



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

**PROPOJENÍ TEPELNÉHO MANEKÝNA
S TERMOFYZIOLOGICKÝM MODELEM ČLOVĚKA**

COUPLING OF THERMAL MANIKIN WITH HUMAN THERMOPHYSIOLOGICAL MODEL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Veronika Doležalová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pokorný, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--------------------------------|
| Ústav: | Energetický ústav |
| Studentka: | Bc. Veronika Doležalová |
| Studijní program: | Strojní inženýrství |
| Studijní obor: | Technika prostředí |
| Vedoucí práce: | Ing. Jan Pokorný, Ph.D. |
| Akademický rok: | 2018/19 |

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:

Propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tepelný manekýn Newton je rozdělen do 34 vyhřívaných zón, které je možné nezávisle řídit v režimech: konstantní povrchová teplota, konstantní tepelný tok a uživatelský režim regulace. V současné době je tento manekýn používán na testování oděvů a hodnocení tepelného komfortu, kdy je předepisována všem zónám stejná konstantní povrchová teplota 34 °C. Hlavní motivací této práce je přiblížit tepelné chování manekýna člověku pomocí vybraného termofyziologického modelu. Tento model je schopen simulovat lokální teploty pokožky a vnitřní tělesnou teplotu s uvažováním termoregulace člověka, což dává nové možnosti v aplikaci tepelného manekýna.

Cíle diplomové práce:

Navrhnout způsob řízení tepelného manekýna v uživatelském regulačním režimu, který by umožňoval dynamicky regulovat jeho povrchové teploty v závislosti na vývoji okolního prostředí a předepsané produkci metabolického tepla.

Propojení tepelného manekýna s virtuálním termofyziologickým modelem člověka.

Otestovat a vyhodnotit systém řízení pro ustálené a neustálené podmínky okolního prostředí.

Seznam doporučené literatury:

BURKE R., CURRAN A., HEPOKOSKI M. Integrating an active physiological and comfort model to the Newton sweating thermal manikin. Proceedings of the International Conference on Environmental Ergonomics, Boston, 2009.

FARRINGTON R., RUGH J., BHARATHAN D., BURKE R. Use of a Thermal Manikin to Evaluate Human Thermoregulatory Responses in Transient, Non-Uniform, Thermal Environments. SAE Technical Paper 2004-01-2345, 2004.

FODA E., SIRÉN K. A thermal manikin with human thermoregulatory control: implementation and validation. Int J Biometeorol 56(5),959-971, 2012.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka. Práce obsahuje úvod s problematikou určení tepelného komfortu člověka a možností využití tepelného manekýna na testování tepelného komfortu za určitých podmínek. Předmětem teoretické části diplomové práce je shrnutí současného stavu poznání, princip fungování a příklady použití tepelného manekýna. V praktické části bylo navrženo řízení manekýna pomocí termofyziologického modelu FMTK v režimu řízení teploty a následně byla v klimatické komoře otestována jeho funkčnost na základě porovnání výsledků s experimenty z literatury. Řízení je vhodné pro mírné a chladné prostředí, kdy teplota okolí nepřekračuje teplotu pokožky.

Klíčová slova

tepelný manekýn, termofyziologický model, tepelný komfort, klimatická komora, tepelný odpor oděvu

Abstract

The diploma thesis is focused on the connection of thermal manikin with human's thermophysiological model. The thesis includes an introduction to the issue of determining the thermal comfort of a person and the possibility of using a thermal manikin to test thermal comfort under certain conditions. The theoretical part of the thesis includes the review of state-of-the-art about thermal manikin, its control algorithm, the principle of operation and examples of use. In the practical part, the control of the manikin by means of the thermophysiological model FMTK in the temperature control mode was proposed and its functionality was tested in the climatic chamber based on comparison of the results with the experiments from the literature. The control is suitable for mild and cold environments where the ambient temperature does not exceed the skin temperature.

Keywords

thermal manikin, thermophysiological model, thermal comfort, climatic chamber, clothing thermal resistance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE:

Citace tištěné práce:

DOLEŽALOVÁ, Veronika. *Propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka*. Brno, 2019. 76 s. Dostupné také 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.

Citace elektronického zdroje:

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.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma „Propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem člověka“ jsem vypracovala samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

V Brně, dne 20. května 2019

.....

Bc. Veronika Doležalová

PODĚKOVÁNÍ

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu Ing. Janu Pokornému, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a podklady, které mi pomohly se psaním diplomové práce. Dále bych chtěla moc poděkovat celé své rodině za trpělivost a podporu nejen během psaní práce, ale po dobu celého studia.

Obsah

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 1 | Úvod..... | 13 |
| 1.1 | Motivace..... | 14 |
| 1.2 | Cíle a limity práce | 14 |
| 2 | Tepelný komfort | 15 |
| 2.1 | Tepelný komfort dle modelu PMV-PPD..... | 16 |
| 2.2 | Reakce člověka na okolní prostředí | 18 |
| 2.3 | Termofyziologický model..... | 19 |
| 3 | Fyziologický model tepelného komfortu | 21 |
| 3.1 | Fialův model..... | 21 |
| 3.1.1 | Pasivní systém..... | 21 |
| 3.1.2 | Aktivní systém | 22 |
| 3.1.3 | Dynamický tepelný pocit DTS | 23 |
| 3.2 | Vlastnosti modelu FMTK – VUT Brno | 24 |
| 4 | Tepelný manekýn..... | 25 |
| 4.1 | Adaptivní tepelný manekýn | 26 |
| 4.1.1 | Přehled adaptivních manekýnů..... | 27 |
| 4.2 | Tepelný manekýn Newton – VUT Brno | 30 |
| 4.2.1 | Princip fungování..... | 30 |
| 4.2.2 | Vlastnosti Newtona (VUT Brno)..... | 31 |
| 5 | Termofyziologický simulátor | 33 |
| 5.1 | Propojení Newtona s FMTK modelem | 34 |
| 5.1.1 | Device map – možnosti řízení | 34 |
| 5.1.2 | FMTK READ, FMTK WRITE..... | 35 |
| 5.1.3 | Úpravy kódu | 36 |
| 5.1.4 | Přiřazení jednotlivých částí modelu FMTK a tep. manekýna | 37 |
| 5.2 | Možnosti řízení..... | 38 |
| 5.3 | Vstupně/výstupní rozhraní | 38 |
| 6 | Testování simulátoru..... | 40 |
| 6.1 | Testování funkčnosti propojení..... | 40 |
| 6.1.1 | Test v neutrálním prostředí..... | 40 |
| 6.1.2 | Test Superb (chlazení, topení) | 41 |

| | | |
|-------|----------------------------------------------------------------|----|
| 6.1.3 | Test časových prodlev 22-10-22-22-40-24 °C..... | 42 |
| 6.2 | Verifikační testy v klimatické komoře – popis | 42 |
| 6.3 | Virtuální simulace a šablona pro porovnání se Simulátorem..... | 44 |
| 6.4 | Verifikační testy – souhrnné výsledky | 45 |
| 6.4.1 | 5 °C Young | 45 |
| 6.4.2 | 10 °C Budd..... | 49 |
| 6.4.3 | 28-33-28 °C..... | 52 |
| 6.4.4 | 18-42-18 °C..... | 54 |
| 6.4.5 | 28-18-28 °C..... | 57 |
| 6.4.6 | 28-18-28 °C clothed..... | 60 |
| 6.4.7 | 3-5-8 met..... | 62 |
| 7 | Diskuze | 66 |
| 7.1 | Simulátor..... | 66 |
| 7.2 | Výsledky testů..... | 66 |
| 8 | Závěr | 67 |
| | Seznam použitých zdrojů..... | 68 |
| | Seznam symbolů a zkratek | 71 |
| | Seznam obrázků..... | 73 |
| | Seznam tabulek | 75 |
| | Seznam příloh | 76 |

1 Úvod

Vyhodnocování vlivu životního prostředí na člověka je v současnosti hodně diskutovaným tématem, a stejně tak i to, jak člověk toto prostředí postupně negativně ovlivňuje. V době, kdy se řeší dopady technických zařízení na klimatické změny, a hledají se nové, více ekologické způsoby vytápění/klimatizování, jsou mimo jiné kladeny požadavky na nové metody, jak vyhodnocovat HVAC (topení, větrání, klimatizování) systémy z hlediska úspory energií.

Zároveň je kladen i větší důraz na kvalitu pracovního prostředí a tepelný komfort v kancelářích i obytných budovách, neboť se zhoršením tepelného komfortu klesá efektivita práce (snížená výkonnost či pozornost). Současné trendy, jako jsou třeba otevřené kanceláře pro více lidí neboli „open space“ nebo víceúčelové průmyslové prostory, zvyšují náročnost na funkci zařízení upravující vnitřní prostředí a kladou nové výzvy vyžadující jejich neustálý vývoj.

V posledních letech se také řeší dopady dopravních prostředků na životní prostředí. Zejména v automobilovém průmyslu je velký tlak legislativy a společnosti na ekologii a hospodárnost a výrobci jsou tak tlačeni do nových systémů (elektromobilita, ekologická chladiva apod.) s tím, že si nemohou dovolit dělat tato opatření na úkor tepelné pohody (komfortu) cestujících, jejichž očekávání jsou spíše čím dál vyšší (prodané nové auto bez klimatizace se stává vzácností).

Nová opatření k dosažení tepelného komfortu by měla být před uvedením na trh řádně otestována. Např. se provádějí testy na menší skupině lidí, kteří v určitých podmínkách zaznamenávají hodnotu spokojenosti s tepelným stavem prostředí. Testy se statisticky vyhodnotí a podle toho lze získat představu o tom, jaké požadované hodnoty by preferoval zákazník. Jelikož jsou testy s lidmi zdlouhavé a v některých případech ani z etických důvodů nejsou možné, s výhodou byly zavedeny objektivní metody, jak vyhodnocovat tepelný komfort, či tepelný stres. Buď pomocí modelů pracujících s fyzikálními měřitelnými veličinami dle ISO 7726, či pomocí tepelného manekýna. Mezi základní modely tepelného komfortu patří model PMV-PPD dle ISO-7730, pokročilejší modely pracují s lidskou fyziologií viz Fialův model (Fiala, 1998). Metodika, využívající tepelného manekýna a dobrovolníků, je popsána v normě ISO 14505. Obecně tato problematika spadá do třídy norem 8335 - Ergonomie prostředí.

V dnešní době je tepelný manekýn nejvhodnějším zařízením používaným pro testování oděvů (tj. vyhodnocení přenosu tepla mezi člověkem, oděvem a okolním prostředím). Tepelný manekýn se nyní používá nejvíce v automobilovém a oděvním průmyslu, zejména při výzkumu a vývoji nových technologií a materiálů. Pro technické zařízení budov ho lze rovněž využít, ale vzhledem k pořizovacím nákladům se obvykle pro měření parametrů prostředí používají cenově dostupnější metody, např. dle ISO 7726. Výhodou tepelného manekýna je jeho anatomický tvar a v některých konfiguracích i schopnost pohybovat se

a potit, což poskytuje podmínky, které jsou velmi blízko k člověku a lze ho tedy při testování velmi dobře nahradit.

V následujících kapitolách jsou zmíněny cíle a limity práce, problematika tepelného komfortu a základní popis tepelného manekýna a modelu FMTK tvořící simulátor. V praktické části, začínající kapitolou 5, jsou prezentovány výsledky testů simulátoru – 3 pretesty a 7 laboratorních testů.

1.1 Motivace

Pracoviště Otpp od roku 2012 disponuje tepelným manekýnem Newton, který byl zakoupen v rámci NETME centra v základní konfiguraci bez chodícího, potícího systému a virtuálního modelu člověka. Roku 2017 byl validován FMTK model tepelného komfortu, a naskytla se tak příležitost rozšířit možnosti tepelného manekýna o řízení termofyziologickým modelem. Předmětem této diplomové práce je sestavit a otestovat simulátor napodobující člověka včetně schopnosti termoregulace. To obnáší zejména aktivní propojení termofyziologického modelu FMTK s tepelným manekýnem Newton.

V dnešní době již tato řešení existují, ale jedná se o komerční produkty. Motivací pro vznik simulátoru je doplnit současného tepelného manekýna Newton na VUT Brno o virtuální fyziologický model člověka, který v roce 2012 nebylo z finančních důvodů možné zakoupit.

1.2 Cíle a limity práce

Cíle

Tato práce si klade za cíl navrhnout způsob řízení tepelného manekýna v uživatelském regulačním režimu, který by umožňoval regulovat jeho povrchové teploty v závislosti na vývoji okolního prostředí a předepsané produkci metabolického tepla, propojit tepelného manekýna s virtuálním termofyziologickým modelem člověka a na závěr otestovat a vyhodnotit systém řízení pro ustálené a neustálené podmínky okolního prostředí.

Limity práce

Práce si neklade za cíl provádět experimentální ověření na lidech, jelikož je zde problém s etickou komisí, která má na starosti, aby experimenty neohrožovaly zdraví člověka. Tyto experimenty obvykle vyžadují lékařský dohled. Z tohoto důvodu je výhodné využít k experimentům manekýna a termofyziologického modelu. Při experimentech s manekýnem lze provádět testování také za extrémních podmínek, aniž by došlo k ohrožení zdraví člověka.

2 Tepelný komfort

Současná definice (dle ČSN EN ISO 7730) zní: „Tepelná pohoda je stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení.“

Dříve byly sepsány tři definice tepelného komfortu/pohody:

- „Tepelná pohoda znamená, že je dosaženo tepelných poměrů, kdy člověku není ani chladno, ani příliš teplo – člověk se cítí příjemně.“ (Cihelka)
- „Tepelnou pohodou (někdy též tepelnou neutralitou) se označuje stav, kdy prostředí odnímá člověku jeho tepelnou produkci bez výrazného (mokrého) pocení.“ (Pulkrábek)
- „Tepelná pohoda je stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení.“ (ASHRAE)

Faktory ovlivňující tepelný komfort

Faktory, které ovlivňují tepelný komfort člověka, jsou rozděleny do 3 skupin (Centnerová, 2001).

- a) Vnitřní prostředí
 - teplota vzduchu – teplota interiérového vzduchu
 - relativní vlhkost vzduchu – míra nasycení vzduchu vodní parou
 - radiační teplota – rovnoměrná společná teplota všech ploch v prostoru
 - rychlost proudění vzduchu – proudění ovlivňuje přenos tepla konvekcí
- b) Osobní faktory
 - oděv – jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují odvod tepla
 - produkce tepla metabolismem
- c) Doplňující faktory
 - množství podkožního tuku
 - věk a pohlaví
 - jídlo a pití
 - adaptace na venkovní prostředí
 - adaptace na vnitřní prostředí

Oblečení je jeden z hlavních faktorů, které ovlivňují odvod tepla z těla do okolí. Z důvodu studia tepelného komfortu byla zavedena jednotka clo (Clothing and Thermal Insulation). 1 clo odpovídá izolační hodnotě oděvu, která je potřeba k udržení neutrálního tepelného komfortu sedícího člověka v místnosti, přičemž vnitřní teplota je 21 °C a rychlost proudění vzduchu 0,1 m/s (The Engineering ToolBox, 2004). Hodnoty clo pro denní běžné oblečení jsou uvedeny v Tab. 2.1. V příloze A se nachází podrobnější popis jednotlivých částí oblečení.

Tab. 2.1 Hodnoty clo pro typy běžného denního oblečení (Centnerová, 2000)

| Denní běžné oblečení | I_{cl} | |
|---------------------------------------------------------------------|----------|----------|
| | clo | m^2K/W |
| Kalhotky, tričko, lehké ponožky, sandály | 0,30 | 0,050 |
| Kalhotky, spodnička, punčochy, lehké šaty s rukávy, sandály | 0,45 | 0,070 |
| Spodky, košile s krátkými rukávy, lehké kalhoty, ponožky, polobotky | 0,50 | 0,080 |
| Kalhotky, punčochy, košile s krátkými rukávy, sukně, sandály | 0,55 | 0,085 |
| Spodky, košile, lehčí kalhoty, boty | 0,60 | 0,095 |
| Spodní prádlo, košile, kalhoty, ponožky, boty | 0,70 | 0,110 |
| Kalhotky, spodnička, košile, sukně, silné podkolenky, boty | 0,90 | 0,140 |
| Spodky, nátělník, košile, kalhoty, svetr s věčkem, ponožky, boty | 0,95 | 0,145 |
| Kalhotky, košile, kalhoty, sako, ponožky, boty | 1,00 | 0,155 |
| Kalhotky, punčochy, blůzka, dlouhá sukně, sako, boty | 1,10 | 0,170 |

Zjišťování a hodnocení tepelného komfortu

Jsou známé dvě hlavní metody, pomocí kterých se zjišťuje tepelný komfort, a to pomocí dotazníků nebo měřením fyziologických změn člověka. První metoda využívá dotazníků, do nichž testovaní lidé zapisují své subjektivní pocity vnímání teploty, a souběžně s tím se také měří parametry vzduchu v místnosti. U druhé metody se měří fyziologické změny člověka, vlivem okolního prostředí, tím je například pocení, teplota a vlhkost pokožky. Měření se provádí v klimatické komoře a naměřené hodnoty se vyhodnocují pomocí sedmibodové stupnice buď podle PMV, ASHRAE nebo Bedforda. ASHRAE popisuje to, jak je člověk v prostředí spokojený, za to u hodnocení podle Bedforda jde hlavně o pocitové vnímání tepelného komfortu. V Tab. 2.2 je znázorněno porovnání mezi stupnicemi. (Centnerová, 2000)

2.1 Tepelný komfort dle modelu PMV-PPD

Tab. 2.2 Porovnání stupnic pro určení tepelného komfortu (Centnerová, 2001)

| PMV | ASHRAE | Bedford |
|-----|---------------|------------------|
| 3 | Horko | Velmi teplo |
| 2 | Teplo | Teplo |
| 1 | Mírně teplo | Příjemně teplo |
| 0 | Neutrálně | Příjemně |
| -1 | Mírně chladno | Příjemně chladno |
| -2 | Chladno | Chladno |
| -3 | Zima | Velmi chladno |

Informace o indexu PMV byly čerpány převážně z disertační práce s názvem Tradiční a adaptivní model tepelné pohody (Centnerová 2001).

Často používané kritérium pro hodnocení tepelného komfortu je index PMV (Predicted Mean Vote) tzv. předpokládaná průměrná volba (viz Tab. 2.2). Index určuje předpokládaný průměrný tepelný pocit člověka podle sedmibodové stupnice tepelného komfortu ASHRAE – AMERICAN SOCIETY OF AIRCONDITIONING ENGINEERS (ASHRAE, 1997). „Index PMV (Fanger, 1970) je definován jako funkce rozdílu tepelného toku produkovaného organismem a aktuálního toku tepla, které tělu odnímá okolí při daných podmínkách prostředí.“ – viz rovnice (2.1) a (2.3). Tyto rovnice jsou platné pouze pro stavy blízké tepelné rovnováhy člověka s okolním prostředím.

$$PMV = [0,303 \exp(-0,036M) + 0,028]L \quad (2.1)$$

Odvození rovnic pro výpočet indexu PMV vychází z rovnice tepelné rovnováhy (2.2). Jelikož PMV model je navržen pro ustálené podmínky prostředí, předpokládá se $\Delta S = 0$.

$$M^* - W^* = E_d + E_{sw} \pm R \pm C \pm K + L_{res} + S_{res} + \Delta S [W] \quad (2.2)$$

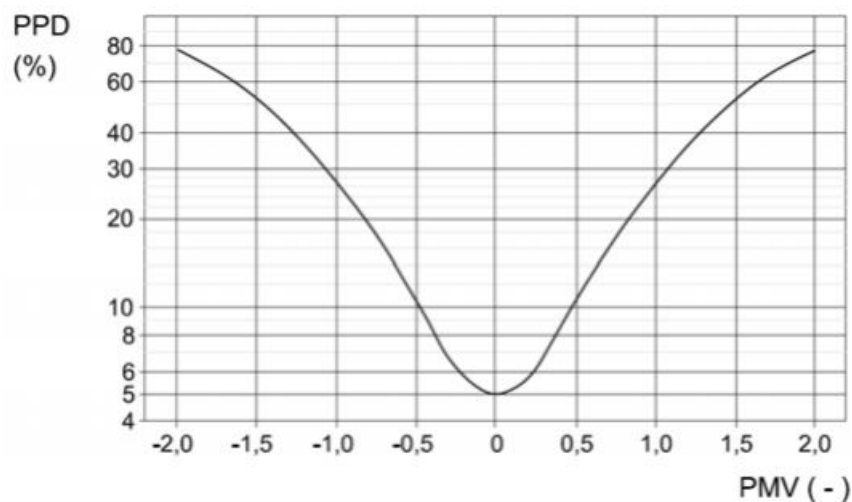
- M^* – hodnota metabolismu [W]
- W^* – mechanická práce [W]
- E_d – tepelná ztráta difuzí pokožky (suché pocení) [W]
- E_{sw} – tepelná ztráta pocením (mokré pocení) [W]
- R – tepelný tok zářením [W]
- C – tepelný tok prouděním [W]
- K – tepelný tok vedením [W]
- L_{res} – latentní tepelná ztráta dýcháním [W]
- S_{res} – citelná tepelná ztráta dýcháním [W]
- ΔS – akumulace tepla, tj. zohlednění tepelné kapacity člověka [W]

Rovnice (2.3) vyjadřuje tepelnou zátěž (bilanci) člověka $L [W/m^2]$ tj. rozdíl mezi produkcí tepla a tepelnými ztrátami, které unikají z těla do okolí. Výpočet této tepelné bilance je vztažen na jednotkovou plochu a zahrnuje v sobě na osobní faktory (M , W a I_{cl}) a parametry prostředí (t_a , t_r , v , p_{wa}). Kde p_{wa} se počítá z relativní vlhkosti a z tlaku nasycených vodních par při dané teplotě určené podle empirického vztahu uvedeném v (ASHRAE, 2001).

$$L = (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} [5733 - 6,99(M - W) - p_{wa}] - 0,42 [(M - W) - 58,15] - 1,7 \cdot 10^{-5} M (5867 - p_{wa}) - 0,0014 M (34 - t_a) - 36,9 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(t_{cl} + 273)^4 (t_r + 273)^4] - f_{cl} h_{cl} (t_{cl} - t_a) [W/m^2] \quad (2.3)$$

- M – metabolická produkce tepla vztažená na plochu [W/m^2]
- W – mechanický výkon vztažený na plochu [W/m^2]
- p_{wa} – parciální tlak vodní páry ve vzduchu [Pa]
- t_a – teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$]
- f_{cl} – poměr povrchu oblečené a neoblečené části těla [-]
- t_{cl} – teplota oděvu [$^{\circ}\text{C}$]
- t_r – střední radiační teplota [$^{\circ}\text{C}$]
- h_c – součinitel přestupu tepla prouděním [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] – závisí na rychlosti v [m/s]
- I_{cl} – tepelná izolace oděvu [clo]

Vzhledem k tomu, že každý člověk je jiný, má jiné proporce, věk, je v různém psychickém rozpoložení, vnímání tepelného komfortu může být odlišné. Podle Fangerova výzkumu je předpokládané procento nespokojených (PPD – predicted percentage dissatisfied) funkcí předpokládané průměrné volbě (PMV – predicted mean vote). Z Obr. 2.1 lze vidět, že u velké skupiny lidí, která pobývá ve shodném prostředí, bude vždy aspoň 5 % nespokojených s okolními podmínkami (Psikuta, 2017).



Obr. 2.1 Procentuální nespokojenost lidí PPD jako funkce předpokládané průměrné volby PMV (Drkal, 2009)

2.2 Reakce člověka na okolní prostředí

Informace v této kapitole jsou převzaty z článku Tepelná pohoda a nepohoda (Centnerová L.) uvedeném v časopisu Vytápění větrání instalace 5/2000.

Metabolická produkce tepla lidského těla je rozdělena na bazální a svalový metabolismus. U bazálního metabolismu je teplo produkováno biologickými procesy, jako je např. trávení potravy a svalový metabolismus je aktivován při činnosti člověka. Teplo, které je produkováno organismem, je potřeba odvést do okolí, aby nedošlo ke změně tělesné teploty.

Normální tělesná teplota uvnitř lidského těla se pohybuje kolem 37 °C a teplota kůže dosahuje teploty v rozmezí 31 až 34 °C¹. Teplota kůže se mění podle okolního prostředí. Teploty kolísají podle denní doby, a také záleží na konkrétní části lidského těla. Také závisí na pokrytí oblečením a množství krve, která protéká kapilárami v podkoží. V těle neustále dochází k proudění krve z vnitřních tkání na povrch kůže, kde je teplo odváděno do okolí kondukcí, konvekcí, sáláním a vypařováním. Odvod tepla závisí nejen na parametrech okolí, ale také na vlastních fyziologických regulačních mechanismech, pomocí kterých si tělo udržuje tepelnou rovnováhu.

Reakce těla na teplé/chladné prostředí

Na zvýšenou produkci tepla nebo teplé prostředí reaguje tělo reakcí zvanou vazodilatace. Při této reakci se podkožní cévy rozšiřují a tím zvyšují krevní zásobení pokožky, díky čemuž dochází k odvodu tepla z těla. Pokud vazodilatace nestačí k udržení stálé teploty těla, aktivují se potní žlázy a dochází k chlazení odpařováním. Pokud selžou oba mechanismy ochlazování, dochází k tzv. hypertermii, což znamená přehřívání organismu, který může mít fatální následky.

Na chladné prostředí tělo naopak reaguje snížením cirkulace krve v podkoží tzv. vazokonstrikcí, a tím se snižují tepelné ztráty do okolí. Vazokonstrikce je doprovázena postavením chloupků na kůži, které ještě zvýší tepelnou izolaci kůže. Pokud tyto dvě reakce nepomohou, dochází k třesu tzv. termogenezi, který zvyšuje tepelnou produkci těla. Pokud ani tento mechanismus nepomůže, dochází k hypotermii, podchlazení těla.

2.3 Termofyziologický model

Termofyziologický model reprezentuje virtuální lidské tělo, které se skládá z několika válců, které jsou složeny z vrstev, a koulí. Tyto části jsou opatřeny vlastnostmi lidských tkání (tzv. pasivní systém) a souborem algoritmů simulujících lidské termofyziologické vlastnosti a reakce na okolní podmínky, jako je pocení, třes a vazokonstrikce (aktivní systém). Hlavní funkcí lidské termoregulace je udržovat vnitřní teplotu těla na 37 °C bez ohledu na dynamické kolísání tepelných zisků v těle a změny okolního prostředí. Z toho vyplývá, že teplo produkované tělem se rovná ztrátě tepla lidského těla do okolí a tepla v něm uložené. Tato tepelná bilance je dána vztahem (2.2). (Pokorný, 2014)

Úlohou termofyziologického modelu je tedy určit, jak se bude chovat lidská termoregulace v ustálených i časově proměnlivých podmínkách. Tuto schopnost modelu je možné využít k řízení povrchových parametrů manekýna jako je pocení, teplota povrchu nebo tepelná ztráta. Model také umožňuje zapisovat okrajové podmínky jako je teplota okolí, rychlost vzduchu a relativní vlhkost. Na základě těchto parametrů se součet vedení tepla kondukcí,

¹ Dle modelu kůže dosahuje teplot 32,7 až 35,7 °C.

konvekcí a radiací skrze oděv rovná produkci metabolického tepla. Tímto vztahem je možno zjistit teplotu pokožky. (Pokorný, 2014)

3 Fyziologický model tepelného komfortu

3.1 Fialův model

Fiala rozdělil vývoj svého modelu do tří etap, a to pasivní systém (Fiala, 1999), aktivní systém (Fiala, 2001) a model tepelného komfortu (Fiala, 2003). Postupem času se stal nejpoužívanějším modelem termofyziologie člověka. Jeho model převzaly komerční firmy zabývající se tvorbou softwaru, jako jsou Theseus-FE a TAITherm (dříve RadTherm), které ho mírně upravily navýšením počtu segmentů, propojením s reálnou geometrií člověka a k detailnímu výpočtu radiace mezi modelem a okolím. Fiala dále pracoval na jeho využití například v kombinaci s CFD nebo propojením s reálným tepelným manekýnem. Nejnovějším vylepšením modelu je tzv. body-builder, který zohledňuje parametry člověka, jakým jsou pohlaví, obsah tuku nebo věk. Je zohledněn také vliv aklimatizace a vykonávané činnosti na intenzitu dýchání. (Psikuta, 2017)

Matematický popis se dělí na pasivní a aktivní systém. Pasivní systém zahrnuje definici lidského těla (segmenty, sektory, vrstvy), celkový fyzikální popis a vlastnosti tkání, aktivní systém zahrnuje termoregulaci.

3.1.1 Pasivní systém

Pasivní systém udává parametry průměrného člověka (hmotnost 73,5 kg, povrch kůže 1,86 m², výška 171,6 cm, podíl tuku 14 %, faktor schopnosti odvádět teplo suchým pocením 6 %, basální metabolismus 87.1 W a bazální srdeční výdej CO = 4,91 l/min). (Pokorný, 2014, Šišolák, 2018)

Lidské tělo je v modelu rozděleno do 19 segmentů a některé z nich jsou dále rozděleny do tří až čtyř sektorů rozlišených podle orientace v prostoru (přední, zadní, 2x boční). Každý sektor se skládá z několika vrstev tkání, které lze přerozdělit do libovolného počtu výpočetních uzlů, které jsou použity pro výpočet teplotního profilu (Pokorný, 2014). Počet uzlů se může u každého segmentu lišit. Jednotlivé vrstvy segmentu popisují jednotlivé lidské tkáně, jako je jádro, do kterého patří mozek, plíce a vnitřnosti, kosti, svaly, tuk a povrchová vrstva definuje pokožku. Lze přidat i přídatnou vrstvu, která představuje oděv. (Šišolák, 2018)

Pasivní systém Fialova modelu vychází z práce, kterou sepsal Wissler (1964). Práce se zabývá přestupem tepla uvnitř lidského těla a tepelné výměny člověka s jeho okolím, která je vyjádřena bilanční rovnicí, která v sobě zahrnuje přenos tepla kondukcí, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Přestup tepla uvnitř lidského těla je definován parciální diferenciální rovnicí vedení tepla (viz. rovnice (3.1)) v živých tkáních podle Pennese (1948), která zohledňuje pouze radiální směr vedení tepla. Rovnice obsahuje vliv akumulace tepla v

tkáních, vedení tepla válcovým segmentem, metabolickou produkcí tepla, vliv krevního oběhu v cévách a protiproudou tepelnou výměnu v krvi.

$$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta t} = \lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\delta T}{\delta r} \right) + \dot{q}_m + \rho_b \cdot c_b \cdot \dot{V}_b \cdot (T_{ar} - T) \quad (3.1)$$

Definice jednotlivých členů:

$\rho \cdot c \cdot \frac{\delta^2 T}{\delta t}$ – akumulace tepla v lidské tkáni

\dot{q}_m – produkce tepla uvnitř lidského těla

$\lambda \cdot \left(\frac{\delta^2 T}{\delta r^2} + \frac{\omega}{r} \cdot \frac{\delta T}{\delta r} \right)$ – přenos tepla vedením tkáněmi

$\rho_b \cdot c_b \cdot \dot{V}_b \cdot (T_{ar} - T)$ – přenos tepla krevním oběhem

kde:

- t – čas [s]
- T_{ar} – teplota krve v žilách [°C]
- r – poloměr [m]
- ρ – hustota [kg/m³]
- c – měrná tepelná kapacita [J/kgK]
- λ – součinitel tepelné vodivosti [W/mK]
- \dot{q}_m – metabolická produkce tepla [W]
- ρ_b – hustota krve [kg/m³]
- c_b – měrná tepelná kapacita krve [J/kgK]
- \dot{V}_b – objemový tok krve tkání [m³/s]
- T – teplota tkáně [°C]

Rovnice (3.1) řeší jednorozměrná nestacionární vedení tepla koulí (hlava) nebo válce v závislosti na tom, o jakou část modelu jde. Člen t definuje čas, T_{ar} je teplota krve v žilách a je definována pro každý segment. Ostatní členy popisují vlastnosti jednotlivých vrstev tkáně, které jsou definovány jako funkce vzdálenosti od jádra, která je vyjádřena poloměrem r . (Pokorný, 2014)

3.1.2 Aktivní systém

Termoregulace lidského těla (tzv. aktivní systém) se aktivuje při vychýlení člověka z neutrálního stav. Dle Fialy je neutrálním stavem myšleno udržení vnitřní tělesné teploty v rozmezí teplot 35,8 °C až 37,4 °C (Pokorný, 2012), střední teploty pokožky na 34,4 °C a

teploty hypotalamu na 37 °C (Pokorný, 2014). Je to stav, při kterém lidské tělo nepotřebuje zapojovat termoregulaci. K vychýlení dochází při odchylce teploty hypotalamu, střední teploty pokožky a její časové derivace. V tomto případě již je aktivována termoregulace, která slouží k regulaci pasivního systému a udržení potřebné tělesné teploty. Mezi funkce aktivního systému patří svalový třes, který způsobí zvýšenou produkci tepla a vazomotorika, která ovlivňuje průtok krve v cévách, její množství ve vrstvách pokožky a pocení, kterým se zvyšuje odvod tepla z organismu vypařováním přes pokožku (Šišolák, 2018).

