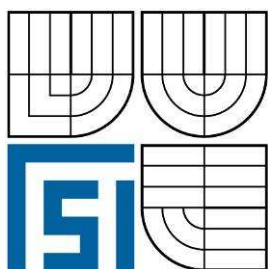


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

STUDIE PASIVNÍHO CHLAZENÍ KABINY OSOBNÍHO AUTOMOBILU

CAR CABIN PASSIVE COOLING SYSTEM PERFORMANCE STUDY

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. PETR VIŠČOR

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. JAN FIŠER

BRNO 2010

Abstrakt

Práce je zaměřena na problematiku využití způsobů pasivního chlazení v kabině osobního automobilu. V teoretické části jsou popsány základní principy a mechanismy přenosu tepla a je zde pojednáno o kvalitě prostředí v kabinách vozidel a to zejména z hlediska tepelné pohody a čistoty vzduchu. Dále je popsána problematika větrání a klimatizace kabin automobilů, posléze jsou rozebrány možné metody pasivního chlazení. Pojmem pasivní chlazení je myšleno snížení teploty interiéru vozu bez nutnosti dotace energií z autobaterie, nebo z paliva. Součástí práce jsou také numerické simulace vytípaných metod pasivního chlazení pomocí programu THESEUS-FE 3.0. Simulace byly provedeny na modelu automobilu Volkswagen Polo, s cílem ověřit funkčnost jednotlivých metod pasivního chlazení.

Abstract

The work is focused on issue of passive cooling in a cabin of a car. The basic principles and mechanisms of heat transfer are described in the theoretical part and the quality of cabin environment in terms of thermal comfort and air quality is discussed as well. Next part of the work describing the principles of ventilation and air conditioning of cabins and possible methods of passive cooling are discussed. Passive cooling means decrease of temperature of cars interior, without need of energy supply from car battery, or fuel. The last part of the work includes numerical simulation of selected methods of passive cooling using the THESEUS-FE 3.0 software. Simulations were performed on model of Volkswagen Polo car and primarily were focused on testing of functionality of various methods of passive cooling.

Klíčová slova

Přenos tepla, tepelná pohoda, klimatizace automobilu, pasivní chlazení, numerická simulace

Key words

Heat transfer, thermal comfort, car air-conditioning, passive cooling, numerical simulation

Bibliografická citace

VIŠČOR, P. *Studie pasivního chlazení kabiny osobního automobilu*. Brno, 2010. 58 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí diplomové práce Ing. Jan Fišer.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci vypracoval samostatně na základě uvedené odborné literatury a pod vedením Ing. Jana Fišera.

.....

Petr Višcor

V Brně dne 20. května 2010

Poděkování

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce Ing. Janu Fišerovi za jeho cenné rady.

Obsah

Úvod.....	7
1 Přenos tepla	8
1.1 Přenos tepla vedením	8
1.2 Přenos tepla prouděním.....	9
1.3 Přenos tepla zářením	9
2 Kvalita prostředí v kabinách vozidel.....	11
2.1 Tepelná pohoda.....	11
2.1.1 Předpověď středního tepelného pocitu (PMV).....	12
2.1.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených (PPD).....	13
2.1.3 Operativní teplota (t_o)	14
2.1.4 Stupeň obtěžování průvanem (DR).....	14
2.1.5 Ekvivalentní teplota (t_{eq}).....	14
2.2 Čistota vzduchu.....	17
3 Větrání a klimatizace kabin automobilů.....	18
3.1 Větrání.....	18
3.1.1 Filtrace vzduchu.....	19
3.2 Vytápění.....	19
3.3 Chlazení	21
3.4 Klimatizační zařízení	23
4 Pasivní chlazení automobilů.....	26
4.1 Volba vhodného laku karoserie automobilu	26
4.2 Užití selektivního zasklení.....	27
4.3 Tepelná izolace kabiny.....	28
4.4 Provětrávání zaparkovaného vozu	29
4.5 Užití tepelných trubíc.....	30
5 Numerické simulace.....	31
5.1 Program THESEUS-FE	31
6 Popis simulace a výchozího nastavení	32
6.1 Úvod.....	32
6.2 Příprava, rozdělení geometrie a volba materiálů.....	33
6.3 Tvorba zón a objemů vzduchu, kavit a volba vlastností okolního prostředí.....	35
6.4 Okrajové podmínky – nastavení pro výpočet konvekce a radiace.....	37
7 Popis ostatních modelových případů.....	40
7.1 Změna laku automobilu, případ B.....	40
7.2 Izolace střechy, případy C1 a C2	40
7.3 Provětrávání vozu, případy D1 a D2.....	40
7.4 Užití selektivního zasklení, případ E	40
7.5 Kombinace metod pasivního chlazení, případ F	41
8 Vyhodnocení výsledků.....	42
8.1 Metoda spočívající ve změně laku automobilu (případ B)	42
8.2 Metoda izolace střechy automobilu (případy C1 a C2).....	44
8.3 Metoda provětrávání vozu (případy D1 a D2)	47
8.4 Metoda využívající selektivní zasklení (případ E).....	49
8.5 Kombinace metod pasivního chlazení (případ F)	51
8.6 Závěr vyhodnocení výsledků	52
Závěr.....	54
Použitá literatura.....	55
Seznam použitých symbolů.....	57
Seznam příloh.....	58

Úvod

Mezi jedny z nejdůležitějších faktorů ovlivňujících mikroklima v kabině automobilu, tedy kvalitu vnitřního prostředí, patří tepelná pohoda prostředí a čistota vnitřního vzduchu. Možností, jak dosáhnout tepelné pohody uvnitř automobilu, může být několik. V praxi je většinou problematika tepelné pohody řešena vhodně navrženou klimatizací, kterou lze především ovlivnit teplotu vzduchu v kabině, teplotu povrchu stěn a předmětů, rychlost proudění vzduchu a do jisté míry také vlhkost vzduchu uvnitř automobilu. Pokud je navíc klimatizační jednotka vybavena filtrací větracího vzduchu, ovlivňuje příznivě i čistotu a kvalitu vzduchu v kabině. Provoz klimatizačního zařízení však odebírá část výkonu motoru, což se následně promítá do celkové spotřeby vozu.

Rostoucí ceny energií a negativní vlivy spalování fosilních paliv na životní prostředí jsou však faktory, jenž vedou k nutnosti snižování spotřeby paliva potřebného pro klimatizaci automobilu. Možností, jak snížit energetické nároky na klimatizaci, existuje celá řada. V této práci bude popsána jak problematika klimatizačních soustav, tak možné způsoby snížení energetické náročnosti klimatizace automobilu a to především využitím pasivních způsobů chlazení kabiny. Termínem pasivní způsoby chlazení jsou v práci označovány systémy, které nespotřebovávají energii z autobaterie či paliva a také konstrukční opatření, která upravují tepelně technické vlastnosti kabiny automobilu. Takovéto systémy a opatření pak fungují buď naprosto bez dotace energií, případně s dotací z vnějších zdrojů, jako je například sluneční záření.

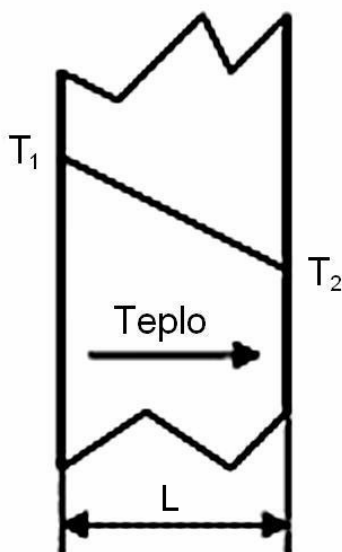
Cílem práce je tedy kromě teoretického rozboru problematiky kvality prostředí v kabinách dopravních prostředků také rozbor možných způsobů pasivního chlazení kabin osobních automobilů a ověření účinnosti vytipovaných způsobů pomocí 1D simulačního nástroje Theseus-FE 3.0. Na základě získaných výsledků bude následně vyhodnoceno, který ze způsobů pasivního chlazení má největší přínos pro snížení energetické náročnosti klimatizačního systému vozu.

1 Přenos tepla

Přenos tepla se odehrává všude tam, kde existuje teplotní gradient. V případě automobilu dochází k přenosu tepla zejména mezi posádkou a kabinou, dále pak mezi kabinou a okolním prostředím a je-li automobil vybaven klimatizací, dochází také k přenosu tepla v samotné klimatizační jednotce. Proto je nezbytné zmínit se alespoň o jeho základních principech a mechanismech. Základní mechanismy přenosu tepla dělíme na [1]:

- Přenos tepla vedením (kondukcí)
- Přenos tepla prouděním (konvekce)
- Přenos tepla zářením (radiace)

1.1 Přenos tepla vedením



Vedení tepla (obr. 1) si lze představit jako přenos energie od částic s vyšší energií k částicím s nižší energií. Tento jev popisuje Fourierův zákon: „Měrný tepelný tok \dot{q} [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$], tj. tepelný tok \dot{Q} vztahovaný na jednotku plochy S , přenášený vedením v nějaké látce je přímo úměrný velikosti teplotního gradientu a má opačné znaménko než tento gradient.“

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{S} = -\lambda \cdot \frac{dT}{dx} \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (1)$$

Kde λ je tepelná vodivost [$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$].

Obr. 1: Příklad kondukcí [2]

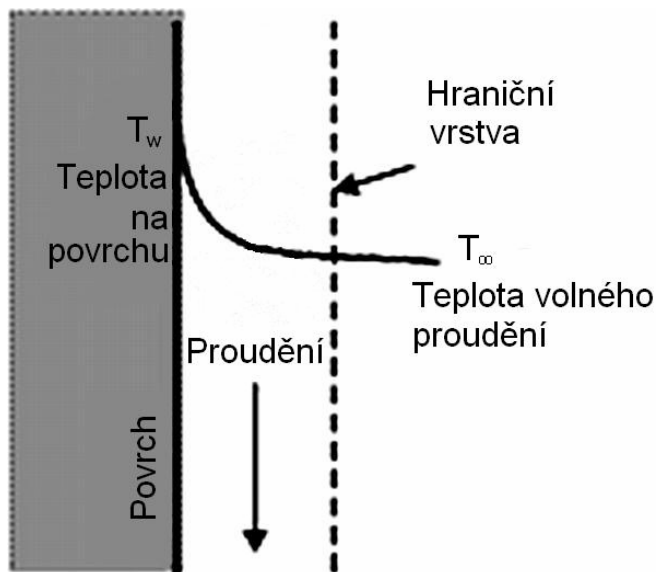
U praktických inženýrských úloh je však často potřeba řešit teplotní rozložení v 3D tělese a proto je nutno použít nástroj na řešení teplotních polí. Tímto nástrojem je diferenciální rovnice energie, která vyplývá z energetické bilance pro objemový element. Tuto energetickou bilanci lze zapsat jako [3]:

$$\left(\begin{array}{c} \text{tepelný tok} \\ \text{vstupující} \\ \text{do elementu} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{tepelná energie} \\ \text{generovaná} \\ \text{v elementu} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{změna} \\ \text{vnitřní energie} \\ \text{elementu} \end{array} \right) + \left(\begin{array}{c} \text{tepelný tok} \\ \text{vystupující} \\ \text{z elementu} \end{array} \right)$$

Samotnou rovnici energie pak [3]:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{Q}_{zdroj} = \rho c \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2)$$

1.2 Přenos tepla prouděním



Přenos tepla prouděním (obr. 2) je kombinovaný přenosový mechanismus skládající se z náhodného pohybu molekul – kondukcce a společného pohybu většího množství molekul – advekce, přičemž přenos energie je důsledkem superpozice těchto dvou. Pokud je těleso obtékáno tekutinou s odlišnou teplotou, pak dochází ke konvekci, kterou lze popsat Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (3)$$

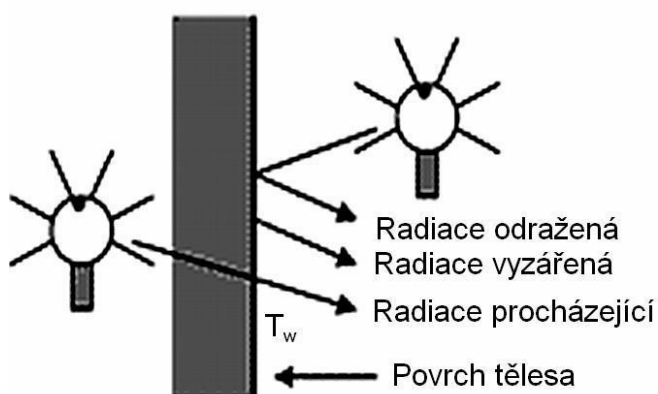
Obr. 2: Příklad konvekce [2]

Kde α je součinitel přestupu tepla $[\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$, T_w je teplota povrchu obtékaného tělesa a T_∞ je teplota v dostatečné vzdálenosti od povrchu tělesa. [1]

Konvekce se podle povahy proudění dělí na:

- Nucenou (vzniká v důsledku nuceného proudění tekutiny)
- Přírozenou (vzniká v důsledku rozdílů hustot tekutiny)
- Kombinovanou (vzniká superpozicí nucené a přírozené konvekce)

1.3 Přenos tepla zářením



Tepelné záření lze pozorovat u všech povrchů s konečnou teplotou. Objevuje se i u plynů a kapalin a nevyžaduje přítomnost hmotné látky. Je to tedy proces, který může probíhat i v absolutním vakuu. Maximální tok, který může emitovat povrch je pak dán Stefan-Boltzmannovým zákonem:

$$\dot{q} = \sigma T_w^4 \text{ [W} \cdot \text{m}^{-2}] \quad (4)$$

Kde σ je Stefan – Boltzmannova konstanta ($\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$) a teplota T_w je teplota povrchu tělesa. [1]

Obr. 3: Příklad radiace [2]

Tento maximální tok by vyzářil ideální tepelný zářič, který byl pojmenován jako černé těleso. Černé těleso definoval roku 1860 Kirchhoff jako povrch, který veškeré na něj dopadající záření absorbuje. Protože se takováto tělesa vyskytují v přírodě jen vzácně, byla jako podíl pohlceného záření zavedena absorptivita a [-]. Jelikož většina těles nejsou ideálními tepelnými zářiči, definoval Kirchhoff emisivitu ε [-] jako poměr tepelné radiace reálného povrchu při dané teplotě a radiace absolutně černého tělesa při stejné teplotě a za stejných spektrálních a směrových podmínek. Jak je vidět na obrázku 3, záření nemusí být pouze pohlceno, nebo vyzářeno, ale také odraženo, nebo může povrchem procházet. Podíl záření, které je povrchem odraženo, udává reflektivita ρ [-], záření procházející tělesem pak transmisivita τ [-]. Pro reálné povrchy platí: $0 \leq (a, \varepsilon, \rho, \tau) \leq 1$ a dále pak že: $\rho + a + \tau = 1$. [3,4]

2 Kvalita prostředí v kabinách vozidel

Jedním z důvodů, proč je důležité udržovat příznivou pohodu prostředí uvnitř vozidel, může být fakt, že pozornost a psychická pohoda řidičů dopravních prostředků jsou značně závislé na stavu vnitřního prostředí v kabině. Proto má větrání a klimatizace vozidel příznivý vliv na snižování nehodovosti. Dalším neméně důležitým aspektem je udržení zdravotní nezávadnosti prostředí, v němž se posádka vozu nachází. Důležité je tedy jak větrání vozu okolním vzduchem, kterým lze odstranit škodliviny produkované posádkou vozu, tak také možnost větrání pouze vzduchem cirkulačním, což může být výhodné například v dopravních zácpách, nebo ve zhuštěné dopravě, kdy je okolní vzduch značně znečištěn. V této kapitole budou proto probrány základy tepelné pohody a problematiky čistoty vzduchu v kabinách dopravních prostředků.

2.1 Tepelná pohoda

Tepelnou pohodu se označuje podle ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating & Air Conditioning Engineers) stav mysli, jenž vyjadřuje spokojenost s teplotním klimatem a který vychází ze subjektivního hodnocení. Člověk by tedy neměl mít v daném prostředí pocit nepříjemného chladu, ani nepříjemného tepla. Výměnu tepla mezi člověkem a jeho okolím ovlivňují faktory tepelné pohody, které lze rozdělit na faktory prostředí a faktory osobní. Mezi faktory prostředí patří:

- Teplota vzduchu t_a [$^{\circ}\text{C}$]
- Rychlost proudění vzduchu w [$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$]
- Střední radiační teplota \bar{t}_r [$^{\circ}\text{C}$]
- Relativní vlhkost φ [-]

Mezi osobní faktory pak:

- Energetický výdej člověka M [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$]
- Tepelný odpor oděvu R_{cl} [$\text{m}^2 \cdot \text{K} \cdot \text{W}^{-1}$]

Pro hodnocení tepelné pohody se používá několik kritérií. Nejčastěji to jsou:

- Předpověď středního tepelného pocitu (*PMV*)
- Předpověď procentuálního podílu nespokojených (*PPD*)
- Operativní teplota (t_o)
- Stupeň obtěžování průvanem (*DR*)
- Ekvivalentní teplota (t_{eq})

2.1.1 Předpověď středního tepelného pocitu (PMV)

Index *PMV* je ukazatel, který předpovídá střední tepelný pocit skupiny osob, která hodnotí svůj pocit pomocí sedmistupňové stupnice [5]:

+3	horko
+2	teplo
+1	mírně teplo
0	neutrálně
-1	mírně chladno
-2	chladno
-3	zima

PMV lze vypočítat dle následujících vztahů, jejichž vstupem jsou parametry okolního prostředí, činnost člověka a tepelné vlastnosti oděvu [5]:

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

$$\left\{ \begin{array}{l} (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] \\ - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot \alpha \cdot (t_{cl} - t_a) \text{ pro } (M - W) > 58,15 \\ (M - W) - 3,05 \cdot 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_a] \\ - 1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_a) - 0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_a) \\ - 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] - f_{cl} \cdot \alpha \cdot (t_{cl} - t_a) \text{ pro } (M - W) \leq 58,15 \end{array} \right\} \quad (5)$$

$$t_{cl} = 35,7 - 0,028 \cdot (M - W) - I_{cl} \cdot \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot [(t_{cl} + 273)^4 - (\bar{t}_r + 273)^4] + f_{cl} \cdot \alpha \cdot (t_{cl} - t_a) \right\} \quad (6)$$

$$\alpha = \left\{ \begin{array}{ll} 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} > 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \\ 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} & \text{pro } 2,38 \cdot |t_{cl} - t_a|^{0,25} \leq 12,1 \cdot \sqrt{v_{ar}} \end{array} \right\} \quad (7)$$

$$f_{cl} = \left\{ \begin{array}{ll} 1,05 + 0,645 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} > 0,078 \quad m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \\ 1,00 + 1,290 \cdot I_{cl} & \text{pro } I_{cl} \leq 0,078 \quad m^2 \cdot K \cdot W^{-1} \end{array} \right\} \quad (8)$$

Kde M je metabolismus $[W \cdot m^{-2}]$
 W užitečný mechanický výkon $[W \cdot m^{-2}]$
 I_{cl} tepelný odpor oděvu $[m^2 \cdot K \cdot W^{-1}]$

f_{cl}	povrchový faktor oděvu [-] (poměr povrchu oděného člověka k povrchu člověka nahého)
t_a	teplota vzduchu [°C]
\bar{t}_r	střední radiační teplota [°C]
v_{ar}	relativní rychlost proudění vzduchu [m · s ⁻¹]
p_a	parciální tlak vodní páry [Pa]
α	součinitel přestupu tepla [W · m ⁻² · K ⁻¹]
t_{cl}	teplota povrchu oděvu [°C]

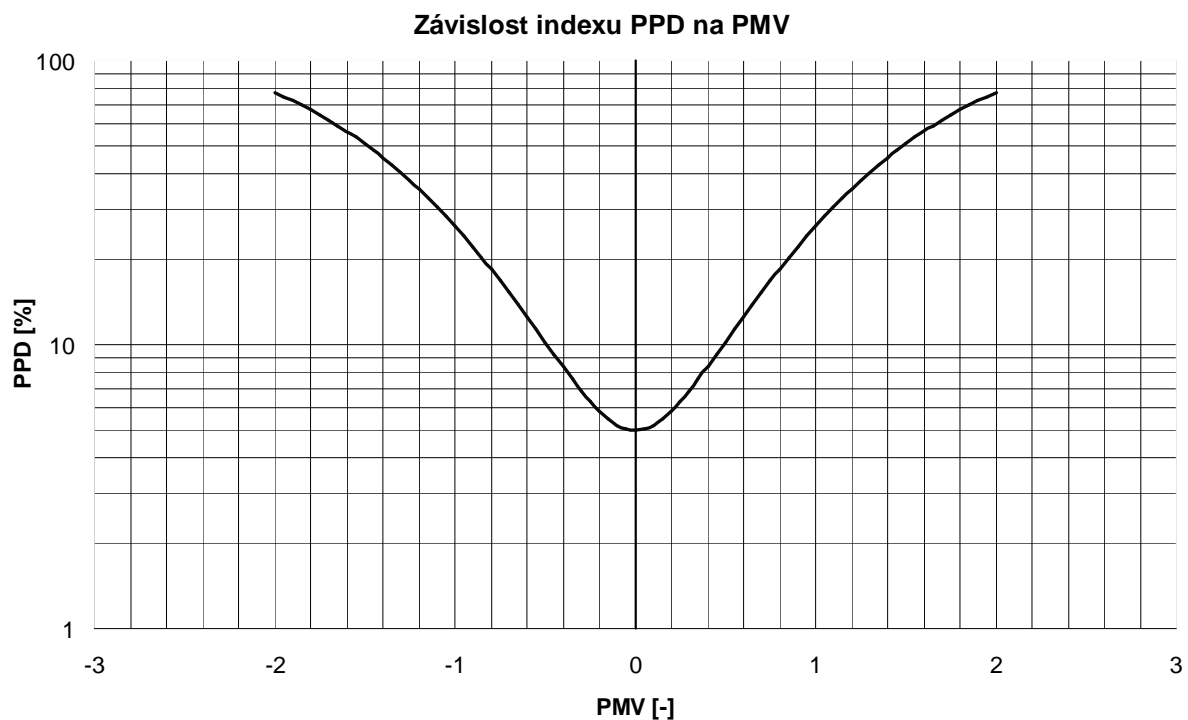
Index *PMV* slouží především k ověření, zda dané prostředí odpovídá kritériím tepelného komfortu a ke stanovení požadavků pro různé úrovně přijatelnosti. [5]

2.1.2 Předpověď procentuálního podílu nespokojených (PPD)

Vzhledem k individuálním odchylkám fyziologických funkcí lidí nelze zaručit, že všichni přítomní budou v daném prostředí spokojeni. Podle Fangera bude minimálně 5 % lidí pociťovat tepelnou nepohodu, a proto byl zaveden index *PPD* jako procentuální podíl nespokojených. Index *PPD* lze vyjádřit z indexu *PMV* dle vztahu [5]:

$$PPD = 100 - 95 \cdot \exp(-0,03353 \cdot PMV^4 - 0,2179 \cdot PMV^2) \quad [\%] \quad (9)$$

Závislost mezi indexem *PPD* a *PMV* lze pozorovat na obrázku 4.



