

Vetranie a klimatizácia

návody na laboratórne cvičenia

Ing. Jan Fišer, PhD.

Ing. Jan Pokorný, PhD.

Ing. Martin Vantúch, PhD.

doc. Ing. Andrej Kapjor, PhD.

Žilina 2020



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA

SPOLOČNE BEZ HRANÍC

V rámci projektu: **Výmena odborných poznatkov a skúsenosti z oblastí
energetických systémov**

ITMS2014+: 304011D102



INTERREG V-A
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA

Publikácia bola vydaná s podporou:

Programu **Interreg V-A Slovenská
republika – Česká republika**

Publikácia je súčasťou projektu:

**Výmena odborných poznatkov
a skúsenosti z oblastí energetických
systémov / VOPES**

ITMS2014+: 304011D102



**EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA**

SPOLOČNE BEZ HRANÍC

Projekt je spolufinancovaný:

**Európskou úniou a Európskym fondom
regionálneho rozvoja (EFRR)**

Spoločne bez hraníc

Recenzent: doc. Ing. Radovan Nosek, PhD.

Vydala EQUILIBRIA, s.r.o.

© J. Fišer, J. Pokorný, M. Vantúch, A. Kapjor, 2020

ISBN 978-80-8143-263-7

PREDHOVOR

Skriptá, ktoré práve otvárate, vznikli ako výsledok spolupráce medzi Vysokým učením technickým v Brne a Žilinskou univerzitou v Žiline, ktoré sa spoločne podieľali na projekte Výmena odborných poznatkov a skúseností z oblastí energetických systémov – VOPES – v operačnom programe Interreg. Jedným z cieľov projektu bolo harmonizovať výučbu v oblasti energetiky a prispieť tak k prekonávaniu istých bariér (rôzny vývoj odborov v minulosti, rôzna podpora rozvoja odborov výučby atď.), ktoré stále pretrvávajú na oboch stranách hraníc (ČR – SR). Aby bol text dobre prístupný študentom/kám z oboch štátov sú skriptá vydané v slovenskom a českom jazyku, pričom kolektív autorov zostáva rovnaký. Týmto postupom je naplnená hlavná idea projektu VOPES, aby boli dostupné rovnaké/harmonizované výukové podklady pre obe strany projektu, ale vždy v príslušnom národnom jazyku.

Skriptá obsahujú návody na celkom 10 úloh pre laboratórne cvičenia z oblasti, Vykurovania, Vetrania a Klimatizácie skrátene HVAC (z anglického Heating, Ventilation and Air Conditioning), ktoré bližšie pokrývajú oblasť merania prietokov a inšpekcie vetracích systémov, energetické bilancie a simulácie HVAC systémov v kabínach vozidiel, komfortu vnútorného prostredia a testovania vlastností systémov pre vytváranie optimálneho vnútorného prostredia.

Všetky tieto znalosti sú z pohľadu autorov dôležitými znalosťami a schopnosťami, ktoré by mali študenti/ky a budúci inžinieri/ky pre svoje štúdium poznať, aby boli schopní v praxi vyvíjať, navrhovať a udržiavať HVAC zariadenia s cieľom vytvoriť optimálne vnútorné prostredie vhodné pre tvorivú prácu, relaxáciu a regeneráciu ľudí, ktorí v ňom zdržiavajú.

Za kolektív autorov: Ing. Jan Fišer, PhD.

1. OBSAH

1.	OBSAH	1
2.	MERANIE PRIETOKU VO VZDUCHOTECHNIKE	2
2.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	2
2.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	2
2.3.	POSTUP MERANIA	4
2.4.	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV A OTÁZKY NA ODPOVEDANIE	4
3.	VÝUSTKY, ICH MERANIE A REGULÁCIA	6
3.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	6
3.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	6
3.3.	POSTUP MERANIA	7
3.4.	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV A OTÁZKY NA ODPOVEĎ	7
4.	VETRACIA JEDNOTKA SO SPÄTNÝ ZÍSKAVANÍM TEPLA	8
4.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	8
4.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	8
4.3.	POSTUP MERANIA	9
4.4.	SPRACOVANIE VÝSLEDKOV A OTÁZKY K ODPOVEDI	9
5.	SYSTÉMY INNOVA A IHNAC – PRINCÍPY MERANIA	10
5.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	10
5.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	10
5.3.	POSTUP PRI MERANÍ	13
5.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	13
6.	SYSTÉMY INNOVA A IHNAC – PRINCÍPY MERANIA	14
6.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	14
6.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	15
6.3.	POSTUP MERANIA	18
6.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	19
7.	TEPELNÝ MANEKÝN A PRINCÍPY MERANÍ	20
7.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	20
7.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVIE PRE CVIČENIE	21
7.3.	POSTUP MERANIA	22
7.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	24
8.	TEPELNÝ MANEKÝN – MERANIE V KONŠTRUKČNEJ PRAXI	25
8.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	25
8.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	25
8.3.	POSTUP MERANIA	25
8.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	26
9.	SIMULAČNÉ NÁSTROJE V OBORE HVAC – TEPELNÁ BILANCIA KABÍNY	27
9.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	27
9.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	29
9.3.	POSTUP SIMULÁCIE	34
9.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	34
10.	HVAC JEDNOTKA PRE KLIMATIZÁCIU KABÍNY AUTOMOBILU	35
10.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	35
10.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	36
10.3.	POSTUP MERANÍ	37
10.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	38
11.	POROVNANIE PARAMETROV TEPELNO-VLHKOSTNEJ MIKROKLÍMY PRE RÔZNE SYSTÉMY VYKUROVANIA	39
11.1.	ÚVOD A CIELE CVIČENIA	39
11.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	39
11.3.	POSTUP MERANIA	40
11.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	40
12.	MERANIE VÝKONOVÝCH CHARAKTERISTÍK PLYNOVÉHO A ELEKTRICKÉHO TEPELNÉHO ČERPADLA	42
12.1.	ÚVOD A CIELE MERANIA	42
12.2.	POUŽITÉ METÓDY A VYBAVENIE PRE CVIČENIE	42
12.3.	POSTUP MERANIA	44
12.4.	SPRACOVANIE A VYHODNOTENIE VÝSLEDKOV	44

2. MERANIE PRIETOKU VO VZDUCHOTECHNIKE

2.1. Úvod a ciele cvičenia

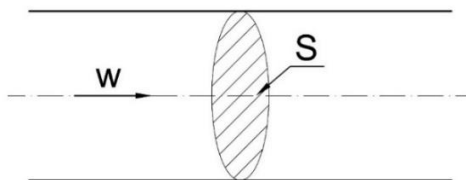
Pri vetraní budov je dôležité využiť systém, ktorý by účinne zaistil prívod vzduchu, filtráciu vzduchu, úpravu teploty, distribúciu vzduchu do vetraného priestoru, odvod znečisteného vzduchu a spätné získavanie tepla (SZT). Tieto služby všeobecne zaisťujú HVAC jednotky (Heating, Ventilation and Air-Conditioning) a k nim prináležiace systémy pre distribúciu vzduchu. Súčasťou týchto systémov sú vzduchovody, regulačné prvky a koncové prvky pre distribúciu vzduchu tzv. výustky. Všetky komponenty systému je potrebné správne vybrať a následne aj po inštalácii správne zmerať a zaregulovať na požadované prietoky.

Cieľom tohto cvičenia je

Názorne si ukázať základné možnosti merania prietokov vzduchu vo vzduchotechnických zariadeniach a demonštrovať si vlastnosti, výhody a limity jednotlivých metód.

2.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Na zaistenie objemového prietoku vzduchu vzduchovodom vychádzame zo vzťahu, kde objemový prietok vzduchu $\dot{V}$ vyrátame ako súčin voľnej plochy priečného rezu vzduchovodu S [m²] a magnitudy vektora rýchlosti, inak tiež rýchlosti vzduchu w [m/s]. Schematicky je tento postup naznačený na obr. 1.



Obr. 1 Schéma merania objemového prietoku vo vzduchovode

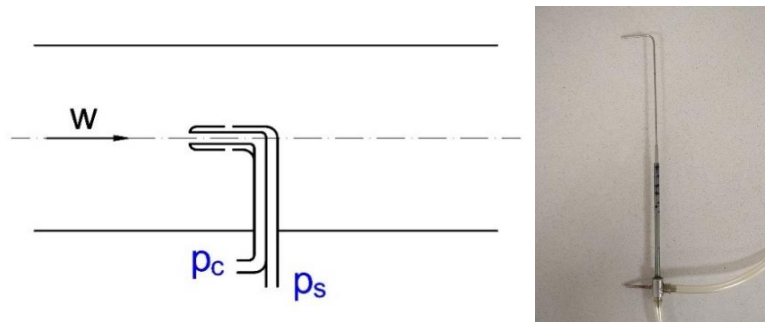
$$\dot{V} = S \cdot w \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \right] \left[\frac{\text{m}^3}{\text{h}} \right]$$

Rýchlosť prúdenia vzduchu w meriame niektorým z typov rýchlostných sond, ktoré najčastejšie využívajú tlakový princíp, či princíp merania príkonu elektricky vyhrievaného telieska, ktoré je ochladzované prúdiacim vzduchom tzv. termoanemontrami (anglicky Constant temperature anemometry).

Tlakové sondy – Prandltova a Pitotova trubica, Wilsonova mreža

Všeobecný princíp tlakových sond spočíva v meraní dynamického tlakového účinku prúdiaceho vzduchu p_d , ktorý je daný rozdielom celkového tlaku p_c a statického tlaku p_s . Toto je možné všeobecne dosiahnuť tak, že na stene rovnobežnej s prúdením pre meranie je umiestnený tlakový odber pre meranie statického tlaku p_s a druhý tlakový odber pre meranie celkového tlaku p_c , je umiestnený v ploche kolmej ku smeru prúdenia (viď obr. 2.). Tieto požiadavky spĺňa Prandltova a Pitotova trubica, ale pre meranie vo vzduchovodoch sa spravidla

používa hlavne prvá z nich, pretože umožňuje rastovanie v potrubí a meranie dynamického tlaku p_d priamo v mieste sondy, pričom pre prístup do vzduchovodu postačuje len jeden otvor.



Obr. 2 Prandtl-ova trubica: princíp vľavo [1], skutočné prevedenie vpravo

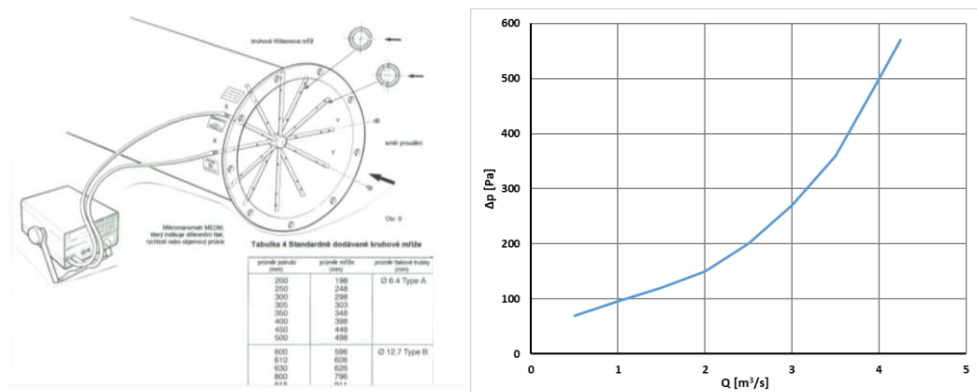
Výslednú rýchlosť možno určiť zo vzťahu

$$w = k \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot p_d}{\rho}}$$

kde je spravidla $\rho = 1.2 \text{ kg/m}^3$, pre teploty 16°C tlak 100 kPa a k je konštanta Prandtlovej sondy získaná kalibráciou (pokiaľ nie je známa, použijeme hodnotu 1). Na získanie konkrétnych hodnôt tlaku p_d je potrebné dodržať tieto zásady:

- 1) Mať vždy os sondy v smere rýchlosti prúdenia.
- 2) Mať dostatočne citlivý a kalibrovaný diferenčný manometer, pretože pri rýchlostiach bežných vo vzduchotechnických potrubíach je výsledný tlakový rozdiel maximálne v radoch desiatok Pascalov.
- 3) Nemerať v blízkosti kolien a ohybov, kde sú typické úplavy a recirkulačné zóny, ktoré znehodnotia meranie.

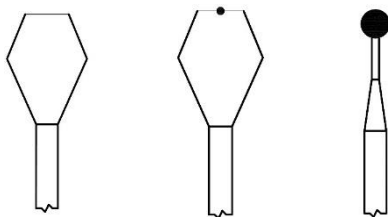
Pretože sú často merané rýchlosti malé a rozdiely tlakov tiež, používa sa pre kontinuálne meranie vo väčších prierezoch tzv. Wilsonova mreža (viď obr. 3 vľavo). Jedná sa o špeciálne navrhnutú tlakovú sondu, ktorej konštrukcia a umiestnenie odberových otvorov zlepšuje výsledný tlakový rozdiel a tým aj presnosť meraní. Musíme si však byť vedomí toho, že pre správne vyhodnotenie prietokov Wilsonovou mrežou potrebujeme poznať konštantu mreže a tiež, že vzťah medzi tlakovým rozdielom a prietokom nie je lineárny (viď obr. 3 vpravo).



Obr. 3 Príklady prevedenia Wilsonovej mreže a graf znázorňujúci závislosť medzi dynamickým tlakom a objemovým prietokom pre Wilsonovu mrežu typu WM 400 x 500 mm [3]

Termoanemometrické sondy metóda CTA (constant temperature anemometry)

Ich princíp spočíva v meraní energie potrebnej pre udržiavanie stálej teploty meracieho telieska, ktoré je ochladzované okolo prúdiacim vzduchom, pričom množstvo tejto energie je priamo úmerné rýchlosti prúdiaceho vzduchu. Pre dostatočnú presnosť merania je potrebné zabezpečiť, aby teplota nahrievaného telieska (má podobu tenkého drôtku, valčeka alebo guľôčky) bola podstatne vyššia ako teplota meraného vzduchu, a preto sa pri presných sondách sa ešte vždy meria teplota okolia pre korekciu nameranej rýchlosti. Schematicky sú príklady konštrukcie termoanemometrických sond znázornené na obrázku 4 vľavo. Keďže sa jedná o meranie elektrických veličín, sú prakticky vždy tieto sondy pripojené k elektronickému meraciemu prístroju, ktorý prevádza nameraný signál na hodnotu rýchlosti prúdenia vzduchu. S výhodou sa tieto prístroje dnes kombinujú so záznamom dát a pri špeciálnych prístrojoch pre techniku prostredia sú dostupné aj dodatočné funkcie ako napríklad priamy výpočet prietokov či priemerovanie meraných hodnôt viď obr. 4 vpravo.



Obr. 4 Vľavo: Príklady typov konštrukcie termoanemometrických sond – drôtik, teliesko, guľôčka [1].
Vpravo: Multifunkčný prístroj Testo 480 pre meranie v technike prostredia. Umožňuje pripojiť celý rad sond, real-time výpočty a ukladanie dát [3]

2.3. Postup merania

- 1) Ukážka princípu merania prietoku vo vzduchovode – tlakové sondy Prandtlova trubica, Wilsonova mreža.
- 2) Ukážka princípov merania vo vzduchovode – metódy CAT, využitie moderných digitálnych prístrojov na meranie v reálnom čase (Testo + Wilsonova mreža).

2.4. Spracovanie výsledkov a otázky na odpovedanie

- 1) Porovnajte hodnoty rýchlosti prúdenia vzduchu a rýchlostný profil nameraný pomocou CTA sondy Testo a Prandtltovej trubice. Aké hlavné obmedzenia a naopak výhody majú tieto dve metódy?
- 2) Z nameraných dát na Wilsonovej mreži overte, či vzťah medzi meraným tlakom a rýchlosťou vo vzduchu odpovedá tvaru kalibračnej krivky na obr. 1.3. Akým spôsobom budeme meriať kontrolné hodnoty?

- 3) V ktorých miestach vzduchovodu nie je doporučené meranie rýchlosti prúdenia a prečo? Existuje nejaké opatrenie ako je možné ovplyvniť umiestnenie meracieho miesta a znížiť tak vplyv takejto chyby na výsledok merania?

Literatúra

- [1] POLÁČEK, F. *Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D.
- [2] *Wilsonovy mříže* [online], Airflow Lufttechnik GmbH [cit. 1.10.2019]. Dostupné z: www.airflow.cz/pdf/wilsonovy_mrize.pdf
- [3] *Měřicí přístroj Testo 480* [online], Testo, s.r.o. [cit. 1.10.2019]. Dostupné z: <https://www.testo.com/cz-CZ/testo-480/>

3. VÝUSTKY, ICH MERANIE A REGULÁCIA

3.1. Úvod a ciele cvičenia

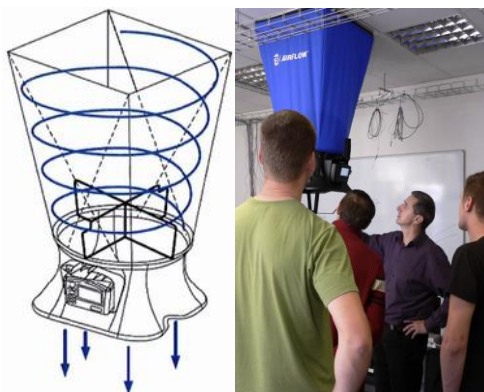
Súčasťou HVAC systémov pre vetranie a klimatizáciu budov sú systémy pre distribúciu vzduchu, ktoré sa skladajú zo vzduchovodov, regulačných prvkov a koncových prvkov pre distribúciu vzduchu tzv. výustiek. Všetky komponenty systému je potrebné správne vybrať, nainštalovať a nastaviť/zaregulovať na požadované prietoky. Neoddeliteľnou súčasťou zaregulovania distribučných vzduchovodov a koncových prvkov je meranie prietoku vzduchu koncovými prvkami, ktoré je náplňou tohto cvičenia.

Cieľom cvičenia je

1. Názorne si ukázať základné druhy koncových prvkov pre distribúciu vzduchu (mriežka, anemostat, vírivý anemostat, tanierový ventil) a demonštrovať si vlastnosti, výhody a limity jednotlivých riešení.
2. Ukázať si možnosti meraní prietokov z výustiek, výhody a limity jednotlivých metód.

3.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Bolometer je špeciálny merací prístroj určený pre meranie prietoku na základe meraní tlakového rozdielu, pričom vstavaný diferenčný manometer je priamo spojený s tlakovou sondou a umožňuje v reálnom čase určiť prietok vzduchu, ktorý preteká prístrojom. Pre meranie prietoku z výustiek je prístroj vybavený skladacou nadstavbou kónického tvaru, ktorá umožňuje usmernenie prúdiaceho vzduchu z výustky na tlakovú sondu (viď obr. 5). Na spresnenie meraní je do vstupnej nadstavby ešte možné vložiť usmerňovací kríž, ktorý zabráni rotácii pridávaného vzduchu a zvlášť pri vírivých typoch výustiek zníži neistotu merania prístroja.



