

# **ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

## **FAKULTA STROJNÍ**



## **TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE**

Ing. Lukáš Málek

STANOVENÍ METODIKY SYSTÉMOVÉ INTEGRACE KOMPONENT  
KOLEJOVÉHO VOZIDLA K DOCÍLENÍ OPTIMÁLNÍHO PROSTŘEDÍ  
V JEHO INTERIÉRU



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel

TEZE DISERTAČNÍ PRÁCE

Stanovení metodiky systémové integrace  
komponent kolejového vozidla k docílení  
optimálního prostředí v jeho interiéru.

*Ing. Lukáš Málek*

Studijní obor: Dopravní stroje a inženýrství

Školitel: *prof. Ing. Ladislav Rus, DrSc.*

Teze disertace k získání akademického titulu "doktor", ve zkratce "Ph.D."

Praha, leden 2021

Název anglicky:

Setting of the method of railway vehicle components system integration to achieve the optimal environment in the vehicles interior

Disertační práce byla vypracována v kombinované formě doktorského studia na Ústavu automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel Fakulty strojní ČVUT v Praze.

Disertant: Ing. Lukáš Málek

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

Školitel: prof. Ing. Ladislav Rus, DrSc.

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, 166 07 Praha 6 - Dejvice

Oponenti:

Doc. Ing. Petr Heller, CSc.

Katedra konstruování strojů, Fakulta strojní,  
Západočeská univerzita v Plzni  
Univerzitní 22, 301 00 Plzeň  
Telefon: +420 377 638 720  
Email: pheller@rti.zcu.cz

Doc. Ing. Josef Kolář, CSc.

Ústav automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel,  
Fakulta strojní ČVUT v Praze  
Technická 4, 166 07 Praha 6 – Dejvice  
Telefon: +420 224 352 493  
Email: josef.kolar@fs.cvut.cz

Doc. Ing. Arch. Patrik Kotas

Atelier designu a architektury  
Janáčkovo nábřeží 85/5, Praha 5  
Telefon: +420 224 942 588  
Email: atelier@patrikkotas.com

Teze byly rozeslány dne: .....

Obhajoba disertace se koná dne ..... v ..... hod.  
v zasedací místnosti č. .... Fakulty strojní ČVUT v Praze, Technická 4,  
Praha 6, před komisí pro obhajobu disertační práce ve studijním oboru  
Dopravní stroje a inženýrství.

S disertací je možno se seznámit na oddělení vědy a výzkumu Fakulty strojní  
ČVUT v Praze, Technická 4, Praha 6.

prof. Ing. Bohumil Culek, CSc.

Předseda oborové rady oboru Dopravní stroje a inženýrství

Univerzita Pardubice, Dopravní fakulta Jana Pernera, Studentská 95, 53210  
Pardubice

Obsah:

1.	SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY .....	6
2.	CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE .....	7
3.	METODY A NÁSTROJE POUŽITÉ PRO ZPRACOVÁNÍ .....	8
4.	VÝSLEDKY TEORETICKÉ ČÁSTI .....	9
5.	VÝSLEDKY PRAKTICKÉ ČÁSTI .....	23
6.	ZÁVĚR .....	32
7.	PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTACE .....	34
8.	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZÍCH .....	35
9.	OHLASY A RECENZE .....	37
10.	ANOTACE .....	38

## **1. SOUČASNÝ STAV PROBLEMATIKY**

Metoda s cílem systémově navrhnout optimální prostředí interiéru kolejového vozidla z pohledu hluku, vibrací, světla a tepla doposud nebyla publikována.

Návrh kolejového vozidla znamená respektovat 4 základní pilíře:

- Bezpečnost
- Lidský faktor
- Fyzikální zákony
- Udržitelné technologie provozu

Systémový návrh vnitřního prostředí interiéru kolejového vozidla představuje plnění řady důležitých norem a nařízení.

Systémově navrhnout kolejové vozidlo je velmi komplexní problematika zastřešující řadu expertíz a vědních oblastí.

Metody pro hodnocení kvality hluku, vibrací, intenzity osvětlení a tepelného komfortu se v návrhu vozidla se vzájemně liší.

Technické řešení vozidla zajišťují specializované skupiny odborníků a výrobce kolejových vozidel je odpovědný za kvalitu zpracování svého produktu.

Trend ergonomie cestovního prostředí v návrhu kolejových vozidlech získává na popularitě a stává se samostatným průřezovým tématem.

Dostupné metody hodnocení cestovního, akustického, tepelného a světelného pohodlí jsou mnohdy zastaralé, a ne vždy je znám jejich původ.

Při homologaci vozidla je nutné dostatečně podložit vhodnost a udržitelnost koncepce návrhu vozidla po celý její životní cyklus.

Predikční metody komfortního prostředí koncepce návrhu vozidla nejsou zcela běžné, nebo v některých oblastech doslova chybí.

## 2. CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Globální cíl této práce je navrhnout metodiku k hodnocení interiéru vozidla s ohledem na cestovní pohodlí cestujících. Návrh metodiky zahrnuje hlavní vlivy pohodlí – hluk, vibrace, intenzita osvětlení a teplo. Navržená metodika musí vést k porozumění návrhu kolejového vozidla již ve fázi jeho vývoje a pochopení jeho vztahu k lidskému faktoru, musí být aplikovatelná v jakémkoliv grafickém a matematickém řešiči a musí vést k optimalizaci systémových komponent návrhu kolejového vozidla.

Z výsledků kritické rešerše disertační práce vyplynuly následující konkrétní cíle potřebné k návrhu metodiky.

Cílem je:

- Najít řešení systémového návrhu vnitřního prostředí kolejového vozidla prostřednictvím metodiky, díky níž je možné hodnotit různé vlivy prostředí, jako je hluk, vibrace, světlo a teplo, ve vztahu k vnímání člověka.
- Sestavit komplexní model prostředí vozidla, který simuluje podmínky cestujících v přepravním procesu tak, aby se dal model matematicky a graficky vyjádřit a jeho výsledkem je kvalitativně-quantitativní pochopení modelové situace.
- Popsat matematický model pomocí parametrů – intenzita, frekvence, čas, vzdálenost a orientace v prostoru tak, aby nejlépe vystihovaly jízdní situaci cestujících v přepravním procesu.
- Vyjádřit interakce studovaných vlivů (hluk, vibrace, světlo, teplo) jako přenosové funkce, které budou popisovat vztah mezi zdrojem, prostředím vozidla a pozorovatelem cestujícím v přepravním procesu.
- Hodnotit časové průběhy jednotlivých vlivů prostředí (hluk, vibrace, světlo, teplo) a jejich efekt na cestujících v přepravním procesu.
- Aplikovat logaritmické funkce Weber-Fechnerova zákona a hodnotit vlivy prostředí (hluk, vibrace, světlo, teplo) ve vztahu k hygienickým, fyziologickým a psychologickým aspektům cestujících v přepravním procesu.
- Stanovit rozhodovací kritéria, která pomůžou optimalizačnímu procesu systémových změn návrhu kolejového vozidla a která budou vypovídat o kvalitě prostředí v místě cestujících v přepravním procesu.

### **3. METODY A NÁSTROJE POUŽITÉ PRO ZPRACOVÁNÍ**

Pro dosažení cílů disertační práce a pro sestavení metodiky systémové integrace komponent k docílení optimálního prostředí v jeho interiéru byly použity:

#### Metody:

- a) Metoda informačního managementu pomocí Ishikavových diagramů, viz [18]
- b) Weber-Fechnerův zákon [14], Stevensův zákon výkonu [15]
- c) Metoda Path tracing [17], [16]

#### Nástroje (software):

- a) Siemens PLM Jack&Jill
- b) PTC Creo Parametric a PTC Creo View
- c) Dassault Systems Simpack Academy
- d) Adobe Audition CS3, Photoshop CS3
- e) Autodesk Sktetchbook
- f) MS Excel

#### Nástroje (hardware):

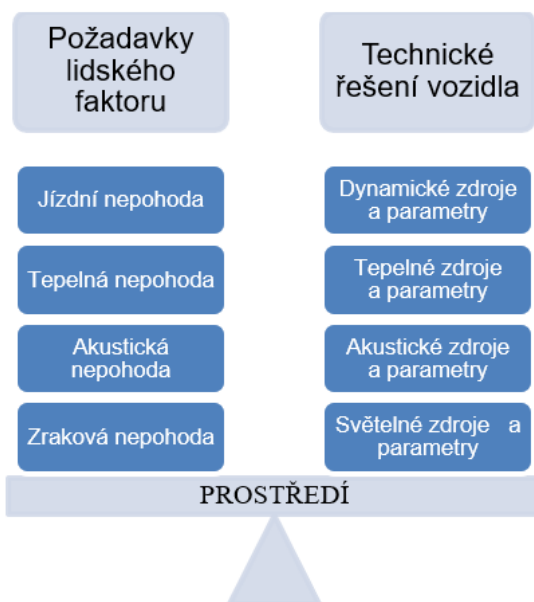
- a) Kalkulačka a PC
- b) Fotoaparát Sony ILCE-5000L/BCEC při nastavení – ISO 2000, EXP = 1/200 s, f = 5,6
- c) Multifunkční měřič prostředí 4v1 DT-8820
- d) Profesionální infračervený teploměr DT-8862
- e) Miniaturní anemometr DT-82
- f) VOLTcraft DL-131G datalogger zrychlení