3.1.3 Dynamický tepelný pocit DTS

Na základě teploty pokožky a vnitřní teploty existuje možnost, jak určit tepelný pocit/komfort a to pomocí tzv. indexu DTS (Dynamical thermal sensation). Tento index je, stejně jako index PMV, definován podle stupnice ASHRAE. Index DTS se počítá podle níže uvedeného algoritmu. Základem je empirický vztah (2.4) určený regresní analýzou experimentálních dat, která obsahovala hodnocení celkového tepelného pocitu lidmi pro různé teploty okolního prostředí. Jednotlivé členy vzorce jsou závislé na velikosti vychýlení tepelného stavu člověka z neutrálního stavu. Vychýlení je dáno odchylkou vnitřní teploty hypotalamu $\Delta T_{hy} = T_{hy} - 37$ a odchylkou střední teploty pokožky $\Delta T_{sk,m} = T_{sk,m} - 34,4$. Pokud je rozdíl odchylky střední tepelné pokožky, je index DTS roven nule, což se rovná neutrálnímu tepelnému pocitu. (Pokorný, 2015)

$$DTS = 3 \tanh(f_{sk} + \Phi + \psi) \quad (3.2)$$

První člen rovnice (3.2) určuje vliv střední teploty pokožky na celkový tepelný pocit člověka – viz rovnice (3.3).

$$f_{sk} = \begin{cases} 1,026 \cdot \Delta T_{sk,m} & \text{pro } \Delta T_{sk,m} > 0 \\ 0,298 \cdot \Delta T_{sk,m} & \text{pro } \Delta T_{sk,m} < 0 \end{cases} \quad (3.3)$$

Druhý člen rovnice (3.2) určuje vliv vnitřní teploty na celkový tepelný pocit (viz rovnice (3.4)).

$$\Phi = 6,662 \cdot \exp\left(\frac{-0,565}{\Delta T_{hy}}\right) \cdot \exp\left(\frac{-7,634}{5 - \Delta T_{sk,m}}\right) \quad (3.4)$$

Třetím členem rovnice (3.2) je dynamický člen, který se vypočítá z rovnice (3.5).

$$\psi = \frac{\tau}{1 + \Phi} \quad (3.5)$$

Pokud by se dynamický člen zanedbal, z dynamického tepelného pocitu by se stal statický tepelný pocit TS, který se svými hodnotami a průběhem přibližuje indexu PMV. Dynamický

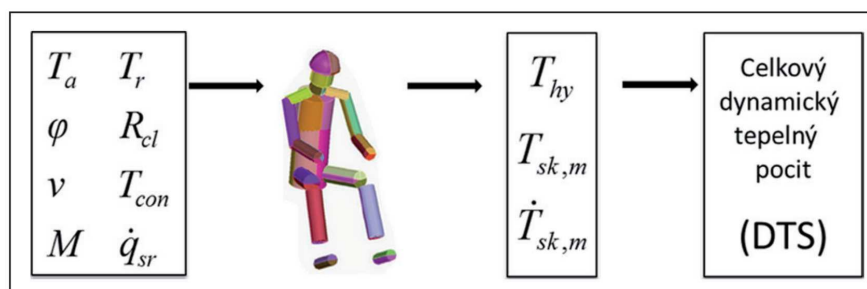
člen je závislý na parametru τ definovaného vztahem (3.6), který v sobě nese rychlost změny tepelného stavu a její trvání. Také rozlišuje, zda se tělo ohřívá nebo ochlazuje.

$$\tau = \begin{cases} 0,137 \cdot \frac{\max\left(\frac{\Delta T_{sk,m}}{dt}\right)}{(1+z)} \exp[-0,681(t - t_{max})] & \text{pro } \Delta T_{sk,m} > 0 \\ 0,114 \cdot \frac{dT_{sk,m}}{dt} & \text{pro } \Delta T_{sk,m} < 0 \end{cases} \quad (3.6)$$

Podrobnější informace o indexu DTS a jeho výpočtu lze nalézt ve výzkumné zprávě (Pokorný, 2014).

3.2 Vlastnosti modelu FMTK – VUT Brno

Model FMTK, který vznikl na VUT v Brně v rámci projektu Centrum kompetence automobilového průmyslu Josefa Božka, umožňuje určit tepelný stav člověka, a to za pomoci podmínek okolního prostředí, oblečení a činnosti člověka. Tento tepelný stav je vyjádřen fyzikálními veličinami, jako je například teplota, tepelný tok a produkce tepla metabolismem, nebo subjektivními veličinami jako například tepelný komfort (Pokorný 2014). Model vychází z Fialova fyziologického modelu a indexu DTS a byl otestován vůči komerčnímu kódu Theseus-FE (Pokorný, 2017). Na obr. 3.1 je zobrazeno schéma FMTK modelu včetně propojení termofyziologického modelu s modelem tepelného pocitu/komfortu. Podrobnější popis modelu lze nalézt např. v článku Implementace Fialova modelu tep. komfortu v Matlabu (Pokorný, 2014).



Obr. 3.1 Vstupně výstupní schéma FMTK modelu (Pokorný, 2015)

Vlevo na obrázku Obr. 3.1 jsou vypsány vstupní parametry, které se vkládají do FMTK modelu. Jedná se o: T_a – teplota vzduchu [$^{\circ}\text{C}$], T_r – střední radiační teplota [$^{\circ}\text{C}$], φ – relativní vlhkost² [-], R_{cl} – tepelný odpor oděvu [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$], v – rychlost proudění vzduchu [m/s], T_{com} – teplota okolního povrchu, který je v kontaktu s částí těla [$^{\circ}\text{C}$], M – celková

² Relativní vlhkost se u FMTK zadává jako desetinné číslo, tj. ne v procentech jako φ u modelu PMV/PPD.

metabolická produkce tepla [W], q_{sr} – intenzita slunečního záření dopadajícího na povrch člověka [W/m²].

Fyziologický model vyhodnocuje časový průběh teplot u jednotlivých vrstev tkání člověka, a to hlavně vnitřní teploty nebo teploty pokožky, jelikož právě ty určují tepelný pocit a komfort člověka. (Pokorný, 2014)

4 Tepelný manekýn

Poznatky o tepelném manekýnovi jsou převážně čerpány z práce (Psikuta, 2017).

První figuríny byly vyvinuty ve čtyřicátých letech dvacátého století americkou armádou pro testování uniforem a polní výbavy. Manekýn se skládal pouze z jedné zóny, která představovala celé tělo. Byl vyroben z mědi tak, aby se teplo rozneslo rovnoměrně po celém jeho povrchu. Současné figuríny mohou mít více jak 30 individuálně řízených zón a nemusí být už jen z kovu. Kov má sice vhodné tepelné vlastnosti, ale je těžký a tím i manekýn se stává hůře manipulovatelný. Každá zóna obsahuje topný článek a teplotní čidla, která jsou umístěna na povrchu figuríny. Topné články umožňují řídicímu softwaru ohřát figurínu na teplotu lidského těla a při tom se zaznamenává množství energie v každé zóně, které je na toto ohřátí potřeba. Vyhřívání může být umístěno buď na vnějším povrchu, v kůži nebo vevnitř figuríny.

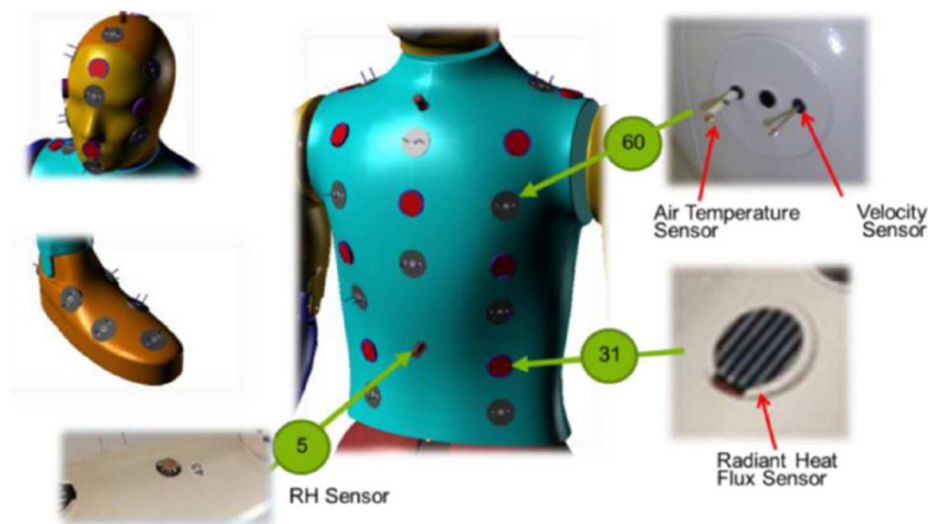
Úlohou manekýna je změřit vliv okolních podmínek na člověka, jako jsou časové a prostorové změny rychlosti pohybu vzduchu, okolní teplotu a přenos tepla kondukcí při styku manekýna s podlahou, s židlí či s jinými objekty, přenos konvekcí nebo radiací. Díky tomu manekýn přesně určuje vliv oděvu a ochranných pomůcek na přenos tepla z okolního prostředí. Nejlepší variantou pro měření tepelně izolačních vlastností oděvu, vyhodnocení přenosu tepla a tepelného komfortu je tepelný manekýn vyhřívající a měřící celým svým povrchem. Zejména při testování oděvů je velkou výhodou anatomický tvar těla, který umožňuje zohlednit vrstvy vzduchu mezi povrchem manekýna a oděvem, tak jako u oblečeného člověka.

Povrch manekýna může být vyrobený ze skleněných vláken, polystyrenu, karbonových vláken nebo z jiného tepelně vodivého materiálu. Uvnitř v každé měřicí zóně jsou teplotní senzory a pod manekýnovým povrchem topné články. Každá zóna je navržena tak, aby její zahřívání probíhalo, co nejrovnoměrněji, a z tohoto důvodu jsou topné elementy (dráty), pomocí kterých je povrch manekýna vyhříván, umístěny tak, aby mezi dráty byly co nejmenší mezery.

Manekýni mohou být vybaveni doplňkovými zařízeními, které napodobují lidské činnosti, jako je dýchání, pocení nebo chůze. Zajímavou variantou je také tzv. vodní manekýn Walter (Kar, 2007), který je naplněn vodou, čímž je zajištěna realistická tepelná kapacita systému.

Naopak, ale existují i zjednodušená řešení, kde existují simulátory reprezentující pouze některý ze segmentů. Např. potíci noha, ruka (UCS), nebo hlava, trup (EMPA). Pro testování bot, rukavic, čepic, outdoor vybavení (Thermetrics), či záda/pozadí pro tetování sedaček.

Další možností měření je použití figuríny, které jsou vybaveny pouze pasivními senzory. Tato měření se mohou dále zkombinovat v rámci virtuální simulace, které předpovídají teplotu pokožky a jádra, z čehož se vyhodnotí celkový komfort (Hepokoski, 2015). Figurínou s pasivními senzory je například HVAC manekýn (MTNW), který je zobrazen na Obr. 4.1. Skládá se z 60 párů senzorů teploty vzduchu a rychlosti proudění vzduchu, 31 sálavých senzorů tepelného toku, které je potřeba pro odvození lokální střední teploty sálání a 5 senzorů vlhkosti. Na VUT v Brně byl vyvinut zjednodušený systém HVAC, který je tvořen soustavou čidel ekvivalentní teploty, jimiž lze nahradit dražší měření pomocí tepelného manekýna. (Fojtlín, 2017)



Obr. 4.1 HVAC manekýn s pasivními senzory (MTNW)[3]

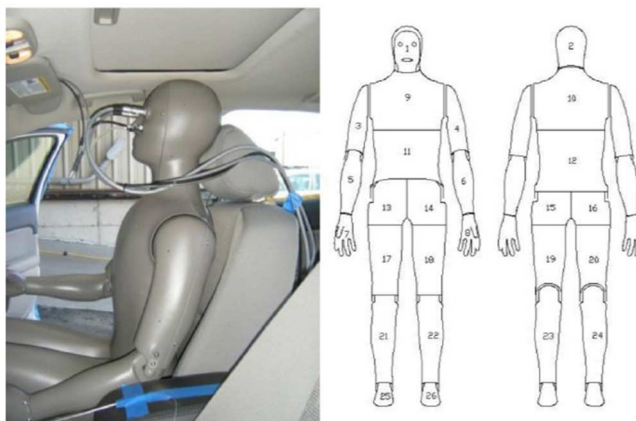
Výše uvedené systémy mohou fungovat samostatně nebo v kombinaci s termofyziologickým modelem aktivně řídicím funkci systému tak, aby se ještě více přiblížili reálnému termoregulačnímu chování člověka. Tento termofyziologický model může virtuálně zohlednit ty části simulátoru, které nejsou fyzicky dostupné. Jedná se o tzv. adaptivní manekýny.

4.1 Adaptivní tepelný manekýn

V současné době se používají dvě kategorie adaptivních manekýnů (zde označovaných jako tepelných simulátorů). První kategorií jsou aktivně regulované tepelné simulátory, které simulují lidské termoregulační funkce tím, že zajišťují teplo a vlhkost na povrchu jeho “pokožky”. Tento druh simulátoru se také nazývá adaptivní tepelná figurína. Druhou kategorií jsou pasivně regulované simulátory, které používají různé snímače zabudované do figuríny ve tvaru lidského těla (pasivní sensor) viz Obr. 4.1. (Hepokoski, 2015)

Předchozí studie ukázaly, že je možné propojit výpočetní termofyziologický model s potícím se tepelným manekýnem, který napodobuje dynamickou fyziologickou odezvu z hlediska přenosu citelného a latentního tepla. Teploty generované na povrchu pokožky manekýna umožňují odhadnout teplotu povrchu lidského těla, a tím předvídat pocit tepelného komfortu. Adaptivní figuríny mohou ve velké míře snížit potřebu testování s lidmi a je možnost poskytnout vyšší opakovatelnost testů. (Psikuta, 2017)

Adaptivním manekýnem je například Newton, který je vícezónový a měří teplotu pokožky pomocí drátového snímače plošně vloženého do povrchu každé zóny a generuje v konkrétní části teplo pomocí odporového ohřívače. Tento ohřívač je také zabudován do pláště figuríny. Pocení je zrealizováno pomocí sítě pórů na povrchu figuríny a materiálu, ze kterého je povrch manekýna vyrobený. Simulace termofyziologické reakce je realizována pomocí modulu ManikinPC, který umožňuje propojení manekýna s termofyziologickým modelem. (Hepokoski, 2015)



Obr. 4.2 Adaptivní tepelný manekýn Newton (Hepokoski, 2015)

4.1.1 Přehled adaptivních manekýnů

Informace této kapitoly jsou čerpány ze zdroje (Psikuta, 2017).

Tab. 4.1 Přehled dosud zvalidovaných manekýnů

| | Manekýn | Termofyziologický model | Propojovací metoda | Počet sektorů | Počet validací | Využití | Laboratoř |
|---|---------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------------------|---------------|----------------|-----------------------------|------------------------------------------------|
| 1 | Pokročilý automobilový manekýn (ADvanced Automotive Manikin) - ADAM | CFD | | 126 | 4 | Automobilový průmysl | Laboratoř pro obnovitelné zdroje energie v USA |
| 2 | Potící se tepelný válec – Torso | Fialův termoregulační model | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 1 | 11 | Textilní průmysl | Empa ve Švýcarsku |
| 3 | Potící se agilní tepelný manekýn (Sweating) | Fialův termoregulační model | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 22 | 2 | Oblečení a ochranné pomůcky | Empa ve Švýcarsku |

| | | | | | | | |
|---|----------------------------------|------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|----|-----------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| | Agile Manikin) - SAM | | | | | | |
| 4 | Tepelný potíčí se manekýn Newton | Manikin PC2 | Okrajové podmínky 1. typu (povrchová teplota pokožky) | 26/34 | 8 | Oblečení a ochranné pomůcky, automobilový průmysl, stavebnictví | Termometrie a termoanalýtika v USA |
| 5 | Tepelný potíčí se manekýn Newton | Vylepšený termoregulační model podle Xu a kol. | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 38 | 3 | Oblečení | Decathlon ve Francii |
| 6 | Tepelný potíčí se manekýn Newton | Vylepšený termoregulační model podle Tanabeho a kol. | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 20 | 1 | Oblečení a ochranné pomůcky | Univerzita Tsinghua v Číně |
| 7 | Therminator | Fialův termoregulační model | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 24 | 2 | Stavebnictví | Univerzita Aalto ve Finsku |
| 8 | Potíčí se tepelná hlava | Fialův termoregulační model | Okrajové podmínky 2. typu (tepelný tok) | 4 | 10 | Pokrývky hlavy | Empa ve Švýcarsku |

V tab. (4.1) je vyobrazen seznam dosud vyvinutých termofyziologických simulátorů za posledních 20 let. V současnosti je k dispozici pouze manekýn Newton, který je spojen s modelem ManikinPC2. Jeho předchůdce, manekýn ADvanced Automotive Manikin (ADAM) (č.1 v tabulce), byl vyvinut pro Americkou Národní laboratoř obnovitelných zdrojů pro komfortní testování. Je to multisegmentální potíčí se figurína, která je řízená pomocí výpočetní dynamiky tekutin (CFD), která je začleněná do termofyziologického modelu. ADAM je primárně určen k testování komfortu ve vozidlech a byl validován v ustáleném stavu v rozsahu teplot souvisejících s tepelným komfortem (23.2–38.0 °C). V průběhu validace manekýn prokázal rozložení teplot na povrchu těla, které je srovnatelné s člověkem. Avšak ve srovnání s lidským tělem byly hlášeny odchylky v předpokládané teplotě jádra až o 0,6 °C a při předpokládaných místních teplotách pokožky odchylky až 4,2 °C. Za přechodných podmínek byly rozdíly teplot jádra ještě vyšší.

Další vývoj simulátoru se uskutečnil v roce 2005 ve Švýcarských federálních laboratořích pro materiálové vědy a technologie (Empa). Tentokrát byl proces vývoje rozdělen, kvůli snadnějšímu odstraňování problémů, na několik částí. Nejprve byl vyvinut jeden simulátor jménem Torso s pouze jedním sektorem ve tvaru válce na základě Fialova modelu. Pouze jeden sektor umožňuje pochopit dynamiku simulačního procesu kombinovaného s lidskými tepelnými vlastnostmi. Simulátor byl validován porovnáním s výsledky testů na lidech a ukázalo se, že teplota jádra a pokožky s menšími odchylkami sedí. Tento test byl uskutečněn v prostředí s teplotou v rozmezí 15–38 °C pro ustálené i přechodné podmínky. Další ověření systému se uskutečnilo za použití ochranného oděvu, přičemž výsledky byly stejně dobré jako u předchozího ověřování, a to navzdory skutečnosti, že jednosektorový simulátor představoval celé lidské tělo, což omezilo přesnost termofyziologického modelu tím, že byla určena na všech částech těla stejná výměna tepla mezi tělem a okolím.

Dalším krokem ve vývoji bylo spojit se stejným termofyziologickým modelem multisektorovou figurínu (č. 3 v tabulce). Změna z ustáleného měření s homogenní teplotou povrchu manekýna na dynamické měření s proměnlivou teplotou vyvolala další problémy. Obtížně se určovala výměna tepla vedením a konvekcí mezi sousedními částmi pláště uvnitř dutých částí těla, které nejdou měřit senzory figuríny. Nakonec kvůli tomu manekýn nebyl schopen přesně fungovat při proměnlivé teplotě povrchu např. během vazomotorické reakce nebo při tepelných ztrátách za použití oděvu.

V roce 2009 bylo dosaženo sjednocení aktivního fyziologického a komfortního modelu do potíciho se manekýna jménem Newton (č. 4 v tabulce). V Newtonovi byl použit software s názvem Manikin PC² a poprvé došlo k propojení s manekýnem, který jako vstupní informace do modelu používá povrchovou teplotu.

Redortier a kol., od firmy na sportovní oděvy Decathlon, udělal další pokus a spojil Newtona s termoregulačním modelem Xu a kol. (č. 5 v tabulce). Tepelný tok byl tentokrát měřen pomocí externích měničů, což umožnilo spolehlivost výsledků měření i v přechodných podmínkách. Systém byl také nastaven na některé sportovní scénáře s různými typy oblečení.

Dalším příkladem (č. 6 v tabulce), kde figuroval Newton, je jeho spojení s víceuzlovým modelem jménem 65MN, který byl vyvinut na univerzitě v Tshinghua. Tento model byl však prověřen pouze jednou experimentální studií.

Figurína Therminator (č. 7 tabulka) byla dalším typem tepelného manekýna. Figurína byla propojena s novým modelem, založeným na zdokonaleném multisegmentovém modelu Gagge, který byl vyvinut ve Finsku na univerzitě Aalto. Systém se primárně používal pouze k odhadu lokální a celkové ekvivalentní teploty za různých vnitřních podmínek.

Dalším manekýnem v pořadí byla devítizónová figurína tvořená pouze jednou částí a to hlavou (č. 8 tabulka). Tato figurína byla propojena s termofyziologickým modelem podle Fialy. Manekýn byl tvořen pouze hlavou, jelikož je to jediná část těla, která není chráněná oděvem a tím pádem je bezprostředně vystavená vlivům okolí. Zbytek těla bylo nutné simulovat virtuálně. Z tohoto důvodu musí model současně přijímat různé okrajové podmínky, jako jsou povrchové tepelné ztráty hlavy a virtuální okolní podmínky pro zbytek těla. Manekýn reprodukoval povrchovou teplotu a stupeň pocení uložené v termofyziologickém modelu v reálném čase zahrnující dynamické změny na hlavě. Bylo možné pečlivě simulovat jádro a průměrnou teplotu pokožky za vystavení širokého spektra podmínek.

Z výše uvedeného přehledu vyplývá, že nejpoužívanějším adaptivním manekýnem je Newton, proto je mu věnována ještě samostatná podkapitola pro uvedení více detailů. A také proto, že VUT Brno vlastní tepelného manekýna, který byl použit v rámci řešení této diplomové práce, viz kapitola 4.2.

4.2 Tepelný manekýn Newton – VUT Brno

Newton je tepelný manekýn používaný po celém světě k testování oblečení a životního prostředí. Je dostupný v provedení západního a asijského typu muže, s pocítm mechanismem nebo bez něj. Manekýn je konstruován z tepelně vodivého kompozitního karbon-epoxidového pláště s vloženým odporovým vodičem a sensorovými prvky. Existují modely s 20, 26 nebo 35 zónami se softwarem pro chůzi, dýchání a lidský komfort, přičemž je vyvinuto i příslušenství pro ženy. Standardní systémy Newton obsahují figurínu, řídicí elektroniku, přenosný počítač a software ThermDAC. (Thermetrics, a)

K propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem byl použit manekýn Newton, který je propojen s modelem, který má název ManikinPC. Tento model umožňuje ovládat manekýna při různých činnostech, které simulují metabolismus člověka během spánku, cvičení, odpočívání nebo práci (Thermetrics, a). Se zadáním činnosti se do manekýna nahraje odpovídající metabolický výkon. Newton v kombinaci s modelem ManikinPC funguje jako vícezónový senzor, který měří tepelné ztráty na povrchu každého segmentu, reaguje na tepelné prostředí modelu a poskytuje mu reálné údaje. Kožní senzory na Newtonovi měří teplotu pokožky, které se používají k určení vazodilatace a vazokonstrikce. ManikinPC reaguje v reálném čase s odpovídající tepelnou odezvou na vstupy a napodobuje tím chování lidského těla. Díky tomu, že Newton dokáže v reálném čase určit tepelné ztráty těla v určitých situacích, může software ManikinPC vyhodnotit tepelný komfort člověka. Pomocí studie (Blood, 2010) se zjistilo, že Newton regulovaný softwarem ManikinPC může být použit pro napodobení lidské fyziologické odezvy za určitých podmínek.

4.2.1 Princip fungování

Množství tepla, které je dodáváno manekýnovi, je možné řídit třemi způsoby. Prvním způsobem a nejsložitějším je komfortní režim, kde se využívá model komfortu index DTS či model PMV, který je součástí normy ISO 7730. Režim se aplikuje na manekýna a řídicí software díky němu vypočítává tepelné ztráty, které pomáhají určit komfort prostředí. K výpočtu je třeba znát povrch manekýna a předpokládaný výkon metabolismu. Okolní faktory, jakými jsou druh oděvu, teplota vzduchu atd., jsou zadány uživatelem. Druhou metodou je řízení pomocí definovaného konstantního tepelného toku. Na figuríně se nastaví konstantní výkon metabolismu a měří se teplota povrchu jednotlivých segmentů. U poslední nejpoužívanější metody je povrchová teplota udržována na konstantní hodnotě a výkon se buď snižuje nebo zvyšuje v závislosti na podmínkách prostředí, tj. reguluje se elektrický příkon v topných elementech dle potřeby. Konstantní teplota se může nastavit buď pro celou figurínu nebo se může pro každou zónu nastavit konkrétní teplota. (Psikuta, 2017)

Metoda komfortního režimu je považována za nejpřesnější reprezentaci skutečné distribuce tepla v lidském těle. Režim tepelného toku se používá hlavně při vyšších okolních teplotách (více jak 34 °C). Ovšem způsob řízení pomocí konstantní teploty je jednodušší řešení pro opakované laboratorní testy oděvů a vyhodnocování komfortu dle ISO 14505-2. (Psikuta, 2017)

V režimu konstantní teploty se předpokládá, že celková elektrická energie dodaná do topného systému manekýna se rovná ztrátě tepla do okolního prostředí. Tepelná ztráta jednotlivých segmentů manekýna je počítána podle rovnice (4.1),

$$q_{segment} = \frac{Q_{segment}}{S_{segment} \cdot (T_{surf\ segment} - T_a)} \quad (4.1)$$

kde $Q_{segment}$ je tepelný výkon dané části manekýna (W), $S_{segment}$ je plocha segmentu (m^2), $T_{surf\ segment}$ a T_a jsou povrchová a okolní teplota ($^{\circ}C$). Celková tepelná ztráta manekýna q_{total} je potom průměr tepelných ztrát jednotlivých segmentů viz rovnice (4.2), kde n je počet segmentů. (Psikuta, 2017)

$$q_{total} = \frac{(q_{segment} \cdot S_{segment})}{\sum_n S_{segment}} \quad (4.2)$$

Z toho vyplývá, že touto metodou lze měřit pouze tepelné ztráty, ale ne tepelné zisky, které by byly dodávány z okolního prostředí. Tato skutečnost je dána tím, že v manekýnovi jsou pouze topné elementy nikoliv vlastní chladicí okruh. V současnosti (dle informací u konference 12I3M - <https://www.empa.ch/web/12i3m>) probíhá výzkum a vývoj nové generace Newtona, který bude opatřen aktivním chladícím systémem, který by simuloval tepelné zisky, ovšem cena tohoto systému bude vysoká.

Pokud je manekýn vybavený potícím mechanismem, je na povrch pokožky přiváděná voda, která simuluje pocení a tím dochází k tepelným ztrátám vypařováním. Manekýn, který má potící mechanismus, zajišťuje dobré výsledky i za teplých podmínek, kde je tělo chlazeno pocením a lze ho tedy dobře propojit s termofyziologickým modelem. Více informací viz (Psikuta, 2017).

4.2.2 Vlastnosti Newtona (VUT Brno)

Jak již bylo v úvodu naznačeno, tepelný manekýn Newton, který je k dispozici na VUT v Brně, je 34zónová vyhřívaná figurína bez potící kůže a chodícího mechanismu. Rovněž byl tento manekýn zakoupen bez komfortního modulu a termoregulačního software ManikinPC. Tj. manekýn byl zakoupen v základní konfiguraci, přičemž byl k němu dále přikoupen dýchací mechanismus.

**Technické parametry:** (Energetické fórum, 2001)

- Tvar průměrné lidské postavy
- Měření v rozsahu okolních teplot -20 až +50 °C
- 34 nezávisle regulovatelných zón
- 34 nezávisle měřitelných zón – povrchová teplota, tepelný tok
- 2x čidlo teploty vzduchu
- 1x čidlo relativní vlhkosti
- 1x čidlo pro měření rychlosti vzduchu
- Dýchací mechanismus
- Filtrační zařízení pro monitoring vdechovaných částic

5 Termofyziologický simulátor

Cílem této práce je vytvořit funkční propojení tepelného manekýna Newton (VUT Brno) s modelem FMTK (VUT Brno) a otestovat jej.

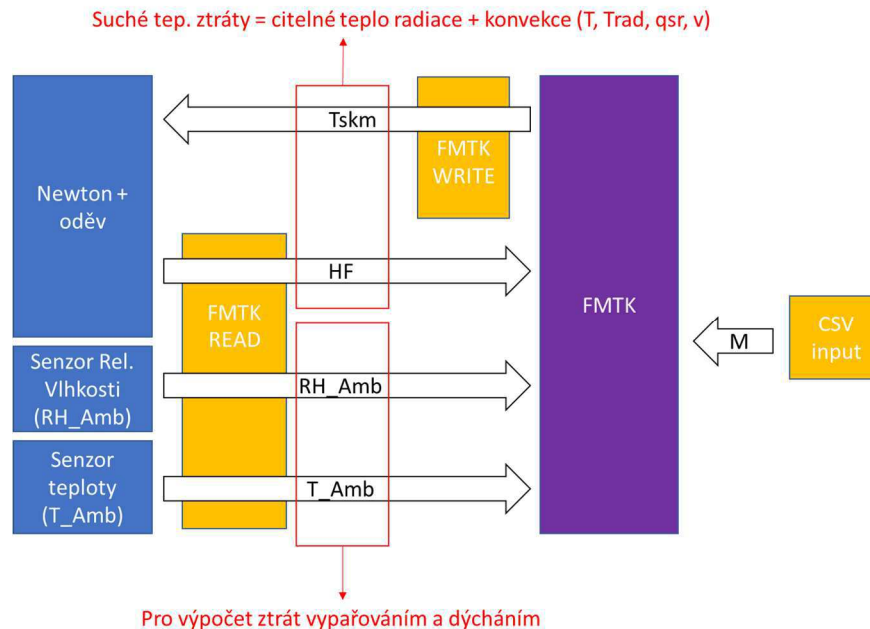
V této kapitole je popsáno technické řešení, jakým způsobem simulátor funguje a v kapitole 6 pak jsou uvedeny výsledky testů. V podkapitolách jsou podrobněji rozepsány části, které byly nově vytvořeny v rámci této diplomové práce.

Postup prací na vytvoření termofyziologického Simulátoru lze rozdělit do několika etap:

- I. Zprovoznit model FMTK pro simulace v reálném čase
Jelikož samotný zdrojový kód modelu FMTK není veřejně dostupný, tato část nebyla předmětem diplomové práce. Již hotové řešení bylo poskytnuto vedoucím této práce ve formě samospustitelné aplikace využívající MCR knihovnu verzi 2018b.
- II. Umožnit řízení tepelného manekýna v reálném čase
Tepelný manekýn Newton je řízen softwarem ThermDac 8.2, který je komerčním produktem výrobce (tj. firmy) Thermetrics a je součástí zakoupeného manekýna na VUT v Brně. Pro to, aby tepelný manekýn bylo možné kontrolovat v reálném čase přes .csv soubory, je nutné nastavení tzv. DeviceMap.
- III. Tvorba propojení manekýna Newton s modelem FMTK,
Pro funkčnost propojení bylo nutné udělat drobné změny ve zdrojovém kódu FMTK. Část v modelu, pro výpočet tepelných ztrát radiací, konvekce, sol. zářením a vedením, byla nahrazena přímým dosazením měřených tepelných toků z manekýna (tato část ale byla poskytnuta již jako hotové řešení). Byly ovšem potřeba, a v rámci této diplomové práce byly vytvořeny, nové kódy v Matlabu pro předávání dat mezi hotovým FMTK modelem a softwarem ThermDac ovládajícího Newtona.
 - RT_FMTK_WRITE.m – předávání tzv. set pointů, (povrchové teploty počítané modelem) do ovládacího software ThermDac prostřednictvím souboru FMTK_WRITE.csv a aktualizace tohoto souboru
 - RT_FMTK_READ_HF.m – načtení výše uvedených tep. ztrát [W/m^2] z Newtona do modelu
 - RT_FMTK_READ_AMB.m – načtení dat ze sond monitorující okolní prostředí (T_AMB1, T_AMB2, windspeed, RH_AMB) do modelu
 - RT_FMTK_READ_BC – načtení zbývajících okrajových podmínek, viz kapitola 5.3
 - RT_PLOT.m – vykreslení povrchových teplot v reálném čase do grafu, pro kontrolu běhu Simulátoru
- IV. Monitorování propojení v reálném čase
Tj. bylo potřeba zajistit online monitorování souborů FMTK_READ.csv a FMTK_WRITE.csv. Pro tyto účely se osvědčil rozšířený textový editor Notepad++.
- V. Otestování hotového řešení (viz kapitola 6)

5.1 Propojení Newtona s FMTK modelem

Na obr. 5.1 je znázorněno základní schéma propojení tepelného manekýna s termofyziologickým modelem, kdy data jsou předávána pomocí csv souborů FMTK_READ, FMTK_WRITE a doplněny o vstupní data z Input (Timetable.xlsx).



Obr. 5.1 Schéma znázorňující způsob propojení manekýna s modelem

Ze schématu vyplývá, že pro samotnou funkci Simulátoru je zásadní mít tepelné toky měřené manekýnem, definovanou metabolickou produkci tepla M (v závislosti na vykonávané činnosti) a pro výpočet ztrát vypařováním a dýcháním je potřeba sledovat teplotu a relativní vlhkost okolního vzduchu. Rychlost proudění ani tepelné odpory oděvu není nutné znát, neboť jsou zahrnuty již v měřených tepelných tocích.

5.1.1 Device map – možnosti řízení

Aby bylo možné řídit ThermDAC, bylo potřeba upravit soubor Device map, ve kterém se definuje jeho grafika, definice skupin, segmentů a jiné.

Název souborů:

- Originální - device.map.P445.Nobreath.22Oct2012.xls
- Nový - device.map.P445.Nobreath_Dolezalova.22Oct2018.xls

V souboru device.map byly pozměněny následující parametry:

| | |
|-------------------------------|------------------------------------|
| [Application Settings] notes: | <i>Sampling Rate is in seconds</i> |
| Sampling Rate | 2 |
| Use File IO | TRUE FALSE |
| IO Write Interval | 5000 |
| IO Read Interval | 5000 |
| IO Write Path | c:\FMTK 1.8. _TFMTK_READ.csv |

| | |
|----------------------------------|---------------------------------------|
| IO Read Path | <i>c:\FMTK 1.8.6_T\FMTK_WRITE.csv</i> |
| File IO States | <i>Model Control</i> |
| Model Control States | <i>Model Control</i> |
| Model Control Save Interface | <i>Manikin Zones</i> |
| Model Control Save From Variable | <i>Temp Setpoint</i> |
| Model Control Save To Variable | <i>Average Surface Temp</i> |

5.1.2 FMTK READ, FMTK WRITE

FMTK READ a FMTK WRITE jsou datové soubory obsahující hodnoty pro řízení modelu FMTK a manekýna. Soubor FMTK READ slouží k zapisování dat z manekýna a následnému načítání do modelu, kde tato data slouží jako vstupní podmínky. Soubor obsahuje jména částí těla (Device Names), teplotu (Surface Temp) a tepelný tok (Heat Flux Generated) jednotlivých částí, okolní teplotu (Avg Amb Temp) a relativní vlhkost vzduchu (RH). Parametry okolního vzduchu jsou měřeny pomocí senzorů umístěných v blízkosti manekýna. Parametry z tohoto souboru model použije ke svému výpočtu a výsledné hodnoty napíše do souboru FMTK WRITE, které udávají manekýnovi, na jaké teploty se má zaregulovat. V souboru FMTK WRITE také najdeme jména částí manekýna (Device Names), jejich teplotu (Temp Setpoint) a tepelný tok (HF Setpoint).

