



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**HODNOCENÍ TEPELNÉHO STAVU PROSTŘEDÍ V KABINĚ
VOZIDLA POMOCÍ MĚŘICÍCH SYSTÉMŮ S EKVIVALENTNÍ
TEPLOTOU**

EVALUATION OF THE CABIN THERMAL ENVIRONMENT BY THE MEANS OF EQUIVALENT TEMPERATURE
MEASURING SYSTEMS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michael Zrůst

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Michael Zrůst
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Technika prostředí
Vedoucí práce:	Ing. Bc. Jan Fišer, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

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

Hodnocení tepelného stavu prostředí v kabině vozidla pomocí měřicích systémů s ekvivalentní teplotou

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pro posuzování tepelného komfortu se v posledních letech stále častěji využívá měření s tepelnými manekýny ve spojení s metodou vypracovanou H. O. Nilssonem v roce 2004. Metoda je založena na určení ekvivalentní teploty jednotlivých částí těla a vyhodnocení tepelného pocitu v diagramu komfortních zón. Metoda byla vyvinuta pro použití v kabinách dopravních prostředků a zohledňuje specifčnost daného vnitřního prostředí (nehomogenost teplotního pole, vysoké rychlosti vzduchu, vliv solárního záření atd.)

Cíle diplomové práce:

Cílem práce je exaktně ověřit u různých vozidel, že v kabině je dosahována stejná úroveň tepelného komfortu při daném nastavení klimatizační jednotky. Jednalo by se tedy o měření kabin více vozidel (klasický pohon, EV) ve stejných klimatických podmínkách (klíma komora) při využití tepelného manekýna Newtona + další systémů a vyhodnocení, jestli různá vozidla při stejném nastavení HVAC poskytují podobný/různý tepelný komfort a jaké systémy jde pro toto měření (ověření) použít. Jedná se o experimentální DP práci.

Seznam doporučené literatury:

DALY, Steven. Automotive air-conditioning and climate control systems. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 9780750669559.

NILSSON, Håkan O. Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. 2004, University of Gävle.

NILSSON, Håkan O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. Building and Environment. 2007, roč. 42, č. 12, s. 4000–4005. ISSN 03601323. DOI:

10.1016/j.buildenv.2006.04.027

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Se zvyšujícím se množstvím automobilů na silnici, mobilitě lidstva a času stráveným v kabinách vozidel se zvyšuje důležitost na dosažení a udržování tepelné pohody pro pasažéry při dlouhých ale i krátkých cestách. Se vzestupem elektromobilů je snaha snížit spotřebu energie pro ovládání vnitřního prostředí automobilů, k prodloužení dojezdu a případně pro spalovací motory, ke snížení emisí v důsledku udržování tepelné pohody.

Klíčová slova

Tepelný komfort, manekýn, kabina automobilu, termoregulace, ekvivalentní teplota

ABSTRACT

With increasing amount of vehicles on roads, the mobility of humanity and time spent in car cabins grows the significance of reaching and maintaining thermal comfort for passengers during long and also short journeys. With electric car industry growing there is an effort to lower the consumption of energy by HVAC systems to enlarge the reach of electric car and for combustion engine cars to lower the emissions coming from maintaining proper thermal comfort.

Key words

Thermal Comfort, manikin, car cabin, thermoregulation, equivalent temperature

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ZRŮST, Michael. *Hodnocení tepelného stavu prostředí v kabině vozidla pomocí měřících systémů s ekvivalentní teplotou* [online]. Brno, 2022 [cit. 2022-04-24]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140676>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Fišer.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma *Hodnocení tepelného stavu prostředí v kabině vozidla pomocí měřících systémů s ekvivalentní teplotou* vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing. Janu Fišerovi Ph.D. za cenné rady, připomínky a za nekompromisní přístup k mé pomalé práci, který mě udržel na cestě k dokončení práce v tomto roce.

S tím souvisí mé další poděkování, které patří v první řadě mým nejbližším přátelům a rodině. Chtěl bych poděkovat Báře za zpříjemnění prvních tří let studia, protože její přítomnost byla jediným pozitivem studia v Brně skrze mé nejtemnější roky, kdy jsem si neměl chuť pokračovat s mnohými věcmi včetně studia. Dále samozřejmě moji další přátelé z mé domoviny, jmenovitě Majda, Simča, Andrejka a Jiřík, díky kterým jsem se mohl cítit jako člověk, který má určité místo ve společnosti a pro které byla radost žít. Jejich přátelství a trpělivost se mnou byla pro mě opravdu klíčová k setrvání ve stavu studia schopného natolik, že jsem se mohl dostat až sem. Samozřejmě bych chtěl poděkovat své rodině, mamce, Honzovi za jejich podporu a důvěru, mé malé sestřičce Nikolce za návrhy prokrastinace, které jsem často přijímal a mohl si tak trochu opepřit studium několika depresemi ohledně stíhání projektů a závěrečných prací. Děkuji i svému otci, který i přes svou preferenci našeho hlavního města se mnohokrát přemohl, aby mi mohl pomoci se zařízením bytu a skoro i provrtáváním nábytku, který nebyl můj. Nemůže chybět poděkování mému bratrovi, který má nyní před svatbou, je spisovatelem a panem magistrem a ukazuje mi velice často směr, kterým se mám vydat a je mi často vzorem pro úspěšný a slušný život. Spolu s jeho nastávající ženou mi byli schopni ukázat jiný úhel pohledu na věci, ať už ohledně školy, ale i životních situací a jak je nevzdávat a vyřešit.

S tím se pojí další část mého poděkování, která patří mně samému. Ačkoliv jsem jen na začátku cesty, tak i přesto když pohlédnu do nedávné minulosti, tak bych nevěřil, že se dostanu do bodu, kdy mám možnost psát tento text, případně ho dokončovat. Chtěl bych poděkovat svému mozku, že zůstal silný. Často sice prohrál boj s vnitřními démony, ale nikdy neprohrál válku. Nechal mě viset na hraně, ale nikdy nedovolil abych se pustil a spadl do propasti. A když už nebylo možné se dále držet, vyvinul neskutečné množství energie a vůle, aby se nakonec vrátil silnější než kdy dříve, stejně jako Gandalf když ho Balrog stáhl s sebou do nekonečné propasti. Z vlastního přičinění bylo čtyři a půl roku tohoto studia peklo na Zemi, které nemělo cenu pokračovat, každý týden utrpení ve městě, kde jsem našel klid jen ve dvanácti metrech čtverečních studentského bytu. Každá cesta domů nebo z domu byla propletena strachem a zlostí, kterou jsem tlumil depresivní muzikou. Ironicky vzato však samotná pandemie a karanténa mi ukázala, jak znovu najít chuť do života a jak ho konečně začít žít. Proto bych chtěl poděkovat dvěma nejmenovaným lidem, ke kterým jsem se nechoval nijak dobře. Chtěl bych se omluvit a ponechat tak své chyby za sebou, poučit se z nich a jít dál vstříc lepším zítřkům se svou novou osobností, která má konečně předpoklady pro šťastný život a postupné naplňování potenciálu. Rád bych také poděkoval odborníkům, kteří mi dodali prostředky, vědomosti, svůj čas a naději k započetí cesty bez depresí, s touhou nadále žít a zlepšovat se, s důvěrou ve své schopnosti. Ačkoliv stále nejsem vnitřně vyléčen, tak i přes to poslední zhruba rok, byl jeden z nejlepších v životě díky jejich pomoci. A i když tento pocit svobody bez stresu a depresí měl ve výsledku efekt pomalého psaní závěrečné práce, nelitoval bych toho ani kdybych tento text nestihl dopsat v řádném čase.

Samozřejmě jak v mém životě již zvykem, tak ironicky jsem si začal užívat života až v posledním semestru, před tím, než se s největší pravděpodobností budu vracet do své původní oblasti. Ale kdo ví kam mě vítr odvane. Rád bych za posledních pár měsíců poděkoval Inženýru Swiss Army Man, za skvělé týdny a měsíce, za pomoc s touto, v jisté chvíli, pekelnou prací, za uvedení mě do Brněnského života, odemknutí mého talentu a ujištění, že je spousta věcí, pro kterou je radost trpět.

Obsah

1. Úvod	11
2. Tepelná pohoda.....	13
2.1. Termoregulace lidského těla a činitelé.....	14
2.1.1. Termoregulace.....	14
2.1.2. Rovnice tepelné rovnováhy lidského těla	16
2.2. Faktory tepelného komfortu	20
2.2.1. Metabolické teplo	20
2.2.2. Efekt oblečení.....	21
2.2.3. Teplota vzduchu	22
2.2.4. Střední radiační teplota	22
2.2.5. Vlhkost vzduch.....	23
2.2.6. Rychlost proudění vzduchu	23
2.2.7. Přidané faktory	23
2.3. Měřicí systémy	25
2.3.1. Sondy	25
2.3.2. Manekýn.....	28
2.3.3. Testování s lidmi	29
2.4. Vyhodnocování.....	30
2.4.1. PMV/PPD	30
2.4.2. Efektivní teplota	32
2.4.3. Operativní teplota	32
2.4.4. Ekvivalentní teplota / DKZ (digram komfortních zón – Nilsson 2007)	32
2.4.5. Adaptivní tepelný komfort	36
3. Tepelný komfort pro automobily	38
3.1. Speciální požadavky.....	39
3.2. Systémy úpravy vzduchu	40
3.2.1 Větrání.....	41
3.2.2 Vytápění a chlazení.....	42
4. Měření.....	43
4.1. Měřené automobily.....	43
4.1.1. Škoda auto benzín	43
4.1.2. Škoda auto hybrid.....	43
4.1.3. Hyundai.....	43
4.2. Manekýn Newton.....	44

4.3.	Manekýn Comfortis	45
4.4.	iHVAC.....	45
4.5.	Klimatická komora	47
4.6.	Postup měření	47
5.	Vyhodnocení.....	49
5.1.	Zimní podmínky – porovnání systémů	49
5.2.	Zimní podmínky – porovnání automobilů	50
5.3.	Letní podmínky – porovnání systémů	53
5.4.	Letní podmínky – porovnání automobilů	55
6.	Závěr	58
	Zdroje	59

1. Úvod

Díky postupu technologie lidstvo přestává být závislé na okolních podmínkách a dokáže si vytvářet vlastní mikroklima uvnitř budov a prostorů, dle požadavků skupin nebo jednotlivců v daném prostoru. Jak procházíme časem a nyní 21. stoletím, zjišťujeme více a více o podmínkách a efektech, které zlepšují tepelný komfort, případně příčiny diskomfortu. I přes to, že existuje mnoho vědeckých článků, studií, diagramů a počítačových softwarů, a znalost oboru je rozsáhlá, tak pokud se člověk podívá na většinu průzkumů, který se týká tepelného komfortu, případně důvodů diskomfortu, výsledkem je, že ve většině byla hlavní příčina nespokojenosti, nehledě na podnebí, nevyhovující teplota vzduchu [2]. Největší vývoj probíhá posledních 30 let, pravděpodobně z důvodu globálního oteplování. Obecně úprava vnitřních prostředí budov je jedním z největších emitorů oxidu uhličitého. V USA například budovy spotřebovávají dle dat z minulé dekády okolo 40 % energie a z této hodnoty 35 % energie pro úpravu vnitřních prostorů, kde tepelná pohoda je primárním produktem. Dalším znepokojujícím faktorem je spotřeba fosilních paliv. Téměř třetina celkové spotřeby fosilních paliv je spotřebována v budovách. Pokud za příklad budou znova postavené Spojené Státy Americké, ročně je spotřebováno zhruba 26 miliard litrů paliva pro chlazení kabiny dopravních prostředků [24].

Před zamyšlením nad tím, co generuje dobrý tepelný design v době, kdy se přemýšlí o užítku a o snižování výdajů s globalizací technologií a věděním, kdy design domu je bojem mezi architekty a inženýry, jelikož architekt má za úkol navrhnout tepelně nejlepší stavbu s nejnižší potřebou pro energii, a úkolem inženýra je maximální možné využití pro jeho zařízení pro úpravu vnitřního prostředí, je důležité položit otázku ohledně kondice lidstva. Rychlý rozvoj západního životního stylu a technologií ve stavebnictví, oblečení a kontroly mikroklimatu, vede k trendu homogenizace vnitřního prostředí. Tento vývoj, ať už veden poptávkou, ve výsledku znamená, že lidé se musí adaptovat většinu času na velice úzký interval tepelného prostředí. V globálním ekosystému se zvyšujícími hrozbami přírodních katastrof a globálního oteplování, Andris Auliciems a Steven V. Szokolay předkládají argument ohledně dlouhodobé udržitelnosti a biologickému stavu těla při vystavení homogennímu prostředí a adaptability lidské rasy [25].

Jejich obavy mají základy v hrubém principu, který říká, že v případě měnícího se prostředí je možnost přežití tradičně mezi více adaptabilními živočichy než mezi adaptovanými na původní prostředí, který z těchto trendů je momentálně favorizován. Pokud stávající trendy oteplování a výskytu extrémních podmínek budou pokračovat, nároky pro udržení absolutního komfortu budou vyšší. Lidé obecně mají momentálně dobrou adaptabilitu, kapacitu pro aklimatizaci v různých prostředích, avšak mohlo by se stát, že se lidé stanou příliš zhýčkaní. Nadměrný pobyt v uměle udržovaném a homogenním prostředí může snížit adaptabilitu a může dojít ke zmenšení limitů pro přežití. Jejich návrh řešení tedy říká, že pokud má tepelný komfort dále sloužit spotřebitelům, musí nadále zajistit dostatečný tepelný komfort. Ten je dosažen, pokud dodává podmínky maximální produktivity, bez negativních účinků na zdraví. Mělo by se tedy raději vytvářet prostředí, které minimalizuje fyziologickou odezvu, ale také maximalizuje aklimatizaci neboli dosáhnout komfortu, který je dostatečný, ale nikoliv přehnaně vysoký [25].

Postupem času se zvyšuje doba, kterou člověk tráví ve vnitřních prostorech a v posledních letech se rapidně zvyšuje doba v kabinách automobilů a poptávka po komfortním cestování. Správné podmínky uvnitř automobilu jsou potřebné nejen pro minimalizaci stresu na řidiče a dosažení tepelného komfortu, ale i pro správnou viditelnost a zvýšení bezpečnosti. Zároveň je jednou z priorit zvyšování účinnosti a snižování potřebné energie. Otázka optimalizace pro kabiny automobilů je komplexním problémem, vzhledem k dodatečným efektům, které jsou potřeba brát v potaz, jako jsou například rozdílné povrchy a materiály, rozdílné rychlosti proudění skrze kabinu, relativní vlhkost, intenzita solárního záření a jeho odraz od daných materiálů, úhly dopadu, typy oblečení a další. Spoustu dalších faktorů má stále neznámý efekt na komfort, což komplikuje modelování a experimenty do určité míry [30].

Vymezení cílů práce

Tato práce má za cíl získat a vyhodnotit data z provedených měření 27., 28., 29. července 2021 a 15. října 2021. Pro stejné nastavení HVAC systémů různých vozidel s různými systémy pohonu, porovnat data mezi sebou a zjistit, zdali všechny vozy dosahují stejné úrovně tepelného komfortu pro předem nastavené podmínky v klimatické komoře za pomoci použitých zařízení pro měření ekvivalentní teploty.

Uspořádání práce

V první podkapitole teoretické části diplomové práce bude rozebrána tepelná pohoda z hlediska mechanismů lidského těla a jeho interakce s okolním prostředím, ať už se jedná o kabinu vozu, byt nebo divadelní sál. Bude rozebrán efekt a výpočet jednotlivých činitelů prostředí, lidských faktorů a efekt dalších aspektů.

V druhé podkapitole budou specifikovány způsoby měření potřebných veličin sondami k možnému určení tepelné pohody, od nejjednoduššího principu dotazníku, po komplexní přístroj, kterým je manekýn, později využitý při samotném experimentu.

Následuje zavedení používaných metod pro vyhodnocování tepelné pohody z dat získaných způsoby popsány v minulé podkapitole. Poslední téma teoretické části specifikuje předchozí kapitoly pro využití v kabinách vozu pro měření, design a vyhodnocování tepelného komfortu.

Následuje experimentální část s popisem průběhu, použitých vozidel a zařízení a výsledků, s následujícím vyhodnocením naměřených dat.

2. Tepelná pohoda

Tepelná pohoda je důležitým komponentem v designu budov a kabin vozidel, jelikož člověk tráví více než 90 % času ve vnitřních prostorech. Samotný pojem je definován jako stav mysli, který určuje spokojenost s tepelným prostředím [35]. Tuto definici není jednoduché popsat fyzikálními parametry, protože vyvstává otázka, jak měřit tento stav mysli. Samotné tepelné prostředí lze popsat jako funkci prostředí, která ovlivňuje přenos tepla mezi tělem a okolím [3]. Výzkum tepelné pohody má mnoho činitelů a je velmi komplexní vzhledem k množství relevantních oborů, například stavební a konstrukční vědy, fyziologie a psychologie [3]. Mimo pocity také tepelný komfort ovlivňuje pozornost a kognitivní výkon [1].

Tento aspekt návrhu vnitřních prostorů nabývá na důležitosti od počátku 20. století, avšak podvědomě každý živý organismus vyhledává optimální podmínky prožití, tudíž už například v pravěku lidé nosili kožšiny, vyhledávali jeskyně a zapalovali oheň pro dosažení příjemnějších podmínek. Sokrates zhruba 400 př. n. l. přemýšlel nad technikou stavby domů pro zajištění tepelné pohody. V té době jeho nápady bohužel neměly praktické uplatnění pro realizaci [1]. Do průmyslové revoluce nebyla myšlenka ovládnutí vnitřního prostředí speciálními metodami předmětem diskuse, vzhledem k úrovni technologie. Při nízké teplotě se přiložilo do ohně v kamnech, při vysoké teplotě se otevřela okna nebo využilo vějířů. Během průmyslové revoluce došlo k rozvoji vědních oborů okolo tepelného komfortu. Dle Kena Parsonse se jejich rozvoj řadí do pěti fází [2].

V první fázi se vyvíjelo vytápění, ventilace a později počátkem 20. století i mechanické chlazení a samotný tepelný komfort byl mimo laboratoř měřen pouze subjektivně pomocí lidských vjemů. V této době neexistovala počítačová technika. Druhá fáze počínala v šedesátých letech minulého století. Hlavním zaměřením byl vztah mezi tepelnou pohodou a přenosem tepla mezi tělem a okolím. Byly vyvinuty rovnice tělesného tepla a byla snaha o propojení s výsledky probíhajícího výzkumu, který byl prováděn pouze formou dotazníků, tudíž subjektivních názorů dotázaných osob. Účelem bylo vytvořit univerzální metodu předpovědi tepelné pohody pro daný prostor. Vzniklá metoda byla považována za příliš komplexní a její využití začalo až se vstoupem počítačové techniky v další fázi [2].

Třetí fáze začala s příchodem počítačových simulací využívajících modely tělesné termoregulace, přenosu tepla a do počítačových modelů byly zavedeny tepelné vlastnosti lidského těla. Tyto modely začaly nahrazovat jednoduché modely přenosu tepla, avšak nebyly plně přijaty normami. Pro měření tepelného prostředí, fyzické modely byly představeny a první manekýni využívání pro měření, ale i jako měřicí přístroj pro určení množství přeneseného tepla skrze oblečení. Další pokrok v tomto oboru směřoval k popisu pohybu a pocení s využitím tepelných manekýnů a robotiky [2].

Čtvrtá fáze přidává výzkum lidského chování jako klíčovou pro pochopení podmínek tepelného komfortu, vedoucí k představení adaptivních modelů. Pátá fáze je předmět spekulací, jelikož počet studií je velice vysoký a je možné, že vývoj řešení může vést k databázovému modelování související s meta-analýzou a velkými daty neboli hodnocení a předpovídání tepelné pohody se může stát zcela empirické, založeno na datech z minulých řešení totožných prostředí a skupiny obyvatel. Tato vize je stále jen vizí, jelikož je nejprve třeba integrovat veškeré znalosti a metody zahrnující biofyziku, přenos tepla, anatomii, fyziologii a aspekty lidského chování k předpovědi tepelného komfortu pro všechny skupiny jednotlivců od novorozenců po vrcholové sportovce [2].

Existuje šest faktorů, které se musí brát v potaz při uvažování tepelné pohody pro člověka. Těmi jsou teplota vzduchu, radiální teplota, vlhkost, rychlost, metabolické teplo v důsledku aktivity, oblečení a jako přidaný sedmý faktor možnost adaptace dané prostředím, ve kterém se subjekt vyskytuje zahrnující možnosti aklimatizace [4].

Existují i další faktory pro některá prostředí, kde je potřeba speciální přístup. Například pro podtlakové nebo přetlakové prostředí například u letadel nebo ponorek, v horských prostředích, případně mimo Zemi při absenci nebo rozdílné hodnotě gravitačního zrychlení. Šest faktorů uvedených v předchozích

odstavci je minimem pro design prostředí zajišťující tepelnou pohodu. Musí být všechny brány v potaz a není možné vytvořit absolutně komfortní podmínky s proměnnou hodnotou jedné nebo více z daných šesti činitelů [2].

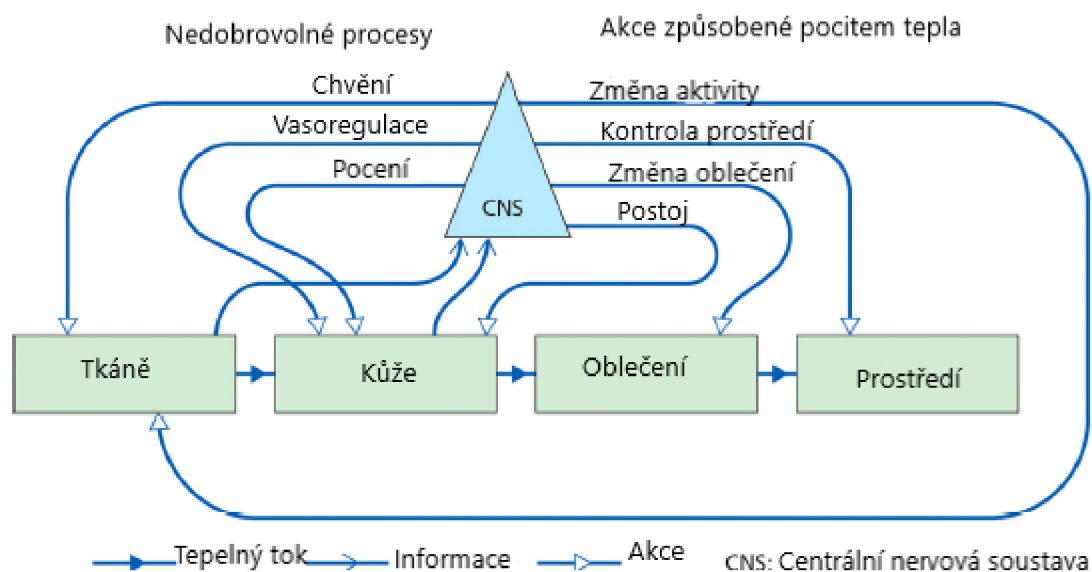
2.1. Termoregulace lidského těla a činitelé

2.1.1. Termoregulace

Člověk se řadí mezi savce a teplokrevné živočichy, tudíž teplota těla je regulována vnitřními mechanismy dle odezvy termoreceptorů v kůži. Termoreceptory pro teplo i chlad se vyskytují, jak v teplotním centru, tak ve svalech, orgánech i v kůži, kde monitorují tepelný stav a informace posílají do mozku, konkrétně do hypothalamu. Termoreceptory chladu začínají posílat signál při poklesu teploty o 0,004 °C/s. Termoreceptory tepla reagují při změně o 0,001 °C/s [4]. Hypothalamus má dvě oblasti. Přední hypothalamus reaguje, pokud je teplo příliš vysoké a změní stav kůže tak, že průtok krve v kůži se zvedne až na desetinásobek minima (vazodilatace) a pokud je třeba, spustí proces pocení [2].

Pot se vylučuje žlázami a následuje nekontrolované kontinuální vypařování. Vylučování vlhkosti probíhá také při dýchání, jelikož vlhkost vdechovaná je nižší než vydechovaná. Ve výsledku je ztráta tepla rozdílem vlhkostí rovna zhruba 28 W. Oproti 40 g/h vlhkosti vyloučené dýcháním, skrze pocení osoba dokáže krátkodobě vyloučit až čtyři litry za hodinu [4]. Dlouhodobě udržitelné vypařování je okolo jednoho litru za hodinu, což odpovídá zhruba 2,4 MJ tepelné energie [1]. Pokud podmínky prostředí neumožňují kompletní odpaření, pot se rozprostírá okolo potních žláz, dokud povrch neumožňuje kompletní odpaření. Podíl povrchu kůže pokryté potem se nazývá zvlhčení kůže. Vlhkost kůže se podílí na tepelném diskomfortu a sedící nebo málo aktivní člověk je nespokojený, pokud vlhkost kůže je vyšší než 25 %. Vyšší vlhkost kůže navíc zvyšuje tření s oblečením, navyšující nespokojenost, a pocit z materiálu oblečení je vnímán jako více hrubý [31].

Zadní hypothalamus reaguje, pokud je tělo podchlazené a odebírá průtok krve z vnějších vrstev kůže (vazokonstrikce), zejména končetin, dlaní a chodidel [2]. Toto je doprovázeno vznikem tzv. „husí kůže“ za účelem vylepšení tepelné izolace těla. Plné zastavení přívodu krve do kůže je ekvivalentní oblečení s hodnotou odporu 0,1 až 1,0 clo podle úrovně tloušťky [4]. Tělo také zahajuje napínání svalstva a proces chvění. Oscilační kontrakce svalových vláken s frekvencí okolo 12 Hz počínají krkem a mají za úkol produkovat teplo. Zprvu jsou ovladatelné, při studenějších podmínkách se stávají neovladatelné, případně mohou být jen lokální [2].