#### 4. VÝSLEDKY TEORETICKÉ ČÁSTI

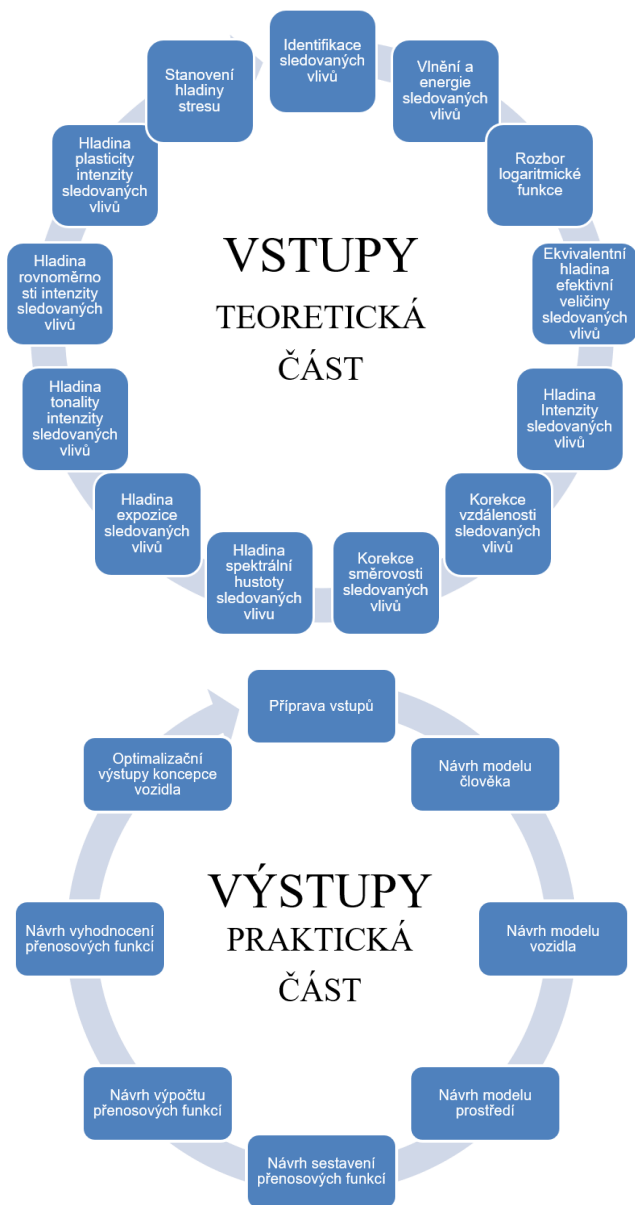
##### Metodika a její proces:

Obrázek 1 naznačuje výsledek studie a popisuje princip hodnocení kvality návrhu vnitřního prostoru vozidla. Požadavky lidského faktoru, reprezentovány fyziologickými, hygienickými a komfortními limity musí být v rovnováze s energetickými účinky prostředí, které jsou do určité míry kontrolovány parametry vozidla.



Obrázek 1 - Princip hodnocení kvality, autor

Schématické znázornění metodiky, viz následující Obrázek 2, vyjadřuje iterační proces optimalizace. Následující kapitoly praktické části odpovídají jednotlivým fázím optimalizačního procesu, který lze znázornit jako kruhový proces, který je potřeba opakovat a revidovat pokaždé, dojde-li k úpravě jakéhokoliv parametru v rámci optimalizačního kolečka.

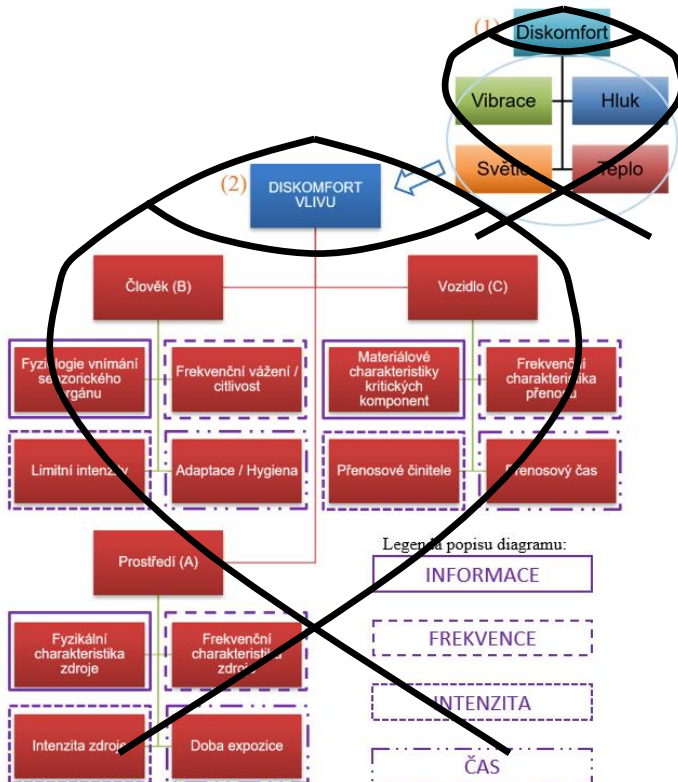


**Obrázek 2 - Vstupy a výstupy disertační práce – návrh sestavení metodiky, autor**

**Identifikace sledovaných vlivů:**

Výsledky studie jednotného hodnocení cestovní pohody [5], str. 254 až 255, přinesly pojmenování problému jako „diskomfort“, neboť pojmenováním problému „komfort“ může být zavádějící a vést k jinému cíli, než je systémová optimalizace kritických komponentů vozidla.

Následující obrázek zobrazuje představu využití tzv. diagramů „rybí kosti“, kdy určitý problém – diskomfort – představuje hlavu ryby a jednotlivé kosti představují možné příčiny diskomfortu.



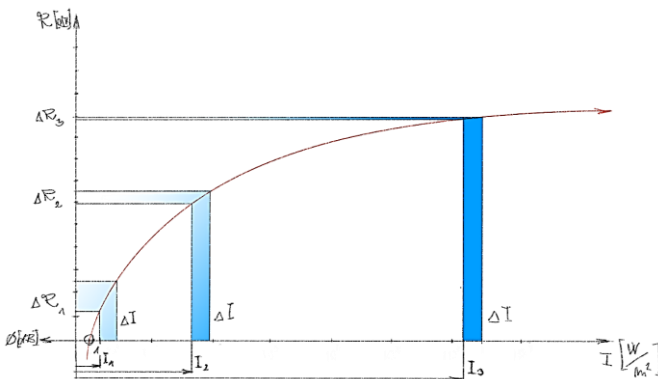
**Obrázek 3 - Informační management metodiky – Aplikace metody rybí kosti. (1) Základní schéma pro studované vlivy disertační práce. (2) Schéma konkrétního studovaného vlivu diskomfortu (hluk, vibrace, světlo, teplo).**

### Aplikace logaritmických funkcí a jejich rozbor:

Byly publikovány výsledky [1], str. 34, které naznačující popis vnitřního prostředí vozidla pomocí logaritmických funkcí, neboť lépe vystihují subjektivní vnímání objektivních efektivních veličin prostředí MAG. Jednotlivé veličiny, specifické pro určitá fyzikální prostředí, lze převést na společné jednotky výkonu, které vyjadřujeme jako hladiny intenzit LEVEL v decibelech. Logaritmická funkce je násobena desetinásobkem hodnoty exponentu  $a$ . Jak uvádí *Weber-Fechnerův zákon* [14] a *Stevensův zákon výkonu* [15], exponent  $a$  je experimentálně stanovená hodnota.

$$LEVEL = 10 \cdot \log \left( \frac{MAG}{REF} \right)^a = a \cdot 10 \cdot \log \frac{MAG}{REF} [dB] \quad (1)$$

Referenční hodnota REF je vyjádřena ve stejných jednotkách, jako veličina MAG. Dle obrázku níže, hladina LEVEL představuje hodnotu velikosti vjemu R vnímaného vlivu prostředí, veličina MAG reprezentuje fyzikální intenzitu I, která působí na cestujícího. S rostoucí celkovou intenzitou má její konstantní přírůstek nižší vliv na velikost vjemu R, tedy hladiny intenzity LEVEL – I [dB].



**Obrázek 4 - Význam Weber-Fechnerova zákona –logaritmická funkce o základu „10“ procházející hodnotou 0 při hodnotě intenzity rovno jedné vyjadřující závislost velikosti vjemu  $\Delta R$  (reakce) na velikosti intenzity podnětu  $\Delta I$  (akce), obrázek autora.**

Disertační práce využívá Weber-Fechnerova [14] zákona a Stevensova zákona [15] výkonu k popisu lidského vnímání intenzity vlivu hluku, vibrací, světla a tepla. Zákony lze takto vykládat i k jiným nejméně jmenovaným vlivům, které nejsou předmětem studia.

Je-li známa hladina intenzity působícího vlivu, výsledná intenzita v místě cestujícího je funkcí dalších parametrů modelu – charakteristickou vlastností modelového prvku, vzdáleností zdroje působícího vlivu od cestujícího, směrem jeho působení, frekvenční hustotou a expozicí.

### Hladina zvukové intenzity:

Na základě rozboru logaritmické funkce byly odvozeny dva postupy, jak určit intenzitu zvuku o velikosti akustického tlaku 1 Pa. První varianta představuje klasický, všeobecně uznávaný, výpočet intenzity zvuku dle platných akustických norem při hodnotě REF akustického tlaku  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa a REF objemové vzduchové impedanci  $396 \text{ Ns/m}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{LEVEL} - I_{\text{zvuk}} &= \text{LEVEL}_{p \ 1} - \text{LEVEL}_{z p \ 1} \\ &= 20 \cdot \log\left(\frac{1}{2 \cdot 10^{-5}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{413,8}{396}\right) \\ &= 94 - 0,2 = 93,8 \text{ [dB]} \end{aligned} \quad (2)$$

Druhá varianta představuje výpočet té samé intenzity zvuku při hodnotě REF akustického tlaku  $10^{-6}$  Pa a REF objemové vzduchové impedanci  $1 \text{ Ns/m}^3$ .

$$\begin{aligned} \text{LEVEL} - I_{\text{ZVUK}} &= \text{LEVEL}_{p \ 2} - \text{LEVEL}_{z p \ 2} \\ &= 20 \cdot \log\left(\frac{1}{10^{-6}}\right) - 10 \cdot \log\left(\frac{413,8}{1}\right) \\ &= 120 - 26,2 = 93,8 \text{ [dB]} \end{aligned} \quad (3)$$

Výsledkem je vhodnost aplikace logaritmických funkcí díky její variabilitě použití. Záměnou hodnot REF v logaritmických rovnicích lze vytvořit tzv. „testovací funkci“ a díky ní ověřovat správnost sestavení logaritmické rovnice, tedy její spolehlivost.

