



VÝZKUM, VÝVOJ A ZKUŠEBNICTVÍ KOLEJOVÝCH VOZIDEL
Bucharova 1314/8, Stodůlky, 158 00 Praha 5

CERTIFIKOVANÁ METODIKA

Metodika tvorby akustického modelu

Autoři:

Vypracoval Ing. Lucie Phamová, Ph.D.

Spolupracoval Ing. Aleš Hába, Ph.D., UPce

Ing. Jakub Vágner, Ph.D., UPce

Přezkoušel Ing. Stanislav Švéd

Schválil Ing. Zdeněk Malkovský, Ph.D. Generální ředitel

Certifikovaná metodika je výstupem z řešení projektu TAČR č. TE01020038

Metodika tvorby modelu.

Praha, 11/2019

OBSAH

1	Úvod	3
2	Cíl metodiky	3
3	Popis metodiky	3
3.1	Seznam zkratk a označení	3
3.2	Obecně	3
3.3	Volba typu výpočtových modelů	5
3.4	Vstupní parametry pro výpočtový model	6
3.4.1	Akustický výkon vyzářený kolem a kolejnicí pro určité rychlosti	6
3.4.2	Akustické výkony významných zdrojů hluku a vibrací	6
3.4.3	Geometrie vozidla	7
3.4.4	Akustické či fyzikální vlastnosti použitých materiálů	7
3.5	Tvorba modelů	8
3.5.1	Zjednodušený analytický výpočet vnějšího hluku	8
3.5.2	Výpočet pomocí numerických metod	10
3.6	Řešení modelů	11
3.7	Výsledky modelů	11
3.8	Ověření výsledků modelu měřením	12
4	Novost postupů a zdůvodnění metodiky	12
5	Popis uplatnění metodiky	12
6	Ekonomické aspekty	13
7	Seznam použité související literatury	13
8	Seznam publikací, které předcházely metodice	13

1 Úvod

Nejčastěji používané evropské normy týkající se hluku kolejových vozidel se zabývají pouze měřením a vyhodnocením vnějšího hluku a vnitřního hluku v kabině strojvedoucího. Jedná se o normy ČSN EN ISO 3095 a ČSN EN ISO 3381. Návrh vozidla z hlediska predikce jeho akustických vlastností není v současné době podchycen v žádné normě.

2 Cíl metodiky

Cílem metodiky je stanovení postupu při tvorbě výpočetních modelů pro predikci hluku.

Metodika stanovuje obecný postup pro vytvoření výpočetního modelu, pomocí kterého lze odhadnout, do jaké míry dané vozidlo plní požadavky na své akustické vlastnosti.

Metodika se zaměřuje pouze na posuzování hluku podle podmínek norem ČSN EN ISO 3095 (vnější hluk) a ČSN EN ISO 3381 (vnitřní hluk na stanovišti strojvedoucího a v prostoru pro cestující).

3 Popis metodiky

3.1 Seznam zkratk a označení

FE	finite element
FEM	finite element method
SEA	statistical energy analysis
CAD	computer aided design
SW	software
MB	multi-body
BEM	boundary element method