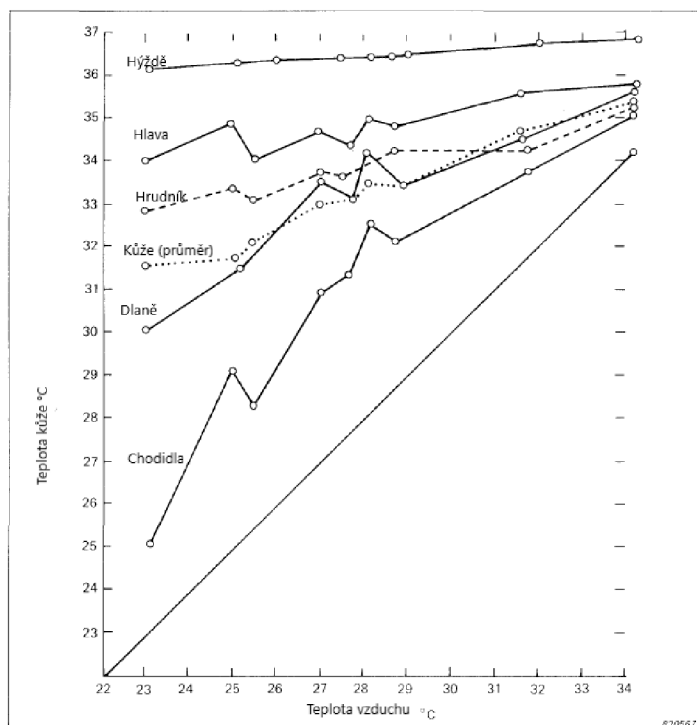
Obrázek 2.1 - Lidská termoregulace [15]

Teplo se z jádra těla přenáší částečně vedením skrze tkáněmi [1]. Krev plní v této oblasti funkci transportu metabolického tepla, které pohltí při dodávkách kyslíku buňkám. Přenese teplo z těla do kůže, kde probíhá většina tepelné výměny s okolím. Vnitřní teplota těla se může pohybovat od 36 °C do 40 °C s limitními teplotami 28 °C a 42 °C a s komfortní teplotou okolo 37 °C, která se zvyšuje s vyšší aktivitou [25]. Například při odpočinku průměrná komfortní teplota je zhruba 36,8 °C a zvyšuje se na 37,4 °C při chůzi a na 37,9 °C při lehkém běhu [31]. Individuálně jsou tyto teploty odlišné a pro odpočinek se mění v intervalu mezi 36 °C a 38 °C. Během dne se můžou měnit v rozsahu 1 °C. Maximální denní vnitřní teplota je v odpoledních hodinách, poté klesá až k rannímu minimu [4]. Při teplotě pod spodním limitem 28 °C může vést k srdeční arytmii a následné smrti. Vnitřní teplota nad 43 °C může způsobit slabost, bolest hlavy, zrychlený tep, duševní nepokoj, následně kóma a smrt. I při záchraně pacienta může nastat nevratné poškození mozku [1].

Tabulka 2.1 - Kritické teploty lidského těla (přeloženo z [25])

	Teplota kůže	Teplota jádra těla	Regulační zóna
Bolest:	45 °C	42 °C	Smrt
		40 °C	Hypertermie
			Pocení
			Vasodilatace
	31-34 °C	37 °C	Komfort
			Vasokonstrikce
			Termogeneze
		35 °C	Hypotermie
Bolest:	10 °C	25 °C	Smrt

Pro teplotu kůže je určen širší interval teplot, od 17 °C do 40 °C. Při komfortních podmínkách při sezení je teplota kůže v rozsahu 33 °C a 34 °C [4]. Tento interval klesá se zvyšující se aktivitou [31]. Při chladných teplotách se teplota kůže liší více pro jednotlivé části těla. Výzkum ukazuje, že pokud teplota jádra těla je ideální, pak tepelný komfort závisí na teplotě kůže. Pokud je teplota jiná, tělo se nenachází v tepelném komfortu a aktivuje mechanismy k udržení teploty těla blízko ideálnímu stavu [2].



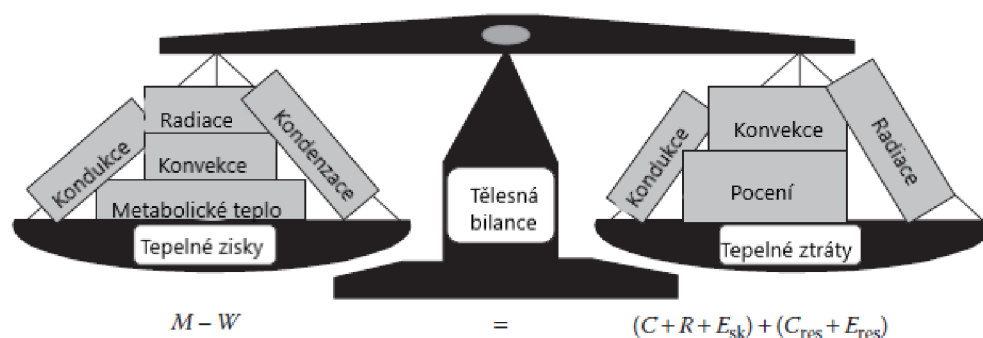
Obrázek 2.2 - Rozdílné povrchové teploty částí těla (přeloženo z [4])

2.1.2. Rovnice tepelné rovnováhy lidského těla

To, že teplota těla by se měla držet na 37 °C znamená, že existuje předpoklad, že mezi tělem a okolím neprobíhá výměna tepla, případně že množství tepla přijatého je stejné jako ztraceného. Neznamená to nutně dosažení stacionárního stavu, jelikož to by vyžadovalo neměnné teploty. V reálném světě se teploty a způsoby přenosu tepla mohou lišit, i když pro vnitřní teplotu těla bude existovat dynamická rovnováha. Pokud teplo produkované a přijaté je větší než ztracené, teplota těla bude růst, a naopak pokud tepelné ztráty budou větší než součet produkovaného a přijatého tepla, teplota bude klesat. Teplo přijaté a odebrané lze počítat z přenosu tepla a pokud se rovnají, jedná se o rovnovážný stav a dostáváme rovnici tepelné rovnováhy lidského těla. Pokud tato rovnice nemá nulový výsledek, znamená to, že tělo není v rovnováze a je tu potenciální nutnost zakročit. Tato rovnice předpokládá symetrické podmínky, například střední radiační teplota se může lišit radikálně na každé straně těla, a poté člověk, který podle rovnice je v tepelné rovnováze nemusí být nutně v komfortní pozici, pouze v tepelně neutrální. Proto dle rovnic můžeme posoudit komfort pouze pokud tepelný komfort je totožný s tepelnou neutralitou. Proces určování přenosu tepla mezi tělem a prostředím se nazývá tepelný audit, kdy každá cesta přenosu tepla je kvantifikována a poté zesumírována v rovnici, a dává informace o pravděpodobné lidské reakci vůči danému prostředí a co by se dalo dělat k vylepšení podmínek [21].

Rovnice tepelné rovnováhy pro lidské tělo se dá popsat více způsoby, avšak všechny sdílí stejný koncept a používají tři typy pojmů, a to jeden pro produkci tepla, přenos tepla, a ukládání tepla. Metabolická produkce tepla (M) dodává energii pro mechanickou práci (W) a nevyužitá energie je uvolněna ve formě tepla ($M-W$). Přenos tepla je poté zprostředkován prostupem (K), konvekcí (C), radiací (R), a vypařováním (E). Zkombinované do sebe, všechny hodnoty produkce a ztráty tepla dávají tepelnou kapacitu (S) [21]. Pro tělo v tepelném ekvilibriu (při konstantní teplotě), rychlost ukládání tepla bude

nulová ($S=0$). Pokud tělo bude dostávat více tepla, člen S bude pozitivní a pro majoritní ztrátu tepla bude negativní [1].



Obrázek 2.3 - Tepelná bilance těla [21]

Konceptem rovnice tepelné rovnováhy je

$$M - W = E + R + C + K + S \quad (2.1)$$

Pro tepelnou rovnováhu tedy

$$M - W - E - R - C - K = 0 \quad (2.2)$$

Kde $M-W$ je vždy kladné a E, R, C, K určují rychlost přenosu tepla výše popsanými způsoby. Výsledkem rovnice je tedy hodnota rychlosti změny tepelného stavu lidského těla v jednotkách W (Watt), případně standardizovaných W/m^2 (Watt na metr čtverečný z celkového povrchu těla) [21].

Celkový povrch těla je většinou odhadnut ze zjednodušené Du Boisovy rovnice kdy:

$$A_D = 0,202 \times m^{0,425} \times h^{0,725} \quad (2.3)$$

kde:

m – hmotnost těla [kg]

h – výška těla [m]

Standartní hodnotou A_D je $1,8 \text{ m}^2$ používané pro muže s výškou 173 cm a 70 kg. A_D je pouze odhadem a existují i přesnější výpočty, ale chyba, kterou tento výpočet vytváří, je zanedbatelná [21].

Pro analýzu rovnice tepelné rovnováhy mezi tělem a okolím, vyčíslení členů rovnice pro konečnou kalkulaci jsou dvě podmínky. Musí být identifikovány specifické cesty přenosu a výměny tepla pro lidské tělo. Dále musí být určeny rovnice pro kalkulaci generace tepla a výměny s okolím [21].

Lidské tepelné modely se řadí od ranných jednoduchých 1D stacionárních modelů, například od Fangerů, více uzlových od Wisslera až po komplexní přechodné modely konečných prvků od Fua a Tanabeho. Pouze některé modely mají v sobě i systém pro pocení a regulaci krevního oběhu (model Stolwijka, Fialy), fyzikální vlastnosti oblečení (Wernerův, Havenithův). Dalšími modernějšími modely jsou Lotensovy a Murakamiho modely, které detailně analyzují přechodný přenos tepla a vlhkosti skrze oblečení, nebo efekt postoje, který je využit v modelu Kaynakliho [5].

Prvním modelem je výše zmíněný Fangerův model představený v roce 1970 a využívá následující rovnici:

$$H - E_{dif} - E_{sw} - E_{res} - C_{res} = R + C \quad (2.4)$$

kde:

H – produkce metabolického tepla [W]

E_{dif} – tepelné ztráty difúzí vodní páry skrze póry kůže [W]

E_{sw} – magnituda pocení [W]

E_{res} – ztráta latentního tepla dýcháním [W]

C_{res} – tepelná ztráta suchého dýchání [W]

Pro „normální“ podmínky je tepelný přenos kondukcí zanedbatelný. Nejvyužívanější standart tepelného komfortu dle ASHRAE je rovnice založená na Fangerově vztahu, popisující tepelnou bilanci mezi tělem a okolím [12].

$$M - W = Q_{sk} + Q_{res} + S = (C + R + E_{sk}) + (C_{res} + E_{res}) + (S_{sk} + S_{cr}) \quad (2.5)$$

kde všechny členy mající jednotky W/m^2 :

Q_{sk} – tepelné ztráty kůží

Q_{res} – tepelné ztráty dýcháním

E_{sk} – tepelná ztráta difuzí vlhkosti kůží a pocením

C_{res} – konvektivní tepelná ztráta dýcháním

E_{res} – tepelná ztráta vypařováním při dýcháním

S_{sk} – tok ukládání tepla v kůži

S_{cr} – tok ukládání tepla uvnitř těla

$$E_{sk} = E_{rsw} + E_{dif} \quad (2.6)$$

kde:

E_{rsw} – vypařovací tepelná ztráta kůží pocením [W/m^2]

E_{dif} – vypařovací tepelná ztráta difuzí vlhkosti kůží [W/m^2]

Rovnice je tedy dělená na část generace tepla v těle ($M-W$), tepelné ztráty v kůži ($C + R + E_{sk}$), ztrát dýcháním ($C_{res} + E_{res}$) a stav tepla uloženého v těle ($S_{sk} + S_{cr}$). Změna uloženého tepla se rovná změně vnitřní energie. Tělo může být v rovnici děleno na dvě části, a to kůži a jádro těla. Tepelný přenos kondukcí je zanedbáván vzhledem k nízkým hodnotám přenosu. Pokud je značná část povrchu těla v kontaktu s jiným objektem, tepelné ekvilibrium je rychle nastoleno a následně působí pouze jako dodatečná tepelná izolace. Při stacionárních případech se ztráty kondukcí započítávají do konvektivních ztrát [21].

Produkce tepla uvnitř těla ($M-W$)

Teplu vytvářené v těle je propojeno s aktivitou osoby. V podstatě je kyslík přiveden do těla dýcháním, vstřebán v plicích, kde se naváže na červené krvinky, a dopraven do mitochondrií, částí buněk produkující energii „spalováním“ živin. Většina této energie je ve formě tepla. S ohledem na aktivitu je část energie využita pro externí práci. Tato energie zabírá od nuly po maximum 25 % celkového metabolického tepla [21]. Pro měření množství vyprodukovaného tepla se může po určitý čas odebrat vyfukovaný vzduch a změřit kolik kyslíku bylo vypotřebováno neboli rozdíl množství kyslíku v okolí (cca 21 % vzduchu) a množství kyslíku ve vydechovaném vzduchu (okolo 16 %). Případně se může využít počet kalorií z jídla k odhadu energie, a tedy i tepla vytvořeného. Další metody existují, avšak jejich přesnost je diskutabilní [2].

Citelné tepelné ztráty ($R+C$)

Pro přenos tepla radiací je důležitý povrch těla pokrytý oblečením, jelikož většinou je větší povrch těla pokryt oblečením, než který je obnažen. Některé kusy oblečení také přenáší teplo mezi sebou a tělem místo okolím, například v oblasti vnitřních stehen, podpaží. Tudíž efektivní radiační povrch těla je nižší než celkový. Pro sedícího osobu je například efektivní povrch pouze okolo 70 % a 72,5 % pro stojícího člověka. Vzhledem k malému rozsahu byla určena konstantní hodnota na 71 %. Kůže a oblečení mají také rozdílné vyzařování s rozdílem pouze 0,05 a tak se uvádí průměrná hodnota 0,97. Tato hodnota je nezávislá na barvě při nízkých teplotách, avšak pro krátkovlnné záření hraje roli. Míra tepelné ztráty radiací je závislá na průměrné teplotě povrchu oblečení, typu oblečení a radiační teplotě [4].

Konvekce se rozděluje na volnou a nucenou. Při volné konvekci je vzduch v blízkosti kůže ohříván a tedy stoupá, čímž vytváří proudění a konstantní odvod tepla. Nucená konvekce probíhá při vyšších rychlostech proudění, například při vystavení proudu vyústek [4]. Konvektivní ztráty jsou závislé na teplotě vzduchu, průměrné teplotě povrchu oblečení, typu oblečení a rychlosti proudění vzduchu [16].

$$C = f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a) \quad (2.7)$$

$$R = f_{cl} \times h_r \times (t_{cl} - t_r) \quad (2.8)$$

$$C + R = f_{cl} \times h \times (t_d - t_0) \quad (2.9)$$

Kde:

$$t_0 = \frac{(h_r \times t_r + h_c \times t_a)}{h_r + h_c} \quad (2.10)$$

$$h = h_r + h_c \quad (2.11)$$

Skutečný přenos tepla skrze oblečení se kombinuje do jednoho tepelného odporu R_{cl} :

$$C + R = \frac{(t_{sk} - t_{cl})}{R_{cl}} \quad (2.12)$$

$$C + R = \frac{(t_{sk} - t_0)}{(R_{cl} + \frac{1}{f_{cl} \times h})} \quad (2.13)$$

kde:

f_{cl} – faktor povrchu oblečení (podíl povrchu oblečené části těla k celkovému povrchu těla dle DuBoise [-])

h_c – koeficient konvektivního přenosu tepla [W/m^2K]

h_r – koeficient lineárního radiačního přenosu tepla [W/m^2K]

h – celkový koeficient přenosu tepla [W/m^2K]

t_0 – operativní teplota [$^{\circ}C$]

t_r – střední radiační teplota [$^{\circ}C$]

t_a – teplota vzduchu [$^{\circ}C$]

t_{cl} – průměrná teplota oblečeného těla [$^{\circ}C$]

t_{sk} – průměrná teplota kůže [$^{\circ}C$]

R_{cl} – tepelný odpor oblečení [m^2K/W]

Teplota vzduchu, střední radiační teplota a tepelný odpor oblečení jsou základními parametry, které musí být změřeny nebo odhadnuty pro určení prostředí. Pro průměrnou teplotu kůže může být hodnota odhadnuta a považována za konstantní [21].

Vypařování skrze kůži (E_{sk})

Vypařování skrze kůži probíhá částečně difuzí, nebo vypařováním potu na povrchu. Teplo pro vypaření voda bere z těla [4]. Tepelná ztráta skrze vodní páru je závislé na rozdílu mezi koncentracemi vodní páry na kůži a ve vzduchu. Když je kůže vždy minimálně vlhká, můžeme předpokládat nasycenou vodní páru na rozhraní, mající teplotu kůže [2].

Tepelná ztráta difuzí probíhá neustále a není regulovatelná hypothalamem. Obvykle touto cestou tělo ztrácí cca $10 W/m^2$, pro normální podmínky $11,2 W/m^2$ [4].

Vypařování potu je jedním z nejúčinnějších termoregulačních prostředků těla k udržení vnitřní teploty od zvyšování při těžké práci. Hodnota tepelných ztrát se pohybuje od $0 W/m^2$ až po $400 W/m^2$ při těžké práci v suchém a horkém prostředí. Každý má limit, jak moc se dokáže potit, což způsobuje velké individuální rozdíly. Roli tu má adaptabilita. Lidé, kteří jsou zvyklí žít a pracovat v horkých prostředích mají lepší funkčnost potních žláz, a tak lépe ovládají teplotu těla. Aklimatizovaný člověk by neměl být schopen vypotit více než 1 litr za hodinu a celkově více než 3,5 litru. Pokud by vypotil toto množství, jeho tepelná ztráta by byla $675 W$ neboli $375 W/m^2$ s celkovou ztracenou energií $8,5 MJ$ [4].

Vzhledem k této vysoké ztrátě vody a soli z těla by obě složky měl člověk doplňovat, aby se byl schopen dostatečně potit. Kompletní mechanismus pocení není kompletně popsán, jelikož teplo odebírá jen odpařený pot, nikoliv kapky, které skapávají z těla a neodebírají teplo. Olesen dává za příklad saunu, kde teplota je velice vysoká pro funkci všech termoregulačních mechanismů těla krom pocení. Prostředí v sauně je dostatečně suché, aby pocení dokázalo udržet teplotu těla, ale když někdo nalije vodu na zdroj tepla, zvýší se vlhkost vzduchu a efektivita pocení rapidně klesne, čímž se člověk dostane do diskomfortu, vzhledem ke sníženému odpařování potu, avšak zvýšené produkce potu [4]. Tepelná ztráta vypařováním je tedy závislá na relativní vlhkosti, teplotě a rychlosti proudění okolního vzduchu, teplotě kůže, zvlhčení kůže, tepelnému odporu oblečení a schopnosti propouštět vlhkost [16]. ASHRAE udává následující rovnici pro výpočet celkové tepelné ztráty vypařováním skrze kůži [21]:

$$E_{sk} = \frac{w \times (P_{sk,s} - P_a)}{[R_{e,cl} + \frac{1}{f_{cl} \times h_e}]} \quad (2.14)$$

kde:

P_a – tlak vodní páry ve vzduchu [kPa]

$P_{sk,s}$ – tlak vodní páry na kůži neboli tlak nasycené vodní páry při teplotě kůže [kPa]

$R_{e,cl}$ – vypařovací tepelný odpor oblečení [$m^2 kPa/W$]

h_e – koeficient přenosu konvekcí [$W/m^2 kPa$]

w – zvlhčení kůže [ND]

h_e je kalkulován pomocí Lewisovy rovnice, která umožnila uskutečnění rovnice tepelné rovnováhy a porovnání mezi suchým a mokřím pocením. Hodnoty P_a a $R_{e,cl}$ jsou základními parametry, $P_{sk,s}$ je vypočítán z Antoinovy rovnice za použití průměrné teploty kůže. Zvlhčení kůže se liší od hodnoty 0,06, pro přirozenou difuzi vody skrze kůži, po hodnotu 1 pokud je kůže kompletně vlhká a probíhá maximální vypařování [21].

Tepelné ztráty dýcháním ($C_{res} + E_{res}$)

Ztráty dýcháním probíhají skrze suchou konvekci vdechováním studeného vzduchu, který se ohřívá na teplotu vnitřního těla v plicích a toto teplo je poté při výdechu odevzdáno do okolí. Vzduch je v plicích navíc i navlhčen na křivku sytosti [16]. Při výdechu je tedy přenos energie do okolního prostředí pomocí vypařování a konvekce [21]. Teplo by tímto způsobem mohlo být přenášeno i do těla, avšak podmínky, které by to umožňovaly, se nachází daleko od jakéhokoliv komfortu. Při výdechu v komfortních podmínkách vydechovaný vzduch ztrácí teplo před opuštěním těla tudíž se uvažuje jako teplota při opuštění 34 °C [2]. Hodnota ztrát je tedy závislá na aktivitě subjektu, vlhkosti a teplotě vzduchu. ASHRAE uvádí: [21].

$$C_{res} + E_{res} = [0,0014 \times M \times (34 - t_a) + 0,0173 \times M \times (5,87 - P_a)], \quad (2.15)$$

kde P_a [kPa], M [W/m^2] a t_a [°C].

2.2. Faktory tepelného komfortu

2.2.1. Metabolické teplo

Produkce tepla v těle je kontinuální proces změny chemické energie na teplo se spotřebou kyslíku a vylučováním oxidu uhličitého [12]. Metabolické teplo se dělí na část základního metabolismu, biologických, kontinuálních a podvědomých procesů, a svalový metabolismus, který je vědomě ovladatelný [25]. Množství produkovaného tepla standardizováno na 1 W/kg tělesné hmotnosti, pro osobu ležící, osm hodin po jídle. Ve studeném prostředí chvění svalstva dokáže zvýšit produkci tepla až na trojnásobek. Teplo z metabolismu se vyjadřuje v jednotkách met, kdy 1 met = 58,15 W/m² [4]. Tato jednotka je založena na průměrném evropském člověku s povrchem kůže 1,8 m². Pro porovnání, průměrná evropská žena má povrch 1,6 m². Povrch těla se může lišit mezi etnickými a geografickými skupinami [31]. Při normálních podmínkách, když člověk odpočívá, tělo vyprodukuje 5,57 W na litr

spotřebovaného kyslíku za hodinu. Jelikož osoba spotřebuje zhruba 18,6 litrů kyslíku za hodinu, vyprodukuje zhruba 104 W neboli již zmíněných 58,15 W/m² [12].

Ve skutečnosti je rychlost metabolismu také závislá na okolních podmínkách. Dle experimentů je výkon metabolismu při odporu oděvu 0,42 clo o 15,8 % vyšší při 16 °C než při 26 °C, a při odporu oděvu 0,91 clo je vyšší o 9,2 % [34].

Energie uvolněná je někdy částečně přeměněna na externí mechanickou sílu, ale ve většině je energie přeměněna na tělesné teplo. Vyšší metabolická rychlost se popisuje porovnáním s rychlostí při odpočinku, tedy pokud člověk produkuje 5 met, znamená to, že metabolismus pracuje pětkrát rychleji než při odpočinku [31].

Externí mechanická energie může být kladná i záporná, například při těžké práci je část energie využita k dokončení činnosti. Je přímo spojená s metabolickým teplem, protože vnitřní pochod metabolismu produkuje energii pro externí práci. Lidské tělo má účinnost zhruba 20 %, tudíž pokud potřebujeme vykonat o 10 W/m² více práce, metabolismus musí vytvořit o 50 W/m² více energie. Tento přebytek je poté ztracen do prostředí výše popsány mechanismy [4].

Hrubé určení měrného výkonu těla při různých aktivitách může být určen tabulkami pro činnosti a profese. Dále se může využít měření srdečního tepu. Individuální tep je sumou několika proměnných a obecně je lineárně závislý na metabolickém teple pro více než 120 tepů za minutu. Toto číslo je typické pro těžší činnosti, nikoliv pro sedavé aktivity. Třetí metodou je přímé měření tepla v určeném zatepleném prostoru, kde se měří produkce tepla přímo. Tuto metodu není možno použít pro reálné prostory a je použitelná pouze ve speciálních prostorech. Dále se může používat tzv. nepřímá kalorimetrie, kdy se zkoumá člověkem vydechovaný vzduch. Vzduch je zachycován po určité dobu buď Douglasovým pytlek a zkoumán později, případně přímo analyzován [32].

Tabulka 2.2 - produkce metabolického tepla pro činnosti [1]

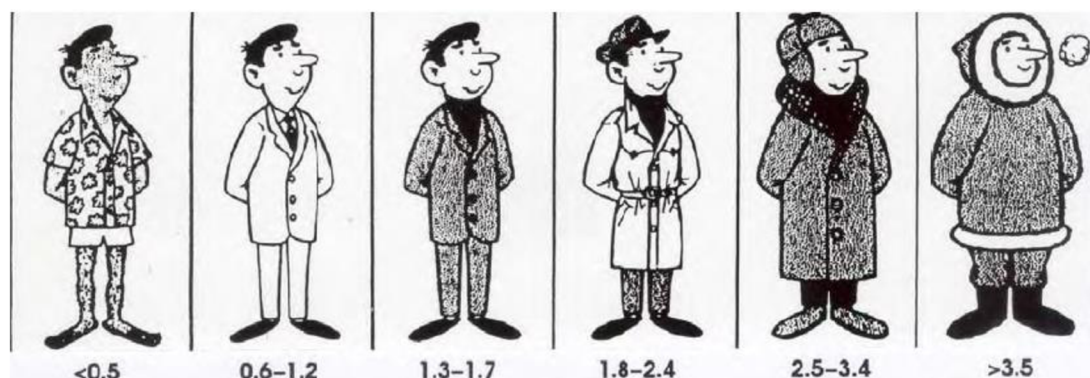
Činnost	W	W.m ⁻²	met
Spaní	70	40	0,7
Odpočívání, ležení na posteli	80	46	0,8
Sezení, odpočívání	100	58	1,0
Stání, práce v sedě	120	70	1,2
Velmi lehká práce (učitel, nakupování, vaření)	160	93	1,6
Lehká práce (domácí práce, práce s přístroji)	200	116	2,0
Středně těžká práce (tanec)	300	175	3,0
Těžká práce (tenis)	600	350	6,0
Velmi těžká práce (squash, práce v hutích)	700	410	7,0

2.2.2. Efekt oblečení

Funkční role oblečení je udržování těla v přijatelném tepelném stavu, přidáním tepelné izolace na povrch těla. Přenos tepla skrze oblečení je velice komplexní, jelikož se teplo přenáší při dotyku oblečení s kůží skrze kondukcii, která se zároveň liší, pokud je povrch vlhký. Teplo se také přenáší skrze vzduchové kapsy, radiální kapsy mezi vrstvami atd. Z tohoto důvodu se přešlo na zjednodušený model hodnocení a celkové vlastnosti oblečení se charakterizují dle celkového tepelného odporu. Byla představena jednotka clo, bezrozměrné číslo pro tepelnou izolaci oblečení, měřené od povrchu kůže po okolní prostředí, bez vlivu odporu vnějšího povrchu. 1 clo se rovná odporu 0,155 m²K/W. Tato hodnota představuje zhruba tepelný odpor společenského obleku s klasickým spodním prádlem [16].

Hlavním faktorem pro určení tepelné izolace je tloušťka oblečení a samotná hodnota odporu je měřena na manekýnech. Oblečení také zvýší povrch, skrze který probíhá přenos tepla. Faktor zvětšení oproti povrchu těla dle Du Boise se nazývá faktor povrchu oblečení [2].

Přenos tepla skrze oblečení je také ovlivněn z velké části tělem a jeho pohybem, což znamená, že při použití stacionárních hodnot pro evaluaci prostředí, nadhodnocení izolace oblečení a reálné ztráty budou vyšší. Například bylo zjištěno, že izolace oblečením může klesnout až o 25 % při rychlosti vzduchu 0,5 m/s při střední aktivitě. Aspektem, který například ASHRAE nebere v úvahu je prodyšnost oblečení a propouštění vypařovaného potu. Zvlhčení kůže sice popisuje produkci a vypařování potu, avšak samotné vlastnosti oblečení, které ovlivňují průchod vlhkosti není v rovnici uveden [32]. Další rozdíl v efektivní tepelné izolaci oblečení představuje postoj. Člověk stojící má například tepelný odpor oděvu při stejných podmínkách o 10 % vyšší než pro člověka sedícího [33].