### Hladina intenzity zrychlení:

Prahová hodnota **REF** zrychlení je **REF-a** =  $10^{-6} \text{ m/s}^2$ , dle ISO 1683. Stejně jako u akustického tlaku, mechanické chvění a vibrace představuje kmitání kolem rovnovážné polohy hmotného tělesa. Dynamické projevy jsou superponované na statickém zatížení, kolem kterého kmitají. Hladina zrychlení při efektivní hodnotě **MAG-a** =  $1 \text{ m/s}^2$  odpovídá hodnotě 120 dB.

$$LEVEL_{\alpha 1} = 10 \cdot \log \left( \frac{MAG-\alpha}{REF-\alpha} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{1}{10^{-6}} = 120 [dB] \quad (4)$$

Stejně jako u akustického tlaku, mechanická impedance pružného prostředí má výsledný vliv na vnímání intenzity zrychlení. Výsledkem je obecná rovnice hladiny intenzity zrychlení.

$$\begin{aligned} LEVEL - I_{zrychlení} &= LEVEL_{MAG} - LEVEL_Z \\ &= 20 \cdot \log \left( \frac{MAG - \alpha}{REF - \alpha} \right) - 10 \\ &\cdot \log \left( \frac{MAG - Z}{REF - Z} \right) [dB] \end{aligned} \quad (5)$$

### Hladina intenzity osvětlení:

Vzhledem k tomu, že pro výpočet hladiny plochy  $A$  je používána referenční hodnota  $REF-A = 1 \text{ m}^2$ , lze provést změnu referenční hodnoty na  $REF-L=10^{-12} \text{ cd/m}^2$ , stejně jako u referenční hodnoty hladiny svítivosti  $REF-Isv=10^{-12} \text{ cd}$  a referenční hodnoty pro světelný tok  $REF-\Phi = 10^{-12} \text{ lm}$ . Hladina střední hodnoty intenzity osvětlení při efektivní hodnotě  $MAG-E = 1 \text{ lx}$  a referenční hodnotě  $REF-E = 10^{-12} \text{ lx}$  bude odpovídat hodnotě 120 dB.

$$LEVEL - I = 10 \cdot \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 [dB] \quad (6)$$

Byly vyjádřeny dva způsoby výpočtu světelné impedance prostředí. První díky indexu lomu atmosféry a druhý pomocí permeability vakua. Obě hladiny světelné impedance vzdušného prostředí jsou pro potřeby disertační práce příliš malé, aby byly uvažovány (0,001 a 0,000008 dB).

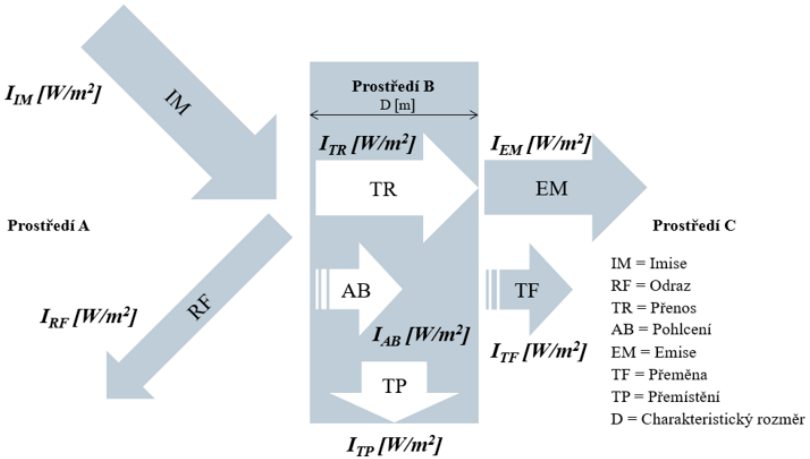
### Hladina tepelné intenzity:

Prahová hodnota pro výpočet hladiny tepelné intenzity je  $REF-q = 10^{-12} \text{ W/m}^2$  a pro efektivní hodnotu měrného sdíleného tepla  $MAG-q = 1 \text{ W/m}^2$  odpovídá hladina tepelné intenzity hodnotě 120 dB.

$$LEVEL - I = 10 \cdot \log \frac{1}{10^{-12}} = 120 [dB] \quad (7)$$

**Hladina intenzity na rozhraní vozidla:**

Díky studii oblasti přenosových cest [3], oblasti logaritmického hodnocení [1] a díky studii vnímání barev [4], str. 4 až 25, vznikla synergie těchto oblastí, která vyústila k použití tzv. energetických činitelů na rozhraní několika různých prostředí. Následující obrázek vykresluje situaci intenzity na dvou rozhraní třech prostředí (A, B, C).



**Obrázek 5 – Obecný popis energetických toků na rozhraní tří prostředí, obrázek autora**

Součinitel TR reprezentuje přenos, RF odraz, AB pohlcení, TF přeměnu, TP přemístění a EM emisi. Vždy musí platit:

$$TR + RF + AB + TF + TP + EM = 1 \quad (8)$$

Hladiny jednotlivých činitelů lze vyjádřit:

$$TR = \frac{I_{TR}}{I_{IM}} [-] \rightarrow LEVEL - TR = 10 \cdot \log(1/TR) [dB] \quad (9)$$

Takto vyjádřené hladiny rozhraní představují matematické rozhraní pro 3D studovaný model návrhu kolejového vozidla.

### **Další hladiny impedancí použitelných v návrhu metodiky:**

#### Hladina vzdálenosti:

Parametr vzdálenosti pozorovatele od zdroje.

$$\mathbf{LEVEL-D = 20.log(D) [dB]} \quad (10)$$

kde REF-D je 1 m.

#### Hladina směrovosti:

Parametr prostorového úhlu působení zdroje studovaného vlivu.

$$\mathbf{LEVEL-Q = 10.log(Q) [dB]} \quad (11)$$

kde REF-Q je 1 sr.

#### Hladina směrové korekce:

Parametr popisující úhel k normále plochy, na kterou intenzita vlivu působí.

$$\mathbf{LEVEL-PHI = 10.log(cos(PHI)) [dB]} \quad (12)$$

kde REF-PHI je 1 rad.

#### Hladina četnosti:

Parametr vyjadřující násobek, četnost, efektivní veličiny studovaného vlivu.

$$\mathbf{LEVEL-n = 10.log(n) [dB]} \quad (13)$$

kde REF-n je 1.

#### Hladina plochy:

V souvislosti se zdrojem představuje součet hladiny vzdálenosti a směrovosti.

$$\mathbf{LEVEL-A = 10.log(A) [dB]} \quad (14)$$

kde REF-A je 1 m<sup>2</sup>.

#### Hladina výkonově spektrální hustoty:

$$\mathbf{LEVEL-F = LEVEL-I + 10.log(MAG-f/REF-f) [dB]} \quad (15)$$

kde REF-f je pro mechanické/elektromagnetické vlnění 1 Hz/THz.

#### Hladina expozice:

$$\mathbf{LEVEL-E = LEVEL-I + 10.log(MAG-t/REF-t) [dB]} \quad (16)$$

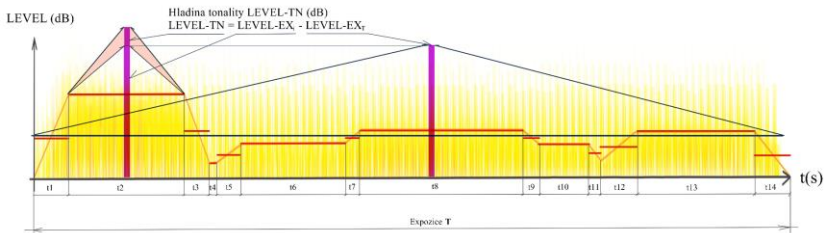
kde REF-t je 1 s.



**Hladiny kvalitativního hodnocení:**

**Hladina tonality:**

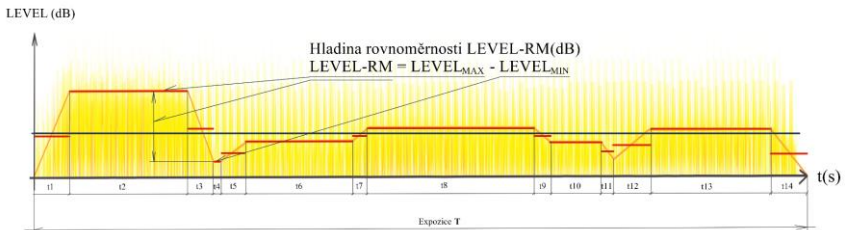
$$\mathbf{LEVEL-TN = LEVEL-EX_i - LEVEL-EX_T [dB]} \quad (17)$$



**Obrázek 6 - Vyhodnocení hladiny tonality, autor**

**Hladina rovnoměrnosti:**

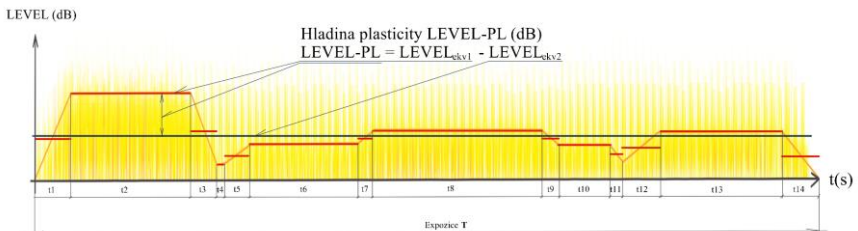
$$\mathbf{LEVEL-RM = LEVEL-MAX - LEVEL-MIN [dB]} \quad (18)$$