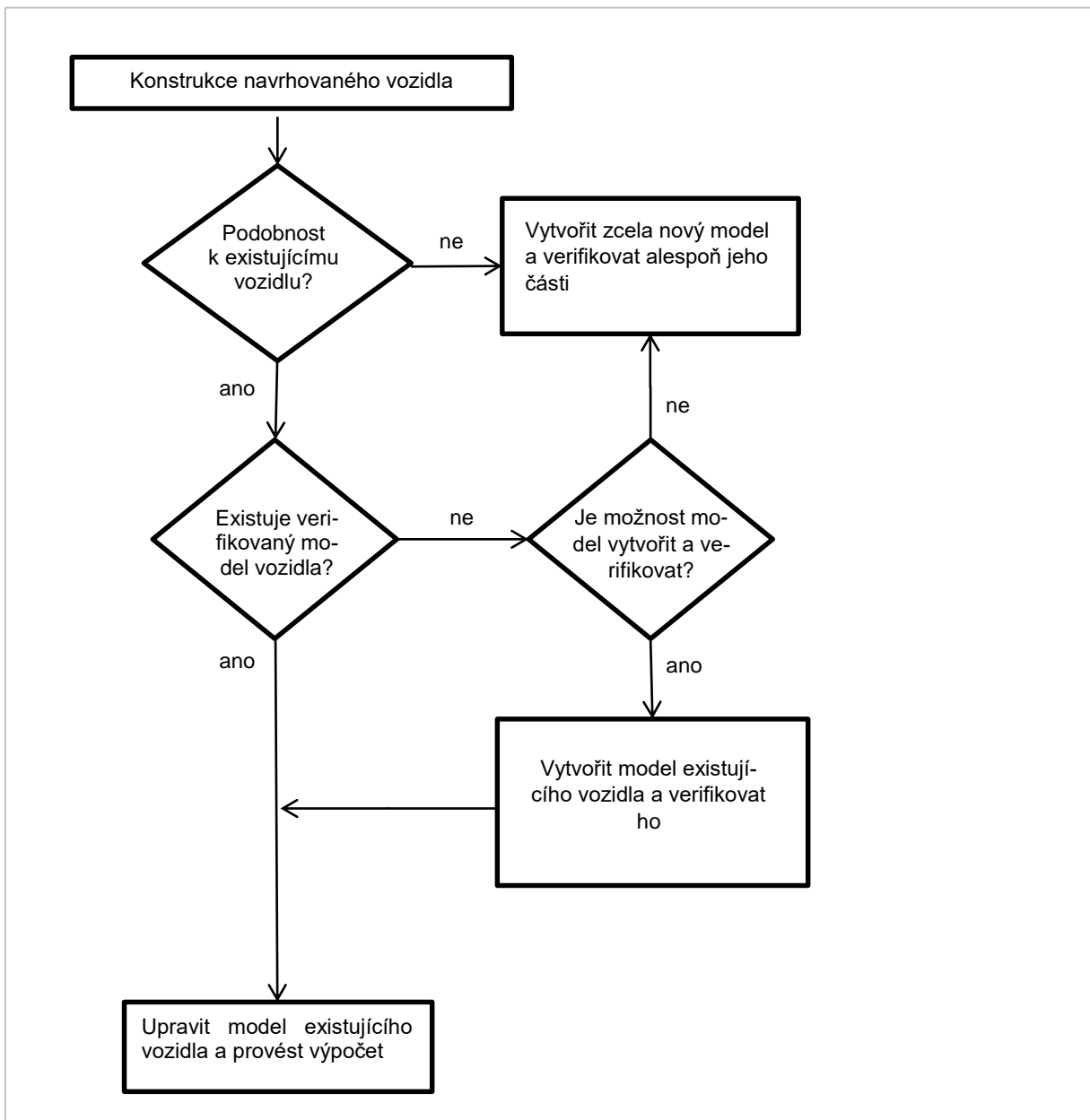
3.2 Obecně

Výpočtový model či modely musí umožnit predikovat hladiny akustických tlaků v požadovaných bodech nebo oblastech, ve zvolených stavech vozidla a při požadovaných provozních podmínkách.

Výpočtový model je vybuzen akusticky anebo vibro-akusticky. Toto buzení se pak přenáší vzduchem a strukturou do míst nebo oblastí, ve kterých je zjišťován akustický tlak.

U jednoduchých modelů se jedná o celkové hodnoty akustického tlaku, u složitějších modelů (např. využívajících metodu SEA) se jedná o hodnoty akustického tlaku pro jednotlivá oktávová či třetinooktávová frekvenční pásma.

Tvorba nového modelu je z velké části založena na předchozích zkušenostech, proto musí začít rešerší existujících vozidel obdobného typu a na nich naměřených dat včetně podmínek měření. Pokud existuje výpočtový model podobného vozidla, který je verifikovaný, je možné jej využít, upravit podle konstrukce a parametrů nového vozidla a provést výpočty s tímto modelem. Pokud se nově navrhované vozidlo zásadně liší od vozidel, u nichž existuje výpočtový model, je potřeba vytvořit zcela nový model a verifikovat alespoň jednotlivé jeho části. Tento postup je uveden na obr. 1.



obr. 1 Vývojový diagram obecného postupu při tvorbě modelu.

Ve všech fázích tvorby modelu je ideální uvažovat také frekvenční spektra. Tedy provádět výpočet a získávat vstupní parametry v oktávových nebo v třetinooktávových pásmech (minimálně v rozsahu 100 Hz až 5000 Hz).

Pro sestavení modelu je nutno znát:

- akustický výkon vyzářený kolem a kolejníc pro určité rychlosti;
- akustické výkony významných zdrojů hluku a vibrací;
- akustické a fyzikální vlastnosti použitých materiálů;
- geometrii vozidla;
- okolní podmínky (nutné pro porovnání s experimentem);
- umístění bodů pro zjišťování akustického tlaku.

Kromě prvotního zjištění akustických parametrů vozidla lze zhotovený výpočetní model využít i pro další optimalizaci vozidla z hlediska jeho akustických parametrů.

3.3 Volba typu výpočtových modelů

Na začátku je potřeba zvolit typ modelu s ohledem na složitost, oblast a účel použití, nástroje, kterými lze model realizovat, a časovou náročnost.

Typy modelů podle složitosti:

- jednoduché modely (analytické), které se dají řešit pomocí jednoduchých výpočtových programů (vytvořených např. v MS Excel nebo v prostředí Matlabu);
- složité modely (numerické), využívající alespoň jednu z náročnějších výpočetních metod (např. metoda konečných prvků, staticko-energetická analýza, ray-tracing a další).

Typy modelů podle oblasti použití:

- řešení vnějšího hluku;
- řešení vnitřního hluku;
- řešení hluku za stání;
- řešení hluku za jízdy.

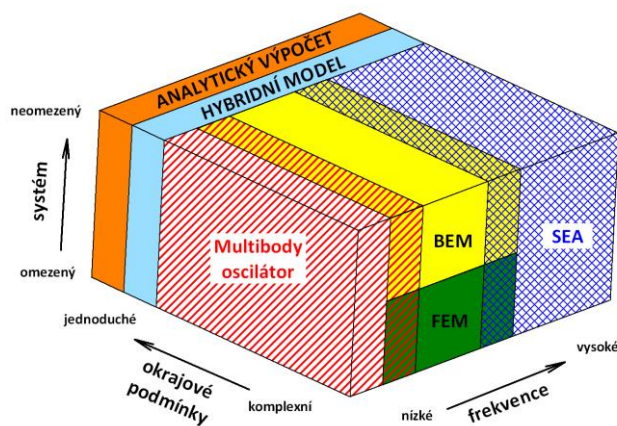
Typy modelů podle účelu použití:

- zjištění akustických parametrů vozidla (absolutní modely)
 - stanovení hladiny akustického tlaku nebo jiné veličiny v hodnoceném místě;
- optimalizace akustických parametrů vozidla (porovnávací modely)
 - porovnání dvou nebo více variant řešení (např. změna použitých materiálů), kdy cílem není stanovení absolutní hodnoty, ale vliv určité změny v modelu (obvykle není potřeba znát vstupní hodnoty pro zdroje) na výsledek.

Volba typu modelu závisí na požadované přesnosti výsledků, dostupných podkladech, zkušenostech a časových možnostech. Modely lze kombinovat, např. jeden model lze použít pro určení jak vnějšího, tak vnitřního hluku; také může sloužit jak pro stanovení absolutních hodnot, tak pro relativní porovnání různých variant.