Obr. 5 Princíp usmernenia prúdenia pomocou nadstavby PH731 [1] a využitie bolometra v praktickom meraní

Výustková trať - je umiestnená v laboratóriu C3 v nadstropnom priestore laboratória (viď obr. 2.2) a obsahuje ventilátor, Wilsonovu mrežu kruhového prierezu s priemerom 320 mm, rozdeľovací box so servo-klapkami a osem individuálne regulovaných vetví pre pripojenie výustiek (1x mriežková výustka, 1x tanierová výustka, 1x anemostat, 3x vírivý anemostat a 2x flexibilný vývod pre pripojenie ďalších zariadení, viď obr. 7).



Obr. 6 Výustková trať v laboratóriu C3 – časť nad stropom laboratória



Obr. 7 Výustková trať v laboratóriu C3 – typy výustiek mriežka, anemostat, vírivý anemostat a ovládací panel servoboxu

3.3. Postup merania

1. Merania prietoku výustkami – ukážka meraní termoanemometrickou sondou, bolometrom a ukážka vplyvu typu rýchlostného poľa na presnosť meraní.
2. Ukážka zaregulovania jednotlivých typov výustiek (mriežka, anemostat) a overenie prietoku.
3. Vplyv zaregulovania na prietok a hlučnosť výustky.
4. Ukážka typu prúdových polí generovaných jednotlivými výustkami na tepelný komfort v priestore pod výustkou.

3.4. Spracovanie výsledkov a otázky na odpoveď

1. Ktorý typ prúdového poľa za výstkom môže spôsobovať najväčšiu chybu pri meraní bolometrom a prečo? Je nejaký spôsob ako túto chybu eliminovať?
2. Aký typ výustky generuje prúdové pole s najnižšou/najvyššou pravdepodobnosťou obťažovania prievanom a prečo to tak je?

Literatúra

[1] Multifunkční přístroj ProHood PH731 určený k měření a zaregulování VZT systémů [online]. Airflow Lufttechnik GmbH [cit. 3.10.2019]., Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/regulace-vetrani-klimatizace/>

4. VETRACIA JEDNOTKA SO SPÄTNÝ ZÍSKAVANÍM TEPLA

4.1. Úvod a ciele cvičenia

Pri vetraní budov je dôležité zaistiť systém, ktorý by účinne zaistil prívod vzduchu, jeho filtráciu, tepelnú úpravu, distribúciu do vetraného priestoru, odvod a spätné získavanie tepla (SZT). Niektoré z týchto služieb zaisťuje zariadenie, ktoré sa nazýva vetracia jednotka so spätným získavaním tepla [1]. Súčasťou týchto jednotiek sú ventilátory, rekuperačný výmenník a filtre vzduchu. Všetky komponenty systému je potrebné po inštalácii správne prevádzkovať a udržiavať.

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Zoznámiť sa s konštrukčným prevedením rovnotlakovej vetracej jednotky s rekuperáciou tepla.
- 2) Ukázať základné prevádzkové merania takejto jednotky (tlaková strata filtrov, ich výmena a konštrukcia).

4.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

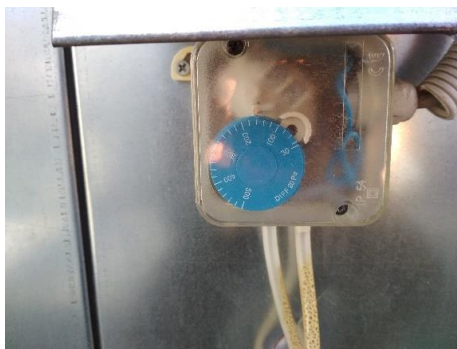
Vetracie jednotky sú zariadenia pre riadenú výmenu vzduchu medzi vnútorným a okolitým prostredím. Typicky sa skladajú z hlavnej skrine, dvoch ventilátorov (väčšinou radiálneho prevedenia), filtrov pre odstránenie pevných častíc zo vzduchu, rekuperačného výmenníka pre spätné získavanie tepla (niektoré jednotky umožňujú aj spätné získanie vlhkosti) a riadiacej elektroniky [2] (viď obr. 8).



Obr. 8 Vľavo: Vetracia jednotka s rekuperáciou tepla a vývody na meranie diferenčného tlaku na filtroch. Vpravo: Vnútročné usporiadanie jednotky

Filter na strane čerstvého vzduchu slúži na odstránenie prachu a pevných častíc, ktoré môžu byť obsiahnuté vo vzduchu privádzanom z okolia. Trieda filtrácie býva väčšinou pri týchto filtroch na úrovni triedy F. Filter na strane vzduchu odvádzaného z interiéru býva väčšinou na úrovni triedy G. Dôvodom pre použitie filtrov na oboch stranách krížového výmenníka je nielen ochrana vnútorného prostredia pred prachom z okolia, ale tiež ochrana teplosmenných plôch výmenníka pred zanesením prachom. Zanesenie výmenníka je nežiadúci stav, ktorý spôsobuje zníženie účinnosti prenosu tepla a naopak zvyšuje tlakovú stratu výmenníka a tým aj spotrebu

elektriny pre pohon ventilátorov. Keďže filtre majú len určitú kapacitu a s postupným zanášaním filtra prachom rastie jeho tlaková strata, je veľmi dôležité túto hodnotu monitorovať. Pri väčších jednotkách je na základe smerníc ErP (2009/125/EC) od roku 2018 kontinuálny monitoring tlakovej straty filtrov povinnou súčasťou jednotky [3]. Monitoring tlakovej straty sa vykonáva pomocou tlakových odberov umiestnených pred a za filtrom, ktoré sú vyvedené na skriňu vetracej jednotky. Pri menších jednotkách sa toto meranie vykonáva pri pravidelnej údržbe zariadení, pri veľkých jednotkách je potom inštalovaný senzor pre kontinuálne meranie diferenčného tlaku, ktorý je pripojený do systému merania a regulácie jednotky (viď obr. 8).



Obr. 9 Diferenčný manometer na veľkej vzduchotechnickej jednotke. Manometer sa vybaví, pokiaľ diferenčný tlak na filtri presiahne nastavenú hodnotu, v tomto prípade cca 160 Pa

4.3. Postup merania

- 1) Rozbor hlavných konštrukčných častí jednotky a ich súčasti (ventilátory, rekuperačný výmenník, filtre, tlakové odbery na meranie rozdielu tlakov).
- 2) Podrobnejší rozbor konštrukcie filtrov typu G a F.
- 3) Pripojenie diferenčného manometra (napr. TESTO 480 viď obr. 9) a určenie tlakovej straty filtrov vzduchu, pri rôznych stupňoch otáčok ventilátora.

4.4. Spracovanie výsledkov a otázky k odpovedi

- 1) Vyhodnoťte a graficky zaznamenajte tlakovú stratu oboch filtrov v závislosti na nastavenom prietoku jednotkou.
- 2) Z akého dôvodu sa tlaková strata filtrov odlišuje?
- 3) V akých prevádzkových stavoch sa uplatňuje vybavenie jednotky pre odvod kondenzátu a akým spôsobom má byť správne pripojená ku kanalizačnému potrubiu?

Literatúra

- [1] DRKAL, F. a kol.: *Klinatizace*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2015
- [2] JANOTLOVÁ, E.: *Technika prostředí – 1. a 2. část* [online]. 1. upravené vyd. Brno: FSI VUT v Brně, 2014, Dostupné z: <http://srudyenergyweb.fme.vutrb.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>
- [3] *Ekodesign výrobků spojených se spotřebou energie* [online], Ministerstvo obchodu a průmyslu [cit. 8.10.2019]. Dostupné z <https://www.mpo.cz/dokument158127.html>

5. SYSTÉMY INNOVA A IHNAC – PRINCÍPY MERANIA

5.1. Úvod a ciele cvičenia

Jednou z konštrukčných súčastí HVAC systémov sú ventilátory a sústava vzduchovodov pre distribúciu vzduchu do vetraného priestoru. Pri doprave vzduchu v distribučnej sústave vzniká vplyvom trenia molekúl vzduchu o steny strata energie, ktorú je možné vyjadriť ako tlakovú stratu tohto systému. Táto strata je priamo úmerná rýchlosti prúdiaceho vzduchu respektíve ako prietok systémom. Aby bolo možné dopravovať vzduch systémom, je dôležité túto tlakovú stratu kompenzovať pomocou ventilátora. Tlaková strata distribučného systému vzduchu a tlak dodávaný ventilátorom musí byť v rovnováhe, pričom takémuto bodu sa hovorí prevádzkový/pracovný bod sústavy. Pre návrh systému distribúcie vzduchu je dôležité poznať priebeh tlakovej charakteristiky ventilátora a nadväzujúcej distribučnej siete.

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Zoznámiť sa s meraním tlakových charakteristík radiálneho ventilátora a nadväzujúcich distribučných vzduchovodov.
- 2) Ukázať si základné prepočtové vzťahy pre ventilátory.

5.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Medzi základné parametre ventilátora patrí objemový prietok, celkový dopravný tlak, príkon a účinnosť ventilátora. Charakteristiky ventilátorov vyjadrujú závislosť dopravného tlaku, príkonu alebo účinnosti na objemovom prietoku ventilátorom, sú merané pre jedny vlastnosti plynu a bývajú vykresľované pre jednotlivé otáčky. Tlaková charakteristika sa používa na určenie prietokov na základe známej tlakovej diferencie ventilátora. Tlakovú diferenciu je možné pomerne jednoducho merať použitím diferenčného tlakomeru a dvoch odberov tlaku (viď cvičenie 1 a 3). Pokiaľ je ventilátor používaný pri iných otáčkach alebo hustote plynu musia byť charakteristiky prepočítané podľa rovníc v tab. 5.1.

Tab. 5.1 Prepočty charakteristík ventilátora v závislosti na hustote a na otáčkach

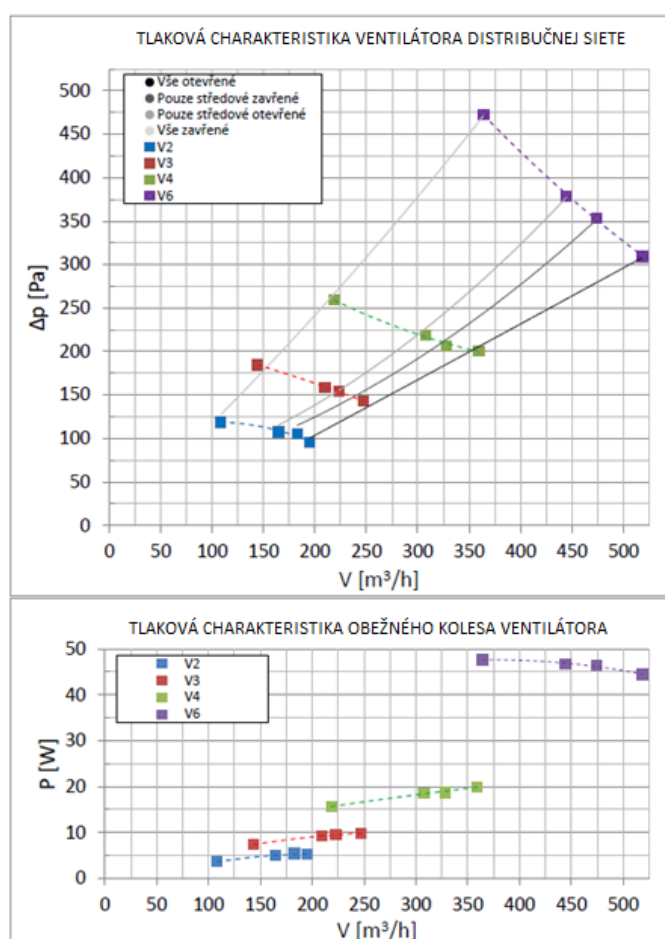
Parameter	Zmena otáčok pri $\rho = \text{konštanta}$	Zmena hustoty pri $n = \text{konštanta}$
Objemový prietok	$V_{v2} = V_{v1} \frac{n_2}{n_1}$	$V_{v2} = V_{v1}$
Celkový dopravný tlak	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2$	$\Delta p_2 = \Delta p_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$
Výkon obehového kola ventilátora	$P_2 = P_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3$	$P_2 = P_1 \frac{\rho_2}{\rho_1}$

Metodika merania charakteristík ventilátorov je popísaná v norme ČSN 12 3061 „Vzduchotechnika. Ventilátory. Predpisy pre meranie.“, alebo tiež v medzinárodnej norme ČSN ISO 5801 „Průmyslové ventilátory – Zkoušení výkonu s použitím normalizovaného vzduchovodu“. Pri meraní ventilátorov je povolené umiestniť meraciu trať na sanie ventilátora, na výtlak ventilátora alebo kombinovane na sanie aj výtlak. Výsledky sú rovnaké,

pretože meriame rozdiel tlaku pred a za ventilátorom. Meracia trať obsahuje tlakové odbery pre určenie celkového dopravného tlaku, meranie prietoku a škrtiaci element pre zmenu prietoku.

Tlakové charakteristiky na obr. 10 boli stanovené pre rôzne výkonnostné stupne motora ventilátora (stupeň 2-6) pri využití regresie a polynómu 2. stupňa. Tlakové charakteristiky distribučnej siete reprezentujú rôzne režimy škrtenia od naplno otvorených výustiek po stav, kedy sú všetky uzatvárateľné výustky zatvorené. Výsledný graf je zostavený na základe reálnych meraní, ktoré majú vždy istú nepresnosť/neistotu a to hlavne pri určení prietoku vzduchu, preto sa tiež všetky charakteristiky distribučnej siete na začiatku grafu nepretínajú. Priesečník charakteristiky ventilátora a potrubnej siete definuje pracovný bod pre konkrétne prevádzkové podmienky. Na základe tab. 5.1 je možné tiež vypočítať výkonovú charakteristiku obehového kola ventilátora, viď obr. 5.1.dole.

Výkonová charakteristika obehového kola ventilátora sa dá vypočítať z tlakovej charakteristiky podľa vzťahu $P = \Delta p \cdot \dot{V}$, kde Δp je dopravný tlak [Pa] a $\dot{V}$ je objemový prietok [m^3/s]. V praxi je sa môžeme stretnúť aj s jednotkami prietoku [m^3/l] a [l/s]. Maximálna nameraná hodnota výkonu obehového kola bola (pre stupeň ventilátora V6) $P = 48$ W, pri elektrickom príkone $P_{el} = U \cdot I = 12,5 \cdot 22 = 275$ W. T. j. účinnosť ventilátora je cca 17,5 %. Zvyšná energia je zmarená v podobe strát (trenie, el. obvody, turbulencie) a v konečnom dôsledku je premenená na teplo.



Obr. 10 Hore: tlaková charakteristika ventilátora (farebne) a distribučnej siete (čiernobielo) nameraná v reálnom vozidle. Dole: vypočítaná výkonová charakteristika obehového kola ventilátora

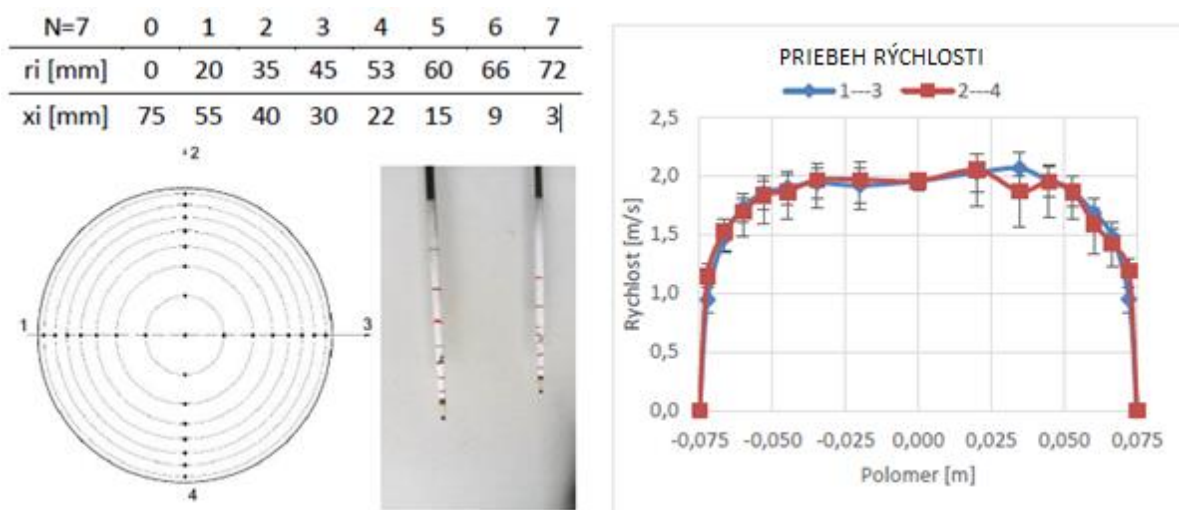
Tlaky a prietoky na ventilátore

Na ovládacom paneli (obr. 11) je možné nastaviť otáčky ventilátora, teplotu privádzaného vzduchu a miesto preferencie prívodu vzduchu do kabíny, tieto nastavenia klapiek ventilátora majú vplyv na výsledný dopravný tlak. Meracia trať je vybavená tlakovými odbermi pred a za ventilátorom. Tlakovú diferenciou týchto odberov získame celkový dopravný tlak do charakteristiky.



Obr. 11 Ovládací panel HVAC jednotky a tlakové odbery skrine HVAC jednotky

Prietok vzduchu, ktorý je nasávaný do kabíny je možné určiť premeraním jednotlivých výustiek (za predpokladu ustáleného stavu HVAC jednotky) alebo za predpokladu nulovej recirkulácie na saní a to by bolo najlepšie pomocou ustaľovacieho kanála. Prietok je možné určiť pomocou anemometrie alebo pomocou clony. Pokiaľ je rýchlostný profil dostatočne vyvinutý a ustálený je možné vo vzdialenosti 0,63 s priemer zmerať strednú hodnotu rýchlosti prúdenia. Pokiaľ profil vyvinutý nie je, je potrebné vykonať reštartovanie najlepšie na dvoch na sebe kolmých osiach (viď obr. 12). Meracie body by mali reprezentovať rovnakú plochu medzikružia, čo znamená, vzdialenosť medzi meracími bodmi klesá s druhou mocninou polomeru smerom k okraju vzduchovodu.