Obr. 4: Závislost indexu *PPD* na *PMV*

2.1.3 Operativní teplota (t_o)

Operativní teplota t_o [°C] je definována jako jednotná teplota černého uzavřeného prostoru, ve kterém by tělo sdílelo konvekcí i sáláním stejné množství tepla jako ve skutečném teplotně nesourodém prostředí. Při rychlostech vzduchu w menších jak $0,2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a rozdílu mezi střední radiační teplotou \bar{t}_r a teplotou vzduchu t_a menším než 4 K ji lze spočítat jako aritmetický průměr t_a a \bar{t}_r . Pokud tyto podmínky splněny nejsou, lze operativní teplotu vypočítat ze vztahu [5]:

$$t_o = \bar{t}_r + A \cdot (t_a - \bar{t}_r) \quad (10)$$

Kde $A = 0,75 \cdot w^{0,16}$

2.1.4 Stupeň obtěžování průvanem (DR)

Průvan lze chápat jako nežádoucí místní ochlazování částí lidského těla proudícím vzduchem. Tento aspekt je hodnocen indexem DR a lze jej vypočítat pomocí vzorce [5]:

$$DR = (34 - t_a) \cdot (w - 0,05)^{0,62} \cdot (0,37 \cdot w \cdot T_u + 3,14) \quad (11)$$

Pro $w < 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dosazujeme $w = 0,05 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
Pro $DR > 100 \%$ považujeme $DR = 100 \%$

Kde T_u je místní intenzita turbulence [%]

Tento model platí pro osoby vykonávající lehkou práci v sedě, které hodnotí tepelný pocit spíše neutrálně a pro předpověď průvanu pociťovaném na krku. Proto tento model může přeceňovat stupeň obtěžování průvanem v oblasti paží a nohou.

2.1.5 Ekvivalentní teplota (t_{eq})

V případě kabin automobilů je nejvhodnější použít pro hodnocení tepelné pohody ekvivalentní teplotu a to především z důvodu asymetrických tepelných podmínek a vzájemnému ovlivňování tepelné výměny kondukcí, konvekcí a radiací. Ekvivalentní teplota t_{eq} je teplota homogenního prostoru při střední radiační teplotě rovné teplotě vzduchu a nulové rychlosti proudění vzduchu, ve které osoba vymění stejnou tepelnou ztrátu konvekcí a radiací, jako ve skutečných podmínkách. Ekvivalentní teplotu lze spočítat ze vztahu [6]:

$$t_{eq} = t_w - \frac{Q}{h_{cal}} \quad [^\circ\text{C}] \quad (12)$$

Kde

t_w je povrchová teplota

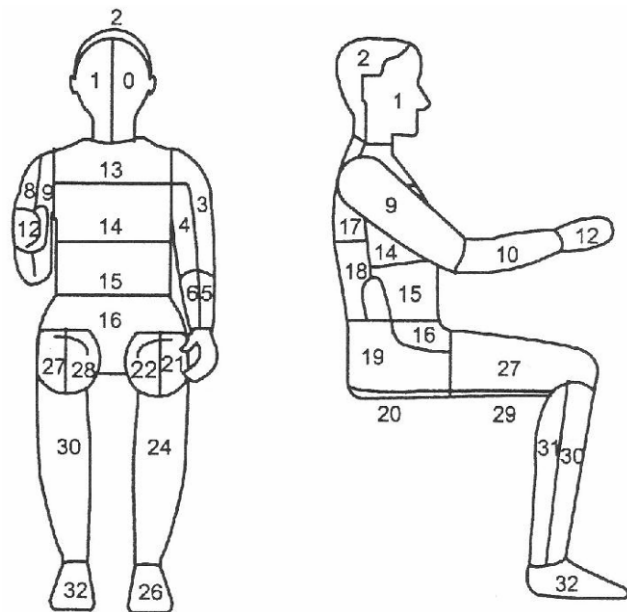
Q naměřená tepelná ztráta konvekcí a radiací ve skutečných podmínkách

h_{cal} složený součinitel přestupu tepla určený při kalibrování ve standardním prostředí.

Když nemáme k dispozici žádnou metodu pro měření správné celkové nebo místní ekvivalentní teploty, lze vypočítat podle [6] čtyři specifické ekvivalentní teploty. Především v závislosti na principu měření lze určit:

- Ekvivalentní teplotu celého těla
- Segmentovou ekvivalentní teplotu
- Směrovou ekvivalentní teplotu
- Všesměrovou ekvivalentní teplotu

Ekvivalentní teplotu celého těla lze stanovit z měření celkového tepelného toku z oblastí zkušební figuríny (obr. 5), která je složena z několika zón. Každá zóna má změřenou povrchovou teplotu podobnou teplotě člověka. Vhodné je použití více zón, protože čím více má figurína zón, tím lze dosáhnout správnější hodnoty ekvivalentní teploty. Pokud nemáme k dispozici tepelnou figurínu, lze t_{eq} stanovit pomocí zahřátých plochých senzorů napojených na nezahřátou figurínu. [6]

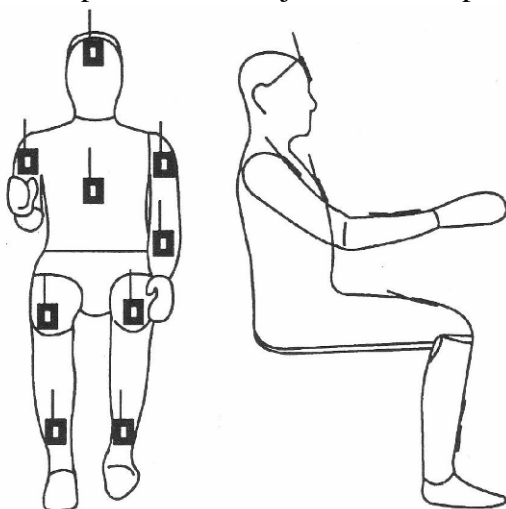


Obr. 5: Tepelná figurína o 33 zónách [6]

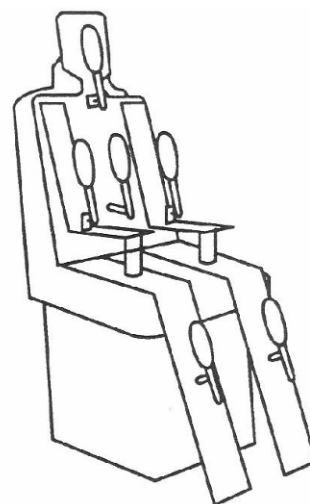
Segmentovou ekvivalentní teplotu lze stanovit z celkového tepelného toku ze segmentu, který se skládá z jedné, nebo více zón. Každá zóna musí mít opět specificky změřenou povrchovou teplotu, podobnou teplotě člověka. Segmentová t_{eq} se může určit pouze na nezmenšeném „lidsky“ tvarovaném zahřátém čidle. [6]

Směrovou ekvivalentní teplotu lze určit pomocí měření celkového tepelného toku z malé rovinné plochy se změřenou povrchovou teplotou (obr. 6). Ke stanovení směrové ekvivalentní teploty lze použít současně několik čidel v dalších místech nebo směrech, avšak jednotlivá čidla musí být umístěna tak, aby se navzájem neovlivňovala. [6]

Stanovení všesměrové ekvivalentní teploty spočívá ve změření celkového tepelného toku z elipsoidu (obr. 7) opět se změřenou povrchovou teplotou. V tomto případě je také možno použít více než jedno čidlo, s přihlédnutím na možné ovlivnění čidel navzájem. [6]

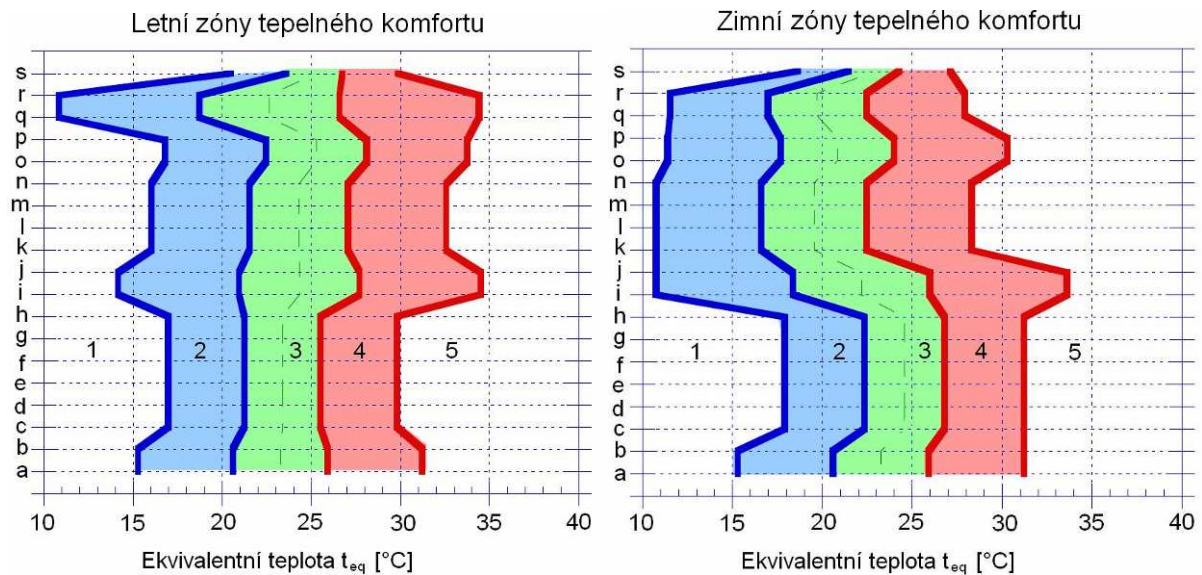


Obr. 6: Plošná zahřívající čidla na figuríně [6]



Obr. 7: Elipsoidní čidla [6]

Vypočtená ekvivalentní teplota se následně vyhodnotí podle diagramu komfortních zón. Příklady takovýchto diagramů pro letní a zimní období a pro figurínu o 16 zónách jsou uvedeny na obrázku 8. Tepelného komfortu je dosaženo, pokud se všechny části těla nacházejí v zóně 3 – neutrální oblast.



Kde

a	je	sedadlo
b		opěradlo
c		pravé chodidlo
d		levé chodidlo
e		pravé lýtko
f		levé lýtko
g		pravé stehno
h		levé stehno
i		pravá ruka
j		levá ruka
k		pravá dolní paže
l		levá dolní paže
m		pravá horní paže
n		levá horní paže
o		horní záda
p		hrud'
q		obličej
r		temeno hlavy
s		celé tělo

1	je	velmi chladno
2		chladno, ale přijatelné (komfort)
3		neutrální oblast
4		teplo, ale přijatelné (komfort)
5		horko

Obr. 8: Příklad schémat zón tepelného komfortu [7]

2.2 Čistota vzduchu

Čistota vzduchu je jedním z nejdůležitějších činitelů prostředí z hlediska dopadu na lidské zdraví, a proto je vhodné udržovat čistotu vzduchu na dobré úrovni i v dopravních prostředcích. Škodliviny se do vnitřního vzduchu mohou dostat z okolního vzduchu, nebo mohou být produkovány posádkou vozu.

Silniční doprava je výrazným zdrojem znečišťování ovzduší, a proto se v okolí silnic vyskytuje značné množství škodlivin, mezi které lze zařadit například:

- Aerosol
- Oxidy uhlíku (CO, CO₂)
- Oxidy dusíku (NO_x)
- Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU)
- Přízemní ozón (O₃)

Aerosol v okolí silnic obsahuje především tuhé částice, na které jsou vázány směsi organických a anorganických látek, které mohou být jak toxické, tak i karcinogenní. Škodlivost aerosolu je dána jak jeho chemickým složením, tak i velikostí částic v něm obsažených. Z hlediska velikosti jsou nejškodlivější částice s aerodynamickým průměrem v rozsahu 0,1 až 5 μm, které již mohou pronikat do plicních sklípků a přitom jsou natolik velké, že nemohou být znovu vydechnuty.

Z oxidů uhlíku vyskytujících se v okolí silnic je nebezpečný zejména oxid uhelnatý (CO), který vzniká především při nedokonalém spalování uhlíku. Při vdechování se pak váže na krevní barvivo snáze a pevněji než kyslík a zabraňuje tak přenosu kyslíku v organismu. Nebezpečí otravy CO je vysoké zejména v uzavřených prostorech jako jsou podzemní garáže.

Oxidy dusíku (NO_x) vznikají za vysokých teplot či tlaků, kdy dochází k oxidaci vzdušného kyslíku. Vysoké koncentrace NO_x způsobují především podráždění sliznic dýchacího ústrojí.

Polycyklické aromatické uhlovodíky (PAU) jsou produkovány při nedokonalém spalování organických materiálů a jsou toxické a karcinogenní. PAU se do lidského těla často dostávají navázanými na částicích poléťavého prachu, a proto je pro jejich eliminaci důležitá filtrace vzduchu přiváděného do kabiny automobilu.

Přízemní ozón (O₃) vzniká při reakci oxidů dusíku s dalšími látkami za působení UV záření. Ozón je toxický těkavý plyn, který způsobuje především podráždění sliznic, očí a dýchacích cest.

Příkladem škodlivin vznikajících v kabině vozu může být produkce oxidu uhličitého, vodní páry (H₂O), případně choroboplodných zárodků, nebo zápachů posádkou vozu. Vodní pára je v provozu nebezpečná především tím, že případná kondenzace na zasklení kabiny snižuje výhled a orientaci řidiče. Vyšší vlhkost a obsah CO₂ v kabině pociťuje posádka vozu jako tzv. vydýchaný vzduch, což může nepříznivě působit na pozornost řidiče.

Významnou roli v odstraňování škodlivin sehrává především filtrace vzduchu, kterou lze odstranit jak pevné částice, tak i látky adsorbované na jejich povrchu. Některé plynné škodliviny a zápachy lze částečně odstranit filtrem s aktivním uhlím a pro eliminaci choroboplodných zárodků lze využít baktericidní výbojku.

Ve zhuštěné dopravě, nebo při dopravní zácpě však může nastat situace, kdy okolní vzduch bude obsahovat větší množství škodlivin, než vzduch uvnitř kabiny vozu. V případě kdy jsou výrazně překročeny koncentrace plynných škodlivin v okolním vzduchu je vhodné, aby byl pozastaven přívod venkovního vzduchu. Takový systém však vyžaduje instalaci senzorů plynných škodlivin jak na straně venkovního vzduchu, tak na straně vzduchu uvnitř kabiny vozu, což zvyšuje konečnou cenu systému.

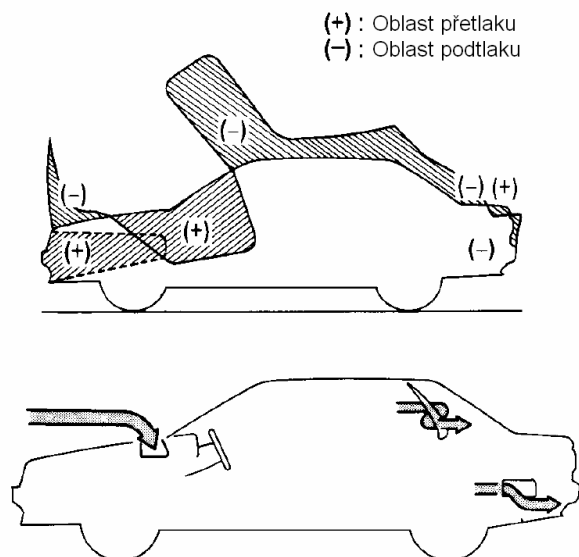
3 Větrání a klimatizace kabin automobilů

Větrání a klimatizace kabin automobilů je velmi rozsáhlé téma, a proto zde bude rozděleno na menší části, kdy každé bude věnována vlastní podkapitola. V první podkapitole bude nastíněn princip větrání vozidel a bude zde také popsána funkce distribuční soustavy. Druhá část bude věnována problematice vytápění kabiny vozu. V třetí části budou popsány možnosti chlazení kabin automobilů a problematika chladiv. Čtvrtá a poslední část této kapitoly bude věnována klimatizačním zařízením, budou zde popsány jednotlivé druhy klimatizačních jednotek a rozebrány dílčí části klimatizační soustavy.

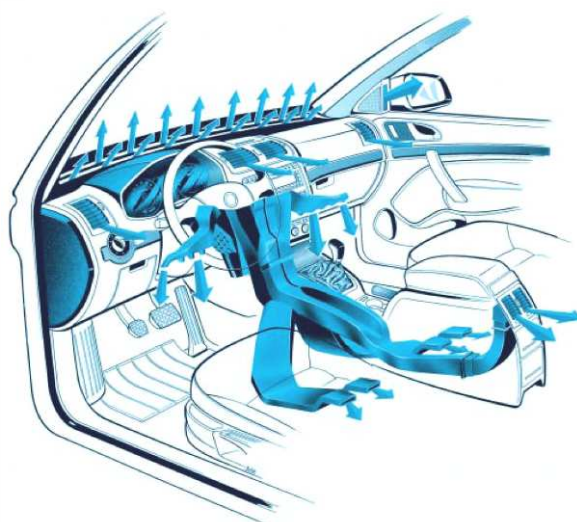
3.1 Větrání

Na větrací soustavu vozu je v dnešní době kladeno několik požadavků. Jedním z hlavních je zajištění dostatečného množství čerstvého vzduchu pro řidiče a cestující. Dále je vhodné, aby do vnitřního prostoru vozidla nevnikal prach a voda, a aby byl vzduch dodáván do kabiny v takovém množství, které zabrání zamlžování oken. V žádné části vozu by také nemělo docházet k akumulaci vydýchaného, či studeného vzduchu a současně by výměna vzduchu měla probíhat bez většího hluku a průvanu. [8]

Při pohybu automobilu směrem dopředu bývá větrání zajištěno díky rozdílu tlaku vzduchu působícího na povrch vozu. Přetlak, případně podtlak je způsoben tvarem vozu (obr. 9). Proto je účelné umístit přívadecí vyústky v oblasti přetlakové a odváděcí v oblasti podtlakové. V případě, kdy je rychlost automobilu nízká, nebo nároky na komfort vysoké, je vhodné využít elektricky poháněného ventilátoru. Ty jsou ve většině případů axiální, nebo radiální a jsou navrženy tak, aby při minimální velikosti a hluku zprostředkovaly co největší průtok vzduchu. Přesto jsou ventilátory dominantními zdroji nízkofrekvenčního hluku. Možností rozložení a umístění jednotlivých přívodních vyústek do interiéru vozu existuje celá řada. Jedna z možností je vyobrazena na obrázku 10. [9,10]



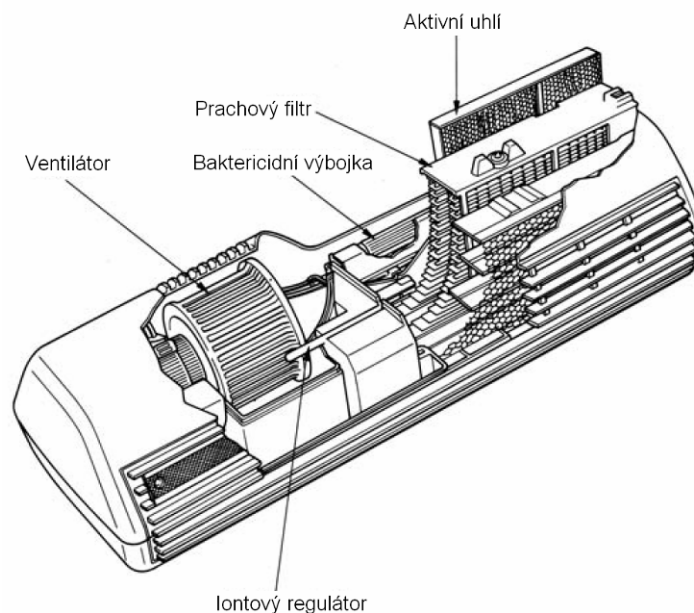
Obr. 9: Tlakové oblasti a umístění vyústek [9]



Obr. 10: Příklad rozložení přívodních vyústek [10]

3.1.1 Filtrace vzduchu

Doposud se pro filtraci vzduchu využíval nejčastěji pouze prachový filtr, který měl zabránit vniknutí částic prachu do interiéru vozu. Se zvyšujícími se nároky na čistotu vzduchu však přestal pouze prachový filtr postačovat. Dnes je možnost instalovat do automobilů prachový filtr společně s filtrem na bázi aktivního uhlí a baktericidní výbojkou (obr. 11). Aktivní uhlí v takovémto systému slouží k adsorpci některých zápachů a plynů, jakými jsou například ozón, chlór, nebo některé složky výfukových plynů. Baktericidní výbojka pak slouží k zničení mikroorganismů obsažených ve vzduchu.