Obrázek 2.4 - Tepelný odpor pro typy oblečení [25]

2.2.3. Teplota vzduchu

Teplotou vzduchu je myšlena průměrná teplota v blízkosti povrchu těla v závislosti na poloze a času a je hlavním aspektem okolí, určující tepelný tok mezi subjektem a prostředím [22]. Tento faktor je považován za velice důležitý vzhledem k úzkému intervalu, který pocit pohody okupuje. Konkrétní teplota v okolí těla se liší v každém bodě, vzhledem ke kontinuálnímu přenosu tepla, stoupání teplého proudu vzduchu vytvářející tepelný gradient s výškou od země. Teplota vzduchu daleko od těla nemusí být vždy totožná a využitelná pro tepelný komfort, jako teplota, která řídí tepelný přenos. Zároveň ale také blízká teplota oblečeného těla je irelevantní vzhledem k okrajové podmínce, kdy teplota na povrchu oblečení se může lišit při vyšších rozdílech okolní teploty a teploty těla [21]. Obvykle se teplota vzduchu měří kulovým suchým teploměrem, který dodává teplotu bez příspěvku radiace a vlhkosti. V nehomogenních prostředích, jako je například kabina automobilu, s rozdílnými povrchovými teplotami povrchů a teplotami vzduchu, nelze vyloučit radiační teplotu. Používají se tepelné senzory, které doporučují teploty mezi střední radiační teplotou a teplotou vzduchu v okolí [29].

2.2.4. Střední radiační teplota

Střední radiační teplota je definována jako jednotná teplota okolních povrchů, ze kterých by černé těleso získávalo/ztrácelo stejné množství energie jako v reálném prostředí [29]. Použití koule v definici ukazuje průměr ve třech dimenzích. Pro nekulové tělesa záleží na jejich orientaci vůči okolí, a tak pro lidské tělo se používá tzv. efektivní střední radiační teplota, která v definici pouze zaměňuje černé těleso za lidské tělo [21]. Střední radiační teplota nabírá na důležitosti s vyšším počtem prosklených ploch, jejichž povrch je více ovlivněn venkovními podmínkami. V budovách například studená podlaha může negativně ovlivnit tepelnou pohodu. Příliš teplé povrchy mohou způsobit, že člověk se bude cítit tepleji, než teplota vzduchu vyznačuje. Radiační teplota se počítá ze změřených teplot okolních zdí a jejich pozice vzhledem k osobě a případně, u materiálů, které nemohou být považovány za černé, emisivit [23].

Věk

V principu starší lidé nevnímají tepelný komfort nijak jinak. V průměru mají starší lidé menší úroveň aktivity a tím i produkci metabolického tepla. Na druhou stranu však i klesá schopnost termoregulace [20]. Bylo nalezeno i snížení pocení a krajní teplota, při které pocení začíná se zvyšuje. Díky tomu že s věkem přibývá podkožního tuku, snižuje se přenos tepla, tudíž si tělo snadněji ponechá teplo a ve výsledku to znamená, že při provedených experimentech se přišlo na to, že věk nehraje velkou roli při návrhu tepelného komfortu, ačkoliv je obecně uznáváno, že starší lidé méně reagují na teplotní změny a jsou více zasaženi extrémů [10].

Národnost

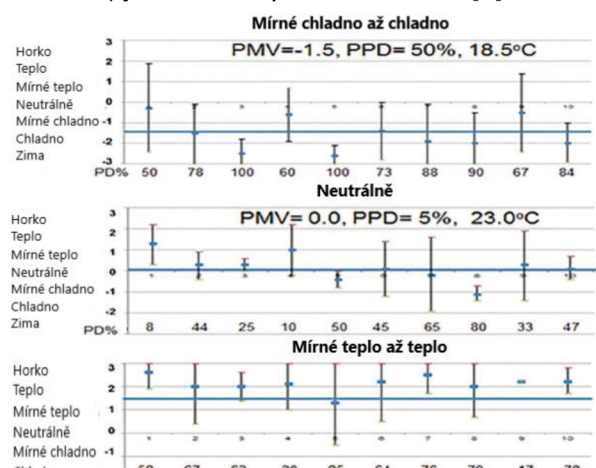
Skrze mnohé výzkumy a pokusy bylo zjištěno, že neutrální komfortní teplota se nemění s aklimatizací a národností, Lidé z různých zemí mohou mít odlišnosti v reakcích na teploty odlišné komfortním dle PMV [2].

Kontrola

Byly provedeny pokusy, kde subjektům bylo umožněno mít kontrolu nad prostředím. Pro všechny hodnoty teplot bylo zjištěno, že při pocitu kontroly nad prostředím bylo dosažený medián volby míry komfortu blíže k neutrální hodnotě [13].

Postižení

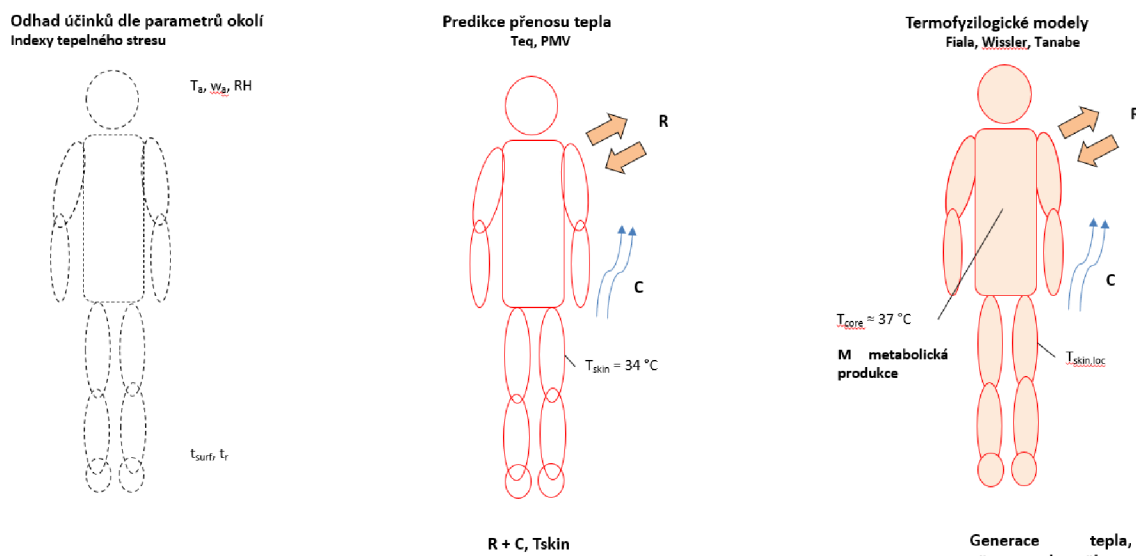
Mnohá postižení, ať už fyzická nebo mentální, vytváří jiné potřeby pro daného člověka. Postupně probíhají výzkumy, jak nejlépe nastavit vnitřní prostředí, aby lidé, kteří nemohou sami změnit oblečení nebo upravit vnitřní podmínky, mohli žít v komfortu. Výsledky laboratorních pokusů s deseti skupinami lidí s postižením (1 – mozková obrna, 2 – poranění páteře, 3 – degenerace páteře, 4 – rozštěp páteře, 5 - hemiplegie, 6 - obrna, 7 - artróza, 8 – revmatoidní artritida, 9 – poranění hlavy, 10 – roztroušená skleróza) jsou uvedeny na obrázku 2.6 [2].



Obrázek 2.6 - Tepelný komfort pro lidi s postižením (přeloženo z [2])

2.3. Měřící systémy

Při měření tepelného komfortu se může použít řada způsobů. Zmíněny zde budou tři základní, sondy, tepelný manekýn a testování skrze dotazníky. Využití jednotlivých způsobů záleží na požadované přesnosti, podmínkách měřeného prostředí a dostupných financí. Na problém objektivního měření tepelného komfortu může být hleděno třemi způsoby. Mohou být změřeny podmínky prostředí a určeny hladiny osobních činitelů a dle těchto hodnot se odhaduje míra spokojenosti. Dále se může pracovat s modelem lidského těla a zjišťovat tepelný komfort skrze intenzitu přenosu tepla z těla jako celku do okolí, nebo se mohou využít komplexní termofyziologické modely k simulaci přenosu tepla uvnitř těla a do okolí viz obrázek 2.7 [36].



Obrázek 1.7 - Přístupy řešení tepelné pohody [36]

2.3.1. Sondy

Norma ošetřující hodnocení tepelné pohody a měření parametrů prostředí je ČSN EN ISO 7726 Ergonomie tepelného prostředí – Přístroje pro měření fyzikálních veličin. Osobní činitelé, kterými jsou metabolické teplo a aktivita, jsou určeny dle tabulek odporů jednotlivých kusů oblečení a míry aktivity nebo podle spotřeby kyslíku [38]. Měření probíhá bodově, a proto se měří na třech pozicích, ve výšce kotníků, stehen a obličeje [37].

Měření teploty

Výše bylo uvedeno, že teplota je definována jako teplota vzduchu obklopující lidské teplo a určuje tepelný tok mezi tělem a prostředím. Většinou se teplota měří rtuťovým teploměrem, termočlánkem, odporovým teploměrem nebo termistorem. Pro kontinuální zapisování je lepší mít přístroj vydávající elektrický signál [21]. Důležité je zabránit co nejefektivněji radiaci na teploměr snížením emisivity ať už stříbrnou barvou, odstíněním za předpokladu že nebude narušeno proudění vzduchu okolo nebo zvýšením rychlosti vzduchu přes senzor. Přesnost teploměrů používaných v dnešní době se blíží $\pm 0,1\text{ °C}$, případně pro laboratorní podmínky může být přesnost vyšší [39].

Jedním z typů teploměrů, které dávají elektrický signál, který se dá zaznamenat v počítači je odporový teploměr. Pracují na principu měnícího se elektrického odporu při změně teploty. Například pro platinový odporový teploměr se při proudu 1 mA a změně teploty o 1 °C změní napětí o 40 μV [21]. Kov, který je pro teploměr využit musí být nejen levný, ale také musí mít správné vlastnosti pro změnu odporu s teplotou, musí být odolný vůči oxidaci a měl by být jednoduchý na zpracování. Měď, Nikl a platina jsou nejčastějšími kovy. První z nich se používá pro teploty -100 °C až 100 °C a je levným materiálem. To samé se dá říci i o niklu, avšak jeho změna odporu s teplotou není lineární. Nejčastěji používaným je však platina, která má šestkrát větší odpor, není reaktivní a má vysokou teplotu tání. Používá se pro teploty od -260 °C do 1000 °C [40].



Obrázek 2.8 - Kulový teploměr [47].

Střední radiační teplota

Střední radiační teplota je dána teplotou okolních povrchů a jejich emisivitou. Při měření je důležité si říci, zdali je důležitý směr, odkud je subjekt ozařován nejvíce. Pokud se jedná pouze o čistě skalární měření teploty, využívá se kulový teploměr. Jedná se o teploměr umístěný v měděné kouli obarvené dle použití [41]. Ve vnitřních prostorech je lepší černá koule, protože s větší odrazivostí příchozí radiace se zvyšuje akumulovaná chyba z měření ostatních parametrů potřebných k výpočtu střední radiační teploty. Ideálně, pokud se v měřeném místě vyskytuje solární záření, teploměr by měl mít barvu oblečení, aby nepřecenil efekt záření na osobu. Pokud je převládající směrová radiace například ze stropního vytápění, je více vhodné použít válcový nebo elipsoidní teploměr [42]. Samotný materiál kulového krytu ovlivňuje setrvačnost, se kterou teploměr reaguje na změny teploty. Hodnota střední radiační teploty se z kulového teploměru získá následovně [21].

Pro přirozenou konvekci [21]:

$$t_r = [(t_g + 273)^4 + \frac{0,25 \times 10^8}{\varepsilon} \times \left(\frac{|t_g - t_a|}{d}\right)^{0,25} \times (t_g - t_a)]^{0,25} - 273 \quad (2.17)$$

Pro nucenou konvekci [21]

$$t_r = ((t_g + 273)^4 + \frac{1,1 \times 10^8 \times v^{0,6}}{\varepsilon \times d^{0,4}} \times (t_g - t_a))^{0,25} - 273 \quad (2.18)$$

Kde:

t_r – střední radiační teplota [K].

t_g – teplota kulového teploměru [K].

t_a – teplota vzduchu [K].

ε – emisivita [-]

d – průměr kulového krytu teploměru [m].

Pro prostory, ve kterých se podmínky mění rychleji, než kulový teploměr dokáže zaznamenat, je potřeba výpočet střední radiační teploty z teplot okolních povrchů, která se měří bodově teploměrem, nebo čidly na povrchu daných ploch [39].

$$t_r^4 = t_1^4 F_{p-1} + t_2^4 F_{p-2} + \dots + t_N^4 F_{p-N} \quad (2.19)$$

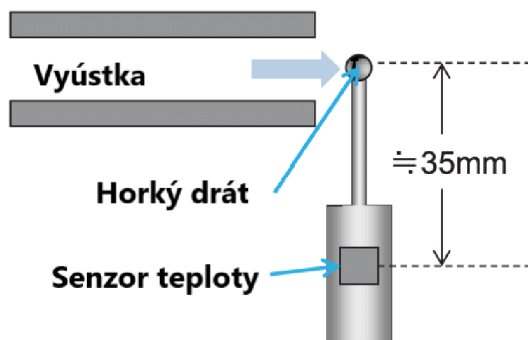
kde:

t_n – povrchová teplota n -té plochy [K].

F_{p-n} – úhlový faktor mezi subjektem p a n -tou plochou [-]

Rychlost vzduchu

Rychlost proudění vzduchu se zjišťuje anemometrem. Podle typu proudění a směrovosti rozlišujeme různé typy anemometrů. Anemometry měří rychlost větru, podle tlaku na tvarovanou plochu, případně zvukovými pulzy. Nejjednoduššími jsou šálkové, nebo rotační, anemometry. Šálky jsou umístěny vertikálně a roztáčí se působením větru. Na stejném principu fungují i vrtulkové anemometry a oba typy jsou velmi nevhodné pro nízké rychlosti pod 1 m/s [25]. V minulosti pro nízké rychlosti se používal katateploměr, nyní je víceméně nahrazen anemometrem s horkým drátem, který dle rychlosti proudění ztrácí teplo [43].

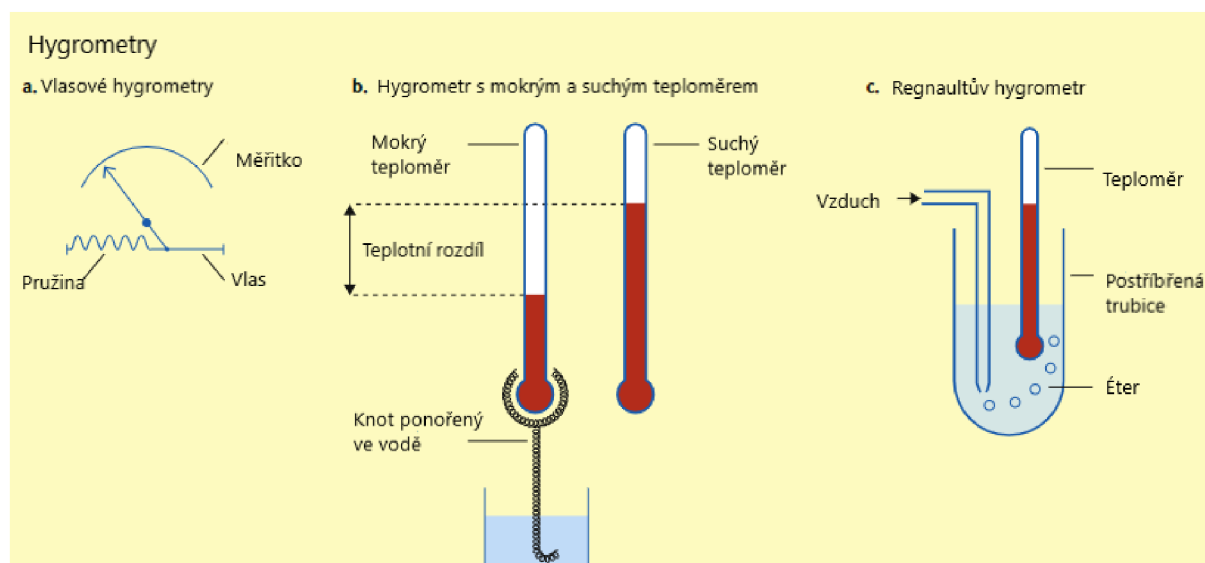


Obrázek 2.9 - Anemometr s horkým drátem [48]

Pro nízké rychlosti se využívá ultrazvukový anemometr, který posílá zvukové vlny mezi dvěma přijímači a rychlost vyčte z míry rozrušení signálu [43]. Přístroj dokáže měřit velice přesně a rychle, jeho hlavní nevýhodou je cena. Většinou se skládá ze čtyř senzorů uspořádaných ve čtverci. Mohou být dvourozměrné nebo třírozměrné, které se používají na měření emisí [44]. Dalším vysoce přesným anemometrem je laserová dopplerovská anemometrie, která jak už název napovídá využívá Dopplerův jev. Tento měřič dokáže zaznamenat i velice malé změny rychlosti [43]. Paprsek světla se rozděluje na dva oddělené paprsky a rychlost je zjištěna množstvím světla, které bylo odraženo pohybujícími se částicemi [44].

Vlhkost

Vlhkost vzduchu se měří několika způsoby. Prvním je psychrometrie, která vyžaduje teplotu suchého a mokrého teploměru. Tyto teploty na h - x diagramu jsou zaokrouhleně na stejné izoentalpě. Dalším způsobem pro měření vlhkosti je měření teplotu suchého teploměru a rosného bodu, jejichž body na diagramu jsou pod sebou, jelikož mají stejné x , měrnou vlhkost [25]. Třetím způsobem jsou vlhkoměry. Mechanické vlhkoměry využívají citlivosti lidských vlasů na vlhkost. Se zvyšující se vlhkostí se vlas prodlužuje. Tento typ se jmenuje hygroskop [46]. Má velkou nejistotu měření a k zachování flexibility vlasů by se měl čas od času dostat do 100 % vlhkého prostředí pro kalibraci. Absorpční vlhkoměr využívá hygroskopické látky, které jsou schopné na sebe vázat vlhkost nebo ji vydávat zpět. Pro elektronické přístroje je běžný princip změny elektrické vodivosti nebo elektrické kapacity určité látky. Dvě elektrody, vzdálené od sebe půl centimetru jsou odděleny hygroskopickým polymerem, jehož elektrické vlastnosti se mění s vlhkostí [45].



Obrázek 2.10 - Druhy hygrometrů [46]

2.3.2. Manekýn

Jelikož senzory a sondy popisují pouze bodově okolní prostředí, a neberou v úvahu tvar těla a přenos tepla mezi ním a okolím, byli vyvinuti vyhřívaní manekýni, kteří umí simulovat lidskou termoregulaci za stejných podmínek jako osoby v testovaném prostředí. Jedná se o komplexní figurínu tvarovanou jako lidské tělo, která vytápí svůj povrch, nebo každou část zvlášť, na průměrnou teplotu kůže a měří tepelné ztráty konvekcí, kondukcí, radiací, případně i vypařováním po celém svém povrchu do všech směrů. Manekýn se skládá z počtu segmentů, a dle modelu může obsahovat od jednoho až po více než 100 individuálně regulovaných částí [51].

První tepelný manekýn byl vytvořen pro účely americké armády ve čtyřicátých letech minulého století. Manekýn byl jedno-segmentový, neměl hlavu a paže. Byl vytvořen z trubek a plechů, měl vnitřní vytápění a ventilátor k zajištění proudění [55]. Další iterace manekýna byla vytvořen z galvanicky pokoveného měděného krunýře s elektrickým vytápěním, které jednotně vyhřívalo povrch. Tento typ byl vyráběn sériově pro využití ve výzkumu vytápění, klimatizace a větrání [51].

Hlavní vylepšování manekýnů se zaměřovalo směrem zvýšení počtu segmentů, které nezávisle na sobě měří povrchovou teplotu. Samotný krunýř manekýna se vyrábí z lehčího a levnějšího hliníku, skleněných vláken, polystyrenu, případně jiného materiálu, který dostatečně vede teplo, s digitální regulací [56]. Pouze stojící manekýn nebyl dostačující pro širokou škálu činností potřebující optimální komfort. Proto v sedmdesátých letech minulého století, byl vytvořen první manekýn s klouby, který umožnil simulaci chůze nebo jízdy na kole [54]. Důležitým pokrokem bylo integrování simulace pocení, jelikož zahrnuje obrovskou část tepelných ztrát lidského těla při vysokých venkovních teplotách [51]. První dámský manekýn byl představen v roce 1989 v Dánsku a v roce 2000 byl vytvořen manekýn, který umí simulovat dýchání [54]. V tabulce 2.3 je uveden pokrok mezi tepelnými manekýny.

Table 2.3 - Milníky ve vývoji tepelných manekýnů (přeloženo z [51])

Typ	Segmentace	Série	Materiál	Regulace	Postoj	Stát
A	1segmentový	SAM	Měď	Analog	Stojící	USA 1942
B	11segmentový	ALMANKIN	Hliník	Analog	Stojící	UK 1964
C	Radiační manekýn	CEPAT400	Hliník	Analog	Stojící	Francie 1972
D	16segmentový	HENRIK2	Plast	Analog	Pohyblivý	Dánsko 1973

E	16segmentový	CHARLIE	Plast	Analog	Pohyblivý	Německo 1978
F	16segmentový	SIBMAN	Plast	Digitální	Stojící, sedící	Švédsko 1980
G	19segmentový	VOLTMAN	Plast	Digitální	Sedící	Švédsko 1982
H	34segmentový	ASSMAN	Plast	Digitální	Sedící	Švédsko 1983
I	19segmentový	TORE	Plast	Digitální	Pohyblivý	Švédsko 1984
J	7segmentový	CLOUSSEAU	Plast	Analog	Stojící	Švédsko 1987
K	Potící se manekýn	COPELIUS	Plast	Digitální	Pohyblivý	Finsko 1988
L	Dámský manekýn	NILLE	Plast	Komfort	Pohyblivý	Dánsko 1989
M	33+3segmentový	HEATMAN	Plast	Multi	Sedící	Švédsko 1991
N	1 potící segment	WALTER	Tkanina	Vodou	Pohyblivý	Hong Kong 1991
O	36segmentový	HEATMAN	Plast	Digitální	Pohyblivý	Francie 1995
P	Dýchající manekýn	NILLE	Plast	Multi	Pohyblivý	Dánsko 1996
Q	Potící se manekýn	SAM	Plast	Digitální	Pohyblivý	Švýcarsko 2001
R	26segmentový	TOM	Měď	Digitální	Pohyblivý	USA 2003
S	126segmentový	ADAM	Kompozit	Model	Pohyblivý	USA 2003

Výhodou tepelného manekýna je simulace tepelné výměny mezi tělem a okolím souhrnně i lokálně, z čehož se například může určit část těla, pro kterou prostředí není komfortní. Měření je trojrozměrné, rychlé, přesné s opakovatelností. Využívá se často pro měření tepelného odporu, odporu vypařování a tepelné ztráty oblečení, jelikož se může na manekýna jednoduše navléknout. Výstupy manekýna jsou kompatibilní s nynějšími matematickými modely pro předpověď tepelného komfortu [51].

Jak již bylo uvedeno, jedno z prvních využití a důvodem pro rozvoj manekýnů je měření tepelného odporu jednotlivých kusů oblečení, jelikož některé vybavení například pro armádu nebo hasičský sbor nelze bezpečně testovat na lidech v potřebných podmínkách. Testování s lidmi v bezpečných podmínkách je časově a finančně náročné a počet subjektů by musel být velký, aby bylo měření reprezentativní. Brzy se zjistilo, že manekýn je ideální přístroj k měření a hodnocení tepelných podmínek mikroklimat, jak ve vnitřních obytných prostorech, tak také v dopravních prostředcích [51].

Existují také přístroje, které mají tvar pouze části těla pro testování oblečení, sedaček, nebo jiných produktů, pro které by celý manekýn byl zbytečný. Mezi tyto patří potící noha, ruka, hlava nebo trup, na kterých se testují čepice, rukavice, ponožky a další. Dalšími možnostmi jsou manekýni s pasivními senzory, nevyhříváné, které místo měření teploty povrchu těla jako teploty kůže skutečné osoby, jsou pokryty senzory pro činitele prostředí: teplota vzduchu, vlhkost, rychlost proudění a střední radiační teplota [56].

2.3.3. Testování s lidmi

Testování s lidmi je nejstarší metodou a zároveň nejjednodušší. I přes svou vysokou subjektivitu a množství proměnných, které nedokážeme ovládat, zůstává nezbytnou metodou. I kdyby všechny sofistikovanější testy tepelného komfortu měly výborné výsledky, pokud se obyvatelé daného prostoru nebudou cítit dobře, komfortu dosaženo nebude [50]. Subjektivita spočívá v mnoha faktorech lidského života, která v průměru skupiny nemá vliv na tepelný komfort, může zkreslit výsledky testu několika jedinců, ať už se jedná o zdravotní stav, kdy například nachlazení ovlivní vnímání teploty, nedostatek spánku, nálada, strava jsou dalšími příklady aspektů, které pro širší skupiny lidí nejsou faktory tepelného komfortu, jelikož je mizivá šance, že se objeví u většiny konzistentně [39].

Strukturu a obsah dotazníku ošetřují normy ISO 10551 a ASHRAE 55. Dotazník by měl obsahovat hodnocení na škále pro tepelný stav osoby, tepelný komfort, tepelný preference, osobní přijatelnost prostředí a tolerance. V každém dotazníku by mělo být uveden věk, pohlaví, oblečení, aktivita, výška a váha [49].