Jednoduché modely řešené v běžných matematických řešičích (vytvořených např. pomocí MS Excel, Matlab apod.) může vytvořit osoba znalá akustiky – nevýhodou je riziko, že použité algoritmy mohou obsahovat chybu; proto je nutné každý krok výpočtu ověřit (verifikovat).

Pro tvorbu složitých modelů (FE, SEA modely), viz obr. 2, se využívají speciální SW produkty, které jsou obvykle verifikovány výrobcem SW (musí být doloženo). Vytvářet modely a interpretovat výsledky může pouze osoba nejen znalá akustiky, ale také znalá principů použitých výpočetních metod příslušného SW.



obr. 2 Použití různých výpočetních metod

3.4 Vstupní parametry pro výpočtový model

3.4.1 Akustický výkon vyzářený kolem a kolejnici pro určité rychlosti

Akustický výkon kola a kolejnice (hluk valení) je možné získat z výpočtu (SW produkty TWINS, StarDamp apod.) nebo vhodným využitím výsledků speciálních měření. Akustický výkon pro jiné rychlosti, než pro které byl proveden výpočet nebo měření, lze jednoduše přepočítat přes vzorec:

$$L_1 = L_2 - 30 \cdot \log(v_2 / v_1),$$

kde L_i je hladina akustického tlaku, v_i je příslušná rychlost.

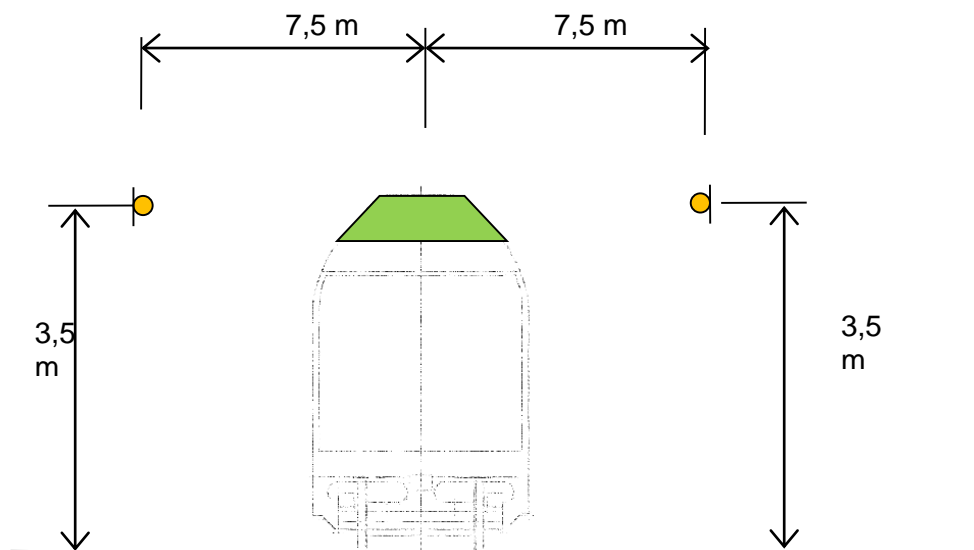
Vyzářený akustický výkon kola a kolejnice je silně závislý na vzájemné akustické drsnosti kola a kolejnice. Pokud se tedy akustický výkon získá výpočtem, je potřeba znát typickou akustickou drsnost trati, po které vozidlo bude provozováno. Akustickou drsnost kol i kolejníc lze získat měřením nebo z literatury.

3.4.2 Akustické výkony významných zdrojů hluku a vibrací

Akustické výkony agregátů mohou být v úvodní fázi návrhu buď známy od dodavatelů (v případě již existujících agregátů), nebo dodavatelům při vývoji zadány jako limitní hodnoty (včetně tonality).

U již existujících agregátů se doporučuje požadovat minimálně laboratorní měření, nejlépe provozní měření. Laboratorní měření vyzářovaného hluku jednotlivých typů agregátů je potřeba provádět a vyhodnocovat podle standardizovaných postupů. V případě provozního měření je potřeba, aby měření akustických výkonů u agregátů bylo provedeno za stejných nebo podobných podmínek, za jakých budou provozovány a zkušeny na navrhovaném vozidle.

Vzhledem k rozměrům a umístění některých agregátů (např. klimatizace) se doporučuje rozšířit standardizovaná laboratorní měření i o měření vyzářovaného hluku ve vzdálenostech ve smyslu normy ČSN EN ISO 3095, podle které se měří vnější hluk kolejových vozidel, viz obr. 3. Agregát je při tomto měření umístěn samostatně ve volném zvukovém prostoru na podporách.



obr. 3 Příklad způsobu měření agregátu umístěného na střeše vozidla ve smyslu normy ISO 3095. Slabě naznačen řez vozidlem.

Pokud nejsou známy absolutní hodnoty vyzářené energie, ale je znám odhad vyzářeného spektra, pak lze na základě výsledků měření na stávajících vozidlech nebo agregátech provést zesílení/zeslabení odhadovaného spektra na takovou úroveň, aby byl výsledný akustický tlak v referenčním bodě shodný. Toto lze s výhodou aplikovat u agregátů přímo vyzářujících hluk do okolí (volné zvukové pole mezi mikrofonom a agregátem), avšak tento způsob nelze obvykle použít u agregátů zabudovaných uvnitř vozidla (tj. tam, kde mezi mikrofonom a agregátem se nachází jiné součásti vozidla). Tento postup vyžaduje nadstandardní zkušenost osoby, která bude úpravy spekter provádět. Také je nutno zohlednit, že spektrum i celková hladina vyzářovaného hluku agregátu jsou závislé na aktuálním provozním režimu daného agregátu.

3.4.3 Geometrie vozidla

Z geometrických parametrů vozidla jsou důležité zejména velikosti, tvary a polohy jednotlivých ploch, které tvoří vnější či vnitřní tvar vozidla (např. okna, příčky, tvar čela vozidla,) a umístění zdrojů (např. agregátů) ve vozidle a případně tvar čela vozidla.

