

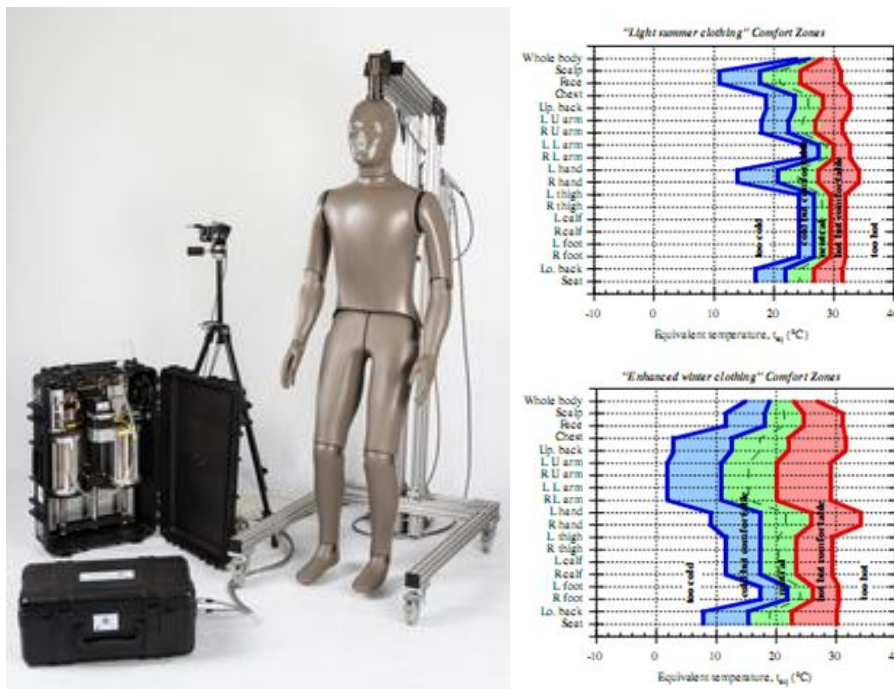
Thermal Comfort Analyzer

(TCA – Analyzátor tepelného komfortu)

Apollo ID: 26790
Datum: 28.8.2013
Typ projektu: R–software
Autoři: POKORNÝ, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M.

Popis a využití programu

Program **Thermal Comfort Analyzer (TCA)** pro **vyhodnocení tepelného komfortu pomocí tepelného manekýna Newton** umožňuje automatické zpracování naměřených dat a vyhodnocení tepelného komfortu dle normy ČSN ISO 14505-2 „*Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech – Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty*“. Tepelný manekýn Newton od firmy Measurement Technology NW je 34 zónová vyhřívaná figurína, která umožňuje měření tepelných toků při konstantní teplotě, které jsou následně přepočteny na lokální ekvivalentní teploty a vyneseny do diagramu komfortních zón dle (Nilsson, 2004) viz obr. 1. Ovládací software ThermDac od téže firmy je schopen průběžně zaznamenávat měřené veličiny (tepelné toky, teploty) do výstupního souboru ve formátu .csv.



Obr. 1 Tepelný manekýn Newton s příslušenstvím a Diagram komfortních zón dle ČSN ISO 14505-2 pro letní a zimní oděv

Hodnoty tepelných toků jsou zpracovávány programem TCA jako klouzavý průměr s uživatelem zadanou vzorkovací frekvencí a posunem. Hodnoty tepelných toků jsou programem přepočteny na lokální ekvivalentní teploty jednotlivých částí těla a dle ČSN ISO 14505-2, viz níže je vyhodnocen tepelný komfort. Výsledkem jsou zpracovaná naměřená data a zejména jejich vizualizace: diagram komfortních zón s vynesnými lokálními ekvivalentními teplotami. Program umožňuje znázornovat diagram komfortních zón přímo během měření s tepelným manekýnem a také exportovat a přehrát zpracované výsledky pomocí sekvence .png obrázků, z které lze dodatečně vytvořit videosekvenci výsledků daného měření.