Table 2.4 - Dotazníkové otázky pro vyhodnocení tepelného komfortu (přeloženo z [49])

Parametr tepelného stavu	Norma	Otázka při interview	Měřící stupnice
Tepelné vnímání	ISO 10551	“Jak se nyní cítíte?”	Sedmidílná stupnice: Zima (-3), chladno (-2), mírně chladno (-1), neutrálně (0), mírně teplo (1), teplo (2), horko (3) Případně devítidílná: Velmi zima (-4), velmi horko (4)
	ASHRAE 55	“Jaký je váš obecný tepelný pocit?”	Sedmidílná symetrická stupnice shodná s ISO 10551
Tepelný komfort	ISO 10551	“Toto prostředí je pro vás jaké?”	4bodová: komfortní (0), mírně nekomfortní (1), nekomfortní (2), vysoce nekomfortní (3) 5bodová: extrémně nekomfortní (4)
Tepelná priorita	ISO 10551	“Prosím řekněte, jaké by to tu teď mělo být”	7bodová: mnohem chladnější (-3), chladnější (-2), mírně chladnější (-1), stejné (0), mírně teplejší (1), teplejší (2), mnohem teplejší (3)
	McIntyre	Radši byste aby tu bylo...?”	3bodová: chladněji (-1), beze změny (0), tepleji (1)
Tepelná přijatelnost	ISO 10551	“Osobně, toto prostředí je pro mě...”	Dvě tvrzení: více přijatelné než nepřijatelné (0), nepřijatelné více než přijatelné (1) Kontinuální měřítko: zřejmě přijatelné, jen přijatelné, jen nepřijatelné, zřejmě nepřijatelné
	ASHRAE 55	“Jak spokojen jste s teplotou ve vašem osobním prostoru?”	7bodová stupnice: velmi spokojen (3), velmi nespokojen (-3), neutrální (0)
Osobní tolerance	ISO 10551	“Je prostředí...?”	5bodová: perfektně snesitelné (0), mírně obtížně snesitelné (1), obtížně snesitelné (2), velmi obtížně snesitelné (3), nesnesitelné (4)

2.4. Vyhodnocování

2.4.1. PMV/PPD

Norma EN ISO 7730 popisuje metodu vyhodnocení tepelného komfortu dle Fangerovy komfortní rovnice z roku 1970. Subjekt by tehdy oblečen „standartně“ se „standartní“ hladinou aktivity,

a vystaven různým tepelným podmínkám, které hodnotil na sedmistupňové škále, od -3 pro velmi chladné po 3 pro velmi teplé. Dále subjekty byly požádány o změnu oblečení v různých podmínkách pro dosažení tepelného komfortu. Spolu s výzkumem lidské termoregulace vznikl PMV index (zkratka pro Predicted Mean Vote). Kvantifikuje průměrnou hodnotu názoru skupiny lidí na stav komfortu. Druhý z indexů, PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) je propojen s PMV indexem a označuje procento obyvatel nespokojených s tepelnou pohodou. Hodnota 10 % PPD indexu je úměrná PMV od -0,5 do +0,5 na Fangerovy škále. Pro 0 PMV je stále dle PPD zhruba 5 % lidí nespokojeno [57]. V normě se s rychlostí vzduchu a efektem pohybu těla počítá jen s mezní vrstvě změnou koeficientu konvekce. Tím že rychlost proudění vzduchu není brána v potaz pro odpor oblečení, hodnota I_{cl} se stává více nepřesnou s vyšší rychlostí proudění vzduchu a index PMV přeceňuje kvalitu komfortu [58].

Výpočet PMV indexu se provádí následující rovnicí [57]:

$$PMV = (0,303 \cdot e^{0,303} + 0,028) \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot [5,73 - 0,007 \cdot (M - W) - p_a], -0,42[(M - W) - 58,15], -0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (t_{mr} + 273)^4], -f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_a)\} \quad (2.20)$$

kde:

M – metabolické teplo [W]

W – aktivita [W]

t_{cl} – teplota povrchu oblečení [°C], definována:

$$t_{cl} = 35,7 - 0,0275 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \{(M - W) - 3,05 \cdot [5,73 - 0,007 \cdot (M - W) - p_a], -0,42 \cdot [(M - W) - 58,15], -0,0173 \cdot M \cdot (5,87 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a)\} \quad (2.21)$$

p_a – parciální tlak vodní páry [kPa]

t_a – teplota vzduchu [°C]

f_{cl} – faktor oblečení [-]

I_{cl} – odpor oblečení [clo]

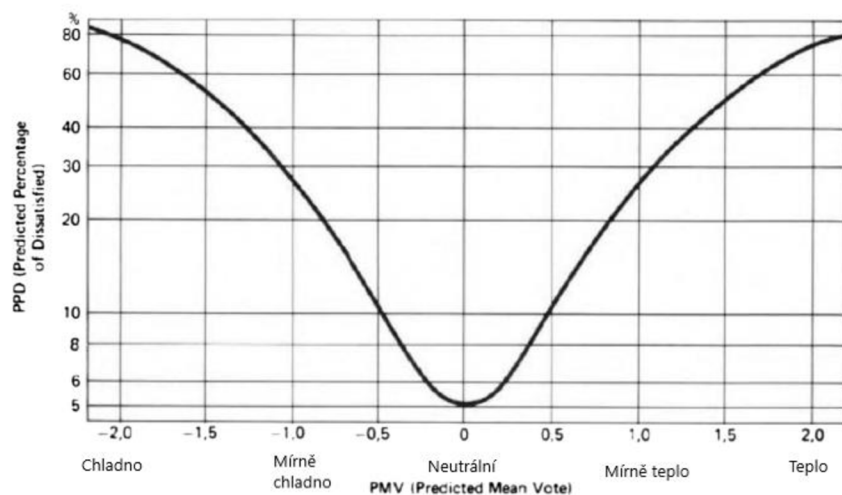
t_{mr} – střední radiační teplota [°C]

h_c – koeficient přenosu tepla konvekcí [W/m²K]

PPD index je definován následovně:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp[-(0,03353 \cdot (PMV)^4 + 0,2179 \cdot (PMV)^2)] \quad (2.22)$$

Vztah mezi PMV a PPD je zobrazen na obrázku.



Obrázek 2.11 - Graf závislosti PPD a PMV [59]

2.4.2. Efektivní teplota

Tato teplota původně byla popsána v roce 1923 v laboratořích v americkém Pittsburghu a je graficky znázorněna jako série komfortních křivek na psychrometrickém diagramu. Jedná se o teplotu (ET) homogenního klidného vzduchu, který bez radiálních příspěvků má stejný efekt jako dané prostředí. Kombinuje tedy teplotu suchého teploměru a relativní vlhkost. V padesátých letech minulého století bylo zjištěno, že tato teplota přeceňuje efekt vlhkosti pro nízké a komfortní teploty [25]. Toto bylo způsobeno průběhem testování, kdy subjekty se přemísťovali mezi dvěma klimatickými komorami a porovnávali různé kombinace prostředí. Tím, že dávali okamžité vjemy, popisovali přechodné pocity způsobené vypařováním potu [21].

V roce 1932 byl pokus o upravení této teploty a vznikl CET (Corrected effective temperature), který v sobě zahrnoval i efekt radiace substitucí suchého za kulový teploměr. V roce 1955 však vyšlo najevo, že tato teplota podceňuje efekt vlhkosti ve vysokých teplotách, a naopak přeceňuje rychlost proudění [25].

Následovala teplota ET* (New effective temperature), která je definována jako teplota homogenního prostředí s relativní vlhkostí 50 % RH, s danou mírou aktivity a oblečení, rychlostí proudění vzduchu a dobou expozice [25]. Dva lidé s touto stejnou teplotou by měli totožné zvlhčení kůže, průměrnou teplotu kůže a stejnou tepelnou ztrátu na povrchu těla [21]. Problém s touto teplotou je, že pro definování je potřeba znát parciální tlak vodní páry pro danou teplotu ET* [25].

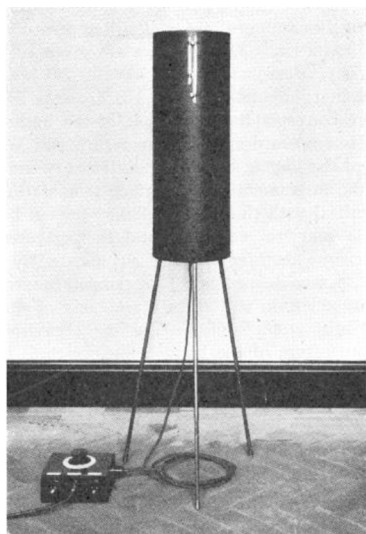
Teplota SET (Standard effective temperature) byla vytvořena biofyzikem A.P. Gagge jako standardizovaná verze ET*, zapracováním korektních vlastností oblečení pro dané úrovně aktivity a normované hodnoty aktivity v jednotkách clo pro oblečení a met pro aktivitu [25]. Výpočet SET probíhá v dnešní době pomocí dvouuzlového modelu tělesné termoregulace, rozdělující tělo na jádro a povrch, vypočtené iteračně využívající validačních případů z ASHRAE 55 [60].

2.4.3. Operativní teplota

Tento index spojuje efekt teploty vzduchu a střední radiální teploty v jednu. Její definice zní následovně. Operativní teplota je definována jako rovnoměrná teplota imaginárního prostoru, ve kterém osoba má stejnou suchou výměnu tepla s okolím jako v reálném prostředí. Pro tepelně mírné prostředí a pro $t_{mr} - t_a < 4^\circ C$, může být operativní teplota vyjádřena jako průměrná hodnota dvou zmíněných teplot [16].

2.4.4. Ekvivalentní teplota / DKZ (digram komfortních zón – Nilsson 2007)

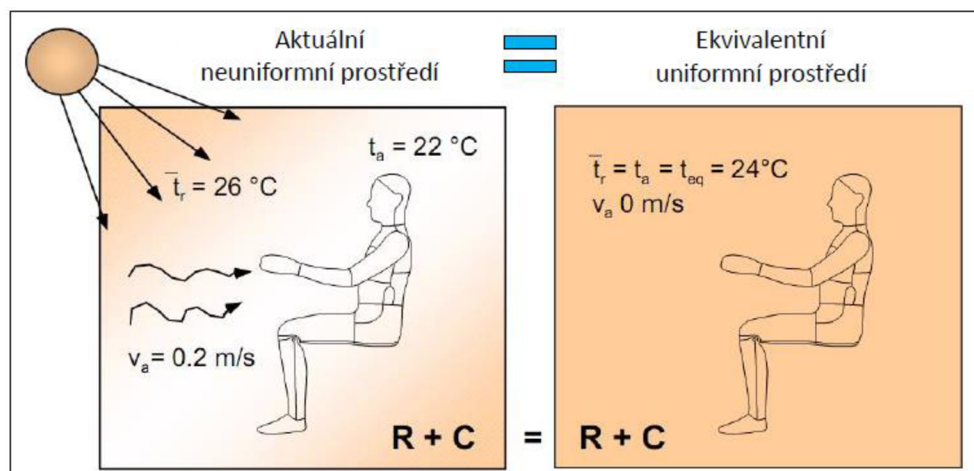
Koncept ekvivalentní teploty byl poprvé představen v roce 1932 A. F. Duftonem při jeho výzkumu vytápění budov. Byla dlouho probírána, avšak její komplexnost byla limitujícím faktorem pro využití. Dufton vytvořil termostat, který uměl udržovat teplotu pokoje na komfortní hodnotě podle teploty vzduchu, střední radiální teplotou a rychlostí vzduchu. Tento přístroj byl pojmenován eupateoskop (viz obrázek 2.12) a byl vytvořen pro simulaci suché ztráty tepla člověka [61]. Jedná se o vytápěný černý válec, který má simulovat lidské tělo [21].



Obrázek 2.12 – Eupateoskop [39]

Definice ekvivalentní teploty se několikrát změnila. Madsen například definoval ekvivalentní teplotu jako rovnoměrnou teplotu imaginárního prostoru s rychlostí vzduchu rovnou nule ve které bude mít osoba stejnou suchou tepelnou ztrátu radiací a konvekcí jako v reálném prostředí. Naproti tomu Mayer, tvůrce tzv. „umělé kůže“, přístroj pro měření ekvivalentní teploty, definoval tuto teplotu jako povrchovou teplotu imaginární místnosti, ve kterém je povrchová teplota těla vyhřívána určitou hustotou tepelného toku jako v reálné místnosti. Tyto dvě definice se liší v objektu, který pociťuje tepelné podmínky. U Madsena je objektem osoba, kdežto u Mayera se jedná o vytápěného manekýna [61].

Oproti operativní teplotě je teplota ekvivalentní bližší k teplotě, které lidské tělo cítí, obzvláště v případě neevaporativních tepelných ztrát. Jednou z výhod ekvivalentní teploty je, že vyjadřuje kombinované efekty tepelných faktorů v jedné hodnotě, která je jednoduše vysvětlitelná [51]. Ekvivalentní teplota se využívá u tepelných manekýnů a pro stejné podmínky by manekýni měli dávat velice podobně výsledky [52]. Dnešní definice ekvivalentní teploty je dle ISO 14505-2 „**Teplota homogenního prostoru při střední radiční teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, v kterém osoba vymění stejnou tepelnou ztrátu konvekcí a radiací, jako ve skutečných podmínkách.**“ Tato definice je platná pouze pro kompletní tělo neboli její nejvěrnější napodobeninu v podobě manekýna. Velkou roli také hraje pozice a natočení aktivní plochy senzorů, případně celého manekýna, protože při špatném natočení se může měnit tepelný přenos konvekcí a radiací [39].



Obrázek 2.13 - Princip ekvivalentní teploty [62]

V roce 1936 Bedford vydal studii o ženských pracovnicích v továrnách a jejich pocitech tepelného komfortu na pracovišti. Součástí této studie byla i rovnice pro ekvivalentní teplotu, kterou aproximoval touto studií [21]:

$$t_{eq} = 0,522 \cdot t_a + 0,478 \cdot t_r - 0,21\sqrt{v} \cdot (37,8 - t_a) \quad (2.23)$$

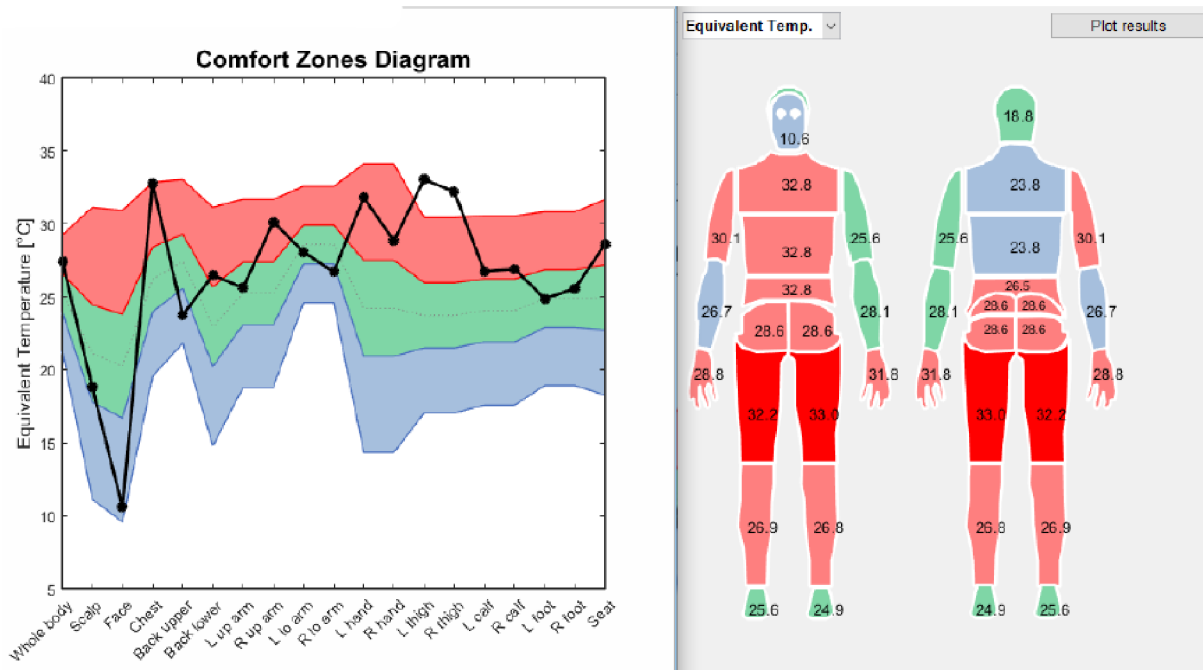
kde:

t_a – teplota vzduchu [°C]

t_r – střední radiční teplota [°C]

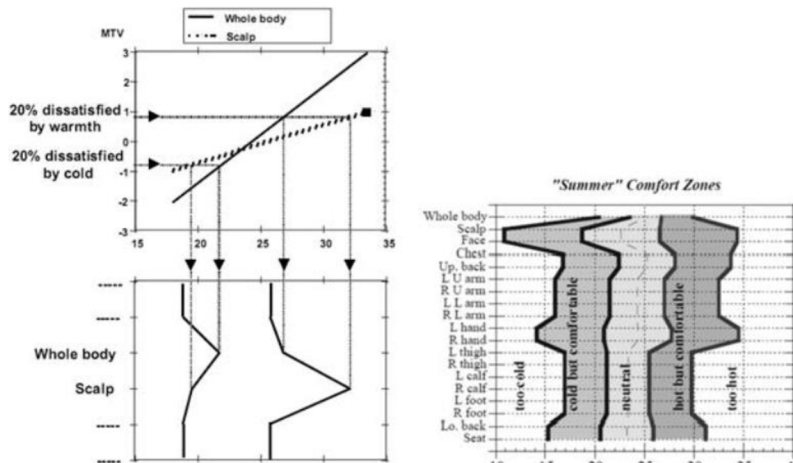
v – rychlost proudění vzduchu [m/s]

Pro vyhodnocení tepelného komfortu nezávisle na oblečení jsou vytvořené diagramy zobrazené na obrázku 2.14. Diagram má pro každou část těla samostatně vypočtené oblasti komfortu, mírného chladu a tepla, kam následně je zakreslena ekvivalentní teplota pro každou měřenou část těla [52].



Obrázek 2.14 - Vyhodnocování manekýnem Newton [62]

Každý diagram je rozdělen na 5 oblastí. Zleva se jedná o nepříjemně chladno (bez barvy), chladno ale příjemně (modrá), příjemně (zelená), teplo ale příjemně (červená), nepříjemně teplo (bez barvy).



Obrázek 2.15 - tvorba diagramu komfortních zón [38]

Princip tvorby těchto diagramů je vyznačen na obrázku 2.15 [38]. Modrá zóna se vyskytuje pro $PMV - 1,5$ až $-0,5$, červená oblast pro $0,5$ až $1,5$ PMV se zelenou oblastí mezi nimi. Z více než 500 experimentů celkových i místních přenosů tepla z tepelných manekýnů bylo porovnáno s experimenty se subjekty, které byly zprůměrovány do průměrné hodnoty MTV , Bedfordovy stupnice tepelného komfortu [52]. Ekvivalentní teplota pro oblasti diagramu se vypočte z následující rovnice:

$$t_{eq,zóna} = t_s - R_T \cdot (a + b \cdot MTV_{zóna}) \quad (2.24)$$

kde:

t_s – povrchová teplota manekýna [°C]

R_T – celkový tepelný odpor [m²K/W]

a, b – konstanty lineární regrese [-]

$MTV_{zóna}$ – MTV zóny [-]

Konstanty lineární regrese jsou uvedeny na obrázku 2.16.

Při měření tepelným manekýnem za použití ekvivalentní teploty je funkce ekvivalentní teploty, převod asymetrického prostředí na asymetrické, pro které se může vyhodnotit tepelný pocit a komfort. Sjednocuje se do této teploty přenos tepla konvekcí, radiací, a přichozím slunečním zářením. Tepelný manekýn počítá ekvivalentní teplotu následujícím vzorcem [38]:

$$T_{eq} = T_s - \frac{q_{real}}{h_{cal}} = T_s - (R_{cl} + R_a) \cdot \dot{q}_t \quad (2.25)$$

kde:

T_s – povrchová teplota manekýna [°C]

q_{real} – měrný tepelný tok mezi povrchem manekýna a skutečným prostředím [W/kg]

h_{cal} – součinitel přenosu tepla [W/m²K]

R_{cl} – tepelný odpor oblečení [m²K/W]

R_a – tepelný odpor konvekcí vzduchu [m²K/W]

\dot{q}_t – měrný tepelný tok citelného tepla [W/kg]

Tuto rovnici je možné použít pro celý povrch manekýna, případně do segmentů podle toho, jak je tepelný manekýn funkčně rozdělen. Dle použité technologie může být s tímto vzorcem určit směrová nebo všesměrová ekvivalentní teplota [39].

V dnešní době je ekvivalentní teplota měřena různými způsoby. Nejvypělejší metodou je již zmíněný vytápěný manekýn. Kromě již zmíněných rovnic, kdy je třeba změřit faktory prostředí nebo tepelné

Table 1
Linear regressions and calculated “neutral” values for clothing combinations (LS) “Light summer clothing” (1.0 clo) and (EW) “Enhanced winter clothing” (1.9 clo)

Zone	a	b	r^2	R_T (m ² K/W)LS	R_T (m ² K/W)EW	I_T (clo) LS	I_T (clo) EW	t_{eq} (°C) neutral LS	t_{eq} (°C) neutral EW
Whole body	43.8	-13.3	0.97	0.160	0.300	1.03	1.94	21.0	21.4
Scalp	65.5	-33.9	0.89	0.199	0.193	1.28	1.25	21.0	21.4
Face	65.5	-33.9	0.89	0.199	0.193	1.28	1.25	25.7	17.2
Chest	36.1	-20.5	0.95	0.229	0.464	1.48	2.99	25.7	17.2
Up. back	36.1	-20.5	0.95	0.229	0.464	1.48	2.99	24.8	15.4
L U arm	43.0	-21.1	0.94	0.215	0.432	1.39	2.79	24.8	15.4
R U arm	43.0	-21.1	0.94	0.215	0.432	1.39	2.79	28.8	15.4
L L arm	43.0	-21.1	0.94	0.122	0.432	0.79	2.79	28.8	15.4
R L arm	43.0	-21.1	0.94	0.122	0.432	0.79	2.79	24.1	21.6
L hand	84.9	-57.2	0.98	0.117	0.146	0.75	0.94	24.1	21.6
R hand	84.9	-57.2	0.98	0.117	0.146	0.75	0.94	28.0	20.4
L thigh	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
R thigh	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
L calf	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	20.4
R calf	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.292	0.83	1.88	28.0	24.0
L foot	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.215	0.83	1.39	28.0	24.0
R foot	46.7	-20.3	0.97	0.128	0.215	0.83	1.39	24.2	19.0
Lo. back	39.5	-19.5	0.93	0.247	0.381	1.59	2.46	24.2	19.0
Seat	39.5	-19.5	0.93	0.247	0.381	1.59	2.46	21.0	21.4

Obrázek 2.16 - Hodnoty lineární regrese pro výpočet ekvivalentní teploty [52]

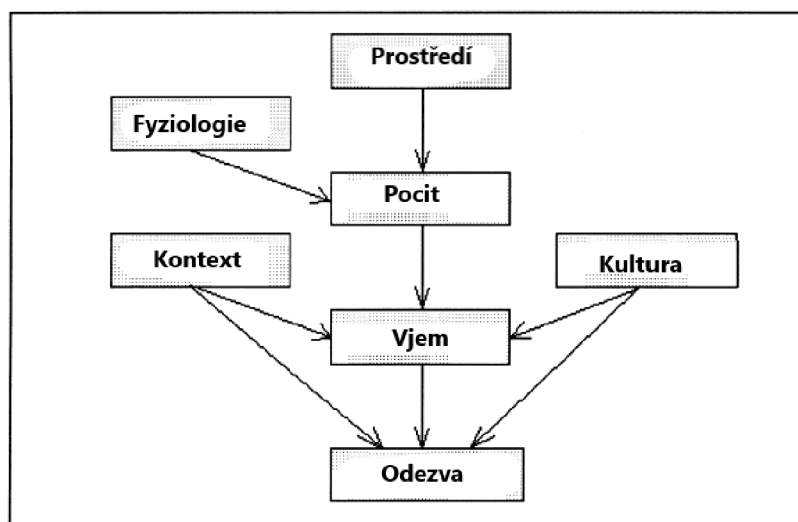
ztráty, je možné také použít senzorů. Elipsoidní senzory mohou sloužit jako miniaturní napodobenina lidského těla a jeho tepelná výměna s okolím se považuje za úměrnou výměně s tělem, a tedy přímo kalkuluje ekvivalentní teplotu. Druhým typem senzoru je plochý, který je vytápěný a dává spolehlivé odhady suchých tepelných ztrát. K napodobení tvaru člověka je potřeba využití většího množství senzorů různě natočených, například na povrchu figuríny. K výsledné hodnotě ekvivalentní teploty přístroj dojde sečtením a vážením jednotlivých hodnot reprezentativním způsobem [51].

2.4.5. Adaptivní tepelný komfort

Adaptivní komfort vznikl v roce 1998 vzhledem k tomu, že pro přirozeně větrané prostory se komfort neshodoval s predikcí standardem ISO 7730. Použití modelu PMV-PPD je problematické pro prostory, ve kterých se mění fyziologické faktory během časového intervalu, jelikož model využívá tyto hodnoty jako jednotlivá čísla [39].

Adaptivní přístup využívá možnost jednotlivců adaptovat se na okolní prostředí skrze podvědomé mechanismy. Přístup se zakládá také na představě, že obyvatelé očekávají vysokou tepelnou konzistenci, a tak jsou více citliví na změny komfortu od optima. Oproti předchozím způsobům, výzkum nelze být prováděn v klimatické komoře, kde jsou podmínky pod absolutní kontrolou. Měření se provádí na daném místě s lidskými subjekty provádějící konkrétní rutinní aktivity. Adaptivní přístup vztahuje komfortní vnitřní teplotu k jedné proměnné, venkovní teplotě vzduchu [63].

Adaptivní hypotéza uvádí, že předchozí tepelné vjemy a další faktory mají vliv na očekávání a prioritu tepelného komfortu. Například lidé v teplých končinách mohou preferovat vyšší teploty než lidé z chladnějších klimatických pásem [63]. Případně v budovách se během dne mění podmínky, ať už kvůli změně míry aktivity, nebo prostředí. Hlavním předpokladem adaptabilního tepelného komfortu je tedy, že člověk využije schopnosti adaptovat se [39]. Adaptace je definována jako postupné zmenšování lidské odezvy na opakující se tepelné vjemy a může být behaviorální (změna oblečení, ovládání oken), fyziologické, nebo psychologické [63]. Člověk není brán jako pasivní příjemce tepelných vjemů ale aktivní součást v dynamice tepelného prostředí. Odstup od neutrálního stavu přináší diskomfort a přiblížení komfortu. Toto vyznačuje že komfortní zóna nelze popsat jen několika činiteli. Je potřeba brát v úvahu i čas jako faktor [64].



Obrázek 2.17 - Interakce prostředí a lidské termoregulace [16]

Jedním z hlavních výtvorů adaptivního komfortu je zavedení vnitřní komfortní teploty jako proměnnou venkovní teploty:

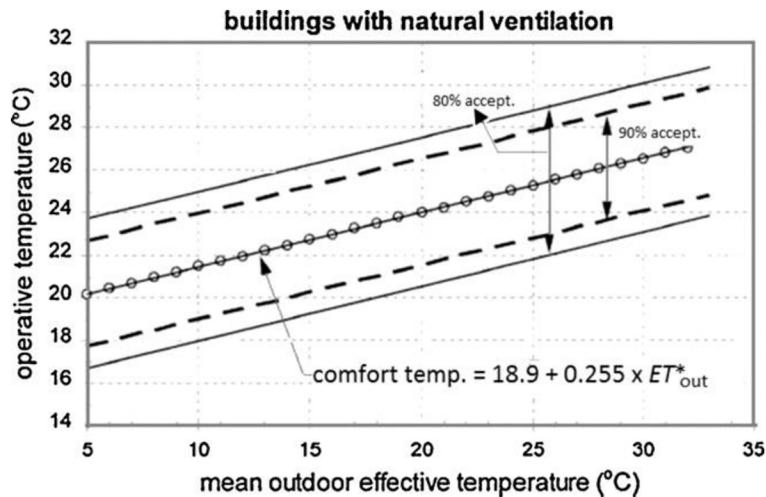
$$T_{comf} = A \cdot T_{a,out} + B \quad (2.26)$$

kde:

$T_{a,out}$ – měsíční průměrná venkovní teploty [°C]

A, B – konstanty [-]

Model adaptivního tepelného komfortu udává rozsah této teploty, kdy 80 % nebo 90 % lidí by bralo dané prostředí za akceptovatelné, viz obrázek 2.18 [39].