V příloze jsou vloženy skripty těchto souborů. Ukázky tabulky hodnot, které se načítaly do modelu a zpětně z modelu zapisovaly, jsou znázorněny na Obr. 5.2 a Obr. 5.3.

```

1 ,Average Surface Temp,Heat Flux Generated,Avg Amb Temp,RH,
2 Face,4.433848,5.817708,,,
3 Head,0.3847255,37.64104,,,
4 R Up Arm Fr,33.9798,10.66139,,,
5 R Up Arm Bk,7.072501,6.701831,,,
6 L Up Arm Fr,-36.79917,-22.62571,,,
7 L Up Arm Bk,-11.08573,5.554815,,,
8 R Forearm Fr,-28.04359,-35.04343,,,
9 R Forearm Bk,32.49746,10.30545,,,
10 L Forearm Fr,-24.22643,-64.18724,,,
11 L Forearm Bk,-15.78825,2.729222,,,
12 R Hand,3.395872,-70.54628,,,
13 L Hand,-31.46474,68.24786,,,
14 Upper Chest,16.11798,14.69361,,,
15 Shoulders,48.56528,15.37323,,,
16 Stomach,18.97462,15.75494,,,
17 Mid Back,4.411637,17.62665,,,
18 Waist,-13.13533,14.04783,,,
19 Lower Back,36.95396,-14.51134,,,
20 R Up Thigh Fr,1.141666,14.15721,,,
21 R Up Thigh Grd,-20.41273,1.091026,,,
22 R Up Thigh Bk,15.44922,5.990782,,,
23 L Up Thigh Fr,-12.12473,-5.865095,,,
24 L Up Thigh Grd,-4.039891,-26.30717,,,
25 L Up Thigh Bk,-23.90135,-2.458124,,,
26 R Lwr Thigh Fr,-9.112727,-9.837532,,,
27 R Lwr Thigh Bk,-20.03387,-46.57987,,,
28 L Lwr Thigh Fr,-68.88275,7.65589,,,
29 L Lwr Thigh Bk,17.73581,4.025209,,,
30 R Calf Fr,-13.87559,-5.741006,,,
31 R Calf Bk,14.91628,5.020606,,,
32 L Calf Fr,-12.65045,40.57503,,,
33 L Calf Bk,30.25493,2.849253,,,
34 R Foot,1.308733,19.61429,,,
35 L Foot,-78.78326,2.382876,,,
36 Ambient,,,,-9.051188,-4.917096,
37

```

Obr. 5.2 Csv soubor FMTK READ. Soubor pro načtení dat z Newtona do modelu

```

1 Device Names,Temp Setpoint,HF Setpoint
2 Face,24.10,0.00
3 Head,24.10,0.00
4 R Up Arm Fr,24.10,0.00
5 R Up Arm Bk,24.10,0.00
6 L Up Arm Fr,24.10,0.00
7 L Up Arm Bk,24.10,0.00
8 R Forearm Fr,24.10,0.00
9 R Forearm Bk,24.10,0.00
10 L Forearm Fr,24.10,0.00
11 L Forearm Bk,24.10,0.00
12 R Hand,24.10,0.00
13 L Hand,24.10,0.00
14 Upper Chest,24.10,0.00
15 Shoulders,24.10,0.00
16 Stomach,24.10,0.00
17 Mid Back,24.10,0.00
18 Waist,24.10,0.00
19 Lower Back,24.10,0.00
20 R Up Thigh Fr,24.10,0.00
21 R Up Thigh Grd,24.10,0.00
22 R Up Thigh Bk,24.10,0.00
23 L Up Thigh Fr,24.10,0.00
24 L Up Thigh Grd,24.10,0.00
25 L Up Thigh Bk,24.10,0.00
26 R Lwr Thigh Fr,24.10,0.00
27 R Lwr Thigh Bk,24.10,0.00
28 L Lwr Thigh Fr,24.10,0.00
29 L Lwr Thigh Bk,24.10,0.00
30 R Calf Fr,24.10,0.00
31 R Calf Bk,24.10,0.00
32 L Calf Fr,24.10,0.00
33 L Calf Bk,24.10,0.00
34 R Foot,24.10,0.00
35 L Foot,24.10,0.00
36 Head Post,24.10,0.00
37

```

Obr. 5.3 Csv soubor FMTK WRITE. Soubor pro načtení dat z modelu do Newtona

Aby se parametry do modelu načítaly automaticky, bylo potřeba použít program Notepad++, který umožňuje průběžnou aktualizaci hodnot. Aktualizace se zapne pomocí tlačítka monitorování změn (Obr. 5.4).



Obr. 5.4 Notepad++ (tlačítko Monitorování změn)

Alternativní možnosti

Pokud by nefungovalo aktivní řízení přes Device map, je možné pomocí Matlabu vytvořit funkci, která by umožnila zautomatizování kliknutí myší na příslušná tlačítka.

Spuštění programu ThermDAC

Aby propojení fungovalo, je potřeba zapnout program pro řízení manekýna ThermDAC. Po zapnutí programu se zvolí režim NO BREATHING, jelikož k propojení není používána funkce dýchání. V horní liště záložka File IO – Start.

5.1.3 Úpravy kódu

Základní struktura zdrojového kódu FMTK je následující:

Run.m %spuštění aplikace

GUI.m %grafické rozhraní FMTK aplikace, včetně vizualizace výsledků (grafy, apod.)

FIALA.m %spuštění aplikace

READ %pokud je potřeba aktualizovat koeficienty modelu

INIT %inicializace proměnných

MAIN %Miller

END %export dat do .csv respektive .xlsx souborů

%-----

Proto, aby FMTK model mohl fungovat v reálném čase, bylo nutné změnit:

- Způsob načítání okrajových podmínek, které v původní verzi bylo vždy před simulací. Po změně kódu `RTN=1; %RT Newton` – Načítání dat z Newtona, je aktivován nově vytvořený skript `RT_FMTK_READ_BC`, který zajišťuje načítání okrajových podmínek v každém časovém kroku `RT_FMTK_WRITE`, který zapisuje teploty FMTK jako set pointy Newtonovi.
- Nahradit výpočet tepelné výměny s okolím (radiace, konvekce) měřeným tep. tokem z Newtona a také uvažovat měřenou teplotu vzduchu a jeho relativní vlhkost. Tj. pokud

W_NT_FH==1;, aktivují se nově vytvořené skripty RT_FMTK_READ_AMB a RT_FMTK_READ_HF.

- Vykreslovat výsledná data v průběhu simulace viz skript RT_PLOT

Více detailů týkajících se úpravy jádra zdrojového kódu MAIN.m a tvorby nových skriptů, jejichž tvorba byla předmětem řešení této diplomové práce jsou uvedeny v Příloze D.

Pro distribuci jádra FMTK modelu byl použit Deploytools nástroj, který ze zdrojového kódu zkompiluje samospustitelnou aplikaci FMTK.exe, pro jejichž spuštění si uživatel musí stáhnout příslušnou MCR knihovnu. Tímto je možné sdílet model s ostatními uživateli, aniž by bylo nutné předat zdrojový kód. Podobným způsobem byl použit i model PMV-PPD, který byl převzat o Barbory Kopečkové ve formě p-kódu.

5.1.4 Přiřazení jednotlivých částí modelu FMTK a tep. manekýna

Přiřazení jednotlivých částí modelu FMTK a tep. manekýna je zásadní pro správnou funkci Simulátoru. Propojení bylo provedeno pro níže uvedené části prostřednictvím matic SF_N a N_SF. Plochy jsou důležité pro přepočítání z W na W/m².

FMTK WRITE - SF_N

FMTK READ N_SF

| N | NEWTON | SF_N (FM) | Plocha | SF | FialaNames | N_SF | Plocha |
|----|----------------|---------------|--------|----|--------------------|------|--------|
| 1 | Face | [2,3] | 0,0436 | 1 | head-head | 2 | 0,0642 |
| 2 | Head | 1 | 0,0939 | 2 | head-forehead | 2 | 0,0038 |
| 3 | R Up Arm Fr | [18,20] | 0,0519 | 3 | face-A | 1 | 0,0281 |
| 4 | R Up Arm Bk | 19 | 0,0317 | 4 | neck-anterior | 1 | 0,0150 |
| 5 | L Up Arm Fr | [24,26] | 0,0519 | 5 | neck-posterior | 1 | 0,0150 |
| 6 | L Up Arm Bk | 25 | 0,0317 | 6 | R_shoulder-A | 14 | 0,0084 |
| 7 | R Forearm Fr | [21,23] | 0,0384 | 7 | R_shoulder-B | 14 | 0,0084 |
| 8 | R Forearm Bk | 22 | 0,0264 | 8 | L_shoulder-A | 14 | 0,0084 |
| 9 | L Forearm Fr | [27,29] | 0,0384 | 9 | L_shoulder-B | 14 | 0,0084 |
| 10 | L Forearm Bk | 28 | 0,0264 | 10 | thorax-inferior | 13 | 0,0207 |
| 11 | R Hand | [30,31] | 0,0461 | 11 | thorax-anterior | 13 | 0,1033 |
| 12 | L Hand | [32,33] | 0,0461 | 12 | thorax-inferior | 13 | 0,0207 |
| 13 | Upper Chest | 11 | 0,092 | 13 | thorax-posterior | 16 | 0,1033 |
| 14 | Shoulders | [4,5,6,7,8,9] | 0,0793 | 14 | abdomen-inferior | 15 | 0,0364 |
| 15 | Stomach | 15 | 0,1019 | 15 | abdomen-anterior | 15 | 0,1821 |
| 16 | Mid Back | [10,12,13] | 0,0634 | 16 | abdomen-inferior | 15 | 0,0364 |
| 17 | Waist | 16 | 0,0468 | 17 | abdomen-posterior | 18 | 0,1821 |
| 18 | Lower Back | 14 | 0,0503 | 18 | R_up_arm-anterior | 3 | 0,0314 |
| 19 | R Up Thigh Fr | 15 | 0,0487 | 19 | R_up_arm-posterior | 4 | 0,0314 |
| 20 | R Up Thigh Grd | 17 | 0,0309 | 20 | R_up_arm-inferior | 4 | 0,0209 |
| 21 | R Up Thigh Bk | 17 | 0,0274 | 21 | R_lo_arm-anterior | 7 | 0,0314 |
| 22 | L Up Thigh Fr | 15 | 0,0487 | 22 | R_lo_arm-posterior | 8 | 0,0314 |
| 23 | L Up Thigh Grd | 17 | 0,0309 | 23 | R_lo_arm-inferior | 8 | 0,0209 |
| 24 | L Up Thigh Bk | 17 | 0,0274 | 24 | L_up_arm-anterior | 5 | 0,0314 |
| 25 | R Lwr Thigh Fr | [34,36] | 0,1032 | 25 | L_up_arm-posterior | 6 | 0,0314 |
| 26 | R Lwr Thigh Bk | 35 | 0,0488 | 26 | L_up_arm-inferior | 6 | 0,0209 |
| 27 | L Lwr Thigh Fr | [37,39] | 0,1032 | 27 | L_lo_arm-anterior | 9 | 0,0314 |
| 28 | L Lwr Thigh Bk | 38 | 0,0488 | 28 | L_lo_arm-posterior | 10 | 0,0314 |
| 29 | R Calf Fr | [40,42] | 0,0823 | 29 | L_lo_arm-inferior | 10 | 0,0209 |
| 30 | R Calf Bk | 41 | 0,0528 | 30 | R_hand-hand back | 11 | 0,0220 |
| 31 | L Calf Fr | [43,45] | 0,0823 | 31 | R_hand-hand palm | 11 | 0,0220 |

| | | | | | | |
|------------------------------------------|---------|--------|---------------------------------------|-----------------------|--------|--------|
| 32 L Calf Bk | 44 | 0,0528 | 32 L_hand-hand back | 12 | 0,0220 | |
| 33 R Foot | [46,47] | 0,0596 | 33 L_hand-hand palm | 12 | 0,0220 | |
| 34 L Foot | [48,49] | 0,0596 | 34 R_up_leg-anterior | 25 | 0,0453 | |
| Celková plocha Newtona [m ²] | | | 1,8676 | 35 R_up_leg-posterior | 26 | 0,0453 |
| | | | 36 R_up_leg-inferior | 26 | 0,0302 | |
| | | | 37 L_up_leg-anterior | 27 | 0,0453 | |
| | | | 38 L_up_leg-posterior | 28 | 0,0453 | |
| | | | 39 L_up_leg-inferior | 28 | 0,0302 | |
| | | | 40 R_lo_leg-anterior | 29 | 0,0453 | |
| | | | 41 R_lo_leg-posterior | 30 | 0,0453 | |
| | | | 42 R_lo_leg-inferior | 30 | 0,0302 | |
| | | | 43 L_lo_leg-anterior | 31 | 0,0453 | |
| | | | 44 L_lo_leg-posterior | 32 | 0,0453 | |
| | | | 45 L_lo_leg-inferior | 32 | 0,0302 | |
| | | | 46 R_feet-instep | 33 | 0,0264 | |
| | | | 47 R_feet-step | 33 | 0,0264 | |
| | | | 48 L_feet-instep | 34 | 0,0264 | |
| | | | 49 L_feet-step | 34 | 0,0264 | |
| | | | Celková plocha FMTK [m ²] | | 1,8557 | |

5.2 Možnosti řízení

Řízení teploty

Při vývoji FMTK modelu bylo nutné, aby model fungoval „na sucho“ (bez tepelného manekýna) – bylo možné spustit simulaci v reálném čase na základě parametrů viz Tab. 5.1. Při testech s tepelným manekýnem byly parametry okolí (teplota vzduchu, rad. teplota, vlhkost, rychlost proudění a intenzita slunečního záření) nahrazeny měřenými veličinami a to tep. tokem odcházejícím z povrchu tepelného manekýna (HF) a měřením relativní vlhkosti pomocí čidel, které jsou dodávány s manekýnem. Tzn. teploty, (slun. záření) a rychlost proudění byly kompletně zahrnuty do tepelného toku (HF). Oděv taky není potřeba zohledňovat, protože je též zahrnut přímo v tepelném toku. Jediné, co zbývá, je nastavení produkce tepla metabolismem (aktivita). Tlak vzduchu slouží k výpočtu nasycení vodních par (předpokládalo se, že je atmosférický) – je to zanedbatelné (nemá to takový vliv).

Řízení teploty v simulátoru je možné dvěma způsoby:

- s využitím souboru okrajových podmínek, ze kterého si model bere informace (bez čidel RH, T)
- s využitím tepelných toků a senzorů, které se nachází v blízkosti Newtona (ve vstupních souborech zůstává pouze definice aktivita a poloha manekýna)

Testování probíhá druhým způsobem, a to s využitím senzorů.

5.3 Vstupně/výstupní rozhraní

V Tab. 5.1 je znázorněna ukázka vstupních okrajových podmínek a v Tab. 5.2 ukázka výstupního rozhraní Simulátoru, který využívá FMTK model.

Tab. 5.1 Soubor vstupních okrajových podmínek

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|-----|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 27 | 27 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 60 | 27 | 27 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 65 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 90 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |

V souboru se nachází následující činitelé:

- *Tsur* [°C] – Teplota okolního vzduchu
- *Trad* [°C] - Teplota okolních stěn
- *RH* [-] - Relativní vlhkost vzduchu, v FMTK je zadávána jako desetinné číslo
- *v* [m/s] - Rychlost vzduchu
- *qsr* [W/m²] – Intenzita slunečního záření
- *Psur* [Pa] - Tlak okolního vzduchu
- *act* [met] - Aktivita vykonávané činnosti
- *Posture* [stn/sit] - Poloha (leh/sed)
- *dress* [name] - Oděv (kód oděvu definovaný souborem Clothing.xls)

Tab. 5.2 Ukázka výstupního souboru Simulátoru

| t [s] | t [min] | Tsur | RH | act | posture | iclo | T_re | Tskm_A | DTS |
|-------|---------|------|-----|-------|---------|------|------|--------|------|
| [s] | [min] | [°C] | [-] | [MET] | [-] | [-] | [°C] | [°C] | [-] |
| 0 | 0.0 | 30.1 | 0.3 | 0.8 | 1 | 1 | 36.8 | 34.3 | -1.4 |
| 20 | 0.3 | 30.1 | 0.3 | 0.8 | 1 | 1 | 36.8 | 34.3 | -2.0 |
| 40 | 0.6 | 30.2 | 0.3 | 0.8 | 1 | 1 | 36.8 | 34.3 | -2.1 |
| 60 | 1.0 | 30.2 | 0.3 | 0.8 | 1 | 1 | 36.8 | 34.3 | -2.1 |
| 80 | 1.3 | 30.3 | 0.3 | 0.8 | 1 | 1 | 36.8 | 34.3 | -2.1 |

Pro testování simulátoru byl samostatně použit model PMV/PPD s obdobným vstupním rozhraním viz tab. 5.1, kde jsou totožné parametry $T_{sur} = t_a$, $T_{rad} = t_r$ a v . Relativní vlhkost se zadává v procentech, tj. krát 100. Dále se rozhraní liší v tom, že zde vystupuje celkový tepelný odpor oděvu (ne lokální) a explicitně se zadává mechanický výkon W , který byl uvažován, že je zanedbatelný, tj. 0. Model byl použit pro neoblečeného člověka ve spodním prádle, byla uvažována hodnota celkového tepelného odporu oděvu 0,1 clo a pro letní oděv 0,6 clo.

Výstupem těchto simulací jsou index PMV/PPD, které lze dát do kontextu s indexem DTS.

6 Testování simulátoru

V předchozí kapitole bylo popsáno řešení, jakým způsobem byl realizován Simulátor. Již během řešení vyvstala otázka, zdali hodnoty ze simulátoru dávají relevantní data podobná tomu, jak by se v daném prostředí choval reálný člověk a jaký tepelný pocit by vnímal. Ale jako první bylo nezbytné otestovat i samotnou funkčnost propojení napřed v neutrálním prostředí, pak chladném a teplém, a nakonec zdali odpovídá dynamické chování, neboť manekýn sám o sobě váží cca 30 kg a je vyplněný vzduchem, tj. má úplně jinou tepelnou kapacitu než člověk. Tyto dynamické vlastnosti by měl předepisovat FMTK model, ale otázkou bylo, zdali nenastanou nějaké komplikace zejména z hlediska časových prodlev, viz kapitola 6.1.

Po otestování výše zmíněných vlastností Simulátoru pak bylo přistoupeno k vlastní verifikaci Simulátoru na základě dostupných dat z literatury, týkajících se experimentů s lidmi (vlastní měření na lidech nebyla prováděna jednak z časových ale i etických důvodů. Snahou bylo napodobit podmínky z experimentů s lidmi, a to pomocí klimatické komory NETME.

Jedná se o verifikaci Simulátoru na vybraných scénářích z literatury, nejprve pro ustálené podmínky 5 °C Young, 10 °C Budd a následně neustálené podmínky 28-33-28 °C, 18-42-18 °C, 28-18-28 °C i dokonce co se týče metabolické produkce tepla 3-5-8 met. Tyto testy byly prováděny na lidech oblečených pouze do spodního prádla (trenýrky). Navíc byl proveden jeden scénář navíc, vyhodnocující vliv oděvu na tepelný pocit/komfort, a to pro letní oděv a podmínky 28-18-28 °C, viz kapitola 6.4.6 a 6.4.7. Dodatečně byly provedeny i virtuální simulace pro vyhodnocení přínosu Simulátoru, viz případy FMTK klimakomora a FMTK dle literatury.

Pro určení parametrů okolního prostředí byly v blízkosti manekýna nainstalovány senzory teploty vzduchu, relativní vlhkosti a rychlosti vzduchu. Senzory byly umístěny na výšku trupu manekýna a druhý senzor teploty do výšky kotníků viz Obr. 6.7.

6.1 Testování funkčnosti propojení

6.1.1 Test v neutrálním prostředí

Bylo potřeba nejdříve otestovat, zda skript v Matlabu na propojení FMTK modelu s Newtonem funguje. Během testování se do Newtona postupně nahrávaly hodnoty z modelu, ale zatím do FMTK nechodila zpětně žádná data z manekýna. Proto bylo potřeba pozměnit nastavení v kódu v Matlabu, jak bylo diskutováno v minulé kapitole. Pro zjištění, zda dochází mezi modelem a manekýnem ke sdílení dat, sloužily soubory FMTK READ a FMTK WRITE. Pomocí programu Notepad ++ byly hodnoty v souborech průběžně aktualizovány.

V programu ThermDAC byl nastaven čas načítání hodnot na 5 s. Bylo zjištěno, že model FMTK načítá rychleji než program ThermDAC, takže bylo potřeba pomocí úpravy skriptu model zpomalit (byl využit příkaz „pause“).

Jako další úkol bylo potřeba přiřadit k sobě správné části těla mezi Newtonem a modelem, jelikož jsou jejich části odlišné, a tím vychází výsledky měření špatně.

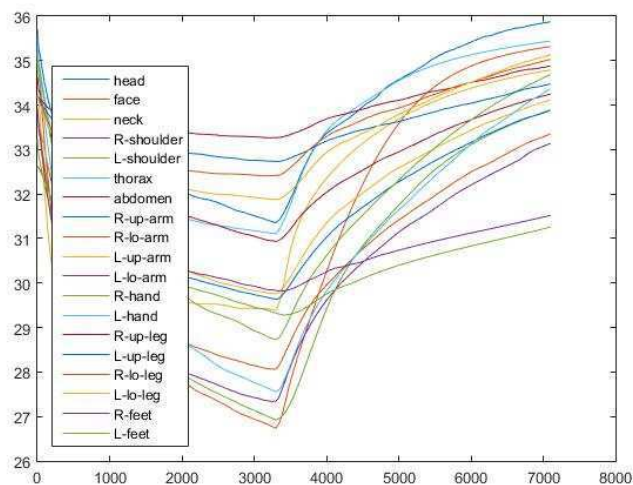
6.1.2 Test Superb (chlazení, topení)

Test byl zrealizován v automobilu Superb, do kterého byl posazen manekýn Newton. Nejdříve byla v automobilu zapnuta klimatizace a poté se začalo topit. Cílem bylo zjistit, zda spolu Newton a model FMTK správně komunikují a střední teploty pokožky jednotlivých částí správně reagují na chlad a poté na teplo.

Jak je vidět na Obr. 6.3, střední teploty pokožky všech částí manekýna při zapnutí klimatizace klesají dolů, a naopak při topení všechny části začínají stoupat na vyšší hodnoty.



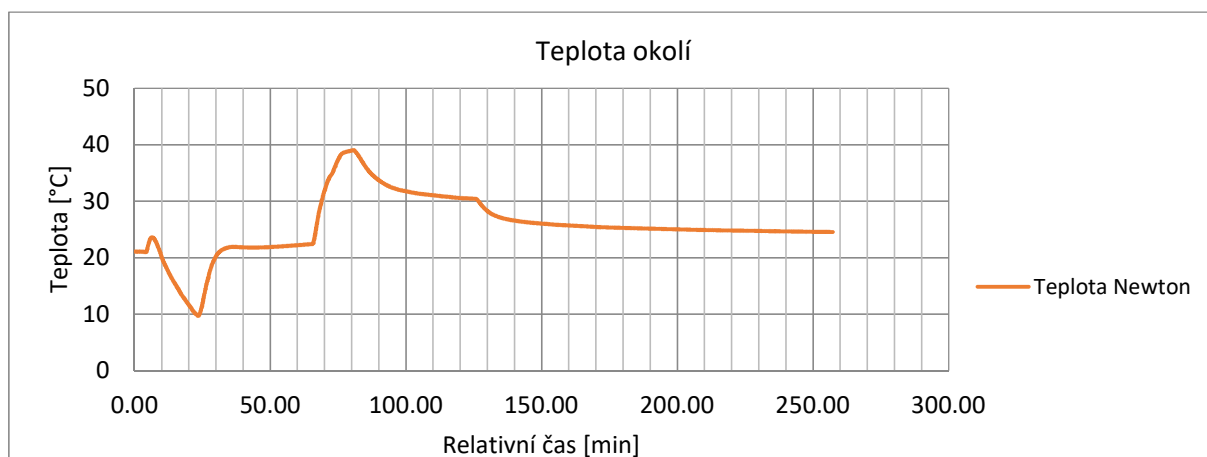
Obr. 6.1 Manekýn umístěný v Superbu po dobu testu Obr. 6.2 Použitý automobil k testování Simulátoru



Obr. 6.3 Průběh teplot jednotlivých částí manekýna

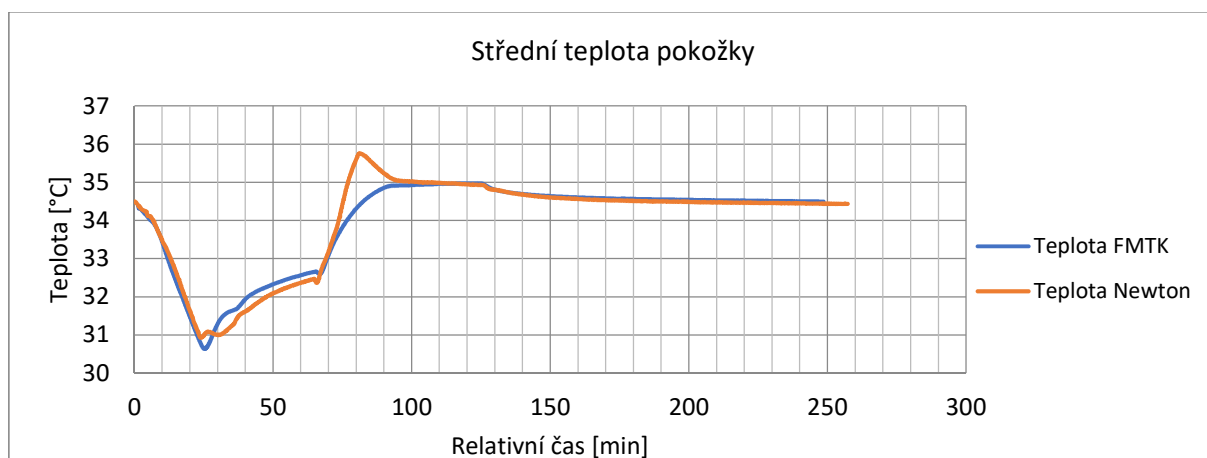
6.1.3 Test časových prodlev 22-10-22-22-40-24 °C

Tento test byl zrealizován z důvodu zjištění, jaké jsou časové prodlevy náběhu teplot u manekýna. Na Obr. 6.4 jsou znázorněny změny teplot v průběhu testu.



Obr. 6.4 Průběh okolní teploty při testu v klimatické komoře

Na Obr. 6.5 je znázorněn průběh teploty, kterou model FMTK posílá manekýnovi jako informaci, na jakou teplotu se má nahřát (křivka Teplota FMTK) a průběh teploty, kterou manekýn skutečně má (křivka Teplota Newton).



Obr. 6.5 Průběh střední teploty pokožky při testu

Test prokázal, že při ochlazení okolní teploty manekýn reaguje dobře a nejsou zaznamenány žádné prodlevy, avšak při oteplení na vysokou okolní teplotu se manekýn, oproti požadované teplotě z modelu přehřívá, jelikož není schopen se chladit z důvodu absence chladicího prvku.

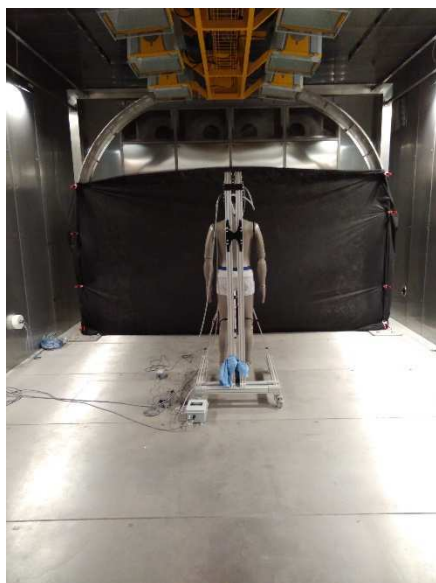
6.2 Verifikační testy v klimatické komoře – popis

V roce 1966 provedli Stolwijk a Hardy experimenty, ve kterých účastníky experimentu vystavovali různým okolním podmínkám a sledovali, jak se mění jejich povrchová a vnitřní

teplota těla. K testování Simulátoru bylo použito 7 různých scénářů. Každý scénář začíná v neutrálním prostředí (22 °C), ve kterém se setrvává 1 hodinu.

Do klimakomory byly zadány podmínky scénáře a pomocí manekýna byl scénář proveden na simulátoru. Pro porovnání výsledků byl experiment spuštěn také samostatně v modelu FMTK, jak pro přesné podmínky z experimentu, tak pro podmínky, které byly reálně v klimakomoře při provádění experimentu na simulátoru.

V souboru vstupních podmínek je v určitých časech zadána produkce tepla 1 met, což odpovídá tepelné produkci sedícího člověka. Pro zjednodušení byl manekýn během testování v pozici ve stoje.



Obr. 6.6 Závěs omezující rychlost proudění vzduchu



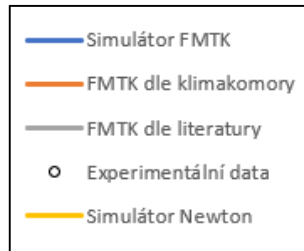
Obr. 6.7 Umístění senzorů okolního prostředí

Ve všech použitých scénářích je požadavek na rychlost vzduchu 0,1 m/s. V důsledku ventilátoru, který přivádí do klimakomory teplý nebo naopak studený vzduch, je rychlost vzduchu větší. Aby byly podmínky co nejpřesnější těm v experimentech z literatury, bylo potřeba nainstalovat mezi ventilátor a manekýna závěs, který zpomaloval proudící vzduch. V důsledku toho však bylo nutné nastavovat až o 6 °C rozdílnou teplotu od té požadované, a z toho důvodu se v komoře skoková změna teploty velice obtížně regulovala. Například při požadavku 42 °C byla na klimakomoru nastavena teplota 55 °C. Relativní vlhkost je, stejně jako teplota, špatně regulovatelná, jelikož změnou teploty v komoře se změní i vlhkost vzduchu.

Možnou variantou, jak tento problém vyřešit, je přenášet manekýna do různých místností s požadovanou teplotou. To je ale kvůli kabelům, ke kterým je manekýn připojený, problematické.

6.3 Virtuální simulace a šablona pro porovnání se Simulátorem

Pro vyhodnocení přínosu Simulátoru byly provedeny pouze virtuální simulace modelu FMTK, a to podle okrajových podmínek z literatury a podle skutečných podmínek v klimatické komoře během testů Simulátoru. Pro ty byl vyhodnocen i index PMV-PPD. Celkově tedy bylo možné v rámci výsledků jednotlivých scénářů porovnat následující případy (viz ukázka legendy Obr. 6.8).



Obr. 6.8 Vzor legendy

- *Simulátor FMTK* – teplota pokožky, kterou model FMTK zapisuje do manekýna (požadované teplota po manekýnovi)
- *FMTK dle klimakomory* – teplota pokožky, kterou udává model na základě vstupních parametrů z klimakomory
- *FMTK dle literatury* – teplota pokožky, kterou udává model na základě vstupních parametrů z experimentu
- *Experimentální data* – teplota na základě měření při experimentu
- *Simulátor Newton* – teplota, na kterou se manekýn nahřál

Osnova pro porovnání výsledků Simulátoru, virtuální simulace a experimentů

Dle schématu na Obr. 6.8 je cílem prezentovaných grafů vyhodnotit rozdíl mezi:

- 1) Simulátor FMTK a Simulátor Newton – rozdíl, jak rychle reaguje Newton na set pointy vypočítané FMTK modelem
- 2) Experimentální data a Simulátor FMTK / Simulátor Newton – určení, které hodnoty teplot simulátoru lépe reprezentuje chování člověka
- 3) FMTK dle klimakomory a Simulátor FMTK / Simulátor Newton – zda použití simulátoru přináší nějakou výhodu oproti čisté simulaci na základě souboru vstupních podmínek (tab. 6.1) – viz manekýn s pasivními senzory
- 4) Index PMV dle klimakomory a index DTS simulátor / index DTS dle klimakomory – porovnání jednoduchého PMV modelu s indexem zohledňujícím dynamické chování člověka včetně uvažování termofyziologie

Výsledky těchto simulací i výsledky simulátoru jsou souhrnně prezentovány v následující kapitole dle šablony pro porovnání výsledků viz. body 1) až 4).

6.4 Verifikační testy – souhrnné výsledky

Z testů byly vyhodnocovány střední teplota pokožky, vnitřní teplota, tepelný pocit a lokální povrchové teploty. Lokální teploty jsou prezentovány pro scénář 5 °C Young a pro ostatní scénáře je lze nalézt v příloze B.

První dva scénáře reprezentují ustálené podmínky a ty zbývající podmínky proměnné (změna teploty, změna produkce tepla).

6.4.1 5 °C Young

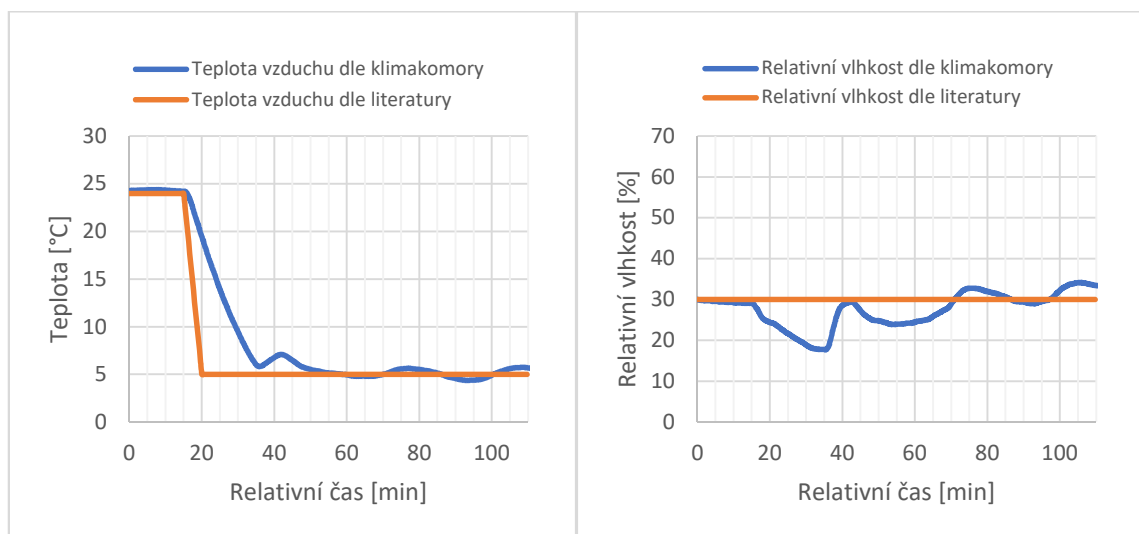
V tomto scénáři jsou lidé vystaveni prostředí o teplotě 5 °C, při experimentu se pouze odpočívalo, což odpovídalo zhruba metabolické produkci tepla 0.8 met (Tab. 6.1).

Tab. 6.1 Parametry experimentálních dat scénáře 5 °C Young

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|-----|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 24 | 24 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 15 | 24 | 24 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 20 | 5 | 5 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 110 | 5 | 5 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |

Teplota v čase 20 minut dle literatury skokově klesá na 5 °C a až do konce testu zůstává konstantní (Obr. 6.9). Komora v čase 16 minut začíná reagovat na požadavek snížení okolní teploty a plynule klesá až k 5 °C, které dosáhne v 35. minutě. Regulaci klimatické komory tedy trvalo 19 minut, než se teplota vzduchu dostala na požadovanou teplotu.