Instalace programu

„Thermal Comfort Analyzer“ je samospustitelná aplikace vytvořena v Matlabu 2012b. Po rozbalení archívu TCA_1_0.zip je nutné nainstalovat MCR compiler 2012b (32bit. nebo 64 bit. verze dle PC). Po nainstalování MCR je možné program spustit souborem TCA.exe. Pokud uživatel má zájem sledovat průběh běhu programu v konzoli, pak lze program spustit pomocí TCA.bat. Odkaz pro stažení MCR: <http://www.mathworks.com/products/compiler/mcr/>

Technické a programové požadavky

Hardwarové požadavky jsou stanoveny náročností programu MATLAB.

Softwarové požadavky: MATLAB Compiler Runtime (MCR) 2012b (32 nebo 64 bit)

Popis algoritmu: ČSN ISO 14505 – Model komfortních zón¹

Model komfortních zón (Nilsson, 2004) je navržen pro vyhodnocování tepelného komfortu v prostředí kabin dopravních prostředků. Model navazuje na práci (Wyon a kol., 1989), která pojednává o vyhodnocování vnitřního prostředí kabiny dopravních prostředků pomocí tepelného manekýna. Metodika vyhodnocování tepelného komfortu v kabinách s využitím tepelného manekýna a komfortních zón je součástí normy (ČSN ISO 14505, 2007).

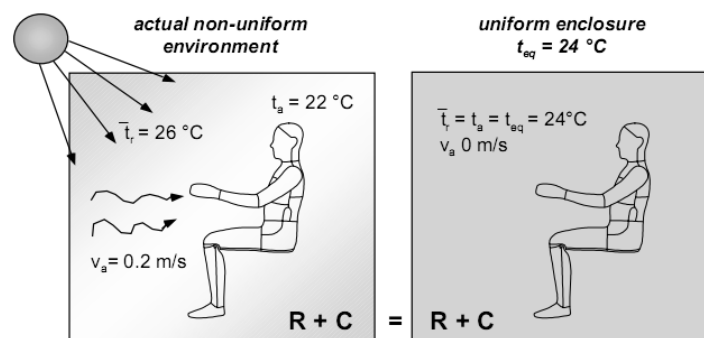
Princip ekvivalentní teploty

Metodika ekvivalentní teploty umožňuje popsat asymetrické působení prostředí na člověka a vyhodnotit jeho vnímání (tepelný pocit) a spokojenost (tepelný komfort). Tepelný komfort je vyhodnocen na základě určení 18 lokálních ekvivalentních teplot příslušných jednotlivým částem lidského těla. Ekvivalentní teplota pro celé tělo je definována pomocí váženého průměru lokálních ekvivalentních teplot, kde váhami jsou plochy jednotlivých segmentů. Důvod, proč se zavádí veličina ekvivalentní teplota, spočívá ve zjednodušení vyhodnocování různých prostředí. Díky sjednocení více faktorů prostředí do jedné veličiny (sluneční záření, konvekce, radiace) lze porovnávat různá nehomogenní prostředí z hlediska vlivu prostředí na tepelné ztráty člověka jednotným způsobem. Ekvivalentní teplota T_{eq} je vypočtena dle následujícího vztahu

¹ Tato kapitola je citována z (Pokorný, 2012)

$$T_{eq} = T_s - \frac{\dot{q}_{real}}{h_{cal}} = T_s - (R_{cl} + R_a) \cdot \dot{q}_t \quad (1)$$

kde T_s je povrchová teplota tepelného manekýna, který je vyhříván na všech segmentech na teplotu 34 °C. $R_{cl} + R_a = 0,155 \cdot I_{cl} + R_a$ je celkový tepelný odpor, který zahrnuje tepelný odpor oděvu R_{cl} a tepelný odpor konvekce vzduchu $R_a = 0,1395 \text{ m}^2 \cdot \text{K}/\text{W}$. \dot{q}_t je měrný tepelný tok citelného tepla (radiace a konvekce). $\dot{q}_{real} [\text{W}/\text{m}^2]$ je měrný tepelný tok mezi povrchem manekýna a skutečným nehomogenním prostředím a $h_{cal} [\text{W}/\text{m}^2\text{K}]$ je součinitel přenosu tepla získaný z virtuální kalibrace v homogenních podmínkách.