Obr. 12 Meracie body v kruhovom kanáli a vyznačenie meracích pozícií na rýchlostných sondách. Vpravo sú výsledné rýchlostné profily v ustaľovacom kanáli v oboch na sebe kolmých osiach. Oba profily sú porovnateľné, čo znamená, že prúdenie je dostatočne ustálené a rýchlostný profil je vyvinutý (v tomto prípade bolo použitých 7 bodov v jednej poloosi)

5.3. Postup pri meraní

Postup:

- 1) Zapnite jednotku s ventilátorom a pripojte diferenčný manometer (napr. TESTO 480 alebo TESTO 475).
- 2) Pri rôznych nastaveniach otáčok ventilátora a škrtení zmerajte tlakovú diferenciu na ventilátore.
- 3) Zmerajte anemometrom rýchlosť prúdenia najjednotlivých výstupoch z jednotky a na sanie.

5.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Určite tlakovú charakteristiku ventilátora a rozvodov.
- 2) Určite z nameraných rýchlostí prúdenia prietoky vzduchu na saní do ventilátora a na jednotlivých výstupoch.
- 3) Porovnajte hodnoty prietokov vzduchu na saní do ventilátora a jednotlivých výstupoch. Odpovedajú si tieto prietoky, pokiaľ zohľadníme neistotu merania? Pokiaľ je rozdiel väčší, ako očakávaný, čím je to spôsobené?

Literatúra

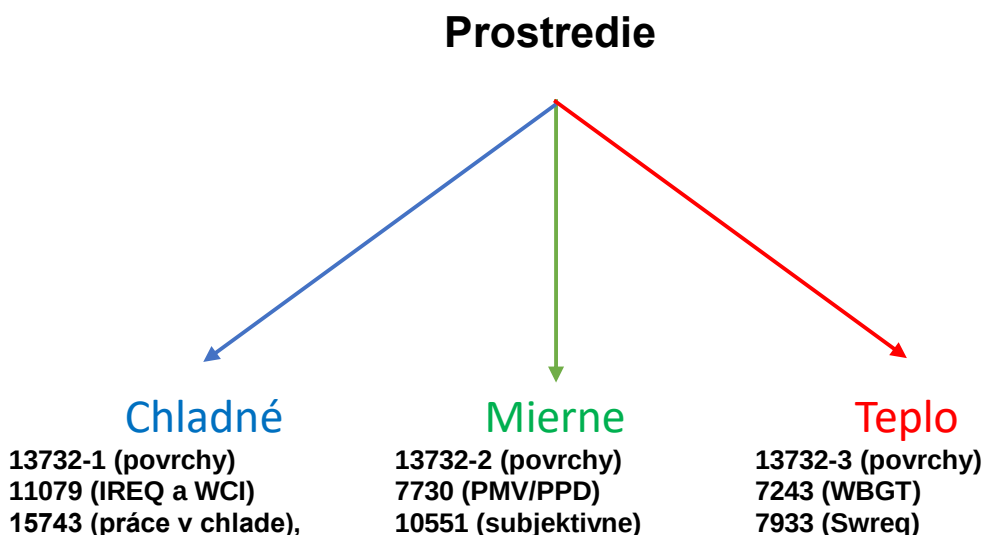
- [1] DRKAL, F. A KOL.: *Klimatizace*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2015.
- [2] JANOTKOVÁ, E.: *Technika prostředí - 1. a 2. část* [online]. 1. upravené vyd. Brno: FSI VUT v Brně, 2014, Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>
- [3] POLÁČEK, F. *Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D.
- [4] CALETKA, P. *Posouzení funkčnosti různých modifikací větrací vyústky pro kabinu osobního vozu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jan Jedelský, Ph.D.
- [5] ŠÍP, J. *Aplikace rychlostní sondy se žhavenými drátky při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 103 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.

6. SYSTÉMY INNOVA A IHNAC – PRINCÍPY MERANIA

6.1. Úvod a ciele cvičenia

Návrh vetrania a klimatizácie by mal rešpektovať triedu noriem 12 „Vzduchotechnické zariadenia“ hlavne normu ČSN 12 7010 „Navrhovanie vetracích a klimatizačných zariadení – Všeobecné ustanovenia“. A tiež rešpektovať vplyv prostredia na človeka, ktoré je uvedené v nariadení vlády č. 93/2012, respektíve č. 361/2007 „Podmienky ochrany zdravia pri práci“, ktoré mimo iné obsahuje predpísané rozmedzie veličín zvlášť pre zimné a letné obdobie (operatívna teplota, relatívna vlhkosť, rýchlosť prúdenia a pod.).

Ďalšími odporúčajúcimi postupmi ako hodnotiť vplyv prostredia na človeka sú normy spadajúce do triedy noriem 83 „Ochrana životného prostredia, pracovná a osobná ochrana, bezpečnosť strojných zariadení a ergonómia“ a to hlavne 83 35 „Ergonómia“ viď. <https://www.tzb-info.cz/normy/hledat>.



Ďalšie štandardy

11933 (princípy), 7726 (merania), 8996 (metabolická produkcia tepla), 9920 (odev), 12894 (monitorovanie ľudí, 13731 (slovník a jednotky), 9886 (fyziológia)

Aplikácie

Auta: 14505-1 (princípy), 14505-2 (T_{eq}), 14505-3 (Ľudské subjekty), 14415 (vek), 15265 (odhad rizík), 15742 (kombinované prostredie) ,

Obr. 13 Prehľad základných noriem z Ergonómie podľa typu prostredia a aplikácie

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Zoznámiť sa s používanými ISO štandardami z Ergonómie prostredia a prístrojmi umožňujúcimi prostredie merať (INNOVA; iHVAC).
- 2) Náзорne si ukázať metodiku určenia ekvivalentnej teploty, pomocou systému iHVAC.

- 3) Demonštrovať využitie systému INNOVA pri hodnotení tepelného komfortu pomocou modelu PMV-PPD.

6.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

iHVAC je vyhrievaný plošný senzor merací tepelné toky (radiácia a konvekcia), ktoré je možné prepočítať na t_{eq} (=EHT) ekvivalentnú homogénnu teplotu. Následné hodnotenie tepelného stavu prostredia spočíva v prevedení ekvivalentnej teploty t_{eq} na kombinovanú stupnicu tepelného pocitu/komfortu MTV (Mean Thermal Vote) pomocou diagramu komfortných zón (DKZ).

Princíp vyhodnotenia tepelného komfortu vychádza z normy ČSN ISO 14505 (2007) Ergonómia tepelného prostredia – Hodnotenie tepelného prostredia vo vozidlách – Časť 1: Princípy a metódy pre posúdenie tepelného namáhania. Časť 2: Určenie ekvivalentnej teploty. Časť 3: Hodnotenie tepelného komfortu pomocou skúšobných osôb.

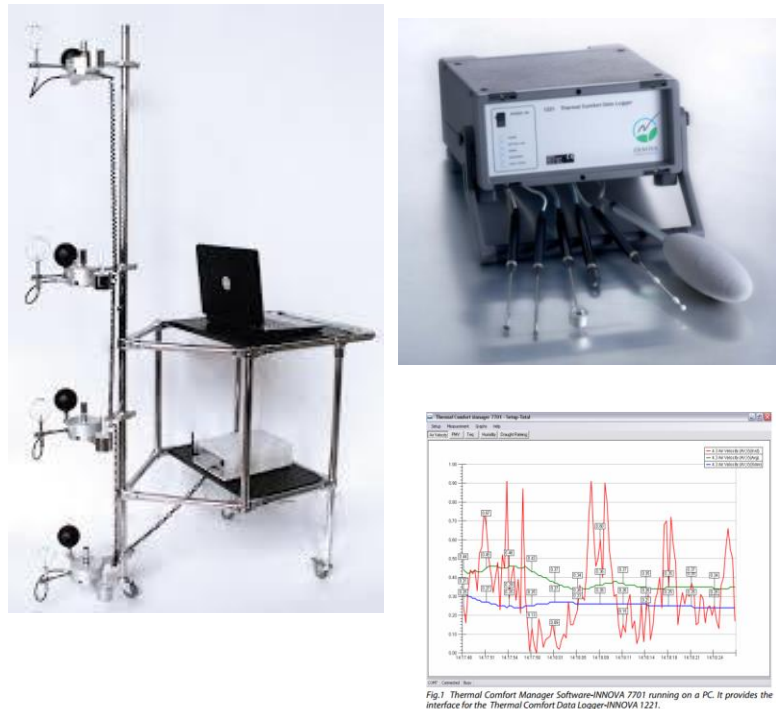
Systém snímačov je do určitej miery schopný reprodukovat' výsledky meraní pomocou tepelného manekýna, viď cvičenie 4.



Obr. 14 Rozmery iHVAC senzora, pohľad na riadiaci a vyhrievaný prvok, aplikácia senzora do výustku HVAC systému auta, preložené z [2]

Thermal Comfort Data Logger-INNOVA 1221 + 7701 Software

- Umožňuje hodnotiť vplyv okolitého prostredia na tepelný stres a komfort podľa ISO 7726 (T_a , T_r , ϕ , v), ISO 7243 (WBGT, SWreg), ISO 7933 (PHS) a ISO 7730 (PMV-PPD, Dr), ET*.
- Modulárny systém až pre 12 prvkov.



Obr. 15 Vľavo: sondy pripojené k systému INNOVA 1221. Vpravo: data logger INNOVA 1221 a software 7701

Tento systém vie vyhodnotiť základné parametre z oblasti ergonómie prostredia a dokáže zohľadniť nasledujúce normy:

- STN ISO 7726 (2002) – Ergonómia tepelného prostredia – Prístroje na meranie fyzikálnych veličín. Norma podrobnejšie špecifikuje meracie prístroje a ich požadovanú presnosť pre tie metódy: A/ Meranie teploty vzduchu, B/ Meranie strednej radiačnej teploty, C/ Meranie asymetrie radiačnej teploty, D/ Meranie absolútnej vlhkosti vzduchu a E/ Meranie rýchlosti vzduchu.
- STN ISO 7730 (2006) – Ergonómia tepelného prostredia – Analytické určenie a interpretácia tepelného komfortu pomocou výpočtov ukazovateľov PMV a PPD a kritéria miestneho tepelného komfortu.
- STN ISO 7933 (2005) – Ergonómia tepelného prostredia – Analytické určenie a interpretácia tepelného stresu pomocou výpočtu predpovedanej tepelnej záťaže
- STN ISO 7243 (2018) - Ergonómia tepelného prostredia – Určenie tepelnej záťaže pracovník podľa ukazovateľa WBGT (teploty mokrého a guľového teplomera).

Tepelný komfort (pohoda) je stav mysle vyjadrujúci spokojnosť s tepelným stavom okolitého prostredia. Tepelný komfort nastáva vtedy, keď prostredie odoberá človeku jeho tepelnú produkciu bez nutnosti zásahu termoregulácie a tento stav je človekom pociťovaný ako uspokojivý/príjemný. Tepelný komfort úzko súvisí s tepelnou bilanciou človeka s okolím, ideálnym stavom je situácia, kedy sú produkcie tepla v tele a prenos tepla v okolí v rovnováhe.

Tepelnú bilanciu ľudského tela je možné vyjadriť nasledujúcou rovnicou:

$$M - W = S + E + R + C + K + (E_{res} + C_{res}) \quad [W/m^2], \text{ kde}$$

M ... energetický výdaj, W ... mechanická práca, S ... akumulácia tepla v tele (= tepelná záťaž L), R ... radiácia (zariadenie), C ... konvekcia (prúdenie), K ... kondukcia (vedenie), E ... evaporácia (vyparovanie), Cres ... dýchanie (konvekcia), Eres ... dýchanie (vyparovanie).

Na zaistenie predpokladaného tepelného pocitu a percenta nespokojných ľudí s tepelným stavom prostredím sa používa Fangerov model PMV/PPD uvedený v norme ČSN ISO 7730. Model nerieši vlastnú akumuláciu tepla v tele S , ale len vypočítava tepelnú záťaž/bilanciu L medzi ľudským telom a okolím. Fanger na základe empirických pozorovaní určil vzťah medzi tepelnou záťažou L a tepelným pocitom (index PMV) nasledovne:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{-0,036 \cdot M} + 0,028) \cdot L,$$

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2}$$

kde je tepelná záťaž L vyjadrená ako rozdiel tepla, ktoré je generované v ľudskom tele M (zmenšená o vykonávanú ľudskú mechanickú prácu W) a tepla odvádzaného do okolia. Prenos tepla do okolia je popísaný rovnicami pre všetky základné spôsoby prenosu tepla. V tejto rovnici sú zahrnuté všetky primárne faktory tepelného komfortu (viď kapitola 6).

$$L = (M - W) - \left(3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p] + 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] + \right. \\ \left. + 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot \alpha \cdot (t_{cl} - t_a) + \right. \\ \left. + 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p) + 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \right)$$

Kde p_a [Pa] je parciálny tlak vodnej pary, a [W/m²K] súčiniteľ prestupu tepla f_{cl} [-] pomer zväčšenia povrchu oblečenia človeka k povrchu nahého človeka a t_{cl} [°C] povrchová teplota odevu (rieši sa iteratívne).

Interpretácia indexu PMV (tepelný pocit):

+ 3 horko; + 2 teplo; + 1 mierne teplo; 0 neutrálne; - 1 mierne chladno; - 2 chladno; - 3 zima

Interpretácia indexu PPD (predpokladané percento nespokojných):

PPD = 5 [%] ideálne podmienky prostredia (PMV = 0)

PPD < 10 [%] Prijateľné podmienky prostredia (PMV = ± 0,5)

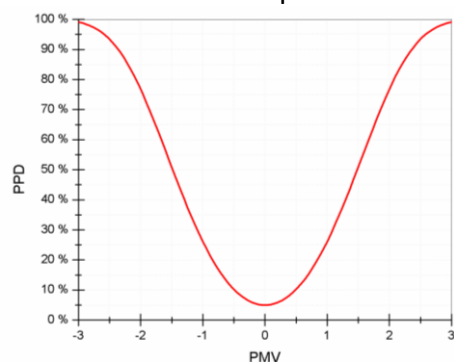
PPD < 20 [%] Prístupné podmienky prostredia (PMV = ± 1)

Na základe normy ISO 7730 je možné rozdeliť vnútorné prostredie do troch kategórií podľa kvality: t. k. A, B, C (obr. 11.). Okrem celkového pôsobenia prostredia na človeka sú v tej istej norme uvedené kritéria lokálneho diskomfortu ako sú asymetria radiačnej teploty, vertikálna teplotná diferencia, teplota podlahy, stupeň obťažovania prievanom. Na zaistenie stupňa obťažovania prievanom DR (Draft Risk) sa používa vzťah

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

Kde pre merací bod t_a [°C] lokálna teplota, $\overline{v_a}$ [m/s] lokálna stredná rýchlosť prúdenia vzduchu, T_u [%] lokálna intenzita turbulencie, čo je podľa ČSN ISO 13731 (Ergonómia tepelného prostredia – Slovník a značky) pomer smerodajnej odchýlky miestnej rýchlosti vzduchu k miestnej strednej rýchlosti vzduchu. Index DR môže mať hodnoty od 0 do 100 %.

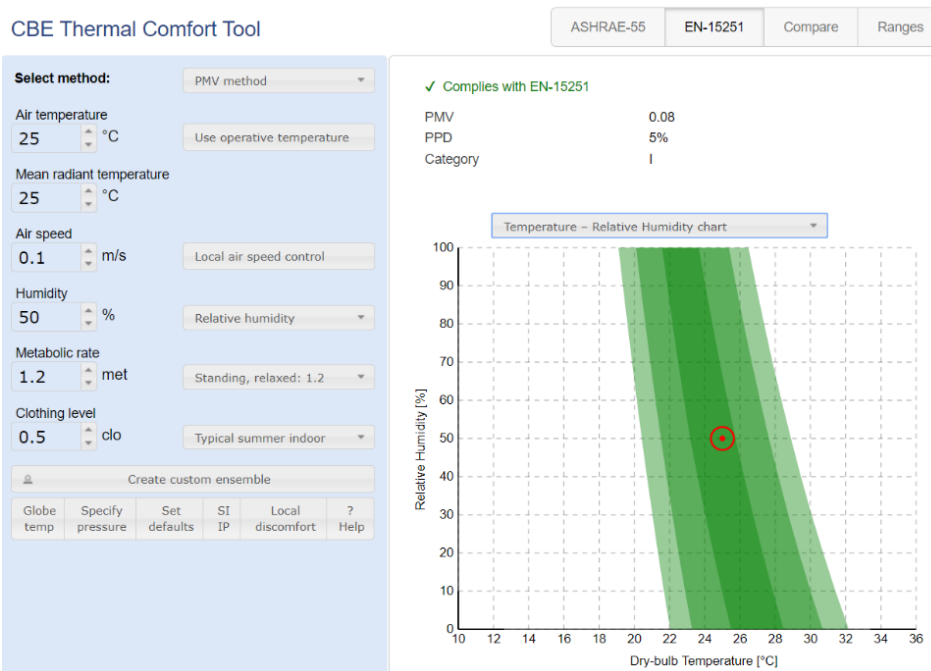
Doporučený rozsah použitia je pre hodnoty 20-26 [°C], 0,05 - 0,5 [m/s], $T_u = 10 - 60$ [%]. Model je možné aplikovať pre ľahké aktivity (sedenie) do 1,2 [met], pri intenzívnejšie aktivity je všeobecne citlivosť na prievan nižšia.



Trieda	Celkový tepelný stav tela		Lokálny diskomfort			
	PPD [%]	PMV [-]	DR [%]	PD [%] vertikálny rozdiel teplôt	PD [%] teplota podlahy	PD [%] radiačná asymetria
A	< 6	-0,2 < 0,2	< 10	< 3	< 10	< 5
B	< 10	-0,5 < 0,5	< 20	< 5	< 10	< 5
C	< 15	-0,7 < 0,7	< 30	< 10	< 15	< 10

Obr. 16 Vzťahy medzi PMV a PPD (vľavo). Kvalita vnútorného prostredia rozdelenie do tried podľa ISO 7730, príloha A1. Všetky kritéria by mali byť splnené zároveň pre danú kategóriu

Výsledné hodnoty indexu PMV a PPD pre dané podmienky môžu byť prenesené do psychrometrického diagramu, respektíve Mollerovho h-x diagramu vlhkého vzduchu. V nich je možné názorne ukázať vhodné rozmedzie parametrov vnútorného prostredia spĺňajúceho kritéria tepelného komfortu. Tieto informácie sú dôležité pre návrhu vetracích, vykurovacích, chladiacich systémoch budov a je ich možné použiť pri posúdení energetickej náročnosti budov s ohľadom na kvalitu vnútorného vzduchu (STN ISO 15251). Na obr. 17 je ukážka jedného z voľne dostupných nástrojov, ktorým umožňuje interaktívne vyhodnotiť návrhové podmienky vnútorného prostredia budov z hľadiska tepelného komfortu.