Obrázek 2.18 - Vztah operativní teploty a střední venkovní efektivní teploty v modelu adaptivního tepelného komfortu [63]

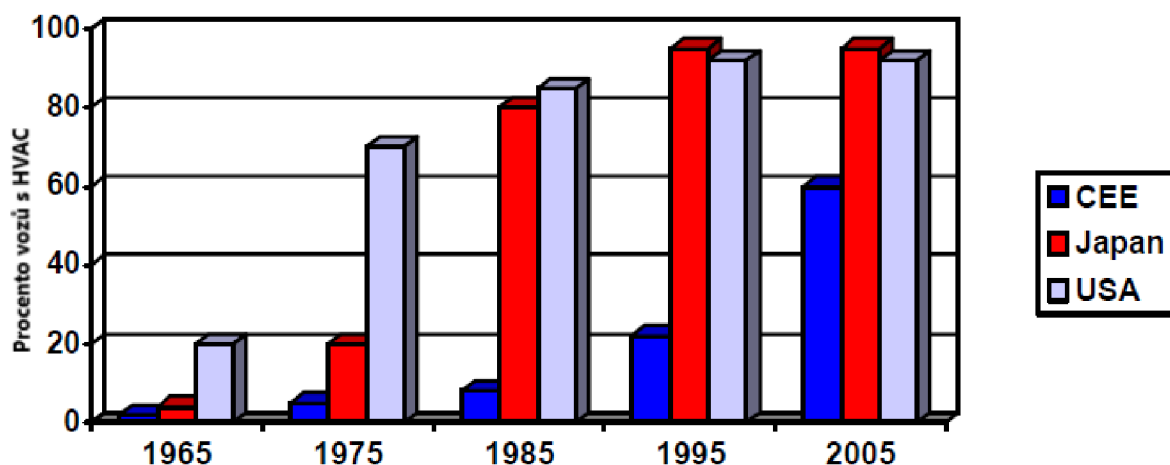
Jednou z hlavních kritik tohoto přístupu je množství omezení, které se musí být brány v potaz, jelikož bez nich by se mohlo říci, že jakákoliv teplota je přijatelná, protože se člověk dokáže přizpůsobit veškerými možnými prostředky. Mezi tato omezení patří klima, blahobyt, kultura, pracovní podmínky, možnost kontroly, osobnostní rysy a zdraví [64].

3. Tepelný komfort pro automobily

První automobily měly otevřenou kabinu, tudíž jediný způsob, jak si pomoci k dobrému tepelnému pocitu uvnitř, byla změna oblečení [65]. Prvním automobilem s uzavřenou kabinou byl v roce 1910 automobil značky Cadillac [66]. Prvním náznakem vytápěcích systémů bylo umístování nahřívání cihel do interiéru automobilu, nebo využívání hořáků k ohřátí vzduchu. Větrání bylo uskutečňováno otevíráním nebo vykláněním oken. Později byly přidány průduchy do dveří k vylepšení cirkulace vzduchu. Kontrola proudění byla víceméně nulová a izolace kabiny od výfukových plynů byla daleko od dokonalosti. Jediný způsob chlazení byl skrze používání kostek ledu uvnitř. Postupně byly konstruovány průduchy do palubní desky k zachování přírodního pohybu vzduchu a elektromotory pro urychlování proudu při nízkých rychlostech jízdy [65].

S postupem času byly zavedeny tepelné výměníky, využívající výfukové plyny, nebo vodu z chladiče jako zdroje tepla. Chlazení bylo dosahováno vypařováním chladicí látky. Nádoba byla připevněna na okno a měla v sobě vstupní otvor pro vzduch, který procházel vodou navlhčenou mřížkou pohlcující část tepla a dýzou do interiéru. V roce 1939, první klimatizační zařízení s uzavřeným cyklem byl představen. Obsahoval kompresor, kondenzátor, přijímací sušičku a výparník. Tento systém bohužel měl kontinuálně pracující kompresor, který musel být odpojen od řemenu k jeho vypnutí. První klimatizační systémy pro tovární výrobu automobilů přišel po druhé světové válce od značky Cadillac [65].

Využívání technologie HVAC je postupně více a více běžnější. Na obrázku 3.1 je vidět procentuální podíl automobilů s HVAC mezi registrovanými. Je vidět, že lidé touží více po komfortu. Správný komfort často zvyšuje pozornost, snižuje stres a mlžení oken [67]. Jedním z kamenů úrazu pro používání klimatizace je vysoká energetická náročnost. Pro USA v roce 2018, pokles energetické náročnosti o 5 % by ušetřil 1,32 miliardy litrů paliva [68]. Celosvětově se na silnicích vyskytuje zhruba 1,4 miliardy aut a jejich počet se donedávna exponenciálně zvyšoval. Nynějším standardem je, že každé vozidlo má zabudovaný HVAC systém [69].



Obrázek 3.1 - Vývoj vozů s HVAC systémy [67]

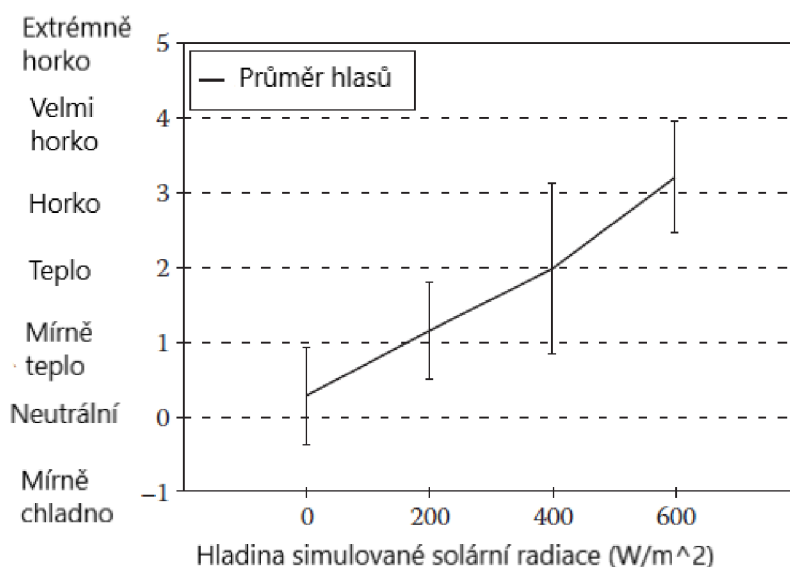
Od poloviny minulé dekády se masivně zvyšuje poptávka po elektromobilech, jelikož jejich cena, životnost a dojezd se zvyšuje s pokroky při výzkumu baterií. Jejich lákadlem je snižování emisí, nezávislost na kapalných palivech, lepší energetická účinnost a vylepšený pocit z jízdy. Každým rokem se zvyšují prodeje hlavně pro osobní automobily, autobusy a dvoukolová vozidla [70]. Vzhledem k prozatím relativně nízkému dojezdu nynějších modelů, je energetická účinnost ještě důležitější, tudíž správně optimalizovaný HVAC je kritický pro kvalitu elektromobilu, jelikož se jedná o nejvíce energeticky náročný pomocný systém [69]. Obvykle HVAC systém využije 20 % celkové energie

elektromobilu, v extrémních případech se může spotřeba zvýšit až na 60 % při extrémních podmínkách, což má obrovský dopad na dojezd [72].

3.1. Speciální požadavky

Účelem HVAC je vytvořit ve vozidle komfortní podmínky a podmínky pro bezpečné vykonávání činnosti. Pro splnění druhého předpokladu se doporučují hodnoty teploty vzduchu mezi 18 °C a 22 °C s vlhkostí 40 % až 60 %, množství čerstvého vzduchu mezi 25 a 50 m³/hod s rychlostí proudění 0,1 m/s pro 18 °C [38]. Systémy klimatizace a topení musí být rychlé, protože některé cesty jsou velice krátké a venkovní podmínky se mohou rapidně měnit, obzvláště co se týče solárních zisků [21]. Vzhledem k vysoké prosklené ploše kabiny (průměrně 24 % celkové plochy) jsou solární zisky velkým faktorem pro hodnocení tepelného komfortu [71]. Obzvláště ve stacionárním stavu se může kabina vozidla, skrze přímou solární radiaci a ohřívání vnitřních povrchů, velice rychle dostat do nekomfortně vysokých teplot [2]. Jako příkladem jsou případy přehřátí interiéru automobilů na parkovištích v krátkých časových intervalech.

V roce 2002 proběhl výzkum v tepelném simulátoru efektu solární radiace na tepelný komfort uvnitř kabiny. Lidé, v lehkém oblečení (0,7 clo s efektem sedadla), byli posazeni do automobilu a vystaveni simulované solární radiaci v půlhodinovém testu. Pro intenzitu radiace v rozsahu 0 W/m² až 600 W/m², každých 200 W/m² znamenalo narůst průměrného PMV indexu o 1 jednotku škály viz obrázek 3.2. Bylo zjištěno, že pocit tepla je závislý na intenzitě slunečního záření, nikoliv na kvalitě spektra [2].



Obrázek 3.2 - Změna komfortu se solární radiací [21]

Jakékoliv změny tepelného prostředí uvnitř kabiny jsou pro pasažéry pocíitelné, jelikož při jízdě autem je velice omezená možnost měnit oblečení a při bezpečné jízdě téměř nemožné změnit míru aktivity. Speciální riziko je pro malé děti a starší lidi se srdečními problémy. Tito lidé při nekomfortních podmínkách jsou náchylnější ke zdravotním potížím způsobených špatnými tepelnými podmínkami, proto je důležité, aby HVAC systémy dokázaly reagovat rychle při venkovních podmínkách, které by mohly způsobit nekomfortní tepelný komfort uvnitř kabiny [29].

Hlavním problémem je dynamika prostředí uvnitř kabiny. Tepelné prostředí se může rapidně změnit během několika minut. I přes to se nedá plně považovat prostředí za přechodné po celou dobu pobytu uvnitř. Přechodné podmínky se uskutečňují pouze během prvních několika minut od zapnutí systému, ať už pro vytápění studeného interiéru, nebo chlazení. Při běhu po nějaké době se průběh blíží více ustálenému stavu, avšak ne dostatečně, aby byla chyba zanedbatelná. Například pro osobu ve velice studeném prostředí, po prudkém zvýšení teploty je dosaženo tepelné neutrality dříve, než vnitřní

teplota dosáhne ideálních hodnot. Stejný princip platí i pro prudké ochlazení z horkého prostředí. Při přerušení změny teploty v bodě, kdy tělo je v tepelné neutralitě, ale teplota vzduchu neleží v komfortní zóně, prostředí se stane nekomfortní po aklimatizaci [71].

Dalším speciálním zaměřením při návrhu HVAC systému pro automobily je velikost prostoru a jeho hranice. Kabina automobilu je relativně malý prostor, ve kterém jsou změny podmínek rychlé vzhledem k malému objemu vzduchu, vysoké ploše prosklení propojené s vysokou mírou prostupu tepla skrze sklo a minimální tepelnou izolací skrze ostatní povrchy. To znamená, že venkovní podmínky jako je počasí vysoce ovlivňuje tepelný komfort. Rychlost jízdy a orientace auta vůči slunci ovlivňuje přenos tepla mezi kabinou a okolím a v neposlední řadě, osoby v autě přispívají k tepelným ziskům/ztrátám v mikroklimatu [38].

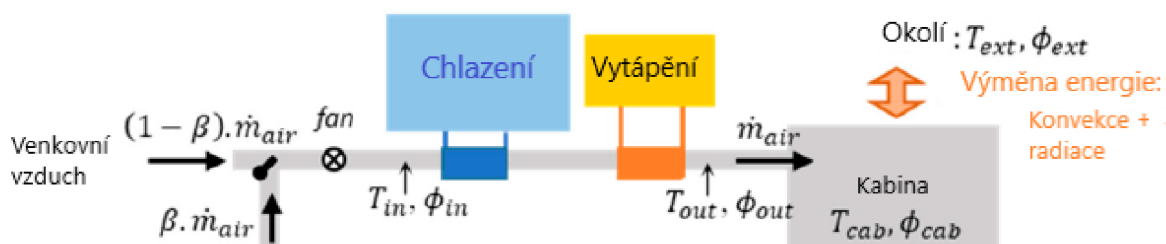
Z důvodu reálné pravděpodobnosti automobilu nacházet se v situaci, kdy bez dostatečného zásahu systému větrání, klimatizace a vytápění by se interiér dostal do nekomfortního až zdraví ohrožujícího stavu, musí být každý nový model vozu vystaven extrémním zimním a letním podmínkám v klimatické komoře, nebo jiném prostředí s dostatečně konstantními a požadovanými podmínkami. Extrémní letní podmínky jsou definovány pro měření teplotou 43 °C a intenzita slunečního záření 1000 W/m². Extrémní zimní podmínky se testují pro teplotu -20 °C [38].

Pro každý model kabiny je individuálně dimenzovaná klimatizační jednotka, která je dostačující i pro extrémní podmínky a zajišťuje komfortní teplotu vzduchu uvnitř, přičemž teploty povrchů interiéru se mohou značně lišit vzhledem k různým intenzitám solárního záření, materiálů a úhlům mezi povrchy a zářením. V zimních podmínkách se přidává i výrazně odlišná teplota skla, vzhledem k téměř zanedbatelnému odporu vůči přenosu tepla [38].

Rychlost korekce podmínek interiéru zaleží na teplotě přiváděného vzduchu, vlhkosti a množství. Standardně, jednotka je schopna produkovat vzduch od cca 5 °C po 70 °C, avšak při návrhu je potřeba modelováním proudění zajistit, aby tyto krajní teploty nefoukaly přímo na části těla, kde by mohly způsobit potíže pro pasažéry. Pokud není používána recirkulace, je možné dosáhnout maximálně zhruba 500 kg/h s jakoukoliv možnou relativní vlhkostí. Většina automobilů má vyústky nastavené pro uzpůsobení proudění do různých částí kabiny pomocí lamel a klapek. Tato regulace znamená, že pole proudění bude výrazně odlišné pro každý mód nastavení vyústek a pro teplotu. Proudění se nikdy nestane zcela homogenní, vzhledem k proudění vzduchu při vysokém gradientu teplot a vysoké míře přenosu tepla skrze stěny a prosklené plochy [38]. Nehomogenní prostředí může působit lokální diskomfort. Nejvýraznější příčinou lokálního diskomfortu je asymetrická tepelná radiace a vertikální rozdíl teploty. První zmíněná příčina se ukazuje, pokud svítí slunce na libovolnou část těla. I při akceptovatelné teplotě vzduchu může být osluněná část těla mimo komfort. Naopak pokud osluněné tělo je v tepelné pohodě, pak části ve stínu mohou pociťovat chlad [71].

3.2. Systémy úpravy vzduchu

Úprava vzduchu v kabině automobilu není jen o změně teploty. Je zapotřebí zajistit bezpečnost pasažérů zajištěním nejlepších podmínek pro zamezení únavy řidiče, dobrou viditelnost a v neposlední řadě i zmíněný tepelný komfort. I při existující infiltraci netěsnostmi je stále potřeba kontinuální proud



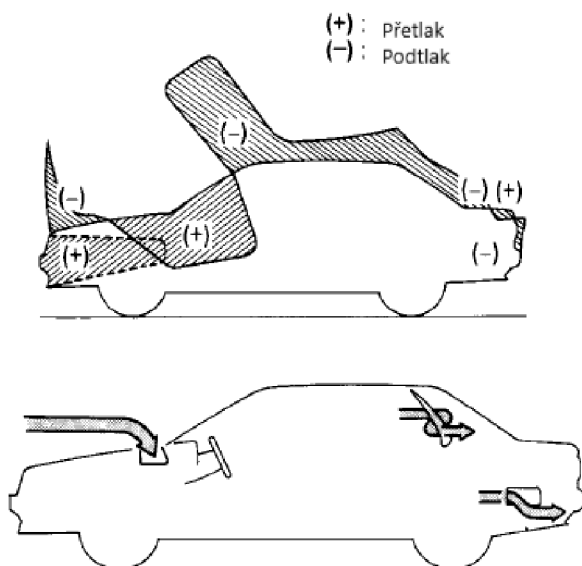
Obrázek 3.3 - Schéma HVAC v automobilu [72]

vzduchu do interiéru k udržení hladiny oxidu uhličitého na úrovni, při které nehrozí omezení pozornosti řidiče (hodnoty uvedené v kapitole 3.1) [65].

3.2.1 Větrání

Pro větrání interiéru se využívá ventilátoru dvou typů, ventilátor s přirozeným prouděním a ventilátor s nuceným prouděním. První zmíněný využívá pohybu vozidla a vytvoření přetlaku a podtlaku na povrchu automobilu dle geometrie karosérie. V pozicích s přetlakem je ideální místo pro větrací vstupní otvory. Naopak v zadní části vozu s pod tlakem jsou umístěny výstupní otvory (viz obrázek 3.4). V návrhu vozidel se vstupní průduchy vyskytují pod čelním sklem na kapotě, kde je vysoký přetlak. Tato pozice má nevýhodu v tom, že je závislá na rychlosti vozu a je nutnost řádně izolovat oblast od motoru, aby se do proudu nedostaly zápachy a částice. Pod vstupní mřížkou vzduch prochází filtrem. Výstupní vzduchovody jsou často zakončené gumovými zpětnými klapkami a ukryté pod zadním nárazníkem [65].

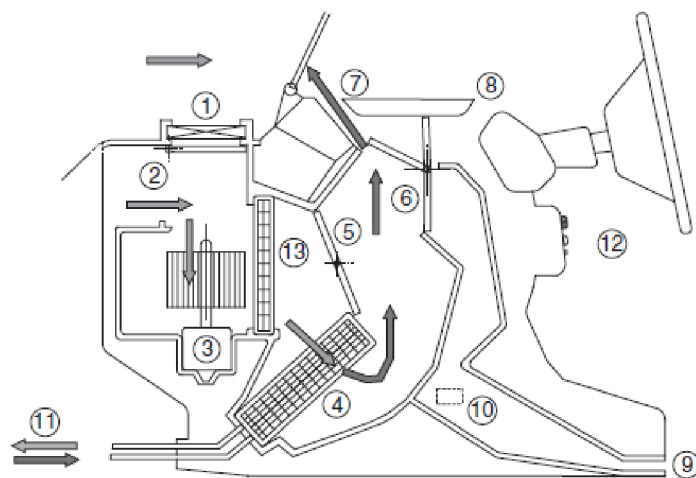
Při nuceném větrání je instalovaný ventilátor uvnitř vozidla a je využíván hlavně při nízkých rychlostech a případně vysokých požadavcích na komfort. Je možnost vhánět přírodní vzduch ventilátorem přes zdroj tepla a ohřívat tak vzduch [56].



Obrázek 3.4 - Tlak na povrchu vozidla [65]

Rozvod vzduchu

Centrum rozvodů vzduchu se většinou nachází pod palubní deskou. Skládá se ze systému trubek, klapek, hnacího motoru, zdroje tepla, a pro vozidla s klimatizací výparníku. Teplota vzduchu je regulována mícháním přírodního a recirkulovaného vzduchu, jinak řečeno, teplého a studeného vzduchu. Recirkulace zajišťuje absenci venkovních zápachů uvnitř kabiny skrze HVAC systém, zvyšuje efekt klimatizace, při delším používání však roste uvnitř vlhkost, která způsobí mlžnění oken, a zvyšuje se množství CO₂. Schéma proudění vzduchu s proudem nastaveným na čelní sklo je popsáno na obrázku 3.5 [65].



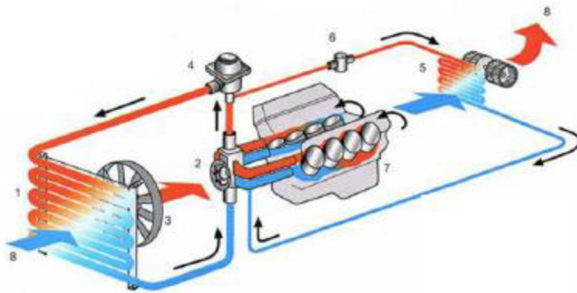
1. Filtrace vzduchu
2. Klapka recirkulace
3. Pohon a odstředivý ventilátor
4. Výměník tepla
5. Klapka směšování teploty
6. Klapka rozvodu vzduchu
7. Vyústka na čelní sklo
8. Vyústka na hlavu
9. Vyústka na nohy
10. Potrubí vyústky spolujezdce
11. Proudění chladiva
12. Kontrolní panel
13. Výparník

Obrázek 3.5 – Schéma rozvodů HVAC systému do kabiny [65]

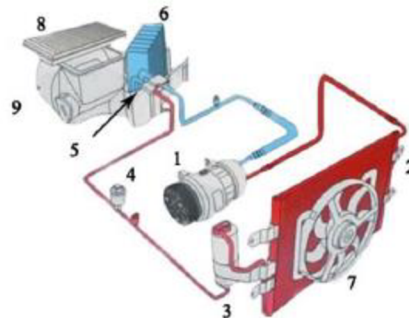
3.2.2 Vytápění a chlazení

Na obrázku 3.6 jsou vyobrazeny okruhy pro vytápění a chlazení kabiny. Ohřev se uskutečňuje ve výměníku chladicí smyčky motoru. Teplo předávané vzduchu je vytvářeno v motoru a přenášeno chladicí smyčkou skrze chladič. V oblasti chladiče se může vyskytovat ventilátor, který dle potřeby zvyšuje svoje otáčky a tím ovlivňuje přenos tepla. Při potřebě topení je část proudu odvedena do výměníku pozice 5, kudy prochází vzduch určený pro interiér. Dle požadované teploty se reguluje průtok do výměníku klapkou před samotným výměníkem, případně ventilem (pozice 6) [62].

- 1 – Chladič, 2 – Vodní pumpa, 3 – Ventilátor, 4 – Termostat,
- 5 – Tepelný výměník topení, 6 – Ventil výměníku topení,
- 7 – Spalovací motor, 8 – Chladicí okolní vzduch



- 1 – Kompresor, 2 – Kondenzátor, 3 – Filtr/odvlhčovač
- 4 – Tlakový spínač, 5 – Expanzní ventil, 6 – Výparník,
- 7 – Ventilátor kondenzátoru, 8 – Filtr vzduchu, 9 – Ventilátor HVAC



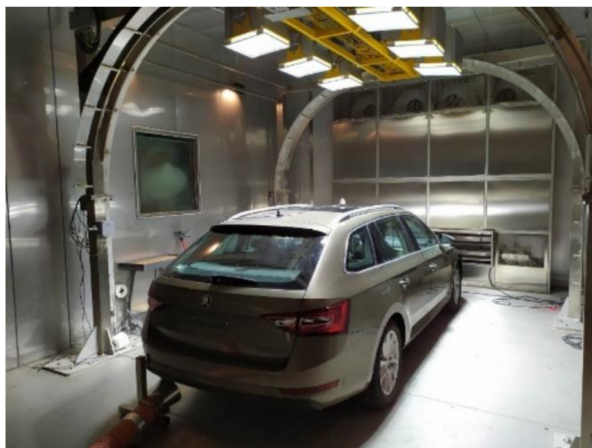
Obrázek 3.6 - Okruh vytápění a chlazení kabiny [62]

4. Měření

4.1. Měřené automobily

4.1.1. Škoda auto benzín

Jedná se o vůz značky Škoda Auto, se spalovacím benzínovým motorem, typu Combi roku výroby 2019. Chladicí systém využívá chladivo HFO 1234yF, také značeno jako R-1234yf, které je náhradou za R-134a a má 335 krát nižší GWP (Global Warming potential). Chladivo je mírně hořlavé, dle studií však je chladivo stejně bezpečné jako dříve používané R-134a [81]. GWP hodnota tohoto chladiva je 4.



Obrázek 4.1 - ŠKODA AUTO BENZÍN

4.1.2. Škoda auto hybrid

Druhým vozem je vůz značky Škoda Auto roku výroby 2020. Jedná se o plug-in hybrid combi s benzínovým palivem jako doplněk elektromotoru. Systém klimatizace používá chladivo HFO 1234yF a hodnotou GWP 4.



Obrázek 4.2 - ŠKODA AUTO Hybridní

4.1.3. Hyundai



Obrázek 4.3 - Vůz Hyundai

Třetím vozem je městský SUV vůz značky Hyundai. Jedná se o elektromobil roku výroby 2020. Vůz disponuje tepelným čerpadlem. Chladicí systém využívá chladivo HFO 1234yF s GWP hodnotou 4.

4.2. Manekýn Newton

Americký manekýn se schopností pocení pojmenován Newton byl vynalezen v roce 2005 firmou Thermetrics ve spolupráci s britskou univerzitou v Loughborough [75]. Systém je shodný s normami ISO a ASTM [76]. Manekýn je 175 cm vysoký a váží 30 kg. Má napodobovat rozměry evropského a asijského průměrného muže v módech suchého pocení, ale i mokrého pocení. Manekýn může být transformován na ženský model připojením přídavných zón v oblasti hrudníku. Vnější plochy Newtona jsou vyrobeny z tepelně vodivého karbox-epoxidového pláště se zabudovaným vyhříváním odporovým drátkem a drátovými prvky snímače. Stavba manekýna ve výsledku dává 1,8 m² plochy, která je rozdělena u konkrétního manekýna použitého pro měření na 34 částí, avšak existují i modely s 20 a 26 segmenty. Pocení je replikováno 134 děrami rozprostřenými po těle, kdy každý výtok je možný regulovat manuálně. Manekýn má klouby, tudíž je možné nastavení do různých póz, případně měřit při motorizované chůzi do 6 km/h. Rozsah použití pro přesné měření je mezi -20 °C a 50 °C pro jakoukoliv vlhkost vzduchu [75]. V těchto podmínkách měří teplotu s přesností 0,1 °C a relativní vlhkost s přesností 3 % [76]. Manekýn je také vybaven nastavitelným systémem simulujícím dýchání s filtry, které měří složení částic ve vdechovaném vzduchu. Dále také měří dvěma senzory teplotu vzduchu, rychlost vzduchu a relativní vlhkost [77].



Obrázek 4.4 – Manekýn Newton [39]



Obrázek 4.5 – Manekýn Newton posazen v autě [77]

4.3. Manekýn Comfortis

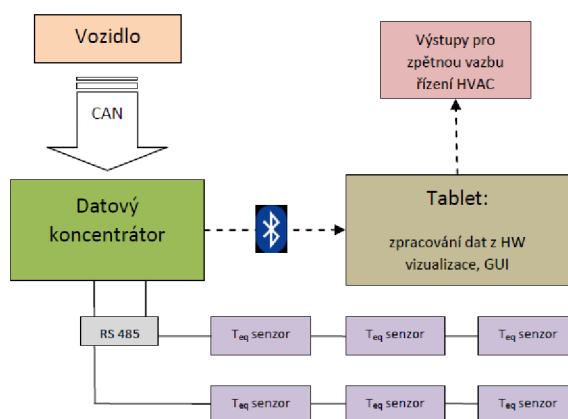
Tento typ vychází ze systému DRESSMAN (Dummy Representing Suit for Simulation of huMAN heat loss). Konkrétně se jedná o verzi DRESSMAN 3.2. Tento typ tepelného manekýna byl vytvořen v 90. letech minulého století v Holzkirchenu nedaleko Mnichova. Comfortis využívá vyhřívané plošné senzory, které se regulují na konstantní tepelný tok nebo RST teplotu [39]. Kromě vytápěných senzorů má systém senzory pro měření koeficientu konvektivního přenosu tepla a senzory pro měření teploty vzduchu a dva termočláanky pro krátko a dlouhodobné záření pro výpočet střední radiační teploty [78]. Tyto senzory jsou umístěny na pasivní figuríně pro správné natočení senzorů vzhledem k prostředí a přibližnému tvaru lidského těla. Veškeré senzory jsou drátově nebo bezdrátově (CAN linka) propojeny s centrální měřicí jednotkou a následně do přístroje pro vizualizaci dat [39].