Obr. 2 – Princip ekvivalentní teploty, převzato z (Nilsson, 2004) .

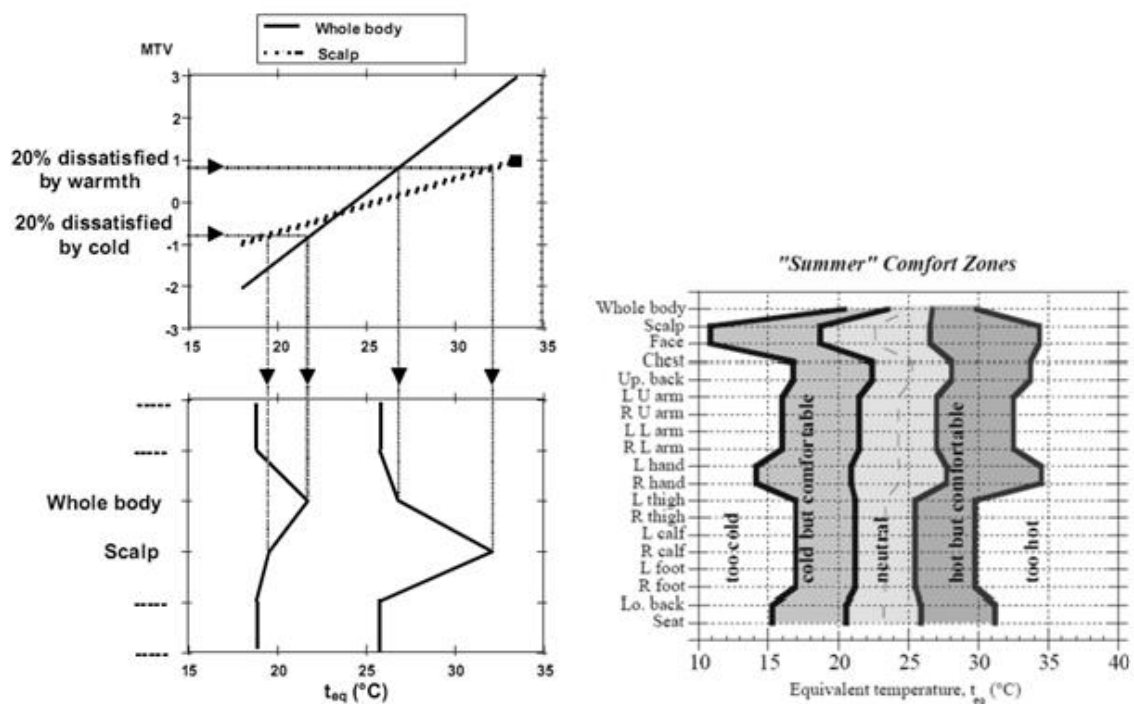
Na obr. 2 je znázorněn princip ekvivalentní teploty s názorným příkladem. Ve skutečném nehomogenním prostředí (v ukázkovém případě střední radiační teplota 26 °C, teplota vzduchu 22 °C a střední rychlost proudění vzduchu 0,2 m/s) je umístěn tepelný manekýn se specifikovaným oděvem a metabolickou produkcí tepla. Z povrchu tepelného manekýna je odebrán měrný tepelný tok konvekce a radiací (včetně slunečního záření) $\dot{q}_{real} = \dot{q}_r + \dot{q}_c = R + C$. Díky principu ekvivalentní teploty lze toto nehomogenní prostředí převést na homogenní prostředí, které je definované pouze ekvivalentní teplotou (v ukázkovém případě $T_{eq} = 24 \text{ °C}$). Ekvivalentní teplota homogenního prostředí je určena na základě předpokladu totožných tepelných toků \dot{q}_{cal} mezi tepelným manekýnem a skutečným nehomogenním a myšleným homogenním prostředím. Homogenní prostředí je definováno jako prostředí bez slunečního záření s nulovou rychlostí proudění vzduchu a s totožnými teplotami vzduchu a stěn (střední radiační teplotou). Především lze zobecnit i pro případ lokálních ekvivalentních teplot. Jediný rozdíl je, že veličiny T_{eq} , $R_{cl} + R_a$, \dot{q}_t v rovnici (1) jsou uvažovány pro jednotlivé segmenty zvlášť.