Obr. 17 Grafická interpretácia PMV-PPD modelu podľa ISO 7730 a 15251. Prevzaté [5]

6.3. Postup merania

Postup:

- 1) Innova – meranie operatívnej teploty, Innova – meranie rýchlosti prúdenia a relatívnej vlhkosti.
- 2) Innova – vyhodnotenie PMV-PPD, DR, PHS.
- 3) iHVAC – určenie ekvivalentnej teploty.
- 4) Korelácia medzi rýchlosťou prúdenia, indexom DR a t_{eq} .

6.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Zaznamenajte merané hodnoty prostredia, systém INNOVA, pre rôzne rýchlosti prúdenia od 0,05 m/s do 2 m/s.
 - vypočítajte intenzitu turbulencie na základe zmeranej fluktuácie rýchlosti prúdenia vzduchu.
- 2) Určite indexy PMV-PPD, DR, PHS.
 - dosadzte do vzorca a určite index DR
 - Spočítajte pomocou šablóny v Exceli index PMV a PHS
- 3) Zaznamenajte merané hodnoty systém iHVAC.
- 4) Vykonajte koreláciu medzi v_a , DR, t_{eq} a PMV.

Literatúra

- [1] PARSONS, K. *Human Thermal Environments: The Effects of Hot, Moderate, and Cold Environments on Human Health, Comfort, and Performance*, 3rd edition, CRC Press, USA, 2014.
- [2] FOJTLÍN, M.; FIŠER, J.; POKORNÝ, J.; POVALAČ, A.; URBANEC, T.; JÍCHA, M. An Innovative HVAC Control System: Implementation and testing in a vehicular Cabin. *JOURNAL OF THERMAL BIOLOGY*, 2017, roč. 70, č. 2017, s. 64-68. ISSN: 0306-4565.
- [3] FANGER PO: *Thermal Comfort*. Copenhagen, Danish Technical Press, 1970.
- [4] HOYT, T.; SCHIAVON, S.; PICCIOLI, A.; CHEUNG, T.; MOON, D.; STEINFELD, K. 2017, *CBE Thermal Comfort Tool*. Center for the Built Environment, University of California Berkeley, <http://comfort.cbe.berkeley.edu/>

7. TEPELNÝ MANEKÝN A PRINCÍPY MERANÍ

7.1. Úvod a ciele cvičenia

Tepelný komfort vo vnútornom prostredí ovplyvňujú primárne faktory prostredia a osobné (ľudské). Sekundárne faktory únava, stres, pohlavie, tréňovanosť, osobné zvyky a pod. sú veľmi rôznorodé, obtiažne sa kvalifikujú a nie je jednoduché ich objektívne zohľadniť.

Faktory prostredia

- Teplota vzduchu t_a [°C]
- Stredná radiačná teplota t_r [°C]
- Rýchlosť prúdenia vzduchu v [m/s]

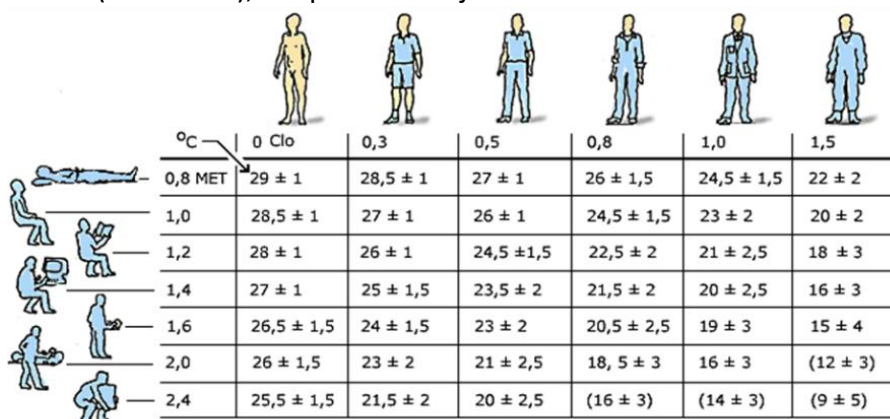
Ekvivalentná homogénna teplota t_{eq} [°C]

Faktory ľudské

- Tepelný odpor odevu R_{cl} [m²K/W]
- Vykonávaná činnosť M [met]

Diagram komfortných zón

Pri dynamických modeloch hrá tiež úlohu doba záťaže, prípadne aj vplyv slnečného žiarenia. Tepelný komfort je veľmi subjektívna záležitosť, preto sa niekedy pristupuje len k vyhodnoteniu tepelných pocitov, ktoré sa následne prevádzajú na predpokladané percento nespokojných ľudí (index PPD), viď predchádzajúce cvičenie 5.



Obr. 18 Osobné faktory (aktivita: 1 met = 58,15 W/m², odev: 1 clo = 0,155 [m²K/W]) a ich vplyv na komfortnú teplotu

Pre zjednodušenie vyhodnotenia vplyvov prostredia na prenos tepla z tela do okolia sa používa tzv. ekvivalentná teplota zahrňujúca vplyv mechanizmov prenosu tepla konvekciou a radiáciou, vrátane vplyvu slnečného žiarenia, len vplyv relatívnej vlhkosti nie je braný do úvahy. Ekvivalentná teplota homogénneho prostredia (EHT alebo t_{eq}) vyjadruje teplotu homogénneho prostredia, ktoré by malo rovnaký tepelný účinok na človeka ako skutočné nehomogénne prostredie viď obr. 20.

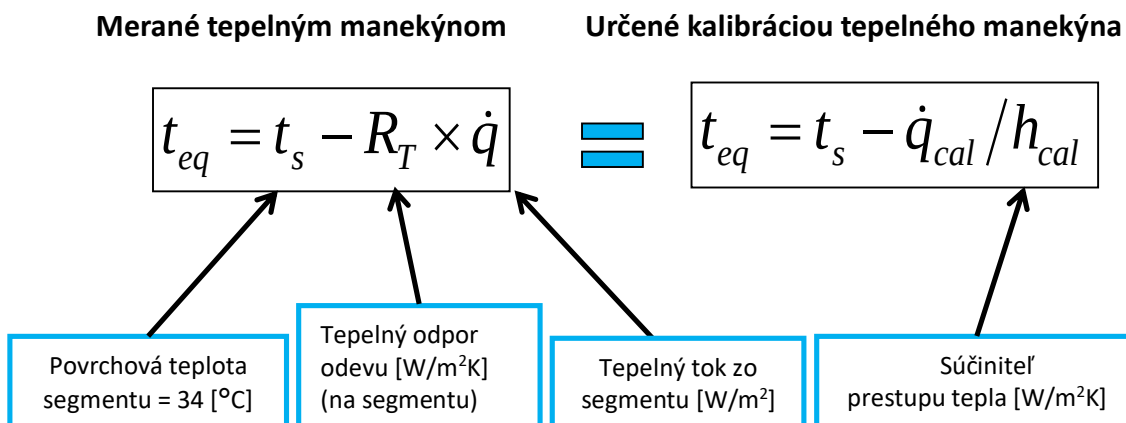
Ľudské faktory sú potom zohľadnené v tzv. diagrame komfortných zón (DKZ), ktorý bol zostavený na laboratórnych meraniach s pokusnými osobami. Metodika diagramu komfortných zón a princípu EHT vychádza z práce [1,2] a je súčasťou normy ISO 14505 [3]. Je vhodná hlavne pre kabíny dopravných prostriedkov a pre aktivity do 1,2 met (sedenie), ale je ju možné aplikovať aj na vnútorné prostredie budov [4].

Cieľom tohto cvičenia je

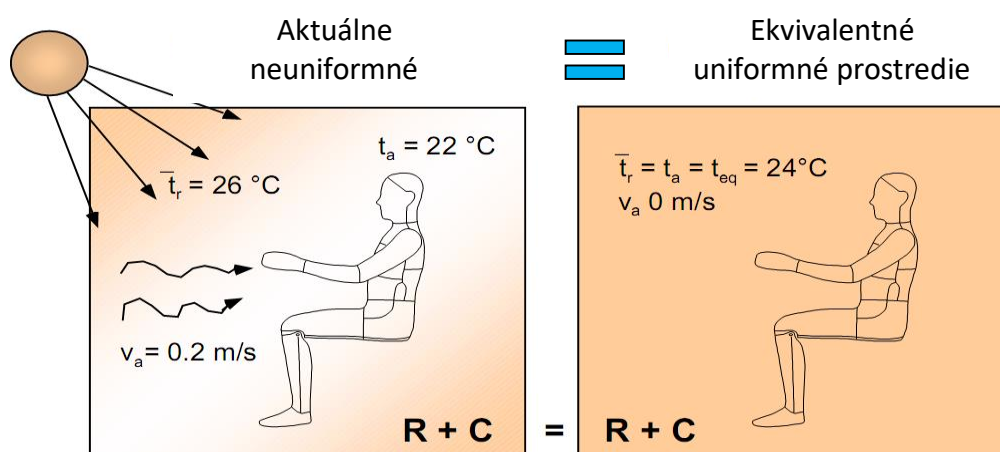
- 1) Názorne si ukázať metodiku vyhodnocovania ekvivalentnej teploty.
- 2) Využitie tepelného manekýna pri vyhodnocovaní tepelného komfortu pomocou diagramu komfortných zón.

7.2. Použité metódy a vybavie pre cvičenie

Tepelný manekýn Newton umožňuje merať tepelné toky $\dot{q}$ [W/m²] z povrchu manekýna pri udržiavaní danej teploty povrchu, ktorá je podľa ČSN 14505 pre všetky časti manekýna určená na hodnotu $t_s = 34$ °C. Ekvivalentná teplota t_{eq} v reálnom prostredí je určená na základe rovnice na obr. 19 vľavo, kde R_T [m²K/W] je celkový tepelný odpor odevu. Táto hodnota $R_T = 1/h_{cal}$ pochádza z kalibrácie tepelného manekýna, viď rovnica na obr. 19 vpravo. V priebehu kalibrácie (ideálne v klimatickej komore) je udržiavaná ekvivalentná teplota a manekýn meria tepelné toky $\dot{q}_{cal}$ [W/m²].

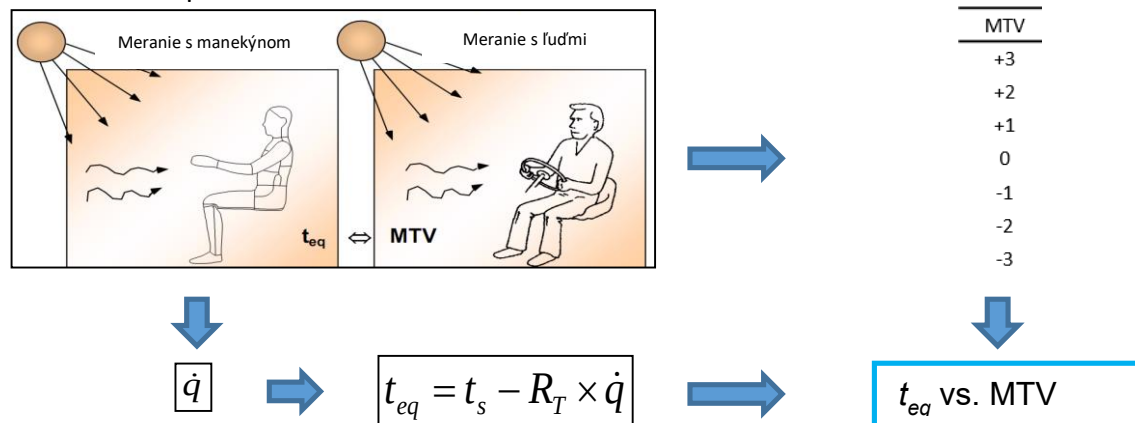


Obr. 19 Výpočet ekvivalentnej teploty v skutočnom neuniformnom prostredí a určenie kalibračných konštánt pre výpočet t_{eq} v homogénnom kalibračnom prostredí



Obr. 20 Ekvivalentná (homogénna) teplota t_{eq} [°C] zahŕňa vplyv konvekcie (C) a radiácie (R). V oboch prípadoch je z povrchu tela do okolitého prostredia prenášané radiáciou a konvekciou rovnaké množstvo tepla. Prevzaté [2]

Následne je možné z hodnôt ekvivalentnej teploty vyhodnotiť tepelný pocit a komfortu pomocou tzv. Diagramu komfortných zón, ktorý definuje komfortné rozsahy (zóny) ekvivalentnej teploty pre jednotlivé časti tela na základe tepelne izolačných vlastností odevu. Aktuálna meraná hodnota ekvivalentnej teploty (faktor prostredia), je potom porovnávaná s empiricky určeným diagramom komfortných zón (faktory osobné). Diagram komfortných zón bol určený na základe testov s dobrovoľníkmi a tepelným manekýnom, vid' obr. 21. Na obr. 22 je uvedený stručný postup merania s tepelným manekýnom. Na obr. 23 sú potom znázornené diagramy pre vybrané kalibrované zostavy odevov, vid' obr. 24 a na obr. 25 je ukážka vyhodnotenia kalibrácie v klimatickej komore. Meranie tepelného komfortu v kabíne automobilu bude predmetom 7 cvičenia.



Obr. 21 Empirický vzťah medzi tepelnými stratami, respektíve t_{eq} a MTV, vyjadrujúci stredný tepelný pocit ľudí podľa ISO 14505-2. Prevzaté z [2]

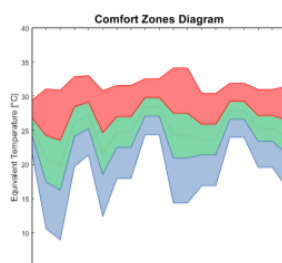
7.3. Postup merania

- 1) **Kalibrácia tepelného manekýna** – určenie h_{cal} [W/m²K] pre daný odev v kalibračnom homogénnom prostredí (typicky klimatická komora).
- 2) **Diagram komfortných zón (DKZ)** – určenie rozsahu $t_{eq,zones}$ pre jednotlivé komfortné zóny.
- 3) **Meranie t_{eq} v reálnom prostredí** – meranie s pomocou tep. manekýna (napr. v kabíne auta).

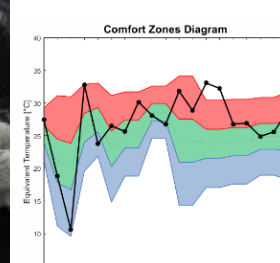
1 kalibrácia – klimatická komora



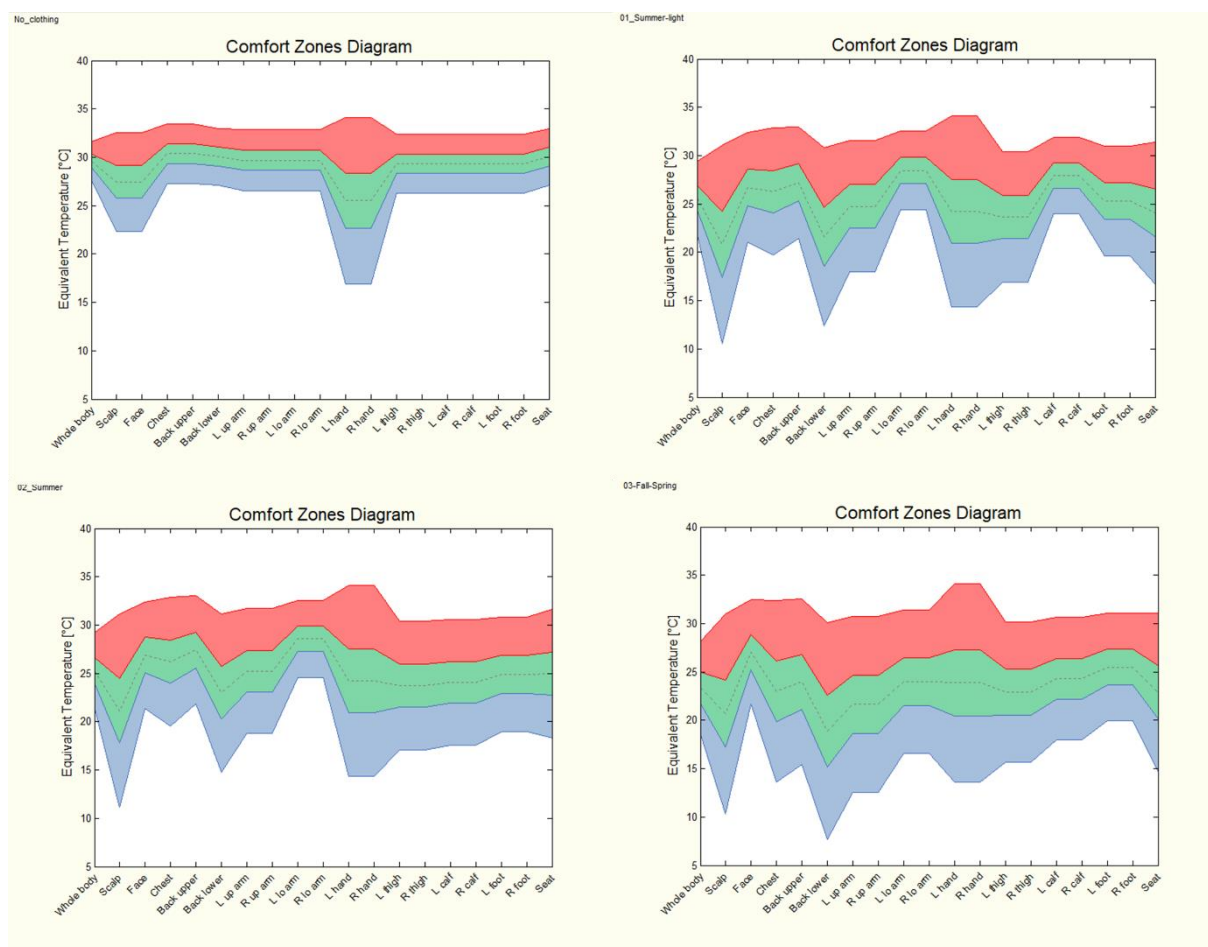
2 vyhodnotenie kalibrácie – tvorba DKZ



3 meranie v reálnom prostredí – zakreslenie t_{eq} do DKZ



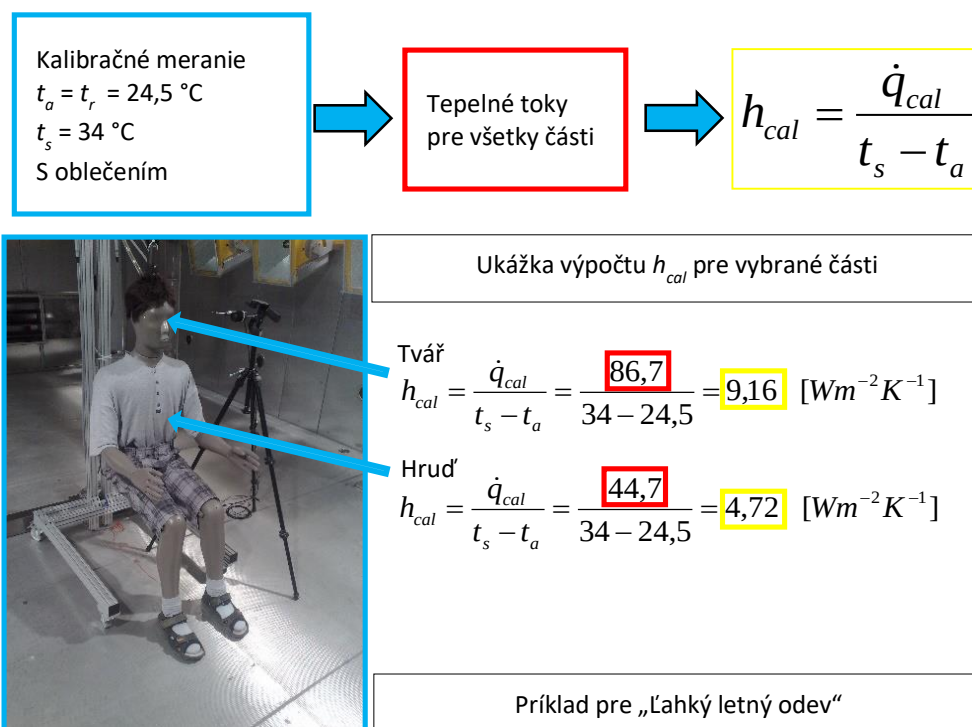
Obr. 22 Postup vyhodnotenia tep. komfortu pomocou tepelného manekýna



Obr. 23 Diagramy komfortných zón pre rôzne odevy



Obr. 24 Fotodokumentácia odevov k diagramom uvedeným na obr. 6.6. Zľava stojací manekýn (1 – bez odevu a vlasov), sediaci manekýn (2 – ľahký letný odev, 3 – letný odev, 4 – jesenný odev)



Obr. 25 Príklad kalibrácie pre ľahký letný odev

7.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Zostavte diagram komfortných zón pre letný odev!
- 2) Zostavte diagram komfortných zón pre jarný/jesenný odev!
- 3) Porovnajzte celkové ekvivalentné teploty! Ako sa zmenili?
- 4) Ako sa zmení tepelný komfort pri zapnutom vykurovaní, chladení?
- 5) Porovnajzte ekvivalentné teploty s teplotami vzduchu pre merané prípady!