Obr. 11: Filtrační systém s prachovým filtrem, aktivním uhlím a baktericidní výbojkou [9]

3.2 Vytápění

V oblasti naší zeměpisné šířky je obzvláště v zimních měsících zapotřebí vytápět vnitřní prostor vozu pro zlepšení tepelné pohody. Důležitá je také možnost odmlžování a odmrazování skel pro zajištění bezpečnosti jízdy. Možností jak toho dosáhnout se rýsuje hned několik, a to především v závislosti na zvoleném chlazení motoru. Motor automobilu bývá chlazen vzduchem, nebo kapalinou.

V případě motoru chlazeného vzduchem, může být čerstvý vzduch ohříván teplem výfukových plynů. Obvykle je za ventilátorem část chladicího vzduchu oddělena, přivedena k tepelnému výměníku ve výfukové soustavě motoru a následně užitá k vytápění. V tomto případě je však nezbytné, aby se do takto ohřátého vzduchu nedostaly výfukové plyny. [8]

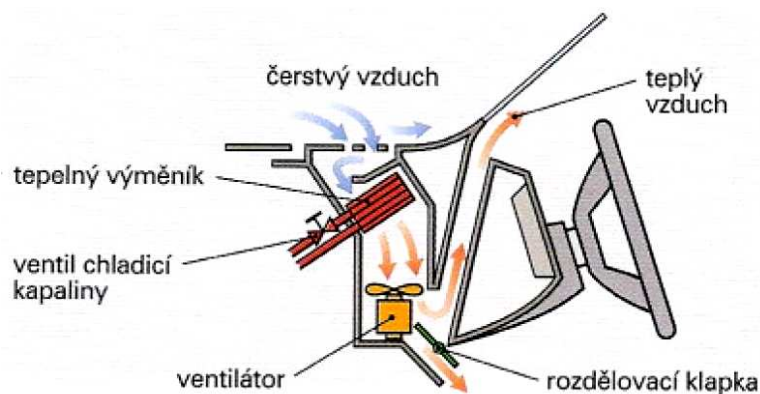
U motorů chlazených kapalinou se vzduch určený k vytápění vozu přivádí k tepelnému výměníku, kde je ohříván chladicí kapalinou motoru. Teplota takto ohříváného vzduchu se ve většině případů reguluje třemi způsoby:

- Množstvím přiváděné chladicí kapaliny
- Množstvím přiváděného čerstvého vzduchu
- Elektronicky řízeným vytápěním

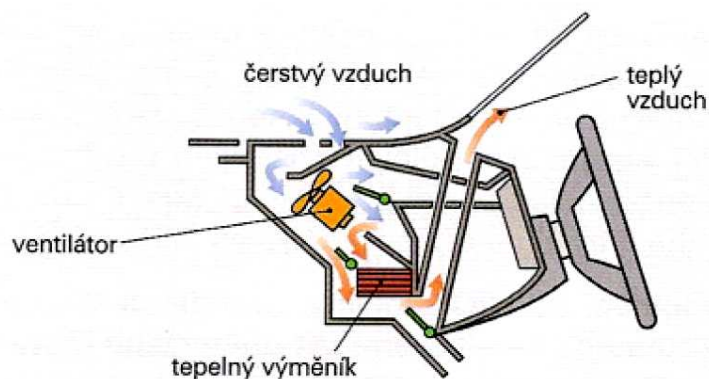
Regulace teploty vzduchu množstvím chladicí kapaliny (obr. 12) je prováděna ventilem chladicí kapaliny, který reguluje její průtok. S redukcí průtoku kapaliny dochází následně k redukcí předávaného tepla.

Regulace teploty vzduchu množstvím přiváděného čerstvého vzduchu (obr. 13) je prováděna klapkou čerstvého vzduchu. Se snižujícím se množstvím přiváděného vzduchu se snižuje také množství předávaného tepla.

U elektronicky řízeného vytápění lze ovladačem na přístrojové desce nastavit požadovanou teplotu uvnitř vozu. Teplota uvnitř kabiny je pomocí čidel zjišťována a v řídicí jednotce porovnávána s požadovanou hodnotou. V případě odlišnosti hodnot se reguluje teplota přiváděného vzduchu dle způsobů popsaných výše, buď množstvím přiváděné chladicí kapaliny, nebo množstvím přiváděného čerstvého vzduchu. [8]



Obr. 12: Regulace množstvím chladicí kapaliny [8]



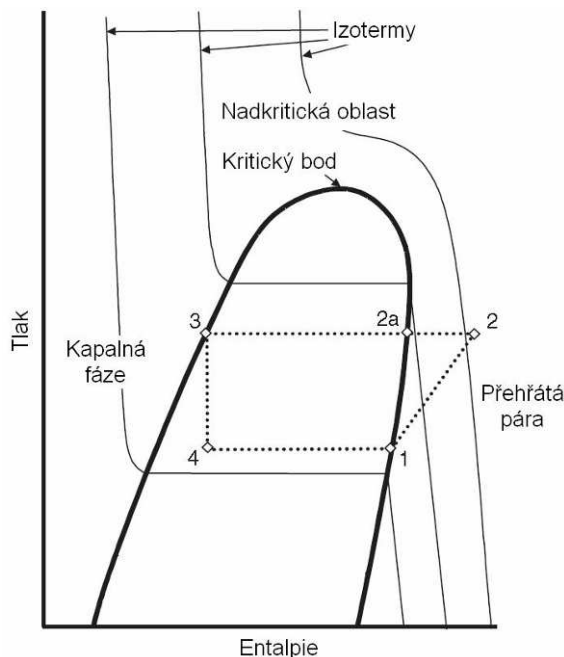
Obr. 13: Regulace množstvím čerstvého vzduchu [8]

V případě stojícího vozu a vypnutého motoru lze pro vytápění kabiny automobilu využít nezávislého topení, ve kterém dochází ke spalování paliva. Vzduch potřebný pro spalování je přiváděn pomocí menšího ventilátoru. Teplo vzniklé při spalování paliva se předává čerstvému vzduchu v tepelném výměníku. Takto ohřátý vzduch je pak přiváděn do interiéru vozu ventilátorem. Výhodou nezávislého topení je také prohřátí motoru a tím i snadnější start v zimním období, čehož se využívá především v severských zemích. [8]

3.3 Chlazení

Dnes se pro chlazení automobilů využívá nejčastěji kompresorových chladicích zařízení, které využívají v uzavřeném cyklu nejrůznějších chladiv. Dříve se využívalo především chladiva R12. To však bylo kvůli obsahu freonu zakázáno Montrealským protokolem a proto muselo být nahrazeno chladivem jiným. Proto se začalo používat chladivo R134a, které nemá tak destruktivní vliv na ozónovou vrstvu jako R12, ale stále podporuje skleníkový efekt. Jeden kilogram chladiva R134a vypuštěný do atmosféry má stejný vliv na skleníkový efekt jako 1300 kilogramů oxidu uhličitého (CO₂). Proto je snaha nahradit i toto chladivo jiným alternativním chladivem.

Chladivo R134a (CH₂FCF₃) není v menším množství toxické, páry jsou těžší než vzduch, a proto může dojít k vytěsnění kyslíku. Nemá korozivní účinek, avšak napadá některé druhy plastů, je výbušné, hořlavé, bezbarvé, se slabým zápachem po etheru. Toto chladivo



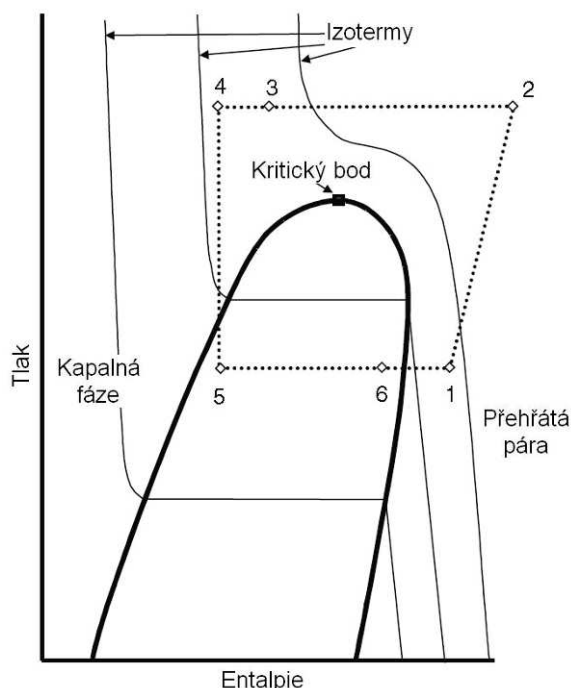
není mísitelné s minerálními oleji, místo toho je mísitelné se syntetickým mazivem PAG (polyalkylglykol). Snadno absorbuje vlhkost, nemůže být smícháno s R12, může však být vyčištěno a recyklováno. Cyklus tohoto chladiva je podkritický (obr. 14). V bodě 1 dochází k nasávání par chladiva kompresorem, v něm dochází k nárůstu tlaku a entalpie. V bodě 2 chladivo dosáhne kondenzátoru, kde se postupně ochlazuje a v bodě 2a se začíná z par chladiva stávat směs kapaliny a páry. Bodem 3 je označen expanzní ventil, ve kterém dojde k poklesu tlaku chladiva vlivem jeho expanze. Dále se chladivo dostává do bodu 4, ve kterém vstupuje do výparníku, ohřívá se a mění skupenství z kapalného na plynné. Následně je opět nasáno kompresorem a cyklus se opakuje. [9]

Obr. 14: Podkritický cyklus chladiva R134a [9]

Alternativní systémy, nahrazující chladivo R134a, mohou být například [9]:

- Systémy využívající oxid uhličitý (CO₂) – chladivo R744
- Absorpční chladicí systémy
- Systémy využívající chladiva HFC152a
- Systémy využívající vzduchu jako chladiva – R729
- Chlazení odpařující se vodou (adiabatické chlazení)
- Termoelektrické chladicí systémy

Chladivo R744 působí korozivně na polymerní materiály, a proto se pro jeho vedení užívá kovového potrubí. Toto chladivo není hořlavé a v porovnání s chladivem R134a je levnější. Maziva se pro tento typ chladiva nejčastěji používají buď na bázi esterů (POE), nebo



na bázi glykolů (PAG). Cyklus R744 je transkritický (obr. 15), což znamená, že část cyklu leží pod kritickým bodem a část v oblasti nad kritickým bodem. Tento cyklus začíná opět bodem 1 v němž je chladivo nasáváno kompresorem, ve kterém dochází k zvýšení tlaku a entalpie. V bodě 2 se chladivo dostane do vnějšího tepelného výměníku, kde odevzdává teplo okolnímu vzduchu. Dále se dostává do bodu 3, kde ve vnitřním tepelném výměníku odevzdává teplo chladivu, které bude posléze nasáto kompresorem. V bodě 4 dochází k expanzi chladiva. Bodem 5 je označen výparník, kde chladivo absorbuje teplo. Následně putuje do vnitřního tepelného výměníku, kde absorbuje teplo, přejde do plynné fáze a může být nasáto kompresorem v bodě 1. [9]

Obr. 15: Transkritický cyklus chladiva R744 [9]

Absorpční chladicí systémy jsou výhodné především tam, kde je možno využít levného nebo odpadního tepla. Pro tento druh cyklu je nezbytné užití chladiva a absorpční látky. V případě klimatizací je nejvhodnější kombinace bromid lithný–voda. Proces kondenzace, expanze a vypařování je v tomto cyklu podobný například s cyklem chladiva R134a. Avšak kompresor je v tomto případě nahrazen absorpčním cyklem, kdy absorpční látka pohlcuje páry chladiva. Následně se vytvoří kapalný roztok, kterému je čerpadlem zvýšen tlak. Dále je využito tepla, kterým je odstraněno chladivo z roztoku. Chladivo se pak dostává do kondenzátoru, následuje expanze, vypařování a cyklus se opakuje. Tyto systémy jsou dnes používány především pro klimatizaci větších budov, nicméně za určitých podmínek je lze využít i pro klimatizaci dopravních prostředků. [9,11]

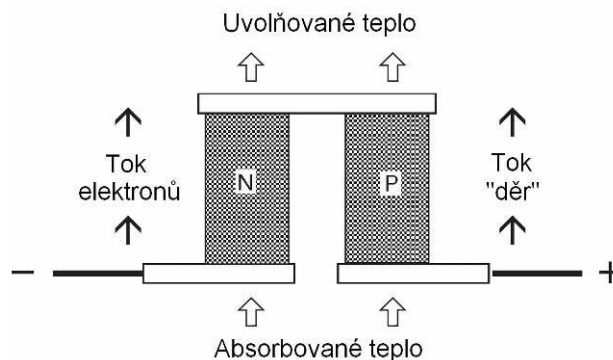
Systémy využívající chladiva HFC152a musí být opatřeny sekundárním okruhem, protože toto chladivo je hořlavé a pokud by se objevila netěsnost ve výparníku, mohlo by dojít k explozi. Proto dochází k výměně tepla mezi primárním a sekundárním okruhem v chladiči, kde teplotněná látka na bázi solného roztoku předává teplo z kabiny vozu do chladiva HFC152a. Primární okruh pak funguje podobným způsobem jak je tomu například u chladiva R134a. Kompresor nasává chladivo, zvýší mu tlak i entalpii, následuje kondenzátor kde se chladivo ochladí, dále expanzní ventil, chladič a jako poslední bývá v okruhu využit akumulátor chladiva, ze kterého může kompresor chladivo nasávat. Výhodou tohoto systému může být široký výběr chladiva, potenciál pro místní chlazení vozu (například chlazení sedadel), redukce množství chladiva a jeho úniku. Nevýhodou pak může být užití hořlavého chladiva, cena a velikost systému. [9]

Systémy, které využívají vzduch jako chladiva (někdy označovaného R729), se využívají především v letecké dopravě. Při tomto druhu chlazení nedochází k fázové přeměně teplotněného média a tento cyklus je většinou otevřený. Tudíž vzduch, který projde tímto cyklem se nevrací zpět na jeho začátek, ale odchází z cyklu do okolního prostředí. Na začátku

cyklu bývá rotační kompresor, který zvyšuje tlak i entalpii vzduchu. Teplota vzduchu dosáhne až 200 °C a následně vzduch putuje do primárního tepelného výměníku, kde odevzdává teplo do okolí za konstantního tlaku. Poté vzduch prochází přes turbínku klimatizační jednotky, kde expanduje. Po expanzi následuje sekundární tepelný výměník, kde dochází k výměně tepla s vnitřním vzduchem kabiny letadla. [9]

Adiabatické chlazení je založeno na přeměně citelného tepla na teplo latentní při vypařování vody. Tento pochod lze realizovat například tak, že okolní vzduch, procházející přes nádobu s vodou bude vlhčen, díky čemuž se sníží jeho teplota a následně bude přiváděn do kabiny vozu. Takovýto proud vzduchu může být vytvořen díky tlakovému spádu při pohybu automobilu, případně ventilátorem. Systém založený na adiabatickém chlazení sice nelze využít v oblastech s velkou vlhkostí vzduchu, ale může být zdárně aplikován v suchých oblastech, kde bude takovéto ochlazení vzduchu nezanedbatelné.

Princip systémů termoelektrického chlazení vychází z Peltierova jevu, který byl objeven roku 1834 J. C. Peltierem. Protéká-li stejnosměrný elektrický proud z vnějšího zdroje obvodem, ve kterém jsou spojeny dva vodiče různých materiálů, pak vzniká mezi spoji teplotní rozdíl. Případný ohřev, nebo ochlazení spoje pak závisí na směru proudu. Jedna z možností termoelektrického chlazení je užití dvou odlišných polovodičových materiálů, jednoho typu N a druhého typu P (obr. 16). Tento způsob chlazení se dnes v automobilovém průmyslu používá především pro chlazení, případně ohřev sedadel.



Obr. 16: Princip Peltierova článku [9]

3.4 Klimatizační zařízení

Kvůli jisté odlišnosti kabiny automobilu od standardně klimatizovaných prostor, jsou na klimatizaci vozu kladeny specifické nároky. Obvykle se od této klimatizace očekává, že vzduch uvnitř kabiny bude podle potřeby ochlazen, případně ohřát v co nejkratším časovém intervalu a kvalita přiváděného vzduchu bude vylepšena především odstraněním nečistot. V neposlední řadě se vyžaduje, aby byla zachována jednoduchost ovládání a ohleduplnost k životnímu prostředí. Vzhledem k regulaci klimatizačních soustav rozlišujeme klimatizace na [8]:

- Ručně ovládané
- Teplotně regulované
- Plně automatické

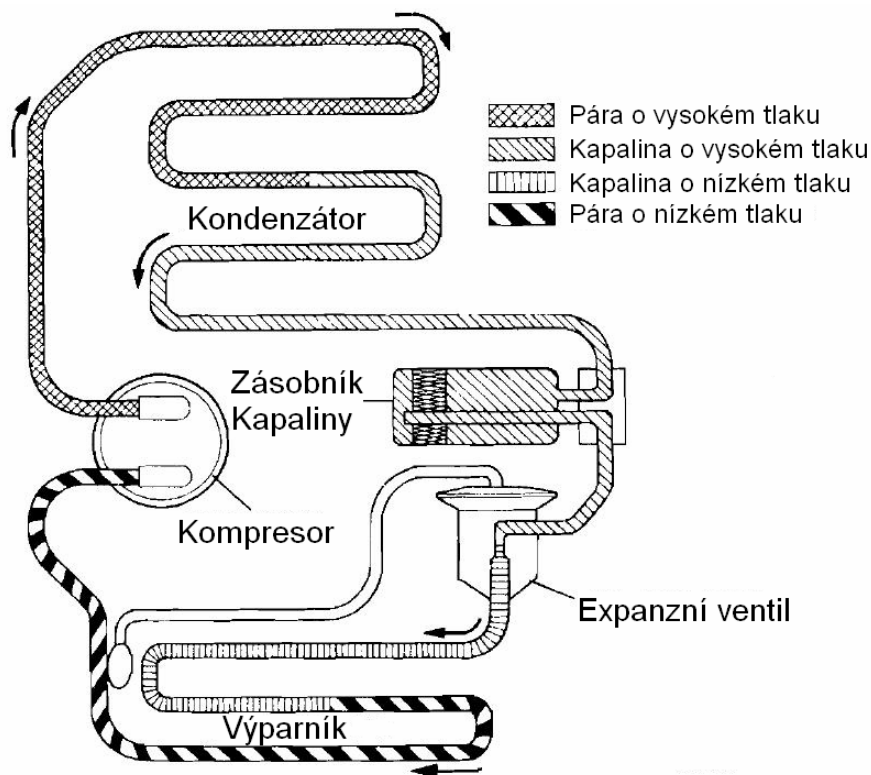
U ručně ovládané klimatizace je teplota vzduchu, jeho rozdělení a množství nastavováno příslušnými ovladači samostatně, ručně. Teplotně regulovaná klimatizace udržuje teplotu uvnitř automobilu konstantní, přičemž se ručně nastavuje rozdělení vzduchu a jeho množství. V případě užití plně automatické klimatizace je teplota vnitřního prostoru udržována konstantní a je kontrolována několika teplotními čidly. Rozdělení vzduchu a jeho množství

jsou regulovány plně automaticky, aby docházelo k optimálnímu rozložení teploty. Klimatizační soustavu lze rozdělit na základní části, kterými jsou [8]:

- Okruh vzduchu
- Okruh chladiva
- Systém řízení a regulace

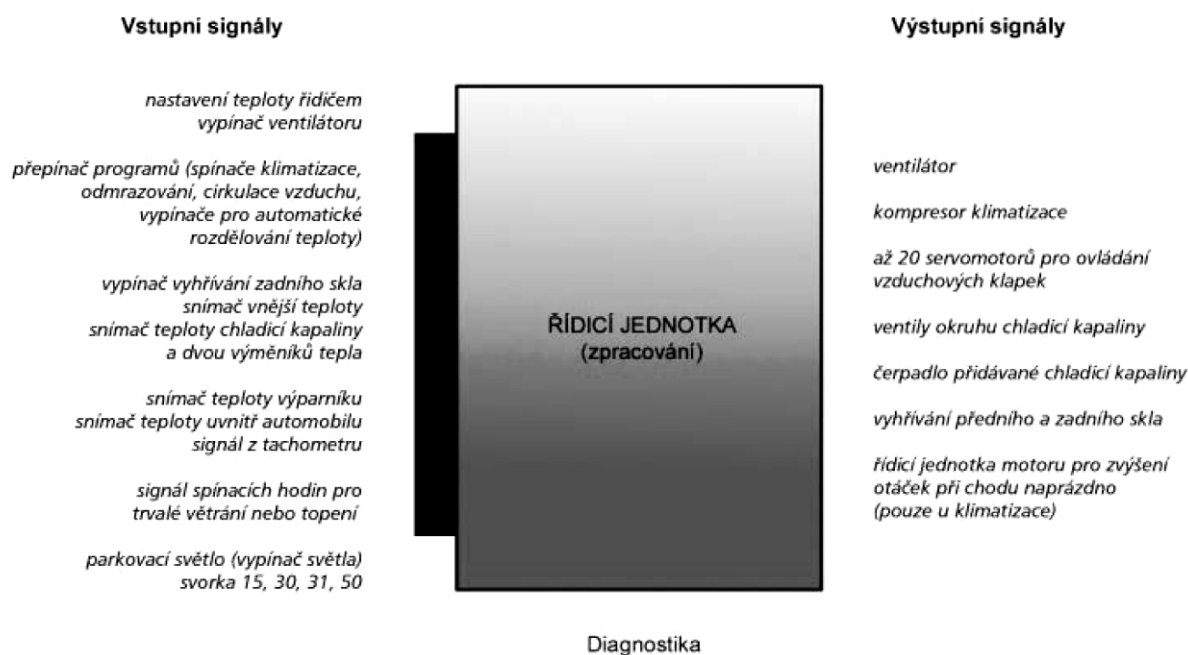
Okruh vzduchu se dále dělí na okruh otevřený a uzavřený. Otevřený okruh pracuje s čerstvým vzduchem, který je přiváděn z okolního prostředí. Tento může být filtrován, podle potřeby ochlazován, nebo ohříván a přiváděn na místa potřeby přes rozváděcí klapky a výústky. Uzavřený okruh, někdy též vnitřní okruh vzduchu, může být využit například z důvodu velké koncentrace nečistot v okolním vzduchu. V tomto okruhu je nasáván vnitřní vzduch kabiny vozu, který je následně upravován podobně jako čerstvý vzduch a nakonec je přiváděn zpět do kabiny automobilu. [8]

Okruh chladiva je jednou z nejdůležitějších částí klimatizačního zařízení. Dnes se pro tento okruh většinou užívá chladiva R134a v provedení s expanzním ventilem (obr. 17), a proto bude dále podrobněji popsán právě tento systém. Na začátku takového okruhu se nachází kompresor, jenž nasává studené páry chladiva, které stlačuje a tak jim zvyšuje tlak i teplotu. Takto upravené páry chladiva putují ke kondenzátoru, kde jsou ochlazovány proudem okolního vzduchu, kondenzují a chladivo tak mění své skupenství v kapalné. Kapalné chladivo se dále dostává do zásobníku kapaliny se sušící vložkou, který funguje především jako zásobní nádoba. Pak se dostává k expanznímu ventilu, kde dojde k snížení jeho tlaku. Dále chladivo putuje do výparníku. Zde mění své skupenství v plynné, přičemž teplo potřebné k této skupenské přeměně je odebíráno ze vzduchu proudícího přes výparník. Plynné chladivo pak již může být opět nasáto kompresorem a cyklus tak může být opakován. Nikdy by však nemělo dojít k nasátí chladiva v kapalném stavu, protože kvůli zanedbatelné stlačitelnosti kapalin ve srovnání s plyny by mohlo dojít k destrukci kompresoru.