Diagram komfortních zón

Každé ekvivalentní teplotě přísluší pět komfortních zón (nepříjemně teplo, teplo ale příjemně, neutrálně, chladno ale příjemně, nepříjemně chladno). Komfortní zóny jsou definovány diagramem komfortních zón, který vyjadřuje vnímání tepelné komfortu v určitém prostředí. Diagramy komfortních zón jsou definovány na základě subjektivního hodnocení dotazovaných

osob a vyjadřují lidské preference pro jedno dané ustálené prostředí, pro jednu aktivitu a pro daný oděv. Diagramy komfortních zón vznikly na základě korelace výsledků

měření pomocí tepelného manekýna a lidských subjektů. Na obr. 3 je znázorněn způsob jejich tvorby a ukázka výsledného diagramu komfortních zón pro letní oděv. Dotazované osoby hodnotily střední lokální tepelný komfort pomocí indexu MTV (Mean Thermal Vote), který je definován podobně jako Bedfordova stupnice tepelného komfort. Na základě regresní analýzy vlastních měření Nilsson určil závislost indexu MTV na ekvivalentní teplotě pro jednotlivé části těla. Podle hodnoty indexu MTV jsou stanovené hranice komfortních zón vyjádřené formou ekvivalentní teploty. Neutrální komfortní zóna byla stanovena pro index MTV v intervalu od -0,8 do +0,8, což odpovídá 80 % spokojených lidí s lokálním tepelným pocitem. Hranice mezi neutrální komfortní zónou a zónou příjemně chladno a příjemně teplo byla stanovena na -1,5 respektive +1,5. Jestliže je index MTV při dané ekvivalentní teplotě nižší než -1,5, pak je dané prostředí příliš chladné. Naopak jestliže je index MTV při dané ekvivalentní teplotě větší než 1,5, pak je dané prostředí příliš teplé. Diagram komfortních zón tedy udává doporučené hodnoty lokální ekvivalentní teploty jednotlivých částí lidského těla.



Obr. 3 – Tvorba komfortních zón pro dané prostředí, ukázka výsledků regrese pro celé tělo a hlavu (vlevo), výsledný diagram komfortních zón pro kabinu automobilu v letním období, převzato z (Nilsson, 2004)

Postup vyhodnocení nehomogenního prostředí pomocí modelu komfortních zón

Výhodou modelu je jeho snadné použití jak při vyhodnocování prostředí pomocí měření, tak i pomocí CFD simulací. Jednotlivé ekvivalentní teploty lze totiž určit pomocí skutečného i virtuálního tepelného manekýna. Oba přístupy mají obdobné fáze:

1) Kalibrační měření / simulace

V klimatické komoře s homogenním prostředím 24 °C se umístí tepelný manekýn vyhříváný na teplotu „pokožky“ 34 °C, který je oblečený do oděvu s definovanými lokálními

tepelnými odpory oděvu. Proveďte se měření měrných tepelných toků \dot{q}_{cal} z jednotlivých segmentů a dle vztahu se určí kalibrační součinitel přenosu tepla radiací a konvekcí.

$$h_{cal} = \frac{\dot{q}_{cal}}{T_s - T_a} = \frac{\dot{q}_{cal}}{34 - 24} \quad [Wm^{-2}K^{-1}] \quad (2)$$

2) Vlastní měření / simulace

Ve skutečném nehomogenním prostředí je nutné změřit skutečné měrné tepelné toky \dot{q}_{real} a rovněž znát povrchové teploty manekýna T_{sk} , který je opět vyhříváný na teplotu „pokožky“ 34 °C. Pro výpočet jednotlivých ekvivalentních teplot se využije vztah (1), v kterém rovněž vystupuje kalibrační součinitel přenosu tepla radiací a konvekcí h_{cal} spočtený v předchozím kroku.