Literatúra

- [1] WYON DP, LARSSON S, FORSGREN B, LUNDGREN I: Standard procedures for assessing vehicle climate with a thermal manikin: SAE Paper 890049, 1989
- [2] NILSSON H: Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models. PhD thesis, University of Gävle, Sweden, 2004
- [3] ČSN EN ISO 14505-2. Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného komfortu ve vozidlech. Český normalizační institut (2007)
- [4] ŠEVEČEK, J. Testování vnitřního prostředí prostřednictvím tepelného manekýna. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D

8. TEPELNÝ MANEKÝN – MERANIE V KONŠTRUKČNEJ PRAXI

8.1. Úvod a ciele cvičenia

Tepelný manekýn je vyhrievaná figurína, ktorá je vhodná na meranie tepelného odporu odevov a hodnotenie tepelného komfortu, hlavne v prostredí dopravných prostriedkov.

Nižšie je výpočet možného využitia tep. manekýna v praxi:

- Testovanie HVAC systémov kabíny automobilu – smerovanie a umiestnenie výustiek a pod.
- Testovanie tepelných vlastností odevov (rukavice, ochranné odevy, uniformy, outdoor vybavenie – bundy, topánky, spacie vaky a pod.)
- Testovanie dopadov znečistenia ovzdušia na človeka – testovanie filtrov, ochranných masiek pomocou dýchacieho mechanizmu

Tepelný manekýn umožňuje určiť tepelné straty z jeho jednotlivých častí tela, a tým identifikovať problematické miesta z hľadiska komfortu a stupňa obťažovania prievanom.

Pre hodnotenie v prostredia budov sa zvyčajne používajú dlhodobšie merania pomocou sond, ale aj tu je možné využiť manekýna pre identifikáciu vplyvu prostredia a HVAC technológií na tepelný komfort.

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Ukázať využitie tepelného manekýna v praxi.
- 2) Aplikovať metodiku na vyhodnotenie tepelného komfortu v kabíne automobilu.

8.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Pre toto cvičenie bude potrebný tepelný manekýn, automobil a klimatická komora.



Obr. 26 Ukážka aplikácie tepelného manekýna, vľavo: zimný odev, konfigurácia s dýchacím aparátom; vpravo letný odev, základná konfigurácia

8.3. Postup merania

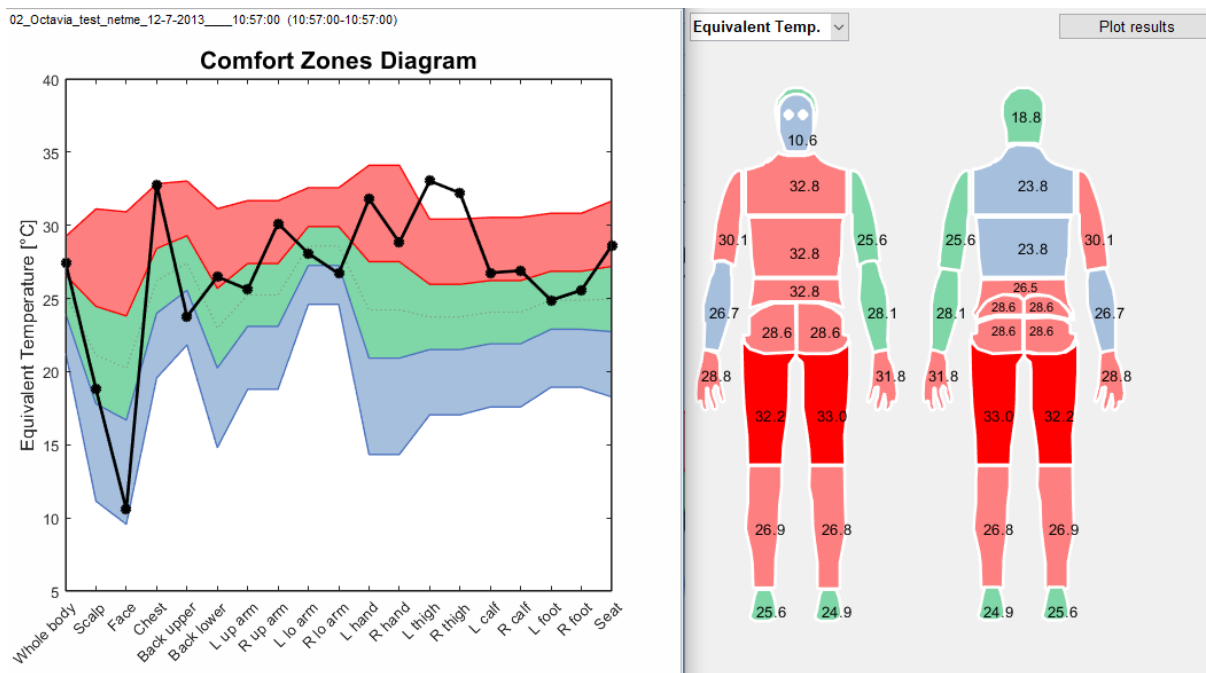
Postup:

- 1) Nastavenie klimatickej komory na požadovanú teplotu stabilizácie teploty, napr. pre vychladenie auta na 5 °C je doba teplotnej stabilizácie aspoň 6 h.

- 2) Stabilizácia tepelného manekýna v kabíne automobilu. Zapnutie záznamu veličín monitorujúci vnútorné a vonkajšie prostredie.
- 3) Nábeh HVAC systému v režime AUTO 22 °C, vyhodnotenie tepelného komfortu po 10 min, 20 min, 30 min.
- 4) Zmena nastavenie HVAC systému. Následné vyhodnotenie tepelného komfortu po 10 min, 20 min, 30 min.
- 5) Porovnanie dvoch nastavení klimatizácie v diagrame komfortných zón.

8.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Spracujete namerané dáta z tepelného manekýna MTV, q , t_{eq} .
- 2) Spracujete namerané dáta sondami monitorujúcimi vnútorné aj vonkajšie prostredie.
- 3) Porovnajte vyhodnotenie tepelného komfortu podľa teploty a t_{eq} .
- 4) Vyhodnoťte tepelný pocit pre automatický režim klimatizácie AUTO = 22 °C.
- 5) Je možné nejakým spôsobom zmeniť stratégiu tepelného managementu tak, aby bol dosiahnutý lepší komfort?



Obr. 27 Ukážka merania komfortu (čierna čiara) v aute. Leto – letný odev – chladenie kabíny (AUTO 22 °C, Vent. 3/6, situácia podľa obr. 7.1 vpravo)

9. SIMULAČNÉ NÁSTROJE V OBORE HVAC – TEPELNÁ BILANCIA KABÍNY

9.1. Úvod a ciele cvičenia

V technickej praxi je tiež bežné využitie simulačných nástrojov pre urýchlenie a zlacnenie vývoja nových technických zariadení. Simulácie je možné vykonávať aj pre experimenty, ktoré sú ťažko realizovateľné (meranie teplôt tkaniva v ľudskom tele) či nákladné (vyhodnocovanie tepelného komfortu pomocou väčšej skupiny dobrovoľníkov). Toto cvičenie sa zameriava na návrh optimálneho prostredia v kabíne automobilu pri danej teplote okolia. Zároveň sa zaoberá aj otázkou určenia dôležitých vstupných dát, vrátane okrajových podmienok, t. j. čo budeme musieť poznať, aby sme boli schopní vykonať simulácie. V cvičení sa na základe okrajových podmienok určených v 7 cvičení vykoná simulácia a ďalej bude vykonaný virtuálny scenár.

Cieľom tohto cvičenia je

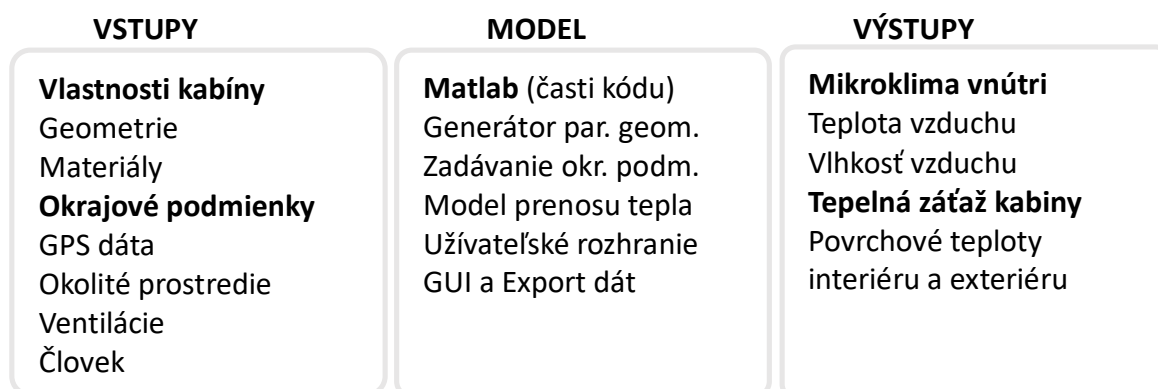
- 1) Ukázať možnosti simulačných nástrojov.
- 2) Naučiť sa základné vedomosti pri pre-processingu (príprava vstupných dát).
- 3) Vykonať simulácie na základe reálneho experimentu.
- 4) Vykonať simulácie na základe virtuálneho experimentu.
- 5) Naučiť sa základné vedomosti pri post-processingu (spracovanie výstupných dát a ich analýza).

Možnosti simulácie prenosu tepla v kabíne automobilu:

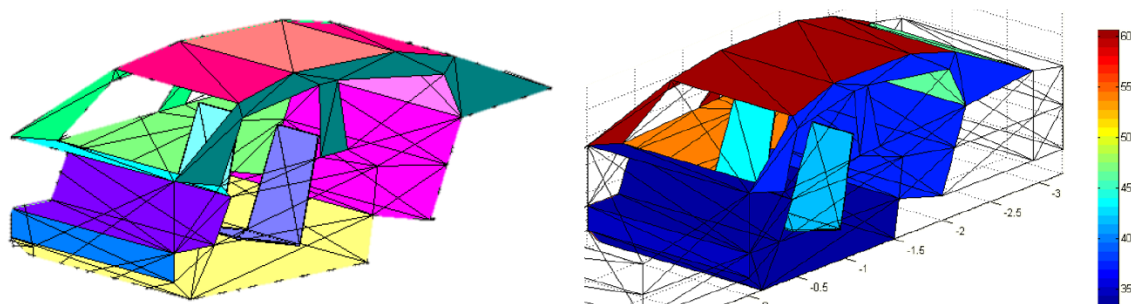
- Bilančný prístup – zvyčajne 0D/1D modely
 - a) Statický výpočet – simulácia ustálených stavov
 - b) Dynamický výpočet – simulácia stavov meniacich sa v čase
- CFD – 3D simulácia prúdenia
- 1D/3D kosimulácia – kombinácia 0D/1D modelov s 3D modelmi

Bilančný prístup – statický model – V technickej praxi zvyčajne platí, čo je možné vyriešiť jednoducho, to sa tiež jednoducho rieši. Pre mnoho technických problémov stačí tzv. zdravý sedliacky rozum a vhodné výpočtové prostredie (napr. MS Excel), ktorý umožňujú v základnej podobe vykonávať statistické/bilančné výpočty. Navyše, za využitia maker vo Visual Basicu, je možné schopnosti Excelu značne rozšíriť a prostredie tak využívať napr. pri post-processingu dát zo zložitejších simulácií, alebo je Excel možné prepojiť s inými simulačnými programami.

Bilančný prístup – dynamický model – Pre dynamické výpočty je vhodný napr. Matlab/Simulind, Dymola, Trnsys, ktorých hlavnou výhodou je rozsiahla knižnica numerických solverov. V tomto cvičení bude využitý program Virtuálny skúšobný stand auta (VTSCC vid' obr. 28,29), ktorý simuluje dynamické správanie prostredia v kabíne vozidla, a to pomocou riešenia sústavy obyčajných diferenciálnych rovníc.



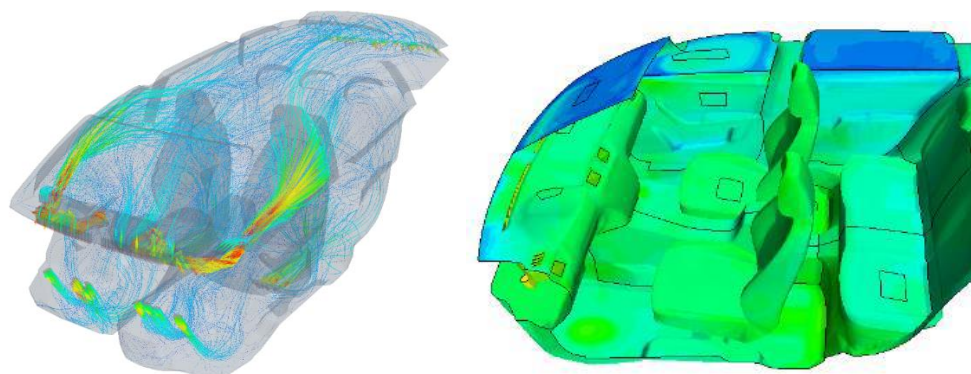
Obr. 28 Prehľad parametrov dynamického modelu tepelnej záťaže kabíny automobilu. Prevzaté z [1]



Obr. 29 Vľavo: parametrizovaná geometria. Vpravo: povrchové teploty interiéru zaparkovaného vozidla v letný deň – slnko svieti na spolujazdcovu stranu

CFD – 3D simulácia – napr. prostredie Fluent, CFX, Star-CCM+, OpenFoam

CFD simulácie sú časovo náročnejšie, ale poskytujú komplexný 3D obraz popisujúci rýchlostné/teplotné pole v uvažovanej doméne. Bežne sa CFD využíva v automobilovom/leteckom priemysle pre tvarovú optimalizáciu aerodynamických parametrov určitých komponentov či celého vozidla/lietadla, ale stále častejšie sa tento prístup využíva aj pre optimalizáciu tepelného managementu kabín (viď obr. 30).



Obr. 30 Ukážka CFD výpočtu prostredia v kabíne automobilu pre zimné obdobie (vykurovanie) – rýchlostné pole (vľavo) a rozloženie teplôt v interiéri (vpravo). Prevzaté z [2]

1D/3D kosisimulácia

V technickej praxi týkajúcej sa návrhu energetických zariadení (nielen HVAC) majú simulácie prenosu tepla nenahraditeľnú úlohu. V automobilovom priemysle je bežné mať výpočtové nástroje (virtuálny model auta) popisujúci dynamické správanie automobilu ešte skôr, ako je

reálny model vyrobený. Týka sa to pevnostných výpočtov, návrhu motora, elektroniky a komunikačných systémov, systému chladenia (power-train cooling), HVAC jednotky, a pod. Samotné CFD simulácie riešia veľmi komplexné problémy a je bežné, že na dielčie úlohy sú výhodné rôzne aj keď jednoduché simulačné modely. Keďže jednotlivé podmodely sa môžu navzájom ovplyvňovať (napr. model motora + model chladenia + energia pre HVAC) je nutné, aby si aj tieto výpočtové programy si medzi sebou boli schopné odovzdávať dáta. Kosimuláciu možno rozdeliť na dva typy

- 1 way coupling – jeden simulačný nástroj poskytuje dáta druhému bez spätnej odozvy
- 2 way coupling – vzájomná obojsmerná dát medzi simulačnými nástrojmi

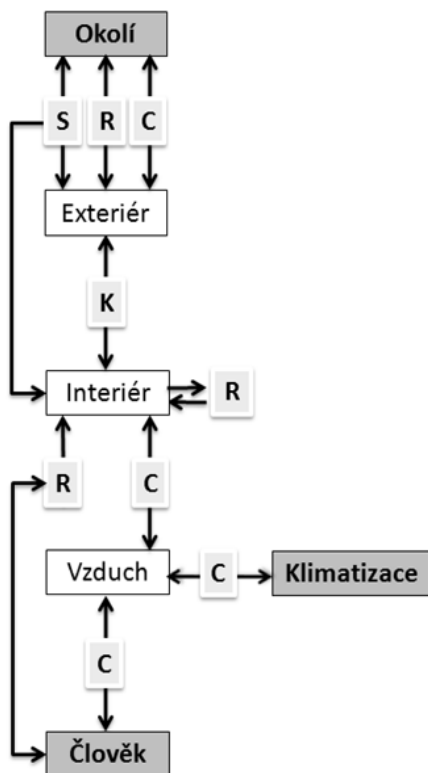
Functional mock-up interface (https://en.wikipedia.org/wiki/Functional_Mock-up_Interface) definuje štandardizované rozhranie pre tvorbu komplexných kosimulácií a je jednou z ciest ako vytvárať zložité modely a prípadne aj HIL (Hardware-in-loop) simulácie. FMU verzia 1 vznikla v roku 2010 aktuálna verzia 2 je z roku 2014. Do dnešného dňa je FMU podporované viac ako 100 výpočtovými nástrojmi, prevažne komerčnými napr.: FMI Add-in for Excel, NI LabVIEW, Matlab/Simulink, Dymola/Modelica, Trnsys, CFX, Star-CCM+, a pod., ale aj opensource Open Modelica, PyFMI, FMUSDK.