Obr. 17: Okruh chladiva [12]

Systém řízení a regulace je nezbytný pro správnou a hlavně ekonomickou funkci klimatizační soustavy. Tento systém má především udržovat požadovanou teplotu vzduchu uvnitř kabiny vozu, přičemž je stále častější možnost nastavení teploty pro jednotlivé členy posádky. Moderní řídicí jednotky jsou schopny regulovat například až dvacet servomotorů pro ovládání vzduchových klapek, ventily v okruhu chladiva, kompresor klimatizace, otáčky hlavního ventilátoru, nebo vyhřívání předního a zadního skla. Vstupními signály pro řídicí jednotku pak mohou být jak signály ze snímačů, tak signály z obslužného panelu, jenž je nastavován posádkou vozu. Možné vstupní a výstupní signály řídicí jednotky jsou popsány na obrázku 18. [10]



Obr. 18: Možné vstupní a výstupní signály řídicí jednotky [10]

4 Pasivní chlazení automobilů

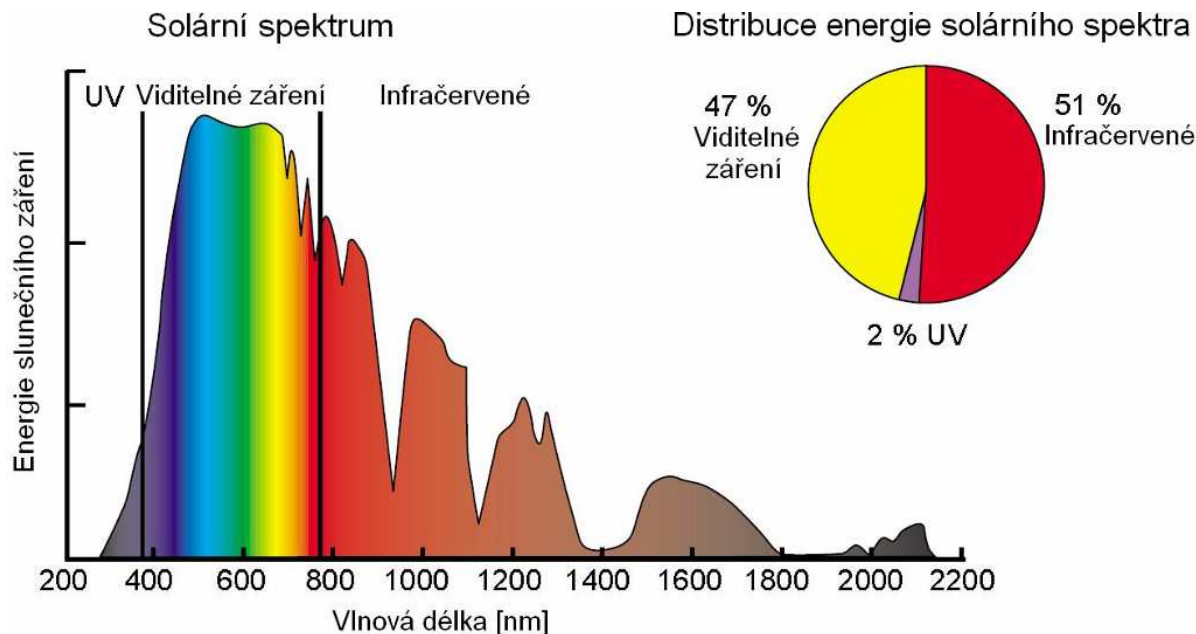
Rostoucí ceny energií a negativní vlivy spalování fosilních paliv na životní prostředí jsou faktory, jenž vedou k nutnosti snižování spotřeby paliva potřebného pro klimatizaci automobilu. Jednou z možností jak toho dosáhnout je použití pasivních způsobů chlazení kabin automobilů. Termínem pasivní způsoby chlazení jsou v práci označovány systémy, které nespotebouvávají energii z autobaterie či paliva a také konstrukční opatření, která upravují tepelně technické vlastnosti kabiny automobilu. Takovéto systémy a opatření pak fungují buď naprosto bez dotace energií, případně s dotací z vnějších zdrojů, jako je například sluneční záření. V této kapitole budou popsány pasivní způsoby chlazení vozu, jakými mohou být například:

- Volba vhodného laku karoserie automobilu
- Užití selektivního zasklení
- Tepelná izolace kabiny
- Provětrávání zaparkovaného vozu
- Užití tepelných trubic

4.1 Volba vhodného laku karoserie automobilu

Zejména v letním období může mít typ laku karoserie automobilu nemalý vliv na tepelnou pohodu uvnitř kabiny vozu. Absorptivita slunečního záření je u tmavých laků mnohem vyšší než u laků světlých. Absorptivita slunečního záření, u karoserie automobilu natřené černým lakem běžně užívaným v automobilovém průmyslu, se pohybuje kolem 0,95. V případě stříbrné metalízy se pak absorptivita pohybuje jen kolem 0,3. Z tohoto je zřejmé, že karoserie natřená běžně užívaným černým lakem bude během slunného letního dne dosahovat vyšších teplot, než tomu bude u karoserie natřené lakem stříbrným. Takto rozehřátý exteriér vozu pak bude mít za následek zvýšení teploty interiéru.

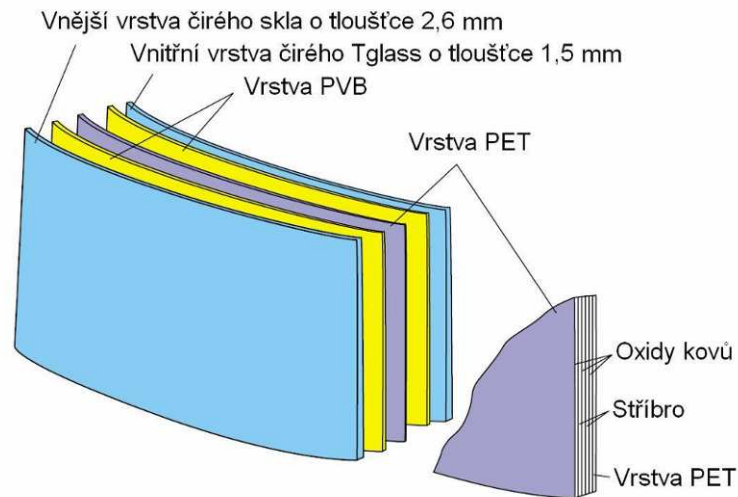
Zajímavou možnost, jak snížit tepelné zisky černého automobilu, nabízí efekt, v přírodě pozorovatelný u lilku, který i za slunného letního dne zůstává chladný i přes jeho tmavou barvu. Toho lze využít pro návrh laků, které se skládají ze dvou vrstev. Svrchní vrstva je černá a absorbuje tak viditelnou složku záření, ale propouští infračervené záření. Toto je posléze odraženo spodní vrstvou do okolního prostředí. Vzhledem k tomu, že infračervené záření tvoří až 51 % celkové energie slunečního záření (obr. 19), má tento efekt příznivý vliv na snížení tepelných zisků tmavě zbarveného automobilu. Nevýhodou těchto laků je v současné době zejména cena. Výhodnější variantou jak omezit tepelné zisky tmavého vozu může být bíle zbarvená střecha, případně tepelná izolace střechy, která částečně eliminuje přenos tepla do interiéru automobilu. [13]



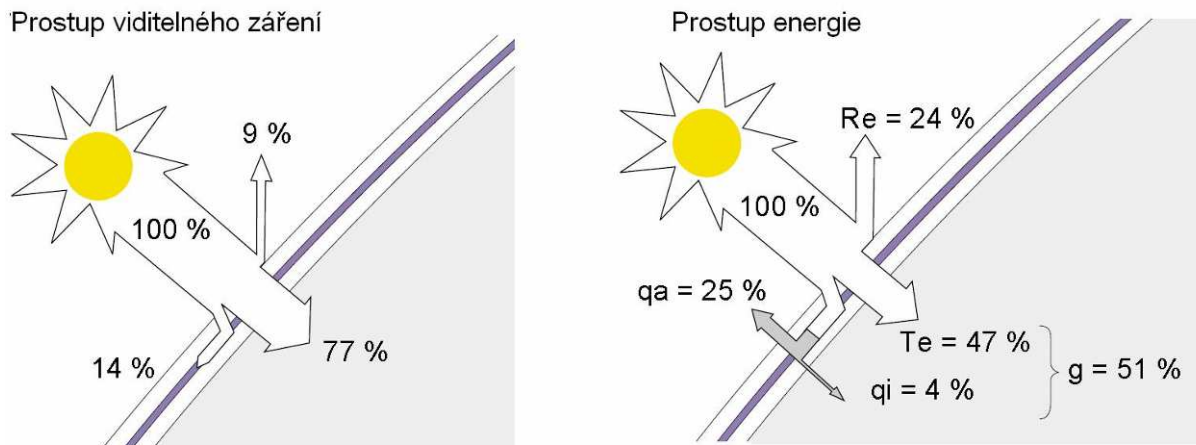
Obr. 19: Distribuce energie solárního spektra [14]

4.2 Užití selektivního zasklení

Zasklení automobilu má rozhodující vliv na tepelnou pohodu uvnitř kabiny vozu za slunných letních dnů. Tepelnou pohodu ovlivňuje především absorptivita a transmisivita zasklení. Nižší absorptivita zasklení znamená, že sklo bude pohlcovat méně energie, bude se méně ohřívat a bude tak předávat menší množství tepla zářením a konvekcí do interiéru vozu. Nižší transmisivita má za následek snížení intenzity slunečního záření dopadajícího dovnitř kabiny automobilu a tím pádem i razantní snížení tepelných zisků. Nicméně musíme mít stále na paměti platnost Kirchhoffova zákona ($\rho + a + \tau = 1$), ze kterého vyplývá, že součet reflektivity, absorptivity a transmisivity je vždy roven jedné. Významnou roli při návrhu vhodného zasklení automobilů hrají také stávající předpisy, které neumožňují snížit propustnost viditelné složky slunečního spektra pod 75 % u čelního skla a pod 70 % u předního bočního skla. Snahou je tedy snížit propustnost zasklení v oblastech ultrafialové a infračervené, které tvoří až 53 % celkové energie slunečního záření. Proto byly k tomuto účelu navrženy různé druhy selektivního zasklení, které propouští minimální množství záření v ultrafialovém a infračerveném spektru. Příkladem takového zasklení může být sklo Siglasol (obr. 20) firmy Pilkington, které propouští až 77 % viditelného záření (obr. 21) a je tak vhodné i pro čelní sklo automobilu. Toto sklo však propouští 51 % a odráží 24 % celkové energie slunečního záření, jak je také vidět na obrázku 21, a tak snižuje tepelné zisky.



Obr. 20: Konstrukce skla Siglasol [14]



Obr. 21: Prostup viditelné složky solárního záření a prostup celkové energie solárního záření u skla Siglasol [14]

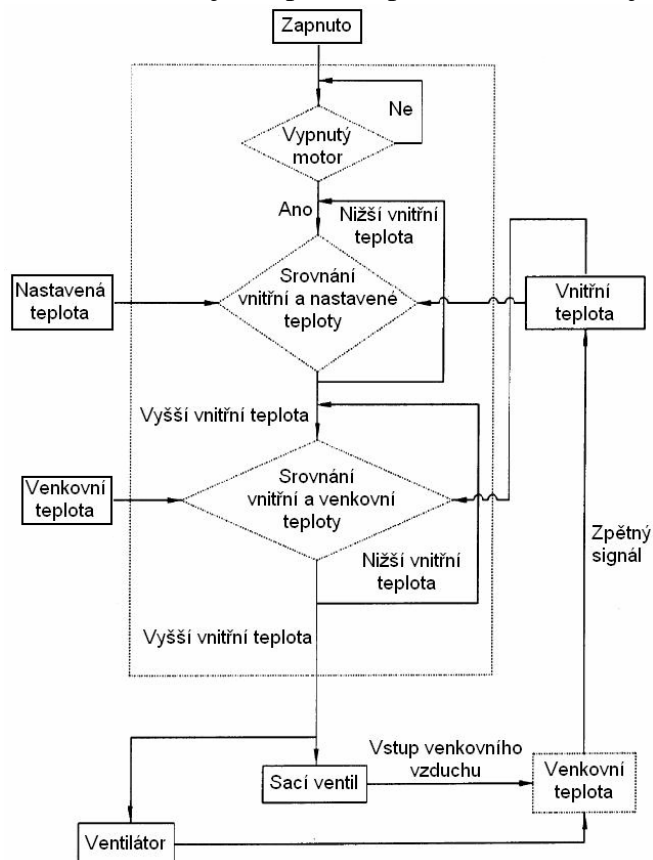
4.3 Tepelná izolace kabiny

Efektivnost izolace je dána především rozdílem teplot interiéru vozu a jeho exteriéru. Teplota exteriéru automobilu za slunného letního dne je pak závislá zejména na typu laku automobilu. Z toho je tedy zřejmé, že u bíle natřené střechy automobilu bude mít její izolace jen malou efektivitu, avšak ta se může zvýšit v případě, kdy bude střecha automobilu natřena černým běžně užívaným lakem. Podle NREL (National Renewable Energy Laboratory) [15] nabývá izolace automobilu na významu především při užití selektivního zasklení a provětrávání zaparkovaného vozu. U konvenčních vozů má tedy izolace za slunného letního dne jen malý význam.

Přidaná hodnota kvalitní izolace automobilu spočívá v redukci tepelných ztrát vozu v zimních měsících. Tento aspekt v dnešní době, kdy je u automobilů dostatek odpadního tepla, není příliš důležitý. Nicméně u budoucích automobilů, u kterých bude nedostatek odpadního tepla, může hrát tento fakt ve vytápění vozů významnější roli. [15]

4.4 Provětrávání zaparkovaného vozu

U zaparkovaného automobilu na parkovišti během slunných letních dnů může docházet k rychlému ohřátí interiéru a vnitřního vzduchu ve vozidle. Výměna takto ohřátého vnitřního vzduchu vzduchem okolním pak může způsobit ochlazení vnitřního prostoru. Provětrávání zaparkovaného vozu lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní provětrávání využívá k vyvození proudění vzduchu rozdílu hustot vnitřního a okolního vzduchu. Aktivní provětrávání k tomu pak využívá ventilátorů. Testy NREL na automobilu Jeep Grand Cherokee ukazují, že pasivní provětrávání vozu je téměř tak účinné, jako aktivní při ventilaci



ventilátorem vozu zapnutým na střední výkon [15]. Toto je však podmíněno vhodným umístěním přívodních vyústek.

Zajímavou možností, jak provětrávat zaparkovaný automobil za letních slunných dnů, může být užití solárně napájeného provětrávání (obr. 22). Tento systém transformuje solární energii na energii elektrickou, kterou je pak poháněn ventilátor. Při vypnutém motoru snímače systému zjišťují teplotu vnitřního a vnějšího vzduchu. Jestliže teplota vnitřního vzduchu výrazně překročí teplotu vzduchu okolního, začne solárně napájený ventilátor provětrávat kabinu vozu chladnějším okolním vzduchem. Takto lze snížit teplotu vnitřního vzduchu až o 20 °C. Podobný systém byl poprvé použit ve voze Mercedes Benz 500 roku 1998, dnes ho lze již běžně pořídit k vybraným vozům jako nadstandardní výbavu (obr. 23). [16]

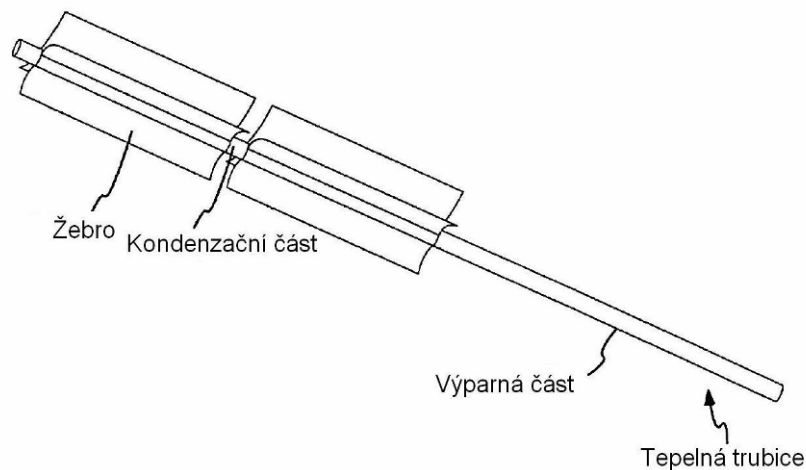
Obr. 22: Řízení solárně napájeného systému [16]



Obr. 23: Pohled na solární panely střešního okna automobilu Audi [17]

4.5 Užití tepelných trubíc

V případě zaparkovaného automobilu na parkovišti za letních slunných dnů dochází k nadměrnému ohřevu některých částí interiéru vozu, jako je například přístrojová deska. Proto se zrodila myšlenka odvádět teplo z určitých prvků interiéru do exteriéru vozu prostřednictvím tepelných trubíc (obr. 24). Tepelná trubice se skládá z kovové hermeticky uzavřené trubičky, spojující část interiéru automobilu s jeho exteriérem, a malého množství pracovní látky uvnitř. Je vhodné, aby byl materiál trubičky dobře tepelně vodivý, z důvodu lepšího přenosu tepla. Z téhož důvodu se na trubičku často umísťují žebra, jak je vidět na obrázku 18. Tepelná trubice se skládá z části výparné a kondenzační. Část výparná je umístěna na horké části interiéru a dochází v ní k výparu pracovní látky, což odebírá teplo z interiéru. Kondenzační část tepelné trubice je připojena k chladnější části exteriéru vozu a pracovní látka v ní kondenzuje a odevzdává tak teplo do okolí. Kondenzát pak putuje do části výparné a proces se může opakovat. Podle mechanismu cirkulace kondenzátu se tepelné trubice dělí na gravitační a kapilární. Gravitační trubice musí být v prostoru umístěny tak, aby byla kondenzační část výše než výparná a kondenzát tak mohl stékat díky gravitační síle. Kapilární trubice lze v prostoru umístit libovolněji, protože proudění kondenzátu je v tomto případě vyvozeno kapilárním tlakem. [15,18]



Obr. 24: Popis tepelné trubice [18]

5 Numerické simulace

Díky rozvoji výpočetní techniky, nárůstu výpočetního výkonu a zlevnění počítačového hardware, došlo v devadesátých letech dvacátého století k výraznému rozvoji metod numerických simulací nejrůznějších fyzikálních fenoménů, jakými jsou například přenos tepla, proudění látky, pružnost a pevnost atd. Tyto metody se začaly postupně uplatňovat a využívat v průmyslu, především jako nástroje pro optimalizaci a vývoj. Jejich hlavním přínosem bylo především zrychlení a zlevnění inovačního cyklu, protože umožňují relativně rychle namodelovat velkou sadu modelových případů, jejichž měření by na reálných modelech trvalo příliš dlouho. Pro fyzický experiment je také nutno vyrobit model, což je většinou finančně i časově náročná záležitost. Numerické simulace využívají geometrie, které lze exportovat z dnes již běžně užívaných CAD systémů či nejrůznějších 3D modelářů. Nejužívanější simulační metodou je dnes CFD (Computational Fluid Dynamics), která řeší v daném modelovém případě mimo jiné problematiku teplotních a rychlostních polí. Výhodou CFD je především její obecnost a tedy široká možnost uplatnění. Nevýhodou pak může být velká náročnost na výpočetní výkon a čas.

5.1 Program THESEUS-FE

Tento program patří do kategorie 1D simulačních programů, které jsou využívány pro řešení problematiky přenosu tepla pomocí diferenciálních rovnic popisujících mechanismy přenosu tepla vedením, prouděním a zářením. Od převážné většiny 1D simulačních programů se liší zejména tím, že pro výpočet přenosu tepla zářením využívá 3D geometrii modelu ve formátu NASTRAN, což umožňuje věrněji popsat konkrétní modelový případ. Dále tento program umožňuje definovat vícevrstvé materiály, přičemž pro každou vrstvu počítá jak přenos tepla skrz, tak přenos tepla vedením podél dané vrstvy. THESEUS neřeší rychlostní pole média, tedy proudění média v jednotlivých bodech prostoru. Prostor daný vstupní geometrií lze rozdělit do jednotlivých zón a objemový, či hmotnostní tok mezi zónami je nezbytné zadat ručně, jako vstupní hodnotu. Toto však může být problém, protože hmotnostní, ani objemový tok média v jednotlivých částech prostoru většinou není předem znám. Proto je pro výpočty uvnitř automobilu často výhodné užití jen jedné zóny pro vnitřní prostor vozu. Nicméně pokud pro nás nejsou z hlediska výsledků rychlostní pole média příliš důležitá, lze je za jistých okolností zanedbat a tento program použít s výhodou značného urychlení výpočtu. Proto je THESEUS-FE vhodný především pro nestacionární řešení teplotních polí v daném modelovém případě. Celkový popis funkce programu by značně přesáhnul možnosti této diplomové práce, avšak podrobné informace o programu THESEUS-FE 3.0 lze nalézt v manuálu programu [19].