3) Vyhodnocení

V závislosti na oděvu tepelného manekýna je nutné zvolit z normy ISO 14505-2 příslušný diagram komfortních zón. Vynesením všech lokálních ekvivalentních teplot do diagramu komfortních zón je vyhodnocen lokální tepelný komfort, čímž je obdržena celkový obraz o tepelném komfortu v nehomogenním prostředí. Lokální tepelný komfort je zajištěn v případě, že lokální ekvivalentní teplota přísluší neutrální zóně. Celkový tepelný komfort je zajištěn právě tehdy, když celková ekvivalentní teplota přísluší neutrální zóně a žádná lokální ekvivalentní teplota nevytváří v zóně příliš chladno či příliš teplo.

Omezení a rozsah použitelnosti

Diagramy komfortních zón uvedené v normě ČSN ISO 14505-2 jsou navrženy pro vyhodnocování prostředí kabin dopravních prostředků zejména automobilů. Zóny jsou dle normy platné pro lehkou aktivitu sezení, kdy energetický výdej člověka je $M = 1,2$ až $1,5$ met, tj. 70 až 90 W/m². Diagramy jsou definovány zvlášť pro letní a zimní oděv. Typický tepelný odpor I_{cl} letního oděvu se pohybuje okolo hodnot 0,6 clo (0,093 m²K/W) a zimního oděvu se pohybuje okolo 1 clo (0,155 m²K/W). Nevýhodou modelu je, že diagramy komfortních zón lze použít pouze pro stacionární podmínky a nelze je použít pro jiné parametry oděvu a energetický výdej člověka než byly sestaveny. V roce 2007 Nilsson na základě dalších vlastních měření stanovil závislost hodnoty MTV na tepelném odporu oděvu pomocí regresních koeficientů a , b , viz rovnice (3) a (Nilsson 2007 a,b).