Okrem tohto štandardizovaného a pre inžinierov užívateľsky prívetivého prístupu je samozrejme možné si vlastné rozhranie pre odovzdávanie dát naprogramovať, viď napr. (MpCCI CouplingEnvironment od Fraunhofer institute), kedy sa jedná o odovzdávanie dát pomocou vlastných skript využívaných dátových súborov či komunikácie pomocou soketov.

9.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Dynamický model tepelnej záťaže kabíny [1] – Model kabíny sa skladá zo sústavy bilančných rovníc popisujúcich zákony zachovania energie, hmoty a tepelnej rovnováhy vo výpočtových uzloch. V modeli sa vyskytujú tri typy uzlov: Exteriér (index E v nasledujúcich rovniciach), Interiér (index I) a tzv. Air zone alebo tiež zóna s konštantným objemom vzduchu (index A), ktoré sú prepojené okrajovými podmienkami. V modeli sú tri typy okrajových podmienok: Okolité prostredie (bez indexu), Klimatizácia a ventilácia (V) a Človek (H). Prenos tepla je riešený zvlášť pre vonkajšie a vnútorné povrchy vrátane uvažovania akumulácie tepla. Vo vnútri kabíny je len jeden priestor, v ktorom je brané do úvahy dokonalé miešanie vzduchu popísané zákonom zachovania energie a hmoty.

Na obr. 31 je znázornená schéma prenosu tepla modelu kabíny automobilu. Na vonkajšom povrchu kabíny prebieha tepelná výmena medzi kabínou a okolitým prostredím konvekciou, krátkovlnnou a dlhovlnnou radiáciou. Časť krátkovlnnej radiácie je transmitovaná presklenými časťami do kabíny automobilu a následne absorbovaná povrchmi interiéru, ako sú napr. palubná doska, sedadlá, čalúnenie dverí a strechy a atď. Nezanedbateľný podiel na tepelnej záťaži kabíny má prestup tepla vedením cez povrch kabíny. Vo vnútri kabíny prebieha tepelná výmena radiáciou a konvekciou medzi jednotlivými povrchmi interiéru kabíny a človeka. Prenos tepla konvekciou sprostredkováva prúdenie vzduchu v kabíne, ktoré môže byť prirodzené či nútené. Prirodzená konvekcia je spôsobená vztlačovými silami, ktoré vynáša ľahší vzduch hore. Nútená konvekcia je spôsobená spustenou ventiláciou, kedy prichádza výústkami do kabíny čerstvý či klimatizačnou jednotkou upravený vzduch. Nútená konvekcia spôsobená vzduchom výústkami je najbežnejším spôsobom pre reguláciu teploty vzduchu v kabíne. Pre výpočet



radiácie (t. j. dopadajúceho slnečného žiarenia a tepelného žiarenia povrchov) model využíva 3D parametrizovanú geometriu a tým zohľadňuje vplyv vzájomnej polohy povrchov áut voči slnku a voči sebe. Relatívna vlhkosť vzduchu v kabíne je určená z rovnice miešania prívodného vzduchu so vzduchom v kabíne, vychádzajúca zo zákona zachovania energie (v tomto

případe zachovania entalpie vzduchu). Výsledkom modelu je teda predikcie mikroklimy v kabíne, t. j. teploty a relatívnej vlhkosti vzduchu, ďalej potom povrchovej teploty jednotlivých častí interiéru a exteriéru a jednotlivé tepelné toky medzi výpočtovými uzlami a tým aj celkovú tepelnú záťaž kabíny. Na základe vedomostí odevu je potom možno odhadnúť aj tepelný pocit podľa modelu PMV-PPD.

Obr. 31 Schéma prenosu tepla v kabíne automobilu. R – radiácia, S – slnečné žiarenie, C konvekcia, K - vedenie

Tepelná bilancia exteriéru kabíny

$$c_E m_E \frac{dT_E}{dt} = \dot{Q}_{r,E} + \dot{Q}_{c,E} + \dot{Q}_{sr,E} + \dot{Q}_{d,E}, \quad (8.1)$$

kde c [J/kgK] je merná tepelná kapacita, m [kg] je hmotnosť, t [s] je čas, T je teplota a $\dot{Q}$ označuje tepelné toky medzi okolím a exteriérom kabíny: $\dot{Q}_{r,E}$ dlhovlnná radiácia, $\dot{Q}_{c,E}$ konvekcia, $\dot{Q}_{sr,E} = \alpha \dot{Q}_{sr}$ absorbované slnečné žiarenie a $\dot{Q}_{d,E}$ vedenie medzi stenami kabíny.

$$\dot{Q}_{E,r} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot [(T_{amb} + 273.15)^4 - (T_E + 273.15)^4] \cdot A_E, \quad (8.1)$$

$$\dot{Q}_{E,c} = h_{c,E} \cdot (T_{amb} - T_E) \cdot A_E, \quad (8.2)$$

$$\dot{Q}_{E,d} = k \cdot \frac{(T_I - T_E)}{\delta} \cdot A_E, \quad (8.3)$$

kde ε je emisivita povrchu jednotlivých častí exteriéru kabíny, A_E jeho plocha a T_E jeho teplota. T_I je teplota interiéru tej istej časti kabíny. T_{amb} je teplota okolitého prostredia (vzduchu i stredná radiačná teplota). σ je Stefan-Boltzmannova konštanta, k je súčiniteľ tepelnej vodivosti medzi exteriérom a interiérom a δ je hrúbka jednotlivých častí kabíny. $h_{c,E}$ je súčiniteľ prestupu tepla konvekciou medzi vonkajším povrchom kabíny a okolitým prostredím.

Tepelná bilancia interiéru kabíny

$$c_I m_I \frac{dT_I}{dt} = \dot{Q}_{c,I} + \dot{Q}_{r,I} + \dot{Q}_{sr,I} - \dot{Q}_{d,E} + \dot{Q}_{r,H}, \quad (8.4)$$

kde $\dot{Q}_{c,I}$ [W] je tepelný tok konvekciou medzi objemom vzduchu a povrchu interiéru, $\dot{Q}_{sr,I} = \mu \dot{Q}_{sr}$

je transmitované slnečné žiarenie, ktoré sa následne absorbuje do povrchov interiéru. Prenos tepla konvekciou vo vnútri kabíny je daný vzťahom:

$$\dot{Q}_{c,I} = h_{c,I} \cdot (T_A - T_I) \cdot A_I, \quad (8.5)$$

$h_{c,I}$ je súčiniteľ prestupu tepla konvekciou medzi vzduchom s teplotou T_A a vnútorným povrchom kabíny s teplotou T_I , ktorého plocha je A_I . Prenos tepla radiáciou z danej časti interiéru (i) na ostatné časti je dané vzťahom $\dot{Q}_{r,I}^{(i)} = \sum_j \dot{Q}_{r,I}^{(i \rightarrow j)}$, t. j. ako súčet preneseného tepla radiáciou medzi danou časťou (i) a jednotlivými ostatnými časťami (j). Pre jednu časť je prenos tepla radiáciou vyjadrený rovnicou:

$$\dot{Q}_{r,I}^{(i \rightarrow j)} = \varepsilon^{(i)} \varepsilon^{(j)} \sigma \cdot [(T_I^{(j)} + 273,15)^4 - (T_I^{(i)} + 273,15)^4] \cdot F_{i \rightarrow j} A_I^{(i)}, \quad (8.6)$$

kde $F_{i \rightarrow j}$ je uhlový faktor medzi daným povrchom (i) a okolitým povrchom (j). Výpočet uhlových faktorov s uvažovaním tienenia je náročný a dá sa vykonať len pomocou CFD programu Star-CCM+, ktorý mimo iné obsahuje práve riešenie na výpočet uhlových faktorov metódou surface-to-surface.

Tepelná bilancia človeka

Pre vyjadrenie tepelnej bilancie človeka v miernom neutrálnom a homogénnom prostredí je možné použiť rovnicu z modelu PMV-PPD. Zjednodušene sa dá predpokladať, že metabolizmus každého človeka sediaceho v kabíne produkuje približne tepelný výkon $\dot{Q}_H = \dot{Q}_{r,H} + \dot{Q}_{c,H} = 70 + 30 = 100$ W. Jeden človek prenáša 70 W tepla radiáciou a vedením a 30 W konvekciou, vyparovaním a dýchaním. Pre n osôb vo vnútri stačí dať $x \cdot n$.

Tepelná bilancia v objeme vzduchu kabíny

$$m_A c_A \frac{dT_A}{dt} = \dot{Q}_{c,V} + \dot{Q}_{c,H} - \dot{Q}_{c,I}, \quad (8.7)$$

Tepelná rovnováha v objeme vzduchu je ovplyvnená konvekciou medzi vzduchom a interiérom $\dot{Q}_{c,I}$ a človekom $\dot{Q}_{c,H}$ a ventiláciou, t. j. miešaním privádzaného vzduchu výustkami v priestore kabíny,

$$\dot{Q}_{c,V} = (i_V - i_A) \frac{dm_V}{dt} - m_A \frac{di_A dx_A}{dx_A dt} \quad (8.8)$$

kde x_A [kg/kg_{sv}] je merná vlhkosť vzduchu v kabíne, čo je hmotnosť vodných pár vzťahujúca sa na hmotnosť suchého vzduchu. 1. člen na pravej strane rovnice (8.9) vyjadruje celkovú zmenu entalpie v kabíne, ktorá je spôsobená ventiláciou, t. j. ako rozdiel medzi vstupujúcou a vystupujúcou entalpiou do kabíny. 2. člen pravej strany v rovnici (8.9) zohľadňuje to, že časť energie sa spotrebuje len zmenu entalpie vodnej pary (vlhké zložky vzduchu) v kabíne.

Bilancia vlhkosti vzduchu

Privádzaný vzduch výustkami sa dokonale mieša s objemom vzduchu v kabíne a pre vlhkosť vzduchu v kabíne platí zákon zachovania hmoty:

$$m_A \frac{dx_A}{dt} = (1 + x_A) \left(\frac{x_V - x_A}{1 + x_V} \right) \frac{dm_A}{dt} + \dot{m}_{H_2O} \quad (8.10)$$

kde x_V [kg/kg_{sv}] je merná vlhkosť vzduchu privádzaného do kabín. $\dot{m}_{H_2O}$ je množstvo vody, ktoré odchádza z človeka vyparovaním ako z pokožky tak aj dýchaním. Ľudský organizmus je citlivý hlavne na relatívnu vlhkosť vzduchu, ktorá je definovaná ako pomer hmotnosti skutočného obsahu vodných pár k hmotnosti vodných pár nasýteného vzduchu, čo odpovedá pomeru parciálneho tlaku vodných pár p_a a parciálneho tlaku sýtych vodných pár p_a'' .

$$\varphi_A = \frac{p_a}{p_a''} = \frac{p_{atm}}{p_a'' \cdot (1 + 0,622/x_A)} \quad (8.11)$$

kde p_{atm} [Pa] je tlak vzduchu v kabíne (blízky atmosférickému tlaku, ale môže vznikať mierny pretlak pri nútenom vetraní, alebo mierny podtlak pri vypnutej ventilácii) a p_a'' je parciálny tlak sýtej vodnej pary vo vzduchu. Parciálny tlak sýtej vodnej pary je závislý na teplote vzduchu, vid' empirická rovnica (6.13), ktorá je platná pre teploty vzduchu $T_a = -80$ °C až 100 °C. V modeli kabíny je tento vzťah využitý pre určenie stavu nasýteného vlhkého vzduchu pri teplote privádzaného vzduchu T_V a vzduchu v kabíne T_A .

$$p_a'' = 10^5 \exp \left(11,848 - \frac{3916,43}{230,99 + T_a} \right) \quad (8.12)$$

Výsledná mikroklima a tepelná záťaž kabíny

Teplota vzduchu v kabíne a jeho relatívna vlhkosť sú základné parametre mikroklimy v kabíne automobilu. Spoločne s povrchovými teplotami povrchov interiéru a exteriéru, je možné určiť výslednú pasívnu tepelnú záťaž kabíny automobilu. Pasívna tepelná záťaž kabíny je daná súčtom tepelných tokov vedených cez steny kabíny $\dot{Q}_{d,E}$, transmitovaných slnečným žiarením $\dot{Q}_{sr,I}$ a produkovaným ľudským telom $\dot{Q}_H$.

$$\dot{Q}_{PHL} = \dot{Q}_{d,E} + \dot{Q}_{sr,I} + \dot{Q}_H$$

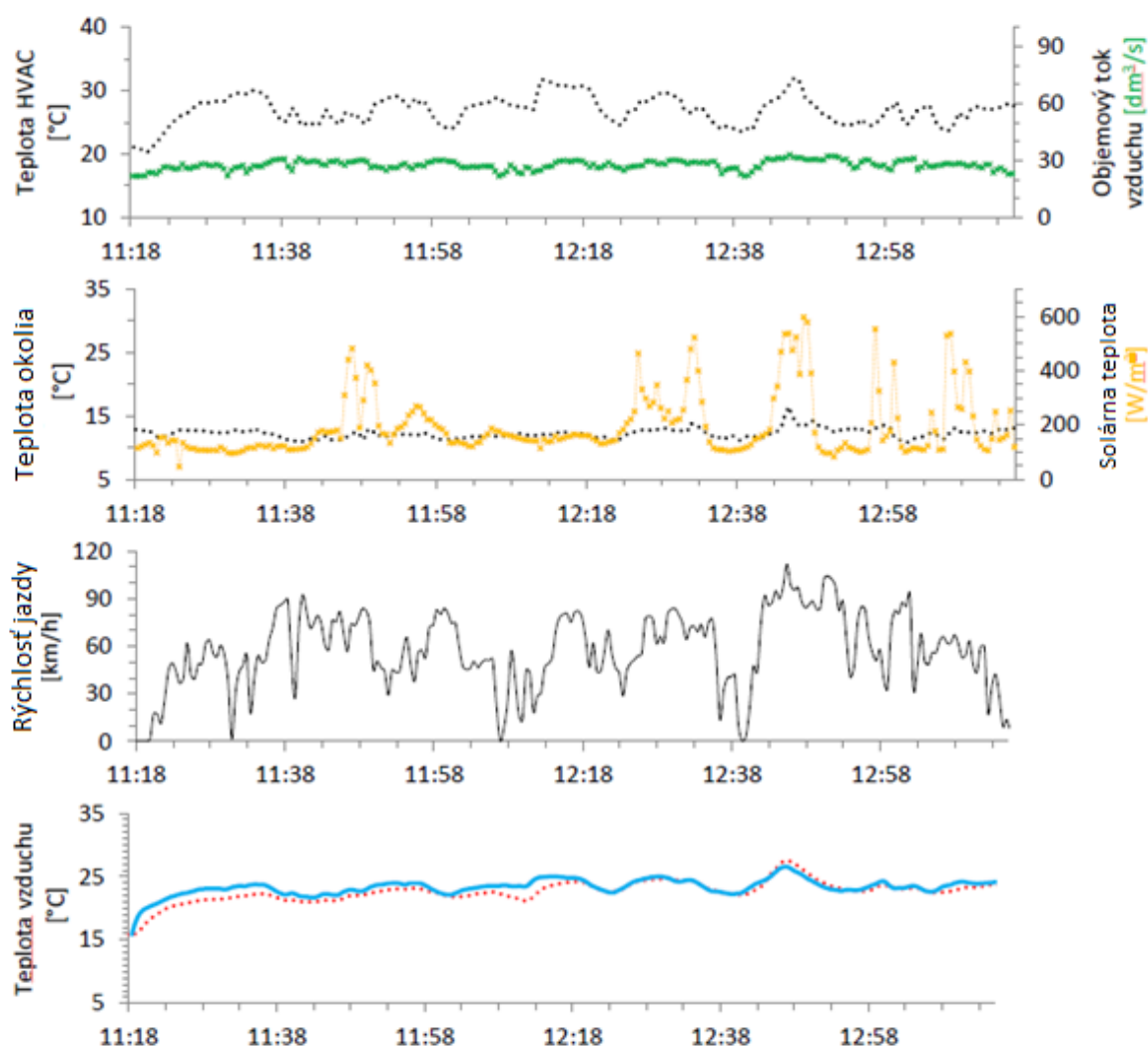
Pre určenie tepelnej rovnováhy v kabíne automobilu je nutné, aby pasívna tepelná záťaž kabíny bola rovná tepelnému toku prichádzajúcemu so vzduchom z klimatizačnej jednotky, pretože

$$\dot{Q}_{PHL} + \dot{Q}_V = 0.$$

Pokiaľ má pasívna tepelná záťaž kabíny kladné znamienko $\dot{Q}_{PHL} > 0$, znamená to, že kabína prijíma teplo z okolia a je nutné ju ochladzovať $\dot{Q}_V < 0$. Pri pasívnej tepelnej záťaži nie je braný do úvahy vplyv spotreby energie v klimatizačnej jednotke na ohriatie/ochladenie čerstvého vzduchu zvonka na teplotu privádzaného vzduchu. Energia spotrebovaná na ochladenie/ohriatie nasávaného vzduchu zvonka $\dot{Q}_{A/C}$ je definovaná ako rozdiel entalpií za čas privádzaného vzduchu do HVAC jednotky a odvádzaného vzduchu do kabíny a musí byť tiež započítaná do celkovej tepelnej záťaže $\dot{Q}_{HL}$

$$\dot{Q}_{HL} = \dot{Q}_{PHL} + \dot{Q}_{A/C} \quad (8.93)$$

Poznámka: Vyššie uvedený popis dynamického modelu tepelnej záťaže kabíny bol prevzatý z [1].



Obr. 32 Ukážka jazdných dát (Škoda Felícia – Brno – Vyškov a späť, 13.10.) a výsledkov predikcie vnútornej teploty v kabíne vozidla (spodný graf – modrá plná čiara)

9.3. Postup simulácie

Postup:

Na základe výsledkov 7. cvičenia „Tepelný manekýn – meranie v konštrukčnej praxi“ vykonajte výpočet tepelnej záťaže kabíny. Rozlíšte tepelné toky prechádzajúce oknami/ ostatnými časťami automobilu.

- 1) Pomocou bilančného prístupu Excelu.
- 2) Pomocou dynamického modelu Matlabu.
- 3) Pomocou CFD alebo 1D/3D Kosimulácie (FMI). Vzhľadom k náročnosti výpočtu vykonajte len post-processing už hotovej simulácie.
- 4) Vykonajte virtuálny experiment pre iný typ okrajových podmienok.