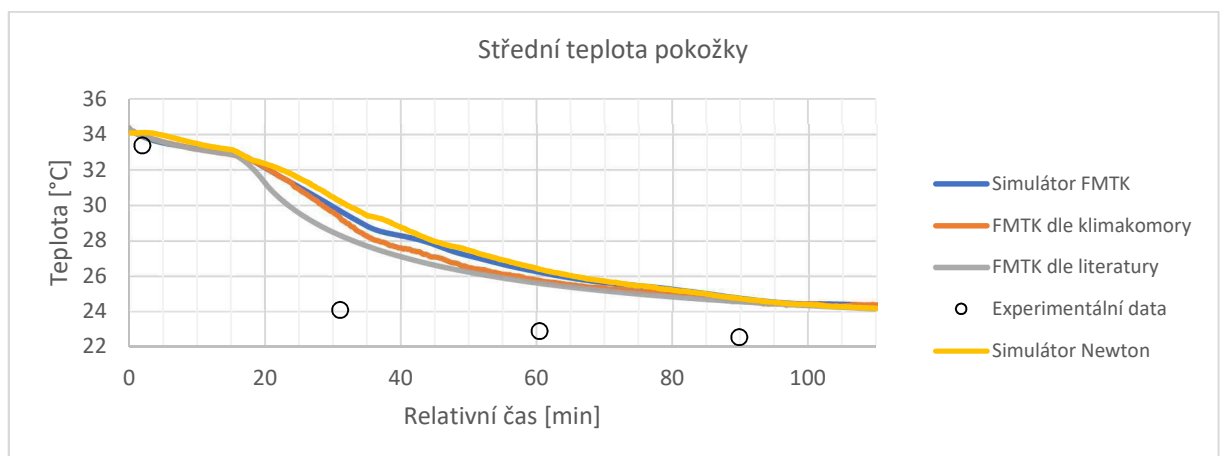
V důsledku změny teploty došlo ke změně relativní vlhkosti z 30 % na 18 %. Po ustálení teploty vlhkost oscilovala mezi 30 % a 34 %, což bylo blízko hodnotě při experimentech s lidmi.



Obr. 6.9 Parametry vzduchu – 5 °C Young

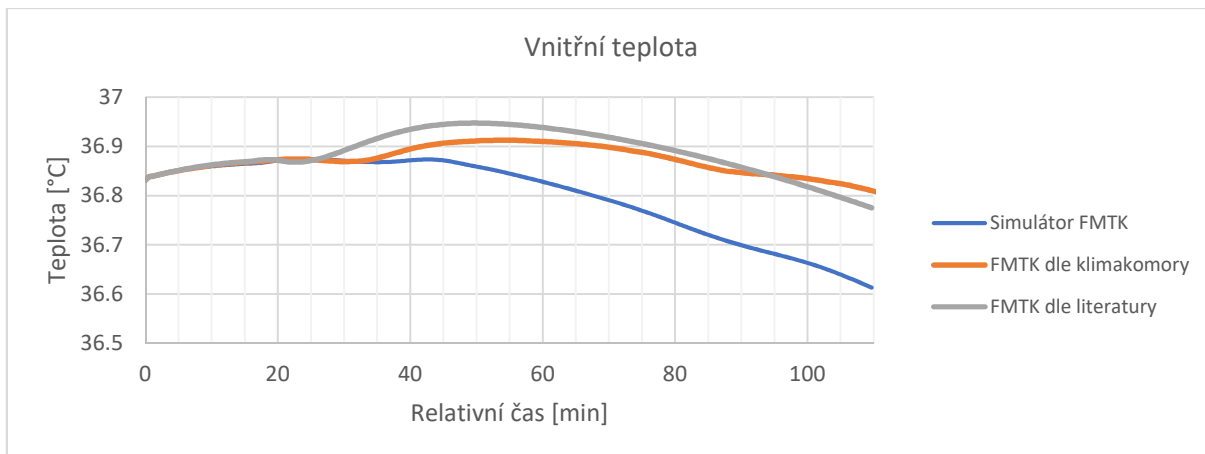
Globální parametry

- ad 1) Ve 22. minutě Simulátor Newton reaguje na změnu teploty poklesem, oproti Simulátoru FMTK, pomaleji (Obr. 6.10). V 38. minutě je mezi křivkami mírný rozdíl. Ve 44. minutě dochází k vyrovnávání rozdílu, který zcela zanikne v čase 72 minut. Křivka Simulátoru Newton klesá při snížení teploty na 5 °C pomaleji, než je tomu u Simulátoru FMTK, což je způsobeno absencí chladícího prvku u manekýna, tudíž se nestíhá chladit na požadovanou teplotu, kterou mu udává model FMTK. Vzhledem k tomu, že Simulátor FMTK lépe reaguje na ochlazení okolí, lépe reprezentuje chování člověka, co se týče termofyziologie.
- ad 2) K experimentálním datům se více přibližují hodnoty Simulátoru FMTK.
- ad 3) Experimentálním datům je v tomto případě blíže křivka FMTK dle klimakomory. Vzhledem k tomu, že se teploty Simulátoru Newton a Simulátoru FMTK vzájemně ovlivňují, Newton svým nedostatečným chlazením zvyšuje také teplotu Simulátoru FMTK. Tj. na základě teplot manekýna jsou měřeny tepelné toky vstupující do modelu. Pokud tedy jsou na Newtonovi neodpovídající teploty člověku, přenáší se tato chyba zpětně i na model.



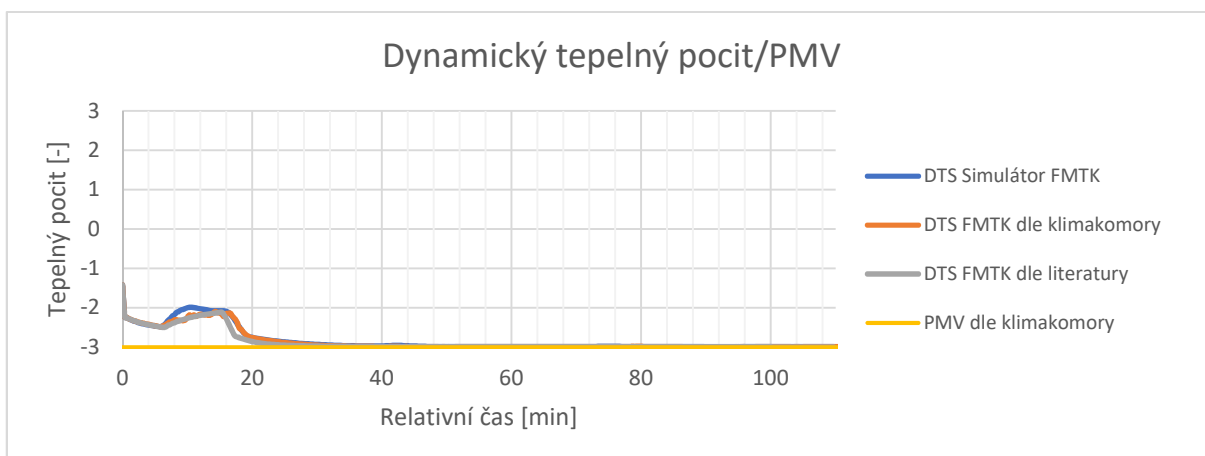
Obr. 6.10 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 5 °C Young

Vnitřní teplota u Simulátoru Newton (Obr. 6.11) není měřitelná veličina, jelikož manekýn má vyhřívaný povrch, tj. jedná se o čistě virtuální veličinu dopočítávanou modelem viz Simulátor FMTK. U tohoto scénáře nejsou k dispozici výsledky z experimentu. Křivky FMTK dle klimakomory a FMTK dle literatury se liší z důvodu mírně odlišného průběhu teplot v klimatické komoře. Teplota jádra Simulátoru je oproti FMTK o dvě desetiny nižší, což je přípustná odchylka. Tento rozdíl se objevil pouze u tohoto scénáře. Část břicha byla více ochlazována, než indikovala teplotní a rychlostní čidla. Odchylka nastává při nižších teplotách vzduchu, čímž roste odvod tepla z těla do okolí. Vyšší odvod tepla u břicha může mít vliv na vnitřní teplotu Simulátoru, jelikož teplota jádra závisí na jeho teplotě.



Obr. 6.11 Průběh vnitřní teploty pokožky u scénáře 5 °C Young

ad 4) Index PMV (Obr. 6.12) je po celou dobu testování na hodnotě -3, avšak index DTS je, v počátku měření při 24 °C, -2 a při poklesu teploty na 5 °C (20. minuta) klesá index na -3, jako je tomu i u PMV. Jednotlivé křivky DTS vyšly téměř identicky. Vzhledem k tomu, že index PMV nezohledňuje dynamické chování termofyziologie člověka, byla lidem v celém průběhu scénáře zima. Avšak index DTS dynamické chování zohledňuje, z toho důvodu tepelný pocit kolísá a při teplotě 24 °C bylo lidem velmi chladno a teprve v 5 °C následoval pocit zimy.



Obr. 6.12 Průběh DTS/PMV u scénáře 5 °C Young

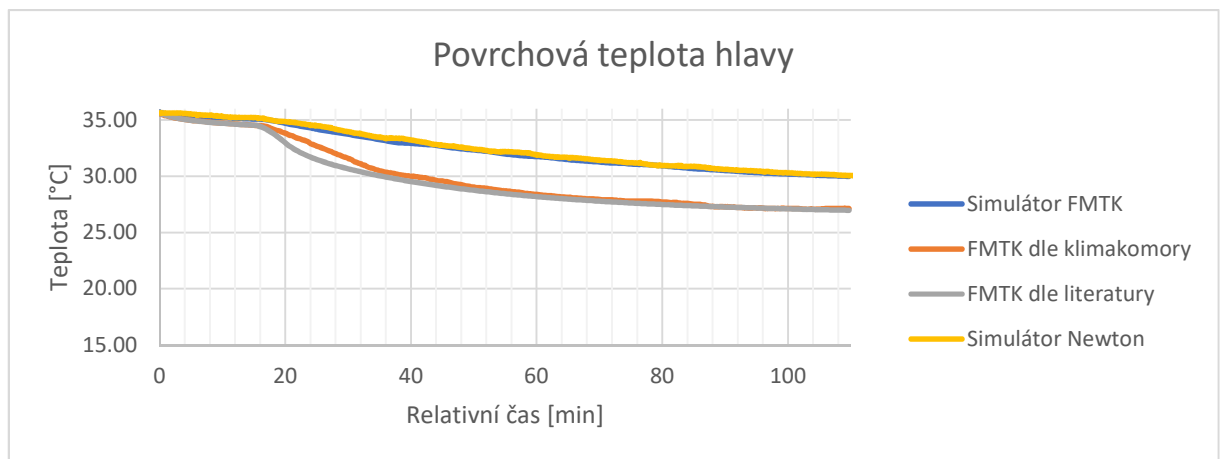
Lokální teploty

ad 1) U povrchové teploty hlavy a hrudníku (Obr. 6.13 a Obr. 6.14) reagují na změnu parametrů okolí Simulátor FMTK i Simulátor Newton stejně. Teplota pravé ruky i pravého chodidla (Obr. 6.15 a Obr. 6.16) klesá, po změně teploty okolí (tj. po

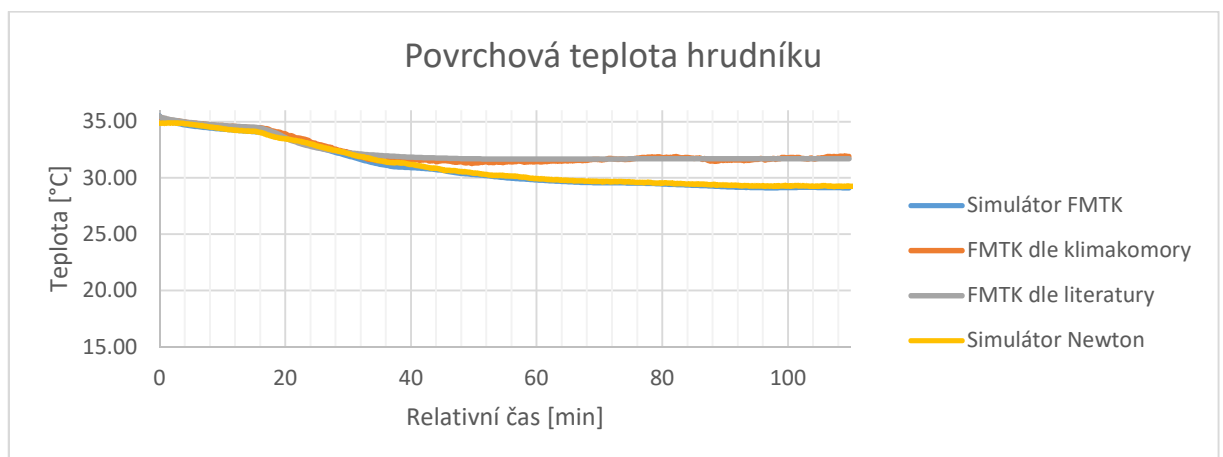
přechodu do studeného prostředí), rychleji u Simulátoru FMTK. U Newtona je pozorován mírnější pokles povrchových teplot.

- ad 2) K lokálním teplotám nejsou experimentální data dostupná. Z toho důvodu nelze určit, který přístup lépe reprezentuje chování člověka.
- ad 3) Z důvodu chybějících dat z experimentu nelze vyhodnotit, jestli je blíže realitě Simulátor nebo FMTK dle klimakomory, avšak ve všech případech lokálních teplot je hodnotám, vypočítaným z modelu na základě parametrů z literatury, nejbližší FMTK dle klimakomory.

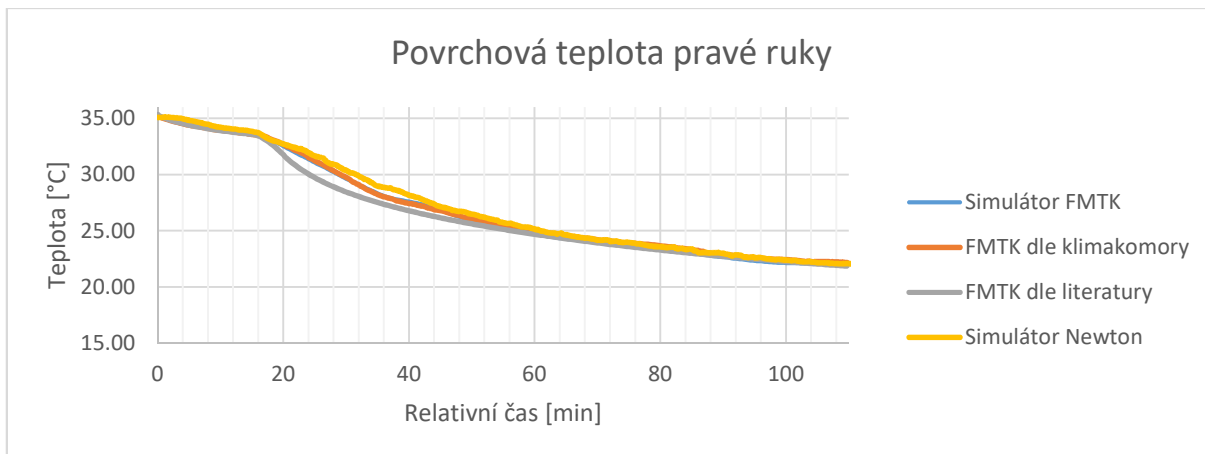
Povrchové teploty hlavy a hrudníku u Simulátoru jsou ovlivněny odlišným prouděním vzduchu na různých částech těla, což FMTK nezohledňuje, tj. model zadává ke všem částem těla stejnou rychlost proudění vzduchu, a proto se průběh teplot Simulátoru a FMTK mezi sebou liší.



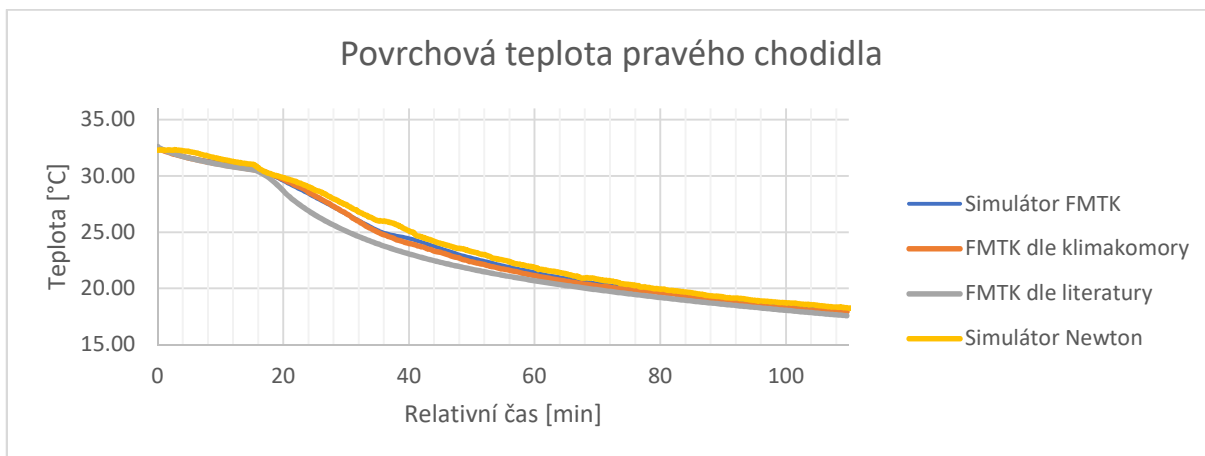
Obr. 6.13 Průběh povrchových teplot hlavy u scénáře 5 °C Young



Obr. 6.14 Průběh povrchových teplot hrudníku u scénáře 5 °C Young



Obr. 6.15 Průběh povrchových teplot pravé ruky u scénáře 5 °C Young



Obr. 6.16 Průběh povrchových teplot pravého chodidla u scénáře 5 °C Young

6.4.2 10 °C Budd

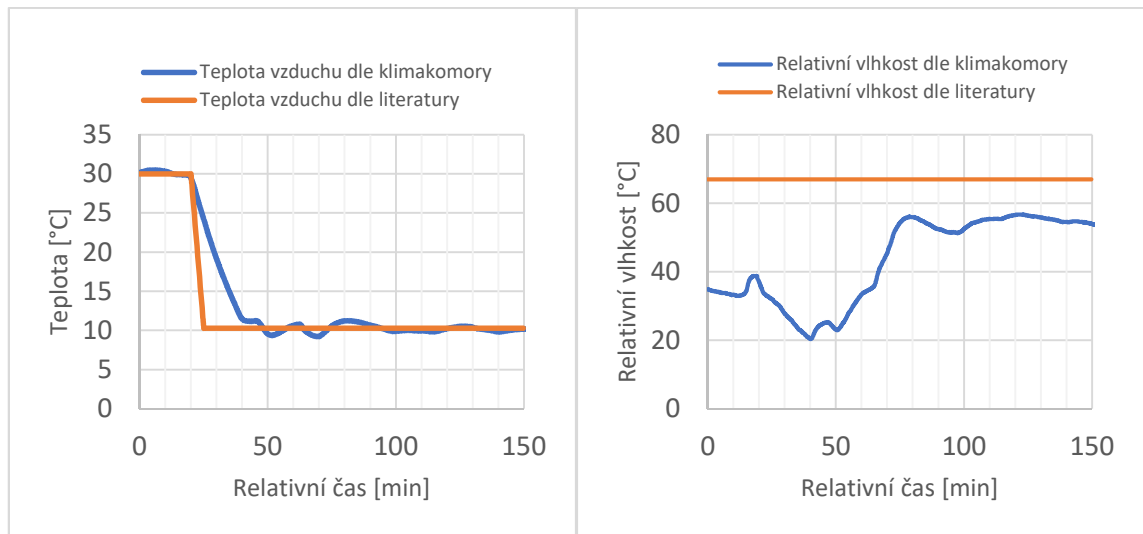
Jedná se o experiment, ve kterém došlo ve 25. minutě ke změně teploty ze 30 °C na 10 °C. Měření bylo prováděno v sedě a trvalo 2,5 hodiny.

Tab. 6.2 Parametry experimentálních dat scénáře 10 °C Budd

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|------|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 30 | 30 | 0.67 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 20 | 30 | 30 | 0.67 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 25 | 10.3 | 10.3 | 0.67 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |
| 150 | 10.3 | 10.3 | 0.67 | 0.1 | 0 | 101325 | 0.8 | 1 | 1 |

Na základě parametrů scénáře dle literatury klesá skokově v čase 20 minut teplota z 30 °C na 10 °C (Obr. 6.17). V klimakomore je teploty 10 °C dosaženo až ve 41. minutě a požadovaná hodnota je v komoře udržována s mírnou odchylkou ± 0,4 °C. Relativní vlhkost

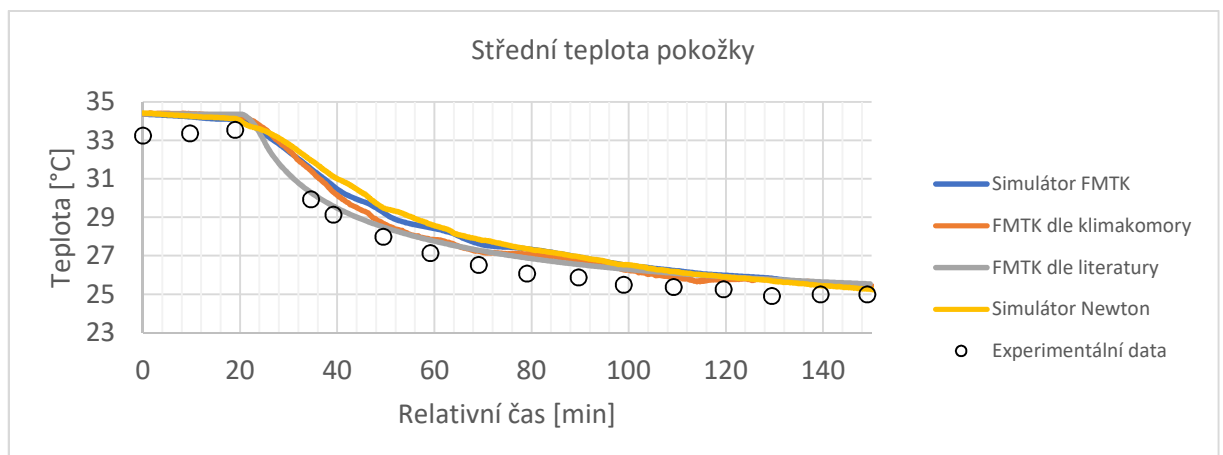
klesla při snížení teploty až na 20 % a při ustálení teploty se dostala až na hodnotu 55 %. Tentokrát se nepodařila hodnota relativní vlhkosti nastavit na požadovaná procenta.



Obr. 6.17 Parametry vzduchu – 10 °C Budd

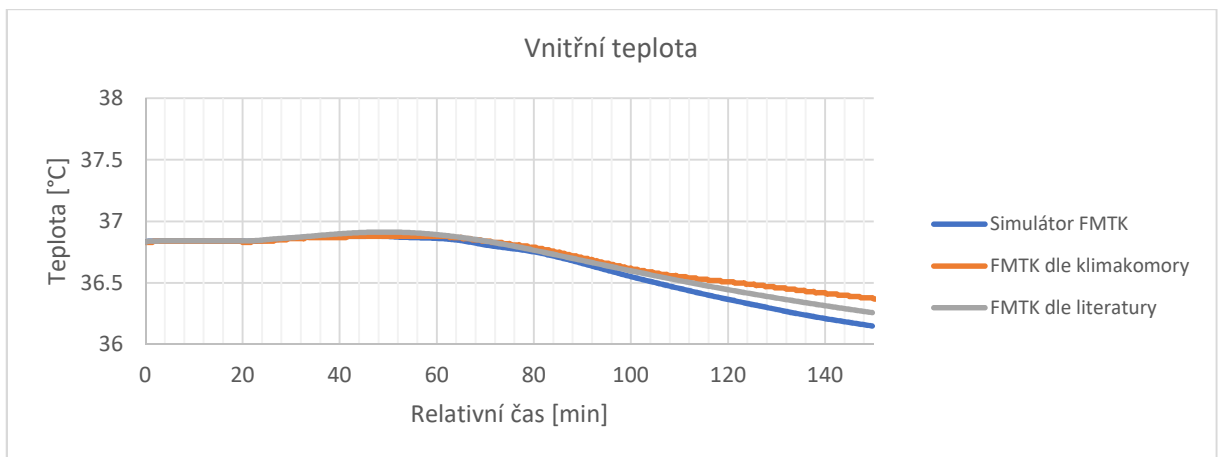
Globální parametry

- ad 1) Tak jako v předchozím scénáři, při poklesu teploty na 10 °C křivka Simulátoru Newton klesá oproti Simulátoru FMTK pomaleji (Obr. 6.18). Největší rozdíl teplot mezi křivkami je ve 43. minutě, a to pouze desetiny stupňů, v 77. minutě se rychlost poklesu obou křivek Simulátoru vyrovnává. Při poklesu okolní teploty je problém s nedostatečně rychlým chlazením manekýna, z toho důvodu klesá teplota pokožky u Simulátoru Newton pomaleji než u Simulátoru FMTK.
- ad 2) K experimentálním datům se více přibližuje Simulátor Newton, jelikož lépe reaguje na snížení teploty, avšak rozdíl je pouze minimální.
- ad 3) Hodnoty FMTK dle klimakomory se přibližují skutečným výsledkům experimentu více než Simulátor, jelikož model FMTK oproti Simulátoru lépe reaguje na ochlazení.



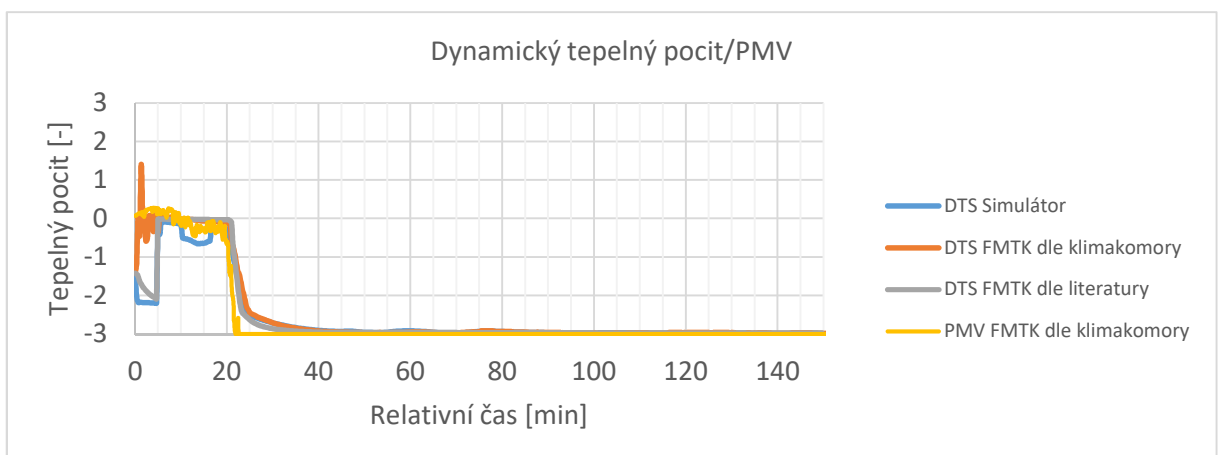
Obr. 6.18 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 10 °C Budd

Vnitřní teplota (Obr. 6.19) si až do 65. minuty drží téměř konstantní teplotu, a to u všech zobrazených křivek. Po 65. minutě dochází k poklesu teploty a společně s tím se začínají objevovat rozdíly mezi křivkami. Simulátor se dostal na nejnižší hodnotu a to 36,3 °C. Nejvyšší hodnotu zaujímal FMTK dle klimakomory.



Obr. 6.19 Průběh vnitřní teploty u scénáře 10 °C Budd

ad 4) Index PMV (Obr. 6.20) je u scénáře 10 °C_Budd přísnější než DTS. Při teplotě 30 °C je tepelný pocit podle PMV hodnocený jako mírně chladno, avšak DTS hodnotí pocit neutrálně. Při poklesu teploty na 10 °C se již oba indexy shodují, a to s výsledkem - 3 (zima).



Obr. 6.20 Průběh DTS/PMV u scénáře 10 °C Budd

6.4.3 28-33-28 °C

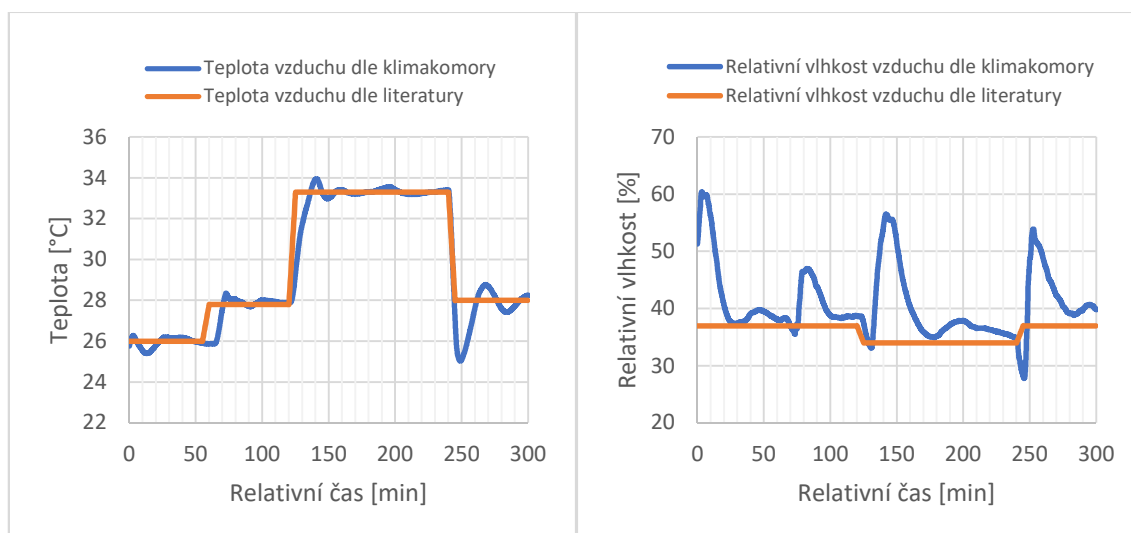
Během testování docházelo ke střídání okolních teplot vzduchu. Po dobu 65 minut byli lidé v experimentu vystaveni teplotě 28 °C, poté stoupla teplota na 33 °C, po 120 minutách klesla zpět na 28 °C (viz Tab. 6.3).

Tab. 6.3 Parametry experimentálních dat scénáře 28-33-28 °C

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|------|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 26 | 26 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 2 | 1 | 1 |
| 55 | 26 | 26 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 2 | 1 | 1 |
| 60 | 27.8 | 27.8 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 120 | 27.8 | 27.8 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 125 | 33.3 | 33.3 | 0.34 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 240 | 33.3 | 33.3 | 0.34 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 245 | 28 | 28 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 300 | 28 | 28 | 0.37 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |

V 60. minutě scénáře 28-33-28 °C dochází podle literatury k nárůstu teploty na 28 °C (Obr. 6.21). Nárůst teploty v klimakomoře se zpožďuje o 10 minut, takže požadovaná teplota 28 °C je v komoře až v čase 72 minut. Při dalším nárůstu teploty na 30 °C ke zpoždění komory nedochází, avšak požadovaná hodnota je nastavena, oproti parametrům z literatury, o 10 minut později. Křivka poklesu teploty zpět na 28 °C je totožná, pouze s rozdílem teplot, kdy komora se ochladila až na teplotu 25 °C. Tento rozdíl byl za 15 minut vyrovnán.

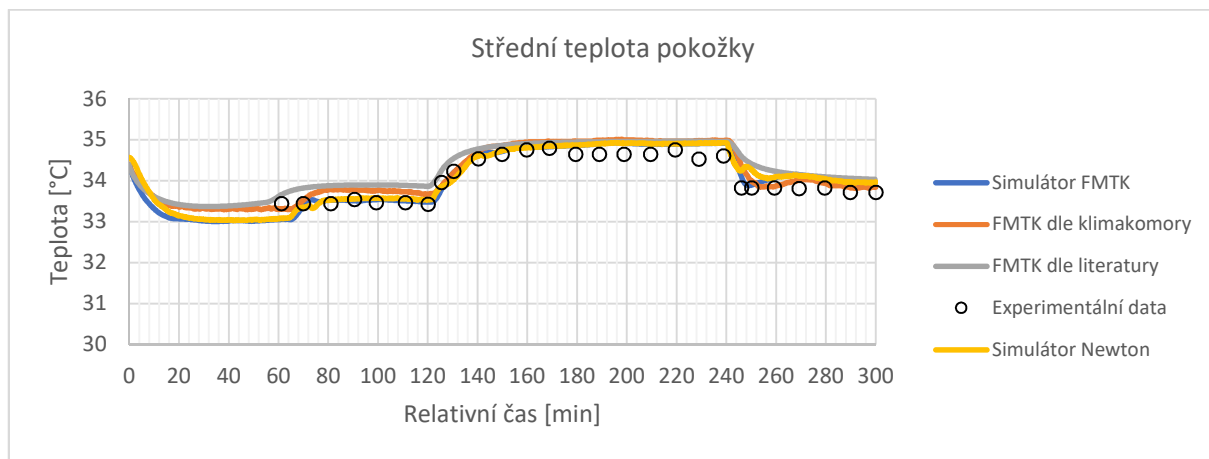
Vzhledem k časté změně teplot je regulace vlhkosti problematická. Hodnoty se nedaří držet na požadované vlhkosti.



Obr. 6.21 Parametry vzduchu - 28-33-28 °C

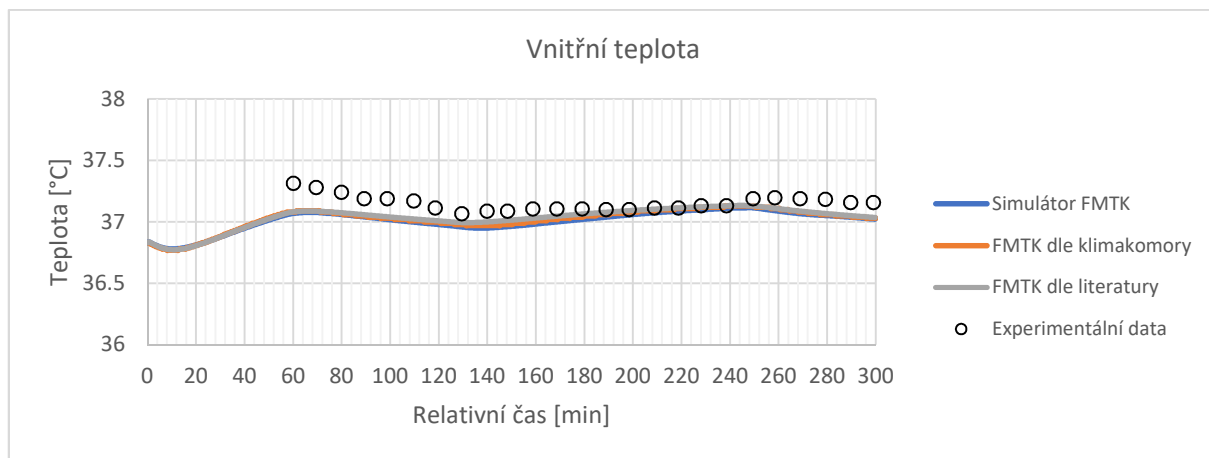
Globální parametry

- ad 1) Střední teplota Simulátoru FMTK i Simulátoru Newton (Obr. 6.22) je v tomto případě téměř identická. Nedochozí k výraznému ochlazení okolního prostředí, což eliminuje zpoždění u Simulátoru Newton. Manekýn tedy v tomto případě na setpointy od FMTK reaguje bez prodlevy.
- ad 2) S chováním člověka v tomto scénáři korespondují obě křivky Simulátoru. Není zde žádný rozdíl teplot.
- ad 3) V tomto scénáři jsou přesnější výsledky při použití Simulátoru oproti samotnému modelu (viz křivka FMTK dle klimakomory). Jeho použití tedy oproti čisté simulaci na základě souboru vstupních podmínek, poskytuje lepší výsledky.