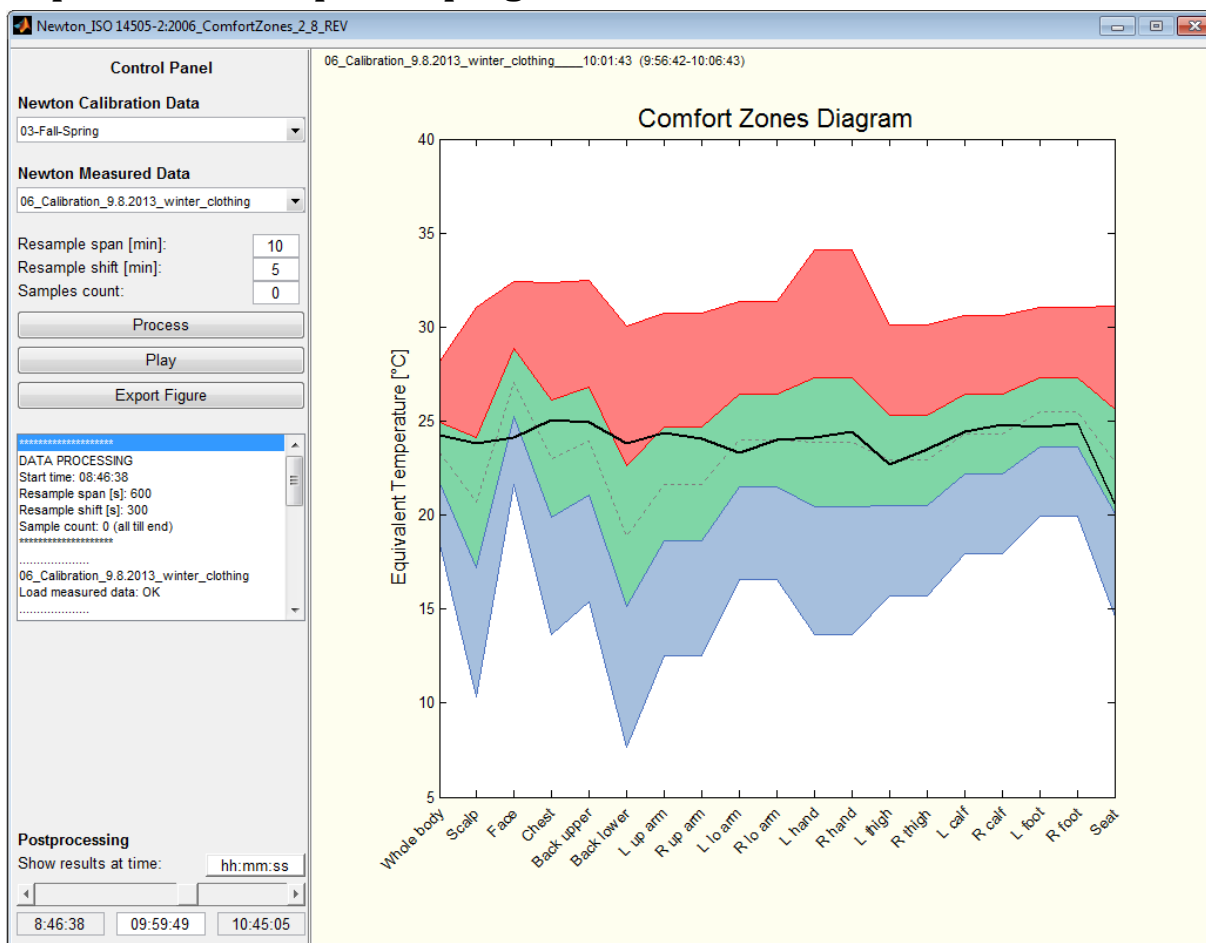
$$T_{eq} = T_{sk} - (R_{cl} + R_a) \cdot (a + b \cdot MTV) \quad (3)$$

Model komfortních zón po této úpravě lze použít pro různé oděvy o tepelném odporu $I_{cl} = 0$ až 1 clo. Za předpokladu tepelného odporu vzduchu konvekcí $I_a = 0,9$ clo je rovnice (3) použitelná pro celkový tepelný odpor (oděvu a vzduchové vrstvy) od 0,9 do 1,9 clo, neboli $R_{cl} + R_a = 0,155 \cdot I_{cl} + I_a = 0,139$ až $0,2945$ Wm⁻²K⁻¹.

V případě použití modelu komfortních zón pro jiné hodnoty tepelného odporu oděvu a energetického výdeje člověka by musel být vytvořen nový diagram komfortních zón, což by

vyžadovalo provést další měření s tepelným manekýnem a testovanými osobami. Vzhledem k úzkému zaměření modelu na prostředí kabin automobilů je však rozsah hodnot oděvu a činnosti dostačující. Předností modelu komfortních zón je jeho jednoduchost matematického zápisu a univerzálnost na široké spektrum nehomogenních prostředí.

Popis nastavení a použití programu



Obr. 4 Grafické rozhraní programu *Thermal Comfort Analyzer*

Režimy aplikace *Thermal Comfort Analyzer*

1. Post-processing – zpracování naměřených dat a vyhodnocení tepelného komfortu s možností analýzy a tvorby obrázkových sekvencí z měření.
2. Real-time – okamžitá vizualizace měření s tepelným manekýnem včetně vyhodnocování komfortu
3. Kalibrace – režim tvorbu diagramů komfortních zón v závislosti na oděvu tepelného manekýna (diagramy pro letní, zimní,.. oděv). Diagramy jsou generovány na základě zpracování kalibračních měření a vypočteného souboru `h_cal.csv`.