V případě výpočtů FE nebo SEA metodou lze geometrii (souřadnice bodů) odečíst z detailních CAD modelů vozidla. Přímý export bez zjednodušení CAD modelu je však obvykle vyloučen, výjimku tvoří snad jen objemové součásti u FE metody. V případě použití výpočetních metod využívajících FE, pro které jsou CAD modely obvykle zjednodušovány, lze geometrie importovat přímo z těchto upravených CAD modelů. U plošných prvků se předpokládá nulová tloušťka, parametry tloušťky jsou zahrnuty do fyzikálních vlastností subsystému. Zaoblené plochy (válcové, kulové apod.) lze segmentovat a nahradit vhodným počtem rovinných ploch.

V případě řešení vnitřního hluku je potřeba znát nejen rozměry ploch a jejich pohltivost (resp. z odrazivosti se dá odhadnout hodnota dozvuku). Pokud jsou ve vnitřním prostoru objemově výrazné části (sedačky, agregáty apod.), je vhodné nutně znát přibližný objem, který zabírají a ten zahrnout do modelu. Menší objemy lze zahrnout změnou parametru „objem“, střední objemy vytvořením náhradního tělesa uvnitř prostoru, velké objemy, které zabírají většinu prostoru, pak obnášejí prostor (dutinu) rozdělit na více menších částí (podle možnosti použitého SW).

V případě výpočtů FE nebo SEA metodou lze geometrii (souřadnice bodů) odečíst z detailních CAD modelů vozidla. Přímý export bez zjednodušení CAD modelu je však obvykle vyloučen. V případě použití výpočetních metod využívajících FE, pro které jsou CAD modely obvykle zjednodušovány, lze geometrie importovat přímo z těchto upravených CAD modelů.

3.4.4 Akustické či fyzikální vlastnosti použitých materiálů

Konstrukce vozidla a fyzikální vlastnosti jednotlivých částí ovlivňují šíření hluku. Vlastnosti stěn (bočnice, podlaha, stropy apod.) vozidla jsou podstatné nejen pro řešení hluku uvnitř vozidla, ale také pro řešení vnějšího hluku (např. problematika neprůzvučnosti kapot přístrojů u hnacích vozidel).

U použitých materiálů se jedná především o:

- měrnou hmotnost a tloušťku nebo plošnou hmotnost;
- neprůzvučnost, viz obr. 4;
- součinitel pohltivosti;
- modul pružnosti;
- materiálové tlumení;
- skladba materiálu v případě sendvičů.

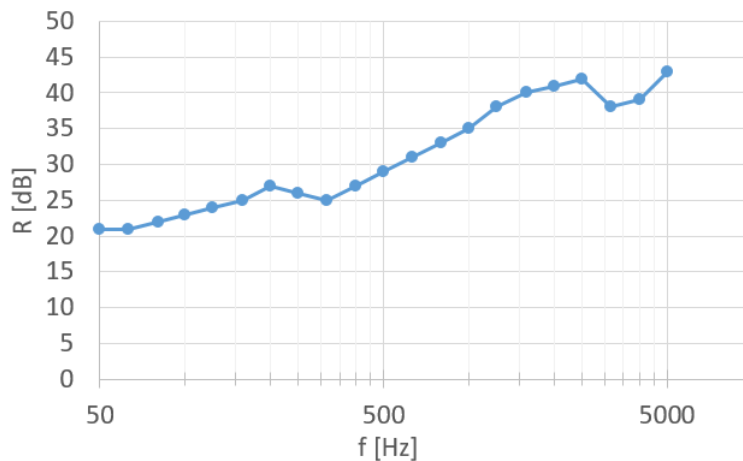
Tyto parametry je potřeba znát zejména pro všechny materiály použité na těchto částech vozidla:

- okna (včetně čelního);
- podlaha (zejména v blízkosti podvozků) včetně krytiny;
- měchy a podlaha mezivozových přechodů;
- vnější dveře (zejména v případě tramvajů);
- bočnice, střecha, čelnice (včetně izolace a obložení);
- vnitřní příčky a obložení;
- vybavení interiéru (sedačky, police, stolky...).

Pozornost je potřeba věnovat:

- větracím otvorům (ve dveřích, u strojoven, ve střeše apod.);
- netěsnostem (dveře, mezivozové přechody apod.);
- dutinám (dvojitě stěny, rozvaděče, prostor nad stropem);
- dalším konstrukčním prvkům, které mohou mít vliv na šíření hluku.

Větrací otvory a netěsnosti významně zvyšují hladinu vnitřního hluku.



obr. 4 Ukázka neprůzvučnosti dvojitého okna.

3.5 Tvorba modelů

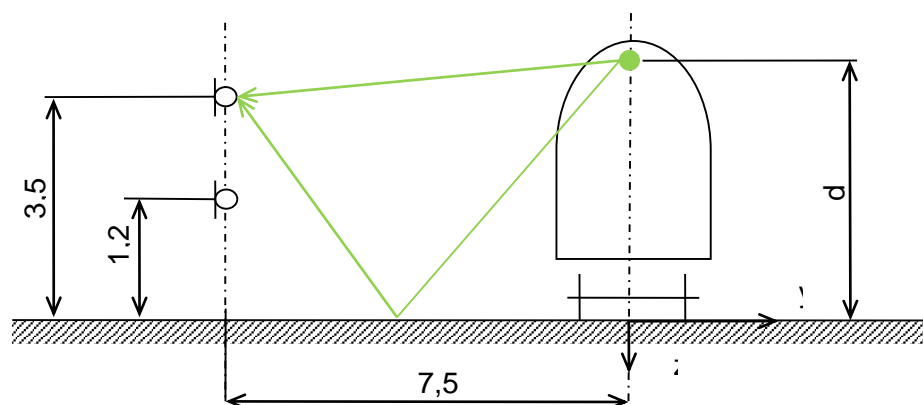
3.5.1 Zjednodušený analytický výpočet vnějšího hluku

Akustické zdroje vyzařující hluk jsou považovány za monopóly (pulzující koule vyzařující akustickou energii rovnoměrně do všech směrů) s konstantním akustickým výkonem.