Obrázek 4.6 - Manekýn Comfortis [79]

4.4. iHVAC

Jedná se o systém vyvinutý na Fakultě elektrotechniky Vysokého Učení Technického v Brně. Plošné a vyhřívané senzory počítají ekvivalentní teplotu skrze tepelné toky potřebné pro udržení teploty senzoru. Každý senzor má v sobě řídicí systémy a procesor [39]. Informace ze šesti senzorů jsou shromažďovány v datovém koncentrátoru. Odsud jsou informace bezdrátově přenášeny do tabletu, kde jsou data zpracována a vizualizována. Schéma hardwaru systému je na obrázku 4.7 [73].



Obrázek 4.7 - Schéma přenosu informací systému iHVAC [73]

Senzory ekvivalentní teploty mají možnost tří možností provedení. Prvním provedením je uzavření senzoru do nalakované krabičky pro místa kabiny, které mají světle šedou barvu, jako jsou potahy stropu a sloupků kabiny. Dalším typem je další Box typ, tentokrát nalakovaný černou barvou, které mají

použití pro sedačky, palubní desku a dalších povrchů, kde se projevuje radiace. Třetím provedením je senzor nezakrytý, který se svou menší velikostí vejde do menších prostorů a na kontaktní plochy sedadla řidiče [73].

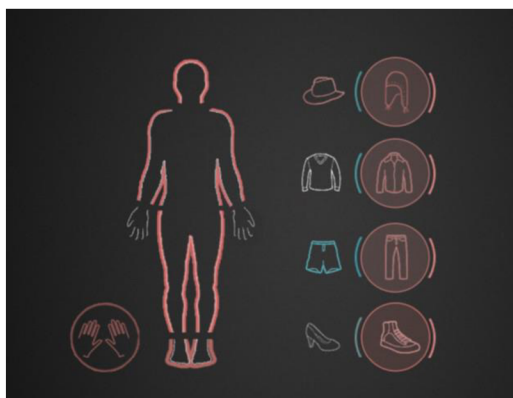
Datovým koncentrátorem je ARM Cortex-M STM32F0 mikrokontroler, který umožňuje propojení mezi jednotlivými sběrnicemi s rozhraním CAN nebo Bluetooth. Samotné senzory využívají sběrnici RS485, kompatibilní s USART periferií mikrokontroleru. Kompletní koncentrátor je uzavřen do plastové krabičky s konektorem OBD viz obrázek 4.8 [73].



Obrázek 4.8 – Datový koncentrátor [73]

Software využitý pro vizualizaci dat je RAVEC (Real time application to visualize equivalent temperature and comfort). Jak již jméno napovídá, RAVEC je real-time aplikací pro vizualizaci ekvivalentní teploty a komfortu a slouží k vyhodnocování tepelného komfortu. Aplikace je postavena pro operační systém android, tudíž kompatibilní s tablety a telefony. Tato aplikace umožňuje nastavení klimatizačního systému automobilu přímo pro tepelný pocit pro celé tělo, ale i pro jednotlivé části. Aplikace také informuje a aktuálním stavu tepelného komfortu [74].

V aplikaci se pomocí virtuálního šatníku zvolí tepelný odpor oděvu, viz obrázek 4.9, jehož hodnoty pocházejí z kalibračních měření s tepelným manekýnem Newton. Diagram komfortních zón je vygenerován a tepelný komfort řešen dle tohoto diagramu. Následné ovládání systému je možné různými možnostmi, dle množství informací uživatel chce a zvládne ovládat za jízdy [74].



Obrázek 4.9 - Interface systému iHVAC [74]

4.5. Klimatická komora

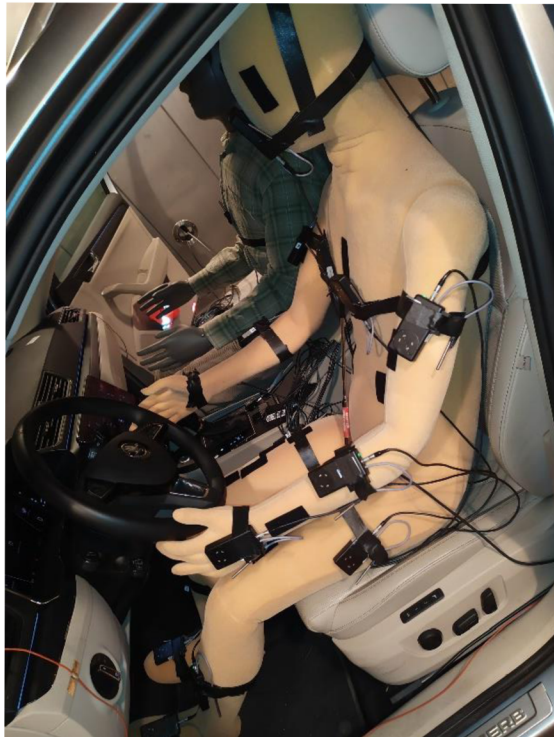
Pro měření byla využita klimatická komora na Fakultě strojního inženýrství v Brně. Jedná se o jediné zařízení svého druhu v České republice určené pro výzkum [80]. Slouží k vytváření přesných umělých podmínek dle potřeby. Ovládána může být teplota, relativní vlhkost a sluneční záření. Komora neumí regulovat teploty zdi a řídit rychlost proudění vzduchu [39]. Komora má rozměry 5 metrů na 8 metrů, vysoká 3,8 metru. Může sloužit jak k testování podmínek vnitřních prostorů, tak i pro testování solárních panelů [80]. Signifikance klimatické komory je v možnosti přesného opakování experimentů. Komora je schopná regulovat teplotu v rozmezí $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $85\text{ }^{\circ}\text{C}$ bez solární simulace, se simulací $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ až $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, přičemž teplota se nejrychleji mění rychlostí $1\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ [39]. Uměle vytvořené solární záření může dosáhnout výkonu až 10 kW [80]. Vlhkost bez simulace může dosahovat 30% až 95% RH, se simulací 30% až 60% RH s přesností $\pm 5\%$. Rosný bod se pohybuje mezi $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $49\text{ }^{\circ}\text{C}$ a vzduch proudí do prostoru při větrání průtokem $3000\text{ m}^3/\text{hod}$ a při provozu $300\text{ m}^3/\text{hod}$ [39].



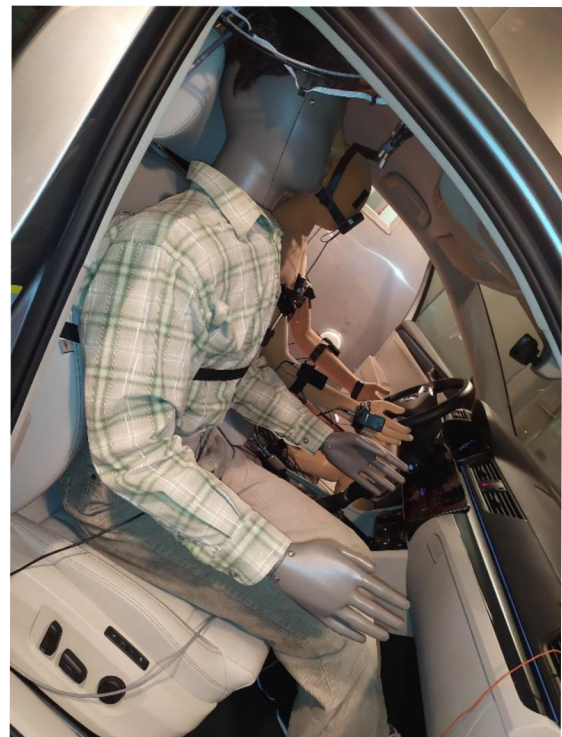
Obrázek 4.10 - Klimatická komora VUT [39]

4.6. Postup měření

Měřily se dva případy, letní a zimní režim, obojí pro nastavení HVAC systému na „AUTO 22“. Každý test byl proveden pro časový interval 1 hodiny, s výjimkou vozu Hyundai, který u zimního režimu byl prodloužen o 15 minut, při kterých byl změněno nastavení systému HVAC na „AUTO 24“. Pro vůz se spalovacím motorem je ICE provozováno s motorem na volnoběh. Pro hybrid a elektromobil je energie brána z akumulátoru. Nastavení výústek je pro všechna měření střed-střed. Zimní čas měl podmínky teploty $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$, bez záření a příprava auta 8 hodin. Pro letní podmínky byla teplota nastavená na $30\text{ }^{\circ}\text{C}$, vlhkost vzduchu 50% , radiační záření rovné $800\text{ W}/\text{m}^2$ s přípravou auta 5 hodin. Pro měření byly využity systémy měření iHVAC umístěného na sedadle spolujezdce okolo manekýna Newton. Na sedadle řidiče je usazen manekýn Comfortis viz obrázek 4.11 a 4.12. Manekýn Newton má zabudované senzory, manekýn Comfortis má senzory připevněné na povrchu těla v místech typických pro měření viz obrázek 4.11. Systém iHVAC má senzory rozmístěné okolo manekýna Newton. Pro tyto testy byly aktivní 3 senzory, obličejový senzor visící u hlavy Newtona, stehenní senzor vedle nohy manekýna a senzor pro chodidlo u nohy. Proces měření je nadále automatický a výsledkem jsou soubory s daty o naměřených hodnotách. Manekýn Comfortis nebyl použit při testu letních podmínek vozidla Hyundai s nastavením „AUTO 24“. Testování vozů probíhalo od 27. července do 29. července s dodatečným měřením již zmíněného testu letních podmínek automobilu Hyundai 15. října.



Obrázek 4.11 - Umístění měřícího systému Comfortis během testů

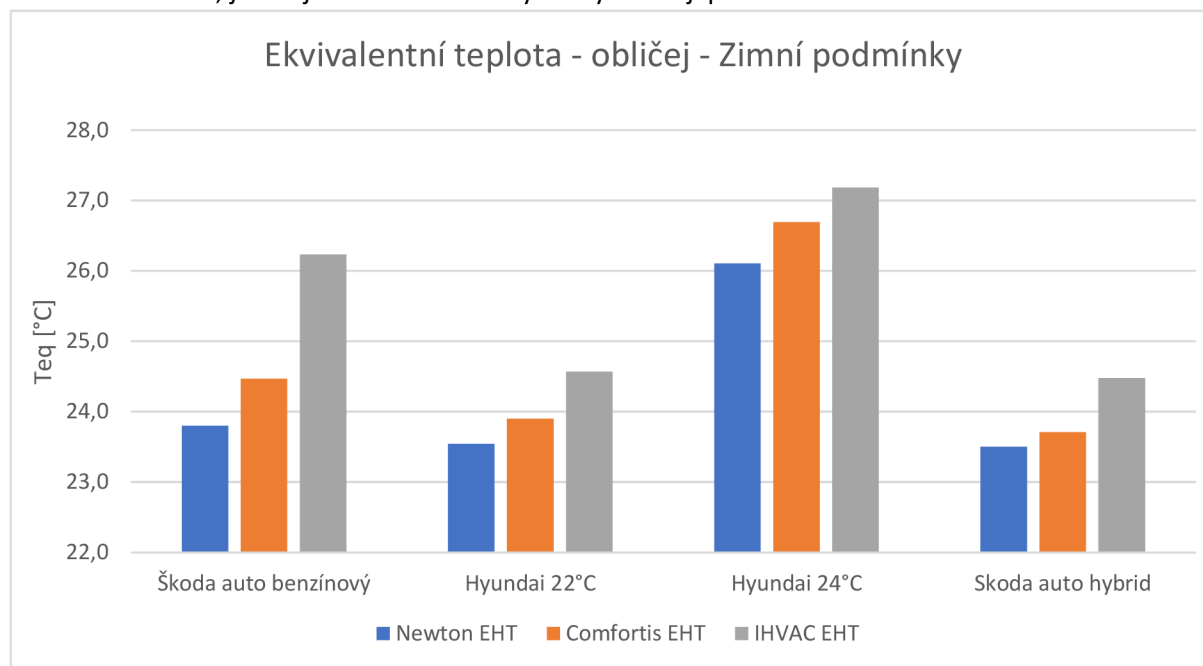


Obrázek 4.12 - Umístění systémů iHVAC a Newton během testů

5. Vyhodnocení

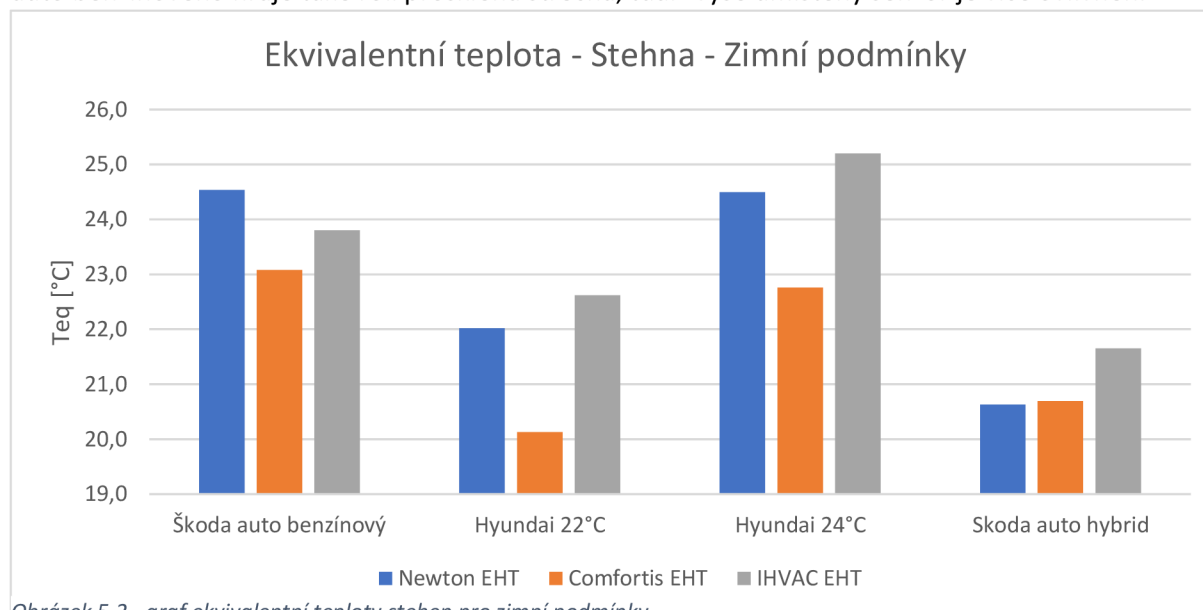
5.1. Zimní podmínky – porovnání systémů

Pro celistvost a porovnatelnost výsledků byly zvoleny 3 oblasti ze kterých se porovnávají data, a to oblast obličeje, stehna a chodidel, jelikož všechny tři využitě přístroje měří tyto oblasti. Ze získaných dat se může určit, jak se jednotlivé měřící systémy shodují při měření.



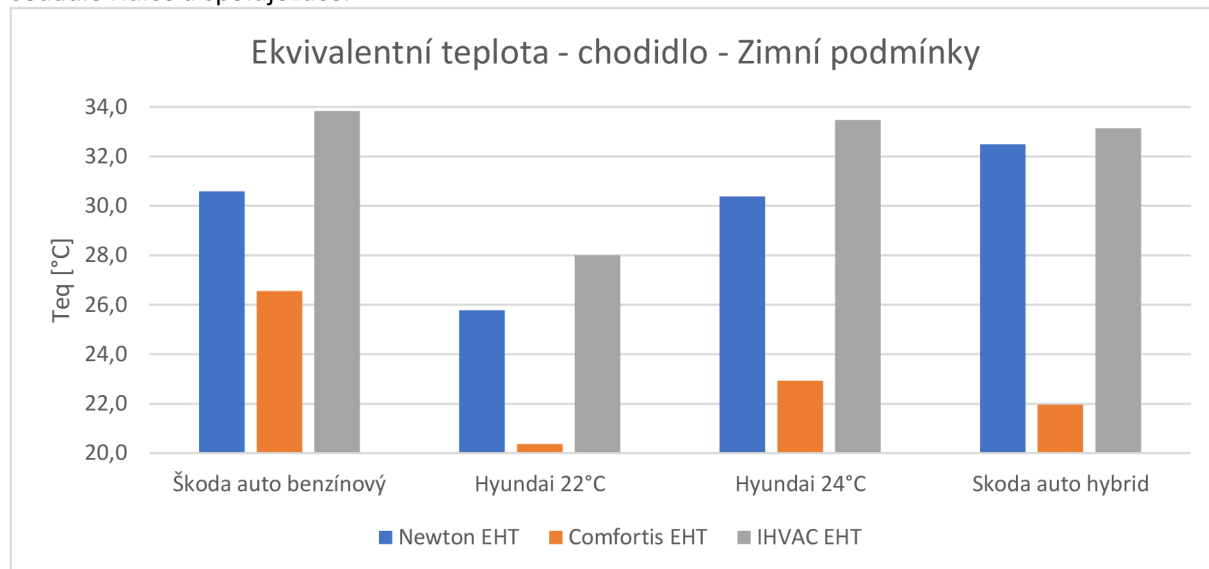
Obrázek 5.1 - Graf ekvivalentní teploty obličeje pro zimní podmínky

Pro měření zimních podmínek v části obličeje je vidět, že systém iHVAC měří v případě vozu Škoda Auto Benzín o více než 2 °C vyšší ekvivalentní teplotu, než manekýn Newton a o více než 1 °C více než Comfortis. iHVAC sonda byla, jak již bylo zmíněno zavěšena nad hlavou manekýna Newton, tudíž měření touto sondou mohlo být ovlivněno stoupajícím teplým vzduchem od povrchu Newtona. Rozdíly mezi manekýnem Comfortis a ostatními je z části způsoben tím, že je umístěn na místě řidiče. U Škody auto benzínového hraje také roli prosklená střecha, tudíž výše umístěný senzor je více ovlivněn.



Obrázek 5.2 - graf ekvivalentní teploty stehen pro zimní podmínky

Pro stehenní část je vidět lepší vyváženost iHVACu a Newtona, vzhledem k jejich vzájemnému umístění, které nedovoluje, aby byl první zmíněný systém ovlivněn do stejné míry jako u obličejové části. Manekýn Comfortis udává nižší hodnoty, které znovu mohou být způsobeny rozdílným prouděním na sedadle řidiče a spolujezdce.

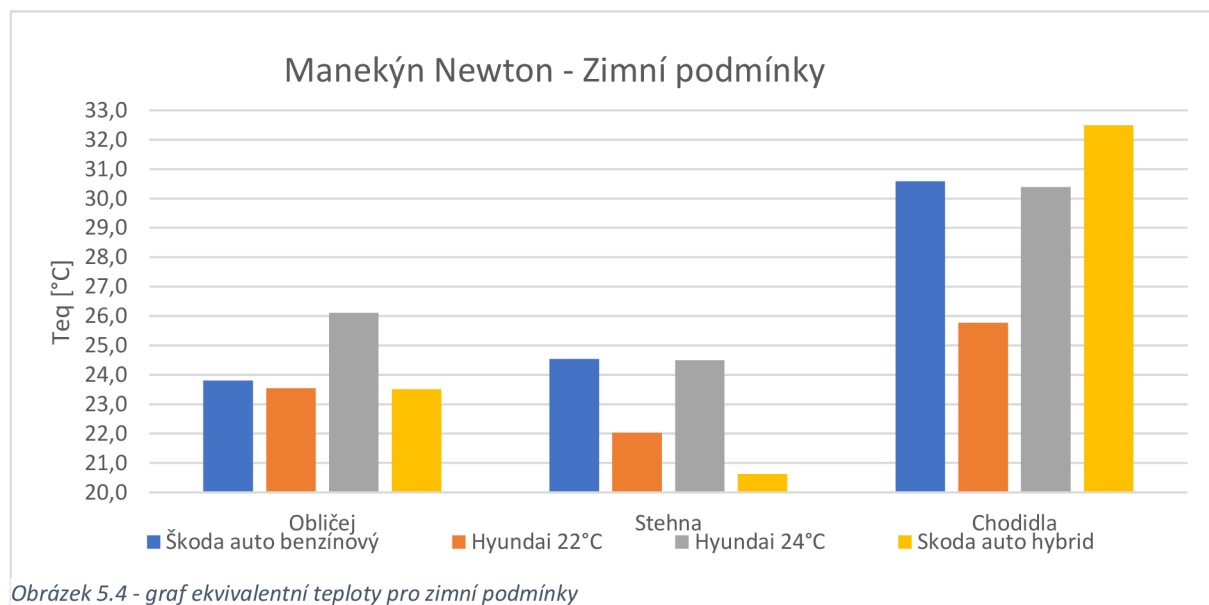


Obrázek 5.3 - graf ekvivalentní teploty chodidel pro zimní podmínky

Pro měření v oblasti chodidel jsou vidět znovu stejné rozdíly mezi sedadlem řidiče a spolujezdce a rozdíl umístění sensorů Newtona a iHVACu, kdy druhý zmíněný je více ovlivněn proudem přiváděného teplého vzduchu. Je vidět, že zatímco v oblasti obličeje je Comfortis v rozmezí mezi teplotami Newtona a iHVACu u všech vozidel, v oblasti stehenní a obzvláště v oblasti chodidel je rozdíl mezi měření na sedadle řidiče a sedadle spolujezdce obrovský, v případě Škoda Auto hybrid přes 10 °C. Vysvětlením může být umístění sensorů Newtona a iHVACu blízko proudu vytápění na nohy.

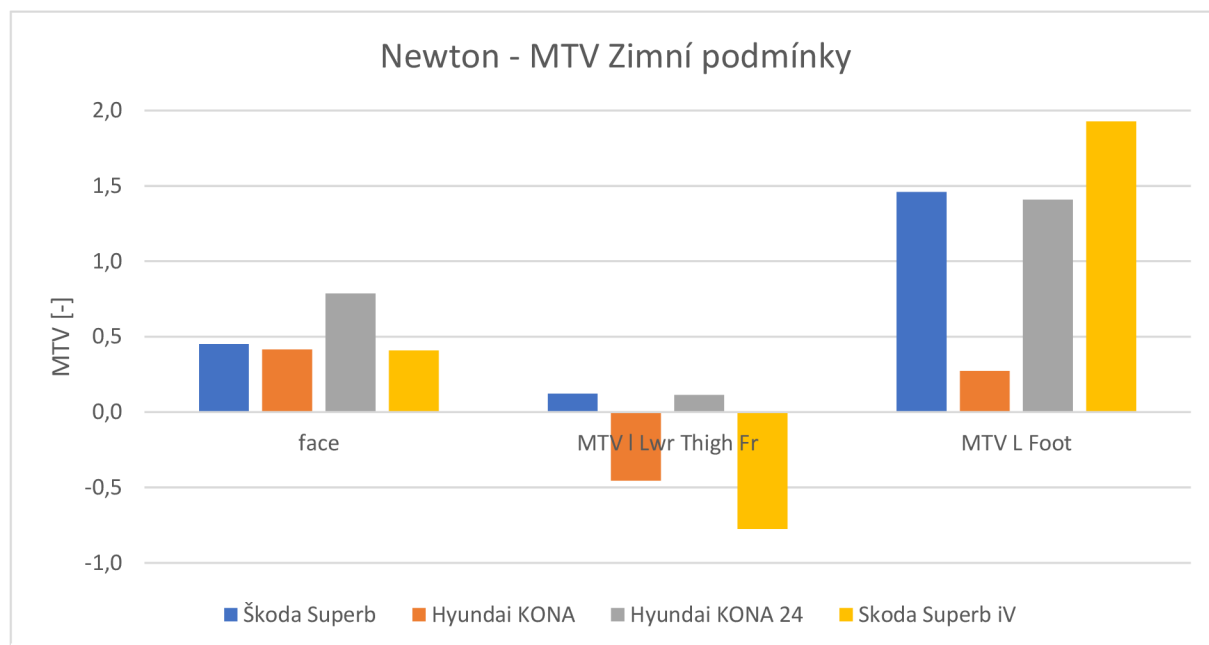
5.2. Zimní podmínky – porovnání automobilů

Pro porovnání jednotlivých vozů jsou použity hodnoty manekýna Newton vzhledem k množství informací, které provádí a jeho použití ve všech testech. Je vidět, že všechny vozy se dostanou nad 20 °C při nastavení „AUTO 22“, ale je vidět, že obzvláště Hyundai je při nastavení „AUTO 22“ dosahuje ve



Obrázek 5.4 - graf ekvivalentní teploty pro zimní podmínky

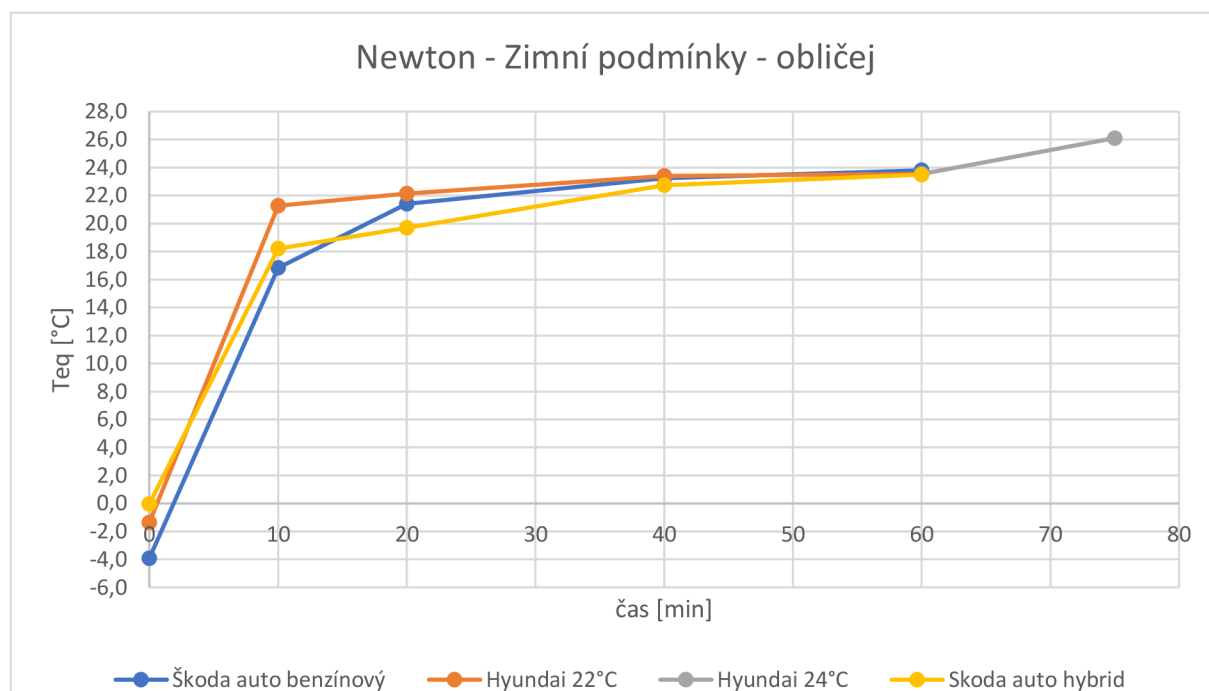
spodní části těla nižších teplot, kde může cestujícím být chladno. Proto bylo upraveno nastavení pro tento vůz na „AUTO 24“. U zimních podmínek následovalo 15minutové měření při tomto nastavení po dokončení hodiny při předchozím a je vidět, že při tomto nastavení se dostává na zhruba stejné hodnoty jako Škoda auto benzín. Škoda auto hybrid téměř nedosahuje dostatečně vysokého komfortu na stehnech, a naopak příliš vysoké teploty na chodidlech, kde se hodnota MTV dostává až téměř na 2, přičemž hranice, kdy se teplo stává nepříjemné je okolo 1,5.