6 Popis simulace a výchozího nastavení

6.1 Úvod

Simulace je zaměřena na zjištění efektivnosti vybraných metod pasivního chlazení automobilu. Simulačním modelem je v této práci automobil Volkswagen Polo (obr. 25). Rozdělení jednotlivých modelových případů je uvedeno v tabulce 1. Simulace budou provedeny pro případ odstaveného vozu na parkovišti, orientovaného přední částí k jihu za slunného letního dne a budou trvat 3600 s. Před zaparkováním uvažujeme vozidlo jako klimatizované, avšak v době zahájení simulace je již klimatizace vypnutá a automobil bez posádky. V jednotlivých simulačních případech budou následně sledovány tepelné poměry uvnitř vozu.



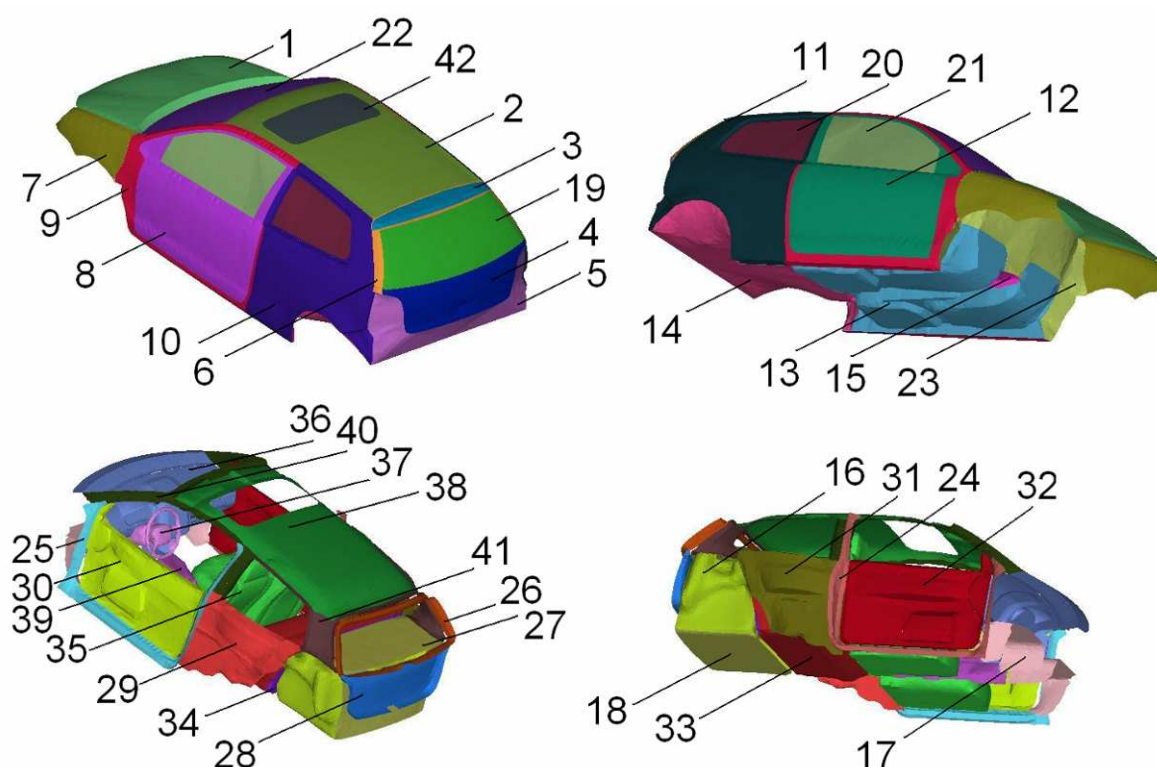
Obr. 25: Volkswagen Polo [20]

Tab. 1: Rozdělení modelových případů

A	Automobil bez úprav - výchozí modelový případ
B	Změna laku automobilu
C1	Izolace střechy černého vozu
C2	Izolace střechy stříbrného vozu
D1	Provětrávání vozu vzduchem o objemovém toku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
D2	Provětrávání vozu vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
E	Selektivní zasklení automobilu
F	Kombinace metod pasivního chlazení

6.2 Příprava, rozdělení geometrie a volba materiálů

Prvním krokem při tvorbě modelu v programu THESEUS-FE je import 3D geometrie daného vozu ve formátu NASTRAN. Importovaná geometrie by měla splňovat některé kvalitativní parametry. Zejména by nemělo docházet k průnikům jednotlivých částí sítě. Po úspěšném nahrání geometrie je nutné ji rozdělit podle materiálů a podle vztahu k jednotlivým okrajovým podmínkám, které chceme v modelu použít. Daný model automobilu je rozdělen na 42 částí. Rozdělení modelu je patrné z obrázku 26. Příslušnost jednotlivých částí k materiálům pak popisuje tabulka 2.



Obr. 26: Rozdělení automobilu na jednotlivé části

Tab. 2: Příslušnost částí k materiálům

Číslo	Název	Materiál	Tloušťka [mm]
1	Kapota	Ocelový plech	0,75
2	Střecha vnější	Ocelový plech	0,75
3	Křídlo	Ocelový plech	0,75
4	Dveře kufru vnější	Ocelový plech	0,75
5	Kufr vnější	Ocelový plech	0,75
6	Rám zadního okna vnější	Ocelový plech	0,75
7	Boční plechy	Ocelový plech	0,75
8	Dveře přední pravé vnější	Ocelový plech	0,65
9	Rám dveří vnější	Ocelový plech	0,65
10	Dveře zadní pravé vnější	Ocelový plech	0,65
11	Dveře zadní levé vnější	Ocelový plech	0,65
12	Dveře přední levé vnější	Ocelový plech	0,65
13	Podlaha	Vícevrstvý materiál 1	14,5
14	Podlaha kufru vnější	Vícevrstvý materiál 1	14,5

15	Podlaha pod palubní deskou	Vícevrstvý materiál 1	14,5
16	Kufr vnitřní	Vícevrstvý materiál 1	14,5
17	Prostor pro nohy	Vícevrstvý materiál 1	14,5
18	Podlaha kufru vnitřní	Vícevrstvý materiál 1	14,5
19	Okno zadní	ESG	3,15
20	Okna boční zadní	ESG	3,15
21	Okna boční přední	ESG	3,5
22	Čelní sklo	ESG	4
23	Přepážka motoru	Ocelový plech	0,75
24	Rám dveří levý vnitřní	Ocelový plech	0,75
25	Rám dveří pravý vnitřní	Ocelový plech	0,75
26	Rám zadního okna vnitřní	Ocelový plech	0,75
27	Deska nad kufrem	ABS	0,9
28	Dveře kufru vnitřní	ABS	0,9
29	Dveře zadní pravé vnitřní	ABS	0,9
30	Dveře přední pravé vnitřní	ABS	0,9
31	Dveře zadní levé vnitřní	ABS	0,9
32	Dveře přední levé vnitřní	ABS	0,9
33	Sedadla zadní	Vícevrstvý materiál 2	22,3
34	Zadní část zadních sedadel	Vícevrstvý materiál 2	22,3
35	Sedadla přední	Vícevrstvý materiál 2	22,3
36	Přístrojová deska	ABS	3
37	Volant	ABS	3
38	Střecha vnitřní	ABS	3
39	Tunel	ABS	3
40	Sloupky přední	Ocelový plech	2
41	Sloupky zadní	Ocelový plech	2
42	Střešní okno	Obyčejné tmavé zasklení	5,2

Materiál je volen většinou jednovrstvý, běžně užívaný v automobilovém průmyslu. Méně známým materiálem může být ABS (akrylonitril butadien styren), což je termoplastický kopolymer hojně používaný pro výrobu automobilových dílů. ESG je pak bezpečnostní sklo. Jednotlivé vícevrstvé materiály jsou popsány v tabulkách 3 a 4.

Tab. 3: Vícevrstvý materiál 1

Vícevrstvý materiál 1	
Materiál	Tloušťka [mm]
Ocelový plech	1,5
Bavlna	8
Koberec	5

Tab. 4: Vícevrstvý materiál 2

Vícevrstvý materiál 2	
Materiál	Tloušťka [mm]
PVC	1,5
Kaučuková pěna	20
Tkanina	0,8

6.3 Tvorba zón a objemů vzduchu, kavit a volba vlastností okolního prostředí

Po rozdělení automobilu na jednotlivé části a po volbě materiálů je vhodné vytvořit v interiéru vozu zónu vzduchu. Této je nutno přiřadit objem, počáteční teplotu a počáteční relativní vlhkost vzduchu. Toto je voleno podle tabulky 5.

Tab. 5: Vnitřní vzduch

Zóna vzduchu	
Objem	2,3 m ³
Počáteční vlhkost	50 %
Počáteční teplota	26 °C

Především z důvodu zkvalitnění výpočtu jsou vytvořeny navíc vzduchové kapsy v oblasti kufří (0,28 m³), motoru (0,2 m³), střechy (0,05 m³), pravých dveří (0,04 m³), levých dveří (0,04 m³) a přístrojové desky (0,2 m³).

Následuje vytvoření kavit kabiny automobilu, pravých dveří, levých dveří a střechy. Ty jsou nastaveny jako uzavřené a jako „Pseudo Grey Body“. Uzavřená znamená, že kavita není otevřená vzhledem k okolnímu prostředí. „Pseudo Grey Body“ pak, že tento druh kavity bere v úvahu vstup difuzního slunečního záření a jednonásobný odraz slunečního záření uvnitř kabiny vozu. Při výpočtu je pak přidána jedna iterace pro výpočet odrazu oproti kavitě typu „Black body“.

Nyní je vhodné definovat vlastnosti okolního prostředí. Hodnoty slunečního záření a poloha slunce přibližně koresponduje s podmínkami slunného letního dne 21.7. ve 13.00 (SELČ) v České republice. Teplota a relativní vlhkost okolního vzduchu jsou voleny jako typické hodnoty horkého letního dne. Reflektivita povrchu země je volena za předpokladu převážně asfaltového parkoviště. Problémem může být hodnota teploty oblohy. Pro její výpočet je použit návod z manuálu programu THESEUS [19]:

Vstupní hodnoty výpočtu jsou: Teplota okolního vzduchu $t_a = 30$ °C

Relativní vlhkost okolního vzduchu $\varphi = 40$ %

Téměř jasné nebe s faktorem oblačnosti $N = 0,05$

Nejprve musíme určit tlak sytých par P_{SPar} , ten určíme podle vzorce:

$$P_{SPar} = \exp\left(11,848 - \frac{3916,43}{230,99 + t_a}\right) \cdot 10^5 \quad (13)$$

$$P_{SPar} = \exp\left(11,848 - \frac{3916,43}{230,99 + 30}\right) \cdot 10^5 = 4250,8 \text{ Pa}$$

Dále určíme okamžitý tlak par ve vzduchu P_{Par} , ten spočítáme podle:

$$P_{Par} = \frac{\varphi}{100} \cdot P_{SPar} \quad (14)$$

$$P_{Par} = \frac{40}{100} \cdot 4250,8 = 1700,3 \text{ Pa}$$

Jako další určíme měrný tepelný tok v případě naprosto jasné oblohy q_0 podle:

$$q_0 = \sigma \cdot T_a^4 \cdot \left(0,790 - 0,174 \cdot 10^{\frac{-0,041 \cdot P_{par}}{100}} \right) \quad (15)$$

Kde: σ je Stefan – Boltzmannova konstanta [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$]
 T_a teplota okolního vzduchu [K]

$$q_0 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (273,15 + 30)^4 \cdot \left(0,790 - 0,174 \cdot 10^{\frac{-0,041 \cdot 1700,3}{100}} \right) = 361,6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Pro výpočet měrného tepelného toku pro zataženou oblohu je nutná teplota rosného bodu t_R :

$$t_R = \frac{241,2 \cdot \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) + \frac{4222,03716 \cdot t_a}{241,2 + t_a}}{17,5043 - \ln\left(\frac{\varphi}{100}\right) - \frac{17,5043 \cdot t_a}{241,2 + t_a}} \quad (16)$$

$$t_R = \frac{241,2 \cdot \ln\left(\frac{40}{100}\right) + \frac{4222,03716 \cdot 30}{241,2 + 30}}{17,5043 - \ln\left(\frac{40}{100}\right) - \frac{17,5043 \cdot 30}{241,2 + 30}} = 14,9 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Měrný tepelný tok pro zataženou oblohu q_1 pak vypočteme podle:

$$q_1 = \sigma \cdot T_R^4 \quad (17)$$

Kde: T_R je teplota rosného bodu [K]

$$q_1 = 5,67 \cdot 10^{-8} \cdot (14,9 + 273,15)^4 = 390,4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Měrný tepelný tok $q_{0,05}$ pro náš případ pak spočítáme podle:

$$q_{0,05} = N \cdot q_1 + (1 - N) \cdot q_0 \quad (18)$$

$$q_{0,05} = 0,05 \cdot 390,4 + (1 - 0,05) \cdot 361,6 = 363,0 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$$

Teplotu oblohy T_{ob} spočítáme podle:

$$T_{ob} = \sqrt[4]{\frac{q_{0,05}}{\sigma}} \quad (19)$$

$$T_{ob} = \sqrt[4]{\frac{363}{5,67 \cdot 10^{-8}}} = 282,9 \text{ K} = \underline{\underline{9,7 \text{ } ^\circ\text{C}}}$$

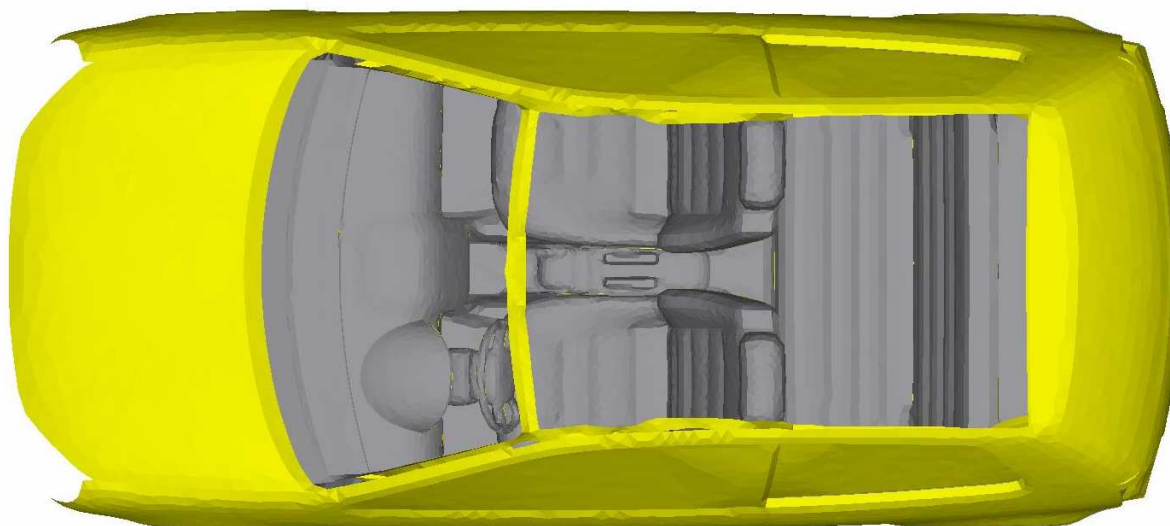
Nyní již můžeme napsat tabulku vlastností okolního prostředí (tab. 6).

Tab. 6: Vlastnosti okolního prostředí

Intenzita přímého slunečního záření	785 W · m ⁻²
Intenzita difuzního slunečního záření	164 W · m ⁻²
Sluneční azimut	180°
Výška slunce nad obzorem	60,4°
Teplota okolního vzduchu	30 °C
Relativní vlhkost okolního vzduchu	40 %
Reflektivita povrchu země	0,15
Teplota oblohy	9,7 °C

6.4 Okrajové podmínky – nastavení pro výpočet konvekce a radiace

Dále pokračujeme přiřazováním jednotlivých částí k okrajovým podmínkám, a proto nastal čas zmínit se o negativní a pozitivní straně stěny. Každá stěna modelu má v programu THESEUS svou pozitivní a negativní stranu, přičemž orientace normály této stěny je ve směru od negativní k pozitivní straně (směr normály je využíván při výpočtech přenosu tepla radiací). Pozitivní strana se zobrazuje jako šedá a negativní pak jako žlutá. Model automobilu je nastaven dle doporučení manuálu tak, že plochy směřující do interiéru vozu jsou pozitivní a plochy směřující z interiéru ven jsou negativní, viz obrázek 27.



Obr. 27: Pozitivní a negativní strany stěn modelu

Nyní již víme, jaký je rozdíl mezi negativní a pozitivní stranou stěny, a proto můžeme začít nastavovat okrajové podmínky jednotlivých částí automobilu. U každé okrajové podmínky nastavujeme počáteční teplotu, způsob výpočtu přenosu tepla konvekcí a způsob výpočtu přenosu tepla radiací a to pro obě strany stěny. Počáteční teploty částí přilehlých k interiéru vozu jsou voleny stejně jako počáteční teplota vnitřního vzduchu 26 °C, u částí které sousedí s okolním prostředím pak je volena počáteční teplota stejná jako teplota okolního vzduchu, tedy 30 °C. Problematictější může být nastavení výpočtu přenosu tepla konvekcí. Ten se samozřejmě řídí již zmíněným Newtonovým ochlazovacím zákonem:

$\dot{q} = \alpha(T_w - T_\infty) [\text{W} \cdot \text{m}^{-2}]$, kdy program zná teplotu povrchu i teplotu okolního média, ale bez dalších vstupních hodnot nedokáže určit součinitel přestupu tepla α . THESEUS umožňuje zadat součinitel přestupu tepla jako vstupní hodnotu. Tuto hodnotu však nemusíme znát. Co ale v případě nucené konvekce můžeme znát, je rychlost proudění média. Když zadáme rychlost proudění $w [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$ jako vstupní hodnotu, program spočítá součinitel přestupu tepla nucené konvekce $\alpha_{nuc} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ podle [19]:

$$\alpha_{nuc} = a_{nuc} + b_{nuc} \cdot w^{c_{nuc}} \quad (20)$$

Kde: konstanty a_{nuc} , b_{nuc} a c_{nuc} jsou automaticky voleny podle rychlosti proudění:

$$w < 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} : a_{nuc} = 6,16, b_{nuc} = 4,18, c_{nuc} = 1$$

$$w > 5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} : a_{nuc} = 0, b_{nuc} = 7,32, c_{nuc} = 0,8$$

V našem případě je touto metodou řešen přenos tepla konvekcí z exteriéru vozu, kde jako médium figuruje vzduch o rychlosti $3,33 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Když se jedná o konvekci přirozenou, rychlost proudění volíme rovnu nule a program pak spočítá součinitel přestupu tepla přirozené konvekce $\alpha_{přř} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}]$ podle [19]:

$$\alpha_{přř} = 2,56 \cdot (T_w - T_\infty)^{\frac{1}{4}} \quad (21)$$

Kde: T_w je teplota povrchu

T_∞ je teplota média

Touto metodou bude řešen přenos tepla konvekcí v interiéru vozu. Přiřazení jednotlivých částí modelu k okrajovým podmínkám, druh výpočtu přenosu tepla konvekcí a nastavení radiace je uvedeno v tabulce 7.

Tab. 7: Okrajové podmínky – nastavení pro výpočet konvekce a radiace

Okrajové podmínky					
Název	Obsažené části	Konvekce pozitivní strany	Konvekce negativní strany	Radiace pozitivní strany	Radiace negativní strany
Vnitřní prostor	26, 37, 39, 40, 41	a	a	1	1
Střecha vnitřní	38	a	a	1	4
Dveře vnitřní pravé	25, 29, 30	a	a	1	2
Dveře vnitřní levé	24, 31, 32	a	a	1	3
Sedadla	33, 35	a	a	1	6
Část pod přepážkou motoru	15	a	b	7	5
Části za přepážkou motoru	17, 36	a	a	1	7
Část zadního sedadla	34	a	a	8	6
Deska nad kufrem	27	a	a	1	8
Kufr vnitřní	16, 18, 28	a	a	8	1
Přepážka	23	a	a	7	9
Kufr vnější	4, 5, 14	a	b	1	5
Zasklení	19, 20, 21, 22	a	b	1	5
Střecha vnější	2	a	b	4	5
Dveře vnější pravé	8, 10	a	b	2	5
Dveře vnější levé	11, 12	a	b	3	5
Vnější části	6, 9, 13, 42	a	b	1	5
Křídlo	3	b	b	5	5
Příd'	1, 7	a	b	9	5

Přenos tepla radiací byl volen mezi danou částí a	
1 - kavitou kabiny	6 - vnitřním vzduchem
2 - kavitou pravých dveří	7 - vzduchem v oblasti přístrojové desky
3 - kavitou levých dveří	8 - vzduchem v oblasti kufru
4 - kavitou střechy	9 - vzduchem v oblasti motoru
5 - okolním prostředím	

Konvekce
a - přirozená
b - nucená

Nyní ještě zbývá nastavit časové intervaly výpočtu. Ty jsou rozděleny na tři úseky, jak popisuje tabulka 8.

Tab. 8: Časové intervaly

Interval [s]	Časový krok [s]
0 - 300	30
300 - 900	60
900 - 3600	180

7 Popis ostatních modelových případů

V předchozí kapitole byl proveden popis a nastavení výchozího modelu (A). Tedy automobilu černé barvy odstaveného na parkovišti za slunného letního dne po dobu 3600 s, bez užití jakýchkoliv metod pasivního chlazení. Nyní budou popsány rozdíly ostatních modelových případů oproti výchozímu.

