (2014) *KFyziologie člověka pro studenty bakalářských oborů Tělesné výchovy*. Dostupné z <https://publi.cz/books/151/Cover.html>

ZOZNAM POUŽITÝCH ZNAKOV A SKRATIEK

Skratky

OTTP	Odbor termomechaniky a techniky prostredí, VUT Brno
FSI	Fakulta strojného inžinierstva VUT Brno
HVAC	Heating, ventilation, air-conditioning – kúrenie, ventilácia, klimatizácia
iHVAC	inovatívny systém HVAC
DKZ	Diagram komfortných zón
MTV	Mean Thermal Vote, stredný tepelný pocit
ASHREA	American Society of Heating, Refrigerating and Air-conditioning Engineering
PMV	Index stredného výsledku hodnotenia tepelného pocitu
PPD	Index percentuálneho podielu nespokojných respondentov
USARIE	Army research insitute of enviromental medicine - ústav enviromentálnej medicíny americkej armády
CFD	Computational Fluid Dynamic, výpočtová mechanika tekutín
TSENS	Index tepelného pocitu
TDISC	Index tepelného diskomfortu
DTS	Index dynamického tepelného pocitu
DKZ	Comfort zones diagram – diagram komfortných zón
AC	Air-conditioning – klimatizácia

Symboly

T_{eq}		
\dot{Q}_d	tepelný tok odvedený dýchaním	[W]
\dot{Q}_k	tepelný tok odvedený konvekciou	[W]
\dot{Q}_r	tepelný tok odvedený radiáciou	[W]
\dot{Q}_v	tepelný tok odvedený vyparovaním	[W]
\dot{Q}_{ved}	tepelný tok odvedený vedením	[W]
\dot{Q}	tepelný tok vyprodukovaný človekom	[W]
R_{cl}	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]
f_{cl}	stupeň pokrytia tela odevom (plochy oblečený/nahý)	[-]
d_{Tk}	hrúbka vrstvy odevu	[m]
d_{vzd}	hrúbka vrstvy vzduchu	[m]
w	rýchlosť prúdenia vzduchu	[m.s ⁻¹]
t_a	teplota okolitého vzduchu	[°C]
t_r	stredná radiačná teplota	[°C]
φ	relatívna vlhkosť	[-]
λ	súčiniteľ tepelnej vodivosti	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
S	plocha prenosu tepla	[m ²]
$\frac{dT}{dx}$	teplotný gradient, os x značí smer šírenia tepla	[K.m ⁻¹]
R	tepelný odpor odevu	[m ² .K.W ⁻¹]

λ	tepelná vodivosť odevu – tk, vzduchu – vzd	[W.m ⁻¹ .K ⁻¹]
\dot{Q}_k	tepelný tok konvekciou	[W]
α	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
S	plocha povrchu	[m ²]
t_s	teplota povrchu steny daného telesa	[K]
t_t	teplota okolitého média v dostatočnej vzdialenosti od povrchu	[K]
a	absorbivita	[-]
r	reflexivita	[-]
t	transmisivita	[-]
F_{1-2}	uhlový faktor medzi telesom (1) a (2)	[-]
ε_1	emisivita telesa (1)	[-]
σ	Stefan – Boltzmannova konštanta,	[W.m ⁻² .K ⁻⁴]
S_1	plocha telesa (1)	[m ²]
T_1	teplota povrchu telesa (1)	[K]
S_2	plocha telesa (1)	[m ²]
p_a	parciálny tlak vodných par vo vzduchu	[Pa]
p_a''	parciálny tlak nasýtených vodných par vo vzduchu	[Pa]
λ_{H_2O}	merné skupenské teplo výparné vody	[J.kg ⁻¹]
m	hmotnosť vody na povrchu telesa	[kg]
Re	súčiniteľ tepelného odporu vyparováním	[m ² .Pa.W ⁻¹]
t	čas	[s]
\dot{q}_{w1}	merný tepelný tok suchým vyparováním	[W.m ⁻²]
p_a	parciálny tlak vodných par v okolitom vzduchu	[Pa]
\bar{t}_s	stredná teplota pokožky	[°C]
T_{eq}	ekvivalentná teplota segmentu	[K]
T_{sk}	povrchová teplota segmentu	[K]
R_{ct}	tepelný odpor odevu a medznej vzduchovej vrstvy na segmente	[m ² .K.W ⁻¹]
h_{ct}	súčiniteľ prestupu tepla	[W.m ⁻² .K ⁻¹]
\dot{q}	tepelný tok zo segmentu	[W.m ⁻²]
ADU	plocha ľudského tela podľa Duboisa	[m ²]
M	hodnota metabolizmu	[W.m ⁻²]
\dot{V}_{CO_2}	objemové množstvo vyprodukovaného CO ₂	[l.min ⁻¹]
\dot{V}_{O_2}	objemové množstvo spotrebovaného O ₂	[l.min ⁻¹]