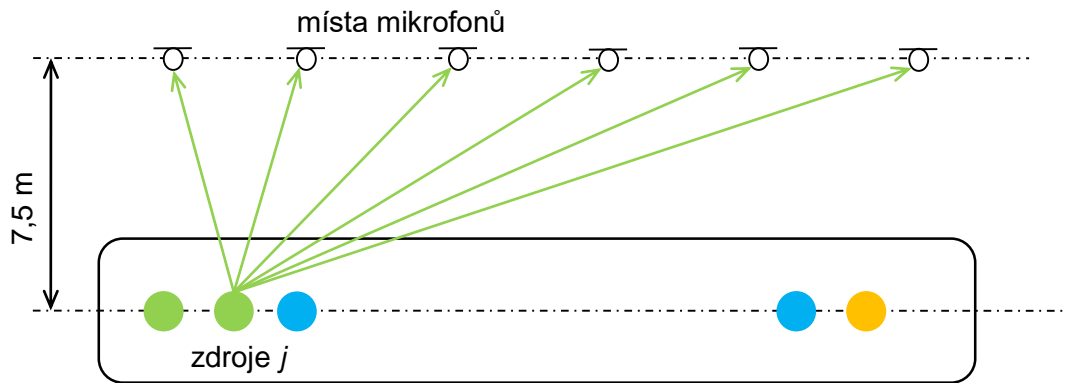
Uvažované okolí:

- okolní vzduch:
 - teplota: -10 °C a 20 °C;
 - útlum: zanedbaný;
- okolí soupravy: betonový povrch na úrovni temene kolejnice (nejhorší možný případ, předpokládaný součinitel odrazivosti $R = 1$ pro celé uvažované frekvenční pásmo), jinak se předpokládají podmínky volného zvukového pole.

Umístění „mikrofonů“ vyplývá z normy ČSN EN ISO 3095, viz obr. 5 a obr. 6. „Mikrofony“ jsou umístěny podél celé uvažované soupravy 7,5 m od osy koleje ve dvou výškách nad temenem kolejnice: 1,2 m a 3,5 m.



obr. 5 umístění mikrofonů, zeleně zobrazeny cesty šíření akustické energie od zdroje k mikrofonu



obr. 6 místa mikrofonů i a zdrojů j

Akustický tlak v uvažovaném místě je dán akustickou energií. Akustická energie zdroje se k mikrofonu šíří přímou a odraženou cestou. To je ve výpočtu zohledněno „ekvivalentním akustickým výkonem“ následujícím postupem.

Ze známého akustického výkonu je vypočítána intenzita zdroje Q_{rms} [rad.m³.s⁻¹]:

$$Q_{rms}^2 = \Pi \cdot \frac{4\pi(1+k^2a^2)}{k^2\rho_0c},$$

kde Π ...akustický výkon [W], ρ_0 ...hustota vzduchu [kg.m⁻³], c ...rychlost šíření zvuku ve vzduchu [m.s⁻¹], k ...vlnové číslo [m⁻¹], a ...poloměr monopólu [m].

„Ekvivalentní akustický výkon“, zohledňující odraz zvuku od roviny se součinitelem odrazu $R = 1$ (všechna energie je odražena, nedochází k fázovému posunu mezi dopadající a odraženou vlnou):

$$\Pi_2 = \frac{Q_{rms}^2 k^2 \rho_0 c}{4\pi(1+k^2a^2)} \cdot \left\{ 1 + \frac{\sin(2kd)}{2kd} \right\},$$

kde d ...kolmá vzdálenost zdroje od roviny odrazu [m] (obr. 5).

Akustická energie v jednom třetinooktávovém pásmu f v místě mikrofonu i od zdroje j je dána kvadrátem akustického tlaku (obr. 6):

$$p_{ij}^2 = \frac{\Pi_{2,if} \rho_0 c}{4\pi r_{ij}^2},$$

kde r_{ij} ...vzdálenost mikrofonu i a zdroje j .

Celkový akustický tlak ve všech uvažovaných frekvenčních pásmech v místě mikrofonu i je součtem dílčích kvadrátů akustického tlaku:

$$p_i^2 = \sum_f \sum_j \frac{\Pi_{2,if} \rho_0 c}{4\pi r_{ij}^2}.$$

Hladina akustického tlaku (SPL) v místě i je definována následujícím vztahem:

$$SPL_i = 10 \cdot \log \left(\frac{p_i^2}{p_{ref}^2} \right),$$

kde p_{ref} ...referenční akustický tlak (2.10⁻⁵ Pa).

3.5.2 Výpočet pomocí numerických metod

Při výpočtu je potřeba zvolit vhodnou (numerickou) metodu výpočtu podle toho, co vše má model zohledňovat, v jakém frekvenčním rozsahu a jaké struktury obsahuje, viz obr. 2. S výhodou lze také použít hybridní modely. Volba metody:

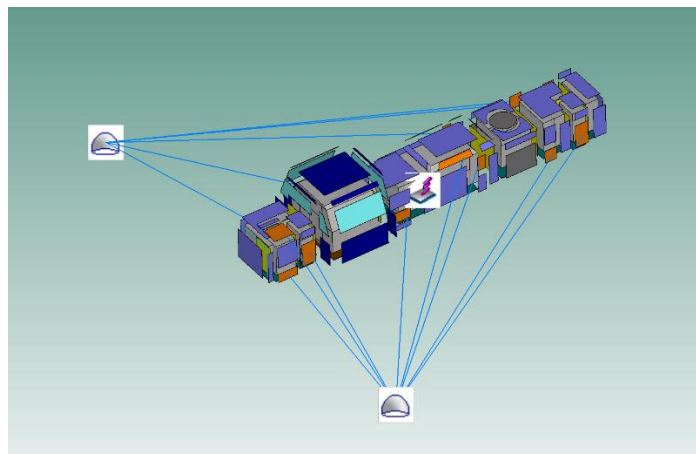
- 1) nízké frekvence: z MB simulace lze získat silové buzení modelu,
- 2) nižší frekvence: FEM nebo BEM metody lze použít pro masivnější a objemné struktury (hlavní rámy, rámy podvozků apod.)
- 3) střední a vysoké frekvence: SEA metoda je vhodná pro skříň vozidel a interiéry (plošné nebo lineární prvky).