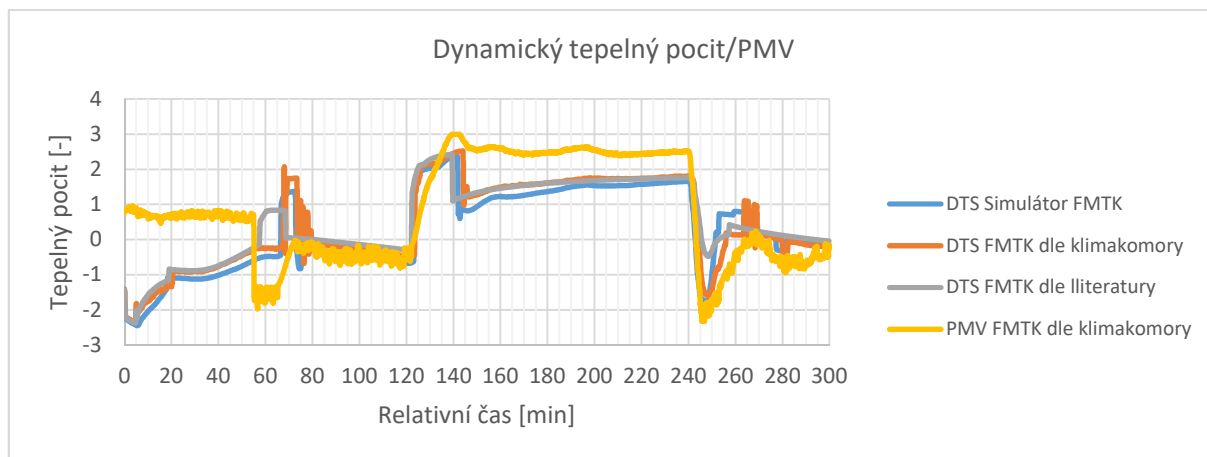
Obr. 6.22 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-33-28 °C

Na Obr. 6.23 je znázorněno správné fungování Simulátoru. Jeho křivka téměř kopíruje křivku FMTK dle klimakomory.



Obr. 6.23 Průběh vnitřní teploty u scénáře 28-33-28 °C

ad 4) Index PMV (Obr. 6.24) je na začátku testu na hodnotě 0,5, avšak index DTS v počátku klesl až na -2. V 60. minutě při nárůstu teploty na 28 °C skokově klesl index PMV až na -2 a následně se po několika minutách ustálil na -1. DTS oproti tomu při nárůstu teploty nárazově zvýšil svoji hodnotu na 1,5 a poté index klesl na 0. Při druhém zvýšení teploty na 33 °C se index PMV i DTS zvýšili na hodnotu 2, s tím, že PMV si tuto hodnotu udrželo a index DTS po chvíli klesl na 1 a poté pomalu stoupal na dřívější hodnotu 2. Při snížení teploty na 28 °C oba indexy klesly až na -2 a po chvíli vzrostly u PMV na -1 a DTS na 0.



Obr. 6.24 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-33-28 °C

Výsledky indexu PMV v 60. minutě vykazují podivné chování, kdy přesto, že teplota vzduchu rostla a rychlost proudění klesala, dochází k chladnému pocitu, což je v rozporu s hodnocením indexu DTS. V závěrečné diskuzi této práce je nabídnuto možné vysvětlení.

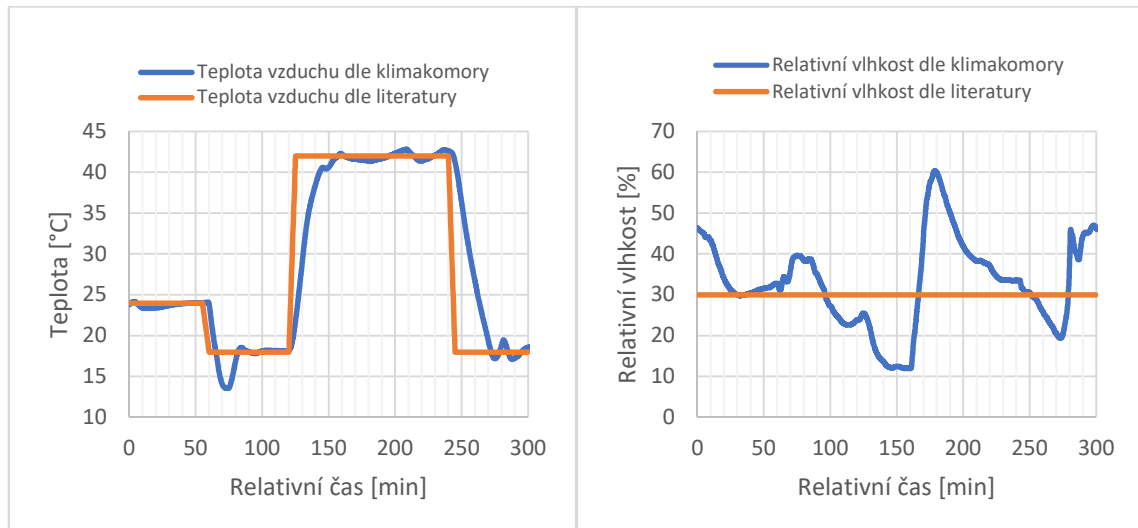
6.4.4 18-42-18 °C

Scénář začal neutrálním prostředím 24 °C (Tab. 6.4), poté po 1 hodině teplota klesla na 18 °C, kde se setrvalo 2 hodiny. Poté došlo ke strmému nárůstu teploty až na 42 °C, v nichž lidé setrvali opět 2 hodiny. Poslední hodinu testu se teplota snížila opět na 18 °C.

Tab. 6.4 Parametry experimentálních dat scénáře – 18-42-18 °C

| Time [min] | Tsur [°C] | Trad [°C] | RH [-] | v [m/s] | qsr [W/m ²] | Psur [Pa] | act [met] | posture [stn/sit] | dress [name] |
|---------------|--------------|--------------|-----------|------------|----------------------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 0 | 24 | 24 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 2 | 1 | 1 |
| 55 | 24 | 24 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 2 | 1 | 1 |
| 60 | 18 | 18 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 120 | 18 | 18 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 125 | 42 | 42 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 240 | 42 | 42 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 245 | 18 | 18 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 300 | 18 | 18 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |

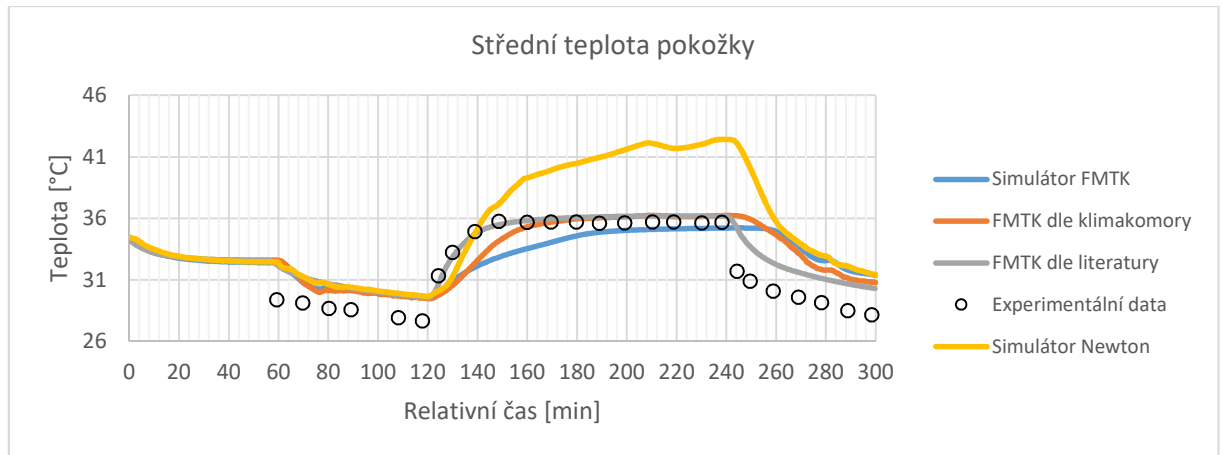
V 60. minutě teplota dle literatury klesá na 18 °C (Obr. 6.25). V klimakomoře dochází oproti literatuře ke zpoždění poklesu o 5 minut, přičemž teplota klesla až na 13 °C. Po chvíli došlo k vyrovnání teplot s parametry v literatuře. Teplota 42 °C byla v komoře nastavena se zpožděním 26 minut. Při poklesu zpět na 18 °C došlo opět ke zpoždění nárůstu teploty tentokrát o 30 minut. Relativní vlhkost opět značně kolísá mezi 10 % a 60 %. Požadovanou vlhkost se daří udržet pouze na začátku testu v čase 25 minut.



Obr. 6.25 Parametry vzduchu – 18-42-18 °C

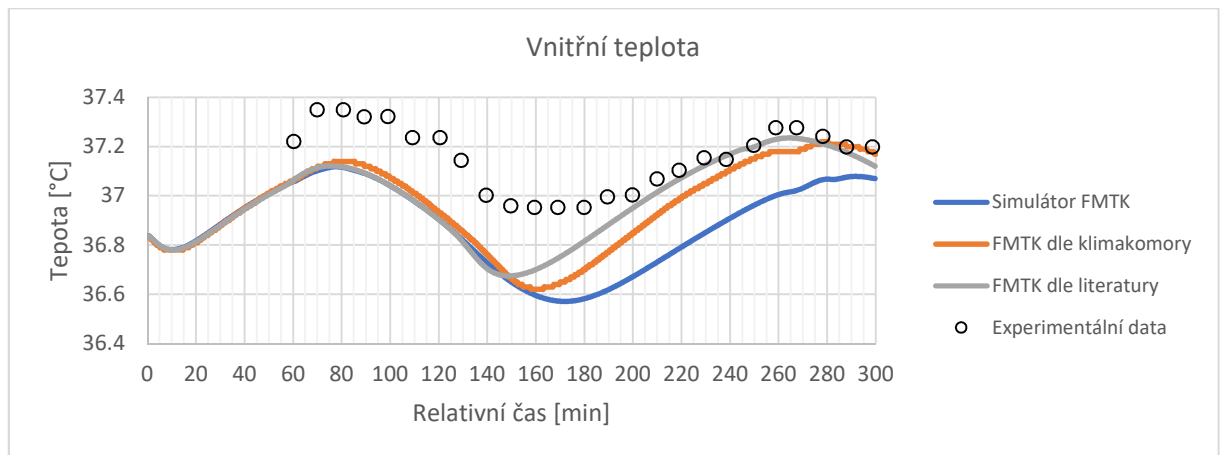
Globální parametry

- ad 1) Po nárůstu teploty na 42 °C hodnoty Simulátoru Newton vzrostly až na 42 °C (Obr. 6.26). Křivka Simulátor FMTK po nárůstu okolní teploty mírně stoupala k hodnotě 35,5 °C, přičemž této hodnoty dosáhla za 69 minut po nárůstu. Při poklesu okolní teploty na 18 °C se obě křivky vzájemně srovnaly. Na tomto scénáři je názorně ukázáno, že Simulátor s použitím manekýna bez pocení se nehodí pro testování v prostředí s vysokými teplotami. (viz. Obr. 6.26 – křivka Simulátor Newton). Manekýn je ohříván na okolní teplotu 42 °C, což je ve skutečnosti člověk schopen snižovat a regulovat pocením. Model předepisuje manekýnovi nižší set pointy, než je teplota okolí, což ThermDac (Newton) vyhodnotí tak, že přestane vyhřívat segmenty ($HF=0 \text{ W/m}^2$), ale nedokáže je aktivně chladit, a tak reagovat na hodnoty teplot, které mu předepisuje model. Za těchto podmínek je vhodnější použít samotný model, kde je pocení zohledněno. Další možností by bylo pořízení manekýna s potící kůží, který je ovšem zhruba 2x dražší než současný manekýn, a také má větší hmotnost a horší manipulovatelnost.
- ad 2) U tohoto scénáře koresponduje s experimentálními daty křivka Simulátor FMTK, lépe tedy vystihuje chování člověka.
- ad 3) V tomto případě se nejvíce přibližuje skutečnosti křivka FMTK dle klimakomory, jelikož u Simulátoru Newton dochází k velkému přehřívání, a naopak u Simulátoru FMTK stoupá teplota pomaleji, než je tomu tak v experimentu s lidmi.



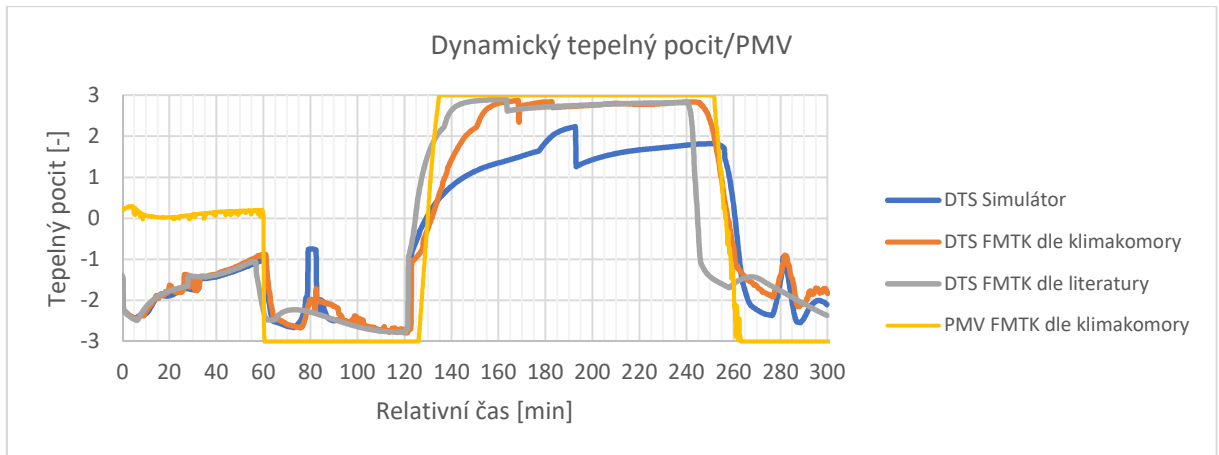
Obr. 6.26 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 18-42-18 °C

Vnitřní teplota těla dle experimentu (Obr. 6.27) se lépe shoduje s experimentálními daty FMTK dle klimakomory, jelikož u Simulátoru dochází při zvýšení okolní teploty k pomalému nárůstu teploty vnitřní.



Obr. 6.27 Průběh vnitřní teploty u scénáře 18-42-18 °C

ad 4) V neutrálním prostředí při 24 °C si index PMV udržuje konstantní hodnotu 0 (Obr. 6.28), avšak index DTS začíná na -2 a postupně stoupá až na hodnotu -1. Při poklesu teploty na 18 °C (60. minuta) index PMV klesl na -3 a opět hodnotu udržuje konstantní až do další změny teploty okolí. Index DTS má mírnější hodnocení, kolísá mezi -2 a -2,5. Při nastavení teploty 42 °C (120. minuta) index PMV stoupá až na hodnotu 3 a konstantně ji udržuje. Index DTS se u Simulátoru i FMTK mírně liší. Nejmírněji je hodnocen index u Simulátoru a podobné výsledky jako u PMV má FMTK. Při poklesu na 18 °C opět klesne hodnocení PMV na -3 a DTS kolísá mezi hodnotami -1 a -2,5.



Obr. 6.28 Průběh DTS/PMV u scénáře 18-42-18 °C

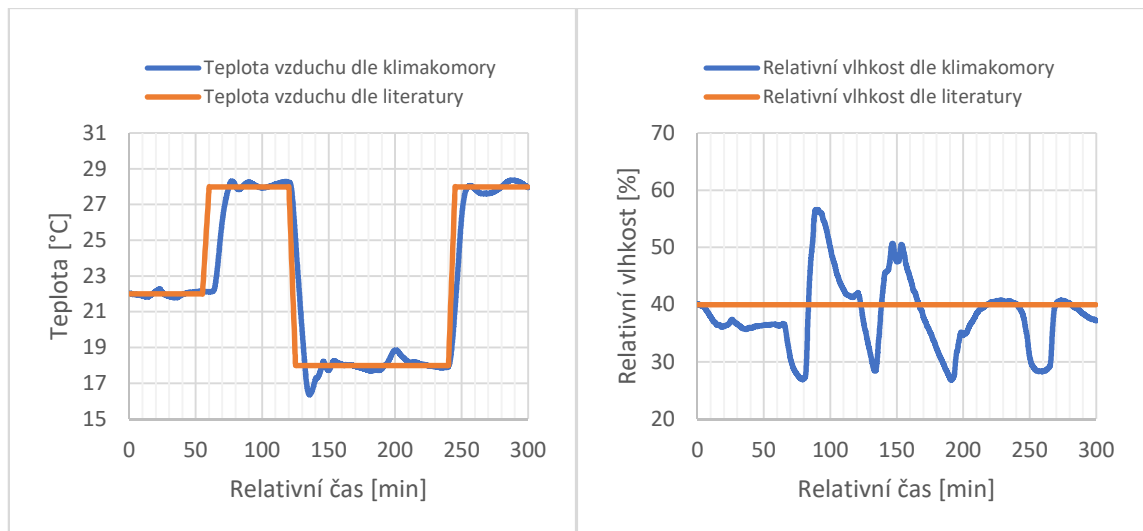
6.4.5 28-18-28 °C

V tomto experimentu byli účastníci vystaveni po dobu 65 minut teplotě 28 °C, poté přešli do prostředí s teplotou 18 °C, kde setrvali po dobu 2 hodin. Po této době se opět vrátili do prostředí s 28 °C. Lidé při měření pouze odpočívali (hodnota metabolismu 1,15 met).

Tab. 6.5 Parametry experimentálních dat scénáře 28-18-28 °C

| Time [min] | Tsur [°C] | Trad [°C] | RH [-] | v [m/s] | qsr [W/m ²] | Psur [Pa] | act [met] | posture [stn/sit] | dress [name] |
|---------------|--------------|--------------|-----------|------------|----------------------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------|
| 0 | 22 | 22 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 2.5 | 1 | 1 |
| 55 | 22 | 22 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 2.5 | 1 | 1 |
| 60 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |
| 120 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |
| 125 | 18 | 18 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |
| 240 | 18 | 18 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |
| 245 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |
| 300 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 1 |

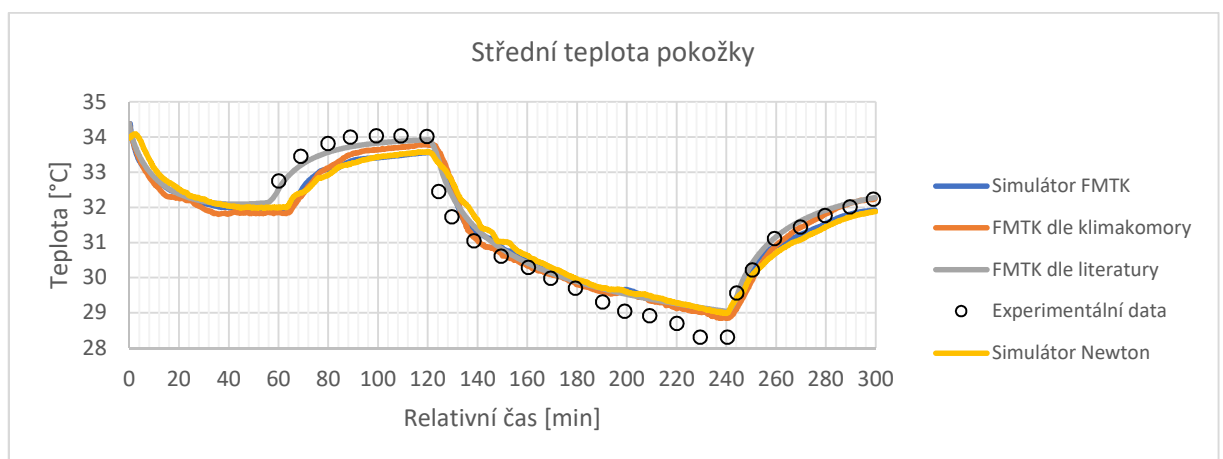
V 60. minutě se účastníci experimentu přesunuli z neutrálního prostředí s teplotou 22 °C do prostředí s teplotou 28 °C. V klimakomoře byla stejná teplota nastavena se zpožděním 8 minut. K nahlátí komory na 28 °C došlo o 15 později, než bylo požadováno. Pokles teploty v komoře (120. minuta) probíhá téměř stejně skokově jako u experimentu, avšak hodnota klesla až na 16 °C oproti požadovaným 18 °C. Během 17 minut se teplota srovnala na 18 °C. Při opětovném nárůstu teploty (245. minuta) se průběh křivky téměř shodoval, avšak výsledné teploty bylo v komoře dosaženo o 10 minut později.



Obr. 6.29 Parametry vzduchu - 28-18-28 °C

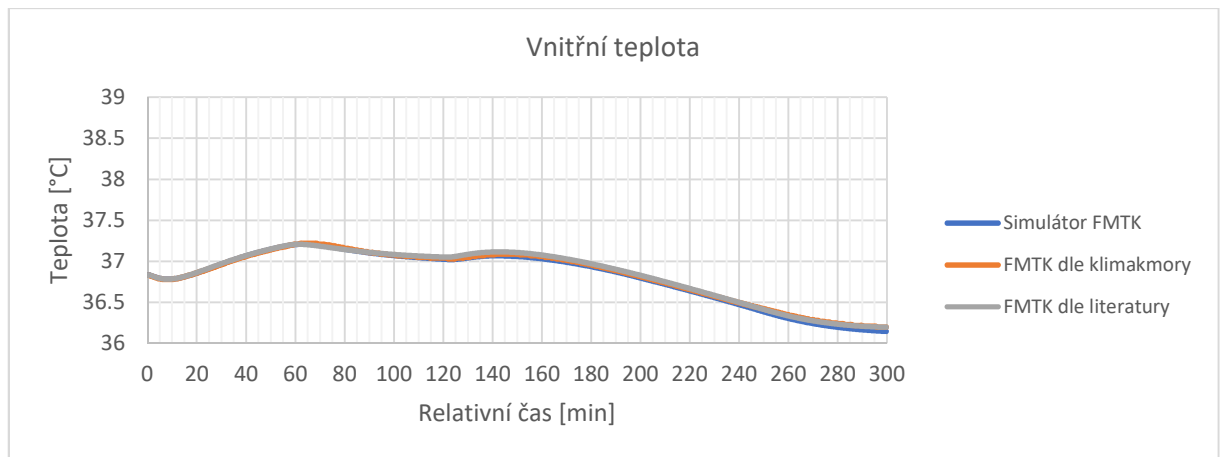
Globální parametry

- ad 1) Okolní teploty v tomto případě prudce neklesají ani nestoupají k vysokým hodnotám, a v tom případě nedochází ke zpoždování reakce na teploty u Simulátoru Newton, ani k přehřívání manekýna. Z toho důvodu se obě křivky Simulátoru shodují (Obr. 6.30).
- ad 2) Vzhledem k tomu, že se obě křivky Simulátoru shodují, nelze určit, který průběh lépe reprezentuje člověka.
- ad 3) V tomto případě se experiment přibližuje více hodnotám křivky FMTK dle klimakomory.



Obr. 6.30 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-18-28 °C

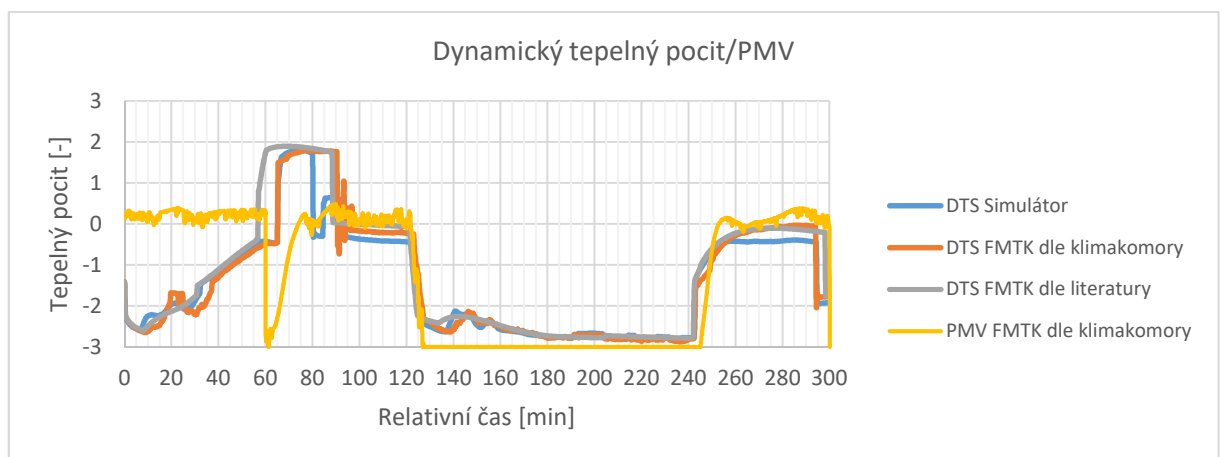
Křivky vnitřní teploty Simulátoru i FMTK dle literatury i klimakomory se při tomto scénáři shodují. Pouze ke konci ve 28 °C (241. až 300. minuta) je vnitřní teplota Simulátoru mírně nižší oproti FMTK, a to se zanedbatelným rozdílem.



Obr. 6.31 Průběh vnitřní teploty těla u scénáře 28-18-28 °C

ad 4) V neutrálním prostředí při 22 °C je index PMV na konstantní hodnotě 0, avšak DTS je v počátku testu na hodnotě -2,5 a postupně stoupá až na -0,5. Při změně okolní teploty na 28 °C (60. minuta) index PMV prudce klesl na -3 a poté se ustálil na hodnotě blízké 0, přičemž DTS stoupl na 2 a po 90. minutě skokově klesl na hodnotu blízké 0. V této části se DTS shoduje s indexem PMV. Ve 120. minutě, při poklesu teploty na 18 °C, došlo ke snížení indexu PMV na -3 a DTS na -2,5, přičemž v průběhu setrvání v prostředí o této teplotě, se index DTS dále snižoval až k hodnotě blízké 3. Při opětovném vystavení teplotě 28 °C se index vrátil u obou indexů na hodnoty blízké 0.

Zde, jako u scénáře 38-33-28 °C, dochází v 60. minutě k podivnému chování indexu PMV. Podrobnější rozbor tohoto problému je uveden v diskuzi.



Obr. 6.32 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-18-28 °C

6.4.6 28-18-28 °C clothed

Cílem tohoto měření bylo vyzkoušet, zda bude simulátor poskytovat správné výsledky i se změnou oděvu. Toto testování nebylo provedeno experimentálně. Vstupní podmínky byly totožné s předešlým testem 28-18-28, jedinou změnou bylo obléknutí manekýna místo spodního prádla (0,1 clo) do letního oděvu (0,6 clo) (viz Obr. 6.33). Manekýn byl pro zajímavost vyfocen termální kamerou (Obr. 6.34 a Obr. 6.35), na snímcích lze pozorovat odlišné teploty různých částí těla.



Obr. 6.33 Manekýn oblečen do lehkého oděvu



Obr. 6.34 Snímek pořízený termální kamerou

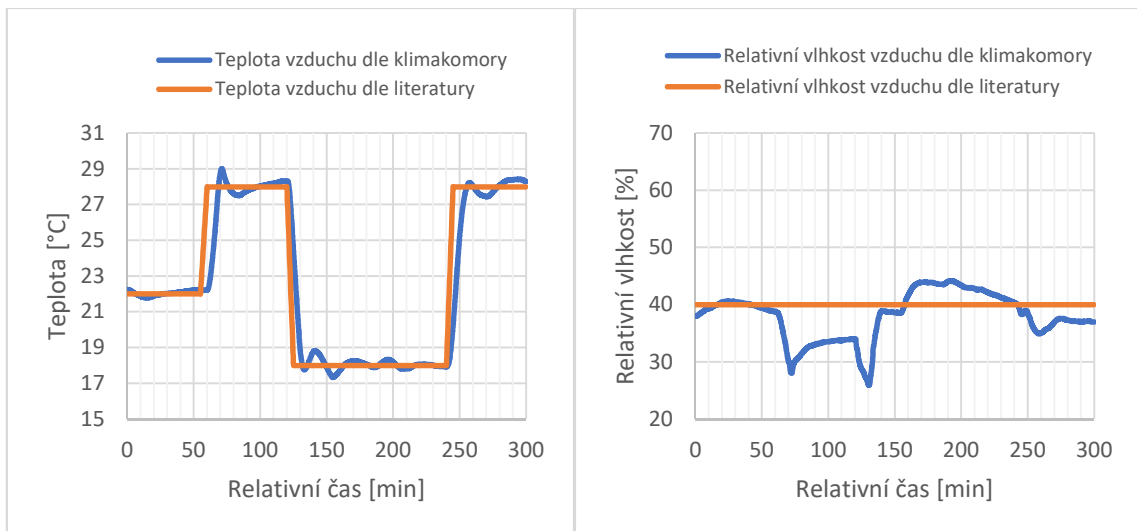


Obr. 6.35 Snímek pořízený termální kamerou

Tab. 6.6 Parametry experimentálních dat scénáře 18-28-18 °C clothed

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|-----|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 22 | 22 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 2.5 | 1 | 6 |
| 55 | 22 | 22 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 2.5 | 1 | 6 |
| 60 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |
| 120 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |
| 125 | 18 | 18 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |
| 240 | 18 | 18 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |
| 245 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |
| 300 | 28 | 28 | 0.4 | 0.1 | 0 | 101325 | 1.15 | 1 | 6 |

Průběh teploty je identický předchozímu scénáři 28-18-28 °C, avšak při tomto testu došlo ke krátkodobému navýšení teploty v komoře až na 29 °C (60. minuta), přičemž požadovaná teplota byla 28 °C. Během 7 minut se teplota v komoře stabilizovala na požadavek.

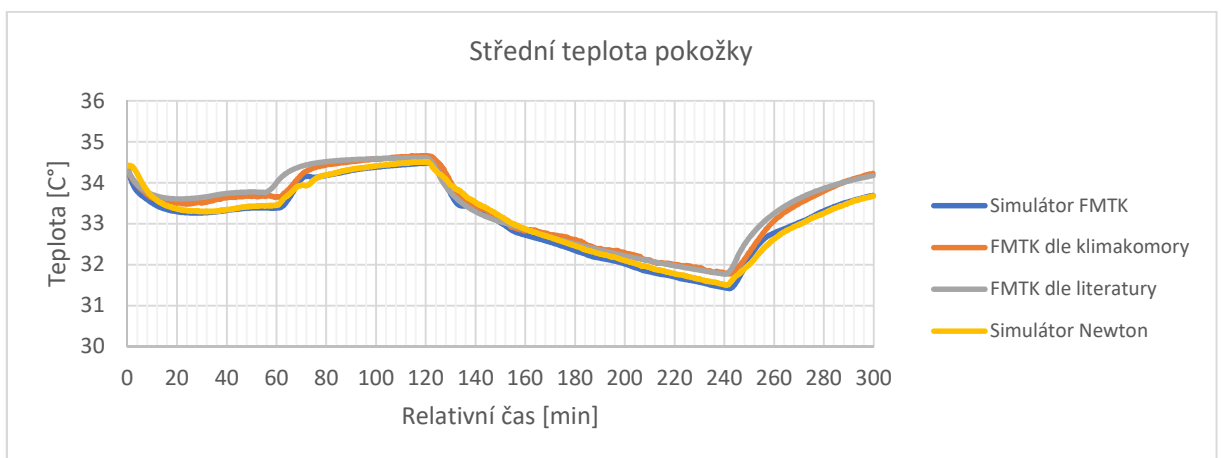


Obr. 6.36 Parametry vzduchu - 28-18-28 °C clothed

Globální parametry

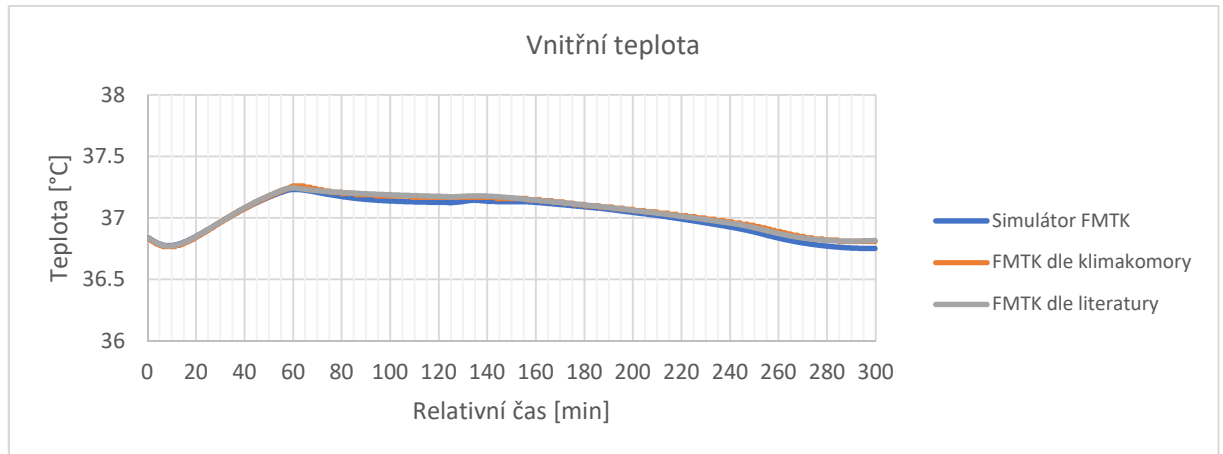
Cílem tohoto scénáře, nebylo ověřit Simulátor pomocí experimentálních dat, ale otestovat, zdali Simulátor správně zohlední vliv oděvu na tepelný pocit/komfort. Což výsledky prokázali, tzn. byla demonstrována výhoda Simulátoru oproti samotnému virtuálnímu modelu, kdy je nutné parametry oděvu předem zjišťovat, kdežto Simulátor je zohledňuje v reálném čase, tj. teoreticky je možné měnit oděv během reálného testu. Výše uvedené se vztahuje na tepelné odpory oděvem, vypařovací odpory je potřeba zohlednit zvláště.