**Obrázek 7 - Vyhodnocení hladiny rovnoměrnosti, autor**

**Hladina plasticity:**

$$\mathbf{LEVEL-PL = LEVEL-EKV1 - LEVEL-EKV2 [dB]} \quad (19)$$



**Obrázek 8 - Vyhodnocení hladiny plasticity, autor**

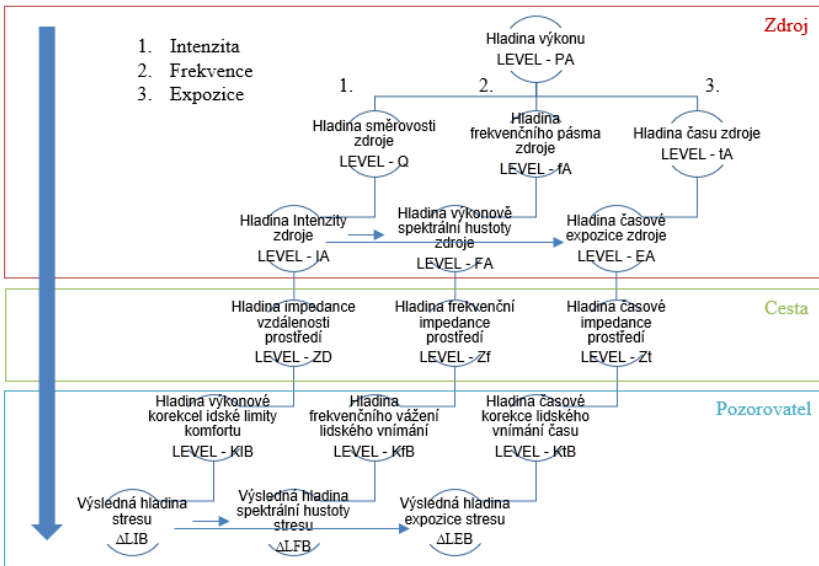
**Celková hladina stresu všech působících vlivů:**

Následující rovnice vyjadřuje výpočet celkové hladiny stresu jako energetický součet dílčích hladin stresu jednotlivých vlivů. Tento výpočet je aplikován ve všech úrovních metody.

$$\Delta L_{Celk} = 10 \cdot \log\left[ (10^{0,1 \cdot \Delta L_{Vibrate}}) + (10^{0,1 \cdot \Delta L_{Hluk}}) + (10^{0,1 \cdot \Delta L_{Teplota}}) + (10^{0,1 \cdot \Delta L_{Světlo}}) \right] \quad (20)$$

Celková hladina stresu  $\Delta L_{Celk}$  představuje komplexní jednočíselné vyjádření pohody cestujícího v přepravním procesu a ve vztahu s návrhem kolejového vozidla. Celková hladina stresu zahrnuje matematický výpočet, který je uspořádán do tří sekvencí. První sekvence počítá pouze intenzity s výsledným vyhodnocením průběhu a ekvivalentní hladiny stresu. Druhá sekvence přepočítává charakteristiky výkonově spektrálních hustot a třetí sekvence přiřazuje časový parametr k vyjádření celkové energie.

**Algoritmus pro obecný výpočet hladiny stresu:**

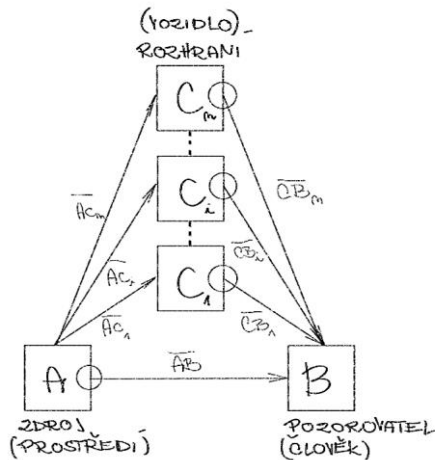


**Obrázek 9 - Diagram znázorňující výpočet hladin stresu na základě sestavení přenosových cest pomocí definovaných parametrů, autor**

Diagram popisuje matematické sestavení přenosových cest a platí pro všechny vlivy – hluk, vibrace, světlo a teplo. Výsledkem je vždy hladina stresu, ať již ve své efektivní, frekvenční nebo časové podobě.

Jednotlivé parametry se pak iteračním způsobem doplňují během konstrukčního vývoje návrhu vozidla. Tímto způsobem lze matematický model stále rozšiřovat a vylepšovat.

**Sestavení přenosových cest:**



**Obrázek 10 - Základní schéma vyjadřující vztah mezi zdrojem a vozidlem a cestujícím, autor**

Následující návrh sestavení přenosové rovnice reprezentuje situaci mezi zdrojem a pozorovatelem (AB):

- První představuje výpočet hladiny stresu  $\Delta LIB$  vyvolanou intenzitou sledovaného vlivu v místě pozorovatele B.
- Druhá představuje výpočet hladiny spektrální hustoty stresu  $\Delta LFB$  intenzity sledovaného vlivu v místě pozorovatele B.
- Třetí představuje výpočet hladiny expozice  $\Delta LEB$  intenzity sledovaného vlivu v místě pozorovatele B.

Vjem	Zdroj vlivu	Impedance cesty	Korekce pozorovatele	
$\Delta LIB =$	$[LEVEL - PA] - [LEVEL - QA]$	$- [LEVEL - ZD]$	$- [LEVEL - KIB]$	Intenzita
$\Delta LFB =$	$[LEVEL - PA] + [LEVEL - fA]$	$+ [LEVEL - Zf]$	$- [LEVEL - KfB]$	Frekvence
$\Delta LEB =$	$[LEVEL - PA] + [LEVEL - tA]$	$+ [LEVEL - Zt]$	$- [LEVEL - KtB]$	Expozice

**Obrázek 11 - Návrh sestavení přenosových cest mezi zdrojem působícího vlivu a pozorovatelem v souvislosti s intenzitou, výkonově spektrální hustotou a expozicí působícího vlivu, autor**

Na levé straně každé rovnice je výsledná hladina stresu  $\Delta L$  pro počítaný vliv a jeho charakteristickou cestu. Na pravé straně je

- hladina výkonu zdroje ( $LEVEL-PA$ ) s parametrem ( $LEVEL-QA$ ,  $LEVEL-fA$ ,  $LEVEL-tA$ ) určující jeho intenzitu ( $LEVEL-IA$ ),
- hladina impedance cesty ( $LEVEL-ZD$ ,  $LEVEL-Zf$ ,  $LEVEL-Zt$ ),
- hladina korekce pozorovatele ( $LEVEL-KIB$ ,  $LEVEL-KfB$ ,  $LEVEL-KtB$ ).

První rovnici přenosu výkonu lze rozepsat jako rozdíl hladiny směrovosti  $LEVEL-QA$ , hladiny impedance vzdálenosti  $LEVEL-ZD$  a hladiny požadované intenzity v místě pozorovatele  $LEVEL-KIB$  od hladiny intenzity zdroje  $LEVEL-IA$  (zvuk, vibrace, světlo, teplo).

Zatímco první tři členy rovnice popisují výslednou hladinu intenzity v místě pozorovatele, hladina požadovaného limitu intenzity  $LEVEL-KIB$  je předem stanovená hodnota, kterou je cílem navrhnout. Hladina stresu intenzity  $\Delta LIB$  je tedy výsledkem poměru výsledné intenzity v místě pozorovatele a intenzity požadované.

$$\Delta LIB = 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - W}{REF - W} \right) - 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - Q}{REF - Q} \right) - 20 \cdot \log \left( \frac{MAG - D}{REF - D} \right) - 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - KIB}{REF - W} \right) \text{ [dB]} \quad (21)$$

Druhou rovnici přenosu frekvenční charakteristiky lze rozepsat jako součet hladiny frekvenční hustoty **LEVEL-fA**, hladiny kritických frekvencí vzdálenosti **LEVEL-Zf** s ekvivalentní hladinou intenzity zdroje **LEVEL-IA** (zvuk, vibrace, světlo, teplo), od kterého se odečte hladina frekvenčně vážené požadované hodnoty intenzity vlivu **LEVEL-KfB**.

$$\Delta LFB = 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - W}{REF - W} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - fA}{REF - f} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - Zf}{REF - f} \right) - 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - KfB}{REF - W} \right) \text{ [dB]} \quad (22)$$

Třetí rovnice představuje výpočet hladiny stresu expozice **ΔLEB** pro libovolně dlouhý časový interval t (s). Součet hladiny expozice zdroje **LEVEL-tA** a hladiny časové korekce přenosu **LEVEL-Zt** s hladinou intenzity zdroje **LEVEL-IA** (zvuk, vibrace, světlo, teplo) vyjadřuje celkovou energii v místě pozorovatele, od které se odečte hladina požadované expozice **LEVEL-KtB**.

$$\Delta LEB = 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - W}{REF - W} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - tA}{REF - t} \right) + 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - Zt}{REF - t} \right) - 10 \cdot \log \left( \frac{MAG - KfB}{REF - W} \right) \text{ [dB]} \quad (23)$$

### Návrh kritérií optimalizace:

Hlavní kritéria platná pro hladiny stresu intenzity, spektrální hustoty a expozice:

- Je-li  $\Delta L < 0 \text{ dB}$ , optimalizace není prioritou, akceptovatelné technické řešení.
- Je-li  $\Delta L > 0 \text{ dB}$ ;  $\Delta L \leq 3 \text{ dB}$ , akceptovatelné technické řešení, možná dvojnásobná intenzita vlivu, než je požadováno.