Maximální frekvenční rozsah MB simulace je omezen velikostí integračního kroku (menší krok = vyšší frekvence), u FEM metody je nutné zvolit velikost konečných prvků s ohledem na vlnovou délku (menší prvek = vyšší frekvence). Tyto metody jsou tedy omezené maximální frekvencí. Metoda SEA je naopak omezena minimální frekvencí, kdy je potřeba splnit min. počet módů na frekvenční pásmo, a to minimální počet 3 (lépe 10). Hraníční hodnoty frekvencí pro volbu metody nelze generalizovat na všechny případy, musí se posoudit pro konkrétní model. Řádově lze pro MB simulace předpokládat maximální frekvenci v desítkách Hz, pro FEM ve stovkách Hz a pro SEA ve stovkách Hz i frekvencích vyšších. S výhodou lze použít hybridní modely, aby bylo pokryto požadované frekvenční pásmo.

Samotná tvorba modelu je také závislá na použitém SW (jeho možnostech a funkcích). Některé SW mají také doplňkové moduly specializované na oblast kolejových vozidel (např. modul valení kola po kolejnici). V následující kapitole jsou popsány pouze základní principy tvorby modelů pro často používanou výpočetní metodu SEA.

3.5.2.1 Geometrie a materiálové parametry

Reálné vozidlo (obvykle popsáno CAD modelem) se rozdělí na jednotlivé subsystemy SEA (beam – prut, plate – deska, cavity – dutina, atd.), viz obr. 7. Je potřeba dodržet rozměry jednotlivých prvků, protože mají vliv na frekvenční odezvu. Geometrický model (resp. jeho interpretace) nezohledňuje tloušťku subsystemu v geometrii (zejména u plošných subsystemů) – zadává se střednice reálného dílu a tloušťka je zohledněna až při zadávání parametrů subsystemu. Parametry je potřeba zadat dle požadavků kapitoly 3.4.



obr. 7 Příklad definice subsystemů skříň kolejového vozidla – stacionární hluk

Vnitřní objemy vozidla (interiér, strojovna, kabina, nákladní prostor atd.) je potřeba reprezentovat subsystemem dutina (cavity). Tomuto subsystemu je potřeba přiřadit parametry vnitřního útlumu (Damping Loss Factor nebo Average Absorption). Tyto parametry jsou dány použitými materiály (jejich absorpcí) uvnitř prostoru (zejména prostor interiéru) a lze je stanovit také analyticky, případně experimentálně z doby dozvuku. Pokud jsou známy velikosti jednotlivých ploch a činitele pohltivosti materiálů u těchto ploch, lze vypočítat celkový činitel pohltivosti jako:

$$\alpha \cdot S = \sum_i \alpha_i \cdot S_i$$

Pokud se nepředpokládá volné zvukové pole kolem vozidla, je potřeba tuto skutečnost zohlednit také v modelu. Metodiky/normy pro měření vnějšího hluku (např. ISO 3095) předpokládají volné zvukové

pole, avšak jsou případy, kdy toho nelze dosáhnout (např. vozidla metra) nebo je cílem simulovat situaci již provedeného experimentu, který slouží k validaci modelu. Zejména odrazivost/pohltivost země, resp. šterkového lože či pevné jízdní dráhy může zásadně ovlivnit výsledek simulace, a to nejen v případě vnějšího, ale také vnitřního hluku. Pokud se tento vliv zahrne, je potřeba modelovat také okolí vozidla, a to opět pomocí subsystému dutina (cavity) reprezentujícího prostor nejbližšího okolí vozidla, případně také subsystémů deska (plate) reprezentujícího zem, resp. kolej.

Po vytvoření geometrického modelu je potřeba zadat vazby mezi subsystémy (Junctions), které zabezpečují tok energie v modelu. Zde lze definovat případné otvory (plošná vazba) nebo izolace mezi subsystémy (tlumení v místě upevnění). Vazby je potřeba zadat také u hybridních modelů mezi prvky FEM a SEA.

3.5.2.2 Buzení

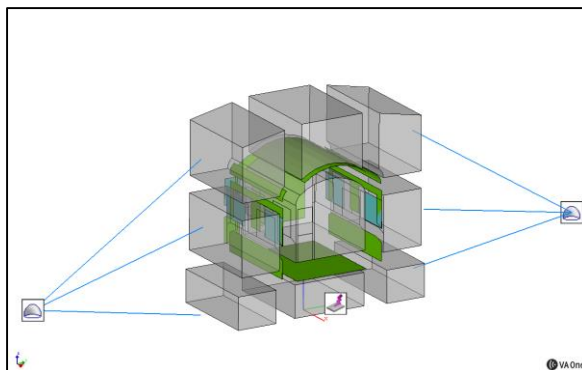
Pokud se jedná o porovnávací modely (dle kapitoly 3.3) pak lze použít jednotkové buzení, v případě modelů absolutních, je nutné dbát na správné zadání vstupů, resp. jejich verifikaci, protože zásadně ovlivňují výstup. Podle typu vozidla a režimu, který se simuluje, je potřeba zadat buzení od:

- valení kola po kolejnici,
- pohonu a pomocných agregátů,
- proudění vzduchu v okolí skříně a to dle režimu, ve kterém se vozidlo simuluje.