- ad 1) V tomto scénáři nedochází ke zpoždění Simulátoru Newton oproti Simulátoru FMTK. Křivky se v celém průběhu téměř shodují (Obr. 6.37).
- ad 2) Jelikož tento scénář nebyl proveden experimentálně, nelze určit hodnoty, které se nejvíce blíží chování člověka.
- ad 3) Hodnoty FMTK dle klimakomory se oproti hodnotám Simulátoru liší, avšak nelze určit, který průběh je nejbližší lidskému organismu.



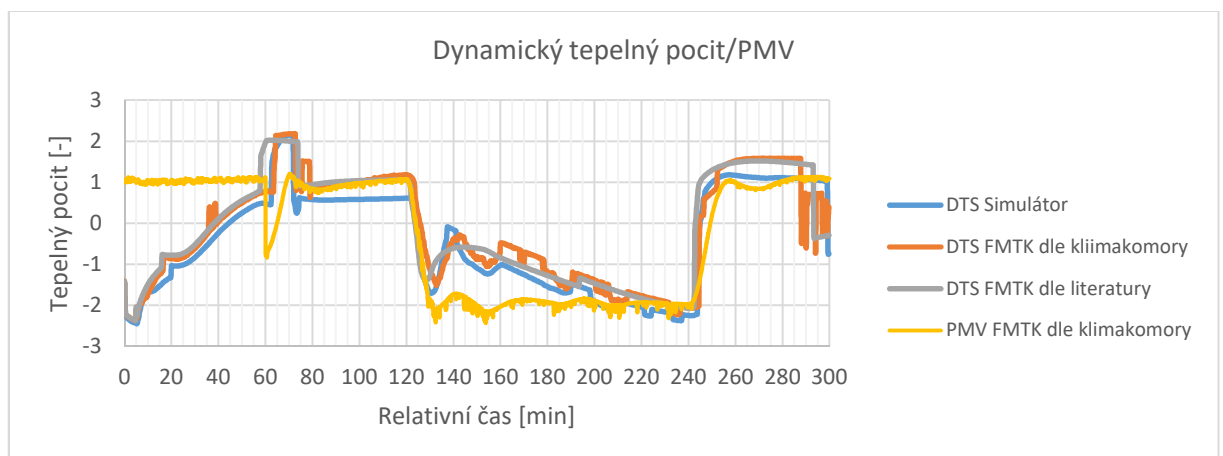
Obr. 6.37 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-18-28 °C clothed

Až na malé odchylky se průběhy vnitřní teploty Simulátoru i FMTK dle klimakomory i literatury shodují.



Obr. 6.38 Průběh vnitřní teploty u scénáře 28-18-28 °C clothed

ad 4) Index PMV je v počátku testu při neutrálním prostředí 22 °C na hodnotě 1, účastníkům tedy bylo teplo. Index DTS začínal na hodnotě -2 (velmi chladno) a postupně se vyrovnal indexu PVM a zastavil se na hodnotě 1. Oproti minulému scénáři, kde byly účastníci oblečeni pouze do spodního prádla, jsou nyní oblečeni lépe, což způsobuje, že je účastníkům tepleji. V 60. minutě okolní teplota stoupla na 28 °C, což způsobilo u PMV propad indexu až na hodnotu -1, oproti tomu index DTS stoupl na 2. Po 75. minutě oba indexy klesly na hodnotu 0,7 až 1. Ve 125. minutě při teplotě 18 °C je index PMV na -2 a DTS postupně klesá z 0 na -2. Při zvýšení teploty na 28 °C se skokově zvyšují oba indexy na 1 a do konce testu se drží mezi hodnotami 0,5 až 1,5.



Obr. 6.39 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-18-28 °C clothed

6.4.7 3-5-8 met

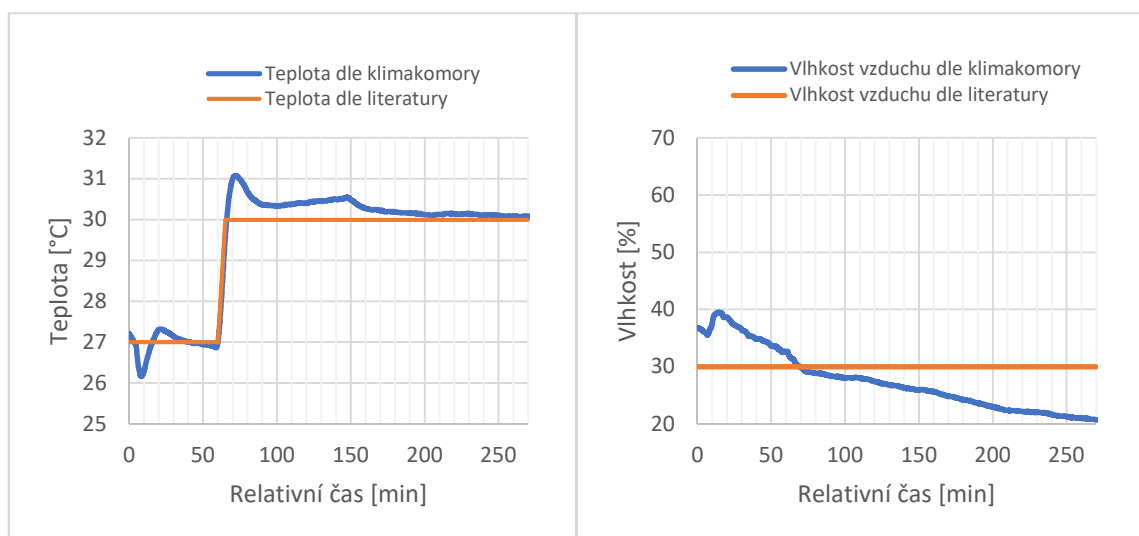
V tomto experimentu se lidé podrobili, za konstantní teploty 30 °C, postupně se měnícím činností. Interval mezi změnou činností byl vždy 25 minut. Prvních 25 minut testování

lidé pouze stáli (1 met), poté cvičili (3 met), dalších 25 minut odpočívali, následovalo náročné cvičení (5 met), odpočinek, náročné cvičení (8 met) a na posledních 25 minut opět následoval odpočinek v poloze ve stoje. Podrobné parametry jsou vyobrazeny v Tab. 6.7.

Tab. 6.7 Parametry experimentálních dat scénáře 3-5-8 met

| Time | Tsur | Trad | RH | v | qsr | Psur | act | posture | dress |
|-------|------|------|-----|-------|---------------------|--------|-------|-----------|--------|
| [min] | [°C] | [°C] | [-] | [m/s] | [W/m ²] | [Pa] | [met] | [stn/sit] | [name] |
| 0 | 27 | 27 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 60 | 27 | 27 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 65 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 90 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 95 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 3 | 1 | 1 |
| 120 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 3 | 1 | 1 |
| 125 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 150 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 155 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 5 | 1 | 1 |
| 180 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 5 | 1 | 1 |
| 185 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 210 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 215 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 8 | 1 | 1 |
| 240 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 8 | 1 | 1 |
| 245 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |
| 270 | 30 | 30 | 0.3 | 0.1 | 0 | 101325 | 1 | 1 | 1 |

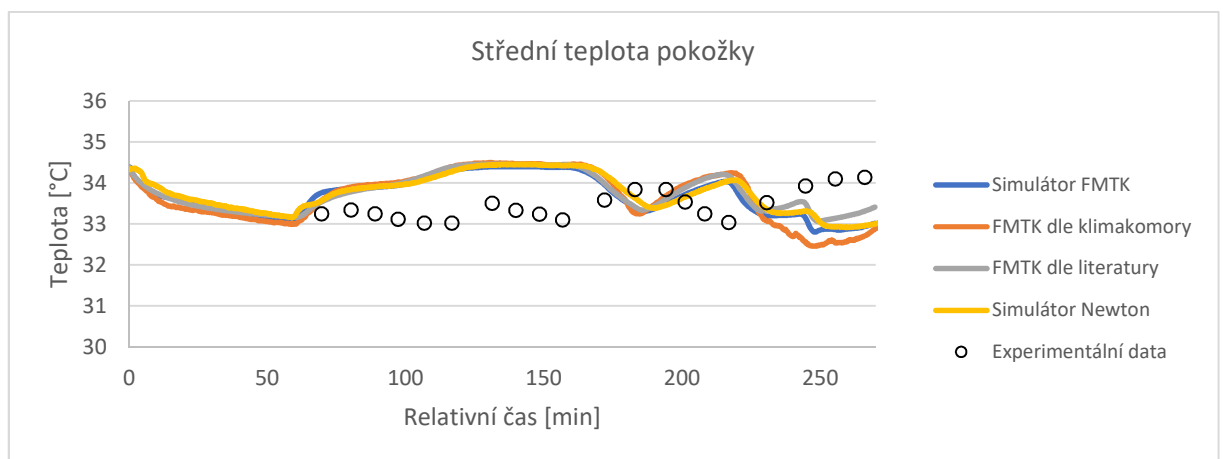
Teploty vzduchu (Obr. 6.40) se v tomto scénáři příliš neměnily. Na začátku testu měla být podle literatury v komoře nastavena teplota 27 °C, avšak při nastavování se vychýlila až na hodnotu 26 °C ve 35. minutě se ustálila. Při zvýšení teploty v komoře na 30 °C byl její náběh identický s průběhem teplot v literatuře, ačkoliv se nepodařilo v komoře zastavit na 30 °C a teplota stoupla až na 31 °C. V 92. minutě se začala ustalovat. Relativní vlhkost se držela mezi 20 % a 40 %.



Obr. 6.40 Parametry vzduchu – 3-5-8 met

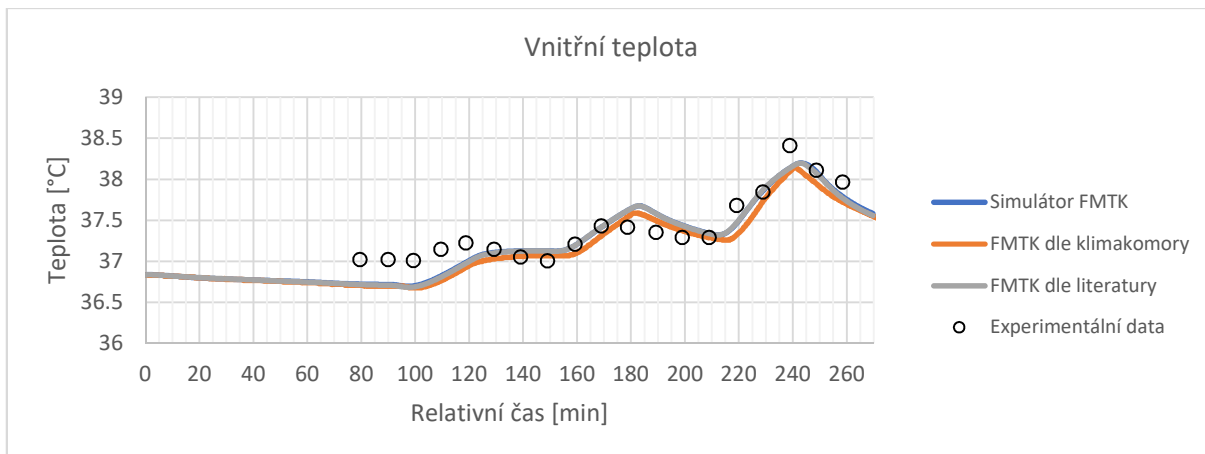
Tento scénář názorně demonstuje možnost využití manekýna pro vyšší metabolické produkce tepla, ovšem jsou zde zásadní omezení. Simulátor zohledňuje pouze generaci tepla, nikoliv vliv pohybu. Vypařovací ztráty jsou silně závislé na odparu oděvu vypařováním, které současný manekýn neumí vyhodnotit. Problematická je i samotná predikce množství odpařeného potu modelem FMTK, lze vidět, že je problematické predikovat střední teplotu pokožky samotným FMTK modelem. Naopak velice dobře vystihuje vnitřní teplotu, která je jedním z nejdůležitějších indikátorů tepelného stresu.

- ad 1) Křivky Simulátoru FMTK a Simulátoru Newton jsou téměř shodné, až na 251. minutu, kde u Simulátoru FMTK došlo k většímu poklesu teploty, přičemž rozdíl oproti Simulátoru Newton byl pouze 0,5 °C.
- ad 2) Při změnách činnosti samotný FMTK model a tím pádem ani Simulátor nefungují tak spolehlivě, jako u předešlých scénářů, kdy se měnila teplota prostředí. Experimentální data se tedy nepřibližují ani jedné křivce.
- ad 3) Nelze vyhodnotit, zda je blíže k reálným datům FMTK dle klimakomory nebo Simulátor.



Obr. 6.41 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 3-5-8 met

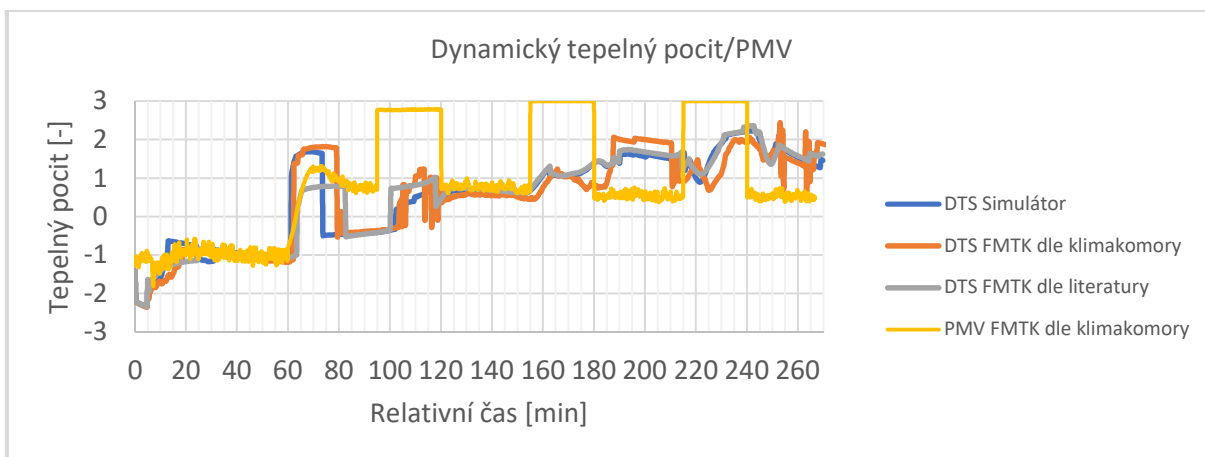
U hodnot vnitřní teploty se experimentální data shodují lépe než u povrchových teplot. Simulátor i FMTK má shodné průběhy s minimálními odchylkami.



Obr. 6.42 Průběh vnitřní teploty u scénáře 3-5-8 met

ad 4) Na začátku testu, při teplotě vzduchu 27 °C, se index PMV i DTS drží mezi hodnotami -2 a -1 a jejich průběh se shoduje. Při oteplení na 30 °C (65. minuta) dochází k nárůstu indexů, přičemž PMV vzroste na 0,5, avšak index DTS se dostává až na hodnotu 2 (teplo). V tuto dobu lidé pouze odpočívali. V 95. minutě lidé začali cvičit a v důsledku toho se index PMV skokově zvýšil na 2,5, přičemž index DTS nejdříve klesá na -0,5 a poté stoupá na 1. Stejně je tomu tak i u dalších cvičení ve scénáři. Oproti PMV index DTS při cvičení jen mírně stoupá, nedochází ke skokovému nárůstu indexu. Při odpočinku oproti PMV ihned neklesá.

V důsledku toho, že index PMV nezohledňuje dynamický průběh, je hodnocení tepelného pocitu oproti DTS odlišné.



Obr. 6.43 Průběh DTS/PMV u scénáře 3-5-8 met

7 Diskuze

7.1 Simulátor

Jelikož tepelný manekýn a model FMTK má různý počet segmentů, bylo nutné navrhnout propojení mezi nimi. Celková plocha manekýna a modelu FMTK se liší o 0.01 m², ovšem lokální plochy vyjadřují větší rozdíly až 46 %. Rozdílnost lokálních ploch mohou vnášet chybu do přenášení hodnot tepelných toků a přenosu tepla uvnitř člověka pro jednotlivé segmenty.

Hlavní výhodou simulátoru spočívá v podrobném vyhodnocení asymetrického vlivu prostředí na člověka, včetně zohlednění přesného vlivu oděvu na tepelnou izolaci člověka.

Simulátor rovněž doplňuje schopnost tepelného manekýna o parametry, které před tím nebylo možné vyhodnotit (např. vnitřní teplota, index DTS).

7.2 Výsledky testů

Neblíže experimentálními datům jsou simulace FMTK dle literatury, což je logické, neboť skutečné podmínky v klimatické komoře byly pouze přiblížením podmínek, které byly při experimentech s lidmi. Hlavním smyslem testů ale bylo porovnat, dle bodu 3 v kapitole, FMTK dle komory a simulátor FMTK.

Kromě testu 18-42-18 °C (tj. horké prostředí) byla ověřena funkčnost Simulátoru FMTK, která až na drobné odchylky odpovídala virtuálním simulacím FMTK dle klimakomory. Simulátor funguje na principu předávání tepelných toků, kdežto virtuální simulace ty tepelné toky vypočítávají. Potvrdilo se, že Simulátor je schopen reprodukovat chování člověka, a to pouze pomocí měření tepelných toků a dopočítávání tep. ztrát vypařováním a dýcháním, kdy jako vstupní data je nutné specifikovat metabolickou produkci tepla a vypařovací odpory oděvu. Není nutné měřit tep. odpor oděvu, rychlost proudění ani jeho teplotu a radiační teplotu či dopadající sluneční záření, to vše tep. manekýn zohledňuje právě v tep. toku odcházejícím z jeho povrchu.

Ve většině testovaných příkladech se ukázalo, že index PMV má v určitých částech odlišný průběh od indexu DTS. Nejprve se zdálo, že je důvodem vliv podmínek prostředí, avšak po hlubším rozboru se příčina jeví jako změna metabolické produkce tepla v daný okamžik, kdy model PMV oproti DTS není schopen zohlednit předchozí chování člověka. Tzn. dochází k vývoji vnitřních a povrchových teplot v čase tak, jak to dokáží termofyziologické modely. Jinými slovy u modelu PMV je daný okamžik nezávislý na tom, co je před tím, což se ukázalo u scénářů 28-18-28 °C a 28-33-28 °C, kdy v čase 60 minut klesala rychlost proudění a stoupala teplota vzduchu, přičemž index PMV klesal. Oproti tomu index DTS zachytil změnu více realisticky a zohlednil tepelnou setrvačnost lidského těla.

8 Závěr

Byl vytvořen a otestován termofyziologický Simulátor propojující FMTK model s tepelným manekýnem Newton, což bylo cílem této diplomové práce. Jelikož VUT Brno nedisponuje aktivně chlazeným potícím manekýnem, Simulátor není vhodný pro horká prostředí, kdy teplota okolí překračuje teploty pokožky. I přes toto omezení Simulátor prokázal možnost použití pro chladné a neutrální prostředí, kdy je tepelný manekýn schopen vyhodnocovat dynamický tepelný pocit DTS, zohlednit vliv oděvu a metabolické produkce tepla. Podstatným rysem Simulátoru je zohlednění reálné tepelné kapacity člověka, která se projevuje zejména při náhlých změnách prostředí, čímž se tepelný manekýn víc přibližuje reálnému chování člověka.

Simulátor může najít uplatnění tam, kde je potřeba zohlednit vliv člověka a tam, kde už je testování s lidmi na hranici bezpečnosti. Ovšem je nutné podotknout, že zatím se jedná o speciální aplikace, nikoliv pro běžně použití v oblasti vzduchotechniky. Přesto tepelní manekýni již našli uplatnění v automobilovém a oděvním průmyslu a jejich adaptivní verze přináší nové možnosti aplikací. Na druhou stranu, i jak bylo v této práci prezentováno, stále jsou zde technické detaily, které by bylo potřeba vylepšit a jsou předmětem výzkumu nejen u nás, ale i ve světě (např. Thermetrics, USA, EMPA, Švýcarsko).

Problematická je např. reakční doba manekýna při náhlých změnách, kdy povrchová teplota manekýna neklesá tak rychle, jak by měla dle Simulátor FMTK, jedná se o časové prodlevy v řádu minut. Bez potícího systému je využití Simulátoru limitováno. Přesto pro oblast tepelného komfortu, kdy se nepředpokládá pocení, tento Simulátor přináší nové možnosti, jak vyhodnocovat tepelný komfort, např. v kabinách dopravních prostředků.

Jako další krok pro reálnější popis chování člověka by bylo vhodné aplikovat tuto metodiku na potící verzi tepelného manekýna.

Seznam použitých zdrojů

- [1] ASHRAE, 2001. *Fundamentals Handbook*. Atlanta, USA.
- [2] BLOOD, K., a kol., 2010. *Further Validation of the model-controlled Newton thermal manikin against historical human studies*. Victoria, Canada. Burke R. and Heiss D. Proceedings of the 8th International Meeting for Thermal Manikin and Modeling.
- [3] CENTNEROVÁ, L., 2000. Tepelná pohoda a nepohoda. *Vytápění větrání instalace* č. 5 [online]. Dostupné z: <https://vetrani.tzb-info.cz/vnitri-prostredi/404-tepelna-pohoda-a-nepohoda>.
- [4] CENTNEROVÁ, L., 2001. *Tradiční a adaptivní model tepelné pohody* [online]. Praha, [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: <https://pure.tue.nl/ws/files/3089420/404776027440901.pdf>. Disertační práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta stavební.
- [5] DRKAL, F., a kol., 2009. *Vzduchotechnika* [online]. Praha. [Cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://svjvybiralova.cz/images/dokumenty/vzt/Vzduchotechnika.pdf>.
- [6] *EMPA* [online]. Sweating Torso. [Cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.empa.ch/web/s401/torso>.
- [7] *Energetické fórum*, 2001. Tepelný manekýn Newton [online]. [Cit. 2019-05-15]. Dostupné z: <http://www.energetickeforum.cz/fsi-vut-v-brne/pristrojove-vybaveni/tepelnymankyn-newton>.
- [8] *Engineering Tool Box*, 2004 [online]. Clo – Clothing and Thermal Insulation. [cit. 2019-04-05]. Dostupné z: https://www.engineeringtoolbox.com/clo-clothing-thermal-insulation-d_732.html.
- [9] FANGER, P. O., 1970. *Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering*. Copenhagen: Danish Technical Press.
- [10] FARRINGTON B. R., a kol., 2004. *Use of a Thermal Manikin to Evaluate Human Thermoregulatory Responses in Transient, Non-Uniform, Thermal Environments* [online]. [Cit. 2019-02-15]. Dostupné z: https://www.nrel.gov/transportation/assets/pdfs/2004_01_2345.pdf.
- [11] FIALA, D., 1998. *Dynamic Simulation of Human Heat Transfer and Thermal Comfort*, Ph.D thesis. De. Montfort University, Leicester.
- [12] FIALA, D., a kol., 1999. A computer model of human thermoregulation for a wide range of environmental conditions: the passive system. *Journal of Applied Physiology*.
- [13] FIALA, D., a kol., 2001. Computer prediction of human thermoregulatory and temperature responses to a wide range of environmental conditions. *International Journal of Biometeorology*.

- [14] FIALA, D., a kol., 2003. First principles modeling of thermal sensation responses in steady state and transient conditions. *ASHRAE Transaction*.
- [15] FOJTLÍN, M, a kol., 2017. An Innovative HVAC Control System: Implementation and testing in a vehicular Cabin. *Journal of thermal biology*. roč. 70, č. 2017, s. 64-68. ISSN:0306-4565.
- [16] HEPOKOSKI, M., a kol., 2015. *Simulating Physiological Response with a Passive Sensor Manikin and an Adaptive Thermal Manikin to Predict Thermal Sensation and Comfort* [online]. SAE International [cit. 2019-05-12]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/282958178_Simulating_Physiological_Response_with_a_Passive_Sensor_Manikin_and_an_Adaptive_Thermal_Manikin_to_Predict_Thermal_Sensation_and_Comfort.
- [17] KAR, F., a kol., 2007. *Comparison of different test methods for the measurement of fabric or garment moisture transfer properties* [online]. IOP Publishing [cit. 2019-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/231131545_Comparison_of_different_test_methods_for_the_measurement_of_fabric_or_garment_moisture_transfer_properties.
- [18] PENNES, H. H., 1948. Analysis of Tissue and Arterial Blood Temperatures in the Resting Human Forearm. *Journal of Applied Physiology*.
- [19] POKORNÝ, J., 2014. *Dynamický fyziologický a psychologický model lidského tepelného komfortu*. Projekt. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Odbor termomechaniky a techniky prostředí.
- [20] POKORNÝ, J., JÍCHA, M., 2015. *Implementace Fialova termofyziologického modelu tepelného komfortu v Matlabu* [online]. Vytápění, větrání, instalace, 2015, no. 4, p. 99-102. ISSN: 1210-1389.
- [21] POKORNÝ, J., 2012. *Svázání fyziologického modelu s modelem tepelného komfortu*. Doktorská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav.
- [22] POKORNÝ, J., a kol., 2017. Verification of Fiala-based human thermophysiological model and its application to protective clothing under high metabolic rates. *ScienceDirect*, Building and Environment.
- [23] PSIKUTA, A., a kol., 2017. *Thermal manikins controlled by human thermoregulation models for energy efficiency and thermal comfort research – A review* [online]. Switzerland. [Cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306202>.
- [24] ŠIŠOLÁK J., 2018. *Fialův termofyziologický model tepelného komfortu*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav techniky prostředí. Vedoucí práce Vladimír ZMRHAL.
- [25] *Thermetrics, a*. Advanced Thermal Measurement Technology [online]. ManikinPC Human Comfort Software. [Cit. 2019-05-02]. Dostupné z: <http://www.thermetrics.com/products/manikin-pc2-human-comfort-software-0>.

- [26] *Thermetrics, b.* Advanced Thermal Measurement Technology [online]. STAN-Seat Test Automotive Manikin. [Cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <http://www.thermetrics.com/products/partial-manikins/upper-lower-body-systems>.
- [27] *UCS.* [online]. Thermal-Evaporate manikin system. [Cit. 2019-05-20]. Dostupné z: http://www.ucstech.eu/files/data/thermal_evaporative_manikins.pdf.
- [28] *Wikipedia, 2017* [online]. Thermal manikin. Poslední revize 19.4.2017 [cit. 2019-02-19]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_manikin.
- [29] WISSLER, E., 1964. A mathematical model of the human thermal system. *Bulletin of Mathematical Biology*.

Seznam symbolů a zkratek

| | | |
|------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------|
| PMV | (Predicted Mean Vote) – předpokládaná průměrná volba | [W] |
| M* | celková metabolická produkce tepla | [W] |
| W* | celkový mechanický výkon | [W] |
| M | metabolická produkce tepla vztažená na plochu | [W/m ²] |
| W | mechanický výkon vztažený na plochu | [W/m ²] |
| E _d | tepelná ztráta difuzí pokožky (suché pocení) | [W] |
| E _{sw} | tepelná ztráta pocením (mokré pocení) | [W] |
| R | tepelný tok zářením | [W] |
| C | tepelný tok prouděním | [W] |
| K | tepelný tok vedením | [W] |
| L _{res} | latentní tepelná ztráta dýcháním | [W] |
| S _{res} | citelná tepelná ztráta dýcháním | [W] |
| ΔS | akumulace tepla, tj. zohlednění tepelné kapacity člověka | [W] |
| L | rozdíl tepelného toku organismu a toku unikajícího z těla do okolí | [W] |
| p _{wa} | parciální tlak vodní páry ve vzduchu | [Pa] |
| t _a | teplota vzduchu | [°C] |
| f _{cl} | poměr povrchu oblečené a neoblečené části těla | [-] |
| t _{cl} | teplota oděvu | [°C] |
| t _r | střední radiační teplota | [°C] |
| h _c | součinitel přestupu tepla prouděním | [W/m ² K] |
| I _{cl} | tepelná izolace oděvu | [W/m ² K] |
| t | čas | [s] |
| T _{ar} | teplota krve v žilách | [°C] |
| r | poloměr | [m] |
| ρ | hustota | [kg/m ³] |
| c | měrná tepelná kapacita | [J/kgK] |
| λ | součinitel tepelné vodivosti | [W/mK] |
| q̇ _m | metabolická produkce tepla | [W] |
| ρ _b | hustota krve | [kg/m ³] |
| c _b | měrná tepelná kapacita krve | [J/kgK] |

| | | |
|---------------|-----------------------------------------------------------------|-----------------------|
| \dot{V}_b | objemový tok krve tkání | [m ³ /s] |
| T | teplota tkáně | [°C] |
| DTS | dynamický tepelný pocit | [-] |
| f_{sk} | vliv střední teploty pokožky na celkový tepelný pocit člověka | [-] |
| $T_{sk,m}$ | střední teplota pokožky | [°C] |
| Φ | vliv vnitřní teploty na celkový tepelný pocit | [-] |
| T_{hy} | teplota hypotalamu | [°C] |
| ψ | dynamický člen | [-] |
| τ | parametr nesoucí změny rychlosti, tepelného stavu a její trvání | [-] |
| T_r | střední radiační teplota | [°C] |
| φ | relativní vlhkost | [-] |
| R_{cl} | tepelný odpor oděvu | [clo] |
| v | rychlost proudění vzduchu | [m/s] |
| T_{con} | teplota okolního vzduchu, který je v kontaktu s částí těla | [°C] |
| q_{sr} | intenzita slunečního záření dopadajícího na povrch člověka | [kWh/m ²] |
| $Q_{segment}$ | tepelný výkon | [W] |
| $S_{segment}$ | plocha segmentu | [m ²] |
| q_{total} | celková tepelná ztráta | [W] |
| T_{sur} | teplota okolního vzduchu | [°C] |
| T_{rad} | teplota okolních stěn | [°C] |
| RH | relativní vlhkost vzduchu | [-] |
| P_{sur} | tlak okolního vzduchu | [Pa] |
| act | aktivita vykonávané činnosti | [met] |

Seznam obrázků

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 2.1 Procentuální nespokojenost lidí PPD jako funkce předpokládané průměrné volby PMV (Drkal, 2009) | 18 |
| Obr. 3.1 Vstupně výstupní schéma FMTK modelu (Pokorný, 2015)..... | 24 |
| Obr. 4.1 HVAC manekýn s pasivními senzory (MTNW)[3] | 26 |
| Obr. 4.2 Adaptivní tepelný manekýn Newton (Hepokoski, 2015) | 27 |
| Obr. 5.1 Schéma znázorňující způsob propojení manekýna s modelem | 34 |
| Obr. 5.2 Csv soubor FMTK READ. Soubor pro načtení dat z Newtona do modelu..... | 35 |
| Obr. 5.3 Csv soubor FMTK WRITE. Soubor pro načtení dat z modelu do Newtona..... | 35 |
| Obr. 5.4 Notepad++ (tlačítko Monitorování změn)..... | 36 |
| Obr. 6.1 Manekýn umístěný v Superbu po dobu testu..... | 41 |
| Obr. 6.2 Použitý automobil k testování Simulátoru..... | 41 |
| Obr. 6.3 Průběh teplot jednotlivých částí manekýna | 41 |
| Obr. 6.4 Průběh okolní teploty při testu v klimatické komoře | 42 |
| Obr. 6.5 Průběh střední teploty pokožky při testu | 42 |
| Obr. 6.6 Závěs omezující rychlost proudění vzduchu | 43 |
| Obr. 6.7 Umístění senzorů okolního prostředí..... | 43 |
| Obr. 6.8 Vzor legendy..... | 44 |
| Obr. 6.9 Parametry vzduchu – 5 °C Young | 45 |
| Obr. 6.10 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 5 °C Young | 46 |
| Obr. 6.11 Průběh vnitřní teploty pokožky u scénáře 5 °C Young | 47 |
| Obr. 6.12 Průběh DTS/PMV u scénáře 5 °C Young | 47 |
| Obr. 6.13 Průběh povrchových teplot hlavy u scénáře 5 °C Young..... | 48 |
| Obr. 6.14 Průběh povrchových teplot hrudníku u scénáře 5 °C Young | 48 |
| Obr. 6.15 Průběh povrchových teplot pravé ruky u scénáře 5 °C Young | 49 |
| Obr. 6.16 Průběh povrchových teplot pravého chodidla u scénáře 5 °C Young..... | 49 |
| Obr. 6.17 Parametry vzduchu – 10 °C Budd | 50 |
| Obr. 6.18 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 10 °C Budd | 50 |
| Obr. 6.19 Průběh vnitřní teploty u scénáře 10 °C Budd | 51 |
| Obr. 6.20 Průběh DTS/PMV u scénáře 10 °C Budd..... | 51 |
| Obr. 6.21 Parametry vzduchu - 28-33-28 °C | 52 |
| Obr. 6.22 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-33-28 °C | 53 |
| Obr. 6.23 Průběh vnitřní teploty u scénáře 28-33-28 °C | 53 |
| Obr. 6.24 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-33-28 °C..... | 54 |
| Obr. 6.25 Parametry vzduchu – 18-42-18 °C | 55 |
| Obr. 6.26 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 18-42-18 °C | 56 |
| Obr. 6.27 Průběh vnitřní teploty u scénáře 18-42-18 °C | 56 |
| Obr. 6.28 Průběh DTS/PMV u scénáře 18-42-18 °C..... | 57 |
| Obr. 6.29 Parametry vzduchu - 28-18-28 °C | 58 |
| Obr. 6.30 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-18-28 °C | 58 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------|----|
| Obr. 6.31 Průběh vnitřní teploty těla u scénáře 28-18-28 °C | 59 |
| Obr. 6.32 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-18-28 °C..... | 59 |
| Obr. 6.33 Manekýn oblečen do lehkého oděvu | 60 |
| Obr. 6.34 Snímek pořízený termální kamerou..... | 60 |
| Obr. 6.35 Snímek pořízený termální kamerou..... | 60 |
| Obr. 6.36 Parametry vzduchu - 28-18-28 °C clothed | 61 |
| Obr. 6.37 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 28-18-28 °C clothed | 61 |
| Obr. 6.38 Průběh vnitřní teploty u scénáře 28-18-28 °C clothed | 62 |
| Obr. 6.39 Průběh DTS/PMV u scénáře 28-18-28 °C clothed..... | 62 |
| Obr. 6.40 Parametry vzduchu – 3-5-8 met..... | 63 |
| Obr. 6.41 Průběh střední teploty pokožky u scénáře 3-5-8 met | 64 |
| Obr. 6.42 Průběh vnitřní teploty u scénáře 3-5-8 met | 65 |
| Obr. 6.43 Průběh DTS/PMV u scénáře 3-5-8 met..... | 65 |