Obrázek 5.5 - graf MTV pro zimní podmínky

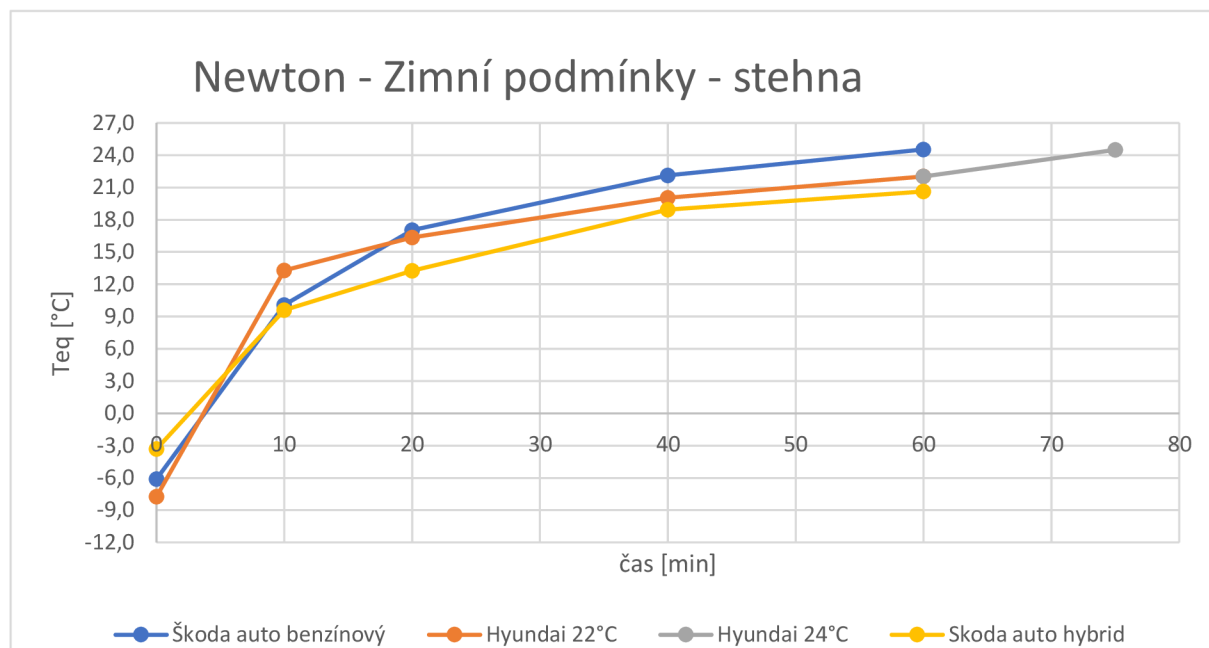
Co se týče průběhu zahřívání prostoru vozu, v oblasti obličeje jsou průběhy téměř totožné, Hyundai byla nejrychlejší, co se týče zahřívání prostoru, kdy během 10 minut se v oblasti obličeje teplota dostává pod 22 °C, Škoda Auto hybrid této teploty dosáhlo po půl hodině.

Hyundai vytápí rychle i pro stehenní část, ale nedohřeje prostor na dostatečnou teplotu, které později dosáhne až při nastavení „AUTO 24“. Škoda auto benzínový plynulou křivkou dosahuje konečné



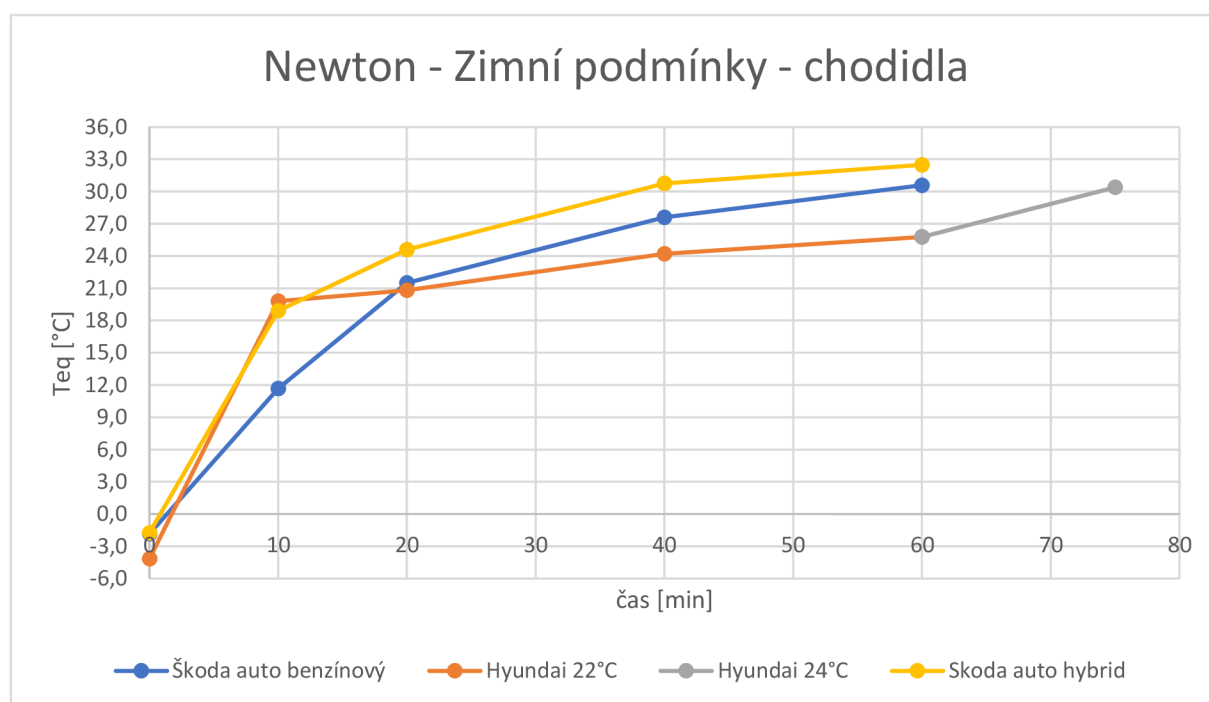
Obrázek 5.6 - graf ekvivalentní teploty obličeje s časem pro zimní podmínky

teploty, zatímco Škoda auto hybrid topí v této části pomaleji a velice nedostatečně, hůř než Hyundai ve všech časových intervalech a dostává se mimo zónu neutrálního tepelného pocitu.



Obrázek 4.7 - graf ekvivalentní teploty stehna s časem pro zimní podmínky

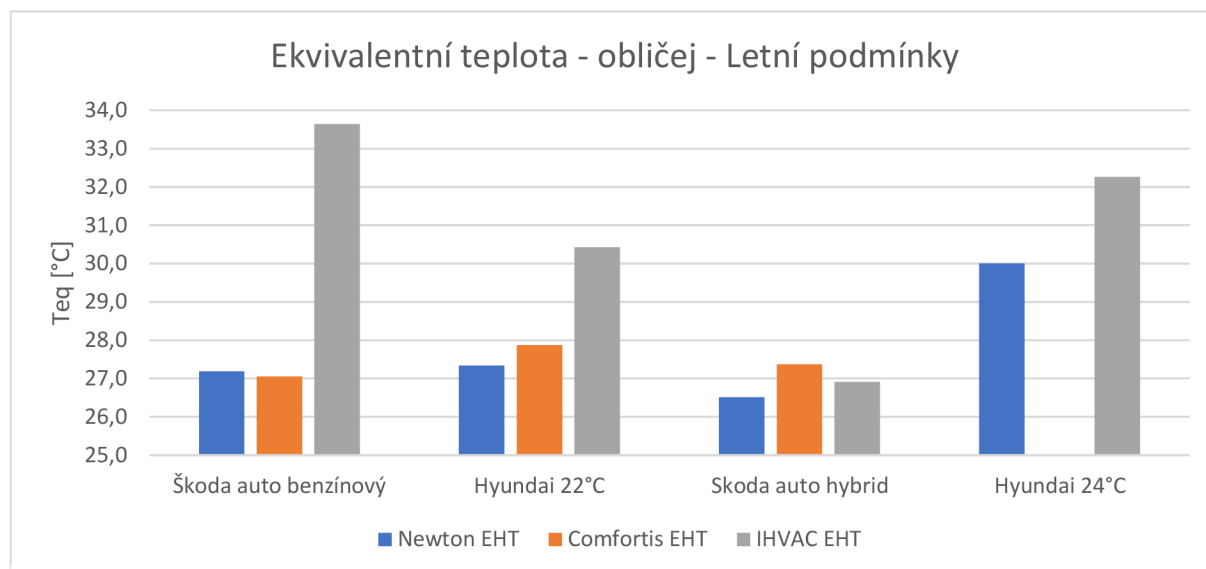
U chodidel je to absolutně opačně. Škoda Auto hybrid, plynule vytápí prostředí na velice vysokou teplotu, z předchozích grafů je vidět, že teplota je příliš vysoká. Škoda auto benzínový se drží plynulé změny teploty k teplotě na horní hranici příjemně teplého pocitu. Hyundai v prvních 10 minutách rychle zvýší teplotu, avšak poté nastavení „AUTO 22“ není dostatečné pro dosažení teplot ostatních vozů, i když MTV se drží v zelené oblasti příjemného pocitu. Při nastavení „AUTO 24“ se teplota zvýší na hodnotu, která byla dosažena vozem Škoda Auto benzín.



Obrázek 5.8 - graf ekvivalentní teploty chodidel s časem pro zimní podmínky

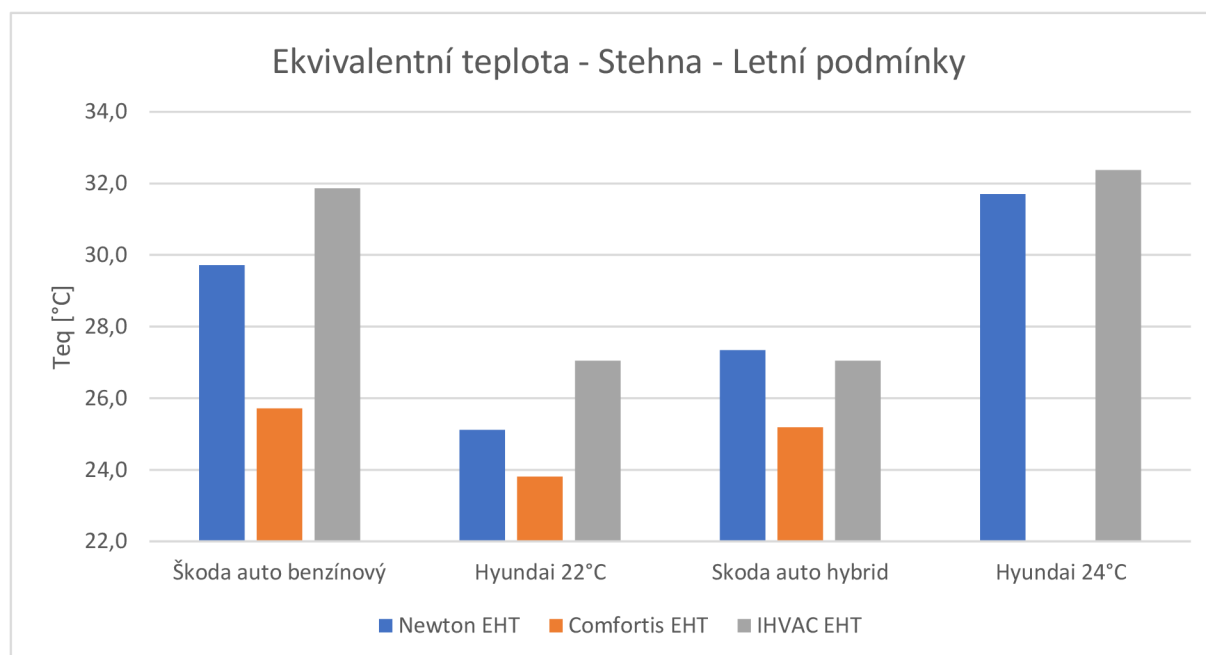
5.3. Letní podmínky – porovnání systémů

Stejně porovnání je i pro letní podmínky s absencí systému Comfortis u vozu Hyundai při nastavení „AUTO 24“.



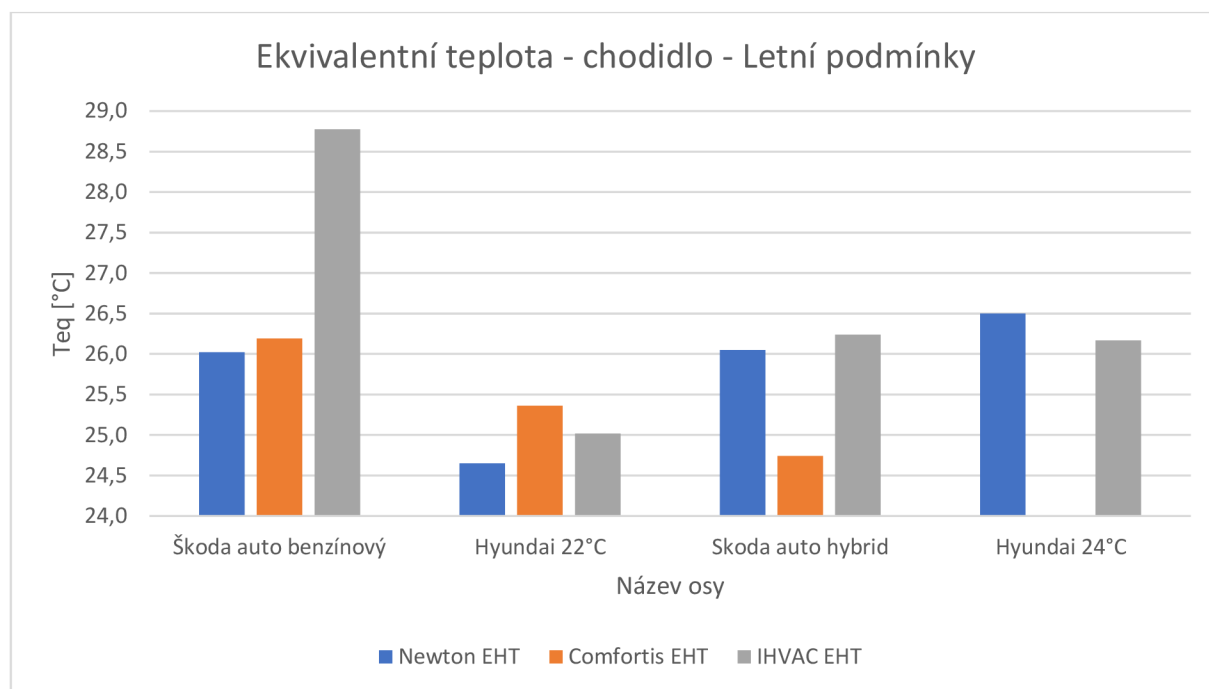
Obrázek 5.9 - graf ekvivalentní teploty pro obličej pro letní podmínky

Podobný trend jako u zimních podmínek je vidět i u letních podmínek, kdy iHVAC udává vyšší hodnoty ekvivalentní teploty než Newton o několik stupňů. U Škoda auto benzínové se vysoce projevuje efekt prosklené střechy, kdy je iHVAC vysoce ovlivněn solární radiací simulující letní slunce v klimatické komoře. Dále je viditelné, že pro tyto podmínky není velký rozdíl mezi místem řidiče a spolujezdce vzhledem k velice podobným teplotám naměřených manekýny Newton a Comfortis.



Obrázek 5.10 - graf ekvivalentní teploty stehna pro letní podmínky

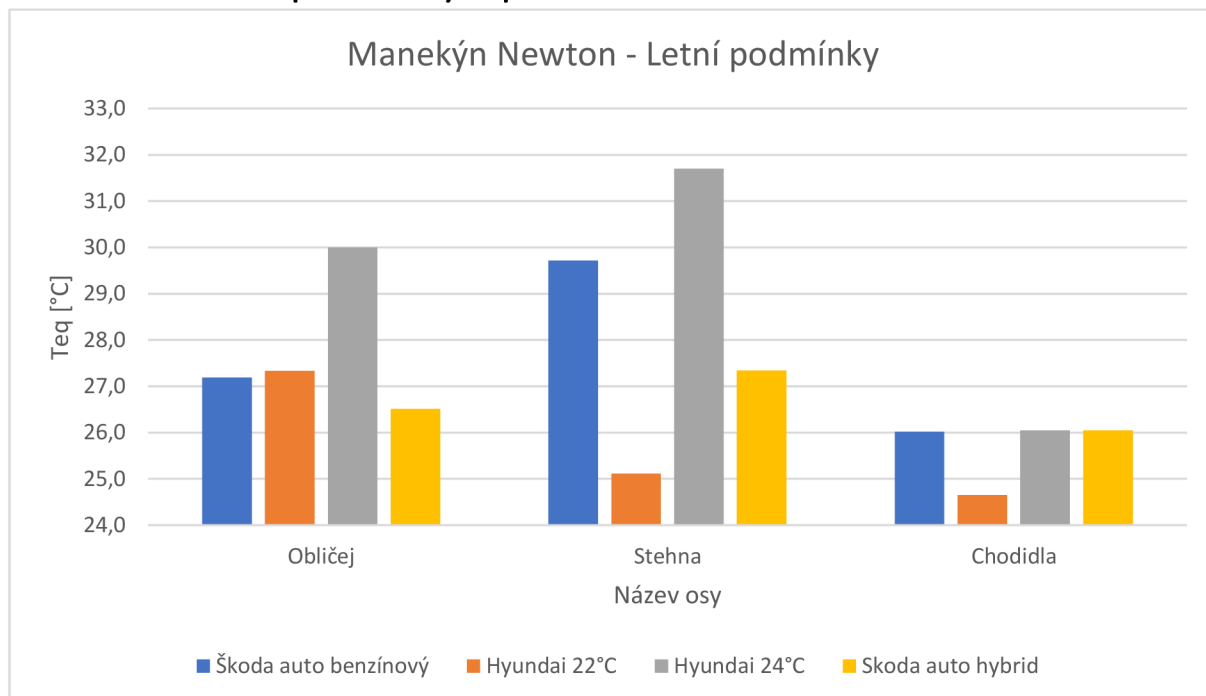
Pro oblast stehen je znovu vidět podobný trend mezi systémy iHVAC a Newton jako při zimních podmínkách, s rozdílem nyní studeného vzduchu ovlivňující výsledky, a rozdíl mezi sedadlem řidiče a spolujezdce, který je umocněn částečným stíněním oblasti stehen volantem a palubní deskou.



Obrázek 5.11 - graf ekvivalentní teploty chodidel pro letní podmínky

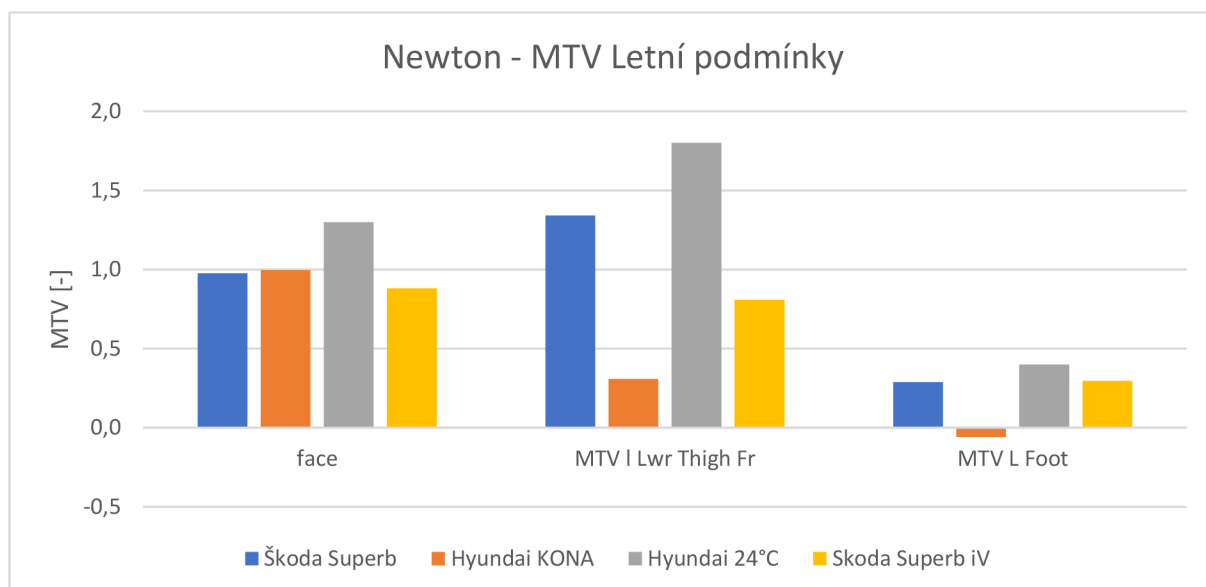
U chodidel lezních podmínek vidíme znovu u vozu Hyundai, že Comfortis na sedadle řidiče je blíže venkovní teplotě při zimních i letních podmínkách, zatímco u Škoda auto hybrid je teplota nižší než pro sedadlo spolujezdce pro oba testovací scénáře. U Škoda auto benzínový vidíme že iHVAC má rapidně vyšší ekvivalentní teplotu oproti Newtonovi. Opět může být způsobeno pozicí vůči proudu přiváděného vzduchu.

5.4. Letní podmínky – porovnání automobilů



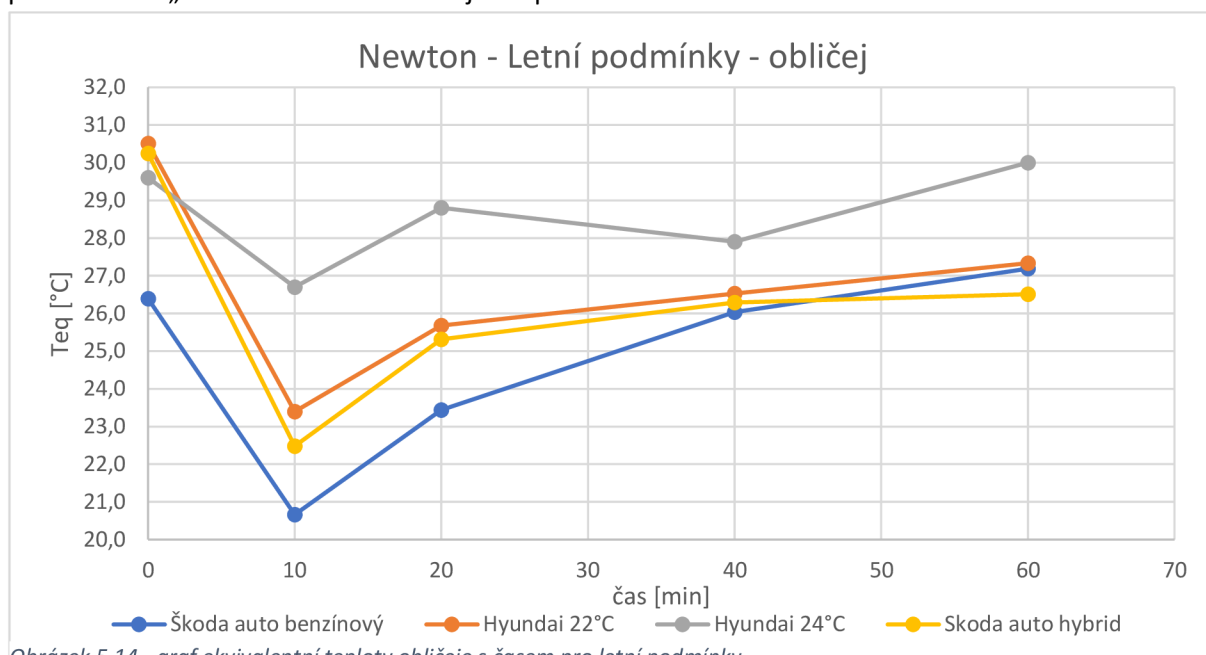
Obrázek 5.12 - graf ekvivalentní teploty pro letní podmínky

Při letních podmínkách byl proveden plný hodinový test i Hyundai při „AUTO 24“. Jak je vidět pro oblast obličeje a stehna nevychladí toto nastavení dostatečně a ekvivalentní teploty se dostávají nad 30°C. Nastavení „AUTO 22“ je v tomto testu blíže vozům Škoda auto a teoretickým hodnotám pro nejlepší tepelný komfort. Z těchto dvou vozů měl lepší výsledky Škoda auto hybrid, avšak oba vozy se udržely v těchto třech oblastech v intervalu příjemně, nebo příjemně teplo. Dle MTV Hyundai s „AUTO 24“ překročil hranici komfortu v oblasti stehna.