Typickým příkladem je rozdíl mezi o stacionární a jízdní zkouškou/simulací.

Valení: Vstupy lze získat experimentálním měřením akustického tlaku v pojezdu vozidla (pro vozidla shodné či obdobné konstrukce pojezdu a spodku vozu), z programu TWINS (simulace hluku vyzařovaného při valení kola po kolejnici) nebo použít SW modul valení kola po kolejnici, pokud to zvolený SW nabízí, viz obr. 8. Vždy je nutné porovnání s experimentem viz kap. 3.4.1.

Agregáty: Jako vstup lze použít informace od výrobce nebo provést měření laboratorní nebo provozní. Zde je potřeba mít na paměti, že výsledky jsou zásadně ovlivněny umístěním stroje (tedy také upevněním) na vozidle. Tedy výsledky laboratorního měření nemusí být vždy objektivní. Energie se přenáší jak strukturou, tak vzduchem. Vyzařovaný výkon také nemusí být do všech směrů stejný. Pro modely SEA lze použít spektrum naměřené nebo udané výrobcem s tím, že výkon spektra lze nastavit tak, aby byla v referenčním bodě (bodech) dosažena požadovaná hladina akustického tlaku.



obr. 8 Příklad umístění mikrofonů (SIF) a zdroje od valení kola po kolejnici.

3.6 Řešení modelů

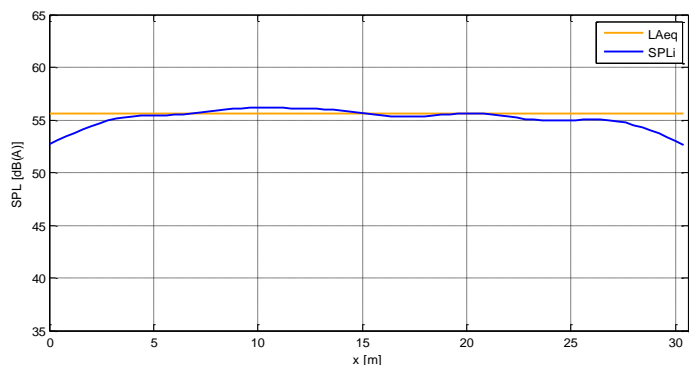
Řešiče jsou nutné zejména při použití některé z výpočetních metod jako je metoda konečných prvků apod. Volba řešiče je nad rámec této metodiky.

3.7 Výsledky modelů

Přesnost výsledků modelů závisí na přesnosti vstupních parametrů a složitosti modelu. Podle toho je také potřeba přistupovat k interpretaci výsledků a uvažovat jejich určitou nejistotu.

U složitých modelů je možné analyzovat cesty šíření akustické energie a v případě potřeby se zaměřit na slabá místa přenosu a navrhnout úpravu, tedy konstrukce.

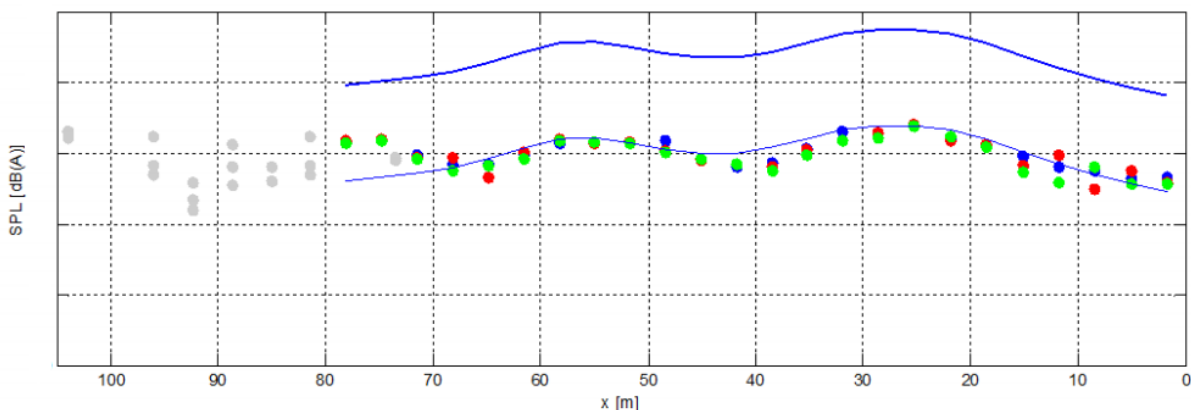
Na obr. 9 je ukázka výsledku zjednodušeného analytického výpočtu průběhu vnější hladiny akustického tlaku podél vlakové soupravy.



obr. 9 Ukázka průběhu hladiny akustického tlaku a ekvivalentní hodnota hladiny akustického tlaku

3.8 Ověření výsledků modelu měření

Důrazně se doporučuje ověření (verifikace) modelu měření, v případě možnosti i nad rámec norem, viz obr. 10. Důvodem pro to je potřeba, aby se zhotovený model mohl v budoucnu bez výraznějších omezení použít pro vytváření dalších modelů. Toto ověření slouží mimo jiné i pro zjištění, zda samotný model vozidla je dostatečně přesný, tedy např. zda vytvořený jednoduchý model je vyhovující nebo je nutné použít složitější a přesnější model vozidla.



obr. 10 Porovnání naměřených hodnot a výpočtu

4 Novost postupů a zdůvodnění metodiky

Předložená metodika popisuje přístup k tvorbě akustického nebo vibro-akustického modelu vozidla, který slouží pro predikci hluku a pro případné návrhy změn za účelem zlepšení akustických vlastností vozidla.

Tvorba akustického modelu vozidla nebyla doposud v používaných legislativních dokumentech popsána. Navíc, v České republice se do nedávné doby hluk kolejových vozidel řešil okrajově a nesystematicky.