Seznam tabulek

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tab. 2.1 Hodnoty clo pro typy běžného denního oblečení (Centnerová, 2000)..... | 16 |
| Tab. 2.2 Porovnání stupnic pro určení tepelného komfortu (Centnerová, 2001) | 16 |
| Tab. 4.1 Přehled dosud zvalidovaných manekýnů | 27 |
| Tab. 5.1 Soubor vstupních okrajových podmínek | 39 |
| Tab. 5.2 Ukázka výstupního souboru Simulátoru..... | 39 |
| Tab. 6.1 Parametry experimentálních dat scénáře 5 °C Young..... | 45 |
| Tab. 6.2 Parametry experimentálních dat scénáře 10 °C Budd | 49 |
| Tab. 6.3 Parametry experimentálních dat scénáře 28-33-28 °C | 52 |
| Tab. 6.4 Parametry experimentálních dat scénáře – 18-42-18 °C | 54 |
| Tab. 6.5 Parametry experimentálních dat scénáře 28-18-28 °C | 57 |
| Tab. 6.6 Parametry experimentálních dat scénáře 18-28-18 °C clothed | 60 |
| Tab. 6.7 Parametry experimentálních dat scénáře 3-5-8 met | 63 |

Seznam příloh

Příloha A: Tabulka tepelného odporu oděvu

Příloha B: Výsledky lokálních teplot

Příloha C: Rychlostní proudění vzduchu v klimakomoře

Příloha D: Zdrojové kódy – pro funkci FMTK v reálném čase a propojení s Newtonem

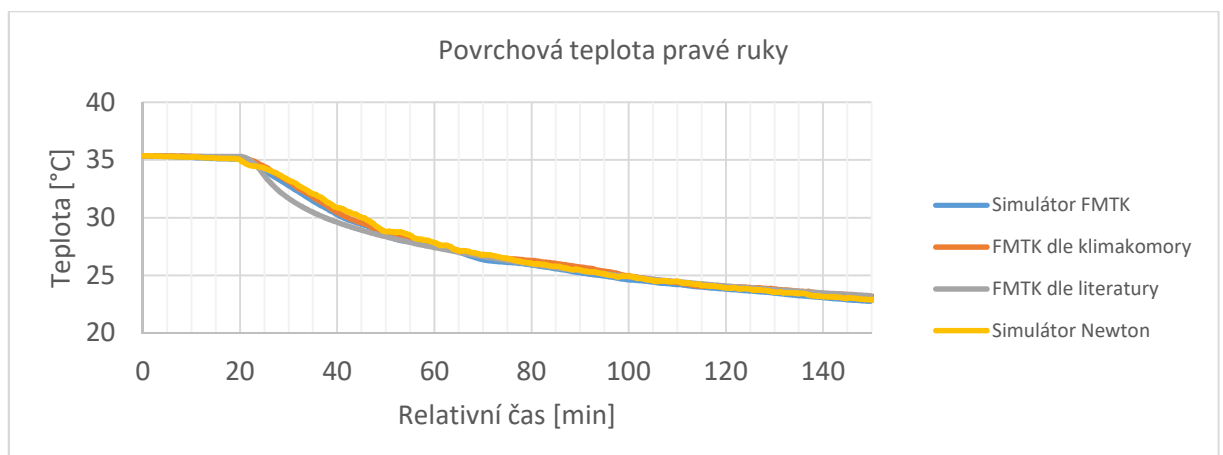
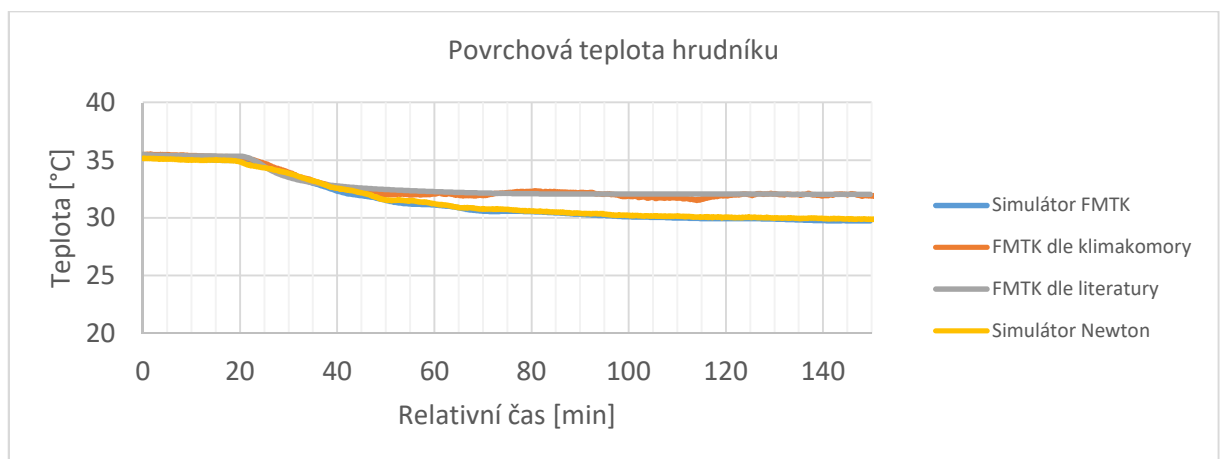
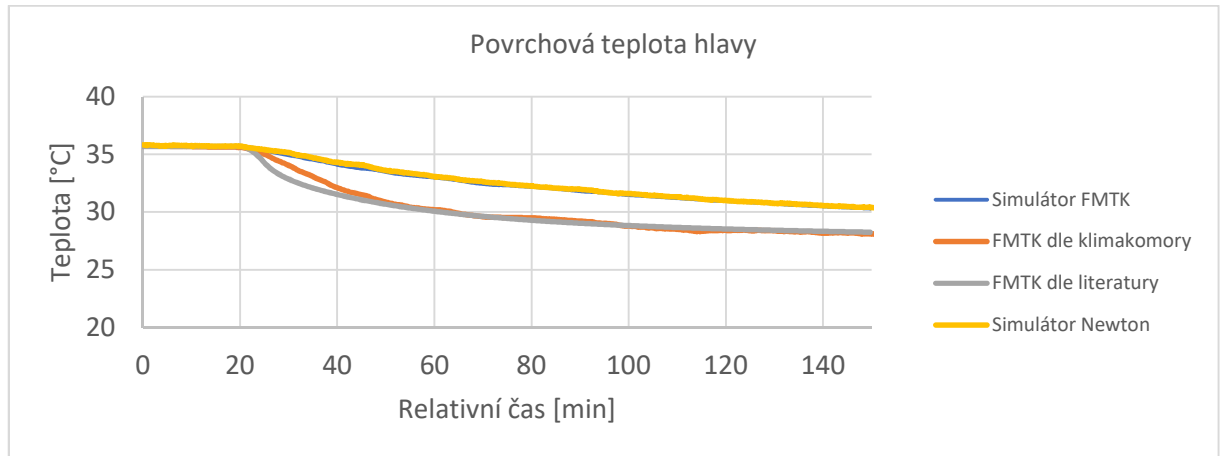
Příloha E: Excelovské soubory (pouze elektronicky na CD)

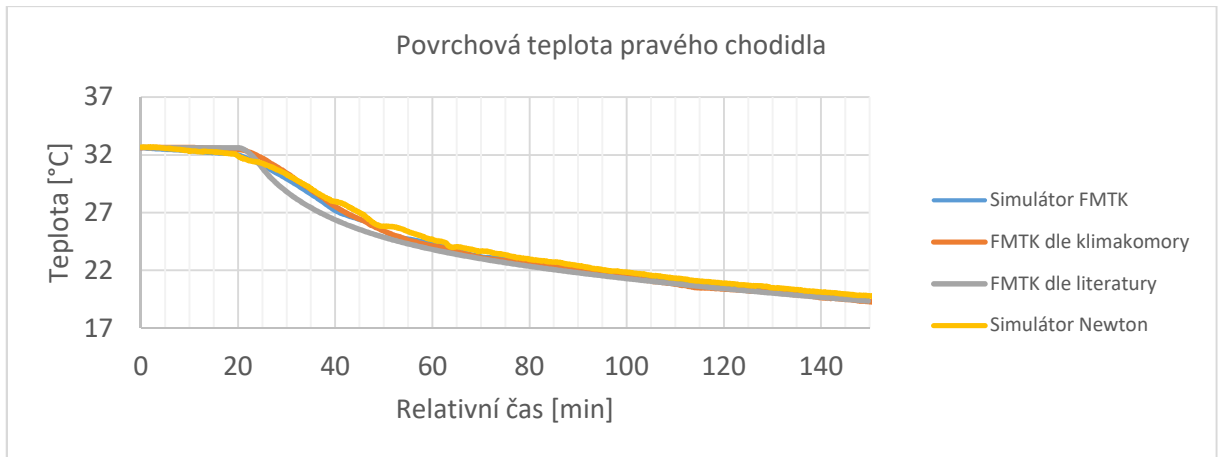
Příloha A: Tabulka tepelného odporu oděvu

| Muži | Oblečení | clo | Ženy | Oblečení | clo |
|------------------------------|---------------------|------|---------------|---------------------|------|
| Spodní prádlo | tílko | 0,06 | Spodní prádlo | podprsenka kalhotky | 0,05 |
| | tričko | 0,09 | | krátké kombiné | 0,13 |
| | slipy | 0,05 | | dlouhé kombiné | 0,19 |
| | nátělník dl. rukáv | 0,35 | | nátělník dl. rukáv | 0,35 |
| | dlouhé spodky | 0,35 | | dlouhé spodky | 0,35 |
| Košile | slabá kr. rukáv | 0,14 | Halenky | slabá | 0,20 |
| | slabá dl. rukáv | 0,22 | | silná | 0,29 |
| | silná kr. rukáv | 0,25 | Šaty | slabé | 0,22 |
| | silná dl. rukáv | 0,29 | | silné | 0,70 |
| + 5 % pro kravatu nebo rolák | | | | | |
| Vesta | slabá | 0,15 | Sukně | slabá | 0,10 |
| | silná | 0,29 | | silná | 0,22 |
| Kalhoty | slabé | 0,26 | Kalhoty | slabé | 0,26 |
| | silné | 0,32 | | silné | 0,44 |
| Svetr | slabý | 0,20 | Svetr | slabý | 0,17 |
| | silný | 0,37 | | silný | 0,37 |
| Sako | slabé | 0,22 | Sako | slabé | 0,17 |
| | silné | 0,49 | | silné | 0,37 |
| Ponožky | krátké | 0,04 | Punčochy | všechny délky | 0,01 |
| | vysoké (podkolenky) | 0,10 | | punčochové kalhoty | 0,01 |
| Boty | sandály | 0,02 | Boty | sandály | 0,02 |
| | polobotky | 0,04 | | polobotky | 0,04 |
| | kotníkové | 0,08 | | kotníkové | 0,08 |

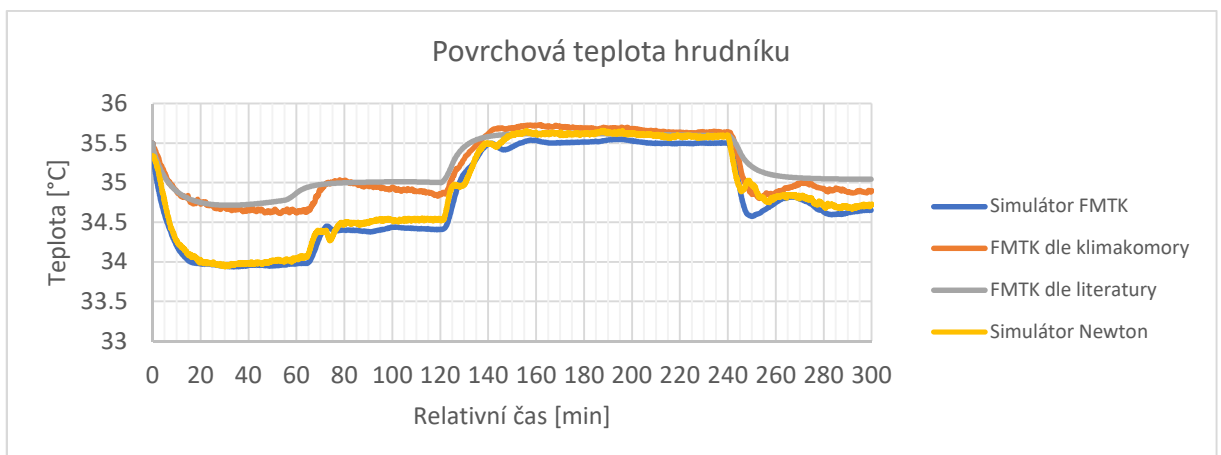
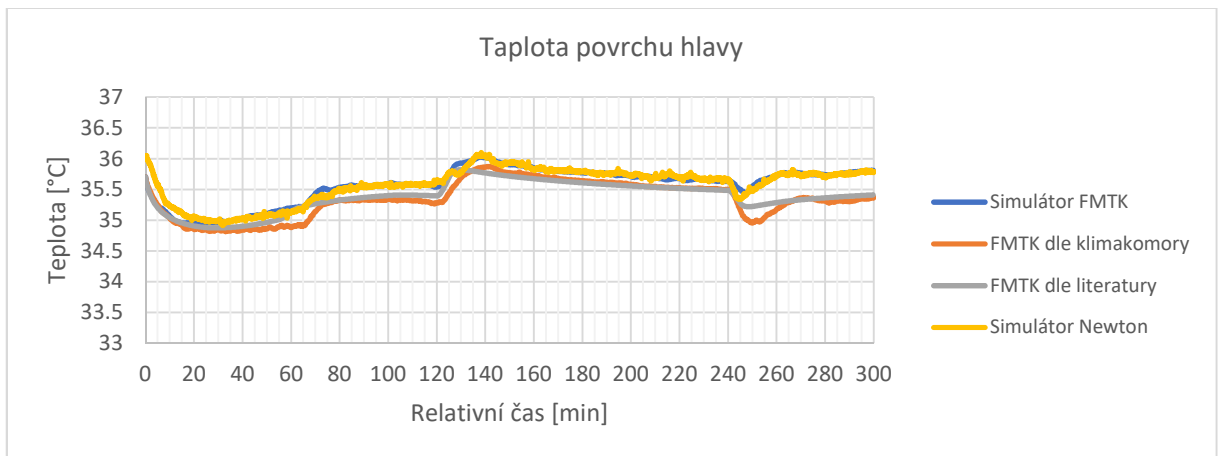
Příloha B: Výsledky lokálních teplot

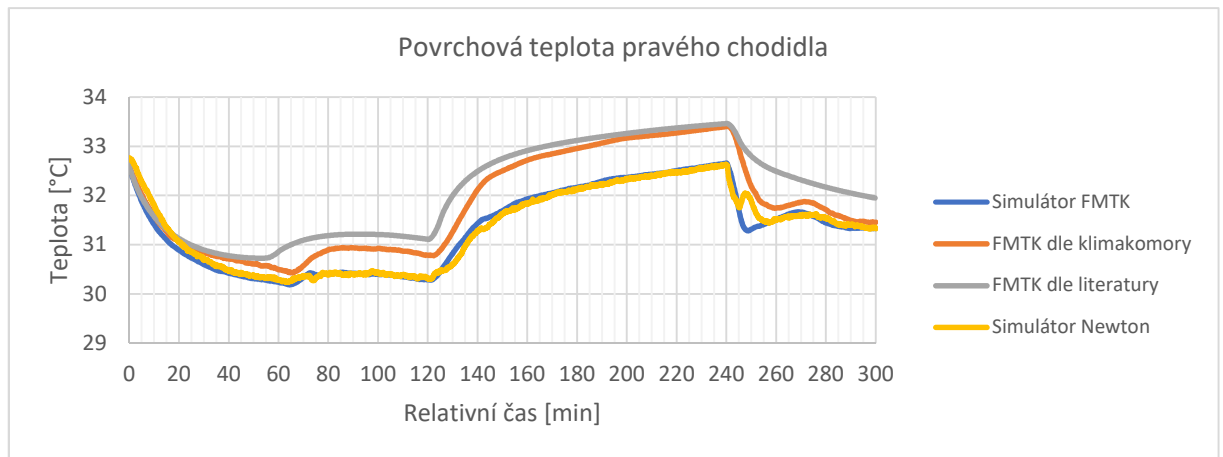
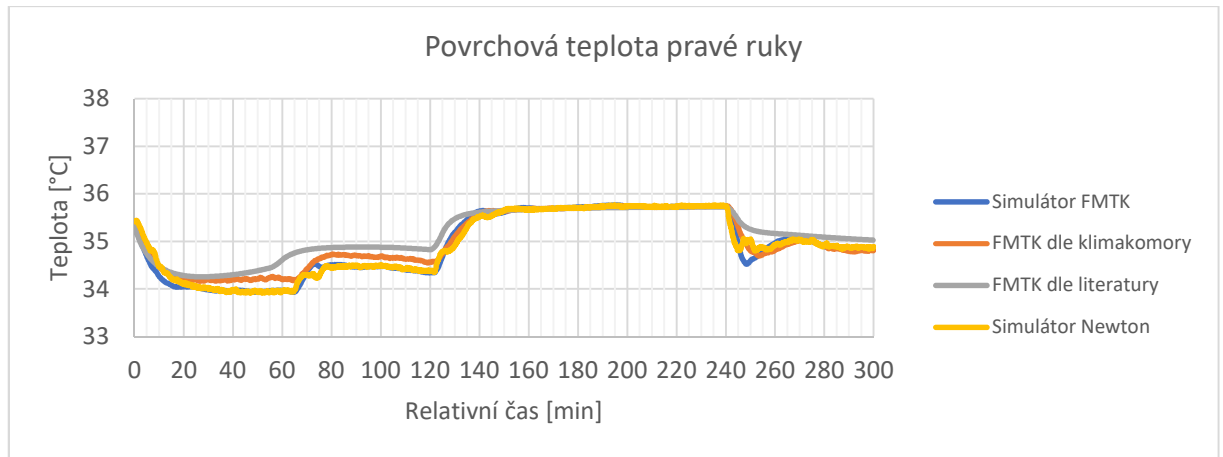
Scénář: 10 °C Budd



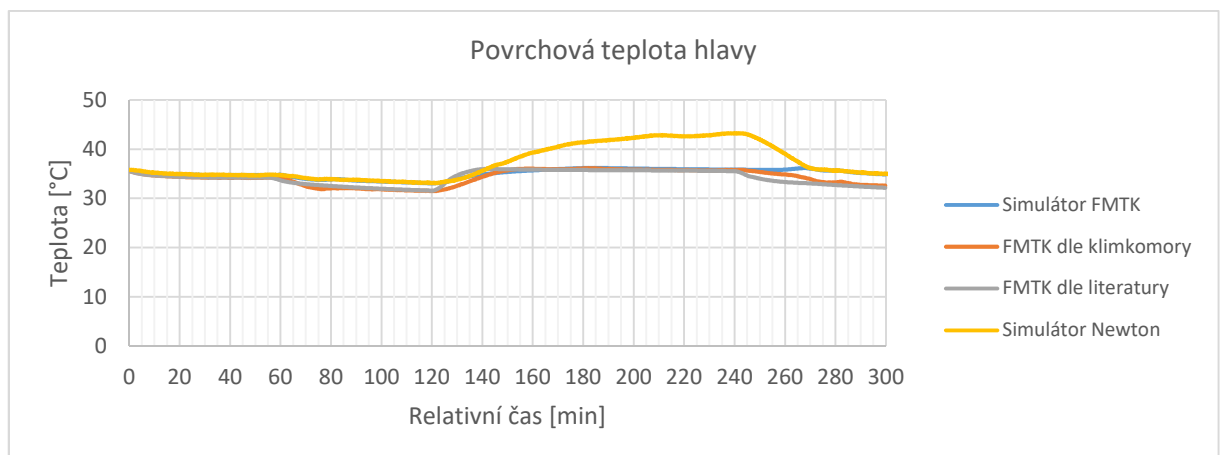


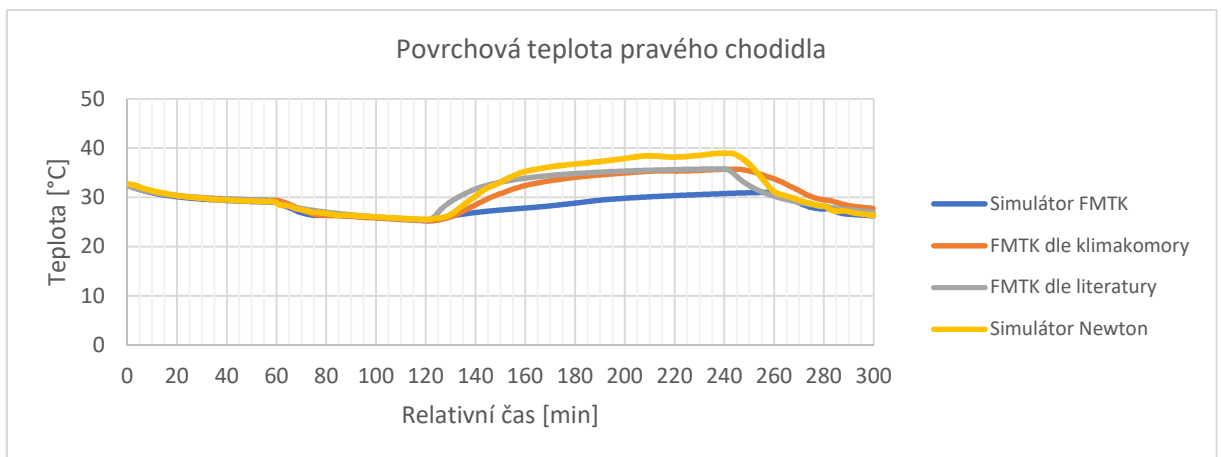
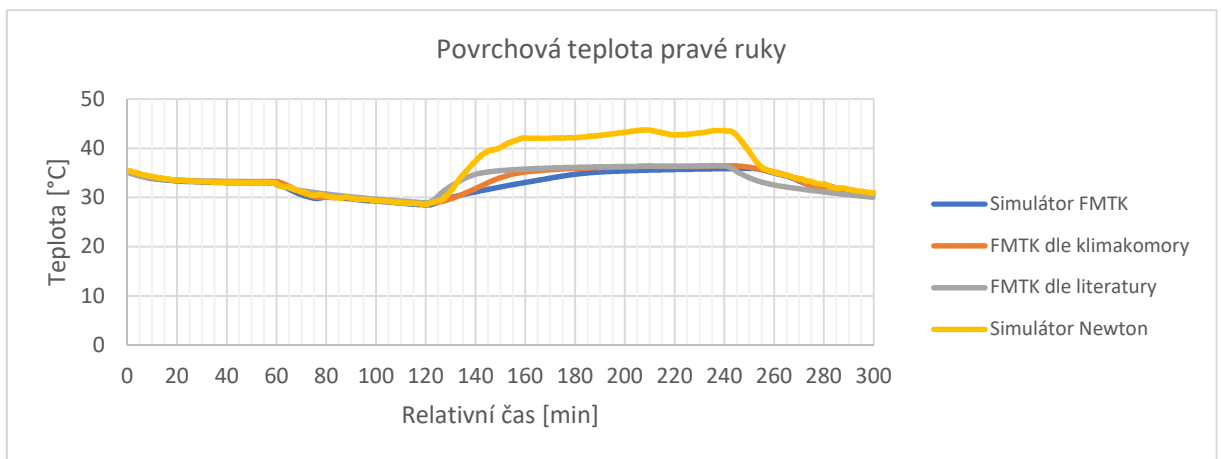
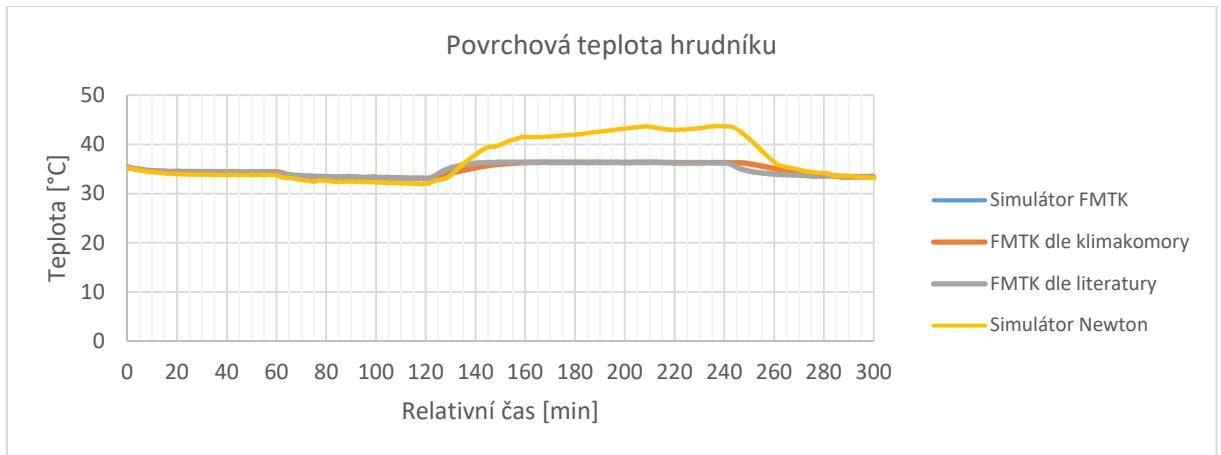
Scénář: 28-33-28 °C



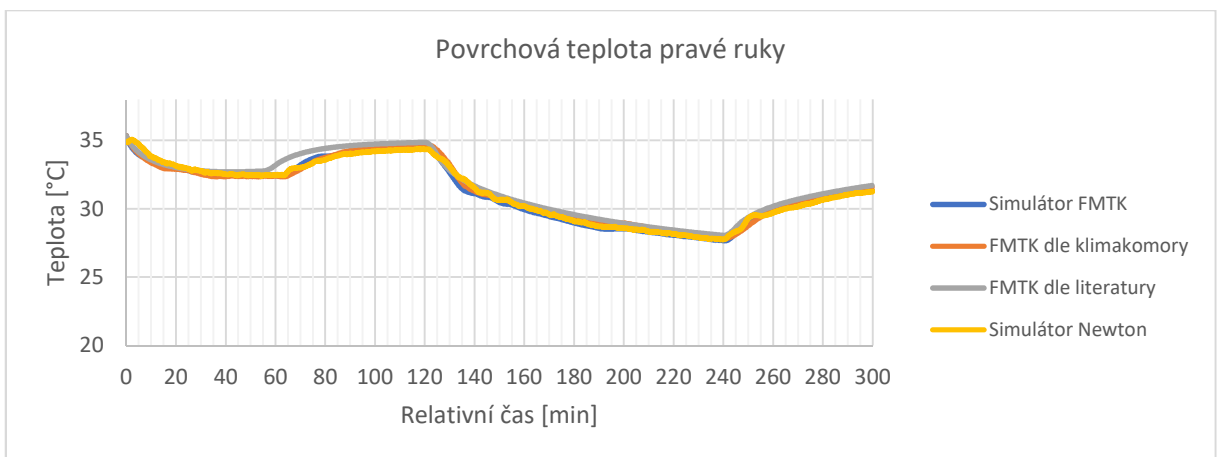
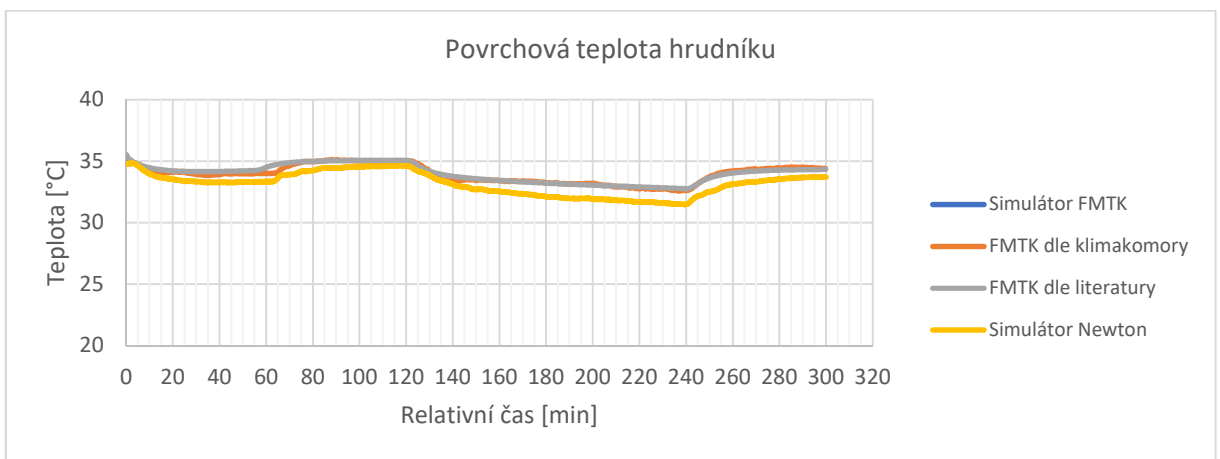
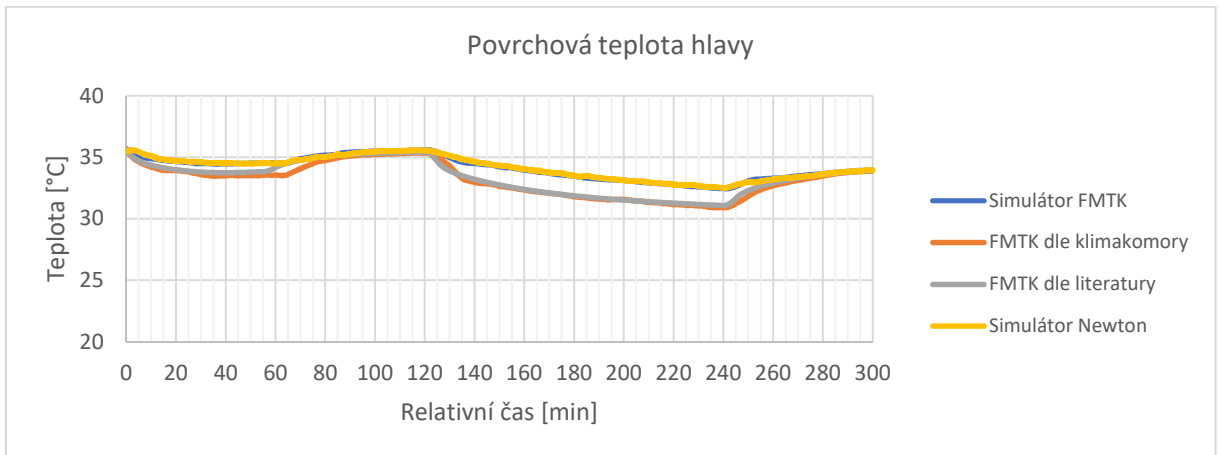


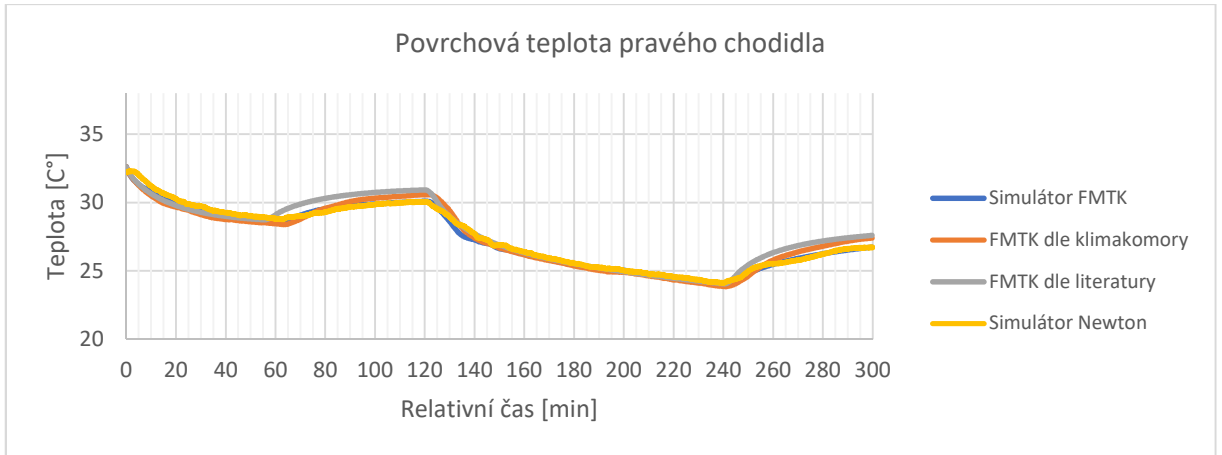
Scénář: 18-42-18 °C



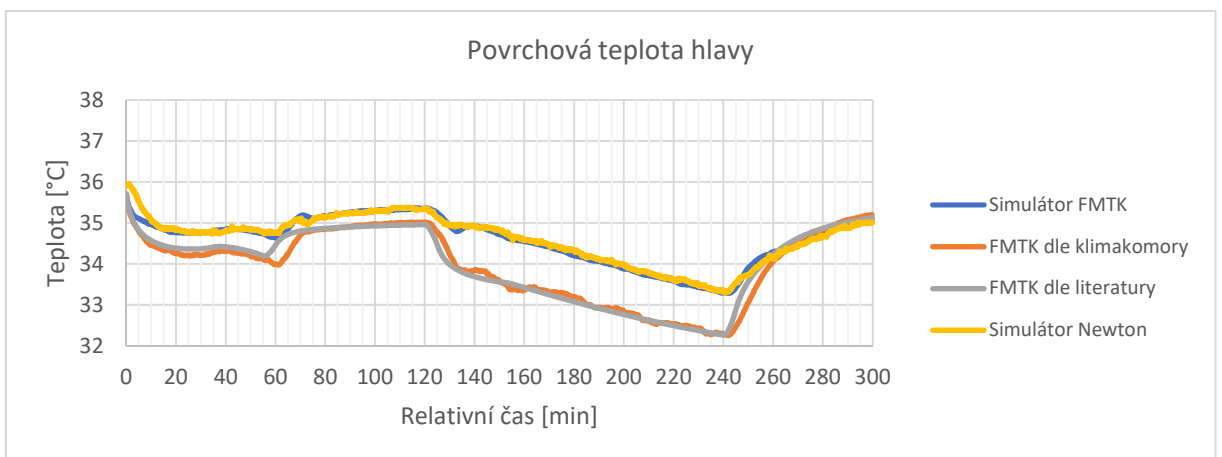
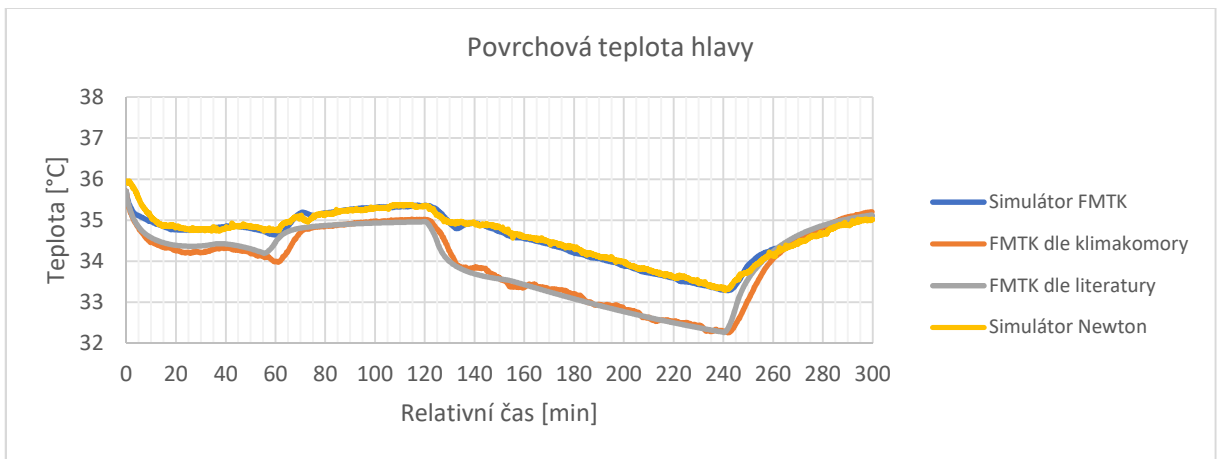