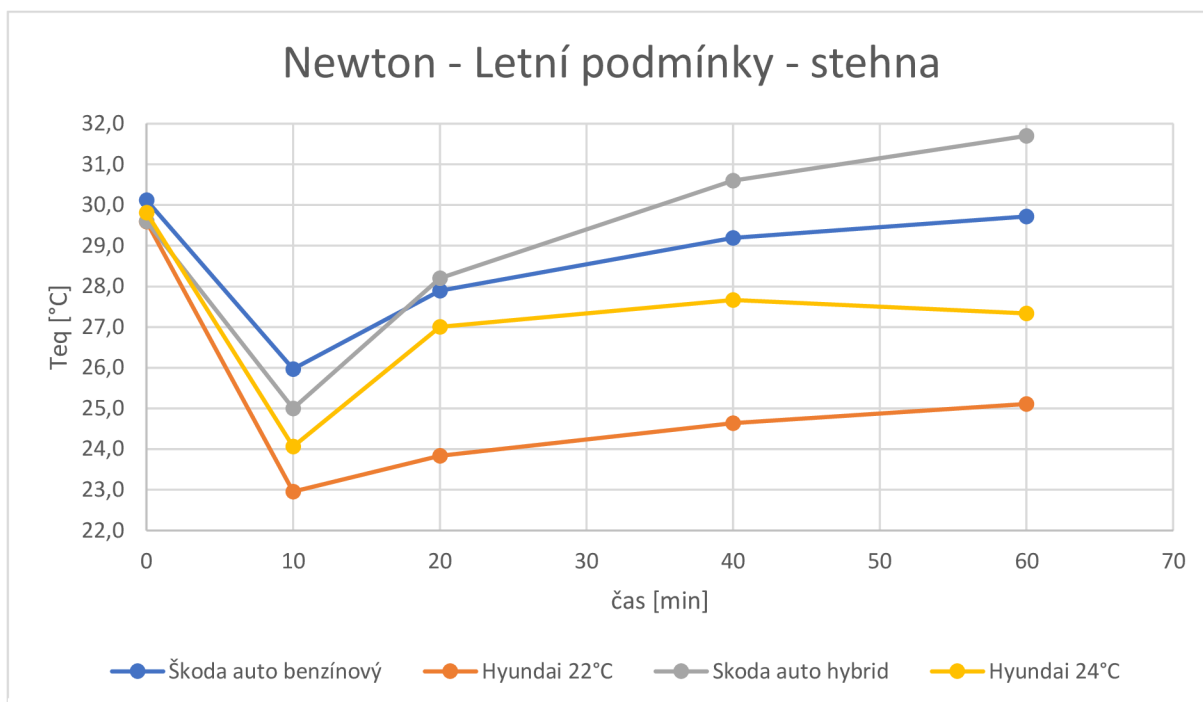
Obrázek 5.13 - graf MTV pro letní podmínky

Z průběhů ekvivalentní teploty je vidět nedostatečné chlazení Hyundai při „AUTO 24“ a na druhou stranu také velice rychlé ochlazení v Škoda auto benzínový. Ve výsledku se však sešly všechny tři vozy při nastavení „AUTO 22“ na zhruba stejné teplotě.



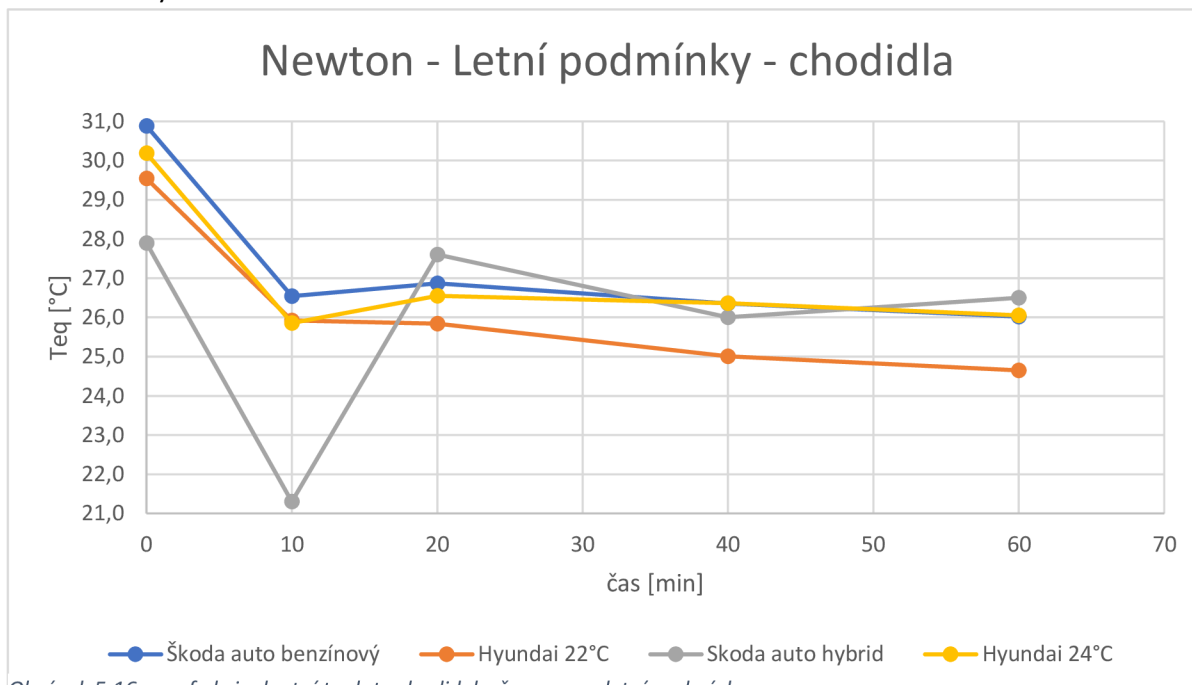
Obrázek 5.14 - graf ekvivalentní teploty obličej s časem pro letní podmínky

V oblasti stehen naopak Škoda auto benzínový ochlazuje nejpomaleji a ve výsledku dokáže interiér vychladit jen na ekvivalentní teplotu o necelých půl stupně nižší hodnotu. Hyundai vyššího nastavení 24 °C ochlazuje prostor rychleji během prvních 10 minut, avšak poté nedokáže udržet ani původní tepelný komfort a interiér se přehřívá. Původní nastavení v této oblasti je velmi účinné a dosahuje nejlepších hodnot ve všech časových pozicích s Škoda auto hybrid držící se v bezpečných hodnotách příjemně teplého pocitu.



Obrázek 5.15 - graf ekvivalentní teploty stehna s časem pro letní podmínky

V oblasti chodidel Hyundai s „AUTO 24“ byl vysoký pokles ekvivalentní teploty v prvních deseti minutách, pravděpodobně způsobeno umístění senzoru v místě nejstudenějšího proudu, vzhledem k tomu, že nastavení „AUTO 22“, které teoreticky by mělo chladit více nemá v tento čas ani zdaleka takto nízkou hodnotu ekvivalentní teploty. V dalších časových úsecích už Hyundai 24 °C dosahuje téměř shodných hodnot s vozy Škoda auto hybrid a benzínový, kdežto Hyundai 22 °C ochlazuje více než zmíněné vozy.



Obrázek 5.16 - graf ekvivalentní teploty chodidel s časem pro letní podmínky

6. Závěr

Tato práce byla rozdělena do dvou částí. V teoretické části byl popsán tepelný komfort, jeho vývoj a princip. Činitelé, kterými jsou teplota vzduchu, střední radiální teplota, rychlost proudění vzduchu, vlhkost, aktivita a oblečení, byly popsány z hlediska výpočtu a jejich důležitosti. Byly popsány i některé dodatečné činitele, jako je pohlaví, věk a postižení, které mají menší efekt na tepelnou pohodu. Dále byly popsány základní způsoby měření činitelů, případně ukazatelů tepelné pohody a popsány dané ukazatele vyjadřující hladinu spokojenosti s prostředím.

V praktické části byl popsán průběh testů, použité přístroje a jejich fungování, testované vozy a podmínky, za kterých toto testování proběhlo. Z výsledných dat bylo provedeno vyhodnocení.

První část vyhodnocení bylo porovnání jednotlivých systémů měření ekvivalentní teploty. Manekýn Comfortis byl umístěn na sedadle řidiče, zatímco Newton na místě spolujezdce se sondami iHVAC v okolí manekýna Newton. Výsledky tedy nejsou totožné, ale mohou se navzájem ovlivňovat a rozdílné umístění ukazuje nehomogenost prostředí kabiny vozidel. Měřená místa jsou rozdílná mezi řidičem a spolujezdcem, ale i v oblasti jedné sedačky, kdy záleží, jestli se nachází v proudu přiváděného vzduchu.

Cílem této práce bylo zjistit, jestli jednotlivé vozy při stejném nastavení dosahují stejně dobrého tepelného komfortu za daných podmínek. Pro zimní podmínky byla nastavena teplota $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z dat je patrné, že pro oblast chodidel a stehů vůz Hyundai nevytápí dostatečně oproti vozu ŠKODA AUTO s benzínovým motorem. Pro tyto podmínky mělo lepší výsledky nastavení „AUTO 24“, které se projevilo, v původně nedostatečných oblastech, velice porovnatelné s ostatními vozy. Druhý z vozů ŠKODA AUTO má nedostatek pouze v oblasti stehů. Nejrovnoměrnější teploty a komfort má ŠKODA AUTO s benzínovým motorem.

V případě letních podmínek s teplotou $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ v klimatické komoře a uměle vytvořeném solárním zářením 800 W/m^2 pomocí vestavěných zářičů. Znovu je vůz ŠKODA AUTO se spalovacím motorem spolu s druhým vozem ŠKODA AUTO nejrovnoměrnější, co se týče dosaženého komfortu. Pro vůz Hyundai bylo naměřeno, že pro nastavení „AUTO 22“ je na stehnech a chodidlech nižší teplota než u předchozích vozů. V tomto případě však při nastavení „AUTO 24“ je na stehnech nekomfortně horko. To, zdali vůz Hyundai s nastavením „AUTO 22“ mající naměřené nižší hodnoty ekvivalentní teploty oproti vozům ŠKODA, je špatné je diskutabilní, jelikož hodnoty MTV jsou pro vůz Hyundai bližší nule neboli teoretické neutrální hodnotě ekvivalentní teploty pro dané podmínky.

Zdroje

- [1] CENTNEROVÁ, Lada. Tepelná pohoda a nepohoda. *Tzbinfo* [online]. Praha: Topinfo, 13.12.2000 [cit. 2022-05-17]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitрни-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>
- [2] PARSONS, K. C. *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. 2nd ed. London: Taylor & Francis Group, 2003. ISBN 0-415-23793-9.
- [3] HOOF, Joost van, Omer KAYNAKLI, Abdulvahap YIGIT, et al. Thermal comfort: research and practice. *Frontiers in Bioscience*. 2010, **15**(1), 3210-3220. ISSN 10939946. Dostupné z: doi:10.2741/3645
- [4] B. W. Olesen, Tech. Rev. 1982 , 2 ,3
- [5] PREK, Matjaz. Thermodynamical analysis of human thermal comfort. *Energy*. 2006, **31**(5), 732-743. ISSN 03605442. Dostupné z: doi:10.1016/j.energy.2005.05.001
- [6]. CANDAS, Victor; DUFOUR, André. Thermal comfort: multisensory interactions?. *Journal of physiological anthropology and applied human science*, 2005, 24.1: 33-36.
- [7] CHENG, Yuanda, Jianlei NIU a Naiping GAO. Thermal comfort models: A review and numerical investigation. *Building and Environment*. 2012, **47**(5), 13-22. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2011.05.011
- [8]. NIKOLOPOULOU, Marialena; STEEMERS, Koen. Thermal comfort and psychological adaptation as a guide for designing urban spaces. *Energy and buildings*, 2003, 35.1: 95-101.
- [9]. MCCARTNEY, K. J.; HUMPHREYS, M. A. Thermal comfort and productivity. *Proceedings of Indoor Air, 2002*, 2002: 822-827.
- [10] HOOF, J. Van, J.L.M. HENSEN a Naiping GAO. Thermal comfort and older adults: A review and numerical investigation. *Gerontechnology*. 2006, **4**(4), 223-228. ISSN 1569-111X. Dostupné z: doi:10.4017/gt.2006.04.04.006.00
- [11] KARJALAINEN, S., J.L.M. HENSEN a Naiping GAO. Thermal comfort and gender: a literature review. *Indoor Air*. 2012, **22**(2), 96-109. ISSN 09056947. Dostupné z: doi:10.1111/j.1600-0668.2011.00747.x
- [12] DJONGYANG, Noël, René TCHINDA a Donatien NJOMO. Thermal comfort: A review paper. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, **14**(9), 2626-2640. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2010.07.040
- [13] LUO, Maohui, Bin CAO, Wenjie JI, Qin OUYANG, Borong LIN a Yingxin ZHU. The underlying linkage between personal control and thermal comfort: Psychological or physical effects?. *Energy and Buildings*. 2016, **111**(9), 56-63. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2015.11.004
- [14]. HUMPHREYS, M., F. NICOL, S. ROAF a O. SYKES. *Standards for Thermal Comfort* [online]. Routledge, 2015 [cit. 2022-05-17]. ISBN 9781135273514. Dostupné z: doi:10.4324/9780203860465
- [15] NICOL, J. Fergus a Susan ROAF. *Rethinking thermal comfort*. 2017, **45**(7), 711-716. ISSN 0961-3218. Dostupné z: doi:10.1080/09613218.2017.1301698
- [16]. BUTERA, Federico M. Chapter 3—Principles of thermal comfort. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 1998, **2**(1-2), 39-66 [cit. 2022-05-17]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/S1364-0321(98)00011-2

- [17] LIU, Weiwei, Zhiwei LIAN a Yuanmou LIU. Heart rate variability at different thermal comfort levels. *European Journal of Applied Physiology*. 2008, **103**(3), 361-366. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-008-0718-6
- [18] ZHU, Y., Q. OUYANG, B. CAO, X. ZHOU a J. YU. Dynamic thermal environment and thermal comfort. *Indoor Air*. 2016, **26**(1), 125-137. ISSN 09056947. Dostupné z: doi:10.1111/ina.12233
- [19] DE DEAR, R. J., T. AKIMOTO, E. A. ARENS, et al. Progress in thermal comfort research over the last twenty years. *Indoor Air*. 2013, **23**(6), 442-461. ISSN 09056947. Dostupné z: doi:10.1111/ina.12046
- [20] WANG, Zhe, Richard DE DEAR, Maohui LUO, et al. Individual difference in thermal comfort: A literature review. *Building and Environment*. 2018, **138**(6), 181-193. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2018.04.040
- [21] PARSONS, K. C. *Human thermal environments: the effects of hot, moderate, and cold environments on human health, comfort, and performance*. 2nd ed. London: Taylor & Francis Group, 2003. ISBN 0-415-23793-9.
- [22] SIMION, Mihaela, Lavinia SOCACIU, Paula UNGURESAN, et al. Factors which Influence the Thermal Comfort Inside of Vehicles: A literature review. *Energy Procedia*. 2016, **85**(6), 472-480. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.12.229
- [23] ATMACA, Ibrahim, Omer KAYNAKLI, Abdulvahap YIGIT, et al. Effects of radiant temperature on thermal comfort: A literature review. *Building and Environment*. 2007, **42**(9), 3210-3220. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2006.08.009
- [24] ALAHMER, A., M.A. OMAR, A. MAYYAS, et al. Effect of relative humidity and temperature control on in-cabin thermal comfort state: Thermodynamic and psychometric analyses. *Applied Thermal Engineering*. 2011, **31**(14-15), 2636-2644. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2011.04.033
- [25]. AULICIEMS, Andris and Steven V. Szokolay. *Thermal comfort*. PLEA : Passive and Low Energy Architecture International in association with Department of Architecture, The University of Queensland Brisbane 4072. 2007. ISBN 0 86776 729 4.
- [26] FANGER, P. O. Assessment of man's thermal comfort in practice. *Occupational and Environmental Medicine*. 1973, **30**(4), 313-324. ISSN 1351-0711. Dostupné z: doi:10.1136/oem.30.4.313
- [27] ENESCU, Diana. A review of thermal comfort models and indicators for indoor environments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2017, **79**(4), 1353-1379. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2017.05.175
- [28] TALEGHANI, Mohammad, Martin TENPIERIK, Stanley KURVERS a Andy VAN DEN DOBBELSTEEN. A review into thermal comfort in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2013, **26**(4), 201-215. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2013.05.050
- [29]. QIAO, Zhou. Thermal comfort in vehicles. 2013. Bachelor's Thesis in Energy Systems
- [30] ALAHMER, A., Ahmed MAYYAS, Abed A. MAYYAS, M.A. OMAR a Dongri SHAN. Vehicular thermal comfort models; a comprehensive review. *Applied Thermal Engineering*. 2011, **31**(6-7), 995-1002. ISSN 13594311. Dostupné z: doi:10.1016/j.applthermaleng.2010.12.004
- [31]. ASHRAE Standard 55, "Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy (ANSI approved)," American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2017.

- [32]. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production
- [33] GAO, Shan, Ryoza OOKA a Wonseok OH. Experimental investigation of the effect of clothing insulation on thermal comfort indices. *Building and Environment*. 2021, **187**. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2020.107393
- [34] LUO, Maohui, Xiang ZHOU, Yingxin ZHU a Jan SUNDELL. Revisiting an overlooked parameter in thermal comfort studies, the metabolic rate. *Energy and Buildings*. 2016, **118**, 152-159. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2016.02.041
- [35]. EKICI, Can. (2013). A review of thermal comfort and method of using Fanger's PMV equation. 5th International Symposium on Measurement, Analysis and Modelling of Human Functions, ISHF 2013. 61-64.
- [36]. FIŠER, Jan. Měření tepelného komfortu [přednáška]. Brno: VUT v Brně.
- [37] REVEL, G.M., M. ARNESANO, Yingxin ZHU a Jan SUNDELL. Measuring overall thermal comfort to balance energy use in sports facilities. *Measurement*. 2014, **55**, 382-393. ISSN 02632241. Dostupné z: doi:10.1016/j.measurement.2014.05.027
- [38] 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.
- [39]. FIŠER, Jan. *Metody hodnocení tepelného komfortu a jejich využití v experimentální a konstrukční praxi*. Brno 2021. Habilitační práce. Konstrukční a procesní inženýrství.
- [40]. CHILDS, Peter RN. *Practical temperature measurement*. Elsevier, 2001.
- [41] BENTON, C.; BAUMAN, Fred; FOUNTAIN, M. A field measurement system for the study of thermal comfort. 1990.
- [42] D'AMBROSIO ALFANO, Francesca Romana, Marco DELL'ISOLA, Boris Igor PALELLA, Giuseppe RICCIO a Aldo RUSSI. On the measurement of the mean radiant temperature and its influence on the indoor thermal environment assessment. *Building and Environment*. 2013, **63**, 79-88. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2013.01.026
- [43] CARPENTER, Michael E. "Different Types of Anemometers" *sciencing.com*, <https://sciencing.com/different-types-anemometers-8526081.html>. 25 April 2022.
- [44]. The Complete Library Of Types Of Anemometer. In: Linqip Technews [online]. [cit. 2022_1_5]. Dostupné z: <https://www.linqip.com/blog/the-complete-library-of-types-of-anemometer/>
- [45]. Vše, co potřebujete vědět o vlhkoměrech. In: síťovámeterologie [online]. [cit. 2022_1_5]. Dostupné z: <https://www.meteorologiaenred.com/cs/higrometros.html>
- [46]. DYER, Ian. Measurement of humidity. *Anaesthesia & Intensive Care Medicine* [online]. 2012, **13**(3), 121-123 [cit. 2022-05-17]. ISSN 14720299. Dostupné z: doi:10.1016/j.mpaic.2011.12.011
- [47]. Kvalita vnitřního prostředí a měření jejích parametrů. In: ASB [online]. [cit. 2022_20_4]. Dostupné z: <https://www.asb-portal.cz/stavebnictvi/technicka-zarizeni-budov/vetrani-a-klimatizace/kvalita-vnitřniho-prostredi-amereni-jejich-parametru>
- [48] KONDO, Masahiro, Takahiro ARAI, Yoshihisa NISHI, et al. Early construction and operation of the highly contaminated water treatment system in Fukushima Daiichi Nuclear Power Station (IV) - Assessment of hydrogen behavior in stored Cs adsorption vessel. *Journal of Nuclear Science and*

Technology. 2014, **51**(7-8), 916-929. ISSN 0022-3131. Dostupné z:
doi:10.1080/00223131.2014.921581

[49] JOHANSSON, Erik, Sofia THORSSON, Rohinton EMMANUEL, et al. Instruments and methods in outdoor thermal comfort studies – The need for standardization. *Urban Climate*. 2014, **10**(7-8), 346-366. ISSN 22120955. Dostupné z: doi:10.1016/j.uclim.2013.12.002

[50] WANG, Jingyi, Zhe WANG, Richard DE DEAR, et al. The uncertainty of subjective thermal comfort measurement. *Energy and Buildings*. 2018, **181**(7-8), 38-49. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2018.09.041

[51] NILSSON, H. O. (2004) Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models. Ph.D. Thesis, University of Gävle.

[52] NILSSON, Håkan O. Thermal comfort evaluation with virtual manikin methods. *Building and Environment*. 2007, **42**(12), 4000-4005. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/j.buildenv.2006.04.027

[53] NILSSON, Håkan O. HEATED MANIKINS AS A TOOL FOR EVALUATING CLOTHING. *The Annals of Occupational Hygiene*. 1995, **42**(12), 4000-4005. ISSN 1475-3162. Dostupné z: doi:10.1093/annhyg/39.6.809

[54] HOLMÉR, Ingvar. Thermal manikin history and applications. *European Journal of Applied Physiology*. 2004, **92**(6), 614-618. ISSN 1439-6319. Dostupné z: doi:10.1007/s00421-004-1135-0

[55] GOLDMAN, R. F. Thermal Manikin, Their Origins and Role. *Thermal Manikins and Modeling*, 2006, 3-18.

[56] DOLEŽALOVÁ, Veronika. *Propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka* [online]. Brno, 2019 [cit. 2019-03-13]. 76 s. Dostupné z:

<https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117253>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Jan Pokorný.

[57] DANCA, Paul, Andreea VARTIRES a Angel DOGEANU. An Overview of Current Methods for Thermal Comfort Assessment in Vehicle Cabin. *Energy Procedia*. 2016, **85**(6), 162-169. ISSN 18766102. Dostupné z: doi:10.1016/j.egypro.2015.12.322

[58] HAVENITH, George; HOLMÉR, Ingvar; PARSONS, Ken. Personal factors in thermal comfort assessment: clothing properties and metabolic heat production. *Energy and buildings*, 2002, 34.6: 581-591.

[59] EKICI, Can, Ibrahim ATILGAN a Angel DOGEANU. A comparison of suit dresses and summer clothes in the terms of thermal comfort. *Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013, **11**(1), 162-169. ISSN 2052-336X. Dostupné z: doi:10.1186/2052-336X-11-32

[60] ZHANG, Sheng, Zhang LIN a Angel DOGEANU. Standard effective temperature based adaptive-rational thermal comfort model. *Applied Energy*. 2020, **264**(1), 162-169. ISSN 03062619. Dostupné z: doi:10.1016/j.apenergy.2020.114723

[61] YE, Guodong, Changzhi YANG, Youming CHEN a Yuguo LI. A new approach for measuring predicted mean vote (PMV) and standard effective temperature (SET*). *Building and Environment* [online]. 2003, **38**(1), 33-44 [cit. 2022-05-17]. ISSN 03601323. Dostupné z: doi:10.1016/S0360-1323(02)00027-6

- [62] FIŠER, J., J. POKORNÝ, M. VATÚCH, A. KAPJOR. *Větrání a klimatizace*. Návody k laboratorním úlohám. 1.vydání. Vysoké učení technické v Brně, 2020, 52 stran.
- [63] HALAWA, E., J. VAN HOOFF a Angel DOGEANU. The adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *Energy and Buildings*. 2012, **51**(1), 101-110. ISSN 03787788. Dostupné z: doi:10.1016/j.enbuild.2012.04.011
- [64] HUMPHREYS, Michael a Fergus NICOL. Understanding the adaptive approach to thermal comfort: A critical overview. *ASHRAE Transactions*. 1998, **104**(1), 991-1004. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/publication/279888246_Understanding_the_adaptive_approach_to_thermal_comfort
- [65] DALY, Steven. *Automotive air-conditioning and climate control systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. ISBN 07-506-6955-1.
- [66] HISTORY OF CADILLAC. In: *plazacadillac* [online]. [cit. 2022_20_4]. Dostupné z: <https://www.plazacadillac.com/History-of-Cadillac>
- [67] NOREN, Olle. Assessment of thermal climate in operator' s cabs: Seminar in Florence 18-19 November 1999. 2000.
- [68] YAN, Xingda, James FLEMING a Roberto LOT. A/C Energy Management and Vehicle Cabin Thermal Comfort Control. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2018, **67**(11), 11238-11242. ISSN 0018-9545. Dostupné z: doi:10.1109/TVT.2018.2869030
- [69] MAZAL, Mirek. Kolik se za poslední roky vyrobilo celosvětově automobilů? Dobře už bylo. In: *auto.cz* [online]. [cit. 2022_25_4]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/kolik-se-za-posledni-roky-vyrobilo-celosvetove-automobilu-dobre-uz-bylo-139665>
- [70] MURATORI, Matteo, et al. The rise of electric vehicles—2020 status and future expectations. *Progress in Energy*, 2021, 3.2: 022002.
- [71] DEVONSHIRE, Joel M. The effects of infrared-reflective and antireflective glazing on thermal comfort and visual performance: a literature review. 2002.
- [72] LAHLOU, Anas, Florence OSSART, Emmanuel BOUDARD, Francis ROY a Mohamed BAKHOUYA. Optimal Management of Thermal Comfort and Driving Range in Electric Vehicles. *Energies*. 2020, **13**(17), 11238-11242. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en13174471
- [73] FIŠER, J., R. TOMA, J. POKORNÝ, M. FOJTLÍN, A. POVALAČ, T. URBANEC. INTEGRACE DEMONSTRÁTORU SYSTÉMU DO TESTOVACÍHO VOZU A TESTY SYSTÉMU PŘI TYPICKÝCH PROVOZNÍCH PODMÍNKÁCH VOZU [online]. Technická zpráva 2016v002. Technologická agentura České republiky, 2017 [cit. 2022-05-19].
- [74] FIŠER, J., O. BASLER, J. POKORNÝ, A. POVALAČ a T. URBANEC. *Aplikace pro real-time vizualizaci ekvivalentní teploty a komfortu: (RAVEC – Real-time application to visualize equivalent temp. and comfort)*. Brno, 2015. R - software. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství.
- [75] NAYAK, Rajkishore a Rajiv PADHYE, ed. *The Textile Institute Book Series: Manikin for Textile Evaluation*. Duxford: Woodhead Publishing, 2017. ISBN 978-0-08-100909-3.
- [76] Newton Thermal Manikin. Thermetrics. Informační list. Dostupno z: https://thermetrics.com/wp-content/uploads/2020/09/Newton-Manikin_Spec-Sheet.R1.pdf
- [77] PŘÍSTROJOVÉ VYBAVENÍ. *Fakulta Strojního Inženýrství: Energetický Ústav* [online]. Brno: WebDesign and System, ©2022 [cit. 2022-05-19]. Dostupné z: <https://eu.fme.vutbr.cz/o-nas-laboratore-ottp-pristrojove-vybaveni>

[78] OBJECTIVE CLIMATE COMFORT EVALUATION IN VEHICLES USING DRESSMAN 3.2. *Fraunhofer IBP*. (2021).

[79] DressMAN 3.2 comfort measurement system. In: *Fraunhofer IBP* [online]. [cit. 2022_1_5]. Dostupné z: <https://www.ibp.fraunhofer.de/en/business-units-and-products/product-developments/dressman.html#expand-all>

[80] RŮŽIČKOVÁ, KATEŘINA. Klimatická komora a tepelný manekýn. In: *FSI* [online], 2013. [cit. 2022_10_5]. Dostupné z: <https://www.fme.vutbr.cz/fakulta/aktuality/35577>

[81] Nejnovější chladivo HFO 1234yf. In: *e-chladiva* [online]. [cit. 2022_10_5]. Dostupné z: <https://www.e-chladiva.cz/nejnovesi-chladivo-hfo1234yf-p111.htm>