7.1 Změna laku automobilu, případ B

V tomto modelovém případě je, oproti výchozímu nastavení, změněn lak automobilu z černé barvy na stříbrnou. Absorptivita slunečního záření karoserie je tedy snížena z hodnoty 0,95 na 0,3. Díky tomu lze očekávat snížení teplot exteriéru vozu a z toho vyplývající snížení teplot vnitřního vzduchu a interiéru vozu.

7.2 Izolace střechy, případy C1 a C2

Zde je použita metoda tepelné izolace střechy automobilu polyuretanovou pěnou a to pro dva případy z důvodu možné odlišnosti efektivity metody. V prvním případě jde o izolaci střechy výchozího modelu (C1), v druhém pak o izolaci stříbrně zbarveného automobilu (C2). Tloušťka pěny je volena 0,04 m a teplotní vodivost $\lambda = 0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$. Výsledkem by mělo být snížení teploty interiéru díky snížení přenosu tepla z exteriéru. Méně efektivní může být tato metoda v případě stříbrného vozu, kde lze očekávat nižší teploty exteriéru, než v případě černého vozu.

7.3 Provětrávání vozu, případy D1 a D2

U této metody je provětráván výchozí model automobilu venkovním vzduchem. V jednom případě je objemový tok vzduchu nastaven na $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (D1), v druhém pak na $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (D2). Zde by mělo docházet k výměně ohřátého vnitřního vzduchu za chladnější vzduch venkovní. Výsledkem by tedy mělo být v obou případech ochlazení interiéru vozu. V případě D2 lze pak očekávat větší snížení teplot, než v případě D1.

7.4 Užití selektivního zasklení, případ E

V tomto případě je místo standardního zasklení výchozího modelu použito selektivní zasklení o tloušťce 4,5 mm a vlastnostech podle tabulky 9. Předpokládáme snížení tepelných zisků prostřednictvím procházejícího slunečního záření skrz zasklení vozu a tím i snížení teploty interiéru automobilu.

Tab. 9: Vlastnosti selektivního zasklení

Selektivní zasklení	
Emisivita	0,90
Absorptivita slunečního záření	0,25
Transmisivita slunečního záření	0,45
Reflektivita slunečního záření	0,30

7.5 Kombinace metod pasivního chlazení, případ F

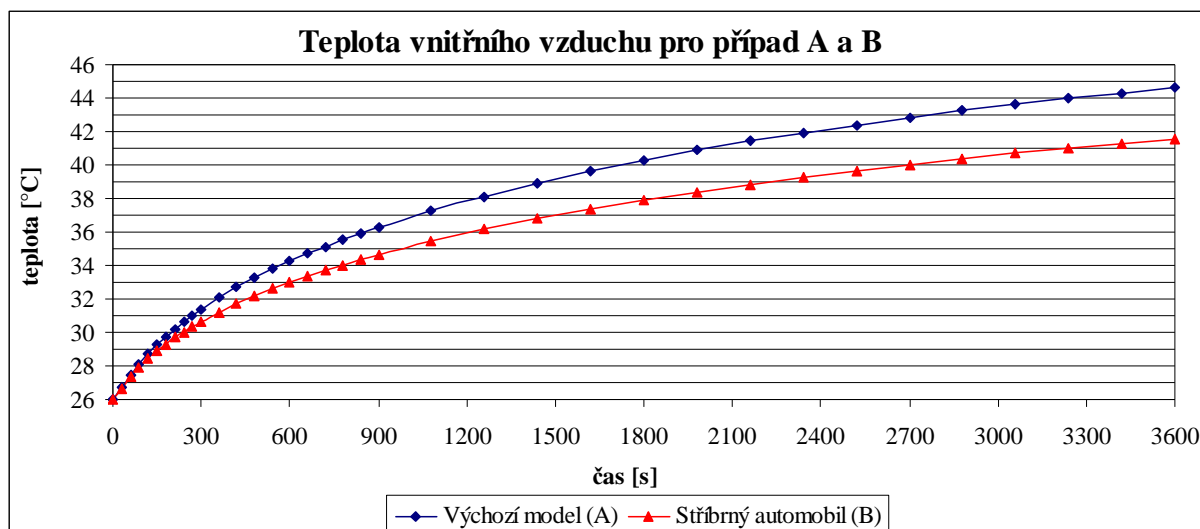
U tohoto modelového případu je užito všech čtyř předešlých metod pasivního chlazení najednou. Tedy změna barvy laku z černé na stříbrnou, izolace střechy automobilu polyuretanovou pěnou o tloušťce 0,04 m a teplotní vodivostí $\lambda = 0,033 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, provětrávání okolním vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a užití selektivního zasklení (tab. 9). Tento modelový případ by měl přinést největší redukci teploty interiéru vozu a tím nejvýznamnější redukci energetických nároků na budoucí klimatizaci.

8 Vyhodnocení výsledků

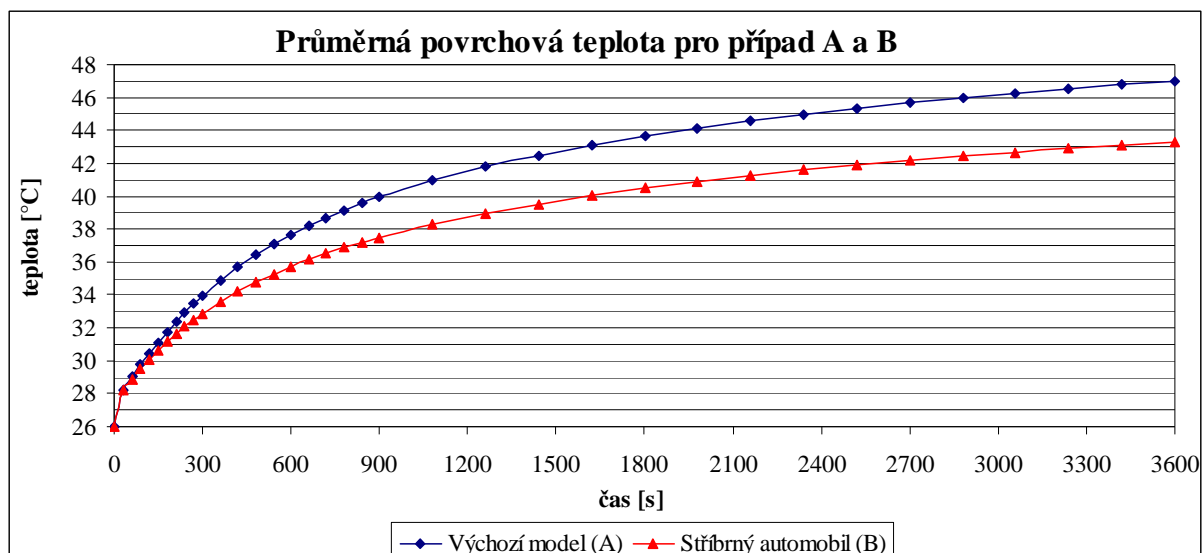
Vyhodnocení a porovnání výsledků bude provedeno především na základě teploty vnitřního vzduchu a střední povrchové teploty vybraných částí interiéru. Jako reprezentativní části, tedy takové, které budou největší měrou ovlivňovat tepelnou pohodu řidiče, jsou zvoleny: čelní sklo, boční přední okna, přední sedadla, přístrojová deska a střecha. Ze středních povrchových teplot vybraných částí budou aritmetickým průměrem vypočteny průměrné střední povrchové teploty a jejich závislost na čase bude sloužit jako jeden z činitelů k porovnávání jednotlivých simulačních případů a metod pasivního chlazení. Jako doplňkové hledisko vyhodnocení efektivnosti jednotlivých metod pasivního chlazení je zvolen tepelný tok slunečním zářením, které dopadá na povrchy interiéru vozu.

8.1 Metoda spočívající ve změně laku automobilu (případ B)

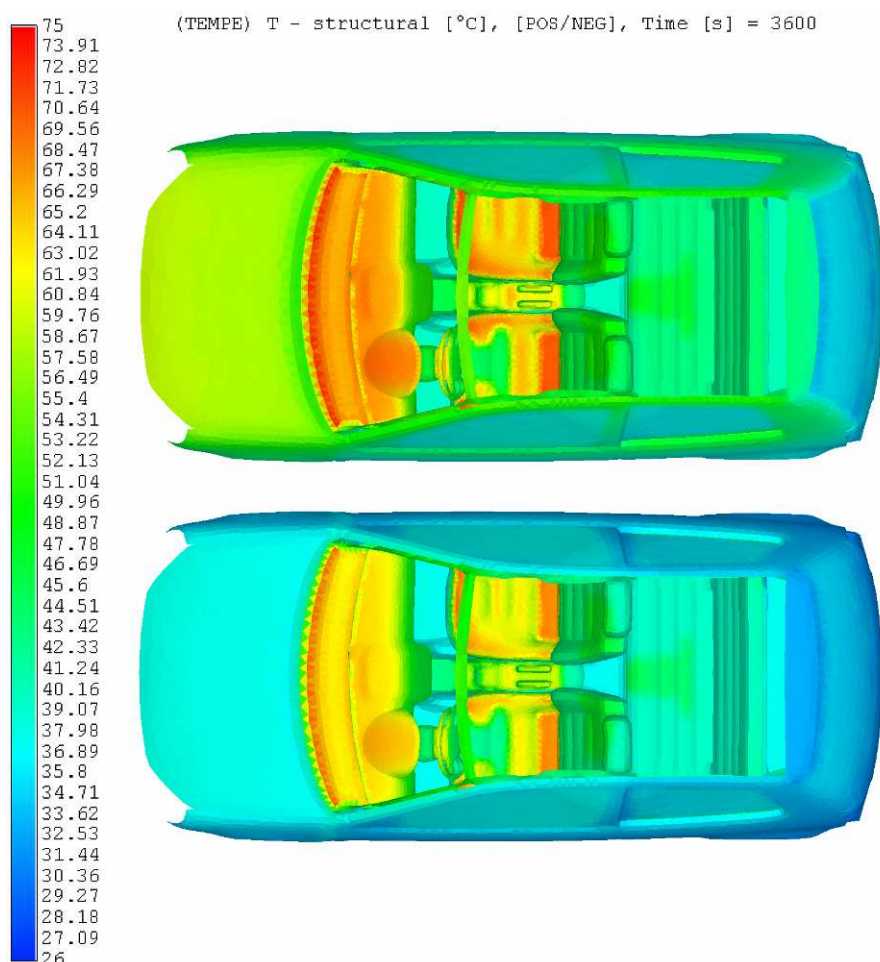
Jako první je vyhodnocena metoda pasivního chlazení změnou laku automobilu z černého na stříbrný. Srovnání teplot vnitřního vzduchu pro případ černého vozu (případ A) a stříbrného vozu (případ B) lze pozorovat na obrázku 28. Srovnání průměrných povrchových teplot je vyobrazeno na obrázku 29 a srovnání teplot interiéru na obrázku 30.



Obr. 28: Vývoj teploty vnitřního vzduchu výchozího modelu a stříbrného vozu



Obr. 29: Průměrná povrchová teplota u výchozího modelu a stříbrného vozu

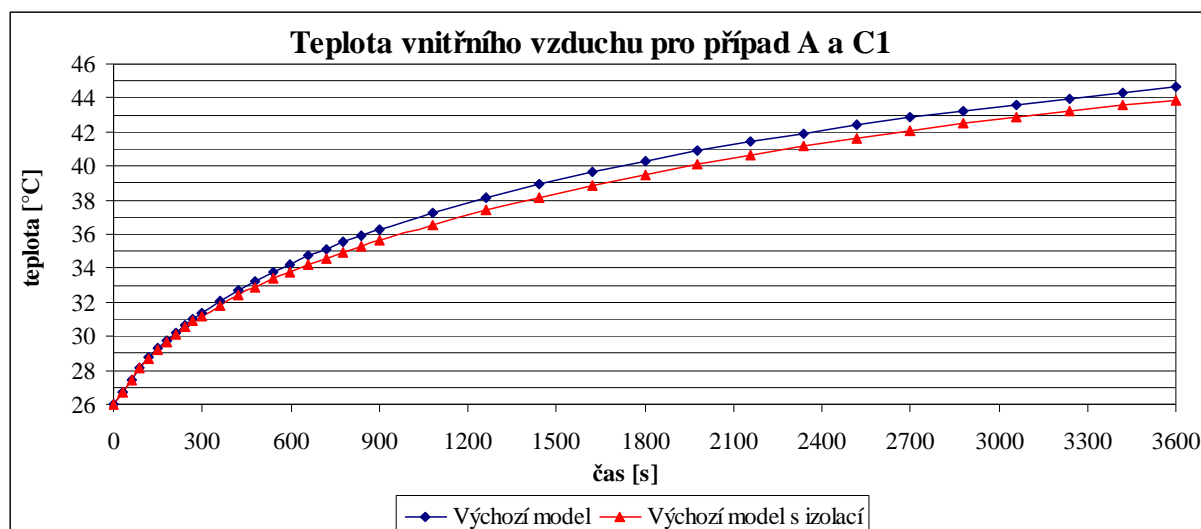


Obr. 30: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a stříbrného vozu (dole)

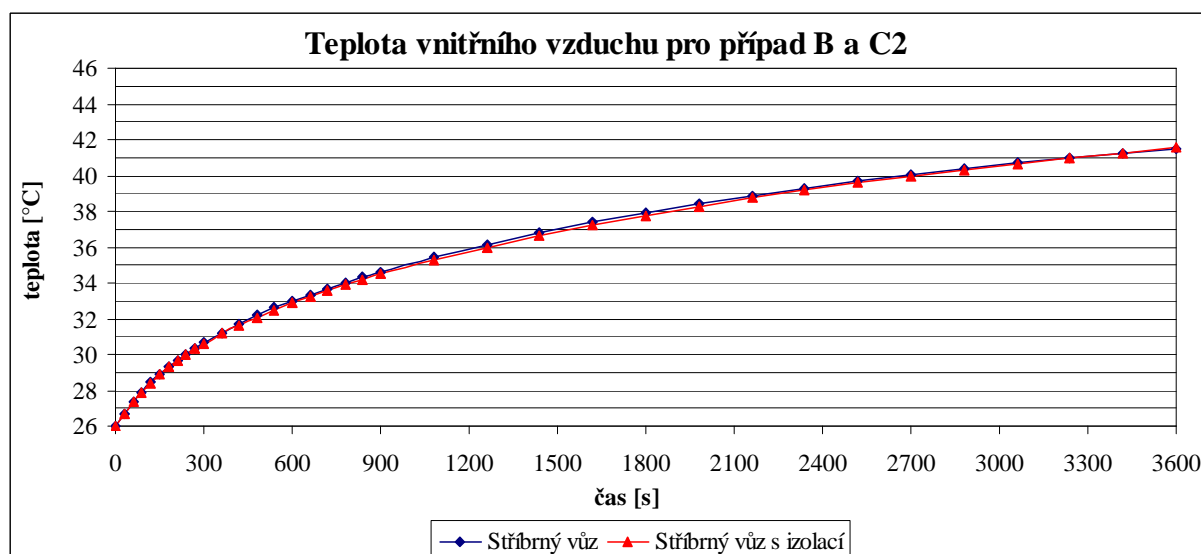
Z obrázků 28, 29 a 30 vyplývá, že volba laku automobilu má výrazný vliv jak na teploty vnitřního vzduchu, tak i na povrchové teploty vybraných částí interiéru vozu. Teploty vzduchu uvnitř kabiny vozu se na konci simulace liší o 3,1 °C. Průměrné povrchové teploty pak přibližně o 3,7 °C.

8.2 Metoda izolace střechy automobilu (případy C1 a C2)

Jako další je vyhodnocena metoda pasivního chlazení izolací střechy automobilu. Ta byla provedena pro dva případy, zejména z důvodu možné odlišnosti účinnosti této metody. Pro případ izolace střechy černě zbarveného automobilu (C1) a pro případ stříbrně zbarveného automobilu (C2).

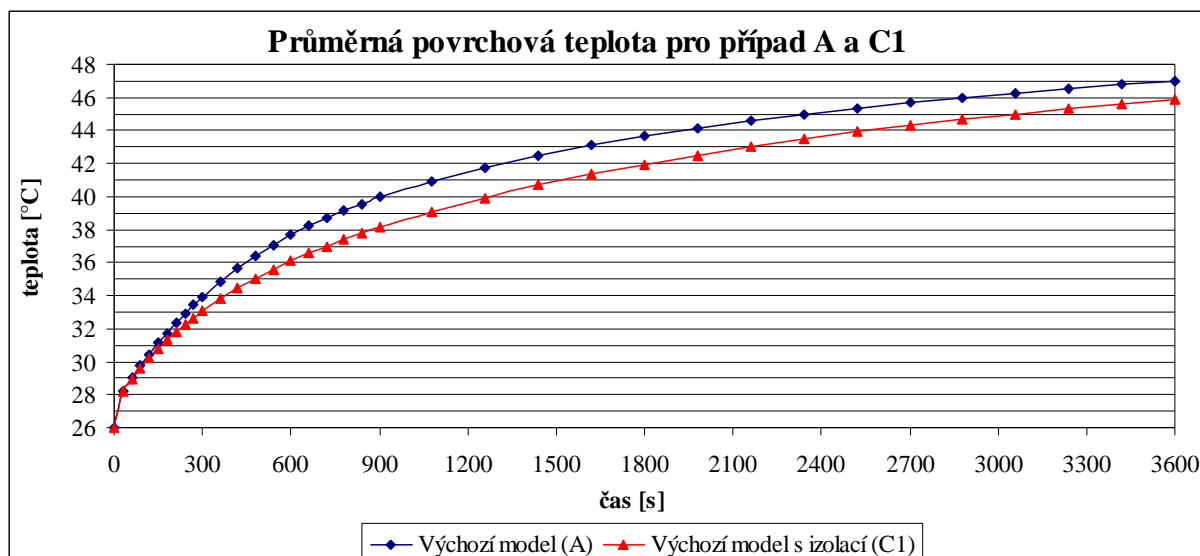


Obr. 31: Vývoj teploty vnitřního vzduchu výchozího modelu a výchozího modelu s izolací

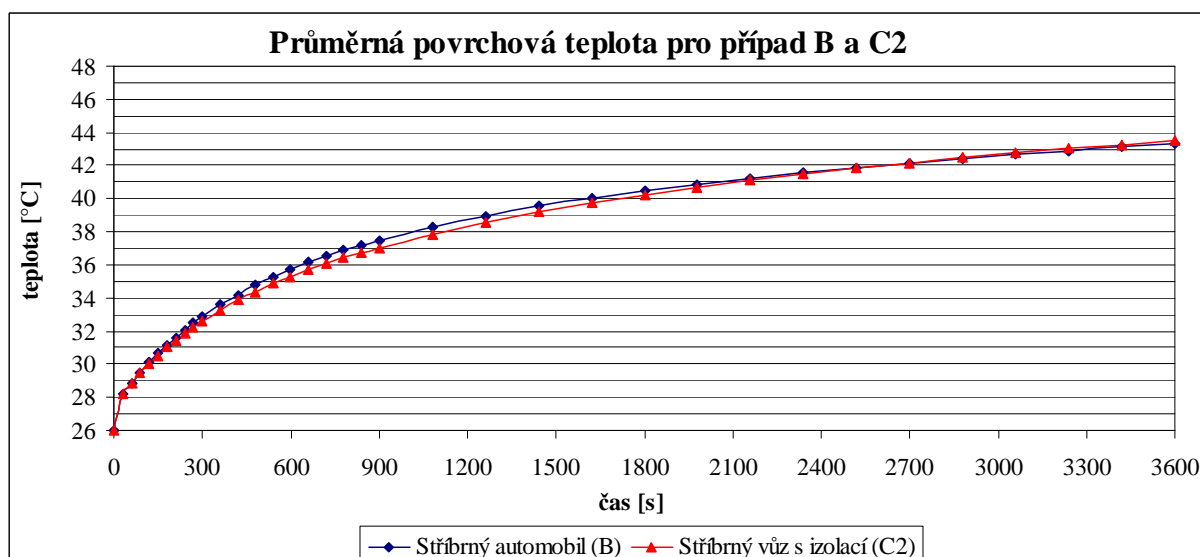


Obr. 32: Vývoj teploty vnitřního vzduchu stříbrného vozu a stříbrného vozu s izolací

Na obrázku 31 lze pozorovat, že izolace střechy výchozího modelu má příznivý vliv na snížení teploty vnitřního vzduchu. Na konci simulace je vnitřní vzduch při užití izolace střechy vozu přibližně o 0,7 °C chladnější, než v případě bez užití izolace. Toto však neplatí pro variantu stříbrného vozu (obr. 32), kde jsou křivky vývoje teploty vnitřního vzduchu v závislosti na čase téměř totožné pro obě varianty. Z tohoto lze usuzovat, že pro tento případ budou podobné i průběhy průměrných povrchových teplot. Ty lze pro jednotlivé případy sledovat na obrázcích 33 a 34.