- Je-li  $\Delta L > 3 \text{ dB}$ ;  $\Delta L \leq 10 \text{ dB}$ , neakceptovatelné technické řešení, možná desetinásobná intenzita vlivu, než je požadováno – nutná optimalizace.
- Je-li  $\Delta L > 10 \text{ dB}$ , neakceptovatelné technické řešení, optimalizace hlavní prioritou.

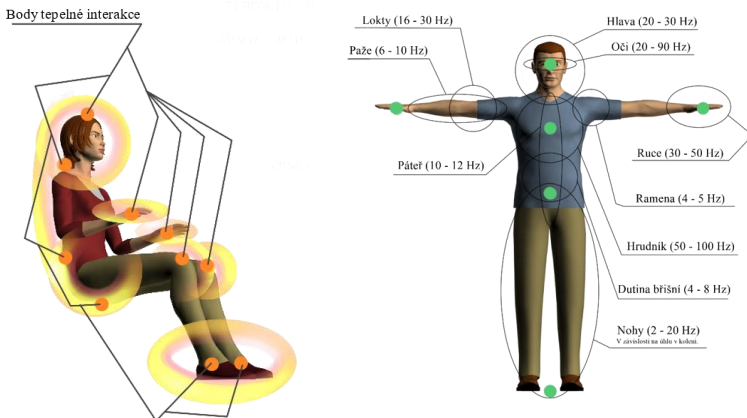
Doplňková kritéria platná pro hladiny plasticity, rovnoměrnosti a tonality:

- Je-li  $LEVEL-PL < 0 \text{ dB}$ , platí stejná kritéria jako pro hodnoty vyšší než 0, znaménko vyjadřuje nárůst nebo úbytek ekvivalentní hladiny intenzity vůči její původní hodnotě.
- Je-li  $LEVEL-PL, TN, RM > 0 \text{ dB}$ ;  $LEVEL-PL \leq 3 \text{ dB}$ , možná dvojnásobná ekvivalentní intenzita vlivu, než je požadováno.
- Je-li  $LEVEL- PL, TN, RM > 3 \text{ dB}$ ;  $LEVEL-PL \leq 10 \text{ dB}$ , možná desetinásobná ekvivalentní intenzita vlivu, než je požadováno – doporučené opodstatnění.
- Je-li  $LEVEL- PL, TN, RM > 10 \text{ dB}$ , doporučená optimalizace.

## 5. VÝSLEDKY PRAKTICKÉ ČÁSTI

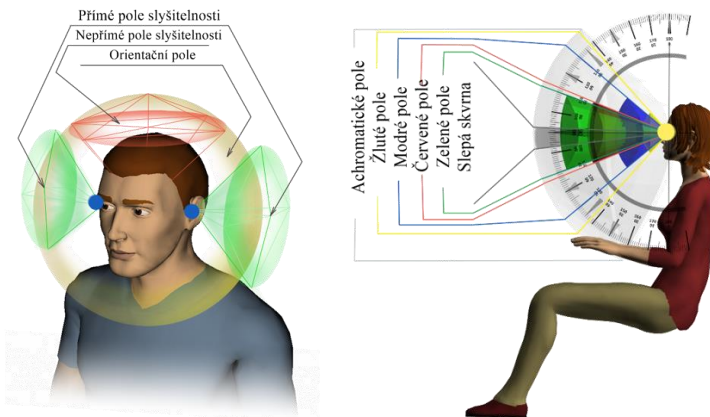
### Návrh modelu člověka:

Člověk je celým tělem citlivý na bezprostřední účinky mechanického a elektromagnetického vlnění v podobě vibrací a tepla. Model člověka je definován body interakce, které se na těle člověka vyskytují.



**Obrázek 12 - Komplexní popis modelu člověka z pohledu působení vibrací a tepla, autor**

Člověk je schopen vnímat ušima a očima účinky mechanického a elektromagnetického vlnění na dálku v podobě zvuku a světla.



**Obrázek 13 - Popis modelu člověka z pohledu působení světla a zvuku, autor**

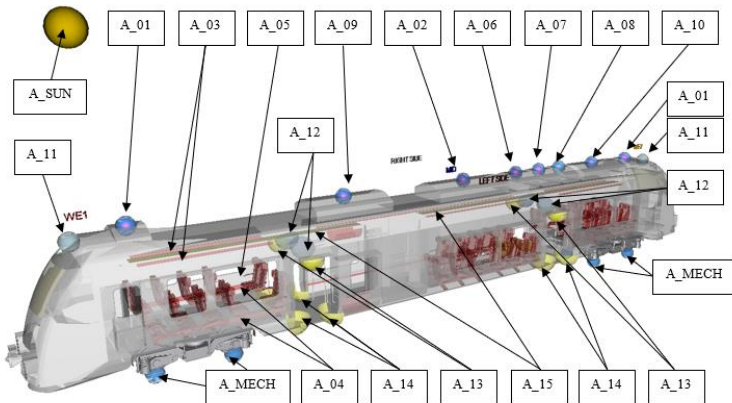
## Návrh modelu vozidla

Jako návrh konstrukčního prostředí vozidla je zvoleno vnitřní prostředí pro cestující příměstské jedno vozové jednotky, s pojezdem B0'B0'. Základní geometrie návrhu vozidla je inspirována parametry vozidla diplomové práce ČVUT Ústavu Kolejových vozidel, viz [13].



**Obrázek 14 - Designový návrh studované příměstské jednotky, autor**

Studie integrace metodiky do 3D CAD prostředí [2] přinesla jasnou představu o rozvržení všech dostupných a známých zdrojů působících vlivů prostředí a vozidla. Geometrické tvary zdrojů odpovídají své charakteristice šíření energie do prostoru, jsou tedy kulové, půlkulové, čtvrt kulové, plošné, lineární apod.

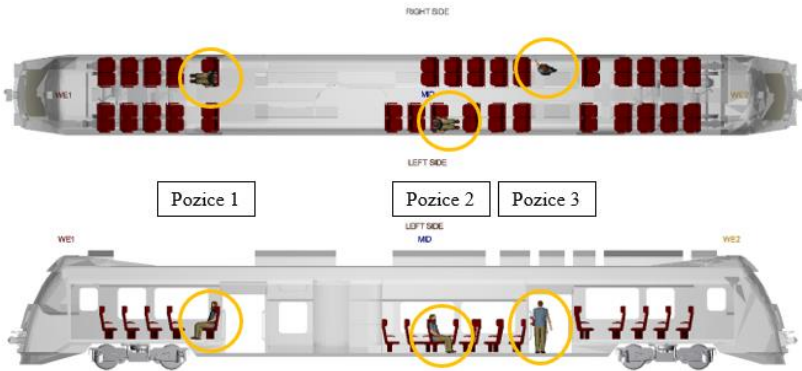


**Obrázek 15 - Rozvržení studovaných zdrojů působících vlivů při provozu vozidla, autor**



## Návrh modelu prostředí

Jsou vybrány tři místa pro cestující, které jsou použity pro výpočet přenosových cest mezi potenciálními zdroji působících vlivů prostředí a lidským faktorem.



**Obrázek 16 - Rozmístění subjektů lidského faktoru. Pozice 1 – figury sedí ve směru jízdy nad podvozkem na pravé straně, Pozice 2 – figury sedí protisměru jízdy mezi podvozky v nízké podlaze na levé straně, Pozice 3 – figury stojí v nástupním prostoru u dveří při nízké podlaze na pravé straně, autor**

Jako testovací prostředí byla zvolen vnitřní okruh železniční testovací trati v Cerhenicích, kterou vozidla projíždí rychlostí 80 km/h při různých výškách slunce nad obzorem, letní provozní režim vozidla.



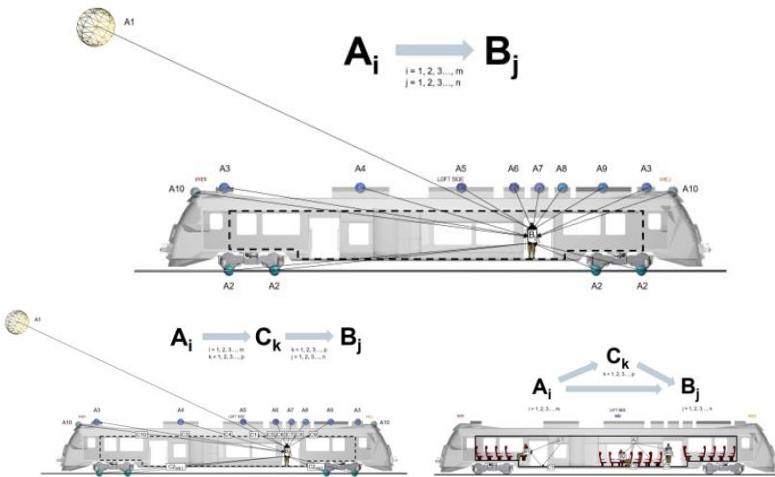
**Obrázek 17 - Letecký pohled na vyznačenou trať v Cerhenicích, Mapy.cz**

## Systémová integrace:

V první fázi je vhodné vypočítat přímé cesty od potenciálních zdrojů k pozorovateli tak, jako by samotné vozidlo zatím neexistovalo.

Každá cesta, která překračuje hranici vnitřního prostoru existuje konstrukční bod C, který reprezentuje kritický komponent vozidla (podlaha, bočnice, strop, okna, dveře apod.). Konstrukční body  $C_k$ , kde  $k$  je indexem daného zdroje, se vnaší na konstrukční hranici návrhu vozidla v průsečíku s přenosovou cestou.