Tato metodika dává návod, jak systematicky přistoupit k tvorbě modelů a jejich ověřování a jak věrohodně predikovat akustické vlastnosti nově vyvíjeného vozidla.

5 Popis uplatnění metodiky

Tato metodika se uplatní při návrhu vozidla při řešení jeho akustických vlastností a jejich porovnání s požadavky.

Je určena pro výrobce kolejových vozidel, zvláště pak pro výrobce osobních kolejových vozidel z důvodu velkého množství akustických zdrojů hluku a různorodosti použitých materiálů. Metodiku využijí hlavně vývojové a výzkumné organizace, které se nejčastěji na základě zadání výrobců zabývají vývojem nových vozidel nebo optimalizací stávajících vozidel.

6 Ekonomické aspekty

Použití metodiky umožňuje odhalení kritických míst ještě před zahájením výroby vozidla, případně ještě před výběrem vhodných agregátů a schválením jejich akustických parametrů. K úpravám konstrukce vozidla či agregátů dojde již ve fázi návrhu, čímž se dosáhne úspory v řádech statisíců až milionů korun podle rozsahu provedených změn.

Systematické používání metodiky povede ke zpřesňování výpočetních modelů, snížení rozsahu úprav na vozidlech a agregátech, a tím ke zvýšení ekonomických přínosů. Vzroste též povědomí o akustických vlastnostech vozidel a jejich souvislostech, což přispěje k postupnému snižování hluku, volbě vhodných materiálů a zvyšování konkurenceschopnosti výrobce.

Při použití složitějších výpočetních modelů je potřeba počítat s prvotní investicí na nákup specializovaného SW v řádech statisíců až milionu korun. Návrhová investice může být dosažena již u prvního rozsáhlejšího projektu. Jednoduché výpočetní modely nevyžadují žádné významnější investice, protože jsou používány standardní a běžně dostupné softwarové prostředky.

7 Seznam použité související literatury

ČSN EN ISO 3095. *Železniční aplikace - Měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly*. 2014.

ČSN EN ISO 3381. *Železniční aplikace – Akustika – Měření hluku uvnitř kolejových vozidel*. 2011.

THOMPSON, D. J., Chris JONES a Pierre-Etienne GAUTIER. *Railway noise and vibration: mechanisms, modelling and means of control*. Boston: Elsevier, c2009. ISBN 978-0-08-045147-3.

NORTON, M. P., and D. G. KARZUB. *Fundamentals of Noise and Vibration Analysis for Engineers*. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003.

NOVÝ, Richard. *Hluk a otřesy*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00101-6.

8 Seznam publikací, které předcházely metodice

HÁBA, A.; MUSIL, M.; VÁGNER, J.: METODIKA MĚŘENÍ VNĚJŠÍHO HLUKU JEDNOPODLAŽNÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY „REGIOPANTER“ V ÚSEKU PARDUBICE –HRADEC KRÁLOVÉ. Technická zpráva CKDV-WP6-2013-AH-02, Univerzita Pardubice, 2013.

HÁBA, A.; MUSIL, M.; VÁGNER, J.; RICHTER, M.: MĚŘENÍ VNĚJŠÍHO HLUKU JEDNOPODLAŽNÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY „REGIOPANTER“ V ÚSEKU PARDUBICE – HRADEC KRÁLOVÉ. Technická zpráva CKDV-WP6-2013-AH-03, Univerzita Pardubice, 2013.

HÁBA, A.; VÁGNER, J.; MUSIL, M.; RICHTER, M.; PHAMO VÁ, L.; KŘEPELA, J.: SPECIFIKACE POŽADAVKŮ NA VIBROAKUSTICKÁ MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY "REGIOPANTER" NA ŽZO V CERHENICÍCH. Tech-nická zpráva CKDV-WP6-2013-AH-04, Univerzita Pardubice, 2013.

VÁGNER, J.; HÁBA, A.: ZPRACOVÁNÍ VYBRANÝCH ZÁZNAMŮ Z VIBROAKUSTICKÝCH MĚŘENÍ ELEKTRICKÉ JEDNOTKY "REGIOPANTER"NA VŽZO V CERHENICÍCH Technická zpráva CKDV-WP6-2014-AH-01, Univerzita Pardubice, 2014.

HÁBA, A.; PHAMO VÁ, L.; KŘEPELA, J.: ANALÝZA HLUKU VYZAŘOVANÉHO KOMPONENTY KOLEJOVÉHO VOZIDLA. Technická zpráva CKDV-WP6-2014-AH-02, Univerzita Pardubice, 2014.

HÁBA, A.: ROZBOR AKUSTICKÝCH VLASTNOSTÍ HLUKOVĚ RELEVANTNÍCH KOMPONENT KOLEJOVÉHO VOZIDLA. Technická zpráva CKDV-WP6-2015-AH-02, Univerzita Pardubice, 2015.

PHAMO VÁ L., RICHTER M.: CKDV – WP6: HLUK NÁKLADNÍHO VOZU. Technická zpráva 16-C-085, VÚKV, 2016.

PHAMO VÁ L., RICHTER M.: CKDV – WP6: JPJ: DRSNOST KOL A KOLEJNIC. Technická zpráva 16-C-080, VÚKV, 2016.

HÁBA, A., PHAMO VÁ, L.; KŘEPELA, J., ADÁMEK, J.; VÁGNER, J.: ANALÝZA HLUKU VYZAŘOVANÉHO KOLEJOVÝM VOZIDLEM. Technická zpráva CKDV-WP6-2018-AH-01, Univerzita Pardubice, 2018.

PHAMO VÁ L., RICHTER M.: AKUSTICKÉ MĚŘENÍ TRAMVAJÍ 15T S RŮZNOU ÚPRAVOU BRZDOVÝCH JEDNOTEK. Technická zpráva 18-C-037, VÚKV, 2018.