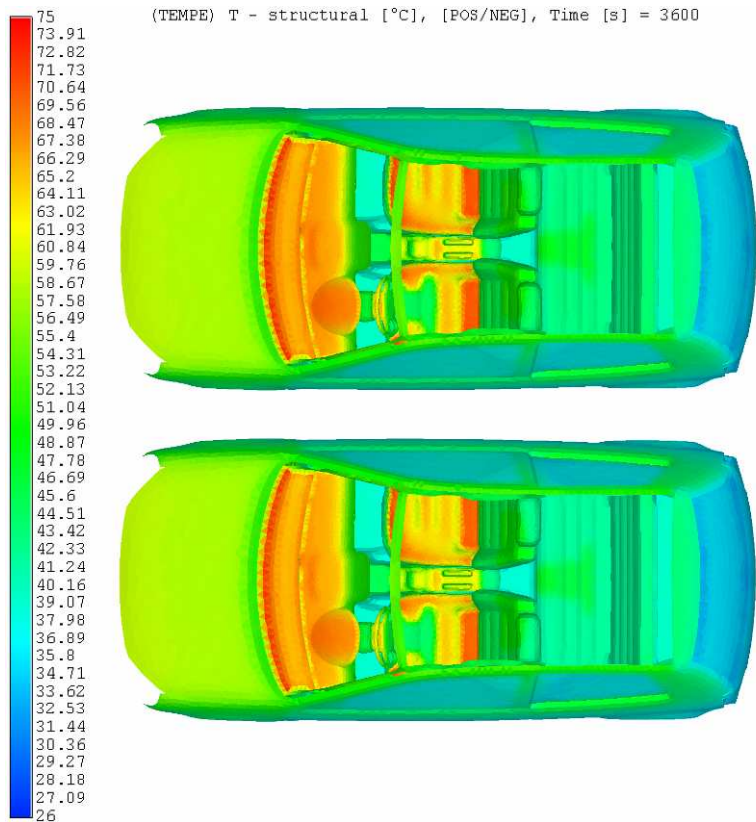


Obr. 33: Průměrná povrchová teplota u výchozího modelu a výchozího modelu s izolací

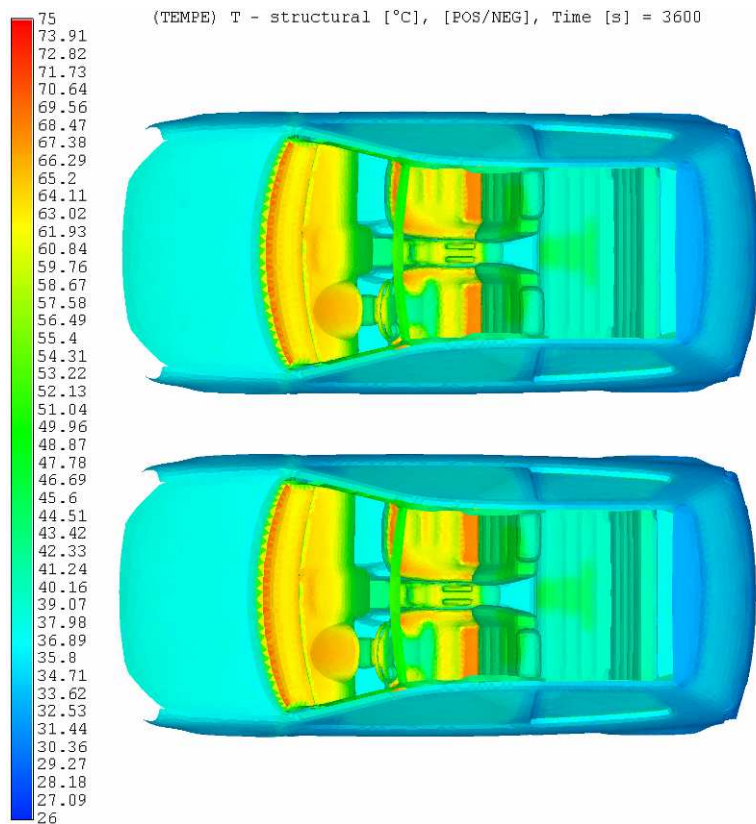


Obr. 34: Průměrná povrchová teplota u stříbrného vozu a stříbrného vozu s izolací

Průměrná povrchová teplota na konci simulace se u případů A a C1 liší o 1,2 °C, u případů B a C2 jsou křivky vývoje průměrné povrchové teploty v závislosti na čase na konci simulace téměř totožné. Použití izolace střechy automobilu tedy má v modelových případech jen malý vliv na snížení teplot uvnitř vozu. Srovnání teplot interiéru je provedeno na obrázku 35 pro případy A a C1 a na obrázku 36 pro případy B a C2.



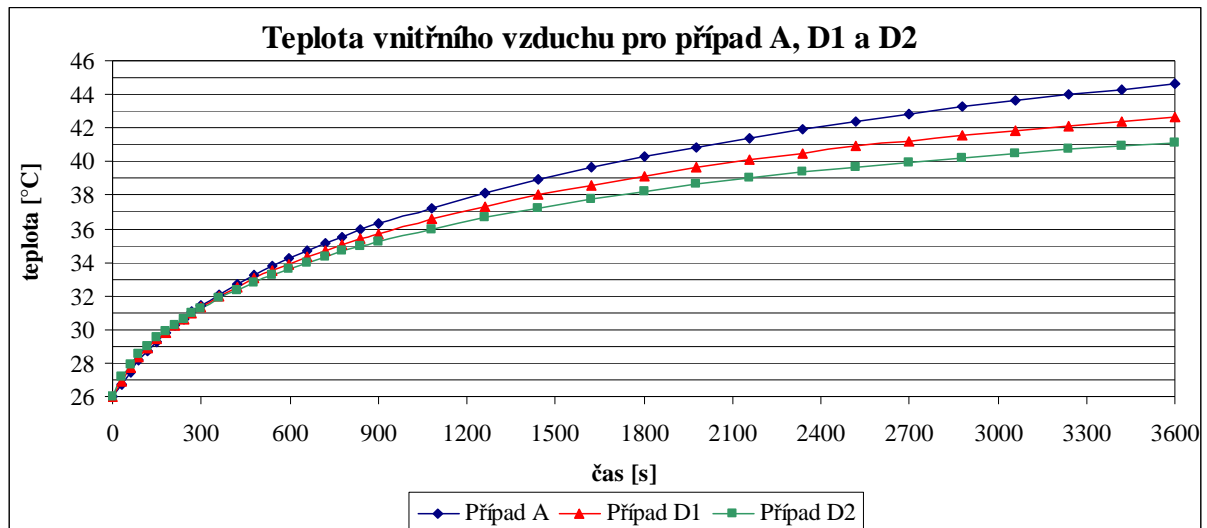
Obr. 35: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a černého izolovaného modelu (dole)



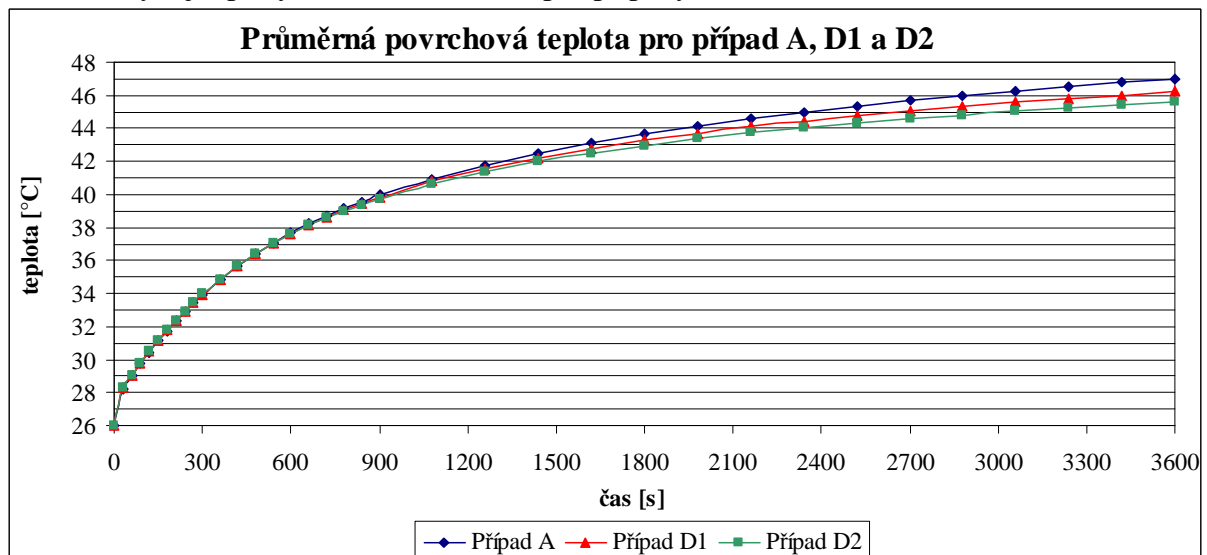
Obr. 36: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace stříbrného modelu (nahore) a stříbrného izolovaného vozu (dole)

8.3 Metoda provětrávání vozu (případy D1 a D2)

Další simulovanou metodou pasivního chlazení automobilu byla metoda provětrávání vozu. Tato byla provedena pro dva případy. V případě D1 byla kabina vozu provětrávána venkovním vzduchem o objemovém toku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. V případě D2 pak vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. Porovnání průběhů teplot vnitřního vzduchu v závislosti na čase pro případy výchozího modelu, provětrávaného výchozího modelu vzduchem o objemovém toku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a provětrávaného výchozího modelu vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ lze sledovat na obrázku 37. Průběh průměrných povrchových teplot pak na obrázku 38.

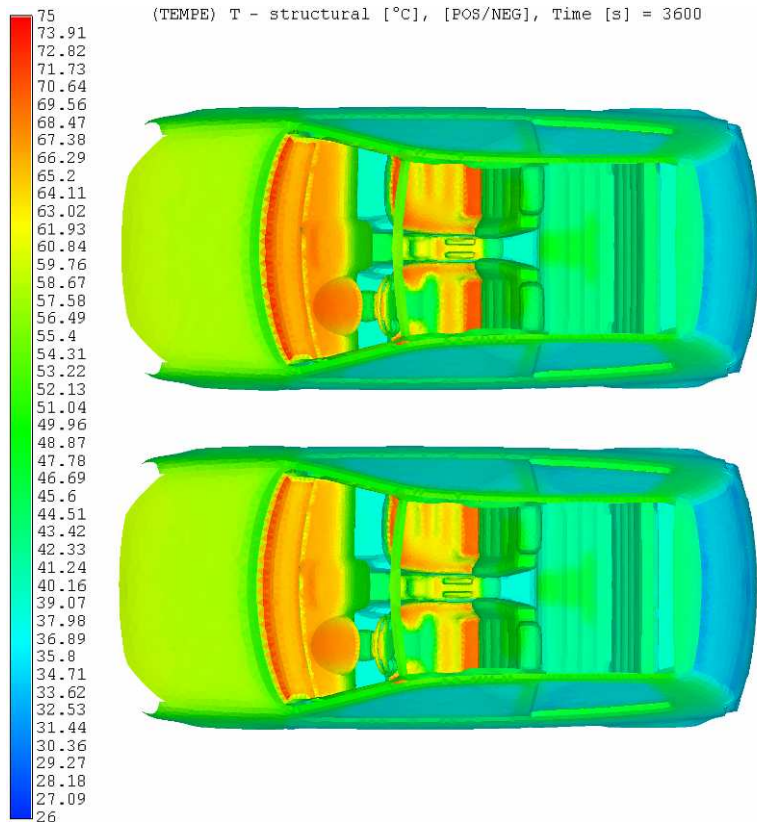


Obr. 37: Vývoj teploty vnitřního vzduchu pro případy A, D1 a D2

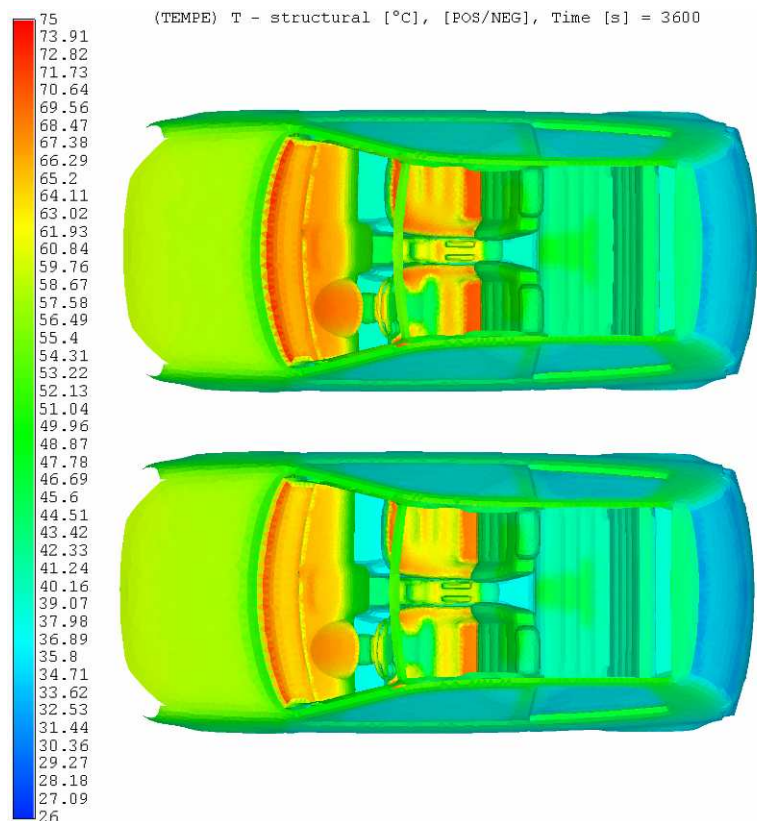


Obr. 38: Průměrná povrchová teplota pro případy A, D1 a D2

Z obrázků 37 a 38 vyplývá, že provětrávání vozu má v simulačním případě značný vliv na teplotu vnitřního vzduchu. V případě D1 došlo k redukci teploty vnitřního vzduchu na konci simulace vzhledem k výchozímu modelu o 2 °C . V případě D2 dokonce o $3,5 \text{ °C}$. U průměrných povrchových teplot nedošlo k tak výrazné redukci. V případě D1 došlo k snížení jen o $0,8 \text{ °C}$ a v případě D2 pak o $1,5 \text{ °C}$. Porovnání teplot interiéru je provedeno na obrázku 39 pro případy A a D1 a na obrázku 40 pro případy A a D2.



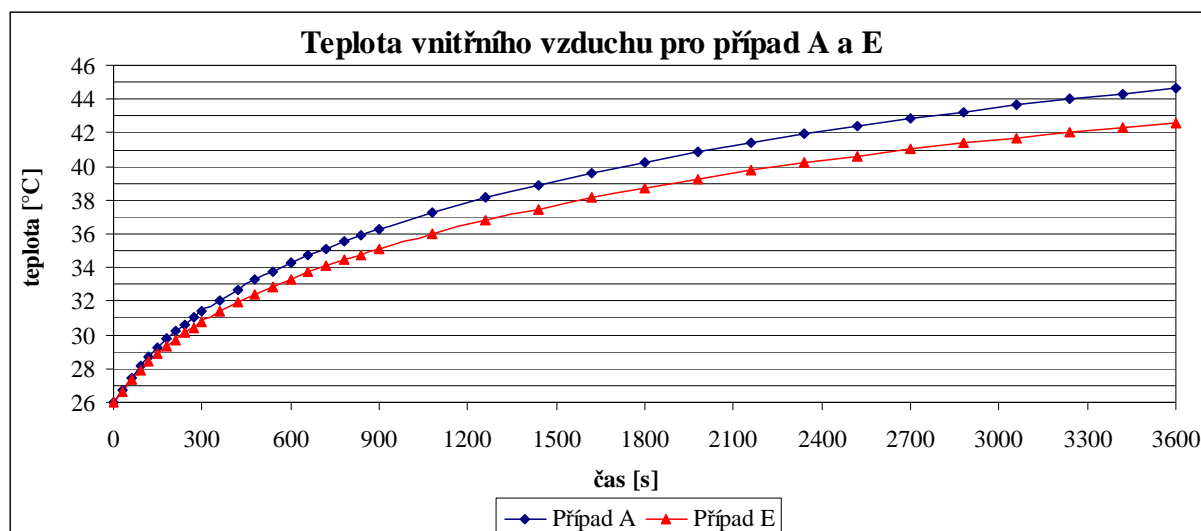
Obr. 39: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a provětrávaného modelu vzduchem o objemovém toku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (dole)



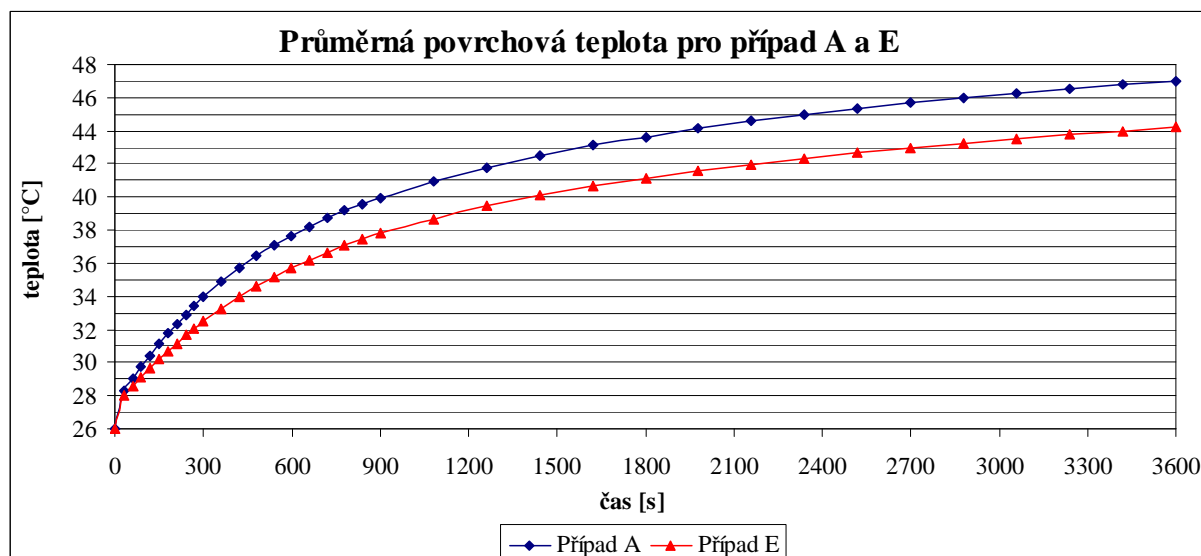
Obr. 40: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a provětrávaného modelu vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (dole)

8.4 Metoda využívající selektivní zasklení (případ E)

Dále je potřeba vyhodnotit metodu pasivního chlazení automobilu užitím selektivního zasklení vozu. Porovnání teplot vnitřního vzduchu pro případ výchozího modelu a pro případ užití selektivního zasklení je provedeno na obrázku 41. Porovnání průměrných povrchových teplot pak na obrázku 42.

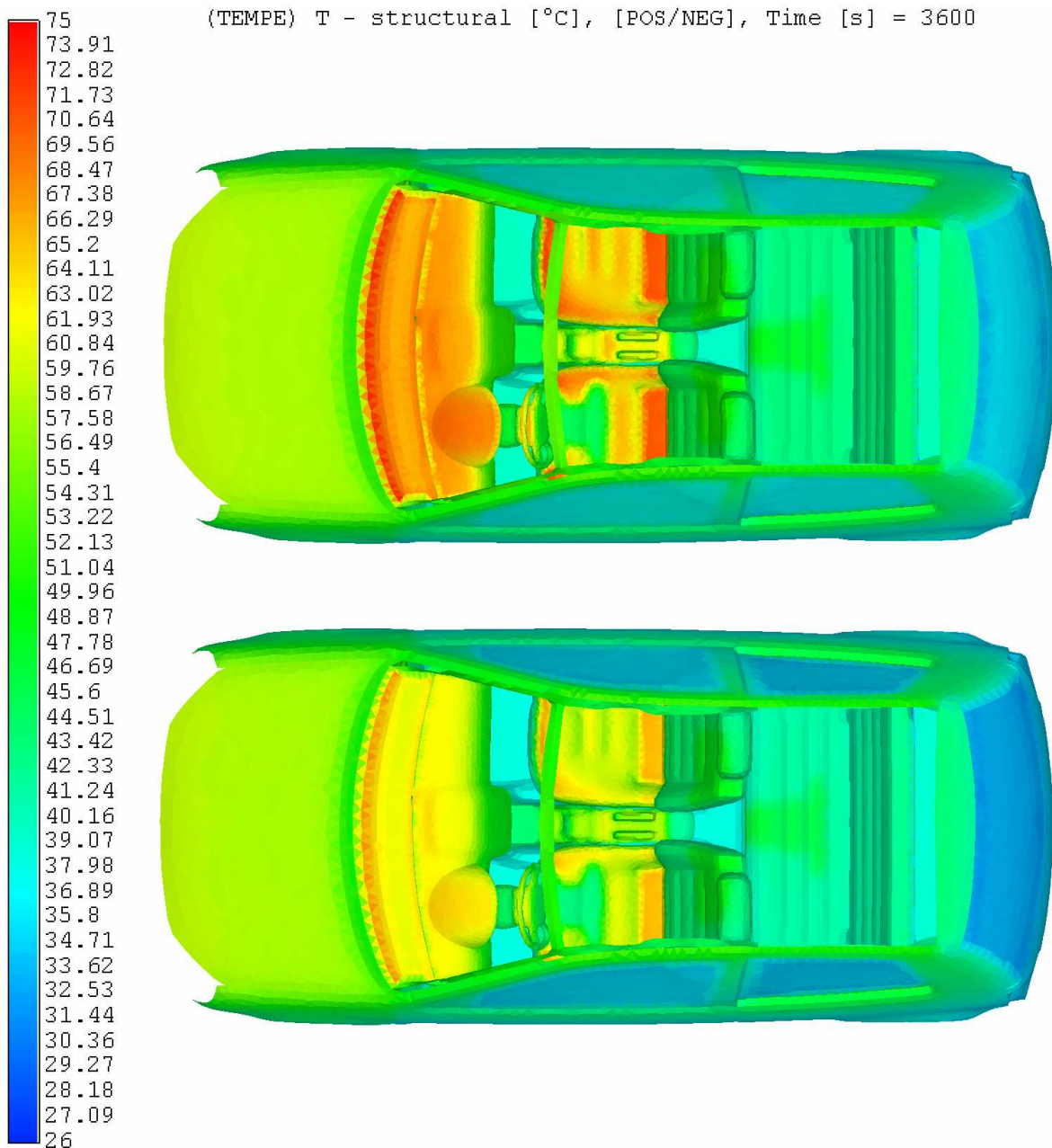


Obr. 41: Vývoj teploty vnitřního vzduchu pro případy A a E



Obr. 42: Průměrná povrchová teplota pro případy A a E

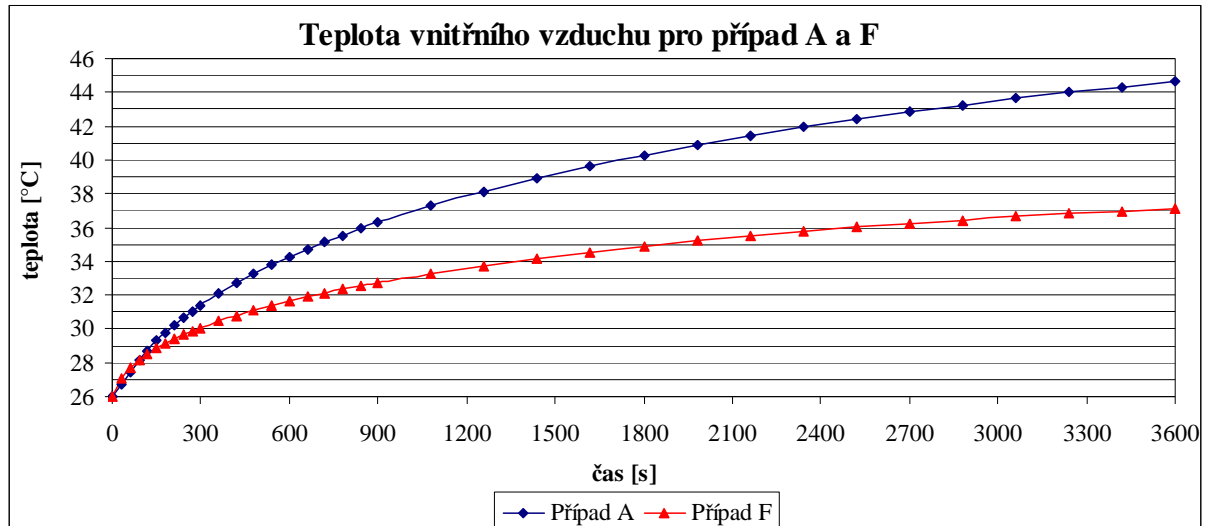
Užitím této metody je vnitřní vzduch na konci simulace v případě E o 2 °C chladnější, než v případě A. U průměrné povrchové teploty došlo k redukci o 2,8 °C. Tato metoda má navíc přidanou hodnotu v tom, že zde dochází k redukci tepelného toku slunečním zářením, které dopadá na plochy interiéru vozu. Jestliže v případech běžného zasklení dopadá dovnitř vozu sluneční záření o tepelném toku 636 W, v případě užití selektivního zasklení to je 553 W. Porovnání teplot interiéru je provedeno na obrázku 43.