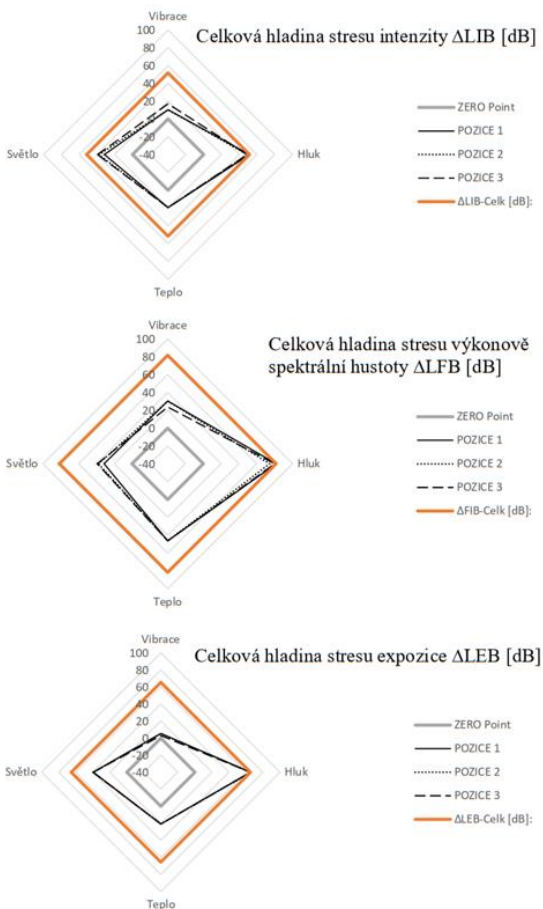
V případě vysokého energetického činitele odrazu materiálu je uvažován princip Snellova zákona. Všechny materiály ovšem reagují na různé vlivy odlišně a ve většině případech se odražená energie v bodu  $C_k$  dále šíří difúzně prostorem tak, že přenosová cesta  $C_k B_j$  se počítá obdobně jako cesta  $A_i B_j$  s tím, že místo odrazu odpovídá parazitnímu zdroji se specifickým prostorovým úhlem produktivity a přenosová vzdálenost je pro každou cestu specifická.



**Obrázek 18 - Integrace lidského faktoru do 3D modelu prostředí návrhu kolejového vozidla k sestavení matematických vztahů studované situace. Základem metodiky je vyjádření hodnoty působících vlivů (A) na člověka (B) bez uvažování rozhraní vozidla (C). Velikost hladiny stresu určuje, která přenosová cesta má největší váhu a jak se její hodnota odrazí na stanovení parametrů rozhraní vozidla (C), autor**

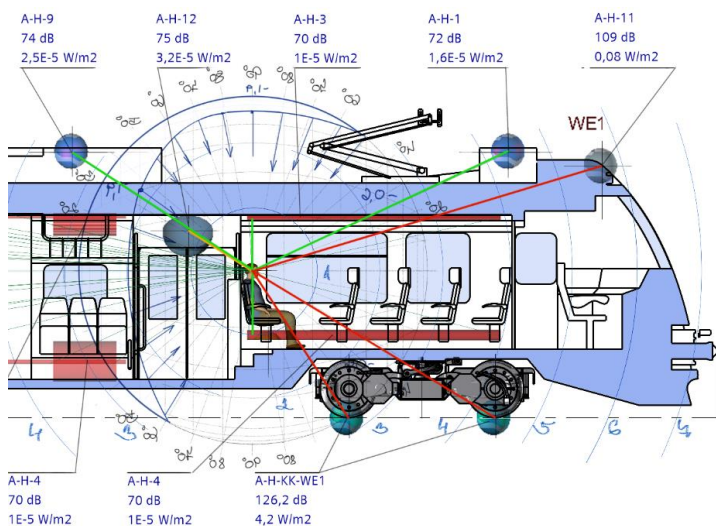
## Výsledné hladiny stresu sestavených přenosových cest

Navržená metodika definuje vztah mezi pozorovatelem a potencionálními zdroji působících vlivů, které vozidlo během provozu generuje. Takto definované vztahy jsou navrženy skrze sestavení přenosových cest a jejich výsledné hladiny stresu v určených pozicích cestujících

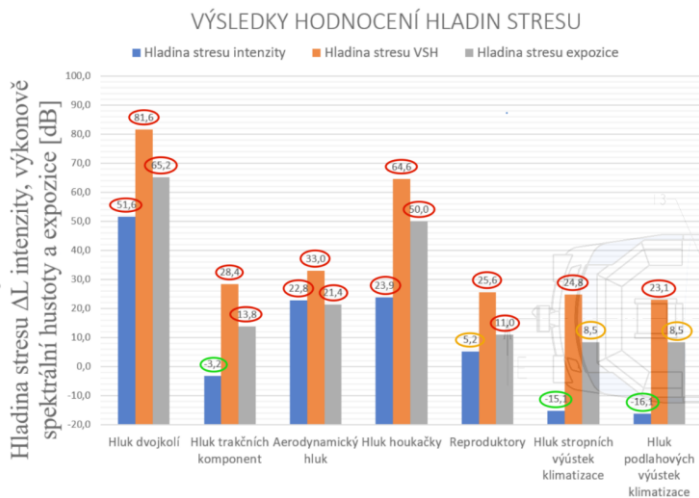


**Obrázek 19 - Diagramy výsledků hladin stresu intenzity, výkonově spektrální hustoty a expozice pro režim výšky slunce nad obzorem 63°. Diagramy znázorňují dílčí výsledky hladin stresu pro jednotlivé vlivy a jejich energetický součet – celková hladina stresu, autor**

Výsledky účinků hluku na cestujícího v pozici 1:

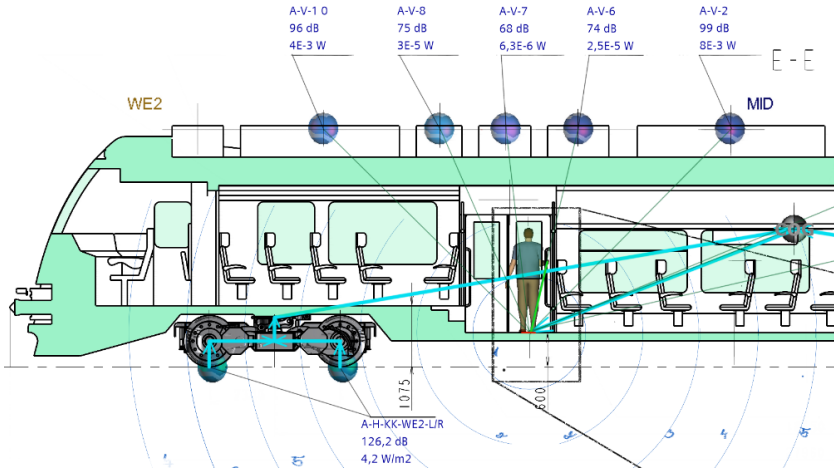


**Obrázek 20 - Sestavené přenosové cesty působícího hluku na cestujícího v pozici 1, autor**

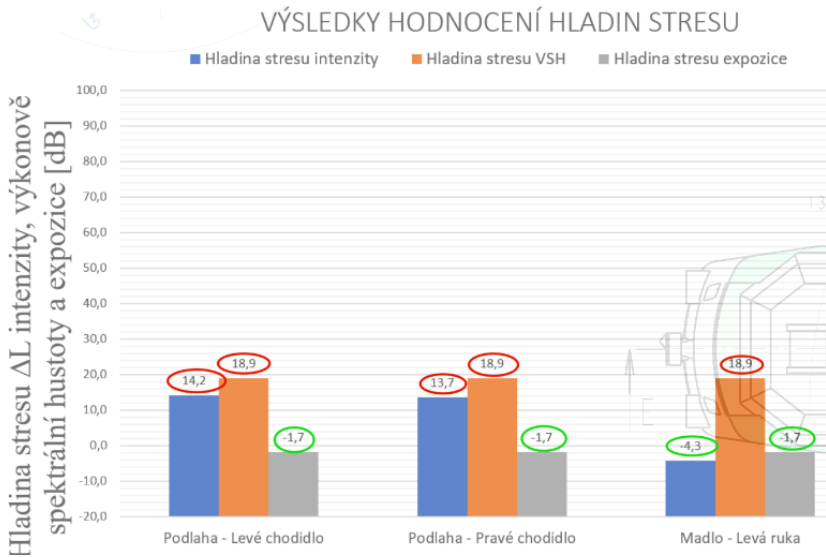


**Obrázek 21 - Vyhodnocení přenosových cest hluku. Červená barva indikuje kritické cesty, oranžová diskomfortní a zelená optimální, autor**

Výsledky účinků vibrací na cestujícího v pozici 3:

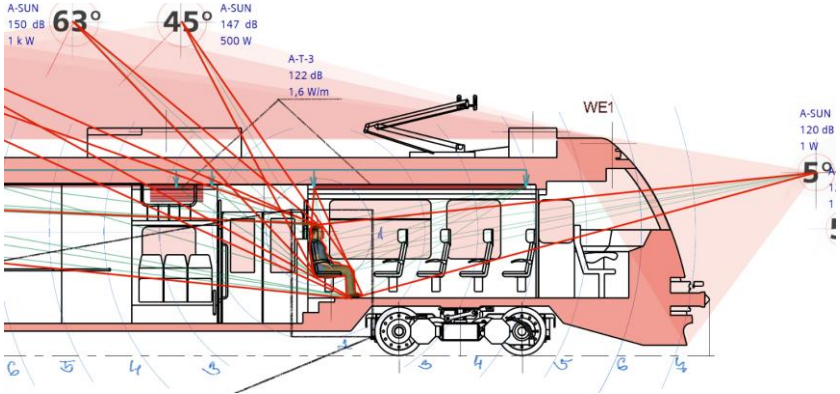


**Obrázek 22 - Sestavené přenosové cesty působících vibrací na cestujícího v pozici 3, autor**



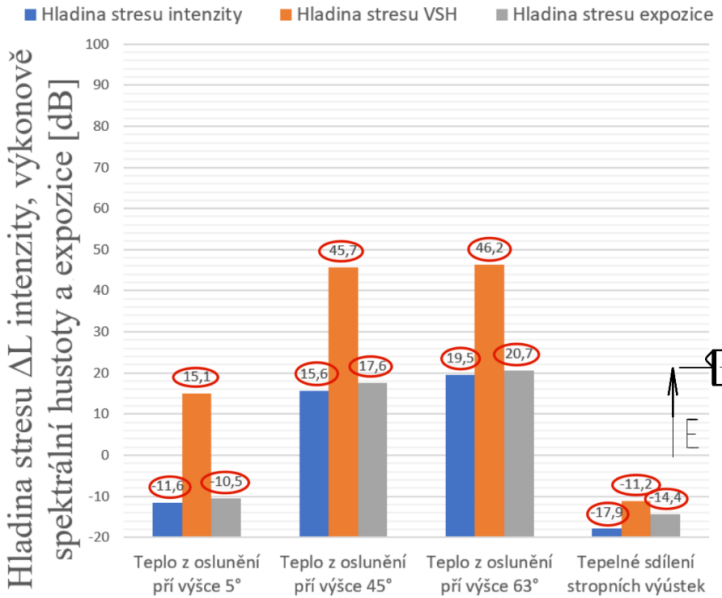
**Obrázek 23 - Vyhodnocení přenosových cest vibrací. Červená barva indikuje kritické cesty, oranžová diskomfortní a zelená optimální, autor**

Výsledky účinků tepla na cestujícího v pozici 1:



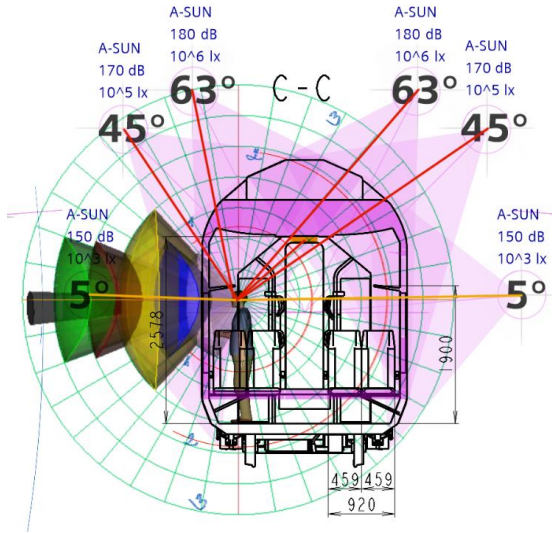
**Obrázek 24 - Sestavené přenosové cesty působícího tepla na cestujícího v pozici 1, autor**

**VÝSLEDKY HODNOCENÍ HLADIN STRESU**

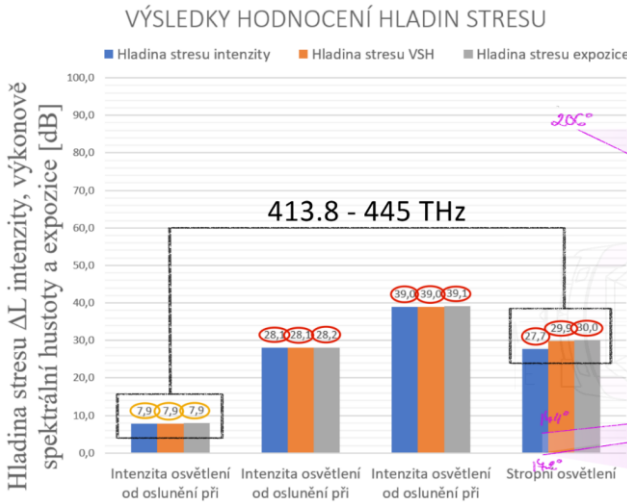


**Obrázek 25 - Vyhodnocení přenosových cest hluku. Červená barva indikuje kritické cesty, oranžová diskomfortní a zelená optimální, autor**

Výsledky účinků světla na cestujícího v pozici 3:



**Obrázek 26 - Sestavené přenosové cesty působícího světla na cestujícího v pozici 3, autor**



**Obrázek 27 - Vyhodnocení přenosových cest hluku. Červená barva indikuje kritické cesty, oranžová diskomfortní a zelená optimální, autor**

## 6. ZÁVĚR

Návrh kolejových vozidel je složitý a nákladný proces, zejména ve fázi výroby a uvedení do provozu. Proto je žádoucí vynakládat větší úsilí v prvních fázích konceptu a snažit se odhalovat případné nedostatky již na papíře. Ačkoliv je vývoj konvenční železnice svázán řadou legislativních, normativních a zákaznickem specifikovaných pravidel, je potřeba se zaměřovat na oblasti zejména lidského faktoru, které nejsou dostatečně vtisknuty do předpisů a kde je možné tvořit a dle dispozic a možností volně vozidlo navrhovat.

Cílem této práce bylo navrhnout jednotnou metodiku hodnocení vnitřního prostoru vozidla v souvislosti s návrhem a optimalizací jeho systémových komponent. Metodika představuje matematický model – nástroj, který je možné aplikovat v souladu s ergonomickými metodami a antropometrickými přístupy.

Bylo vyzkoumáno, že lze hodnotit zdánlivě odlišné fyzikální světy jednotným matematickým přístupem, pomocí logaritmických funkcí. Filozofií metodiky je energetická synergie systému ČLOVĚK-PROSTŘEDÍ-VOZIDLO. Logaritmické funkce jsou aplikovány na základě Weber-Fechnerova zákona a Stevensova zákona výkonu. Díky logaritmickým funkcím je zohledněna fyziologie vnímání podnětů okolního prostředí člověkem.

Princip metodiky je založen na sestavení pomyslných přenosových cest mezi potencionálními zdroji vozidla a místem pozorovatele. Samotná konstrukce vozidla v počáteční fázi není zahrnuta, jsou využity pouze časové průběhy intenzit pro jednotlivé zdroje, které vozidlo během simulovaného provozu generuje.

Výsledkem přenosových cest je výpočet tzv. hladin stresu, tedy rozdílu vypočítané hladiny intenzity v místě pozorovatele a hladiny intenzity požadované. Paralelně se ve vztahu k lidskému faktoru počítají dále hladiny stresu výkonově spektrální hustoty přenosu a jeho časové expozice.

Jsou stanoveny optimalizační kritéria hodnocení hladin stresu intenzity prostředí, jako jsou hladina rovnoměrnosti, hladina plasticity a hladina tonality. Podle toho, zdali hodnoty těchto optimalizačních hladin odpovídají stanoveným kritériím, přistupuje projektant k fázi systémové integrace kritických komponent.



Z vyhodnocení modelové situace počítané v disertační práci vyplývají následující závěry:

- Dominantní vliv na zvukové nepohodlí má zvukový projev pojezdu vozidla, tedy styk kolo-kolejnice. V pozici 1 je cestující hlučnému prostředí vystaven nejvíce.
- Naopak v pozici 3 byly vypočítány nejhorší podmínky ve vztahu s vibracemi, neboť pozorovatel přímo stojí na zdroji vibrací, simulovaným matematickým řešičem Simpack.
- Vliv tepelné intenzity je nejsilnější v místě 1, neboť vzdálenost cestujícího od vyústek klimatizace je nejmenší. Tepelný vliv slunce je pro všechny pozice stejný.
- Vliv intenzity osvětlení vyvolává nejvyšší hladinu stresu pro cestujícího stojícího na pozici 3, neboť jeho orientace je přímo proti oknu dveřního křídla a vystavuje se tak riziku přímého oslnění sluncem. Jak hodnocení ukazuje, intenzita stropního osvětlení je mnohonásobně vyšší než intenzita osvětlení při „zlaté hodině“. Stropní osvětlení tedy dodává intenzitu osvětlení odpovídající intenzitě slunce při výšce nad obzorem  $45^\circ$ , ale jeho spektrální teplota odpovídá intenzitě slunce při výšce  $5^\circ$  a stropní osvětlení může působit příliš „teple“ a může být unavující.

Návrh metodiky je použitelný jak v koncepční fázi návrhu kolejového vozidla, tak v průběhu vývoje a realizace výroby vozidla. V návrhu lze s každou úpravou parametrů metodiku iterativně opakovat a zvyšovat tak přesnost a složitost návrhu.

Kombinace grafického vyjádření, logaritmické matematiky a sestavení energetických cest ukázalo, že lze aplikovat funkční komplexní matematický model systému ČLOVĚK – VOZIDLO – PROSTŘEDÍ, který funguje jak na papíře s kalkulačkou a tužkou v ruce, tak i v oblasti 3D CAD a výpočetních software. Návrh metodiky,

- umožňuje přidávat nebo ubírat jednotlivé vlivy prostředí,
- je matematicky konzistentní,
- systematicky hodnotí parametry vozidla pomocí hladiny stresu,
- stanovuje celkový stupeň příslušné izolace kritického komponentu.