Program se spouští souborem CZ.bat (včetně konzole), případně CZ.exe. Po spuštění aplikace si uživatel může na kontrolním panelu (obr. 4 vpravo nahoře) vybrat kalibrační data **Newton Calibration Data**, a naměřená data tepelným manekýnem Newton určená ke zpracování **Newton Measured Data**. Vstupní data jsou načítány ze složky **Newton**. Po vybrání příslušných položek v menu se na základě kalibračních dat vygeneruje příslušný diagram komfortních zón, a otevře vybrané měření. Kalibrační soubor „hcal_.csv“ ve složce **Calibration/označení_kalibrace** obsahuje hodnoty naměřených součinitelů přestupů tepla během kalibrace. Naměřená data jsou ve složce **Measurement/označení_měření** v souboru „Newton_.csv“. Názvy .csv souborů jsou doporučené a mohou se jmenovat i jinak, ale v případě více csv souborů v dané složce je nutné toto označení dodržet².

Před vlastním vygenerováním výsledků je nutné, aby uživatel nastavil **Resample span** tj. převzorkovací frekvenci. Její doporučená hodnota je 10 min, tzn. data reprezentují průměrnou hodnotu v intervalu 10 min (-5 až +5 min od aktuálního času). Dalšími parametrem je **Resample shift**, který definuje časový posun mezi jednotlivými zpracovanými vzorky. Pokud uživatel nastaví menší hodnotu než je časový krok vlastního měření, program automaticky nastaví hodnotu tohoto časového kroku. **Samples count** definuje počet zpracovaných vzorků, pokud ho uživatel nastaví na hodnotu 0, znamená to, že budou zpracovány veškerá data od zvoleného času až po konec měření. Aktuální čas lze měnit pomocí posuvníku (kontrolní panel vlevo dole), případně zadáním požadovaného času do prostředního editboxu pod posuvníkem. Časová hodnota lze zadávat jak v sekundách, tak i ve formátu hh:mm:ss (hodiny:minuty:sekundy).

Tlačítkem **PROCESS** se spustí vlastní zpracování dat, které probíhá na základě výše zmíněných parametrů. Tlačítkem **PLAY** lze automaticky přehrát zpracované výsledky v diagramu komfortních zón. Pokud uživatel zatrhne při přehrávání výsledků tlačítko **EXPORT FIGURE**, budou se zobrazované diagramy rovněž ukládat do souboru .png a příslušné složky ve složce **Results**. Další možností jak procházet zpracované výsledky lokálních ekvivalentních teplot je manuální režim pomocí posuvníku, případně editboxu s časovým údajem. Opět pokud je při manuálním procházení aktivní tlačítko **EXPORT FIGURE** budou vygenerovány příslušné obrázky diagramů do souborů. Tyto obrázky uložené ve složce Results/Video je možné pomocí skriptu png2avi převést na video.

V záhlaví diagramu komfortních zón je vždy uvedeno příslušné měření, a čas (interval), ke kterému je spočten klouzávy průměr výsledných ekvivalentních teplot. **Zpracované výsledky** ekvivalentních teplot jsou uloženy rovněž do souboru .xls ve složce Results. Program rovněž umožňuje pracovat v režimu **Real-time**, který lze aktivovat změnou parametru na 16 řádku v souboru **setup.csv** na hodnotu 1. Real-time režim se liší od běžného tím, že při výběru měření se objeví dialogové okno, kde uživatel zvolí umístění a soubor, do kterého ovládací software tepelného manekýna Newton, tj. ThermDac, ukládá měřené hodnoty. V tomto režimu není funkční volba posuvníkem a volba počtu vzorků, uživatel má pouze možnost zvolit Resample shift a Resample span. Program funguje tak, že po **spuštění** programu tlačítkem **PROCESS** se **aktivuje** také tlačítko **REAL-TIME**, **opětovným** stisknutím tlačítka **REAL-TIME** se zpracování **zastaví**. U právě zpracovaného vzorku je reálný čas horní