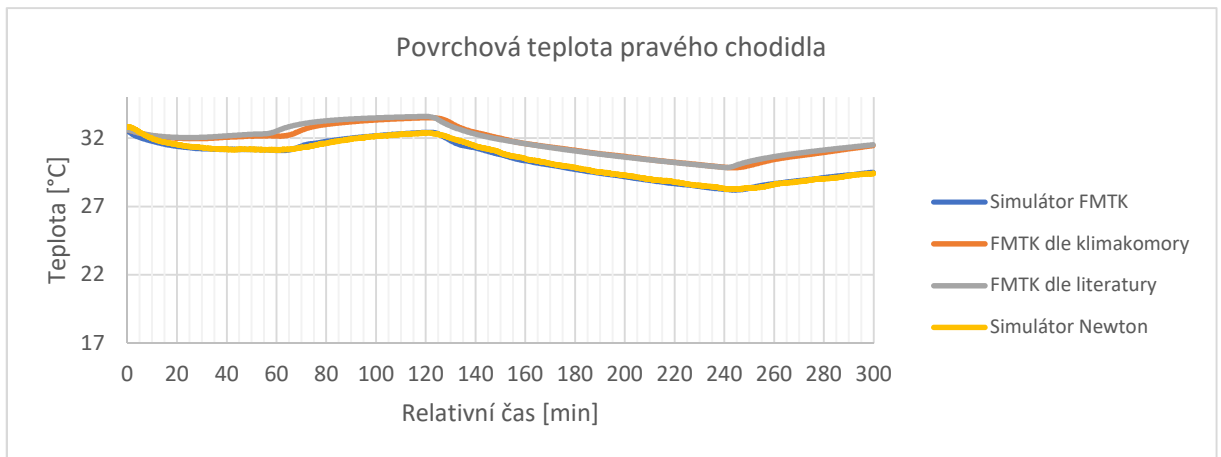
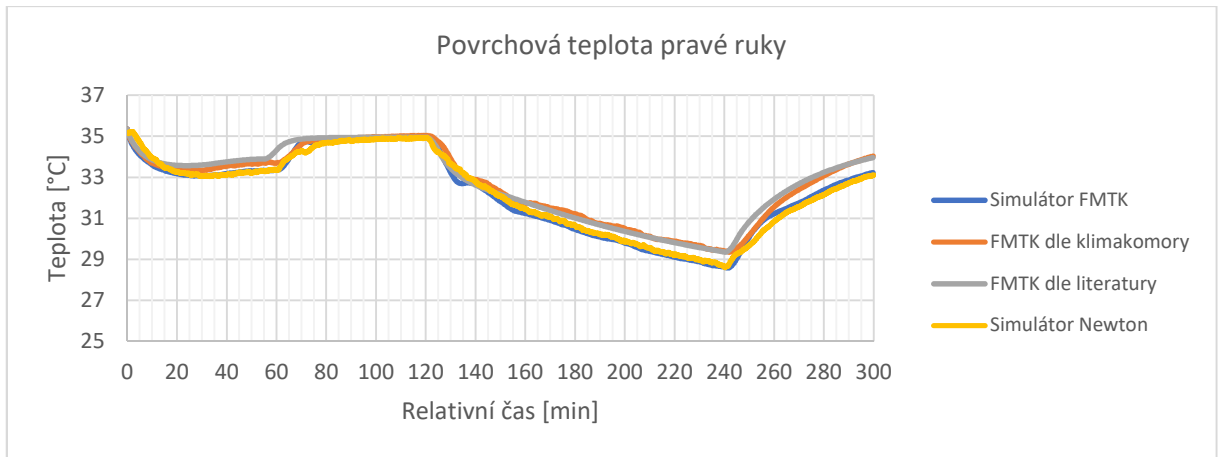
Scénář: 28-18-28 °C



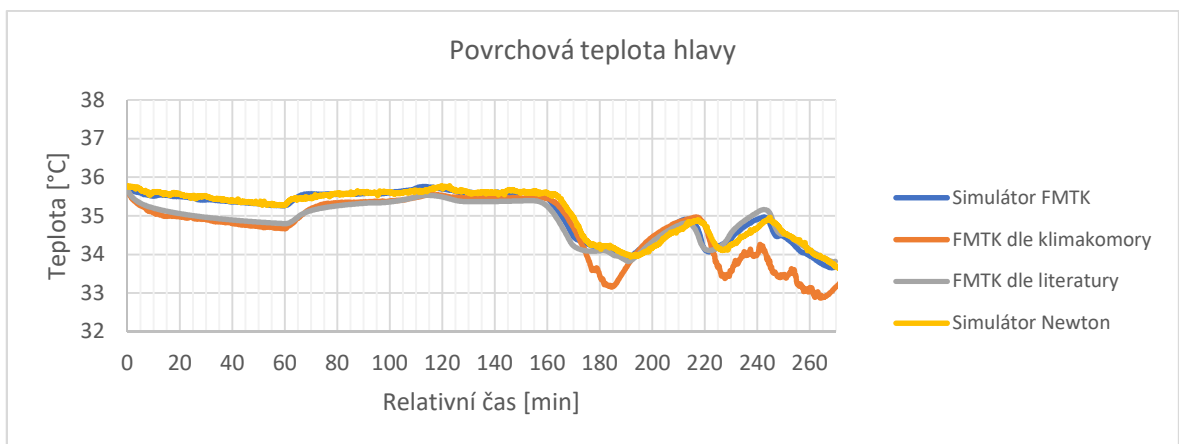


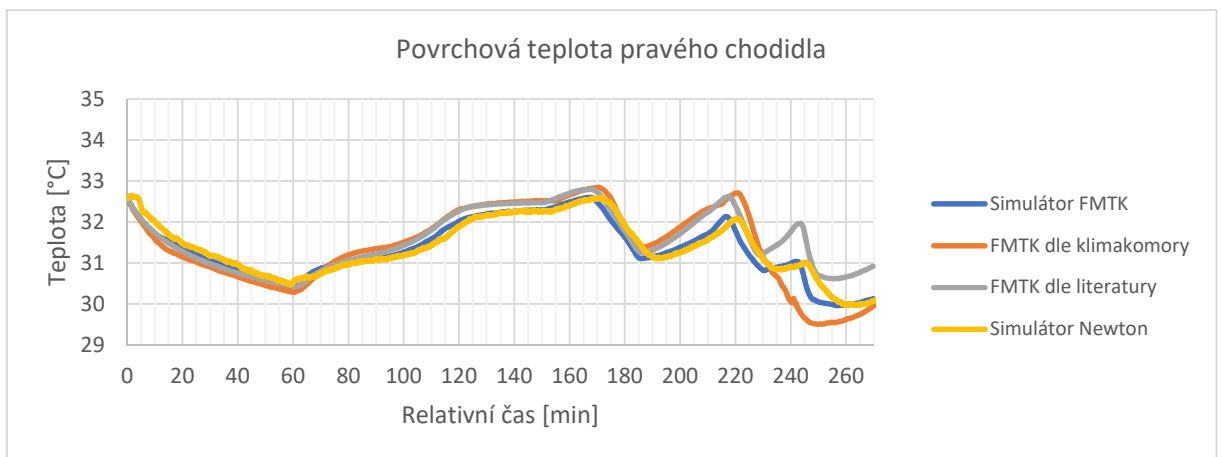
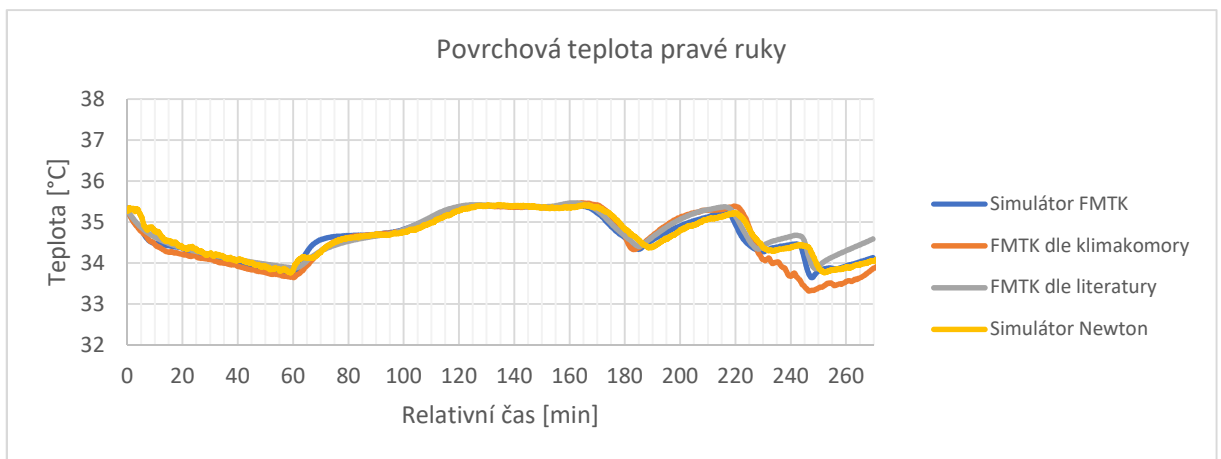
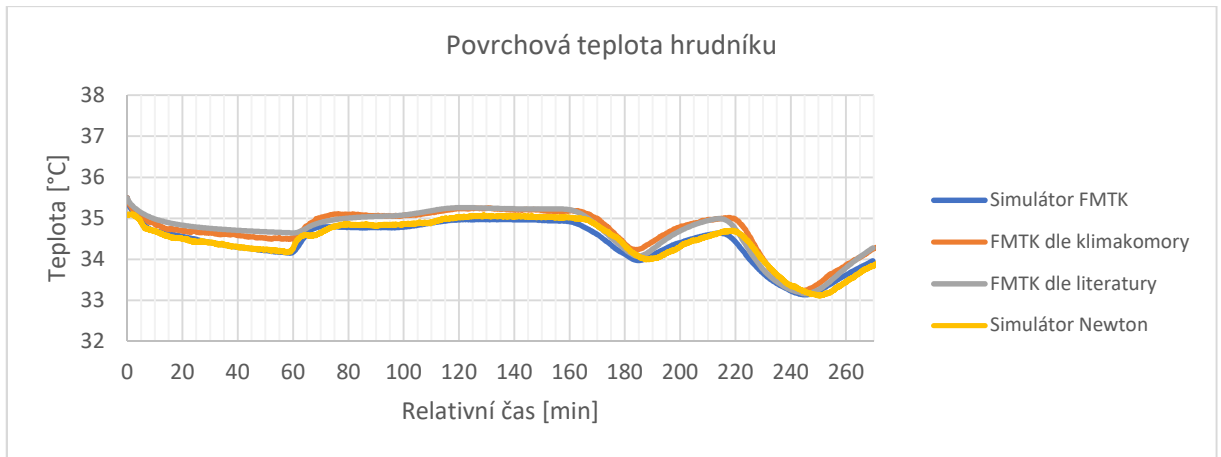
Scénář: 28-18-28 °C clothed





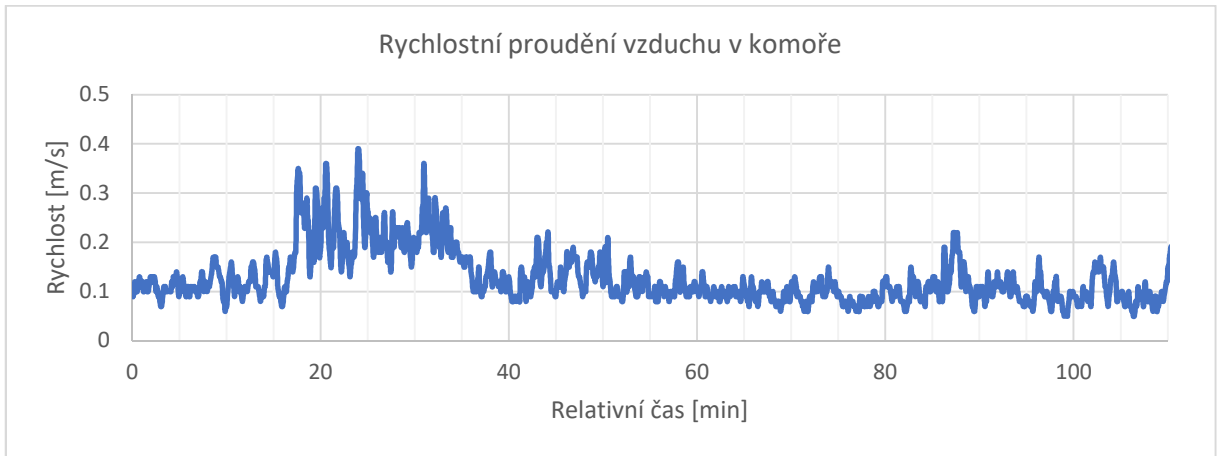
Scénář: 3-5-8 met



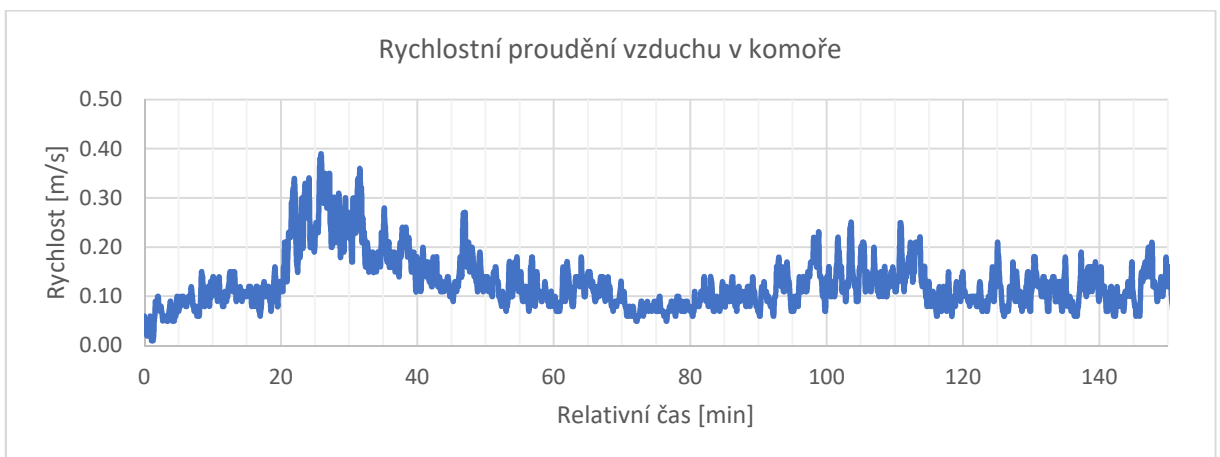


Příloha C: Rychlostní proudění vzduchu v klimakomoře

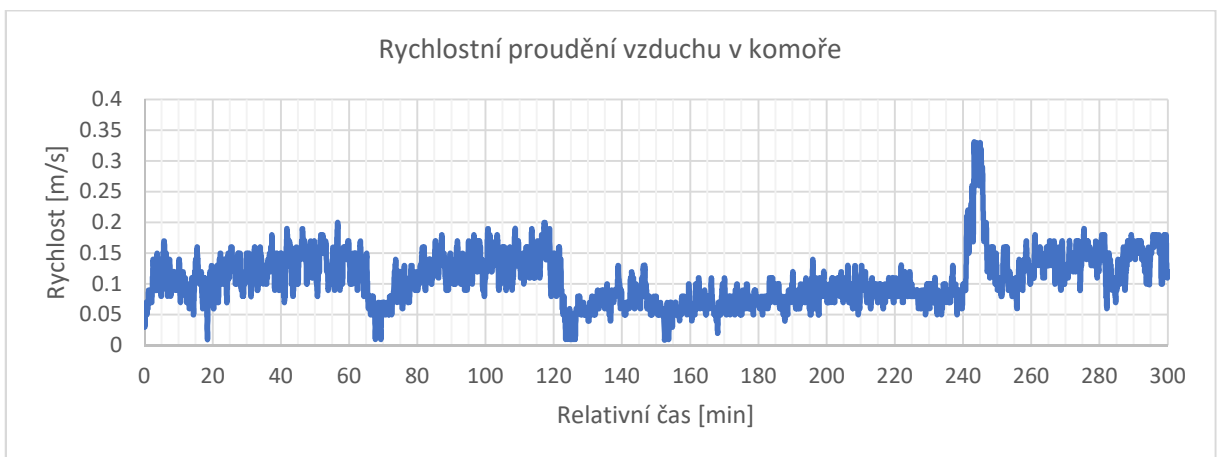
5 °C Young



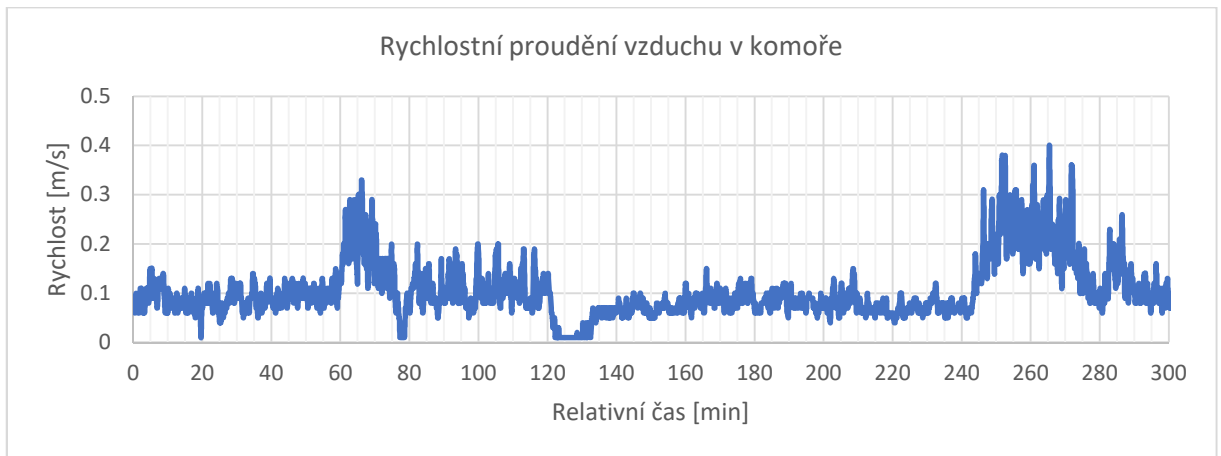
10 °C Budd



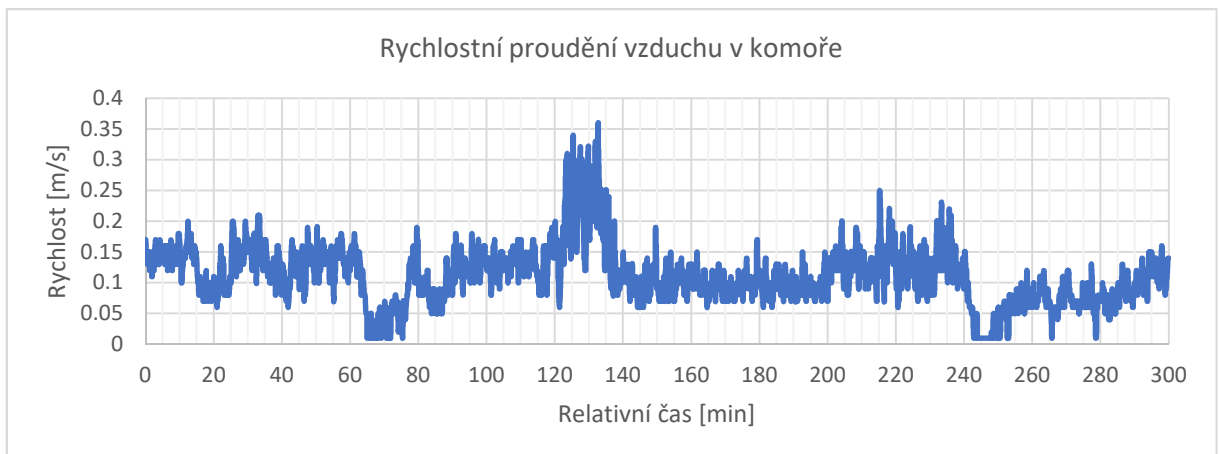
28-33-28



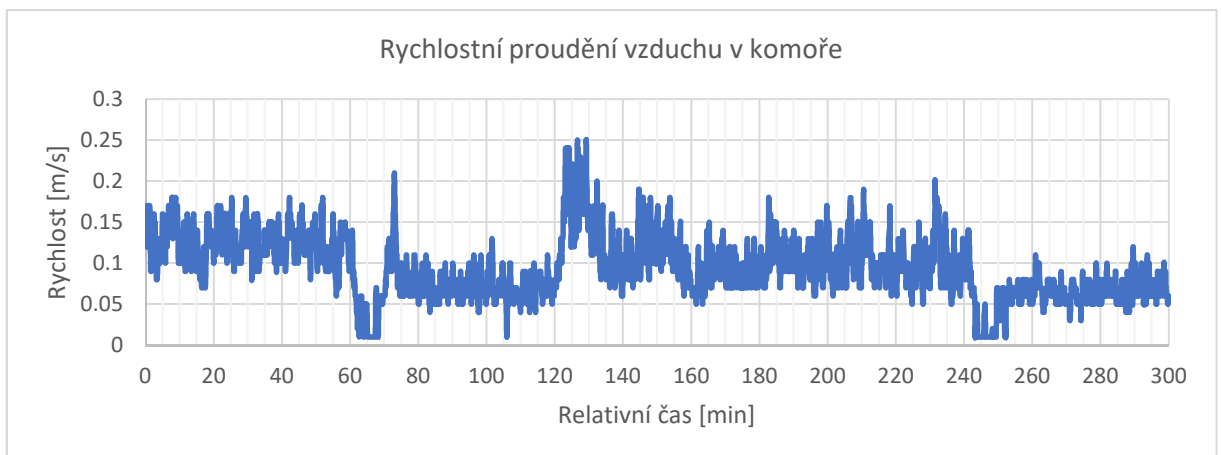
18-42-18



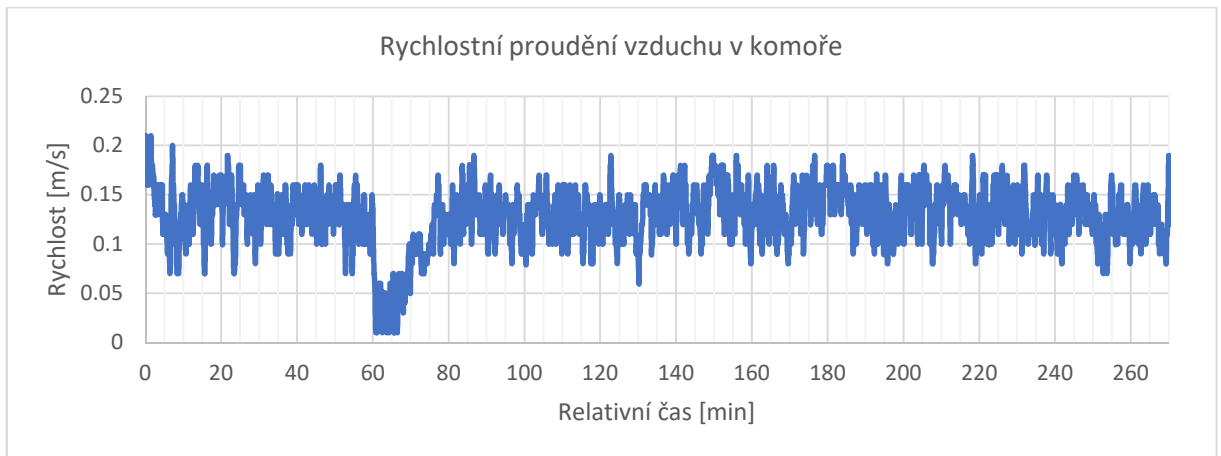
28-18-28



28-18-28 clothed



3-5-8 met



Příloha D: Zdrojové kódy – pro funkci FMTK v reálném čase a propojení s Newtonem

Text vyznačený v rámečkách obsahuje popis kódu, již bez jeho podrobného rozepisování.

MAIN.m %hlavní algoritmus FMTK modelu

```
RTN=str2double(SetupSV{26}); %Načítání dat z Newtona
W_NT_FH =str2double(SetupSV{27}); %Načítání tep. toků
```

```
dt=20;%časový krok, doporučený je 20 s
```

1) Inicializace parametrů FMTK (popis člověka - skladba tkání, geometrie)

```
for BP=1:NofP %cyklus pro všechny části těla (19)
```

2) Načtení geometrických dat do modelu, včetně definice diskretizace a rozdělení člověka na sektory a části

```
end;
```

```
readBC;%Script na načtení okrajových podmínek
```

```
while t<Runtime %800
```

```
    if RTN==1 & W_NT_FH==0; RT_FMTK_READ_BC; end
```

```
    boundaryConditions; %Načítání OP z timetable.xls
```

```
    if RTN==1 & W_NT_FH==1 %Načtení OP z AMB senzorů (T,RH
```

```
        RT_FMTK_READ_AMB
```

```
        Tsur=T_AMB*Tsur./Tsur;RH=RH_AMB/100*RH./RH;
```

```
    end;
```

3) Efekty působící celoplošně - termoregulace, teplota krevního zásobiště, apod.

```
for BP=1:NofP %NofP number of parts, BP je index
```

4) Výpočet metabolické produkce tepla, teploty krve v cévách, tep. ztrát, efektů termoregulace apod. pro jednotlivé části těla.

5) Příprava soustavy diskretizovaných rovnic: matice tuhosti (vedení tepla uvnitř člověka), a vektoru pravé strany (zdrojové členy + tep. výměna s okolím, viz **update**

6) Řešení soustavy diskreditovaných rovnic.

```
if x==2 VarList end; REsexport;%Export dat
```

```
x=x+1;t=t+dt; %x-iterace, t-čas simulace
```

```
fprintf(['%d] t=%5.2f\n',x,t) %výpis času sim.
```

```

fclose all;
if RTN==1
    RT_FMTK_WRITE;RT_PLOT;
    save('qdryW_m2.mat','qdry_model_pt','qdry_newton_pt
', 'W_m2_model_pt','W_m2_newton_pt','W_m2_newton2FMTK_pt'
)
    global TimeNow ALLTimeNow;
    TimeBefore=TimeNow
    TimeNow=now
    ALLTimeNow(x)=TimeNow;

    RTpause=20-(TimeNow-TimeBefore)*24*60*60
    pause(RTpause) % aby model bezel v reálném čase

    if mod(t,120)==0
        save('RT.mat');%průběžné ukládání všech výsledků
    end;
end
end;%end for
    PostProcessing %Script na vizualizaci dat
end;%end while
%-----

```

dupdate.m %aktualizace pravé strany

- 7) Načtení teplot ve výpočetních uzlech z předešlého kroku
- 8) Aktualizace členů pravé strany
- 9) Definice vedení tepla včetně přenosu tepla krví, zdrojových členů, a tepelných ztrát pro nový časový krok
- 10) **Nahrazení výpočtu přenosu tepla radiací a konvekcí měřeným tepelným tokem**

```

if RTN==1 & W_NT_FH==1; %FMTK-NEWTON ŘÍZENÍ qdryMODEL=qdry;
%Hodnota čistě z FMTK [W/m];
W_m2_MODEL=qdry/A{11,BP}(1); %Prepočtena na [W/m2]
RT_FMTK_READ_HF;%NACTENI qdryNEWTON_W_m2 z TEP. MAN.
global qdryNEWTON_W_m2;%RT_FMTK_READ presunuto do MAIN.m
W_m2_NEWTON=qdryNEWTON_W_m2;
W_m2_NEWTON2FMTK=Tsf(ii,BP)*Ucl(ii,BP)- qdryNEWTON_W_m2;
qdryNEWTON= W_m2_NEWTON2FMTK*A{11,BP}(1); %Přepočtena na
[W/m] + PREPOCET TEP. TOK S OKOLIM NA TEP TOK V FMTK
qdry=qdryNEWTON; %PREPSANI !!!!

%ukládání parametry, pro jednotlivé výpočetní uzly,
qdry_model_pt{x-1,BP}(ii)=qdryMODEL;%[W]
qdry_newton_pt{x-1,BP}(ii)=qdryNEWTON;
W_m2_model_pt{x-1,BP}(ii)=W_m2_MODEL;%[W]
W_m2_newton_pt{x-1,BP}(ii)=W_m2_NEWTON;
W_m2_newton2FMTK_pt{x-1,BP}(ii)= W_m2_NEWTON2FMTK;

```

end

11) Přepsání pravá strany novými členy včetně %HEAT EXCHANGE SKIN-EN

%-----

RT_FMTK_READ_BC.m

```
file=dir(filepath_uniformBC);
global updateRT
try
if updateRT==file.date
    disp('no RT update')
else
    disp('BC RT updated')
    updateRT=file.date
    readBC %zmena OP
end;
catch
    updateRT=0;
end;
%-----
```

RT_FMTK_READ_AMB.m

```
FW='FMTK_READ.csv';
FWid = fopen(FW, 'r');
C=textscan(FWid, '%s%f%f%f%f%[\n\r]', 'TextType',
'string', 'EmptyValue',
NaN, 'HeaderLines', 1, 'Delimiter', ',', 'ReturnOnError', false,
'EndOfLine', '\r\n');
fclose(FWid);
%-----
```

RT_FMTK_READ_HF.m

```
global HF
NAMES=C{1};%poslední je ambient proto odečítám -1
TEMP=C{2}(1:end-1); %Average Surface Temp
HF=C{3}(1:end-1); %Heat Flux Generated
T_AMB=C{4}(35); %Avg Amb Temp
RH_AMB=C{5}(35); %RH

global HF

I_4_16=reshape(1:76, 4, 19);
```

```

N_SF=[2;2;1;1;1;14;14;14;14;13;13;13;16;15;15;15;18;3;4;4;7;8
      ;8;5;6;6;9;10;10;11;11;12;12;25;26;26;27;28;28;29;30;30;
      31;32;32;33;33;34;34]; %matice viz Tab
global qdryNEWTON_W_m2

global S2ID
try
qdryNEWTON_W_m2=HF(N_SF(S2ID(BP,ii)));%W/m2
catch
qdryNEWTON_W_m2=qdryNEWTON_W_m2 %přiradí předchozí hodnoty
end
%-----

```

RT_FMTK_WRITE.m

```

FR='FMTK_WRITE.csv';%FOR THERMDAC
Device_Names = {'Face';'Head';'R Up Arm Fr';'R Up Arm Bk';'L
Up Arm Fr';'L Up Arm Bk';'R Forearm Fr';'R Forearm Bk';'L
Forearm Fr';'L Forearm Bk';'R Hand';'L Hand';'Upper
Chest';'Shoulders';'Stomach';'Mid Back';'Waist';'Lower
Back';'R Up Thigh Fr';'R Up Thigh Grd';'R Up Thigh Bk';'L Up
Thigh Fr';'L Up Thigh Grd';'L Up Thigh Bk';'R Lwr Thigh
Fr';'R Lwr Thigh Bk';'L Lwr Thigh Fr';'L Lwr Thigh Bk';'R
Calf Fr';'R Calf Bk';'L Calf Fr';'L Calf Bk';'R Foot';'L
Foot';'Head Post'};
nrows=size(Device_Names, 1);
global S2ID

%mapa přiřazující set pointy Newtonovi z FMTK
%FM = FIALA_MANUAL
FM={ [2,3];1;[18,20];19;[24,26];25;[21,23];22;[27,29];28;
[30,31];[32,33];11;[4,5,6,7,8,9];15;[10,12,13];16;14;
15;17;17;15;17;17;[34,36];35;[37,39];38;[40,42];41;
[43,45];44;[46,47];[48,49]};

for i=1:nrows-1 %nrows-1 je 34 %pro každou část Newtona
    Sx=[];Sy=[];ZZ=[];
    for k=1:size(FM{i},2)%
        [Fx,Fy]=find(S2ID==FM{i}(k))
        Sx=[Sx;Fx]
        Sy=[Sy;Fy]
    end;

    for ii=1:size(Sx,1)%
        ZZ(ii)=I_4_16(Sy(ii),Sx(ii))
    end;
    Temp_Setpoint(i)=sum(Tsf(ZZ).*Asfn(ZZ)/sum(Asfn(ZZ)));

```

```

end;
Temp_Setpoint(35)=0;
HF_Setpoint = ones(nrows,1)*0;

fid = fopen(FR, 'wt');
fprintf(fid, 'Device Names,Temp Setpoint,HF Setpoint\n');
for i = 1:nrows
    fprintf(fid,
'%s,%.2f,%.2f\n',Device_Names{i},Temp_Setpoint(i),HF_Setpoint
(i));
end
fclose(fid);
%-----

```

RT_PLOT.m

```

if ~exist('f3')
    f3=figure('name','RT PLOT Skin temperatures');
else
    figure(f3)
end;

%load('Processing.mat','AllmTsk','time');
plot(time',AllmTsk(2:end,:));
legend(strrep(F.ID.BP,'_','-'),'location','southwest');

```

%DP Doležalová

```

try
[file,path] = uigetfile('*.');
TT=xlsread(fullfile(path,file));
catch
TT=xlsread('UniformTT.xls');
end
%-----

```

PMV_FMTK.m³

```

%PMV-PPD
try
[file,path] = uigetfile('*.');
TT=xlsread(fullfile(path,file));
catch
TT=xlsread('UniformTT.xls');
end

t=TT(:,1);%
Ta=TT(:,2);%30

```

³ Při zadávání vstupních podmínek u PMV se relativní vlhkost (phi) zadává v procentech.

```
Tr=TT(:,3);%30
phi=TT(:,4);%50
v=TT(:,5);%0.1
M=58.2*TT(:,8);%58.2

try
    Icl=TT(:,11);
    W =TT(:,12);
catch
    Icl=0.1;
    W =0;
end

N=size(TT,1);
for i=1:N
    [PMV(i,:),PPD(i,:),~]=PMV_f( Ta(i), Tr(i), phi(i), v(i),
Icl(i), M(i), W(i) ); %PMV_Barbara Kopeckova, odpovídá si s
http://comfort.cbe.berkeley.edu/EN
end
PMV3=PMV;
PMV3(PMV3>3)=3;
PMV3(PMV3<-3)=-3;

xlswrite('PMV.xlsx',{'t','PMV','PMV3','PPD'},1,'A1');
xlswrite('PMV.xlsx',[t,PMV,PMV3,PPD],1,'A2');
```