## **7. PUBLIKACE SOUVISEJÍCÍ S TÉMATEM DISERTACE**

- [1] MÁLEK, Lukáš, 2019. Ergonomie v kolejových vozidlech. In: 24. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA - PRORAIL: SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLÁCH. Žilina: Univerzita v Žilíně. ISBN 978-80-89276-59-2. 24(vol. 2), s. 27 – 35.
- [2] MÁLEK, Lukáš, 2019. Study of methodology integration into 3D Human CAD system: Setting of the method of railway vehicle components system integration to achieve the optimal environment in the vehicle's interior. Praha. Akademická studie. České vysoké učení technické. Vedoucí práce prof. Ing. Ladislav
- [3] MÁLEK, Lukáš, 2018. Evaluation of the travel comfort of the passengers - relationship between the vehicle and the environment. In: Efektivní dopravou k udržitelné mobilitě: VII. mezinárodní vědecká konference Dopravní fakulty Jana Pernera, Česká republika: Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. 7(11). ISBN 978-80-7560-152-0 (pdf), s. 1195 – 1207.
- [4] MÁLEK, Lukáš. ARORA Rahul , 2017. Color perception and finishing strategies for solutions of interiors of rolling stocks. In: Railway Interiors Expo Conference 2017: Konference s mezinárodní účastí. Praha, Česká republika, s. 26.
- [5] MÁLEK, Lukáš, 2017. PŘÍČINY A NÁSLEDKY CESTOVNÍ POHODY V NÁVRHU KOLEJOVÉHO VOZIDLA. In: Současné problémy v kolejových vozidlech 2017: XXIII. Konference s mezinárodní účastí. Pardubice, Česká republika: Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera. ISBN
- [6] MÁLEK, Lukáš, 2017. Presentace na téma: Dveřní, mezivozové a nástupní systémy v kolejových vozidlech. In: RailAcademy, Siemens Mobility s.r.o., s. 57.
- [7] MÁLEK, Lukáš, 2016. In: Akustická a optická pohoda. Mezinárodní odborná konference na téma Cestující v přepravním procesu, Vendryně 2016, vědecká konference Dopravní fakulty Jana Pernera, Česká republika: Univerzita Pardubice Dopravní fakulta Jana Pernera, pod záštitou Českých drah a.s., s. 16.

- [8] MÁLEK, Lukáš, 2016. Setting of the method of railway vehicle components system integration to achieve the optimal environment in the vehicle's interior. Czech Technical University. Dissertation Study. České vysoké učení technické v Praze. Vedoucí práce Prof. Ing. Ladislav Rus, DrSc., s. 25.
- [9] MÁLEK, Lukáš, PRELL, Roman, 2015. Prezentace na téma: Studie nástupu hendikepovaných cestujících při aplikaci specifikace TSI PRM. In: MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA - PRORAIL: SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLEJOVÝCH VOZIDLÁCH. Žilina: Univerzita v Žilíně. s. 15.
- [10] MÁLEK, Lukáš, 2014. Odezvy lidského organismu na akustické podněty: Odborné sympóziu projektu NOVIBRAIL - Hlukové emise a vibrace v systému železnice. Hlavní řešitel projektu: Výzkumný ústav železniční, a.s. ve spolupráci s Dopravní fakultou Jana Pernera Univerzita Pardubice a Výzkumným ústavem kolejových vozidel, s. r. o., Pardubice, s. 49.
- [11] MÁLEK, Lukáš, 2014. Prezentace na téma: Úvod do estetiky kolejových vozidel. In: Design v konstrukci strojů: seminář Strojní fakulty ČVUT, Česká republika: České Vysoké Učení Technické v Praze, s. 32.
- [12] MÁLEK, Lukáš, 2009. Modulární řešení regionální jednotky. Diplomová práce. ČVUT, Fakulta strojní, Odbor automobilů, spalovacích motorů a kolejových vozidel, U12120, DP2009–K01, s. 105. Vedoucí práce Doc. Ing. Josef Kolář, Csc.

## **8. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY V TEZÍCH**

- [13] HRYZ, Petr, 2018. Čtyřnápravový elektrický trakční vůz pro regionální dopravu. Praha. Diplomová práce. Vedoucí práce Ing. Jan Kalivoda PhD.
- [14] Weberův–Fechnerův zákon, 2001-. In: Wikipedia: the free encyclopedia [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2020-02-12]. Dostupné z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Weber%C5%AFv%E2%80%93Fechner%C5%AFv\\_z%C3%A1kon](https://cs.wikipedia.org/wiki/Weber%C5%AFv%E2%80%93Fechner%C5%AFv_z%C3%A1kon)

- [15] STEVENS, S. S. a Geraldine STEVENS, c1986. Psychophysics: introduction to its perceptual, neural, and social prospects. New Brunswick, U.S.A.: Transaction Books. ISBN isbn978-0-88738-643-5.
- [16] PHONG, Bui Tuong, 1975. Illumination for computer generated pictures. Communications of ACM. 18(6), 311 - 317.
- [17] ZHANG, Xiaozheng, Sanqiang ZHAO a Yongsheng GAO, 2008. Lighting Analysis and Texture Modification of 3D Human Face Scans: Computer Vision and Image Processing Laboratory. IEEE Xplore: Digital Image Computing Techniques and Applications. N/A(N/A), 402 - 407. Dostupné z: doi:10.1109/DICTA.2007.18
- [18] STŘELKA, Eduard, 2017. Použití Ishikawových nástrojů řízení jakosti v různých typech výrob. Praha. ČVUT. Vedoucí práce Doc. Ing. Pavel Mach CSc.

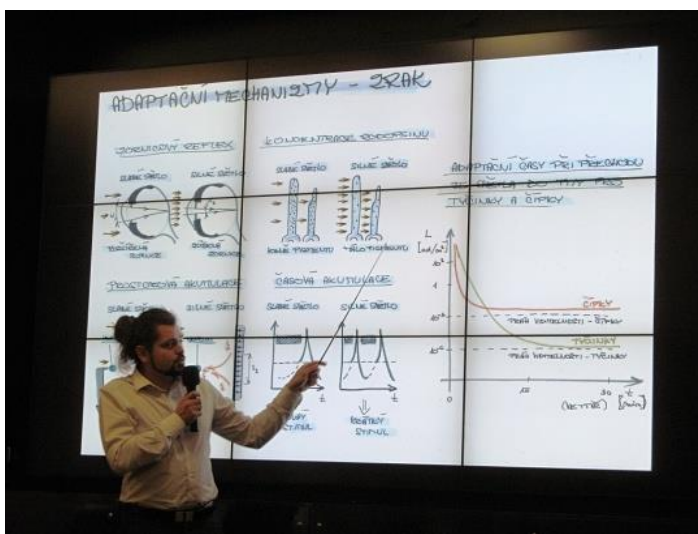
## 9. OHLASY A RECENZE

V rámci publikační činnosti autora byla zaznamenána pouze jediná veřejná recenze, a to na odkazu serveru Vlaky.net:

<https://www.vlaky.net/zeleznice/spravy/6261-Vendrynehostila-konferenci-Cestujici-v-prepravnim-procesu/>

Cituji 11. odstavec internetového článku:

„Dalším vystupujícím byl **Lukáš Málek** z **ČVUT Praha**, který zvolil uměleckou formu prezentace „Akustická a optická pohoda“, již ručně nakreslil. Zmínil, že vzhledem k vysoké životnosti kolejových vozidel musíme jednat maximálně pokrokově. Velmi podrobně byla popsána anatomie lidského oka a ucha, již je nutno se při konstrukci vlaku přizpůsobit. Menší rozruch vyvolalo označení VHD za sociální případ – myšlenka se ale ve skutečnosti zakládala na tom, že ve vozidlech se setkává velké množství lidí. Regionální a dálková doprava podle prezentujícího vyžadují odlišná řešení – při delších cestách je žádoucí méně světla (menší okna) a větší klid (souvisí s akustickým informačním systémem). Za méně vhodné řešení byly označeny jednotky Flirt Leo Expressu, jež mají příliš velká okna, je v nich mnoho prostoru, vozy navíc řinčí, a tak se v nich cestující údajně necítí dobře.“, konec citace



Obrázek 28 - Foto z recenzního článku serveru Vlaky.net

## ***10. ANOTACE***

Cílem této práce je sestavení metodiky systémové integrace komponent návrhu kolejového vozidla k docílení optimálního prostředí v jeho interiéru. Základní filozofií metodiky je synergie systému ČLOVĚK – VOZIDLO – PROSTŘEDÍ, která zohledňuje vzájemnou provázanost systému na úrovni studovaných vlivů. Metodika vede ke komplexnímu porozumění návrhu kolejového vozidla s ohledem na lidský faktor. Různé pozice rozmístění lidského faktoru v prostoru návrhu interiéru vozidla jsou příčinou odlišného vnímání působících vlivů prostředí, jako jsou hluk, vibrace, světlo a teplo. Metodika vyhodnocuje celkové komplexní řešení systémového návrhu vozidla. Teoretická část práce připravuje čtenáři základní znalosti o funkčních částech metodiky a matematickém vyjádření. Praktická část dizertační práce provází sestavením metodiky na příkladu systémového návrhu vozidla. Fyzikálně odlišná prostředí zvuku, vibrací, světla a tepla lze ve vztahu k vnímání člověka popisovat na jejich energetické úrovni jako elektromagnetické a mechanické energie vlnění. Metodika navrhuje optimalizační parametry jako je poloha, směr, intenzita, frekvence a expozice. Metodika navrhuje sestavení přenosových cest mezi lidským faktorem (dále jen pozorovatelem) a systémovým zdrojem hluku, vibrací, světla nebo tepla. Přenosová cesta mezi pozorovatelem a zdrojem představuje informační vztah o toku intenzity, frekvence a expozice. Je navrženo informační pravidlo metodiky o záznamu informace, jsou zavedeny pravidla sestavení přenosových cest a jsou stanoveny kritéria optimalizace. Výsledkem je hladina stresu pozorovatele jako odezva na podmínky okolního prostředí. Metodika zavádí systémové prvky vozidla jako tzv. kritické komponenty, jejichž specifické energetické charakteristiky nejvíce ovlivňují výslednou hladinu stresu pozorovatele. V závěru je návrh metodiky diskutována použitelnost, efektivita, přínos a náměty na vylepšení.

**Klíčová slova:** zvuk, zrychlení, světlo, teplo, pohoda, komfort, metodika, kolejové vozidlo, udržitelnost, systémová integrace, ergonomie, biologie, výkon, intenzita, frekvence, poloha, orientace, přenosové funkce, optimalizace, design.