² V setup.csv – lze nastavit i jiné znaky pro rozlišení vstupních souborů. UPOZORNĚNÍ: tento soubor musí být vždy přítomen ve hlavní složce programu.

mezi intervalu, $\langle RT-RS, RT \rangle$, kde RS je Resample span [s] RT je aktuální čas. Tj. uživatel vidí zpracované hodnoty v diagramu, které přísluší středovému bodu intervalu $RT-RS/2$, tj. aktuální

diagram je opožděn o $RS/2$ oproti skutečnému času z důvodu definice intervalu podle svého středu.

Struktura adresářů a souborů:

- Newton – naměřená vstupní data
 - Calibration
 - Složka s konkrétním označením kalibrace
 - „hcal_.csv“
 - Measurement
 - Složka s konkrétním označením měření
 - „Newton_.csv“
- Results – zpracované výsledky
 - Složka s konkrétním označením měření
 - Výstupní soubory .png, .xls
- Setup.csv, Setup.mat – soubor obsahující nastavení programu, .csv lze editovat
- TCA.exe, TCA.bat – spouštěcí soubory, .bat spustí aplikaci v konzoli, které se vypisují podrobné zprávy z průběhu řešení
- png2avi.m – nadstavbový skript pro tvorbu videí z vygenerovaných obrázků (POZOR – nefunguje v .exe verzi, nutné pustit v Matlabu)

Popis vstupních souborů:

(Kalibrační data)

- „hcal_.csv“ ve složce Newton/Calibration

Soubor obsahující hodnoty hcal získaných kalibrací tepelného manekýna v klimatické komoře, při teplotě 24 °C. Hodnoty hcal zohledňují a jsou nejvíce závislé na tepelném odporu oděvu, který má na sobě tepelný manekýn. Pro jednotlivé typy oděvu je nutné provést novou kalibraci, tj. získat nový diagram komfortních zón.

(Naměřená data)

- „Newton_.csv“ ve složce Newton/Measurement

Nezpracovaný soubor naměřených dat tepelným manekýnem Newton

(Nastavení programu)

- „Setup csv“ ve složce Modules

Obsahuje nastavení některých funkcí programu např: kvalita exportovaných obrázků, rozsah ekvivalentních teplot v diagramu, barva pozadí diagramu, velikost okna, volba real-time zpracování apod.

Vazba na projekty

Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka TE01020020

Licenční podmínky

Poskytovatel licence na výsledek nepožaduje licenční poplatek.

Kontaktní osoba

Ing. Jan Pokorný, Ph.D. +420 541 143 264, pokorny.j@fme.vutbr.cz

Stažení a používání programu

„Thermal Comfort Analyzer“ je možné stáhnout na stránkách:

<http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/vysledky-vyzkumu>

Literatura

- [1] NILSSON, H. O. (2004) *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Ph.D. Thesis, University of Gävle.
- [2] NILSSON, H. O. (2007a) CFD modeling of thermal manikin heat loss in a comfort evaluation benchmark test. *Proceedings of Roomvent*, Helsinki 13-15 June 2007.
- [3] NILSSON, H. O. (2007b) Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment* 42 4000–4005.
- [4] POKORNÝ, J (2012) *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Disertační práce. VUT Brno, FSI, Odbor termomechaniky a techniky prostředí.
- [5] WYON, D., a kol. (1989) Standard Procedures for Assessing Vehicle Climate with a Thermal Manikin. *SAE Technical Paper* (89004).

Prohlašuji, že popsaný výsledek naplňuje definici uvedenou v Příloze č. 1 Metodiky hodnocení výsledků výzkumu a vývoje v roce 2013 a že jsem si vědom důsledků plynoucích z porušení § 14 zákona č. 130/2002 Sb. (ve znění platném od 1. července 2009). Prohlašuji rovněž, že na požádání předložím technickou dokumentaci výsledku.

V Brně dne 28. srpna 2013.

Ing. Jan Pokorný, Ph.D.