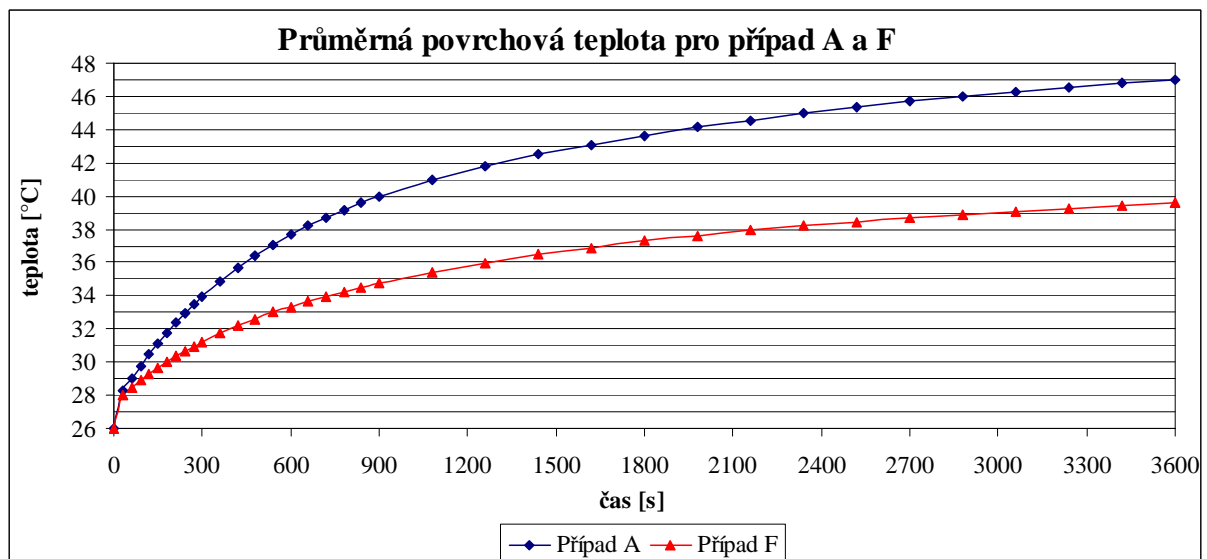
Obr. 43: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a modelu se selektivním zasklením (dole)

8.5 Kombinace metod pasivního chlazení (případ F)

Posledním vyhodnocovaným případem je kombinace všech předešlých metod pasivního chlazení. Porovnání vývoje teplot vnitřního vzduchu pro případ výchozího modelu a pro případ kombinace metod pasivního chlazení je provedeno na obrázku 44, porovnání průměrných povrchových teplot pak na obrázku 45.

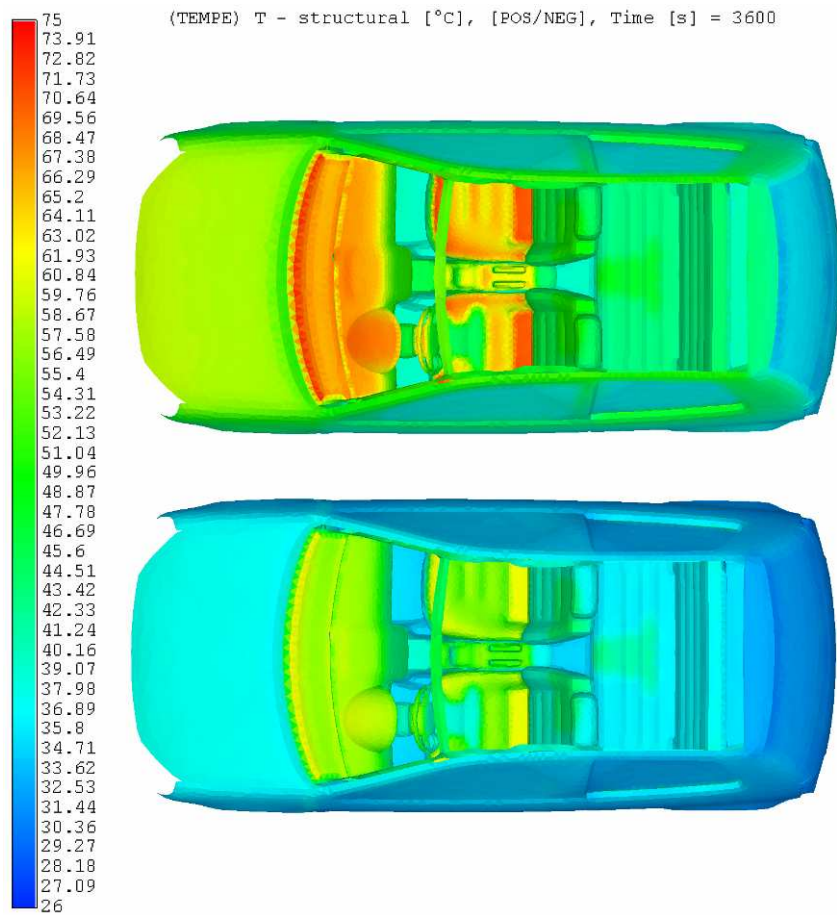


Obr. 44: Vývoj teploty vnitřního vzduchu pro případy A a F



Obr. 45: Průměrná povrchová teplota pro případy A a F

Teplota vzduchu v kabině je na konci simulace nižší oproti výchozímu modelu o 7,5 °C. Průměrná teplota vybraných povrchů je nižší také o 7,5 °C. Z výsledků tedy vyplývá, že kombinace metod pasivního chlazení automobilu má nejvýraznější vliv na redukci teploty uvnitř vozu. Porovnání teplot interiéru je provedeno na obrázku 46.



Obr. 46: Porovnání teplot interiéru vozu na konci simulace výchozího modelu (nahore) a modelu s kombinací předešlých metod pasivního chlazení (dole)

8.6 Závěr vyhodnocení výsledků

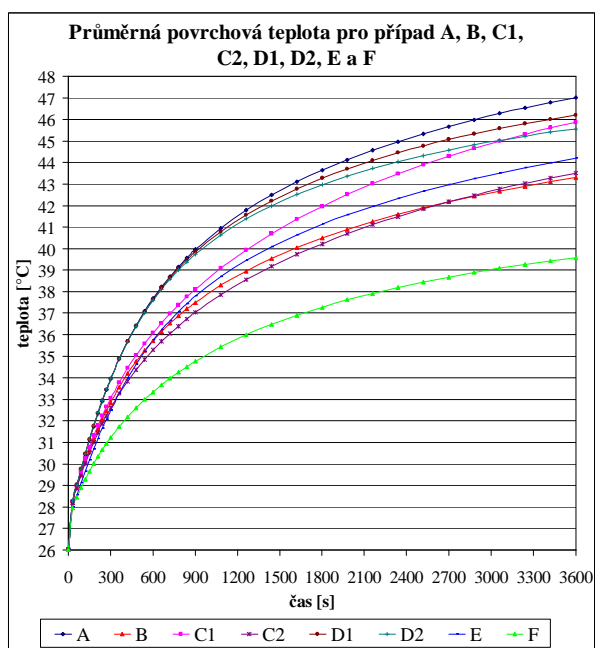
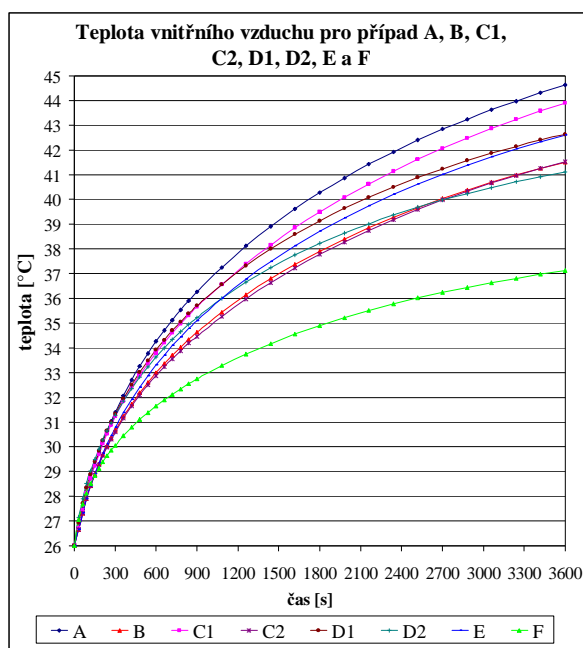
Z výsledků simulací vyplývá, že téměř všechny modelové případy mohou napomoci ke snížení teplot interiéru automobilu vystaveného slunečnímu záření během letních slunných dnů.

Problematický může být případ užití izolace střechy u stříbrného automobilu, kde na konci simulace dochází k mírnému nárůstu průměrné teploty vybraných povrchů i vzduchu uvnitř kabiny, oproti případu stříbrného vozu bez izolace. Výhodou užití izolace však může být redukce tepelných ztrát automobilu v zimních měsících. Tento aspekt může hrát roli především u vytápění budoucích automobilů, kde hrozí nedostatek odpadního tepla či dokonce jeho celková absence v případě elektromobilů.

Jak ukazuje tabulka 10 a obrázky 47 a 48, neefektivnější metodou pasivního chlazení s ohledem na teplotu vnitřního vzduchu je pro daný modelový případ metoda provětrávání vozu okolním vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. K nejvýznamnějšímu snížení průměrné teploty vybraných povrchů pak dochází u metody pasivního chlazení změnou laku automobilu z černého na stříbrný. Z hlediska tepelného toku slunečního záření dopadajícího do interiéru vozu je pak neefektivnější metoda selektivního zasklení automobilu. Jako velice efektivní se jeví kombinace metod pasivního chlazení, kterou lze výrazně snížit teploty uvnitř automobilu, jak lze pozorovat na obrázku 46, a tak i snížit energetickou náročnost následné klimatizace vozu.

Tab. 10: Porovnání teplot vnitřního vzduchu, průměrných povrchových teplot a tepelného toku slunečního záření dopadajícího do interiéru vozu

Modelový případ	Teplota vnitřního vzduchu na konci simulace [°C]	Průměrná teplota vybraných povrchů na konci simulace [°C]	Tepelný tok slunečního záření dopadajícího do interiéru vozu [W]
A	44,62	47,02	636
B	A - 3,11	A - 3,73	636
C1	A - 0,72	A - 1,15	636
C2	B + 0,03	B + 0,20	636
D1	A - 1,98	A - 0,81	636
D2	A - 3,52	A - 1,46	636
E	A - 2,02	A - 2,83	553
F	A - 7,50	A - 7,46	553



Obr. 47: Porovnání teplot vnitřního vzduchu

Obr. 48: Porovnání průměrných povrchových teplot

Závěr

V této práci je pojednáno o základních principech a mechanismech přenosu tepla. Dále je zde probráno téma kvality prostředí v kabinách vozidel a to zejména z hlediska tepelné pohody a čistoty vzduchu v automobilech. Větší část práce je pak věnována větrání a klimatizaci kabin automobilů, přičemž je toto téma rozděleno na části týkající se větrání, vytápění, chlazení a klimatizačních zařízení. Dále jsou v práci rozebrány jednotlivé metody pasivního chlazení a to zejména metoda změny laku automobilu, užití selektivního zasklení, tepelné izolace automobilu, provětrávání vozu a užití tepelných trubic.

Praktická část práce je věnována ověření účinnosti vytipovaných způsobů pasivního chlazení numerickou simulací v programu THESEUS-FE 3.0. Začátek této části se věnuje krátkému seznámení s problematikou numerických simulací a programu THESEUS. Následuje kapitola týkající se popisu simulace a výchozího nastavení. V ní je popsáno rozdělení jednotlivých simulačních případů, rozdělení modelu automobilu na části podle příslušnosti k okrajovým podmínkám a materiálům, tvorba zón a kavit, volba vlastností okolního prostředí spojená s výpočtem teploty oblohy, přiřazení okrajových podmínek a nastavení intervalů výpočtu. Jako modelové metody pasivního chlazení byly zvoleny: metoda změny laku automobilu, tepelná izolace střechy černého a stříbrného vozu, provětrávání venkovním vzduchem o objemovém toku $30 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ a užití selektivního zasklení vozu. Dále jsou v práci popsány rozdíly mezi jednotlivými simulačními případy a výchozím nastavením. Poté jsou provedeny numerické simulace a získané výsledky jednotlivých simulačních případů vyhodnoceny a porovnány s výsledky automobilu bez úprav, případně mezi sebou.

Z výsledků vyplývá, že nejefektivnější metodou pasivního chlazení s ohledem na teplotu vnitřního vzduchu je pro daný modelový případ metoda provětrávání vozu okolním vzduchem o objemovém toku $60 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$. K nejvýznamnějšímu snížení průměrné teploty vybraných povrchů dochází u metody pasivního chlazení změnou laku automobilu z černého na stříbrný. Z hlediska tepelného toku slunečního záření dopadajícího do interiéru vozu je nejefektivnější metoda selektivního zasklení automobilu. Nejméně efektivní metodou se podle výsledků stala metoda izolace střechy automobilu, nicméně ta může být prospěšná v zimním období, kdy díky ní dojde k redukci tepelných ztrát vozu. Tento fakt může hrát roli především při vytápění budoucích automobilů, kde hrozí nedostatek odpadního tepla či jeho celková absence v případě elektromobilů. Jako velice efektivní se ukázala kombinace všech modelových metod pasivního chlazení, kdy došlo k výraznému snížení teplot uvnitř kabiny automobilu. Kombinací uvedených metod lze tedy docílit výrazného snížení energetické náročnosti následné klimatizace vozu, snížení spotřeby paliva a s tím spojených nákladů na klimatizaci. Dalším pozitivním jevem užití kombinace metod pasivního chlazení může být také snížení rychlosti stárnutí materiálů použitých v interiéru vozu.

Použitá literatura

- [1] PAVELEK, M. a kol. *Termomechanika*. 3. vyd. Brno: Cerm, 2003. ISBN 80-214-2409-5
- [2] *Termovize* [online]. 2008 [cit. 2010-03-26]. Teorie termovizního měření. Dostupné z WWW: <<http://www.termovize.com/princip-termovize/>>.
- [3] JÍCHA, M. *Přenos tepla a látky*. Brno: Cerm, 2001. 149 s. ISBN 80-214-2029-4.
- [4] *Zpravodaj pro měření a regulaci : Soubor technických informací poskytovaných firmou OMEGA číslo 1*. [s.l.] : [s.n.], [200-?]. 83 s.
- [5] ČSN EN ISO 7730 Ergonomie tepelného prostředí – Analytické stanovení a interpretace tepelného komfortu pomocí výpočtu ukazatelů PMV a PPD a kritéria místního komfortu. vyd. Praha: Český normalizační institut, říjen 2006
- [6] ČSN EN ISO 14505-2 Ergonomie tepelného prostředí – Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech – Část 2: Stanovení ekvivalentní teploty. vyd. Praha: Český normalizační institut srpen 2007
- [7] NILSSON, H. *Comfort Climate Evaluation with Thermal Manikin Methods and Computer Simulation Models*. Stockholm, 2004. 202 s. Disertační práce. University of Gävle and Royal Institute of Technology, Department of Civil and Architectural Engineering. ISBN 91-7045-703-4.
- [8] GSCHEIDLE, R. a kol. *Příručka pro automechanika*. 2. vyd. Praha: Sobotáles, 2002. 640 s. ISBN 80-85920-83-2
- [9] DALE, S. *Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2006. 432 s. ISBN 0-7506-6955-1
- [10] ČUMPELÍK, J. Praktická dílna : Systémy komfortní elektroniky I. *AutoEXPERT*. 2005, 3/2005, s. 1-16.
- [11] CHYSKÝ, J., HEMZAL, K. a kol. *Větrání a klimatizace*. Brno : Bolit, 1993. 560 s. ISBN 80-901574-0-8.
- [12] STUBBLEFIELD, M., HAYNES, J. *The Haynes Automotive Heating & Air Conditioning Systems Manual*. Somerset: Haynes Publishing Group, 2000. 254 s. ISBN 1-56392-381-5.
- [13] DOYLE, R. *Paint and Coatings Industry* [online]. 1. 5. 2009 [cit. 2010-04-11]. Understanding Cool Coatings for Automotive. Dostupné z WWW: <http://www.pcimag.com/Articles/Feature_Article/BNP_GUID_9-5-2006_A_10000000000000576850>.
- [14] BOHM, M. a kol. *Thermal effect of glazing in driver's cabs. JTI – report 305*. Uppsala, 2002. ISSN 1401-4963

- [15] RUGH, J., FARRINGTON, R. *Vehicle Ancillary Load Reduction Project Close-Out Report. Technical Report NREL/TP-540-42454*. Colorado, 2008.
- [16] HUANG, K. a kol. *Intelligent solar-powered automobile-ventilation system. Applied Energy*. Oxford: Elsevier, 2005. ISSN 0306-2619
- [17] *Audi.cz* [online]. 2010 [cit. 2010-04-22]. Konfigurator Audi. Dostupné z WWW: <http://app.audi.cz/konfigurator/?act=vybava_detail&vybava_id=902086&w=460&h=260&v_allitems=undefined&v_serie=undefined&v_extras=undefined&v_accessories=undefined&v_tech=undefined&v_extras_images=undefined&v_basics_images=undefined&v_accessories_images=undefined&v_extras_details=undefined&v_basics_details=undefined&v_accessories_details=undefined>.
- [18] MIDWEST RESEARCH INSTITUTE. *Passive cooling system for a vehicle*. Původce vynálezu: Terry HENDRICKS, Thomas THOENSEN. Spojené státy americké. 2005. Patentový spis 6964294 B2.
- [19] *THESEUS-FE : Theory Manual*. Version 3.0. Německo : [s.n.], 2009. 132 s.
- [20] *NetCarShow.com* [online]. 2006 [cit. 2010-03-26]. Volkswagen Polo BlueMotion. Dostupné z WWW: <http://custom.netcarshow.com/Volkswagen/2006-Polo_BlueMotion/01.htm>

Seznam použitých symbolů

Značka	Význam	Jednotka
S	Plocha	m^2
T_w	Povrchová teplota	K
T_∞	Teplota v dostatečné vzdálenosti od povrchu	K
T_a	Teplota okolního vzduchu	K
T_R	Teplota rosného bodu	K
T_{ob}	Teplota oblohy	K
t_a	Teplota okolního vzduchu	$^\circ C$
t_w	Povrchová teplota	$^\circ C$
t_R	Teplota rosného bodu	$^\circ C$
\bar{t}_r	Střední radiační teplota	$^\circ C$
t_o	Operativní teplota	$^\circ C$
t_{eq}	Ekvivalentní teplota	$^\circ C$
\dot{Q}	Tepelný tok	W
\dot{q}	Měrný tepelný tok	$W \cdot m^{-2}$
λ	Tepelná vodivost	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
α	Součinitel přestupu tepla konvekcí	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$
σ	Stefan – Boltzmannova konstanta	$W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$
a	Absorptivita	-
ε	Emisivita	-
ρ	Reflektivita	-
τ	Transmisivita	-
φ	Relativní vlhkost vzduchu	-
M	Energetický výdej člověka	$W \cdot m^{-2}$
R_{cl}	Tepelný odpor oděvu	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
I_{cl}	Tepelný odpor oděvu	$m^2 \cdot K \cdot W^{-1}$
T_u	Místní intenzita turbulence	%
P_{SPar}	Tlak syté vodní páry	Pa
P_{Par}	Parciální tlak vodní páry	Pa
w	Rychlost proudění vzduchu	$m \cdot s^{-1}$
PMV	Předpověď středního tepelného pocitu	-
PPD	Předpověď procentuálního podílu nespokojených	%
DR	Stupeň obtěžování průvanem	%

Seznam příloh

Příloha 1 DVD s textem práce a modely automobilu (ve formátu pro program THESEUS-FE 3.0)