9.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Porovnajte vybrané výsledky simulácií s výsledkami reálneho experimentu.
- 2) Vytvorte virtuálny scenár zmenou vstupných parametrov a porovnajte tieto výsledky s pôvodnou simuláciou.

Literatúra

[1] 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.

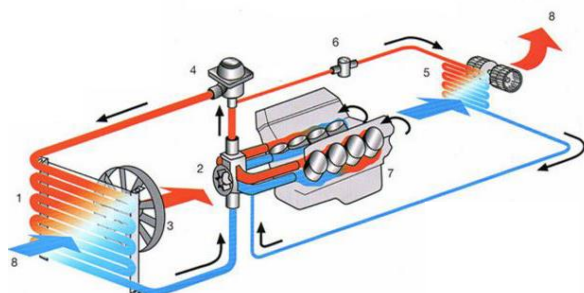
[2] KUČERA, C. CFD simulace proudění vzduchu v kabině automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 59 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D.

10. HVAC JEDNOTKA PRE KLIMATIZÁCIU KABÍNY AUTOMOBILU

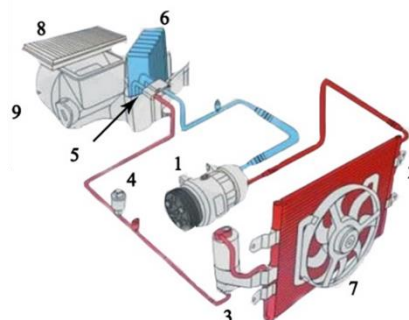
10.1. Úvod a ciele cvičenia

HVAC jednotka poskytuje vykurovanie a chladenie kabíny automobilu. Ako zdroj tepla je väčšinou využité odpadové teplo z motora či iných zdrojov tepla v automobile vid' obr. 33 vľavo. Prívod chladu je zaistený pomocou okruhu klimatizačnej jednotky vid' obr. 33 vpravo. Podľa požiadaviek užívateľa je v rozvodovej HVAC skrini (vid' obr. 34) riadená distribúcia a úprava privádzaného vzduchu.

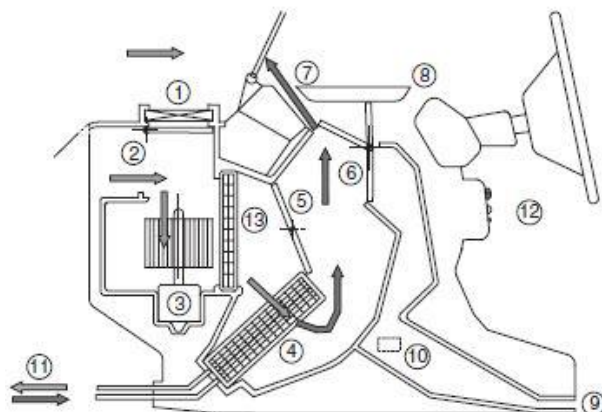
1 – Chladič, 2 – Vodná pumpa, 3 – Ventilátor, 4 – Termostat,
5 – Tepelný výmenník, 6 – Ventil výmenníka,
7 – Motor, 8 – Vzduch



1 – Kompresor, 2 – Kondenzátor, 3 – Filter/odvlhčovač
4 – Tlakový spínač, 5 – Expanzný ventil, 6 – Výparník,
7 – Ventilátor kondenzátoru, 8 – Filter vzduchu, 9 – Ventilátor



Obr. 33 Schéma HVAC obehu automobilu – vykurovanie a chladenie



1 – Filter čerstvého vzduchu
2 – Recirkulačná klapka
3 – Ventilátor
4 – Tepelný výmenník (uzol motoru)
5 – Teplotný zmiešavie klapka
6 – Klapka distribúcie vzduchu
7 – Ofukovač čelného skla
8 – Výustka pre hlavu/telo
9 – Výustka pre nohy
10 – Potrubie pre výustky nohou
11 – Prívod/odvod chladiacej kvapaliny motoru
12 – Ovládací panel
13 – Výparník A/C

Obr. 34 Rozvodová skriňa HVAC jednotky

Vetranie

Jednou z hlavných požiadaviek na vetranie je poskytnúť dostatočné množstvo čerstvého vzduchu, zaistiť bezpečnosť jazdy (odmrazovanie, odhmlievanie skiel), tepelný komfort. Posádka vozidla produkuje dýchaním CO_2 a vodnú paru. Pokiaľ by kabína nebola vetraná koncentrácia CO_2 by mohla jednoducho dosiahnuť hodnoty 2500 ppm, čo prináša únavu, nepozornosť a diskomfort. Vetranie zaisťuje prívod čerstvého vzduchu do kabíny a odvod znečisteného vzduchu do okolia v zadnej časti automobilu. Výmena vzduchu môže prebiehať prirodzene rozdielom tlakov, ktorý vzniká pri pohybe automobilu, alebo pri nízkych rýchlostiach ventilátora, ktorý je súčasťou HVAC jednotky. Privádzaný vzduch pred vstupom do kabíny najskôr prechádza vzduchovým filtrom, kde je zbavený nečistôt, ďalej ventilátorom a potom sieťou vzduchovodov až k výustkám v kabíne automobilu. Potom, čo prejde kabínou,

odchádza otvorom v zadnej časti automobilu. V okruhu býva tiež zabudovaný snímač kvality vzduchu a v prípade potreby je možné, na istý čas, vetranie kompletne prepnúť na vnútornú recirkuláciu (jazda v kolóne, v tuneli).

Vykurovanie

K ohrevu privádzaného vzduchu dochádza na teplosmennej ploche výmenníka chladiacej slučky motora (obr. 33 vľavo). Odpadové teplo, ktoré vzniká pri spaľovaní v motore automobilu je odvádzané vodnou chladiacou slučkou motora cez chladič automobilu (bod 1), ktorý je ofukovaný vetrákom (bod 3). Pokiaľ je potrebné v kabíne automobilu zvýšiť teplotu, môže byť časť tepla privádzaná pomocou tepelného výmenníka (bod 5) do kabíny automobilu. Intenzitu vykurovania môžeme meniť dvoma spôsobmi. Prvý spôsob je obmedzenie prietoku kvapaliny výmenníkom, kedy regulačný ventil (bod 6) mení prietok kvapaliny v tepelnom výmenníku. Táto metóda je pre reguláciu relatívne pomalá. Alebo môžeme použiť druhú metódu, ktorá využíva klapku pred výmenníkom tepla, ktorá reguluje množstvo vzduchu prechádzajúceho cez teplosmennú plochu a tiež jej obtok.

Chladenie

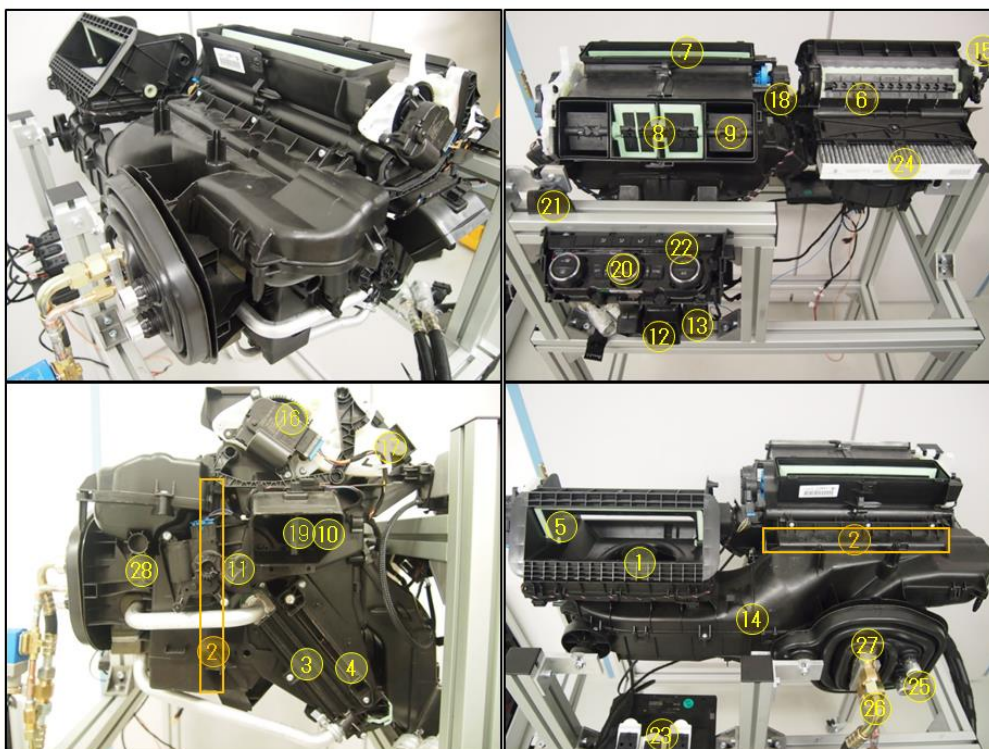
Pri chladení prechádza nasávaný vzduchu cez filter, ventilátor a výparník chladiaceho okruhu obr. 33 vpravo body 8, 9, 6 a vstupuje do kabíny automobilu. K popisu cyklu chladiva: plynné chladivo je nasávané kompresorom (bod 1) a prebieha kompresia medzi bodmi 1-2. Pri kompresii rastie tlak a teplota, pričom tá je po kompresii vyššia ako teplota okolitého vzduchu. Následne plynné chladivo prechádza kondenzátorom (bod 2) a medzi bodmi 2-3 odovzdáva teplo v kondenzátore vzduchu a kondenzuje. Kvapalné chladivo prechádza filtrom a odvlhčovačom. Následne vstupuje do expanzného ventilu (bod 5), kde prebieha expanzia, pri ktorej klesá tlak chladiva a tým aj vyparovacia teplota. Vzduch prechádzajúci výparníkom má vyššiu teplotu ako je výparná teplota chladiva. Chladivo, teplo potrebné k zmene fázy (vyparovanie), odoberá z prúdiaceho vzduchu, ktorý sa tým ochladzuje a následne vstupuje do priestoru kabíny automobilu.

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Zoznámiť sa s rozvodovou skriňou vykurovania pri HVAC jednotke automobilu.
- 2) Zmeniť distribúciu vzduchu pre rôzne nastavenie vnútorných klapiek vrátane recirkulačnej.

10.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

HVAC rozvodná skriňa – MQB (Modularer Querbaukasten) je univerzálna platforma pre konštrukciu osobných automobilov, ktorá umožňuje zníženie vývojových a výrobných nákladov v rámci značiek koncernu VW, pretože veľké množstvo dielov je štandardizovaných a je možná ich zástavba do rôznych vozidiel – napríklad skriňa HVAC jednotky uvedená na obr. 35. Výkon vykurovania/chladenia sa dá regulovať okrem nastavenia teplôt aj otáčkami ventilátora, ktorý dodáva upravený vzduchu do kabíny. Sieť vzduchovodov spoločne s vlastnou s vlastnou charakteristikou ventilátora určujú, ako sa bude systém distribúcie vzduchu správať v priebehu skutočných prevádzkových podmienok.



- 1 – Ventilátor
- 2 – Výparník (pod krytom)
- 3 – Tepelný výmenník
- 4 – PTC – vykurovací el. element
- 5 – Nasávanie čerstvého vzduchu (recirkulačná klapka - 1 časť)
- 6 – Nasávanie vzduchu z kabíny (recirkulačná klapka - 2 časť)
- 7 – Distribučná klapka – defrost
- 8 – Distribučná klapka – palubná doska – stred (uzatvárací kanál ku stredovým výstúpkam)
- 9 – Distribučná klapka – palubná doska – bočná (Pravá) + napojenie prívodu ku dverovej a bočnej výstúpke palubnej dosky
- 10 – Distribučná klapka – nohy – Prívod vzduchu k nohám vpredu – (Prívod vzduchu na nohy vodiča klapka vo vnútri)
- 11 – Zmiešavacia klapka + servomotor k teplotnej klapke
- 12 – Prívod vzduchu stredom dozadu
- 13 – Prívod vzduchu k nohám vzadu (vpravo)
- 14 – Prívod vzduchu prúdiaci cez výparník
- 15 – Servo pohon k recirkulačnej klapke čerstvého vzduchu
- 16 – Servo k defrostu + predné ofukovače stredné
- 17 – Servo k defrostu + predné ofukovače stredné
- 18 – Servo pro zmiešavaciu klapku alebo defrost
- 19 – Senzor teploty nohy vodiča
- 20 – Senzor snímajúci teplotu v kabíne
- 21 – Senzor oslnenia býva umiestnený na palubnej doske pod sklom
- 22 – Riadiaca jednotka - ovládací panel HVAC systému
- 23 – Riadiaca jednotka - výkonové spínacie prvky
- 24 – Peťový a prachový filter - v prevádzkovom stave zasunutý
- 25 – Prívod teplej vody ohriatej od motora na vykurovanie
- 26 – Prívod chladiva do expanzného ventilu
- 27 – Expanzný ventil
- 28 – Prívod kvapalného chladiva do výparníka a odvod plynného chladiva (vo vnútri)

Obr. 35 Rozvodová skriňa vykurovania MQB a popis jednotlivých častí HVAC rozvodná skriňa, niťové sondy, anemometer, tlaková sonda

10.3. Postup meraní

- 1) Aplikujte niťové sondy pre vizualizáciu prúdenia.
- 2) Zmerajte anemometrom rýchlosť prúdenia na jednotlivých výstupoch z HVAC jednotky pre rôzne nastavenia klapiek – nohy, defrost.

- 3) Zmerajte tlakové straty na jednotlivých výstupoch pre rôzne nastavenia klapiek – nohy, defrost.

10.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

- 1) Vyhodnoťte distribúciu privádzaného vzduchu v závislosti na nastavenie regulačného systému.
- 2) Pri ktorých režimoch má prioritu privod vzduchu pred čelné sklo a kedy k nohám cestujúcich?
- 3) Aký je príkon ventilátora jednotky vo vzťahu k prietoku vzduchu jednotkou. Je tento vzťah lineárny? Pokiaľ nie prečo?

Literatúra

- [1] DRKAL, F. A KOL.: *Klimatizace*, 1. vyd. Praha: ČVUT, 2015
- [2] JANOTKOVÁ, E.: *Technika prostředí - 1. a 2. část* [online]. 1. upravené vyd. Brno: FSI VUT v Brně, 2014, Dostupné z: <http://studyenergyweb.fme.vutbr.cz/technika-prostredi/technika-prostredi>
- [3] POLÁČEK, F. Vliv nastavení ventilace na množství přiváděného vzduchu a jeho distribuci v kabině automobilu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 81 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Pokorný, Ph.D.
- [4] ŠÍP, J. Aplikace rychlostní sondy se žhavenými drátky při měření rychlostního pole za automobilovou vyústkou. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 103 s. Vedoucí diplomové práce Ing. František Lízal, Ph.D.

11. POROVNANIE PARAMETROV TEPELNO-VLHKOSTNEJ MIKROKLÍMY PRE RÔZNE SYSTÉMY VYKUROVANIA

11.1. Úvod a ciele cvičenia

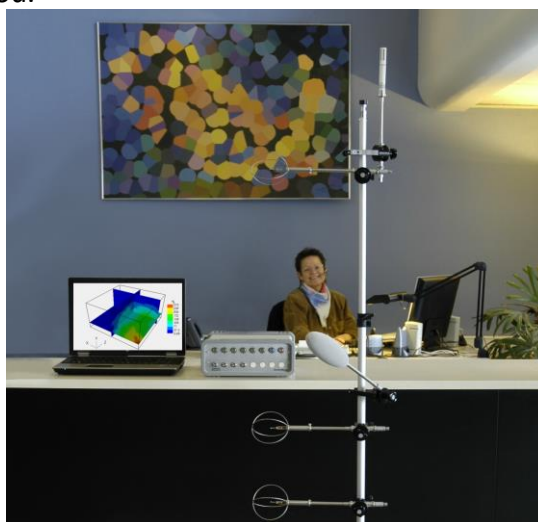
Podobne ako pri cvičení 3, tepelný komfort výrazne vplýva na kvalitu prostredia. Pri porovnaní jednotlivých vykurovacích systémov sa faktory prostredia líšia. Najmä pri rozdielnych pomeroch sálavej a konvekčnej zložky tepla dochádza k heterogennému rozloženiu teplôt vo vykurovanej miestnosti. Konvekčná zložka má vplyv aj na prirodzené prúdenie vzduchu vplyvom gravitačných síl. Meranie faktorov tepelnej pohody bude prebiehať v termostatickej komore, skonštruovanej podľa normy STN EN 442 časť 2 – radiátory a konvektory – skúšanie a vyhodnocovanie výkonu. Pri rovnakých okrajových podmienkach (Tepelná strata miestnosti, relatívna vlhkosť vzduchu v miestnosti a požadovaná výpočtová teplota) sa budú porovnávať odlišnosti vo faktoroch prostredia. Zmena faktorov prostredia bude mať vplyv aj na výsledné hodnoty indexov PPD a PMV, ktoré hodnotia kvalitu prostredia. Do úvahy je potrebné brať aj lokálne faktory tepelnej pohody ako sú napríklad teplota podlahy pri podlahovom vykurovaní.

Cieľom tohto cvičenia je

- 1) Porovnanie faktorov prostredia pre jednotlivé vykurovacie systémy a ich vplyv na výsledné hodnoty indexov PPD a PMV
- 2) Využitie zariadenia ComfortSense – Dantec pre meranie tepelnej pohody v miestnosti

11.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Na meranie tepelnej pohody v termostatickej komore použijeme zariadenie ComfortSense. Meracie členy zariadenia spĺňajú normy EN 13 182, ISO 7726 a ISO 7730. Zariadenie je navrhnuté pre vývoj a výskum vykurovacích chladiacich a vetracích systémov, pomocou viacbodového merania teploty a rýchlosti vzduchu. Zariadenie sa skladá z meracej jednotky, piatich meracích členov, statívu na rozmiestnenie meracích členov a kabeláže na prepojenie členov s jednotkou.



Obr. 36 Meracie zariadenie ComfortSense

Vo výške členkov, ťažiska tela a úrovne hlavy sa umiestnia meracie členy pre meranie rýchlosti prúdenia vzduchu a teploty vzduchu. Merací člen pre meranie strednej radiačnej teploty sa osadí vo výške ťažiska tela. Výška meracieho člena pre meranie relatívnej vlhkosti nie je podstatná.

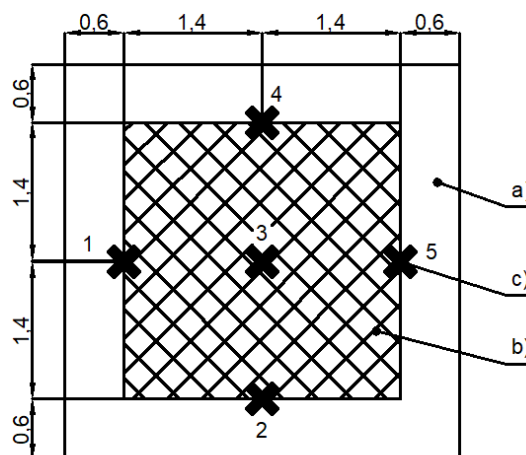


Obr. 37 Meracie členy pre meranie: teploty a rýchlosti prúdenia vzduchu (vľavo), relatívnej vlhkosti (vstrede) a strednej radiačnej teploty (vpravo)

11.3. Postup merania

Postup:

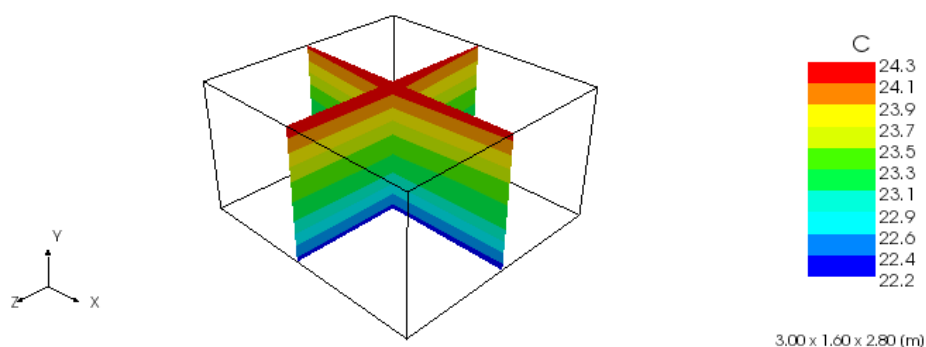
- 1) **Stabilizovanie teploty v termostatickej komore** (vytvorenie rovnakých OP pre jednotlivé merania (konštantná tepelná záťaž a teplota v miestnosti podľa termostatu riadiaceho vykurovací systém)
- 2) **Stanovenie ľudských faktorov** (určenie hodnoty metabolizmu a tepelného odporu oblečenia)
- 3) **Meranie faktorov prostredia** (meranie v strede pôdorysu a strede stien pobytovej zóny miestnosti)



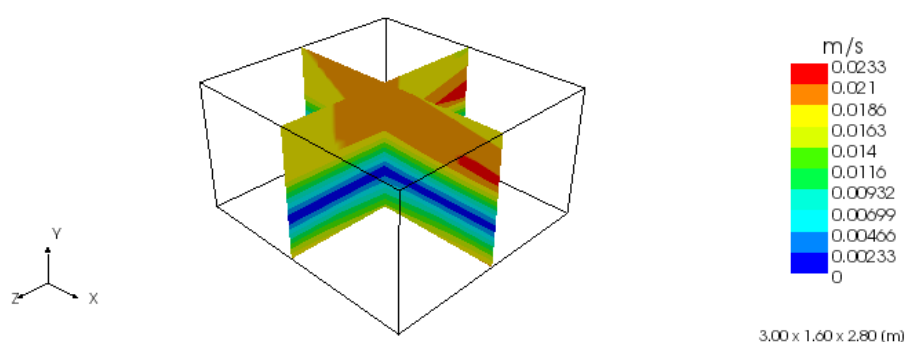
Obr. 38 Pôdorys termostatickej komory a) okrajová zóna, b) pobytová zóna, c) miesto merania

11.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

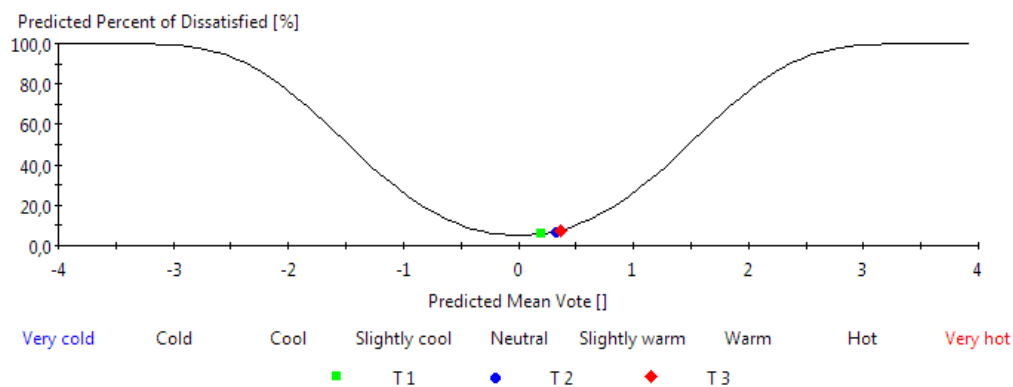
- 4) Porovnajte faktory prostredia pre jednotlivé vykurovacie systémy
- 5) Porovnajte vizualizácie rozloženia teplôt vzduchu v interiéri (porovnajte vertikálne teplotné gradienty)
- 6) Porovnajte vizualizácie rozloženia rýchlostí prúdenia vzduchu v interiéri
- 7) Vyhotovte grafy závislostí indexov PMV a PPD pre jednotlivé systémy vykurovania
- 8) Porovnajte indexy PMV a PPD v závislosti od výšky a polohy meracích zariadení.



Obr. 39 Rozloženie teploty vzduchu v miestnosti



Obr. 40 Rozloženie rýchlosti prúdenia vzduchu v miestnosti



Obr. 41 Závislosť indexov PPD a PMV

- [1] SZÉKYOVÁ, M., FERSTL, K., NOVÝ, R.: Vetrание a klimatizácia. Bratislava: Jaga group, 2004. ISBN 80-80760-00-4.
- [2] PETRÁŠ, D. a kol.: Vykurovanie rodinných a bytových domov. Bratislava: Jaga group, 2005. ISBN: 80-8076-012-8.
- [3] MATHAUŠEROVÁ, Z.: Vnitřní prostředí budov. Brno: EXPO DATA spol. s r.o., 2001. ISBN: 80-7293-023-0.
- [4] ANSI/ASHRAE Standard 55-1992. Thermal Environment Conditions for Human Occupancy.

12. MERANIE VÝKONOVÝCH CHARAKTERISTÍK PLYNOVÉHO A ELEKTRICKÉHO TEPELNÉHO ČERPADLA

12.1. Úvod a ciele merania

Cieľom cvičenia je zistiť, zhodnotiť a porovnávať výkonové charakteristiky, COP, PER pri získavaní nízkopotenciálneho tepla zo zeme a vzduchu pomocou dvoch tepelných čerpadiel. Jedno poháňané elektrickou energiou a druhé plynovým spaľovacím motorom.

Cieľom toho cvičenia je

- 1) Meranie výkonových charakteristík tepelných čerpadiel (TČ) pri rozdielných princípoch získavania nízkopotenciálneho tepla (zem/voda, vzduch/voda).
- 2) Stanovenie COP a PER pre tepelné čerpadlo a plynové tepelné čerpadlo.

12.2. Použité metódy a vybavenie pre cvičenie

Na meranie Výkonových charakteristík bude použité tepelné čerpadlo Vlessman Vitocal 300G a plynové tepelné čerpadlo Aisin GHP 10HP využívajúce na svoj pohon spaľovací motor TOYOTA na zemný plyn. Obe zariadenia sa komerčne využívajú na vykurovanie a chladenie budov a našim cieľom bude meranie výkonových parametrov a ich vzájomné porovnanie s hľadiska efektívnosti a účinnosti pri získavaní nízkopotenciálneho tepla zo zeme a vzduchu.

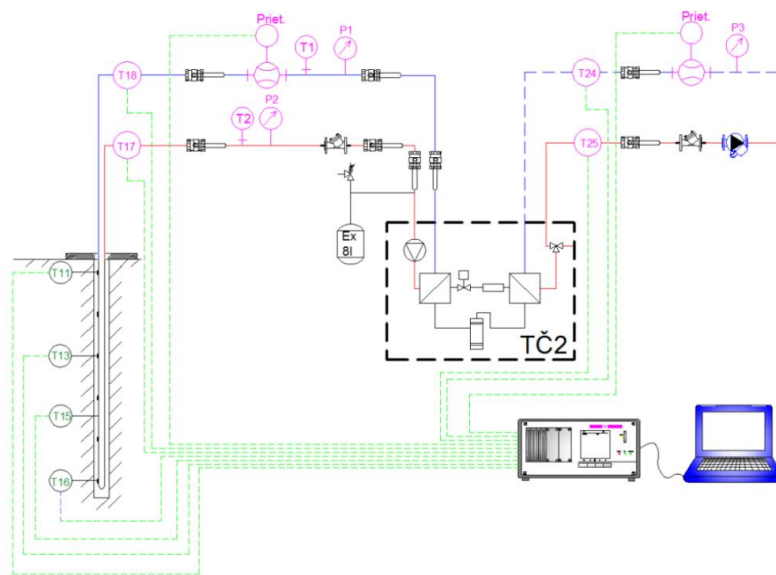


Obr. 42 Elektrické tepelné čerpadlo Viessmann Vitocal 300G BW



Obr. 43 Plynové tepelné čerpadlo Aisin GHP 10HP

Tepelné čerpadlá sú napojené na spoločnú zemnú sondu (hĺbka 150m) s núteným obehom pracovného média - etylenglykolová zmes s vodou v pomere 50/50. Zemná sonda PE-XA sa využíva v bežnej praxi pri realizácii primárnych okruhov tepelných čerpadiel zem/voda. V zemnej sonde sú umiestnené termočlánkové snímače teploty typu K (NiCr-Ni) série TFAU. Teplotné snímače sú rozmiestnené tak aby snímali priebeh zmien teplôt v štyroch rôznych hĺbkach vrtu a to v rozmedzí 150, 100, 40 m a 5 metrov tesne pod povrchom zeme. V priebehu meraní máme prehľad o zmenách teplôt v jednotlivých hĺbkach vrtu. Na primárnych okruhoch oboch čerpadiel sú inštalované rovnaké meracie prístroje (obr. 39) za účelom vzájomného porovnávania pri meraní a následnom vyhodnocovaní merania. Rovnako je tomu aj na sekundárnych stranách obehov tepelných čerpadiel. Obehové čerpadlá na primárnych stranách boli nainštalované priamo v tepelných čerpadlách, ktoré si samé regulujú ich spúšťanie. Plynové tepelné čerpadlo je schopné získavať teplo aj zo vzduchu. Pre lepšie porovnanie bude meraný a porovnávaný aj tento spôsob získavania tepla s princípom zem/voda.



Obr. 44 Schéma zapojenia zariadenia tepelného čerpadla zem/voda pre získavanie nízkopotenciálneho tepla s meracími členmi

Schéma a zapojenie zariadenia pre získavanie nízkopotenciálneho tepla zo zeme

Schéma celého zariadenia pozostávala z meracích zariadení snímajúci termodynamické parametre potrebné pre určovanie:

- tepelného výkonu získaného zo zeme,
- celkového tepelného výkonu na výstupe z tepelného čerpadla (vykurovací výkon),
- teplôt v jednotlivých hĺbkach vrtu,
- teploty na všetkých okruhoch (primár aj sekundár TČ),
- tlaku vo všetkých okruhoch a potrubných sieťach.

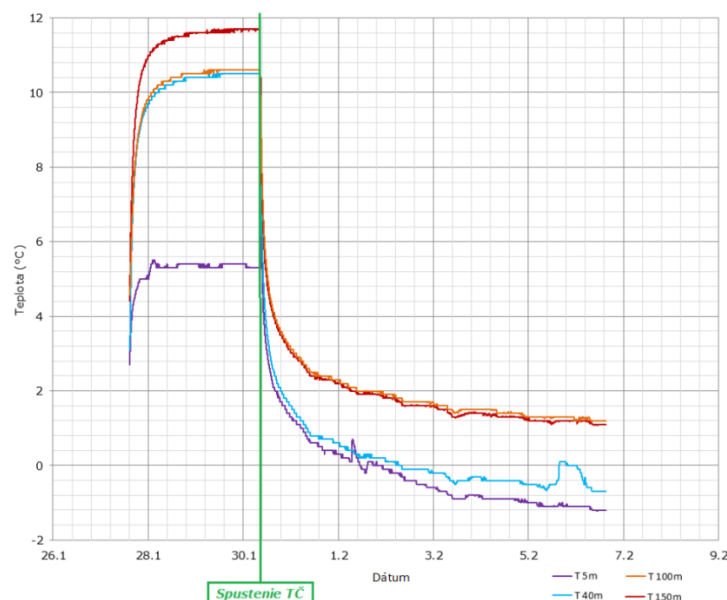
12.3. Postup merania

Postup:

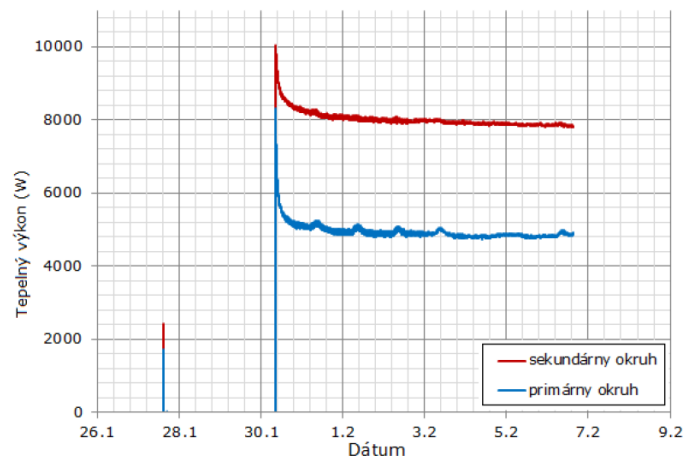
- 4) **Meranie termodynamických parametrov pomocou tepelného čerpadla zem/voda** – zaznamenávanie všetkých hodnôt na primárnej a sekundárnej strane tepelného čerpadla pri plnom výkone
- 5) **Stabilizovanie a regenerácia vrtu** – ustálenie teplôt v sonde prebieha cca 3 dni.
- 6) **Meranie termodynamických parametrov pomocou plynového tepelného čerpadla zem/voda** – zaznamenávanie všetkých hodnôt na primárnej a sekundárnej strane tepelného čerpadla pri plnom výkone
- 7) **Meranie termodynamických parametrov pomocou plynového tepelného čerpadla vzduch/voda** – zaznamenávanie všetkých hodnôt na primárnej a sekundárnej strane tepelného čerpadla pri plnom výkone.
- 8) **Vyhodnotenie merania a stanovenie faktorov COP a PER** – vyhodnotenie všetkých meraných veličín počas troch meraní a porovnanie medzi COP a PER dvoch typov tepelných čerpadiel.

12.4. Spracovanie a vyhodnotenie výsledkov

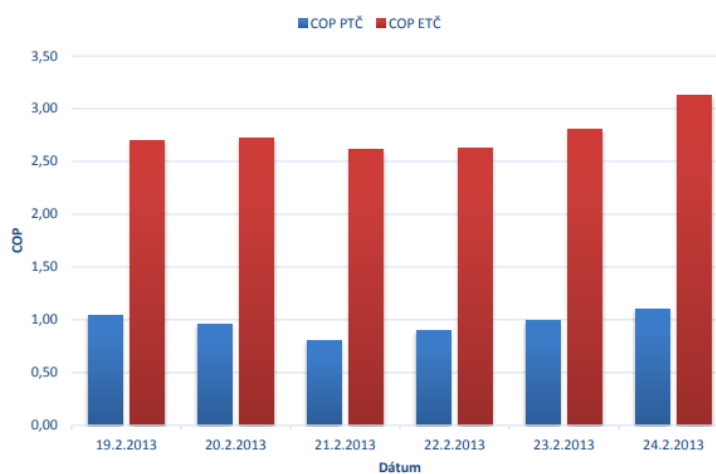
1. Porovnajte výkonové charakteristiky TČ – výkon n a primárnej a sekundárnej strane, rýchlosť ochladzovania vrtu a maximálny výkon na primárnej strane.
2. Stanovte COP a PER pre jednotlivé TČ.
3. Porovnajte namerané a vypočítané hodnoty medzi jednotlivými typmi tepelných čerpadiel a so spôsobom získavania vzduch/voda.
4. Vyhotovte grafy závislostí meraných tepelných výkonov a priebehov teplôt počas merania.



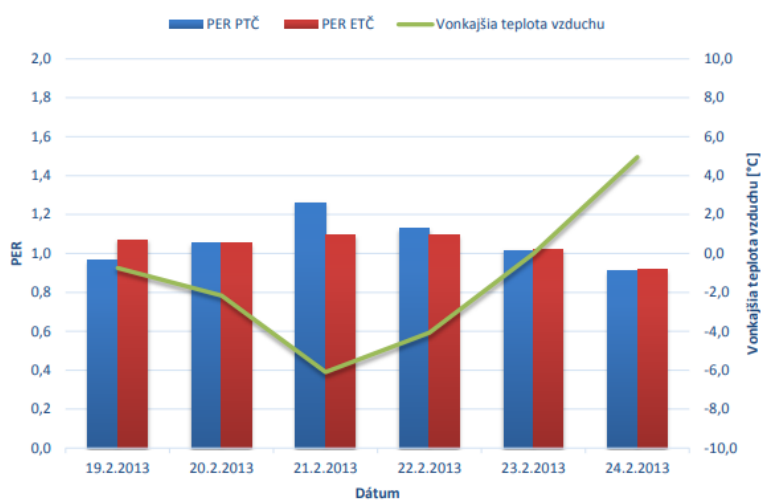
Obr. 45 Priebeh teplôt v hĺbkach zemnej sondy



Obr. 46 Priebeh zmeny výkonu



Obr. 47 Porovnanie nameraných výkonových čísiel COP TČ



Obr. 48 Porovnanie nameraných hodnôt stupňa využitia primárnej energie PER TČ

[1] BAKKER, E. a kol. 2010. Gas heat pumps. Efficient heating and cooling with natural gas. Netherlands. GasTerra/Castel international Publishers, 2010.

[2] ŽERAVNÍK, A. 2003. Stavíme tepelné čerpadlo. 1. vydanie, vydal vlastným nákladom. Přerov, 2003.

Vetrание a klimatizácia

návody na laboratórne cvičenia

Ing. Jan Fišer, PhD.

Ing. Jan Pokorný, PhD.

Ing. Martin Vantúch, PhD.

doc. Ing. Andrej Kapjor, PhD.

Náklad: 50 výtlačkov, vydanie prvé, AH 2,2

50 strán, 42 obrázkov

Vydavateľstvo a tlač: EQUILIBRIA, s.r.o.

Nepredajné

ISBN 978-80-8143-263-7

Za obsah skriptum zodpovedajú autori.

Informácie nie sú oficiálnym stanoviskom Európskej únie ani ďalších donorov.

Skriptum a jej časti môžu byť reprodukované len so súhlasom autorov.